



## Modulus® Empfehlungen für den Konstrukteur



*real*  
It's about time.

<b>Thema</b>	<b>Teil/Seite</b>
<b>Willkommen!</b> .....	<b>I</b>
Zum Geleit .....	I-2
Die Polymere von AlliedSignal .....	I-2
Recycling .....	I-2
Konstruktionsunterstützung .....	I-3
CAD/CAE-Service .....	I-3
Sicherheit .....	I-3
<b>Konstruktionsgrundlagen für Spritzgußteile.</b> .....	<b>II</b>
Werkzeugtrennflächen .....	II-2
Entformungsschrägen .....	II-3
Wanddicke .....	II-3
Abrundungen und Radien .....	II-3
Nocken .....	II-4
Rippen .....	II-4
Öffnungen .....	II-5
Schwindung .....	II-5
Anguß .....	II-5
Werkzeugentlüftung .....	II-6
Fließnähte .....	II-6
<b>Konstruktionstechnik</b> .....	<b>III</b>
Spannung .....	III-2
Spannung/Dehnung .....	III-2
Normalspannung .....	III-3
Scherspannung .....	III-3
Torsionsspannung .....	III-4
Biegespannung .....	III-5
Eigenschaften unterschiedlicher Querschnitte .....	III-6
Definition der Variablen .....	III-6
Querschnitte .....	III-6
Formeln für die Durchbiegung gängiger Kragarme/Träger .....	III-7
Formeln für Deformation und Spannung unter Torsion .....	III-8
I-, T- und L-Profile .....	III-9
Formeln für ebene Flächen .....	III-10
Druckgefäße .....	III-11
Wärmeausdehnung und Spannung .....	III-12
Schlagspannung .....	III-13
Spannungskonzentration .....	III-14
Rippenauslegung .....	III-15
Steifigkeitsausgleich .....	III-18
<b>Konstruktionsbeispiele</b> .....	<b>IV</b>
Träger für Geschwindigkeitsregler .....	IV-2
Abdeckung .....	IV-4
<b>Montage- und Fügeverfahren.</b> .....	<b>V</b>
Schnappverbindungen .....	V-2
Konstruktionskriterien für Schnappverbindungen .....	V-2
Rechteckige oder runde Schnapphaken .....	V-2
Gerade oder abgeschrägte Schnapphaken .....	V-2
Kurze Schnapphaken .....	V-3
Neue Formeln für Schnapphaken .....	V-4
Konstruktionsbeispiel .....	V-4
Preßpassungen .....	V-5
Klebeverbindungen .....	V-6
Schrauben, Muttern und Gewinde .....	V-8
Eingeformte Gewinde .....	V-9

<b>Thema</b>	<b>Teil/Seite</b>
Schneidschrauben . . . . .	V-10
Einsatzmethoden . . . . .	V-11
Ultraschallschweißen . . . . .	V-12
Scherschweißverbindungen . . . . .	V-12
Ultraschallkonzentratoren . . . . .	V-13
Vibrationsschweißen . . . . .	V-14
Sonstige Fügeverfahren . . . . .	V-15
Thermoplastisches Vernieten . . . . .	V-15
Rotationsschweißen . . . . .	V-15
Induktionsschweißen . . . . .	V-16
<b>Kunststoffe . . . . .</b>	<b>VI</b>
Klassifizierung . . . . .	VI-2
Verteilung der Molmasse . . . . .	VI-4
Physikalische Eigenschaften im Vergleich zu Metallen . . . . .	VI-5
Dichte . . . . .	VI-5
Wärmeausdehnung . . . . .	VI-5
Wärmeleitfähigkeit . . . . .	VI-6
<b>Physikalische Eigenschaften . . . . .</b>	<b>VII</b>
Mechanische Eigenschaften . . . . .	VII-2
Kurzzeiteigenschaften . . . . .	VII-2
Kerben . . . . .	VII-2
Belastungsgeschwindigkeit . . . . .	VII-2
Temperaturbeständigkeit . . . . .	VII-4
Wärmealterung . . . . .	VII-4
Feuchtigkeitsaufnahme . . . . .	VII-5
Berücksichtigung der Feuchtigkeitsaufnahme . . . . .	VII-6
Feuchtebedingte Eigenschaftsänderungen . . . . .	VII-6
Feuchtebedingte Ausdehnung . . . . .	VII-6
Beschleunigte Feuchtkonditionierung . . . . .	VII-6
Prozeßbedingte Eigenschaftsänderungen . . . . .	VII-7
Additive (Farbpigmente) . . . . .	VII-8
UV-Einstrahlung . . . . .	VII-8
Chemikalien . . . . .	VII-8
Langzeiteigenschaften - Kriechen, Spannungsrelaxation und Nutzdauer . . . . .	VII-9
Reibungskoeffizient . . . . .	VII-11
<b>Gasinjektionsanwendungen . . . . .</b>	<b>VIII</b>
Hohlformteile . . . . .	VIII-2
Teilfüllung . . . . .	VIII-3
Schwindungsausgleich . . . . .	VIII-3
<b>Oberflächenveredelung &amp; Nachbearbeitung . . . . .</b>	<b>IX</b>
Galvanisieren . . . . .	IX-2
Lackieren . . . . .	IX-2
Bedrucken/Heißprägen . . . . .	IX-2
Schneiden/Sägen . . . . .	IX-3
Oberflächendesign . . . . .	IX-3
<b>Anhang A: Physikalische Eigenschaften &amp; Terminologie . . . . .</b>	<b>A</b>
Anisotropie . . . . .	A-2
Dichte . . . . .	A-2
Duktilität . . . . .	A-2
Elastizität . . . . .	A-2

<b>Thema</b>	<b>Teil/Seite</b>
Gleitfähigkeit . . . . .	A-2
Härte . . . . .	A-2
Isotropie . . . . .	A-2
Kerbempfindlichkeit . . . . .	A-2
Plastizität . . . . .	A-3
Reibung und Verschleiß . . . . .	A-3
Spezifisches Gewicht (relative Dichte) . . . . .	A-3
Sprödigkeit . . . . .	A-3
Verarbeitungsschwindung . . . . .	A-3
Verzug . . . . .	A-3
Wasseraufnahme . . . . .	A-3
Zähigkeit . . . . .	A-3
<b>Anhang B: Internationale Prüfnormen . . . . .</b>	<b>B</b>
<b>Anhang C: Literatur . . . . .</b>	<b>C</b>

*Alle Aussagen und Informationen in dieser Veröffentlichung ergeben in gutem Glauben und nach bestem Wissen, sind jedoch in keiner Weise als ausdrückliche oder implizierte Garantie zu verstehen. Risiko und Haftung für Folgen aus dem Einsatz hierin beschriebener Produkte, Verfahren oder Maßnahmen liegen beim Anwender. Angaben oder Empfehlungen in dieser Druckschrift zum möglichen Einsatz von Produkten oder Verfahren entbinden den Anwender nicht davon, bestehende Patent- oder Schutzrechte einzubalten. Der Anwender sollte nicht davon ausgehen, daß alle Toxizitätsdaten und Sicherheitsmaßnahmen aufgeführt bzw. keine weiteren Vorkehrungen erforderlich sind. Weitere Informationen bezüglich der sicheren Handhabung von Kunststoffen sind die einschlägigen Werkstoff-Sicherheitsdaten zu entnehmen.*

*Capron®, Petra®, Dimension® und Nypel® sind eingetragene Warenzeichen von AlliedSignal Inc.*

*Verkaufsbüros:  
Hinckley (Großbritannien),  
Raunheim (Deutschland),  
Le Perreux-sur-Marne (Frankreich),  
Viggiù (Italien)*

*Technische Zentren:  
Morristown, NJ (U.S.A.),  
Detroit, MI (U.S.A.),  
Heverlee (Belgien),  
Hong Kong, Seoul (Korea)*

*Kundenberatungszentren:*

*AlliedSignal Polymers GmbH  
Breitscheidstraße 105  
D-07407 Rudolstadt  
Deutschland  
Tel: +49 3672 52461  
Kostenfrei Tel: 0130 124 106  
Fax: +49 3672 52957*

*AlliedSignal Europe N.V.  
Engineering Plastics  
Grauwmeer 1  
Haasrode Research Park  
B-3001 Heverlee (Leuven)  
Belgien  
Tel: +32 1639 1267  
Fax: +32 1640 0674*

*AlliedSignal Inc.  
Engineering Plastics  
101 Columbia Road  
Morristown, New Jersey 07962  
U.S.A.  
Tel: +1 602 496 1000  
Fax: +1 804 530 6670*

*Internet: <http://www.asresin.com>*

## Willkommen!

Zum Geleit . . . . .	I-2
Die Polymere von AlliedSignal. . . . .	I-2
Recycling . . . . .	I-2
Konstruktionsunterstützung . . . . .	I-3
CAD/CAE-Service . . . . .	I-3
Sicherheit . . . . .	I-3

## Teil I: Willkommen!

**Dieses Handbuch bietet Ihnen als Teil unserer kundenorientierten Geschäftsphilosophie einen Überblick über das Konstruieren mit technischen Kunststoffen von AlliedSignal. Darüber hinaus unterstützen wir unsere Kunden mit einem umfassenden Paket konstruktions- und entwicklungstechnischer Serviceleistungen.**

### **Zum Geleit**

Kernelemente einer vorausschauenden Konstruktionsstrategie sind:

- a) Sicherheit und Produktleistung
- b) Optimale Materialwahl und Fertigungstechnik zur Sicherung der spezifizierten Konstruktionsziele
- c) Maximale Funktionalität
- d) Wirtschaftlicher und umweltverträglicher Materialeinsatz

Die Empfehlungen und Beispiele in diesem Handbuch informieren Sie über grundlegende Konstruktionskriterien für typische Anwendungsfälle. Zur vertieften Diskussion markt- und produktspezifischer Anforderungen wird in den kommenden Monaten eine Reihe weiterführender Broschüren erscheinen. Ihr Konstruktionserfolg ist unser Hauptanliegen.

### **Die Polymere von AlliedSignal**

Die technischen Kunststoffe von AlliedSignal umfassen Polyamide, thermoplastische Polyester und Polymerblends. Die Konstruktionsempfehlungen in diesem Handbuch basieren auf den verfügbaren Daten dieser Kunststoffe. Da jedoch jede Polymerfamilie in mehr oder weniger zahlreiche Typen mit teilweise sehr unterschiedlichen Eigenschaften verzweigt, ist sollten der konkreten Materialwahl und Konstruktion nur die Produktdaten der jeweils in Frage kommenden Typen zugrunde gelegt werden. Verlassen Sie sich darüber hinaus nie auf Eigenschaftswerte in Datenblättern, da diese im allgemeinen nur Labor- und Richtwerte darstellen. Zuverlässige Aussagen über das tatsächliche Verhalten der Materialien unter Einsatzbedingungen erfordern praxisnahe Prüfungen.

AlliedSignal bietet hochwertige technischer Polymere in vier Hauptproduktlinien:

- Capron® PA 6 und PA 6.6
- Dimension® PPE/PA 6-Blends
- Petra® PET-Recyclate (aus Verbraucherquellen)
- Nypel® PA 6-Recyclate (aus Industriequellen)

Diese Kunststoffe sind in homopolymeren sowie copolymeren und verstärkten Qualitäten lieferbar. Details finden Sie in unserer Produktliteratur, oder fragen Sie unsere Mitarbeiter in Vertrieb und Anwendungstechnik. *Darüber hinaus erreichen Sie uns unter der Adresse <http://www.asresin.com> on-line im Internet.*

### **Recycling**

Recycling gilt heute als selbstverständlicher Bestandteil einer umweltverträglichen und rohstoffsparenden Materialwirtschaft und macht sich in den meisten Fällen durch reduzierte Produktkosten bezahlt. Kunststoffrecyclate sind unter Berücksichtigung der geforderten Produktleistung oft eine wirtschaftliche Alternative.

Beim Einsatz von Recyclaten sollte außerdem folgendes bedacht werden:

- Verwenden Sie für verschweißte oder verklebte Teile möglichst dasselbe oder ein weitgehend identisches, kompatibles Polymer. Unterschiedliche Polymere sollten nur für Anwendungen eingesetzt werden, die mechanisch miteinander verbunden werden und sich wieder demontieren lassen.
- Die Farbauswahl ist in der Regel begrenzt.
- Aus Umweltgründen sind in Europa und weltweit zunehmend cadmiumfreie Farben gefragt. Dies hat die Farbauswahl zunächst weiter eingeschränkt. Es wird jedoch verstärkt daran gearbeitet, dieses Problem zu lösen.

AlliedSignal hat zwei Produktlinien, die zu den Kunststoffrecyclaten zählen: Petra®, das zu 100% aus recycelten PET-Getränkeflaschen besteht; und Nypel®, ein PA6-Recyclat aus Produktionsquellen.

Die Polymere von AlliedSignal sind in einer breiten Palette cadmiumfreier Farbeinstellungen lieferbar. Das gilt auch für die Familie der PaintFree™ Petra® Produkte, die den Zeit- und Kostenaufwand für das Lackieren sparen.

### **Konstruktionsunterstützung**

Konstruktionstechnische Unterstützung bieten die Modulus® Designteams von AlliedSignal Plastics in Morristown (New Jersey, USA), Southfield (Michigan, USA) und Heverlee (Belgien). Das Spektrum der Dienstleistungen umfaßt:

Fertigteilprüfungen  
Spannungsanalysen  
Finite-Elemente-Analysen  
Konstruktionsseminare  
Prototypenbau  
Prototypentests  
Stereolithografie  
Normprüfungen  
Designkonzepte  
Schnappverbindungsauslegung  
Produktwertanalysen  
Montagetechniken  
Fließ-/Verzugstudien  
Kostenanalysen  
Computergestütztes Design  
Gasinjektionstechnologie  
Polymeranalysen  
Unterstützen bei der Werkzeugkonstruktion  
Toleranzstudien  
Fehleranalysen

### **CAD/CAE-Service**

Eine der vielen Stärken von AlliedSignals Modulus® Designservice sind unsere CAD/CAE-Kapazitäten. Wir beraten Sie nicht nur in Konstruktionsfragen, sondern unterstützen Sie auch mit modernster Entwicklungssoftware für Finite-Elemente-Analysen (FEA), Werkzeugfüllstudien etc.

Darüber hinaus haben wir erfahrene Spezialisten für Prototypenbau und Stereolithografie. Das Modulus® Servicepaket wird laufend erweitert und aktualisiert, um Ihnen zu helfen, die technologischen Herausforderungen am Markt mit neuen und innovativen Produkten zu meistern.

### **Sicherheit**

Beim Konstruieren sollte ein Sicherheitsfaktor berücksichtigt werden, um ernsthaften Ausfällen oder vorzeitigem Versagen der Formteile vorzubeugen. Der Faktor hängt von zahlreichen Erwägungen ab, wie Temperatur, Schmelzhomogenität, unvorhersehbarer Überlastung und anderen Unbekannten.

Mit der Größe des Sicherheitsfaktors erhöht sich zwar die Nutzdauer der Teile unter Belastung. Um jedoch zu verhindern, daß die Anwendung unnötig überdimensioniert wird, sollte die angenommene Belastung möglichst genau eingegrenzt werden. Die effektive Größe des Faktors richtet sich dann danach, wie kritisch die spezifische Belastbarkeit für die sichere Funktion der Teile ist. Details zu diesem Thema finden Sie in der einschlägigen Konstruktionsliteratur.

Polyamid weist in diesem Zusammenhang einige Besonderheiten auf. So beeinflußt erhöhte Umgebungsfeuchtigkeit seine physikalischen Eigenschaften: Festigkeit, Steifigkeit, Oberflächenhärte und Sprödigkeit nehmen ab, während Schlagzähigkeit, Volumen und Kriechneigung zunehmen. Diese und andere Toleranzbreiten müssen beim Konstruieren mit Hilfe des Sicherheitsfaktors berücksichtigt werden. Aus diesem Grund sind auch Eigenschaftswerte aus Datenblättern, wie sie von vielen Herstellern veröffentlicht werden, für konkrete Berechnungen ungeeignet und nur als punktuelle Richtwerte zu verstehen.

**Hinweis: Verarbeitungsempfehlungen finden Sie in einer separaten Broschüre.**

**Wir hoffen, daß Ihnen dieses und unsere anderen Handbücher von Nutzen sind. Bitte zögern Sie nicht, weiterführende Produktliteratur oder Unterstützung anzufordern:**

**AlliedSignal Europe N.V.  
Engineering Plastics  
Grauwmeer 1  
Haasrode Research Park  
B-3001 Heverlee  
Belgien  
Tel. +32 1639 1267 (Wir sprechen Deutsch!)  
Fax +32 1640 0674**

**Und im Internet erreichen Sie uns unter der Adresse: [http:// www. asresin. com](http://www.asresin.com)**



## **Konstruktionsgrundlagen für Spritzgußteile**

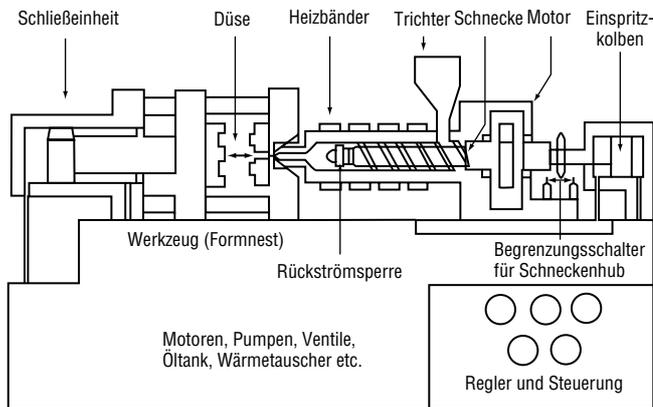
Werkzeugtrennflächen . . . . .	II-2
Entformungsschrägen . . . . .	II-3
Wanddicke . . . . .	II-3
Abrundungen und Radien . . . . .	II-3
Nocken . . . . .	II-4
Rippen . . . . .	II-4
Öffnungen . . . . .	II-5
Schwindung . . . . .	II-5
Angußsysteme . . . . .	II-5
Werkzeuglüftung . . . . .	II-6
Fließnähte . . . . .	II-6

## Teil II: Konstruktionsgrundlagen für Spritzgußteile

Das Spritzgießen ist das gängigste Verfahren für die wirtschaftliche und automatisierte Fertigung thermoplastischer Formteile. Werkzeug, Maschine und Zusatzausrüstung erfordern hohe Investitionen. Folgende Aspekte sind beim Konstruieren der Teile und Werkzeuge besonders zu überlegen:

Werkzeugtrennflächen  
 Entformungsschrägen  
 Wanddicke(n)  
 Abrundungen und Radien  
 Nocken  
 Rippen  
 Öffnungen  
 Schwindung  
 Anbindung/Anguß(Angüsse)  
 Werkzeugentlüftung  
 Fließnähte

**Bild II-1.**  
**Schema einer Schneckenkolben-Spritzgießmaschine**



### Werkzeugtrennflächen

Die Auslegung der Werkzeugtrennebene oder -trennflächen hängt von der Form und Funktion der Teile ab. Falls es sich beispielsweise um eine Welle handelt, deren Durchmesser als Lagerfläche dienen soll, ist eine herkömmliche Trennebene ungeeignet. Statt dessen sollte die Welle zur Trennebene hin leicht abgeflacht werden, um Fehlpassungen zu vermeiden und die Bildung von Grat zu minimieren (Bild II-2).

**Bild II-2.**  
**Freilaufwelle**

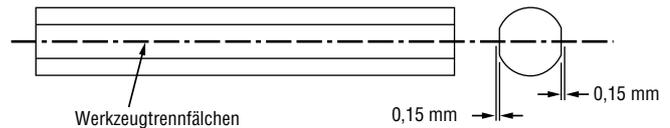
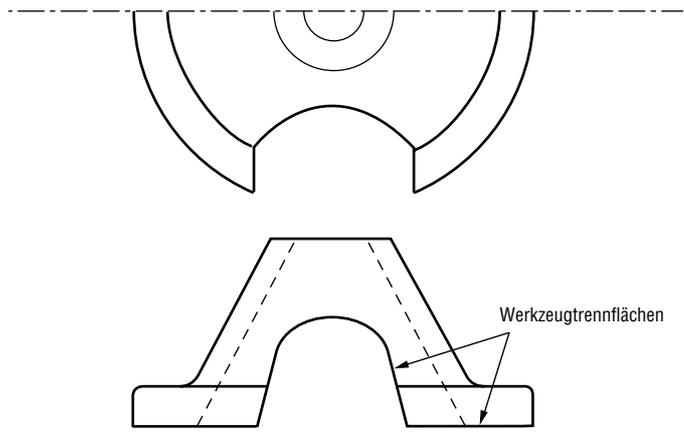


Bild II-3 zeigt ein Beispiel für unregelmäßige Trennflächen. Bei engtolerierten Trennflächen müssen die Werkzeughälften gut ineinandergreifen oder je nach Fertigabmessung ein Spiel von 0,125 bis 0,25 mm lassen, um mögliche Fehlpassungen aufzufangen.

**Bild II-3.**  
**Unregelmäßige Werkzeugtrennflächen**



### Entformungsschrägen

Entformungsschrägen werden für das Auswerfen der spritzgegossenen Teile aus dem Werkzeug benötigt und grundsätzlich empfohlen. Normal sind Mindestschrägen von  $1^\circ$  und  $0,5^\circ$  bei Rippen. Kleine Schrägen sind besser als keine, und wo es die Konstruktion erlaubt, sollten größere in Erwägung gezogen werden. Falls nur sehr kleine Entformungsschrägen möglich sind, sollte der Werkzeugstahl gut poliert und die Tiefe nicht größer als 12,5 mm sein.

### Wanddicke

Oberste Regel beim Konstruieren von Spritzgußteilen ist gleichmäßige Wanddicke-je gleichmäßiger, desto besser das Fließverhalten der Schmelze im Werkzeug und desto geringer die Neigung zu Einfallstellen, eingeformten Spannung und Schwindungsunterschieden.

Wanddickenübergänge sollten 15% der Nennwanddicke nicht überschreiten und graduell verlaufen (Bild II-4). Das gilt auch für Richtungsänderungen im Bereich von Ecken und Kanten.

Bild II-4.

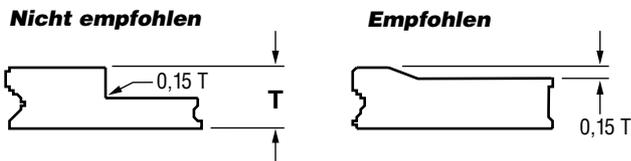
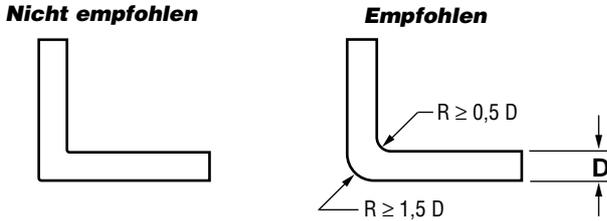


Bild II-5.



### Abrundungen und Radien

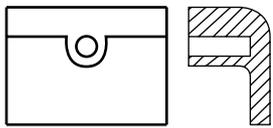
Scharfe Ecken und Kanten sind eine der Hauptursachen für das Versagen von Formteilen, für Spannungskonzentrationen, mangelhaften Schmelzefluß und erhöhten Werkzeugverschleiß. Ecken und Kanten sollten daher je nach Anwendung möglichst großzügig abgerundet werden. Empfohlene Mindestradien sind 50% der Wanddicke (D) innen und 150% der Wanddicke außen (Bild II-5).

## Nocken

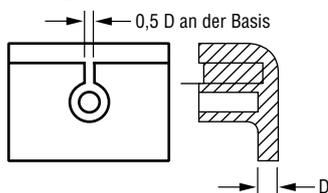
Nocken dienen meistens zur Aufnahme von Einsätzen, Schneidschrauben, Stiften und anderen Montage- oder Funktionselementen. Vermeiden Sie freistehende Nocken. Um ihre strukturelle Festigkeit sicherzustellen, sollten Nocken möglichst immer über Rippen oder Stege mit der Wand des Formteils oder einer Versteifungsrippe verbunden sein (Bild II-6).

**Bild II-6.**

**Nicht empfohlen**



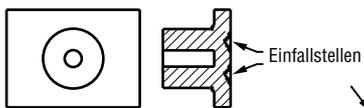
**Empfohlen**



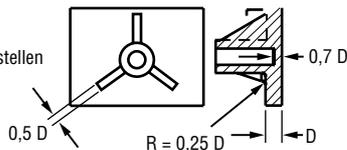
Der Außendurchmesser von Nocken für Schneidschrauben sollte im Idealfall das 2,5fache des Schraubendurchmessers betragen. Dickwandige Nocken mit Grundflächen von mehr als 50% der Wanddicke verursachen sichtbare Einfallstellen. Dies lässt sich umgehen, indem man die Nockenwand nur bis zum Zweifachen des Schraubendurchmessers auslegt und über mehrere Stegrippen anbindet (Bild II-7).

**Bild II-7.**

**Nicht empfohlen**



**Empfohlen**



Die Dicke der Stegrippen an ihrer Basis sollte 50% der angrenzenden Wanddicke nicht überschreiten. Berücksichtigen Sie bei den Innen- und Außendurchmessern von Nocken außerdem eine Entformungsschräge von  $0,5^\circ$ . Weitere Informationen über die Auslegung von Nocken für Preßpassungen und Schneidschrauben finden Sie in Teil V dieses Handbuchs.

## Rippen

Rippen eignen sich, um die Steifigkeit zu erhöhen oder das Füllen komplexer Werkzeuge zu optimieren.

Bei tragenden, verdeckten Teilen, bei denen Einfallstellen keine Rolle spielen, kann die Dicke der Rippenbasis(d) 75% bis 85% der angrenzenden Wanddicke(D) betragen.

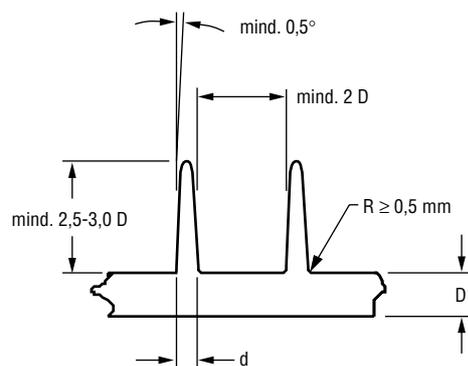
Bei texturierten Sichtteilen ohne Einfallstellen sollte die Rippenbasis nur maximal halb so dick wie die angrenzende Wand sein; bei untexturierten Sichtteilen nur bis zu 30%.

Eine wirksame Verbesserung der Steifigkeit erfordert Rippen, deren Höhe mindestens das 2,5- bis 3fache der Wanddicke(D) beträgt.

Berücksichtigen Sie auf beiden Rippenseiten eine Nennentformungsschräge von  $0,5^\circ$  und Radien von mindestens 0,5 mm an der Rippenbasis.

Als empfohlener Mindestabstand zwischen zwei Rippen gilt das Zweifache der Wanddicke, um die eingeförmten Spannungen zu minimieren und Probleme mit der Werkzeugkühlung zu vermeiden (Bild II-8).

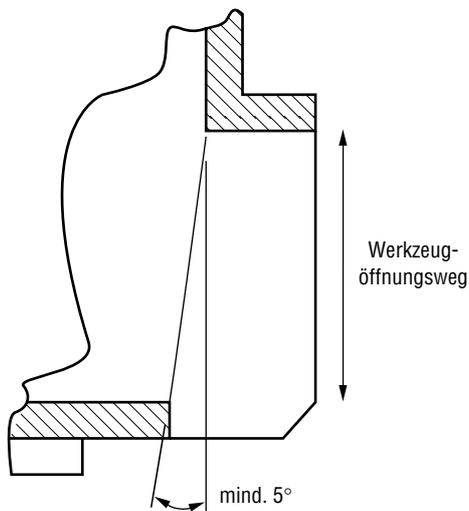
**Bild II-8.**



## Öffnungen

Öffnungen im Formteil (beispielsweise für Schnappverbindungen), die ohne Kernzüge realisiert werden sollen, erfordern einen Öffnungswinkel zwischen Kern und Kavität von  $5^\circ$  (Bild II-9).

Bild II-9.



## Schwindung

Polymere schrumpfen beim Erstarren im Werkzeug. Das Ausmaß der Schwindung hängt von der Art des Kunststoffes ab. Kristalline und teilkristalline Materialien schrumpfen mehr als amorphe. Verstärkte Polymere schrumpfen weniger als unverstärkte. Um die typische Schwindung zu berücksichtigen, muß das Material vor der Konstruktion des Werkzeugs spezifiziert sein. Grundlegende Schwindungsdaten werden nach ISO 2577 ermittelt.

Darüber hinaus wird die Schwindung von der Formteil- und Werkzeugkonstruktion beeinflusst: Dickwandige Teile schrumpfen mehr als dünnwandige. Wanddickenunterschiede können Schwindungsdifferenzen und Verzug verursachen. Vor allem bei glasfaserverstärkten Materialien bestehen außerdem Schwindungsunterschiede in Abhängigkeit von der Fließrichtung.

Zu den Verarbeitungsbedingungen, die die Schwindung beeinflussen, zählen der Werkzeuginnendruck – je höher desto geringer die Schwindungsneigung sowie die Werkzeug- und Verarbeitungstemperaturen. Kältere Werkzeuge reduzieren die Schwindung. Hohe Verarbeitungstemperaturen erhöhen sie, insbesondere bei teilkristallinen Polymeren.

Für typische Schwindungsdaten unserer Polymere wenden Sie sich bitte an den technischen Service von AlliedSignal Plastics.

## Angüsse

Der Anguß, über den das Formteil angespritzt wird, ist normalerweise der kleinste Durchmesser im Angußsystem. Wie diese Anbindung ausgelegt wird – einschließlich Position, Größe, Art und Anzahl der Angüsse – hängt von der geforderten Oberflächenqualität am Anguß, von der Werkzeugkonstruktion und Formteilgeometrie sowie von der Materialwahl ab.

Allgemeine Empfehlungen:

- Anguß möglichst nicht in Bereiche legen, die erhöhter Spannung oder Schlag ausgesetzt sind.
- Anguß so konfigurieren und positionieren, daß sie die Oberflächenqualität so wenig wie möglich beeinträchtigen.
- Anguß so auslegen, daß sie keine nachträgliche Angußabtrennung erfordern.
- Anguß so positionieren, daß sie ein optimales Füllbild sicherstellen, mit vorteilhafter Glasfaserorientierung (falls gegeben) und Fließnähten nur in spannungsarmen Bereichen.

Weitere Einzelheiten finden Sie im Spritzgießhandbuch von AlliedSignal.

### **Werkzeugentlüftung**

Um Luft und Gase entweichen zu lassen, muß das Spritzgießwerkzeug gut entlüftet werden. Mangelhafte Entlüftung kann überhöhten Spritzdruck, unterfüllte Teile, Brandspuren und Streifenbildung verursachen. Ein Werkzeug gilt als ausreichend entlüftet, wenn keinerlei Brandspuren sichtbar sind.

Die Entlüftung erfolgt normalerweise entlang der Trennflächen über kleine Schlitze oder Bohrungen. Deren Größe hängt von der Art des eingespritzten Materials ab; fragen Sie den technischen Service von AlliedSignal nach spezifischen Empfehlungen.

Weitere Möglichkeiten der Werkzeugentlüftung sind Auswerferstifte, Entlüftungsstifte und Angußverteiler. Welche Bereiche besonders entlüftet werden müssen, läßt sich am besten mit Fließstudien ermitteln.

### **Fließnähte**

Wo sich zwei Fließfronten im Werkzeug vereinen, ist die mechanische Festigkeit des Formteils im allgemeinen geringer. Die in Werkzeugfüllstudien gut erkennbaren Fließnähte sollten daher so weit wie möglich in spannungsärmere Bereiche hinein verlegt werden. Fließnähte entstehen meistens nach Einsätzen oder anderen Hindernissen, wie Kernstiften oder Nocken, die den Schmelzestrom teilen oder umlenken.

## **Konstruktionstechnik**

Spannung . . . . .	III-2
Spannung/Dehnung . . . . .	III-2
Normalspannung . . . . .	III-3
Scherspannung . . . . .	III-3
Torsionsspannung . . . . .	III-4
Biegespannung . . . . .	III-5
Eigenschaften unterschiedlicher Querschnitte . . . . .	III-6
Definition der Variablen . . . . .	III-6
Querschnitte . . . . .	III-6
Formeln für die Durchbiegung	
gängiger Kragarme/Träger . . . . .	III-7
Formeln für Deformation	
und Spannung unter Torsion . . . . .	III-8
I, T- und L-Profile . . . . .	III-9
Formeln für ebene Flächen . . . . .	III-10
Gleichungen für ebene Flächen . . . . .	III-10
Druckgefäße . . . . .	III-11
Wärmeausdehnung und Spannung . . . . .	III-12
Schlagspannung . . . . .	III-13
Spannungskonzentration . . . . .	III-14
Rippenauslegung . . . . .	III-15
Steifigkeitsausgleich . . . . .	III-18

## Spannung

### Spannung/Dehnung

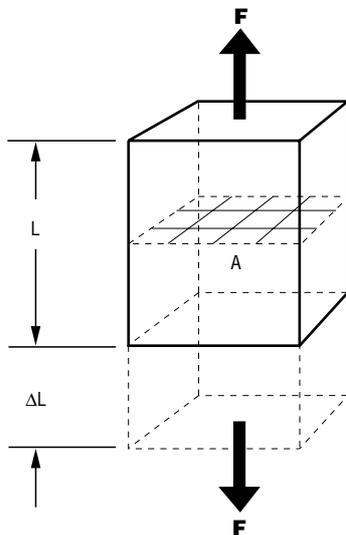
Wenn eine Kraft auf ein Formteil aufgebracht wird, kommt es durch auftretende Spannung und Dehnung zur Verformung. Die Spannung ( $\sigma$ ) im Formteil wird von der aufgebrachten Kraft ( $F$ ) pro Flächeneinheit ( $A$ ) bestimmt.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Dehnung ( $\epsilon$ ) ist die Längenänderung des Formteils gegenüber seiner Ausgangslänge (Bild III-1).

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

**Bild III-1.**  
Dehnung

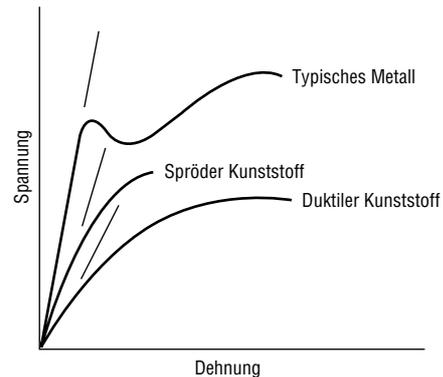


Nach dem Hooke-Gesetz verhält sich die Dehnung proportional zur Spannung, und der Elastizitätsmodul ( $E$ ) ist die Konstante dieser Proportionalität.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Alle Kunststoffe haben eine typische Spannungs-/Dehnungskurve (Bild III-2).

**Bild III-2.**  
Typische Spannungs-/Dehnungslinien



Die Spannungs-/Dehnungskurve für einen Kunststoff wird mittels Zugprüfung bei Raumtemperatur ermittelt. Sie beschreibt das Verhalten der Materialprobe (Prüfstab) unter Streckspannung bei definierter (konstanter) Streckgeschwindigkeit (5-12 mm/min). Die Proportionalitätsgrenze, ab der die Kurve abweichend vom Hooke-Gesetz nichtlinear verläuft, hängt neben Temperatur und Feuchtigkeit auch vom Material ab. Kunststoffe haben kein lineares Verhalten ähnlich dem von Metallen.

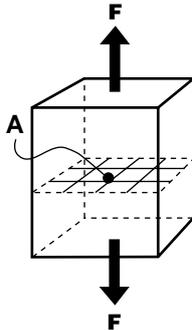
Wenn die Zugkraft groß genug ist, erreicht die Kurve die Elastizitätsgrenze des Kunststoffs, ab der eine irreversible Verformung auftritt. Als Streckgrenze bezeichnet man den Punkt, ab dem die Dehnung bei konstanter Spannung zunimmt. Bei spröden Kunststoffen verläuft die Kurve steiler als bei duktilen, und es kommt oft noch vor der Streckgrenze zum Bruch (Sprödbbruch). Der Zähbruch duktiler Kunststoffe erfolgt demgegenüber meistens weit jenseits der Streckgrenze, sofern überhaupt eine Streckgrenze erkennbar ist.

## Normalspannung

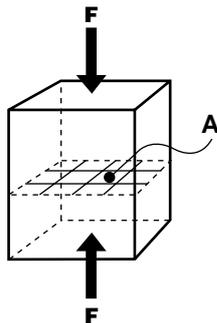
$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Normalspannung ( $\sigma$ ) ist das Verhältnis der aufgetragenen Kraft ( $F$ ) senkrecht zur Querschnittsfläche ( $A$ ): Eine senkrecht (normal) auf die Oberfläche wirkende Kraft verursacht eine Spannung im Querschnitt. Dabei handelt es sich je nach Richtung der Kraft um Zug- oder Druckspannung (Bilder III-3 und III-4).

**Bild III-3.**  
Zugspannung



**Bild III-4.**



**Druckspannung**

## Scherspannung

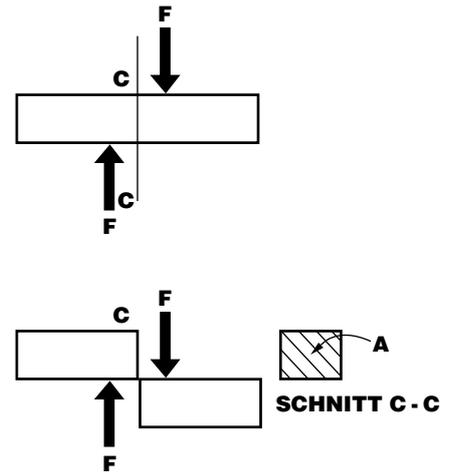
Scherspannung ( $\tau$ ) wird wie die Zug- oder Druckspannung als Verhältnis der aufgetragenen Kraft

$$\tau = \frac{F}{A}$$

( $F$ ) zur Querschnittsfläche ( $A$ ) ausgedrückt. Die Kraft wirkt dabei jedoch parallel versetzt auf die Fläche (Bild III-5).

**Bild III-5.**  
Scherspannung

Illustration: Beer & Johnson, Mechanical Materials, 1981



### Torsionsspannung

Wenn ein zylindrisches Formteil entlang seiner Achse verdreht wird (Bild III-6), entsteht an einem beliebigen Punkt seiner Oberfläche eine Torsionsspannung ( $\tau$ ), die wie folgt berechnet wird:

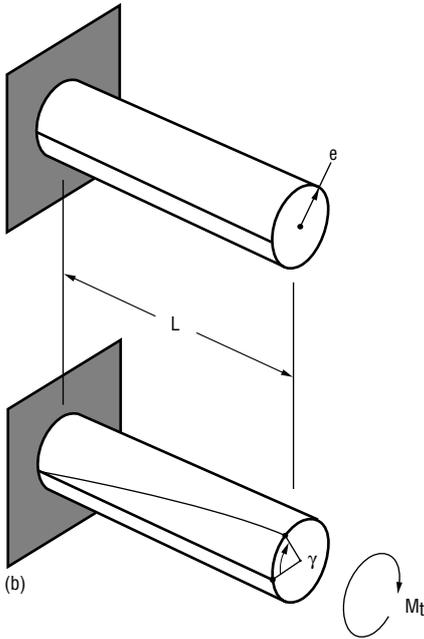
$$\tau = \frac{M_t \cdot e}{I_t}$$

Dabei ist  $M_t$  der Drehmoment,  $e$  die Senkrechte von der Zylinderachse zur Oberfläche, an der die Spannung am größten ist, und  $I_t$  die Querschnittsfunktion (vgl. auch Seite III-8).

#### Bild III-6.

#### Torsionsspannung

Illustration: Beer & Johnson, Mechanical Materials



Das Drehmoment wird nach folgender Formel berechnet:

$$M_t = \frac{\gamma \cdot I_t \cdot G}{L}$$

Dabei ist die Variable der vom Drehmoment bestimmte Torsionswinkel,  $G$  der Schubmodul und  $L$  die Länge des Teils. Für den Torsionswinkel ergibt sich:

$$\gamma = \frac{M_t \cdot L}{I_t \cdot G}$$

### Beispiel für einen massiven Rundstab (Welle):

Ein 100 mm langer, massiver Rundstab mit 10 mm Durchmesser wird einem Drehmoment von 1 Nm ausgesetzt. Zu berechnen sind die Torsionsspannung und der Torsionswinkel.

Der Prüfstab besteht aus 40% mineralgefülltem und glasfaserverstärktem Capron® 8267, spritztrocken; die Torsion erfolgt bei Raumtemperatur.

$$E = \text{Elastizitätsmodul} = 7600 \text{ N/mm}^2$$

$$\nu = \text{Poissonzahl} = 0,35$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{7600 \text{ N/mm}^2}{2(1+0,35)} = 2815 \text{ N/mm}^2$$

$$I_t = \frac{1}{2} \pi R^4 = \pi \frac{(6 \text{ mm})^4}{2} = 2035,8 \text{ mm}^4$$

$$\tau = \frac{900 \text{ Nmm} \cdot 6 \text{ mm}}{2035,8 \text{ mm}^4} = 2,653 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma = \frac{900 \text{ Nmm} \cdot 130 \text{ mm}}{2035,8 \text{ mm}^4 \cdot 2815 \text{ N/mm}^2} = 0,0204 \text{ rad}$$

Die Torsionsspannung ist sehr niedrig im Vergleich zur Zugfestigkeit des Kunststoffes, so daß der Rundstab das spezifizierte Drehmoment aushält.

### Biegespannung

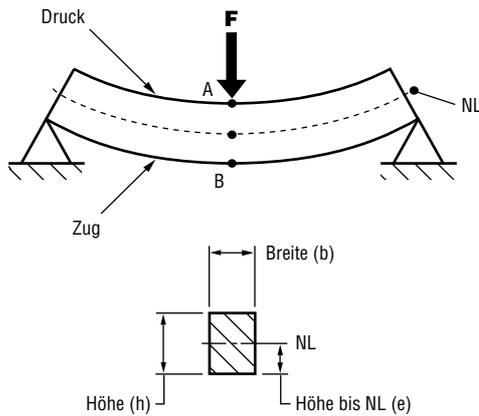
Wenn ein an den Enden aufliegender Träger sich unter Belastung durchbiegt, steht der obere Teil unter Druck und der untere unter Zug.

Die Nulllinie (NL) ist spannungslos. Die größte Spannung herrscht an den Oberflächen des Trägers (A und B). Für die Biegespannung gilt:

$$\sigma = \frac{Me}{I}$$

Dabei ist  $M$  das Biegemoment,  $e$  der Abstand von der neutralen Achse zur Oberfläche und  $I$  das Trägheitsmoment (Bild III-7).

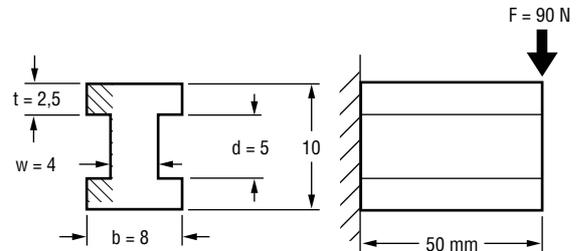
**Bild III-7.**  
Nulllinie bei Durchbiegung



### Beispiel für einen Kragbalken:

Der in Bild III-8 gezeigte Doppel-T-Träger wird mit einer Kraft von 10 kp belastet. Um die dabei entstehende Biegespannung zu ermitteln, muß erst das Trägheitsmoment berechnet werden. Der Träger besteht aus Capron® 8267 (40% mineralgefülltes und glasfaserverstärktes PA6) und hat spritztrocken eine Zugfestigkeit von 140 N/mm<sup>2</sup>.

**Bild III-8.**  
I-Träger im Querschnitt



$$M = \text{Kraft} \times \text{Abstand} = 90 \text{ N} \cdot 0,05 \text{ m} = 4,5 \text{ Nm}$$

$$I^* = \frac{b(d+2t)^3}{12} - \frac{(b-w)d^3}{12} = 625 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_b = 36 \text{ N/mm}^2$$

Ein Vergleich der Biegespannung mit der Zugfestigkeit des Materials zeigt, daß der I-Träger die spezifizierte Belastung aushält.

\* Trägheitsmomente für andere Trägerquerschnitte siehe Bilder III-9 bis III-14.

# Eigenschaften unterschiedlicher Querschnitte

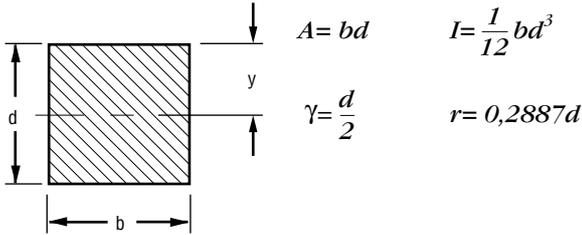
## Definition der Variablen

Die Variablen für die in den Bildern III-9 bis III-14 benutzten Größen sind wie folgt definiert:

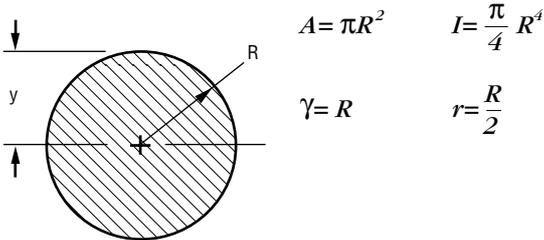
- $A$  = Fläche
- $Y$  = Abstand von der Nulllinie zur Oberfläche
- $I$  = Trägheitsmoment im Bereich der Hauptachse
- $r$  = Kreisradius um die Hauptachse

## Querschnitte

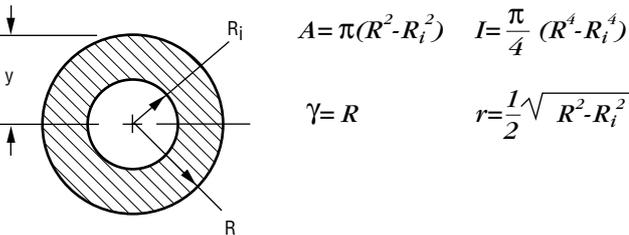
**Bild III-9.**  
Rechteck



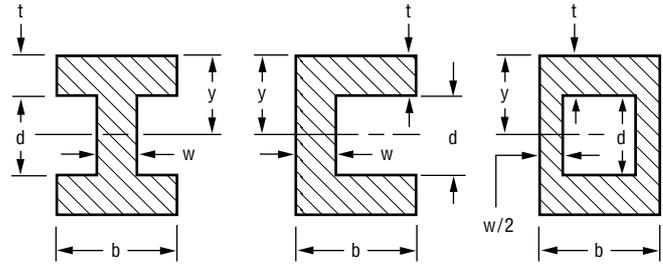
**Bild III-10.**  
Vollkreis



**Bild III-11.**  
Kreisring



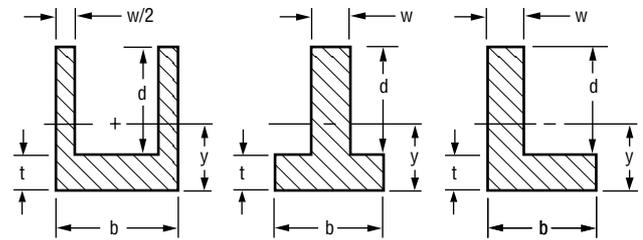
**Bild III-12.**  
I-Träger, U-Profil und rechtwinkliges Hohlprofil



$$A = 2bt + wd \quad I = \frac{b(d+2t)^3}{12} - \frac{(b-w)d^3}{12}$$

$$\gamma = \frac{d}{2} + t \quad r = \left(\frac{I}{A}\right)^{1/2}$$

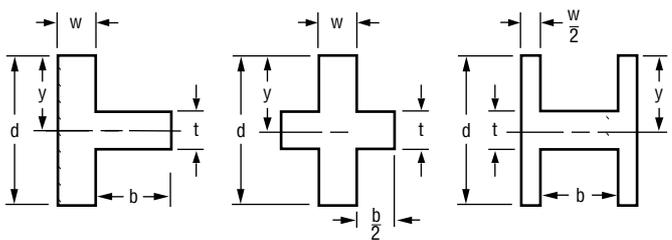
**Bild III-13.**  
U-, T- und L-Profil  
Side T section, Cross section, and H section



$$A = tb + wd \quad I = \frac{b}{3} (d+t)^3 - \frac{d^3}{3} (b-w) - A(d+t-y)^2$$

$$y = \frac{bt^2 + wd(2t+d)}{2(tb+wd)} \quad r = \left(\frac{I}{A}\right)^{1/2}$$

**Bild III-14.**  
T-, Kreuz- und H-Profil



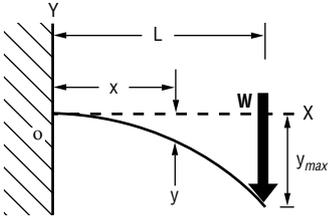
$$A = wd \quad I = \frac{wd^3 + bt^3}{12}$$

$$y = \frac{d}{2} \quad r = \left(\frac{I}{A}\right)^{1/2}$$

### Formeln für die Durchbiegung gängiger Kragarme/Träger

Nachstehend die Gleichungen zum Berechnen des maximalen Biegemoments  $M_{max}$ , der punktuellen ( $y$ ) und maximalen Lastverlagerung  $y_{max}$  und der Maximalspannung ( $\sigma_{max}$ ) typischer Träger;  $c =$  Abstand zur Nulllinie im Querschnitt (Bilder III-15 bis III-22).

**Bild III-15.**  
Kragarm, Belastung am freien Ende



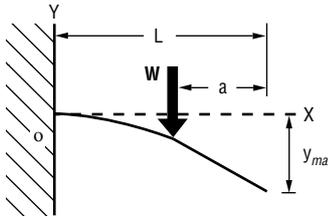
$$M_{max} = WL$$

$$y = \frac{-Wx^2(3L-x)}{6EI}$$

$$y_{max} = \frac{-WL^3}{3EI}$$

$$\sigma_{max} = \frac{WLe}{I} \text{ für } x=0$$

**Bild III-16.**  
Kragarm, punktuelle Belastung

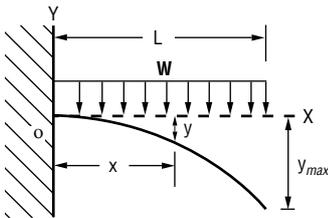


$$M_{max} = W(L-a)$$

$$y_{max} = \frac{-W(2L^3 - 3L^2a + a^3)}{6EI}$$

$$\sigma_{max} = \frac{W(L-a)e}{I} \text{ für } x=0$$

**Bild III-17.**  
Kragarm, gleichmäßige Belastung über gesamte Länge



$$W = \text{Kraft/Länge}$$

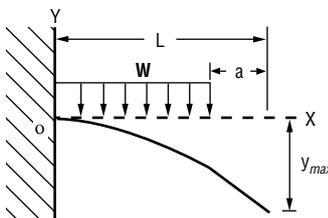
$$M_{max} = \frac{WL^2}{2} \text{ für } x=0$$

$$y = \frac{-Wx^2}{24EI} (6L^2 - 4Lx + x^2)$$

$$y_{max} = \frac{-WL^4}{8EI} \text{ für } x=L$$

$$\sigma_{max} = \frac{WL^2e}{2I} \text{ für } x=0$$

**Bild III-18.**  
Kragarm, gleichmäßige Belastung über Teillänge

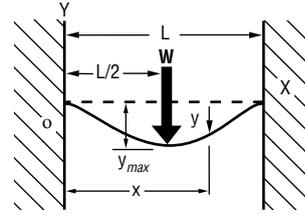


$$M_{max} = \frac{W(L-a)^2}{2} \text{ für } x=0$$

$$y_{max} = \frac{-W}{24EI} (L-a)^3 (3L+a)$$

$$\sigma_{max} = \frac{W(L-a)^2e}{2I} \text{ für } x=0$$

**Bild III-19.**  
Eingespannter Träger, punktuelle mittig



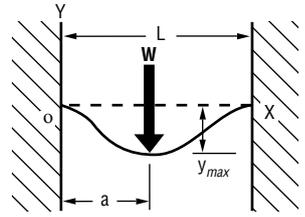
$$M_{max} = \frac{WL}{8} \text{ für } x = \frac{L}{2}$$

$$y = \frac{-W}{48EI} (3Lx^2 - 4x^3)$$

$$y_{max} = \frac{-WL^3}{192EI} \text{ für } x = \frac{L}{2}$$

$$\sigma_{max} = \frac{WLe}{8I} \text{ für } x=0, L$$

**Bild III-20.**  
Eingespannter Träger, mittige Belastung

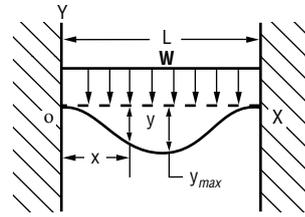


$$M_{max} = \frac{Wa^2(L-a)}{L^2} \quad a > \frac{L}{2}$$

$$\sigma_{max} = \frac{-Wa^2(L-a)e}{L^2I}$$

$$y_{max} = \frac{-2W(L-a)^2a^3}{3EI(L+2a)^2} \text{ für } x = \frac{2aL}{L+2a} \text{ wenn } a > \frac{L}{2}$$

**Bild III-21.**  
Eingespannter Träger, gleichmäßige Belastung



$$W = \text{Kraft/Länge}$$

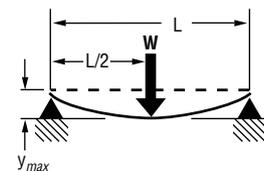
$$M_{max} = \frac{WL^2}{12} \text{ für } x=0, L$$

$$y = \frac{Wx^2}{24EI} (2Lx - L^2 - x^2)$$

$$y_{max} = \frac{-WL^4}{384} \text{ für } x = \frac{L}{2}$$

$$\sigma_{max} = \frac{-WL^2e}{12I} \text{ für } x=0, L$$

**Bild III-22.**  
Frei aufliegender Träger, mittige Belastung



$$M_{max} = \frac{WL}{4} \text{ für } x = \frac{L}{2}$$

$$y_{max} = \frac{-WL^3}{48EI}$$

$$\sigma_{max} = \frac{-WLe}{4I} \text{ für } x=0, L$$

$$y = \frac{-W}{48EI} (3L^2x - 4x^3) \text{ für } 0 \leq x \leq \frac{L}{2}$$

## Formeln für Deformation und Spannung unter Torsion

Nachstehend die Gleichungen zum Berechnen der Torsionswinkel ( $\gamma$ ) und der maximalen Torsionsspannung ( $\tau_{max}$ ) für Träger mit gängigen Querschnitten (Bilder III-23 bis III-29).

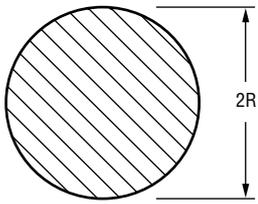
$$\gamma = \frac{M_t \cdot L}{G \cdot I_t}$$

Where:  $M_t$  = Drehmoment (Kraft-Länge)  
 $L$  = Trägerlänge  
 $G$  = Schubmodul (Kraft pro Flächeneinheit)  
 $I_t$  = Querschnittsfunktion (Länge<sup>4</sup>)

Quelle: Roark, Raymond & Young, Warren, Formulas for Stress and Strain, McGraw Hill

### Träger unter Torsion

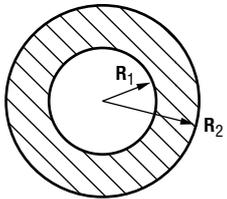
**Bild III-23.**  
Kreisprofil



$$I_t = \frac{1}{2} \pi R^4$$

$$\tau_{max} = \frac{2 \cdot M_t}{\pi R^3} \text{ am Umkreis}$$

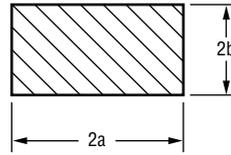
**Bild III-24.**  
Kreisscheibe



$$I_t = \frac{1}{2} \pi (R_2^4 - R_1^4)$$

$$\tau_{max} = \frac{2 M_t R_2}{\pi (R_2^4 - R_1^4)} \text{ am Umkreis}$$

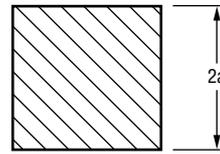
**Bild III-25.**  
Rechteckprofil



$$I_t = ab^3 \left[ \frac{16}{3} - 3,36 \frac{b}{a} \left( 1 - \frac{b^4}{12a^4} \right) \right] \text{ für } a \geq b$$

$$\tau_{max} = \frac{M_t (3a + 1,8b)}{8a^2 b^2} \text{ im Mittelpunkt der Ingeren Seiten}$$

**Bild III-26.**  
Quadratisches Profil



$$I_t = 2,256a^4$$

$$\tau_{max} = \frac{0,601 M_t}{a^3} \text{ im Mittelpunkt jeder Seite}$$

### I-, T- und L-Profile

Bei I-, T- und L-Profilen liegt die maximale Torsionsspannung dort, wo der Inkreis ( $D$ ) den Rand berührt.  $A$  = Querschnittsfläche.

$$I_1 = ab^3 \left[ \frac{1}{3} - 0,21 \frac{b}{a} \left( 1 - \frac{b^4}{12a^4} \right) \right]$$

$$\tau_{max} = \frac{M_t \cdot e}{I}$$

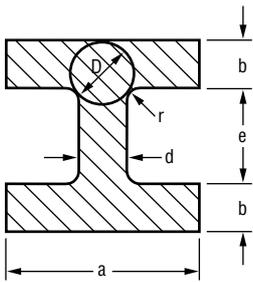
$$e = \frac{D}{1 + \frac{\pi^2 D^4}{16A^2}} \left\{ 1 + 0,762 \left[ 0,118 \log_e \left( 1 + \frac{D}{2r} \right) + 0,238 \frac{D}{2r} \right] \right\}$$

wobei  $D$  den Radius  $R$  berührt

$$e = \frac{D}{1 + \frac{\pi^2 D^4}{16A^2}} \left[ 1 + 0,15 \left( \frac{\pi^2 D^4}{16A^2} \right) \right] \text{ wo der Inkreis } (D) \text{ den Rand berührt}$$

Wenn  $b < d$  dann  $t = b$  und  $t_1 = d$   
 Wenn  $b > d$  dann  $t = d$  und  $t_1 = b$

**Bild III-27.**  
I-Profil



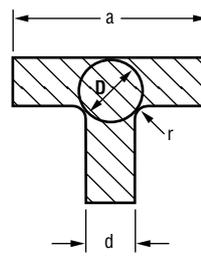
$$I = 2I_1 + I_2 + 2\alpha D^4$$

$$I_2 = \frac{1}{3} e d^3$$

$$\alpha = \frac{t}{t_1} \left( 0,15 + \frac{0,1r}{b} \right)$$

$$D = \frac{(b+r)^2 + rd + \frac{d^2}{4}}{2r+b}$$

**Bild III-28.**  
T-Profil



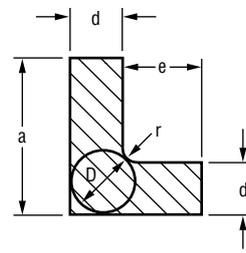
$$I = I_1 + I_2 + \alpha D^4$$

$$I_2 = cd^3 \left[ \frac{1}{3} - \frac{0,105d}{e} \left( 1 - \frac{d^4}{192e^4} \right) \right]$$

$$\alpha = \frac{t}{t_1} \left( 0,15 + \frac{0,10r}{b} \right)$$

$$D = \frac{(b+r)^2 + rd + \frac{d^2}{4}}{(2r+b)} \text{ für } d < 2(b+r)$$

**Bild III-29.**  
L-Profil



$$I = I_1 + I_2 + \alpha D^4$$

$$I_2 = cd^3 \left[ \frac{1}{3} - \frac{0,105d}{e} \left( 1 - \frac{d^4}{192e^4} \right) \right]$$

$$\alpha = \frac{d}{b} \left( 0,07 + \frac{0,076r}{b} \right)$$

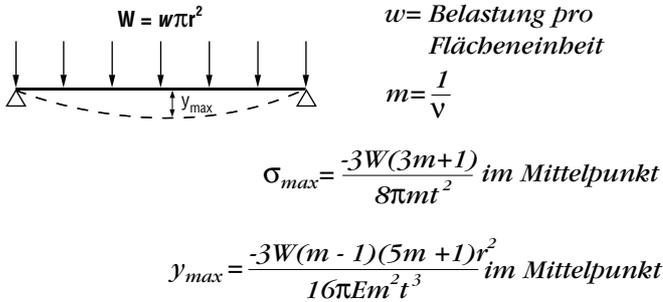
$$D = 2 \left( d + b + 3r \cdot \sqrt{2(2r+b)(2r+d)} \right) \text{ für } b < 2(d+r)$$

### Formeln für ebene Flächen

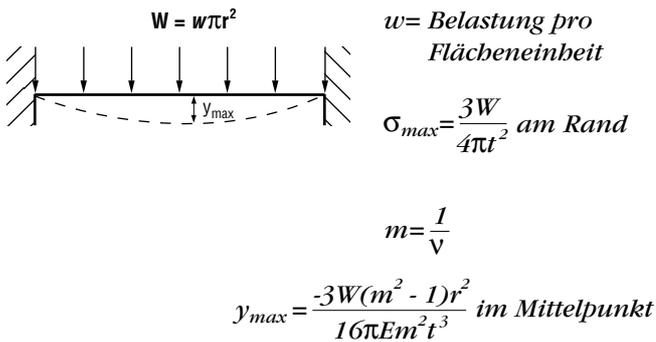
Nachstehend die Formeln für die maximale Lastverlagerung  $y_{max}$  und Biegespannung  $\sigma_{max}$  kreisrunder oder eckiger planer Platten unter gleichmäßiger Belastung (Bilder III-30 bis III-33);  $\nu$  = Poissonzahl.

### Gleichungen für ebene Flächen

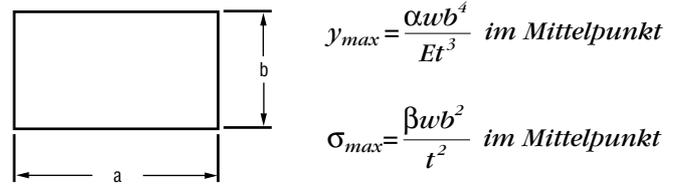
**Bild III-30**  
Frei aufliegende Kreisplatte, gleichmäßige Belastung



**Bild III -31**  
Eingespannte Kreisplatte, gleichmäßige Belastung



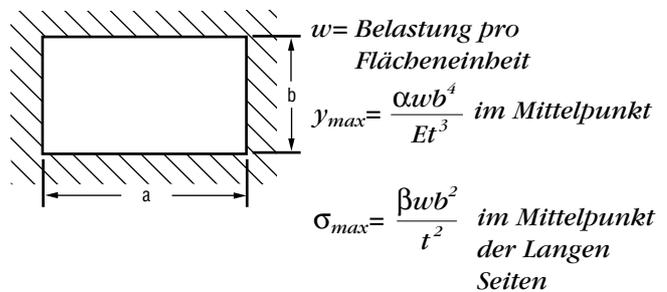
**Bild III-32**  
Frei aufliegende Rechteckplatte, gleichmäßige Belastung



a/b	1	1,2	1,4	1,6	1,8
$\beta$	0,2874	0,3762	0,4530	0,5172	0,5688
$\alpha$	0,0444	0,0616	0,0770	0,0906	0,1017

a/b	2	3	4	5	$\infty$
$\beta$	0,6102	0,7134	0,7410	0,7476	0,750
$\alpha$	0,1110	0,1335	0,1400	0,1417	0,1421

**Bild III-33**  
Eingespannte Rechteckplatte, gleichmäßige Belastung



a/b	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	$\infty$
$\beta$	0,3078	0,3834	0,4356	0,4680	0,4872	0,4974	0,500
$\alpha$	0,0138	0,0188	0,0226	0,0251	0,0267	0,0277	0,0284

## Druckgefäße

Konstruktionen von Druckgefäßen (Behältern, Tanks) lassen sich aufgrund ihrer schalenförmigen Gehäuse und symmetrischen Belastung mit Hilfe der Schalenbautheorie analysieren. Um zwischen dick- und dünnwandigen Gehäusen oder Zylindern zu unterscheiden, muß das Verhältnis der Wanddicke ( $t$ ) zum Radius ( $r$ ) berücksichtigt werden:

- Für  $10t < r$  ist die Dünnwandtheorie anzuwenden.
- Für  $10t > r$  ist die Dickwandtheorie anzuwenden.

Es wird an dieser Stelle nur auf die maximale Druckspannung eingegangen, die von innen auf die Behälterwand wirkt (Bild III-34). Das Versagen von Druckgefäßen aufgrund von äußerem Druck spielt in der Praxis kaum eine Rolle.

Für die maximale Wand- oder Umfangsspannung dünnwandiger Behälter gilt:

$$\sigma = \frac{Pr}{t}$$

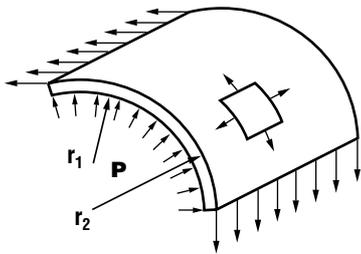
Dabei ist  $P$  der Innendruck,  $r$  der Innenradius und  $t$  die Wanddicke.

Für die maximale Innendruckspannung dickwandiger Behälter gilt:

$$\sigma = \frac{P(r_2^2 + r_1^2)}{r_2^2 - r_1^2}$$

$r_1$  und  $r_2$  stehen hierbei für den Außen- und Innendurchmesser.

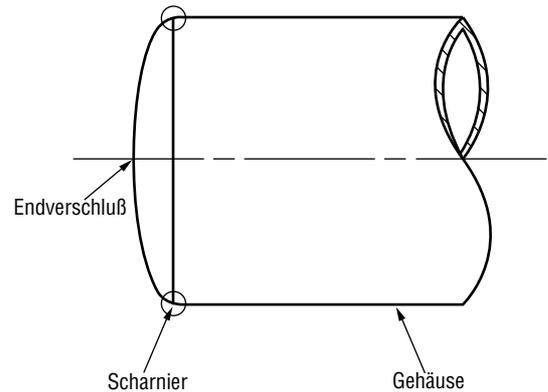
**Bild III-34**



- Dickwandig: Nur Radial- und Wand-(Zug-)spannung
- Dünnwandig: Nur Wandspannung

Der kritische oder am höchsten beanspruchte Bereich von Druckgefäßen ist das Scharnier oder der Übergang vom Gehäuse zum Endverschluß (Bild III-35).

**Bild III-35**



Spannungserhöhende Faktoren können sich im Scharnierbereich konzentrieren; vgl. auch Seite III-14 zu Spannungskonzentratoren. Je abrupter der Übergang, desto höher die Spannung. Kugelförmig gewölbte Endverschlüsse sind daher am besten geeignet.

## Druckgefäße (fortgesetzt)

### Beispiel:

Zu konstruieren ist ein zylindrischer Behälter mit 300 mm Durchmesser, der einen Innendruck von 4 bar aushalten soll. Als Material wurde Capron® 8233 gewählt (33% glasfaserverstärktes Polyamid 6). Aus Verarbeitungsgründen sollte die Wanddicke 6 mm nicht überschreiten.

Analyse der Wanddicke-Dick- oder Dünnwandgleichung? Daraus folgt, daß die Dünnwandlösung anwendbar ist:

$$10t = 10 \cdot 6 = 60 \text{ mm}$$

$$r = \frac{300 \text{ mm}}{2} = 150 \text{ mm}$$

$$60 \text{ mm} < 150 \text{ mm}$$

Der Vergleich dieser Spannung mit der maximalen

$$\sigma = \frac{Pr}{t} = \frac{0,3 \text{ N/mm}^2 \cdot 150 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 7,5 \text{ N/mm}^2$$

Zugspannung des Materials (130 N/mm<sup>2</sup> bei 50% r.L.) zeigt, daß die in Betracht gezogene Dünnwandkonstruktion für vorübergehende Druckspannungen der angenommenen Höhe mehr als ausreichend ist. Falls das Druckgefäß dieser Belastung länger ausgesetzt werden soll, müssen entsprechend erweiterte Tests durchgeführt werden.

$$\sigma = \frac{Pr}{2t} = \frac{0,3 \text{ N/mm}^2 \cdot 150 \text{ mm}}{2 \cdot 6 \text{ mm}} = 3,75 \text{ N/mm}^2$$

Das unterstreicht die Zweckmäßigkeit dieser Form.

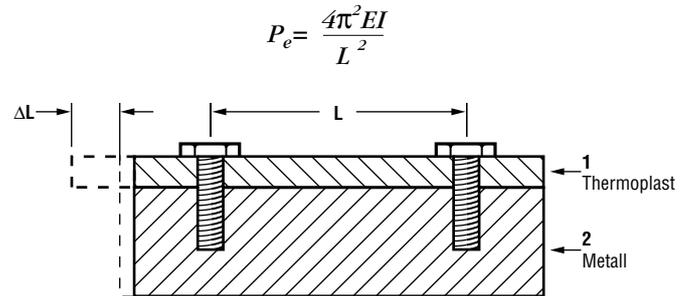
## Wärmeausdehnung und Spannung

Thermische Spannungen sind in der Regel kein großes Problem, außer wenn Materialien mit unterschiedlicher Wärmeausdehnung miteinander verbunden werden; beispielsweise ein thermoplastisches mit einem Metallteil.

Bei fester Montage neigt das Material mit der größeren Wärmeausdehnung zum Stauchen und kann sich verziehen. Um dies zu verhindern, muß die Maximalspannung des Materials größer sein als die beim Ausdehnen entstehende Druckspannung. Die kritische Druckspannung ( $\sigma_{cc}$ ) läßt sich mit der Euler-Gleichung der Stauchbelastung ( $P_e$ ) berechnen:

Bild III-36.

### Thermoplast Metall



Für die kritische Druckspannung gilt:

$$\sigma_{cc} = \frac{P_e}{A_1}$$

$\sigma_{cc}$  = kritische Druckspannung

$A_1$  = Querschnittsfläche von Material 1

$I$  = Trägheitsmoment von Material 1

$E$  = Elastizitätsmodul

Mit nachstehender Gleichung kann der Unterschied der Wärmeausdehnung zweier Materialien (1 & 2) berechnet werden:

$$\Delta L = (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T L$$

$\alpha_1$  = Wärmeausdehnungskoeffizient von Material 1

$\alpha_2$  = Wärmeausdehnungskoeffizient von Material 2

$\Delta L$  = Längenänderung

$\Delta T$  = Temperaturänderung

$L$  = Abstand zwischen Befestigungsmittelpunkten

Die Formel zur Kalkulation der thermischen Spannung ist:

$$\sigma_c = (\alpha_1 - \alpha_2) E \Delta T$$

Falls  $\sigma_c > \sigma_{cc}$ , muß mit Stauchung und Verzug gerechnet werden. Dies läßt sich durch eine der folgenden Maßnahmen vermeiden:

## Schlagspannung

Schlagspannung tritt auf, wenn das Material kurzfristig durch eine Schlag- oder Stoßkraft belastet wird. Beim Konstruieren schlagfester Teile ist es sehr wichtig, die Spannungskonzentrationen zu minimieren. Bohrungen, Kerben, Nuten, Vertiefungen, scharfe Ecken und Kanten, sowie Rippen und Nocken sind potentielle Spannungskonzentratoren, die zu Schlagbruch führen können. Zu den typischen Schwachstellen zählen außerdem Fließnähte.

Modifizieren Sie die Konstruktion möglichst so, daß die Schlagspannung reduziert und über einen größeren Bereich verteilt wird.

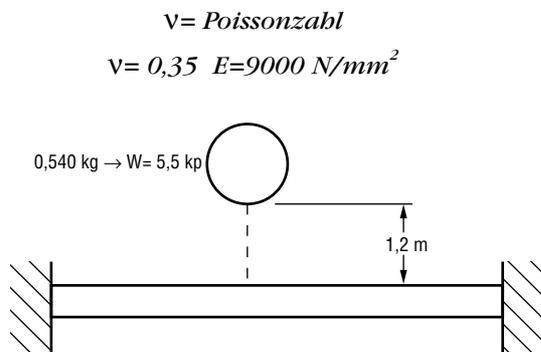
Um die schlagbedingte (dynamische) Spannung, Durchbiegung oder Dehnung zu ermitteln, benötigen wir die statische Durchbiegung ( $y_{static}$ ) und statische Spannung ( $\sigma_{static}$ ) des Formteils. Aus  $y_{static}$  läßt sich ein Verstärkungskoeffizient ( $K_D$ ) ableiten, der dann mit  $y_{static}$  bzw.  $\sigma_{static}$  multipliziert zu Näherungswerten der dynamischen Durchbiegung ( $y_{dynamic}$ ) und dynamischen Spannung ( $\sigma_{dynamic}$ ) führt;  $h$  = Fallhöhe.

$$K_D = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{y_{static}}}$$

### Beispiel:

Eine Last von 0,5 kp fällt aus 1.200 mm Höhe mittig auf eine rundum befestigte, kreisförmig plane Thermoplastplatte mit 0,6 mm Durchmesser.

Bild III-37



Zum Berechnen der statischen Durchbiegung und statischen Spannung greifen wir auf die Formeln in Bild III-31 zurück:

$$y_{static} = \frac{-3W(m^2-1)r^2}{16\pi Em^2t^3}$$

$$= \frac{-3(5,5) \left( \left( \frac{1}{0,35} \right)^2 - 1 \right) 38^2}{16\pi 9000 \left( \frac{1}{0,35} \right)^2 6,35^3}$$

$$= 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$$

$$\sigma_{static} = \frac{3W}{4\pi t^2}$$

$$= \frac{3(5,5 \text{ N})}{4\pi (6,35 \text{ mm})^2}$$

$$= 3,256 \cdot 10^2 \text{ N/mm}^2$$

Dann berechnen wir den Verstärkungskoeffizienten:

$$K_D = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{y_{static}}}$$

$$= 1 + \sqrt{1 + \frac{2(-1200 \text{ mm})}{-1,8 \cdot 10^{-4} \text{ mm}}}$$

$$= 3652,5$$

Durch Einsetzen erhalten wir nun die dynamische Durchbiegung und dynamische Spannung:

$$y_{dynamic} = K_D y_{static}$$

$$= 3652,5 \cdot (-1,8 \cdot 10^{-4}) \text{ mm}$$

$$= -0,657 \text{ mm}$$

$$\sigma_{dynamic} = K_D \sigma_{static}$$

$$= 3652,5 \cdot 3,256 \cdot 10^2 \text{ N/mm}^2$$

$$= 119 \text{ N/mm}^2$$

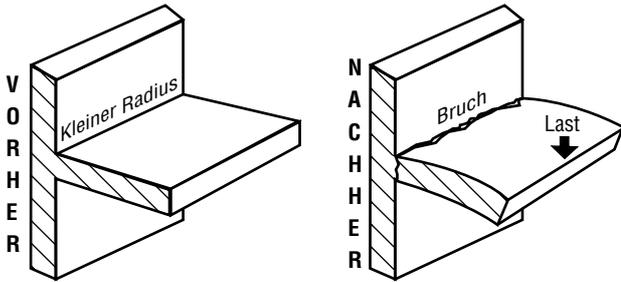
Bitte beachten Sie, daß diese Methode nur Näherungswerte liefert, die auf bewährte Weise durch praxisnahe Schlagprüfungen verifiziert werden sollten.

# Spannungskonzentration

Wenn Bereiche mit unregelmäßiger Geometrie belastet werden, können hohe lokale Spannungen bzw. Spannungskonzentrationen auftreten (Bild III-38). Zu diesen spannungserhöhenden Faktoren zählen Bohrungen, scharfe Kanten und Ecken, abrupte Wanddickenübergänge und zahlreiche weitere geometrische Merkmale.

**Bild III-38.**  
Spannungskonzentrationsfaktor

**Spannungskonzentration = Spannungszunahme**

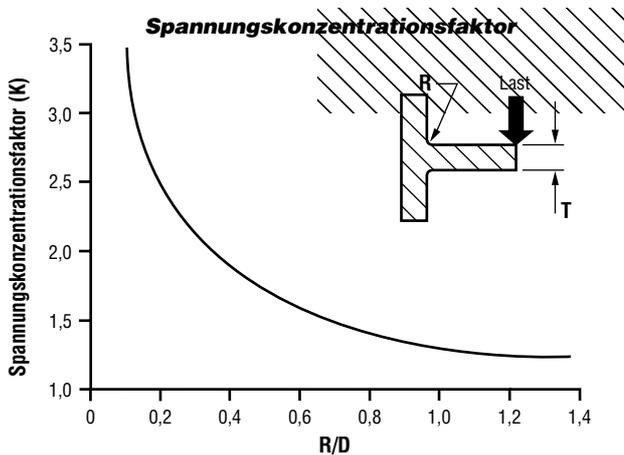


Spannungskonzentration bei zu kleinem Radius Bruch durch Spannungskonzentration

Oft ist es schwer, die effektive Spannung in diesen Bereichen zu berechnen. Es gibt jedoch eine brauchbare Methode, um sie zu schätzen. Bild III-39 zeigt die Kurve für eine definierte Konfiguration. Je kleiner der Innenradius (R) im Verhältnis zur Wanddicke (D), desto größer die Spannungskonzentration (Faktor K).

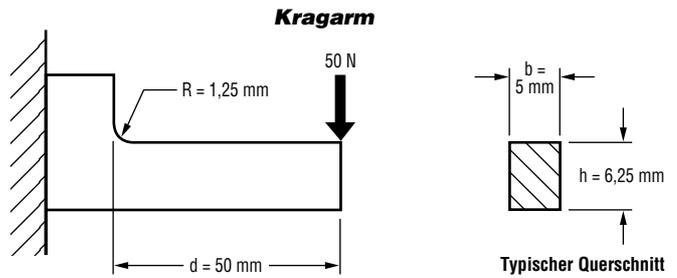
**Bild III-39.**  
Spannungskonzentrationsfaktor

Illustration: Peterson, R.E., Stress Concentration Factors



Die effektive Spannung kann nun durch Multiplizieren der berechneten Spannung mit dem Konzentrationsfaktor K ermittelt werden.

Beispiel:



$$\begin{aligned}
 M &= Fd \\
 &= 50 \text{ N} \cdot 50 \text{ mm} \\
 &= 2,5 \text{ Nm} \\
 e &= \frac{b}{2} \\
 &= 3,125 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{bb^3}{12} = \frac{5 \text{ mm} \cdot 6,25^3 \text{ mm}^3}{12} \\
 &= 101,725 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

**Falsch**

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \frac{Me}{I} \\
 &= \frac{2500 \text{ Nmm} \cdot 3,125 \text{ mm}}{101,725 \text{ mm}^4}
 \end{aligned}$$

$$\sigma = 76,8 \text{ N/mm}^2$$

**Richtig**

$$\sigma = K \frac{Me}{I}$$

$$\frac{R}{b} = \frac{1,25 \text{ mm}}{6,25 \text{ mm}} = 0,2$$

$$K = 2,5$$

$$\sigma = 2,5 \cdot 76,8 \text{ N/mm}^2 = 192 \text{ N/mm}^2$$

Bei der oben abgebildeten Konstruktion und Lastannahme müßte mit einer Spannungskonzentration auf 205 MPa gerechnet werden. Beachten Sie demgegenüber, daß dieser Wert sich bei einem Innenradius (R) von 6 mm (R/D = 1) nahezu halbiert.

# Rippenauslegung

Oft muß beim Konstruieren entschieden werden, wie viele Rippen erforderlich sind, um die Spannung bei einem ursprünglich unversteiften Teil gleichmäßig zu verteilen. So wird bei der Substitution einer Aluminium- oder Stahlkonstruktion durch ein thermoplastisches Formteil in der Regel erwartet, daß dieses mindestens genauso steif wie das Metallteil ist.

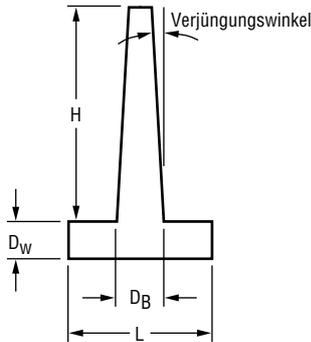
Im folgenden wird beschrieben, wie sich die Anzahl der erforderlichen Versteifungsrippen berechnen und das Gewicht des Teils minimieren lassen, ohne die Verarbeitung zu erschweren oder die Belastbarkeit zu beeinträchtigen.

Verjüngungswinkel (Entformungsschräge):  $0,5^\circ$

Verhältnis der Rippendicke an der Basis zur Plattenwanddicke:  $D_B/D_W = 0,75$

Alle Werte pro Einheit der Plattenwanddicke  $D_W$ .

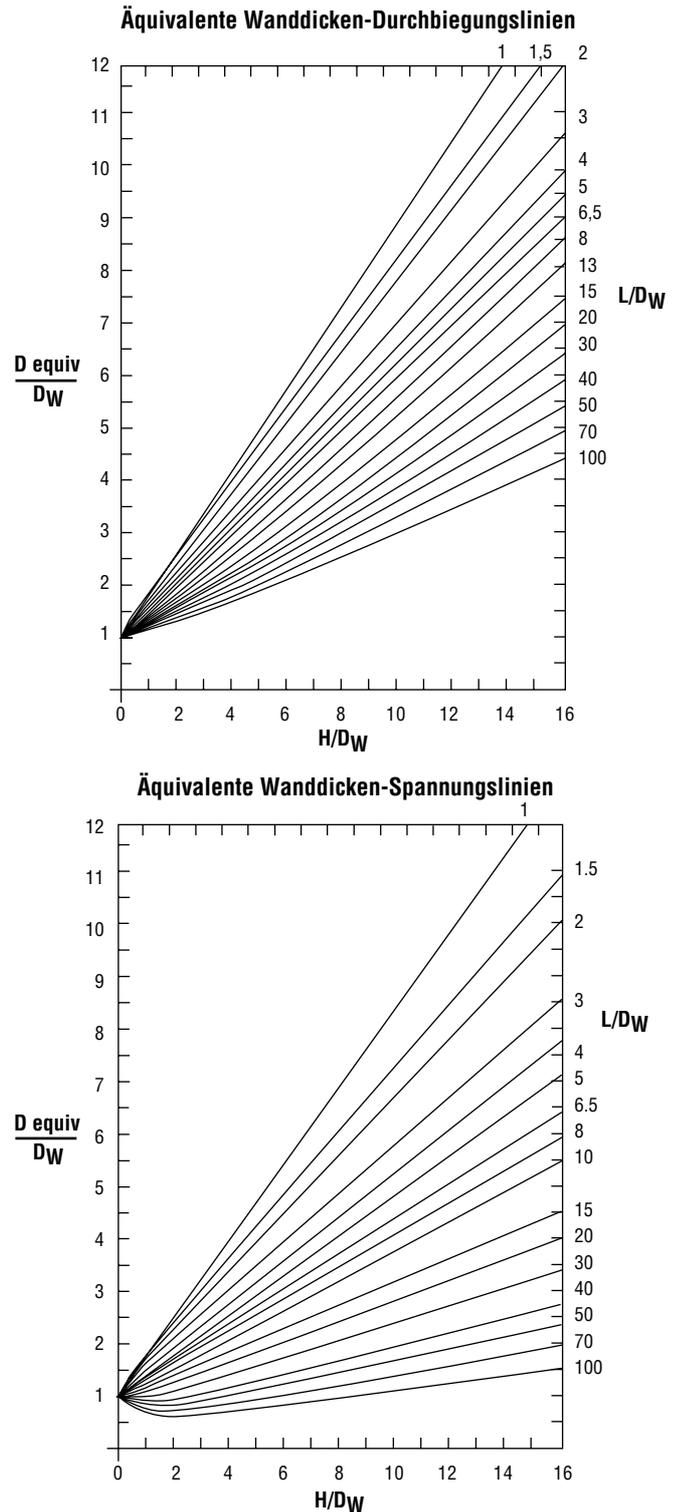
**Bild III-40.**  
Versteifungsrippe mit Entformungsschräge



- Wobei  $D_W$  = Plattenwanddicke  
 $D_B$  = Rippendicke an der Basis  
 $L$  = Rippenabstand  
 $H$  = Rippenhöhe

Die Äquivalenzkurven (Bild III-41) wurden für eine Platte mit  $D_B/D_W = 0,75$  und beidseitig um  $0,5^\circ$  abgeschrägten Versteifungsrippen erstellt. Ähnliche Kurven stehen auch für zahlreiche andere Konfigurationen bereit.

**Bild III-41.**  
Äquivalente Waddickenkurven



Um diese Kurven zur Umkonstruktion eines Aluminium- auf ein gleich steifes Thermoplastteil zu nutzen, müssen einige Verhältnisse und die Vergleichswanddicke  $D_{equiv}$  berechnet werden. Dann wird eine Nennwanddicke ( $D_W$ ) und entweder die Rippenhöhe ( $H$ ) oder die Anzahl der Rippen gewählt, um anhand der Kurven das geeignete Rippenmuster zu ermitteln. Umgekehrt lässt sich auch die Spannung bzw. Spannungsverteilung für einen gerippten Träger ermitteln, wobei dieser im Prinzip auf eine plane Platte reduziert wird.

### Beispiel:

Nachfolgend die Berechnung zur Substitution einer 200 mm x 300 mm großen, 3 mm dicken Aluminiumplatte durch eine gleich steife Platte aus glasfaserverstärktem Polyamid, einmal ohne und danach mit Versteifungsrippen. Für den ersten Fall gilt:

$$E_A t_A^3 = E_P t_P^3 \quad (\text{vgl. Seite III-18})$$

Bekannt sind:

$$E_{\text{Aluminium}} = 70000 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{\text{Kunststoff}} = 3500 \text{ N/mm}^2$$

Daraus folgt:

$$t_P = \left( \frac{E_A t_A^3}{E_P} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$= \left( \frac{70000 \text{ N/mm}^2 \cdot 3^3 \text{ mm}^3}{3500 \text{ N/mm}^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$t_P = W_{equiv} = 8,14 \text{ mm}$$

Dies wäre die erforderliche Wanddicke des thermoplastischen Teils, wenn die ursprüngliche Steifigkeit der Aluminiumplatte ohne Versteifungsrippen erreicht werden soll. Da diese Wanddicke größer ist, als im Spritzgießverfahren wünschenswert, ist die gerippte Konstruktion die bessere Alternative.

Hierfür müssen die Nennwanddicke ( $D_W$ ) und entweder die Rippenhöhe ( $H$ ) oder den Rippenabstand ( $L$ ) definieren. Nehmen wir also an:  $D_W = 3 \text{ mm}$  und  $H = 18 \text{ mm}$ .

Daraus folgt:

$$\frac{W_{equiv}}{W} = \frac{8,14 \text{ mm}}{3 \text{ mm}} = 2,713$$

$$\frac{H}{W} = \frac{17,4 \text{ mm}}{3 \text{ mm}} = 5,8$$

$$\frac{T}{W} = 0,75 \Rightarrow T = 0,75 \cdot 3 \text{ mm}$$

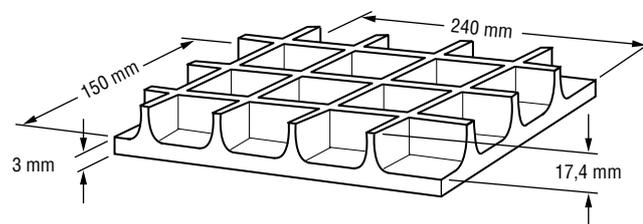
$$= 2,25 \text{ mm}$$

Da wir die gleiche Durchbiegungscharakteristik (Steifigkeit) wie bei der Aluminiumplatte anstreben, können wir aus dem Schnittpunkt der beiden Verhältnisse  $D_{equiv}/D_W$  und  $H/D_W$  in der Wanddicken-Durchbiegungsgrafik die entsprechende  $S/D_W$ -Linie ablesen und daraus den Abstand  $S$  berechnen:

Das heißt, wir würden für ein 200 mm x 300 mm großes Kunststoffteil mit 3 mm Nennwanddicke und gleicher Steifigkeit 3x 4 Versteifungsrippen benötigen. Bild III-42 illustriert dieses Resultat.

**Bild III-42.**

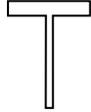
**Kreuzgerippte Kunststoffplatte mit der Steifigkeit einer Aluminiumplatte derselben Größe und Nennwanddicke**



Hinweis: Um die Spannungen in der Platte zu reduzieren, sollten die Radien an der Rippenbasis großzügig abgerundet werden.

Tabelle III-1 zeigt das Verhältnis von Gewicht und Steifigkeit anhand unterschiedlicher Rippenhöhen.

Tabelle III-1

Gewicht und Steifigkeit eines gerippten Teils mit 6 mm Nennwanddicke und 50 mm Rippenabstand bei unterschiedlicher Rippenhöhe					
Fall	Form	Rippenabmessungen	Rippenhöhe/Wanddicke	Prozentuale Gewichtszunahme	Prozentuale Steifigkeitszunahme
0		k.A.	N/A	N/A	N/A
1		k.A.	N/A	100%	700%
2		2,5 mm B x 2,5 mm H	1:2	3,12%	21%
3		2,5 mm B x 5 mm H	1:1	6,25%	77%
4		2,5 mm B x 10 mm H	2:1	12,5%	350%
5		2,5 mm B x 15 mm H	3:1	19,0%	927%
6		2,5 mm B x 20 mm H	4:1	25,0%	1900%
7		2,5 mm B x 25 mm H	5:1	31,0%	3353%
D = Dicke = 5 mm					

# Steifigkeitsausgleich

Wenn ein Metallteil durch eine Kunststoffkonstruktion gleicher Steifigkeit substituiert wird, ist auch die Durchbiegung unter Belastung gleich bzw. umgekehrt proportional zum Steifigkeitsmodul ( $R$ ):

$$R = EI$$

Dabei ist  $E$  der Elastizitätsmodul und  $I$  das Trägheitsmoment abhängig von der Geometrie (Bild III-43). Gleicht man den Steifigkeitsmodul aus, dann bieten die Metall- und Kunststoffteile auch gleiche Steifigkeit.

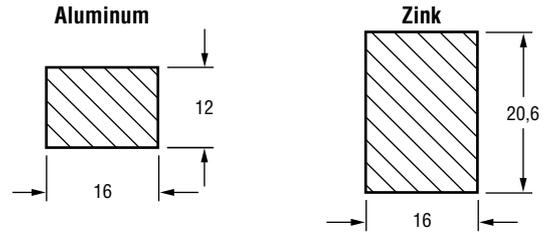
$$E_{\text{Aluminium}} \cdot I_{\text{Aluminium}} = E_{\text{Kunststoff}} \cdot I_{\text{Kunststoff}}$$

Für Körper gleicher Dicke

$$E_{\text{Aluminium}} \cdot t^3_{\text{Aluminium}} = E_{\text{Kunststoff}} \cdot t^3_{\text{Kunststoff}}$$

Bild III-43.

Querschnitte vergleichbarer Steifigkeit:

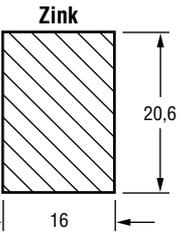


$$E = 71000 \text{ N/mm}^2$$

$$I = 2304 \text{ mm}^4$$

$$EI = 1,636 \cdot 10^8 \text{ N/mm}^2$$

$$A = 192 \text{ mm}^2$$

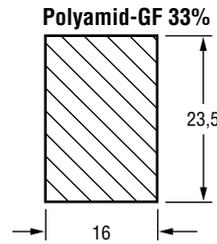


$$E = 14000 \text{ N/mm}^2$$

$$I = 11685 \text{ mm}^4$$

$$EI = 1,636 \cdot 10^8 \text{ N/mm}^2$$

$$A = 330 \text{ mm}^2$$

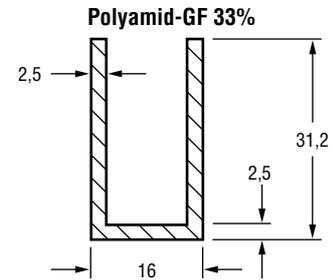


$$E = 9400 \text{ N/mm}^2$$

$$I = 17403 \text{ mm}^4$$

$$EI = 1,636 \cdot 10^8 \text{ N/mm}^2$$

$$A = 377 \text{ mm}^2$$



$$E = 9400 \text{ N/mm}^2$$

$$I = 17403 \text{ mm}^4$$

$$EI = 1,636 \cdot 10^8 \text{ N/mm}^2$$

$$A = 183 \text{ mm}^2$$

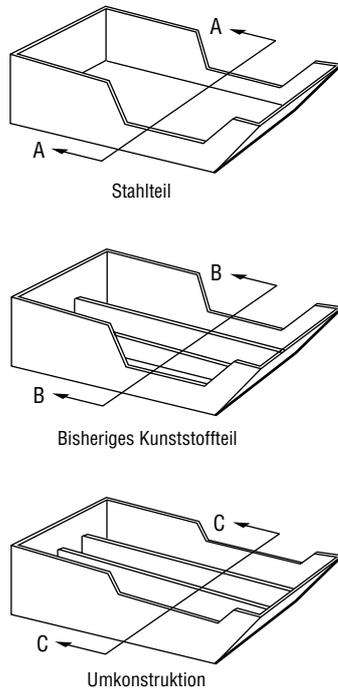
## **Konstruktionsbeispiele**

Träger für Geschwindigkeitsregler .....	IV-2
Abdeckung .....	IV-4

## Teil IV: Konstruktionsbeispiele

### Beispiel 1: Träger für Geschwindigkeitsregler

**Bild IV-1.**  
Träger für Geschwindigkeitsregler



**Anwendung:** Träger für einen Kfz-Geschwindigkeitsregler

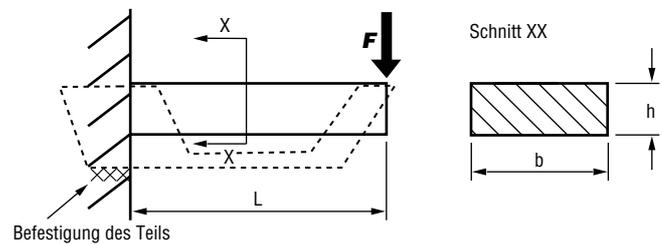
**Problem:** Träger nach Umkonstruktion von Stahl auf Kunststoff nicht steif genug; bricht bei Belastung

**Mögliche Ursachen:**

- a) Material
- b) Verarbeitung
- c) Konstruktion

**Analyse:** Anhand eines einfachen Tragarms (praxisnahe Einsatzbedingung, vgl. Umriß des Trägers in Bild IV-2)

**Bild IV-2.**  
Steifigkeitsmodul  $R = EI$



$E =$  Elastizitätsmodul

$I =$  Trägheitsmoment

$R =$  erhöht sich dabei mit  $E$  und/oder  $I$

Hinweis: Beachten Sie, daß nur der kleinere Querschnitt analysiert wurde, da das Teil am befestigten Ende einen größeren Modul aufweist und erheblich steifer ist als in der Mitte.

Da  $I = bh^3/12$ , hat schon eine geringe Änderung der Höhe großen Einfluß auf das Trägheitsmoment und wirkt sich somit auch deutlich auf den Steifigkeitsmodul aus:

Wird **h** beispielsweise verdoppelt, erhöht sich **R** um den Faktor 8!

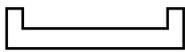
Wenn die Kunststoffkonstruktion mindestens genauso steif wie das Stahlteil sein soll, dann gilt:

$$EI_{\text{kunststoffe}} \geq EI_{\text{stahl}} \text{ N/mm}^2$$

$EI_{\text{kunststoff}} (EI_{\text{stahl}} \text{ (kg/m}^2\text{)})$

Für  $E_{\text{kunststoff}} = 5.100 \text{ N/mm}^2$  (Capron® 8233) und  $E_{\text{stahl}} = 210.000 \text{ N/mm}^2$  (beide Werte bei 50% r.L.) ergeben sich folgende Berechnungen:

**Bild IV-3.**

<b>Schnitt AA</b>	<b>Schnitt BB</b>	<b>Schnitt CC</b>
	Kunststoff	
Ursprüngliches Stahlteil	Bisherige Konstruktion	Umkonstruktion
		
$I = 80 \text{ mm}^4$	$I = 320 \text{ mm}^4$	$I = 16400 \text{ mm}^4$
$IE = 16,8 \cdot 10^6 \text{ N/mm}^2$	$IE = 1,63 \cdot 10^6 \text{ N/mm}^2$	$IE = 836,4 \cdot 10^6 \text{ N/mm}^2$

**Fazit:**

- a) Ein Materialwechsel wäre keine effektive Lösung des Problems, würde die Kosten erhöhen und eine erneute Abnahme des Teils erfordern.
- b) Laboruntersuchungen ergaben, daß die Problemursache nicht in der Verarbeitungsqualität lag.
- c) Das Kunststoffteil wurde erfolgreich umkonstruiert.

## Beispiel 2: Abdeckung

**Anwendung:** Abdeckung

**Problem:** Abmessungen größer als spezifiziert;  
Abdeckung unbrauchbar

**Mögliche Ursachen:**

- a) Material
- b) Verarbeitung

**Kundenbericht:**

- 1) Teile bei Lieferung inspiziert, von der Qualitätssicherung akzeptiert, gelagert.
- 2) Teile nach fünf Monaten für eine Bestellung benötigt.
- 3) Teile 0,11 mm zu groß, vom Endkunden abgelehnt.

**Analyse:**

Die Abdeckung wurde aus Capron® 8233 hergestellt. Die spezifizierte Abmessung hatte einen Durchmesser von 50,05 mm. Es lag nahe, den Grund für die Abweichung in der Aufnahme von Feuchtigkeit zu vermuten.

Falls die Teile ursprünglich kurz nach dem Entformen gemessen wurden, waren sie spritztrocken. Abmessungen, Gewicht und Volumen sind in der Praxis jedoch von der Feuchtigkeitsaufnahme abhängig. Bild IV-4 zeigt, daß der Faktor der Maßabweichung bei 50% relativer Luftfeuchtigkeit für Capron® 8233 ca. 0,0025 mm/mm beträgt. 50% r.L. ist ein globaler Durchschnittswert, der bei allen kritischen Abmessungen berücksichtigt werden sollte.

$$C = 2 \cdot \pi \cdot r$$

*oder*

$$C = \pi \cdot D$$

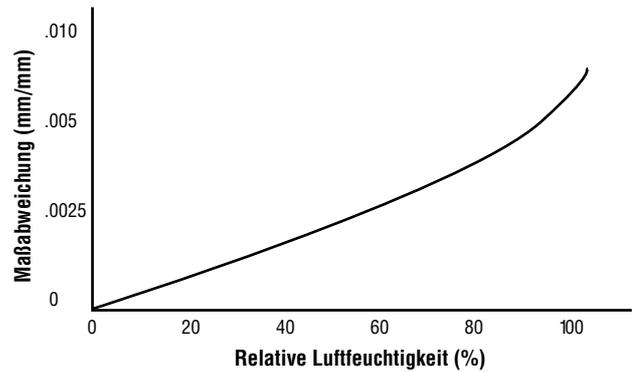
Wobei

*r* = *radius*

*D* = *Durchmesser*

Bei Multiplikation des Abweichungsfaktors mit dem Durchmesser (50,50 mm) erhalten wir eine Zunahme von fast 0,13 mm, was dem beanstandeten Übermaß der Teile nach Lagerung entspricht und der Fehlerbeseitigung zugrunde gelegt wurde.

Bild IV-4.



**Fazit:**

- a) Die Maßabweichung in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit ist bei diesem Kunststoff nur dann von Bedeutung, wenn sehr enge Toleranzen eingehalten werden müssen.
- b) Teile nach fünf Monaten für eine Bestellung benötigt.
- c) Teile 0,11 mm zu groß, vom Endkunden abgelehnt.

## **Montage- und Fügetechniken**

Schnappverbindungen. . . . .	V-2
Konstruktionskriterien für Schnappverbindungen . . . . .	V-2
Rechteckige oder runde Schnapphakenträger . . . . .	V-2
Gerade oder abgeschrägte Schnapphakenträger. . . . .	V-2
Kurze Schnapphaken. . . . .	V-3
Neue Formeln für Schnapphaken . . . . .	V-4
Konstruktionsbeispiel . . . . .	V-4
Preßpassungen . . . . .	V-5
Klebeverbindungen. . . . .	V-6
Schrauben, Muttern und Gewinde . . . . .	V-8
Eingeförmte Gewinde . . . . .	V-9
Schneidschrauben . . . . .	V-10
Einsatzmethoden . . . . .	V-11
Ultraschallschweißen. . . . .	V-12
Scherschweißverbindungen . . . . .	V-12
Ultraschallkonzentratoren . . . . .	V-13
Vibrationsschweißen. . . . .	V-14
Sonstige Fügetechniken. . . . .	V-15
Thermoplastisches Vernieten. . . . .	V-15
Rotationsschweißen . . . . .	V-15
Induktionsschweißen . . . . .	V-16

## Schnappverbindungen

### Konstruktionskriterien für Schnappverbindungen

Zwei- oder mehrteilige Konstruktionen sind mit Schnappverbindungen einfach, kostengünstig und schnell montiert. Bei korrekter Auslegung lassen sich die Teile mehrfach aus- und wiedereinbauen, ohne den sicheren Sitz der Schnapphaken zu beeinträchtigen. Das macht die Schnappverbindung außerdem zu einer wartungs- und recyclinggerechten Montagetechnik.

Der Konstrukteur sollte jedoch einige Grenzen beachten: Dazu zählen das mögliche Spiel der Schnappverbindung aufgrund der summierten Toleranzen beider Teile sowie der niedrigen Ausziehungskräfte. Schnappverbindungen können die Kosten des Spritzgießwerkzeugs erhöhen, wenn sie den Einsatz von Schiebern erfordern. Dies läßt sich jedoch durch einen zusätzlichen Schlitz unmittelbar unter der Schnappkante oder durch Verlegen der Schnappverbindung an eine Außenkante des Formteils vermeiden.

### Rechteckige oder runde Schnapphaken

In den meisten Fällen basiert die Schnappverbindung auf einem rechteckigen Schnapphaken. Die zylinderförmige Alternative (Bild V-1) kann bei Teilen aus ungefüllten bzw. unverstärkten Polymeren eingesetzt werden. Ein typisches Beispiel sind aufsnappbare runde Verschlusskappen.

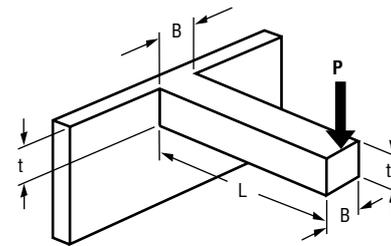
Um einen rechteckigen Kragarm als Schnapphaken auszulegen, muß der Konstrukteur schrittweise vorgehen - Änderung von Länge und Wanddicke, Durchbiegungskriterien etc. Ziel ist eine Konstruktion, deren Dehnung niedriger ist als die zulässige Dehnung des Materials (siehe Beispiel auf Seite V-4).

### Gerade oder abgeschrägte Schnapphaken

In den meisten Fällen genügt zur Konstruktion von Schnapphaken ein Kragarm mit konstantem Querschnitt. Abgeschrägte Kragarme eignen sich dort, wo eine höhere Durchbiegung gewünscht wird (Bild V-2).

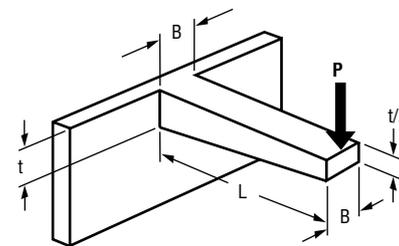
Bild V-2.

Standardformeln für rechteckige Schnapphaken



#### KONSTANTER QUERSCHNITT

$$\varepsilon = 1,50 \frac{t}{L^2} = Y$$



#### VERJÜNGTER QUERSCHNITT

$$\varepsilon = 0,92 \frac{t}{L^2} = Y$$

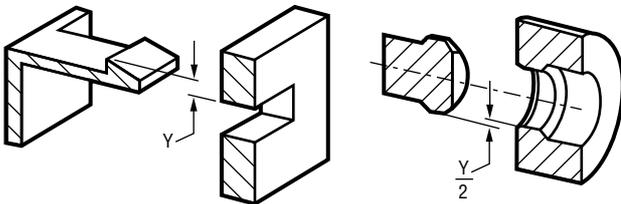
Bild V-1.

#### Rechteckige Konstruktion

(auch mit verstärkten/gefüllten Polymeren)

#### Zylindrische Konstruktion

(nur mit unverstärkten/ungefüllten Polymeren)



### Kurze Schnapphaken

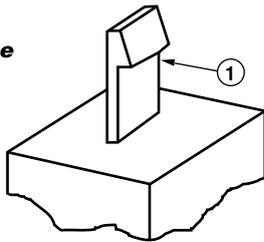
Die herkömmlichen Formeln zur Berechnung der Durchbiegung von Schnapphakenträgern liefern deutlich geringere Werte, als sie bei kurzen Schnapphaken (trägern) auftreten. Diese Formeln gehen davon aus, daß die Trägerwand steif bleibt, was jedoch nur bei langen Trägern der Fall ist. Bei kurzen Schnapphaken durchbiegt sich die Trägerwand unter Belastung.

Praxistests und Finite-Elemente-Analysen von AlliedSignal haben dies bewiesen. Die Resultate der Untersuchung sind in Bild V-4 für unterschiedliche Konfigurationen (Bild V-3) zusammengefaßt. Auf Seite V-4 finden Sie ein entsprechendes Konstruktionsbeispiel und neue Formeln zur Berechnung der maximalen Dehnung, Durchbiegung und erforderlichen Schnappkraft. Fragen Sie unseren technischen Service nach dem speziellen Handbuch über Schnappverbindungen (deutsch in Vorbereitung)

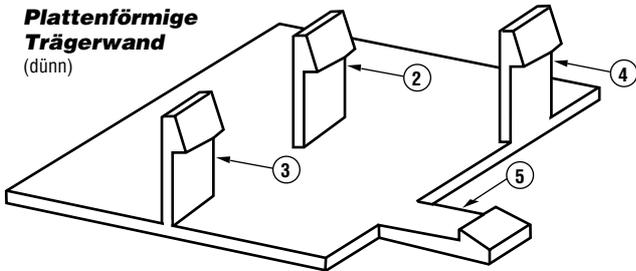
<sup>1</sup> 1987 SPE ANTEC, Chul S. Lee, Alana Dublin and Elmer D. Jones, „Short Cantilever Beam Deflection Analysis Applied to Thermoplastic Snap-fit Design“, Vortrag in Los Angeles, Kalifornien, USA.

**Bild V-3.**  
Unterschiedliche Auslegung kurzer Schnapphaken

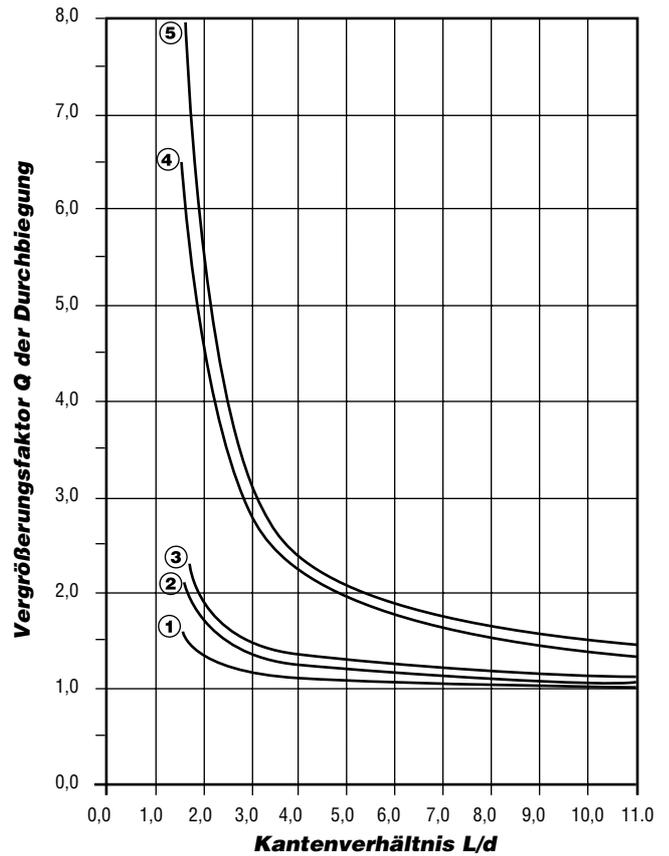
**Blockförmige Trägerwand**  
(massiv)



**Plattenförmige Trägerwand**  
(dünn)



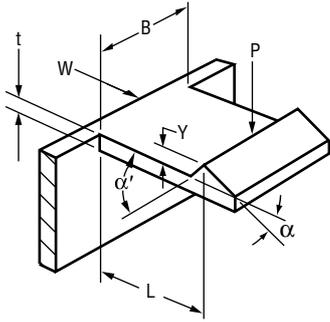
**Bild V-4.**  
Faktor Q



HINWEIS: DIE ZAHLEN IN KREISEN BEZIEHEN SICH AUF DIE KONFIGURATIONSBEISPIELE IN BILD V-3.

## Neue Formeln für Schnapphaken

Bild V-5.



**MAXIMALE DEHNUNG**

$$\epsilon_o = 1,5 \frac{tY}{L^2 Q}$$

Wobei

$\epsilon_o$  = Maximale Dehnung an der Basis  
 $t$  = Trägerdicke  
 $Y$  = Durchbiegung  
 $L$  = Trägerlänge  
 $Q$  = Durchbiegungsfaktor

**SCHNAPPKRAFT:**

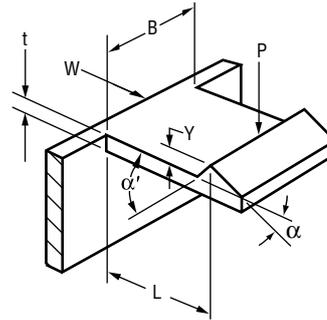
$$F = P \frac{\mu + \tan \alpha}{1 - \mu \tan \alpha} \quad F_v = \frac{Bt^2 \epsilon_o}{6LQ}$$

Wobei

$F$  = Aufschnappkraft  
 $F'$  = Abzugskraft  
 $F_v$  = Vertikalkraft  
 $\mu$  = Reibungskoeffizient  
 $\alpha$  = Vorwinkel  
 $\alpha'$  = Gegenwinkel  
 $B$  = Trägerbreite  
 $t$  = Trägerdicke  
 $E$  = Biegemodul  
 $\epsilon_o$  = Dehnung  
 $L$  = Trägerlänge  
 $Q$  = Durchbiegungsfaktor  
 (vgl. Bild V-4)

Bild V-6.

**Konstruktionsbeispiel:**



**GEGEBEN:**

Material. => (PETRA® 130 (PET))

$t = 3 \text{ mm}$   
 $L = 15 \text{ mm}$   
 $B = 6 \text{ mm}$   
 $E = 9000 \text{ N/mm}^2$   
 $\mu = 0,2$   
 $\alpha = 30,0^\circ$   
 $\epsilon_o = 1,5\%$

**BERECHNE:**

- A) DIE MAXIMAL ZULÄSSIGE DURCHBIEGUNG DES SCHNAPPHAKENS  
 B) DIE ERFORDERLICHE SCHNAPPKRAFT

**LÖSUNG:**

- A) MAXIMAL ZULÄSSIGE DURCHBIEGUNG

$$\epsilon_o = 1,5 \frac{tY_{max}}{L^2 Q} \Rightarrow Y_{max} = \frac{\epsilon_o L^2 Q}{1,5 t}$$

$$\frac{L}{t} = 5,0 \Rightarrow Q = 2,0$$

$$Y_{max} = \frac{0,015 \cdot 15^2 \text{ mm}^2 \cdot 2,0}{1,5 \cdot 3 \text{ mm}} = 1,5 \text{ mm}$$

Im konkreten Anwendungsfall würde daher zur Sicherheit ein kleinerer Durchbiegungswert (Y) gewählt werden.

- B) ERFORDERLICHE SCHNAPPKRAFT

$$F_v = \frac{Bt^2 E \epsilon_o}{6LQ}$$

$$F_v = \frac{6 \text{ mm} \cdot 3^2 \text{ mm}^2 \cdot 9000 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,015}{6 \cdot 15 \text{ mm} \cdot 2} = 40,5 \text{ N}$$

$$F = F_v \frac{\mu + \tan \alpha}{1 - \mu \tan \alpha}$$

$$F = 40,5 \frac{0,2 + \tan 30}{1 - 0,2 (\tan 30)} = 35,6 \text{ N}$$

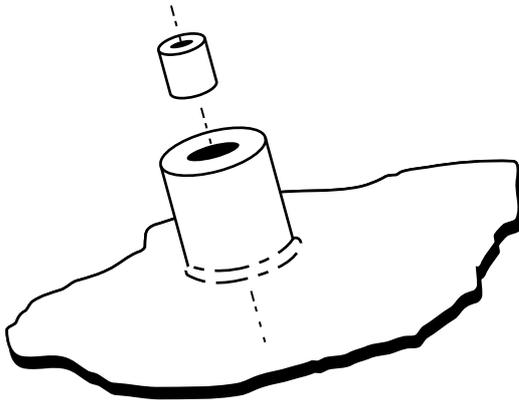
Demnach wäre eine Schnappkraft erforderlich, damit die Schnappverbindung hält.

(Weitere Details finden Sie in unserem speziellen Handbuch über Schnappverbindungen (deutsch in Vorbereitung)).

# Preßpassungen

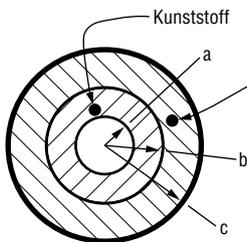
Bild V-7 zeigt eine typische Preßpassung. Diese in der Metalltechnik gängige Montageweise erfordert bei thermoplastischen Teilen zwar einige besondere Erwägungen, ist aber grundsätzlich möglich und wird häufig eingesetzt. Aufgrund der Kriechneigung und Spannungsrelaxation von Kunststoffen muß der Konstrukteur mit einer erheblichen Verringerung der anfänglichen Preßkraft rechnen. Gut konstruierte Preßpassungen zeichnen sich durch minimale Dehnung des Kunststoffs aus (Bilder V-8 & V-9) und berücksichtigen bei der Berechnung der Paßkraft die Toleranzen der Teile sowie die Spannungsrelaxation des Kunststoffs.

**Bild V-7.**



**Bild V-8.**

**Preßpassung mit zwei gleichen Materialien**



**RADIALE DEFORMATION**

$$\delta = \frac{2\varepsilon b^3 (c^2 - a^2)}{(c^2 + b^2)(b^2 - a^2)}$$

**WOBEI:**

$\delta$  = Radiale Deformation  
 $\varepsilon$  = Dehnung

**WENN  $a = 0$**

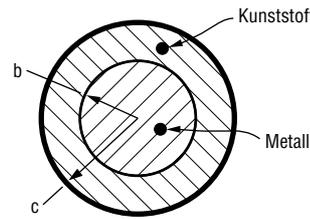
$$\delta = \frac{2\varepsilon b c^2}{c^2 + b^2}$$

**HINWEIS:**

1. Die radiale Deformation  $d$  muß für das Gesamtübermaß der Preßpassung im Durchmesser verdoppelt werden.
2.  $b$  und  $c$  sind Radien, nicht Durchmesser.
3. Die Formel gilt nur, wenn Stab/Welle und Buchse aus demselben Kunststoff bestehen.
4. Die Kriechneigung des Kunststoffs muß vollständig analysiert und berücksichtigt werden.

**Bild V-9.**

**Preßpassung eines massiven Metallstabs in einer Kunststoffbuchse**



**RADIALE DEFORMATION**

$$\delta = b\varepsilon \left( \frac{c^2 - b^2}{c^2 + b^2} \right) \left( \frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} + \nu_{PL} \right)$$

**WOBEI**

$\delta$  = Radiale Deformation  
 $\varepsilon$  = Dehnung  
 $\nu_{PL}$  = Poissonzahl

**HINWEIS:**

1. Die radiale Deformation  $d$  muß für das Gesamtübermaß der Preßpassung im Durchmesser verdoppelt werden.
2.  $b$  und  $c$  sind Radien, nicht Durchmesser.
3. Die Formel geht davon aus, daß der Metallstab sich nicht verformt.
4. Die Kriechneigung des Kunststoffs muß vollständig analysiert und berücksichtigt werden.

**BEISPIEL:**

Ein Metallstab (Außendurchmesser = mm) soll in eine Buchse aus Capron® 8233 (Außendurchmesser = mm) gepreßt werden. Zu berechnen ist das maximale Übermaß unter Berücksichtigung von 2% zulässiger Dehnung für Capron® 8233.

**LÖSUNG:**

$$\begin{aligned} \delta &= b\varepsilon \left( \frac{c^2 - b^2}{c^2 + b^2} \right) \left( \frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} + \nu_{PL} \right) \\ &= 6,25 \cdot 0,02 \cdot \left( \frac{10^2 - 6,25^2}{10^2 + 6,25^2} \right) \left( \frac{10^2 + 6,25^2}{10^2 - 6,25^2} + 0,35 \right) \\ \delta &= 0,144 \text{ mm} \end{aligned}$$

Der Innendurchmesser der Capron®-Buchse sollte daher für ein Übermaß von mm ( $2d$ ) ausgelegt werden (Minstdurchmesser mm).

## Klebeverbindungen

Kunststoffteile lassen sich in vielen Fällen problemlos, dauerhaft fest und dicht miteinander verkleben. Bei Teilen aus unterschiedlichen Kunststoffen sollten jedoch Recyclingkriterien berücksichtigt werden (Kompatibilität). Bild V-10 zeigt einige Beispiele.

Die Wahl des Klebers hängt von der Anwendung und ihren Einsatzbedingungen ab. Tabelle V-1 nennt einige Kleber, die sich bei Teilen aus Capron®, Petra® und Dimension® bewährt haben. Typische Vor- und Nachteile:

**Polyurethankleber:** Hohe Festigkeit, gute Schlagzähigkeit, gute Kältezähigkeit, meistens 2K-Systeme, begrenzte Feuchtebeständigkeit, lange Aushärtungszeiten, Teile müssen normalerweise fixiert werden.

**Epoxidharzkleber:** Hohe Festigkeit, hohe Temperaturbeständigkeit, meistens 2K-Systeme, geringe Schlagzähigkeit, lange Aushärtungszeiten, Teile müssen normalerweise fixiert werden.

**Cyanacrylatkleber:** (wie Crazy Glue®): Hohe Festigkeit, sehr schnelle Aushärtung, 1K-System, begrenzte Wärmebeständigkeit (< 100°C), geringe Schlagzähigkeit, begrenzte Feuchtebeständigkeit.

**Siliconkleber:** Geringe Festigkeit, sehr hohe Wärmebeständigkeit, gute Kälteelastizität, gute Schlagzähigkeit, gute Dichteigenschaften, lange Aushärtungszeiten, Teile müssen normalerweise fixiert werden, sehr hohe Materialkosten.

\* 3M, Structural Adhesive Guide for Industrial Product Design and Assembly

**Bild V-10.**  
Typische Klebeverbindungen \*

### Einfache Überlappung



### Doppelstoßüberlappung



### Gefalzte Überlappung



### Herkömmliches Nut & Feder-Design



**Tabelle V-1.**  
**Empfohlene Kleber für Polymere von AlliedSignal**

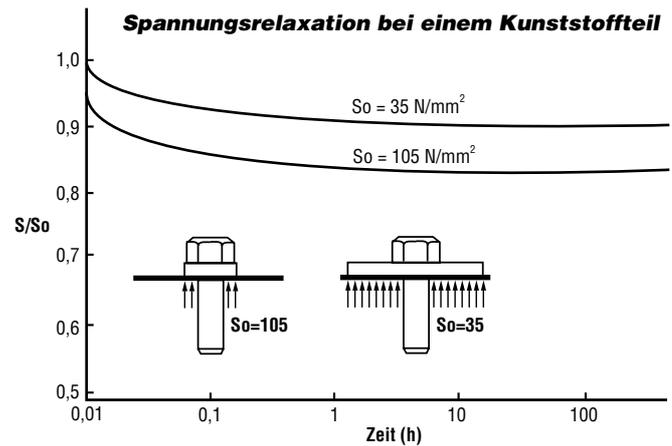
<b>Kleber</b>	<b>Art</b>	<b>Aushrtung</b>	<b>Hersteller</b>
UR 1100	1 K Urethan	30 min at 120° C	HB Fuller (612) 481-3415
FE 6046 (Flexible Epoxy)	2 K Epoxy	60 min at 95° C	HB Fuller (612) 481-3415
Hysol 934	2 K Epoxy	60 min at 95° C	Hysol Aerospace Products (510) 458-8000
Scotch-Weld 2214 Regular	1 K Epoxy	40 min at 120° C	3M Company 1-800-362-3455
Scotch-Weld 2214 Hi-Temp	1 K Epoxy	40 min at 120° C	3M Company 1-800-362-3455
Scotch-Weld 2216	2 K Epoxy	5 min at 120° C	3M Company 1-800-362-3455
Tyrite 5700 A/C	2 K Epoxy	15 min at 95° C	Lord Industrial Adhesives (814) 868-3611
Superbonder 498	Cyanacrylat	30 sec at 23° C	Loctite Corporation 1-800-562-0560
Cylok P	Cyanacrylat	10 - 30 sec at 23° C	Lord Industrial Adhesives (814) 868-3611
Permabond 268	Cyanacrylat	10 sec at 23° C	Permabond Int'l 1-800-526-4741
3-0100	Silicon	24 hrs at 23° C	Dow Corning (517) 496-6000

# Schrauben, Muttern und Gewinde

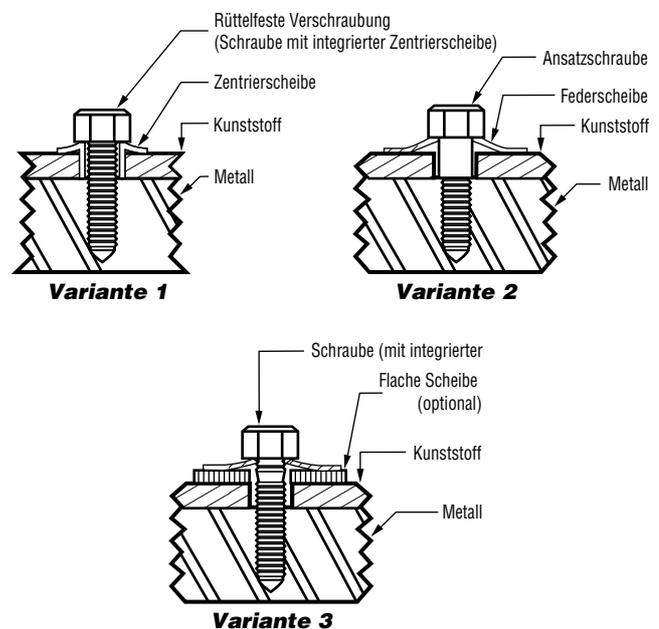
Unter den metallischen Befestigungsmitteln für thermoplastische Teile sind Schneidschrauben am häufigsten. Für Kunststoff/Metall- und Kunststoff/Kunststoff-Montagen werden auch Gewindefschrauben und Muttern eingesetzt. Die auf den Kunststoff wirkende Druckspannung sollte nicht zu hoch sein.

- Schrauben immer mit einem definierten und kontrollierten Drehmoment festziehen. Drehmoment nicht zu schnell aufbringen, da die meisten Kunststoffe darauf empfindlich reagieren.
- Hohe Drehmomente verursachen normalerweise hohe Druckspannung. Die Anfangsspannung nimmt zunächst schnell ab, bevor sich das Spannungsniveau langfristig einstellt. Je höher die Spannung, desto höher die Spannungsrelaxation. Auch erhöhte Temperaturen tragen zur Relaxation bei.
- Schrauben mit breiten Köpfen oder zusätzlichen breiten Unterlegscheiben (auch für Muttern) vergrößern die Kontaktfläche und verringern die Spannung. Bild VII-11 illustriert das Prinzip.
- Flachkopfschrauben und -nieten sollten für Kunststoffteile nicht eingesetzt werden, da sie eine Keilwirkung haben, die hohe Spannungen in der Verbindung bis hin zum Ausfall der Teile verursachen kann.
- Im Verlauf der Spannungsrelaxation des Kunststoffs verliert die Schraubverbindung an Spannkraft und Drehmoment. Federscheiben helfen, der Spannungsrelaxation entgegenzuwirken und den festen Sitz der Schraube sicherzustellen. Bild V-12 illustriert einige Möglichkeiten. Bei Varianten 1 & 2 wird außerdem eine Bundscheibe oder Ansatzschraube eingesetzt, so daß die Befestigung vorwiegend in der Verschraubung mit dem Metallteil beruht, während das Kunststoffteil von einer kleineren Kraft gehalten wird.

**Bild V-11.**  
Berücksichtigung der Spannungsrelaxation beim Konstruieren von Verschraubungen



**Bild V-12.**  
Minimierung der Spannungsrelaxation



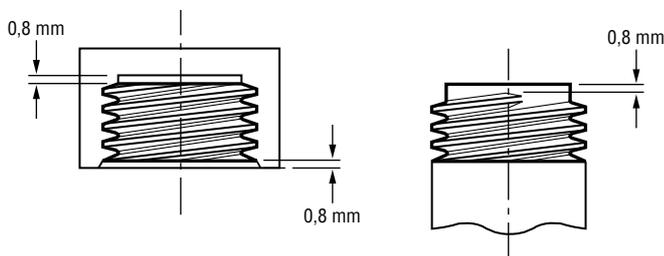
### Eingeformte Gewinde

Einer der Vorteile des Spritzgießens ist die Möglichkeit, unterschiedlichste Funktionen zu integrieren, darunter auch eingeformte Gewinde herkömmlicher oder auf spezifische Anwendungen zugeschnittener Art. Aufgrund ihrer höheren Festigkeit und Drehmomentbegrenzung werden normalerweise grobgängige Gewinde bevorzugt. Für Anwendungen, die hohe Ausziehkräfte erfordern oder hoher Druckbelastung ausgesetzt sind, können Acmetrapez- oder Sägezahngehwinde eingesetzt werden.

Prinzipiell ist zwischen Außen- und Innengewinden zu unterscheiden. In beiden Fällen sollte ein spannungs-entlastender, stumpfer Ansatz am Gewindeauslauf berücksichtigt werden. In der Regel genügen hierfür 0,8 mm. Es hat sich zudem bewährt, am Gewindegrund Radien von 0,12 mm bis 0,25 mm vorzusehen, um auch dort die Spannungskonzentration zu minimieren.

Bild V-13.

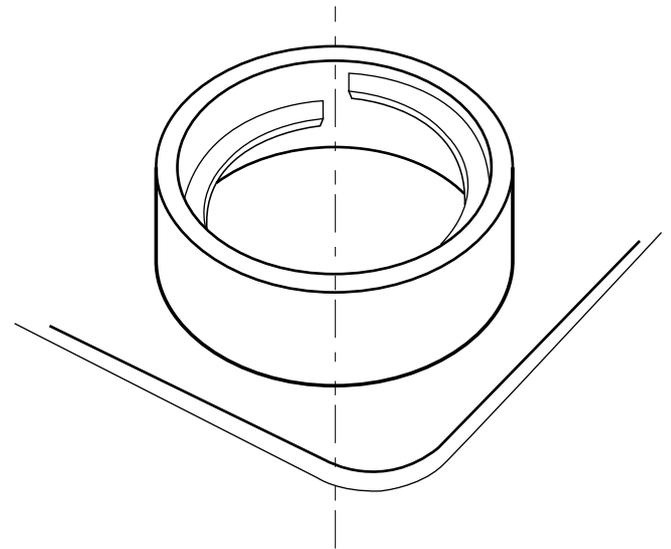
### Gewinde mit eingeformter Spannungsentlastung



Außengewinde sollten möglichst in der Werkzeug-trennebene liegen, um Hinterschneidungen und den Aufwand für Ausschraubmechanismen zu vermeiden. Das spart Werkzeugkosten und Zykluszeit. Innengewinde werden meistens auf einem Ausschraub- oder Falbkern gespritzt. Einfache Innengewinde mit einer Umdrehung von etwas weniger als  $360^\circ$  lassen sich auch mit geraden Kernzügen entformen (Bild V-14).

Bild V-14.

### Innengewinde mit einfacher Umdrehung $< 360^\circ$



### Konische Rohrgewinde

Besondere Vorsicht gilt beim Konstruieren konischer Innengewinde von Kunststoffrohrteilen, die mit Metallteilen verschraubt werden sollen. Die Keilwirkung dieser Gewinde kann hohe Rohrwandspannungen verursachen, so daß das Kunststoffteil reißt oder bricht, wenn die Verschraubung überdreht wird. Um dem vorzubeugen, sollte eine feste Begrenzung vorhanden sein, beispielsweise ein eingeformter Anschlag am hinteren Gewindeauslauf des Kunststoffteils.

## Schneidschrauben

Bei den Schneidschrauben für die Montage von Kunststoffteilen muß zwischen gewindetreibenden und gewindeformenden unterschieden werden.

Treibende Schneidschrauben werden normalerweise nur bei spröden Kunststoffen eingesetzt, wie Duroplasten oder hochgefüllten (> 50%) Thermoplasten. Sie schneiden sich ihren Gewindegang mit einem geschlitzten Schaft. Da sie dabei Material vor sich hertreiben, sollten die Schrauben nicht wieder heraus- und erneut eingedreht werden und für den Materialabtrag ein Reservoir vorgesehen werden.

Die bevorzugte Schneidschraube für thermoplastische Teile ist die gewindeformende, da sie begrenzt (3- bis 7mal) wiederaus- und eindrehbar ist. Für häufigere Demontagen sollte jedoch ein Metalleinsatz in Betracht gezogen werden. Drei der gängigsten Schneidschrauben speziell für Kunststoffe sind nachfolgend beschrieben:

### Plastite™

Gewindefurchende Schneidschraube mit dreiblättrigem Querschnitt, die das Material beim Eindrehen nur zur Seite drückt. Nach der Installation umschließt das Material wieder den Schraubenschaft, was die Restspannung in der Nocke minimiert. Das sorgt außerdem für äußerst rüttelfeste Verschraubungen. Die Schrauben verursachen eine vergleichsweise hohe Wandspannung.

### Hi-Lo™

Schneidschraube mit einem 30° steilen und einem 60° flachen Gewinde. Der Vorschub dieser Schraube ist im Vergleich zu ihrem Anzugsdrehmoment sehr hoch - wichtig bei kurzen Schrauben. Die Schraube verursacht eine vergleichsweise geringe Wandspannung, aber aufgrund ihrer spitzwinkligen Gewinde höhere Spannungskonzentrationen.

### PT™

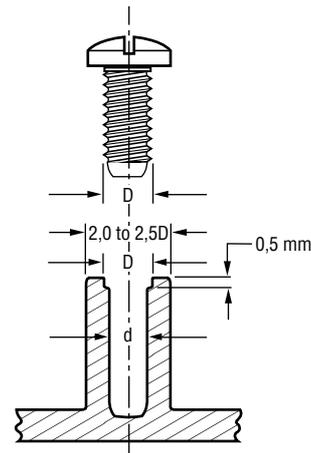
Schneidschraube mit 30° Öffnungswinkel, der die Wandspannung in der Nocke reduziert und ebenfalls eine sehr hohes Vorschub-/Anzugsverhältnis bietet.

## Empfehlungen für Schneidschraubverbindungen:

1. Die Gewindeeinzugstiefe sollte mindestens das 2,5fache des Schraubendurchmessers (D) betragen.
2. Der Außendurchmesser der Nocke sollte mindestens zweimal so groß wie ihr Führungsdurchmesser (d) sein.
3. Der Führungsdurchmesser sollte je nach Material und Schraubentyp für 50% bis 70% Gewindegang ausgelegt sein.
4. Gekernte Nocken sollten 0,25° bis 0,5° Entformungsschräge haben.
5. Die Nocke sollte eine 0,5 mm tiefe Ansatz- oder Schulterbohrung haben, damit die Schraube leichter eingeführt werden kann und die Nocke nicht reißt.
6. Das Verhältnis des Vorschub- zum Anzugsdrehmoment sollte mindestens 3:1 betragen. Der Unterschied zwischen den beiden Momenten ist jedoch wichtiger als das Verhältnis.
7. Das Sitzmoment sollte nicht größer als 2/3 des Vorschubmoments sein.

### Bild V-15.

#### Nocke für Schneidschraube



### **Einsatzmethoden**

Metalleinsätze sind in der Spritzgießtechnik sehr häufig. Solche mit Innen- oder Außengewinden bieten sich überall dort an, wo Bauteile wiederholt auseinander- und zusammengesraubt werden sollen oder die Verbindung erhöhte Beständigkeit gegen Kriechen und Druckrelaxation erfordert. Es gibt mehrere Einsatzmethoden:

#### **Ultraschalleinsätze**

Die Ausrüstung für Ultraschalleinsätze und Ultraschallschweißverbindungen sind gleich. Ein Hochfrequenzhorn erzeugt Reibungswärme zwischen dem Metalleinsatz und dem Kunststoff, so daß der Einsatz in die Nocke eingeschmolzen wird. Das Verfahren dauert keine fünf Sekunden, erzeugt nur eine geringe Restspannung und liefert ausgezeichnete Auszugsfestigkeiten.

#### **Wärmeeinsatz**

Abweichend vom Ultraschallverfahren können Metalleinsätze auch unter der Wärmeeinwirkung eines Lötkolbens in die Nocke hineingeschmolzen werden. Die Methode ist relativ zeitaufwendig, führt jedoch ebenfalls zu guten Auszugsfestigkeiten bei geringer Restspannung.

### **Schneideinsätze**

Einsätze mit selbstschneidendem Außengewinde sind eine kostengünstige Alternative. Zu den Konstruktionskriterien vgl. Seiten V-5 und V-8 über Preßpassungen und Schneidschrauben.

### **Expansionspreßpassungen**

Preßpassungen, die anschließend mit einem Werkzeug in der Nocke verspannt werden, sind im allgemeinen weniger geeignet, da sie hohe Spannungen verursachen und nur eine begrenzte mechanische Festigkeit bieten.

### **Einlegeteile**

Große oder besondere Einsätze werden in vielen Fällen ins Werkzeug eingelegt und direkt umspritzt. Das Einlegen erhöht die Zykluszeit und kann außerdem Schäden am Werkzeug verursachen.

**Bild V-16.**

### **Typische Gewindeeinsätze aus Metall**

Illustration Credit: Spirol Inserts CEM Corporation Inc. and In-X Fasteners Corp.



**Wärmeeinsatz**



**Ultraschalleinsatz**



**Expansionseinsatz**



**Selbstschneidender Einsatz**

## Ultraschallschweißen

Das Ultraschallschweißen ist eine schnelle und zuverlässige Füge­technik für Teile aus gleichen oder ähnlichen Thermoplasten. Dabei wird elektrische Energie in mechanische Vibration umgewandelt, deren Reibwärme die Teile miteinander verschweißt. Die Teile werden und bleiben zu diesem Zweck fixiert, bis die Schweißnaht nach Abzug der Energiequelle verfestigt ist. Die Gesamtschweißzeiten liegen zwischen 0,5 und 1 s. Standardfrequenzen sind 20 kHz. Bei kleinen, empfindlichen Teilen kommen auch 40 kHz-Einheiten zum Einsatz.

Hauptfaktor für die Qualität des Ultraschallschweißens ist die Auslegung der Schweißnaht. Die beiden häufigsten Varianten sind gescherte und konzentrierte Ultraschallverbindungen. Die Wahl hängt von dem zu verschweißenden Material und den Einsatzbedingungen der Anwendung ab.

## Scherschweißverbindungen

Scherschweißnähte werden häufig bei teilkristallinen Materialien wie Polyamiden\* oder thermoplastischen Polyestern eingesetzt, bei denen aufgrund der eng begrenzten Schmelztemperaturen nicht mit Ultraschallkonzentratoren (Bild V-18) gearbeitet werden kann. Das geschmolzene Material würde sich beim Fließen (Verteilen) in der Naht zu schnell wieder verfestigen und keine ausreichende Verbindung mit der anderen Fläche eingehen.

Beim Scherschweißen werden die Teile ausgehend von einem sich gering schneidendem aufgeschmolzenem Bereich ihrer Kontaktflächen entlang einer Schweißnaht zusammengefügt. Dabei lassen sich sehr homogene und feste, hermetisch dichte Verbindungen erzielen.

Bilder 17(a-b) zeigen typische Auslegungen, 17(b) speziell für Sichtflächen ohne Schweißgrat.

Bild V-17 (a).

## Scherschweißnaht

Illustration; „Vibration Welding“, Branson Ultrasonics Corp. 1980

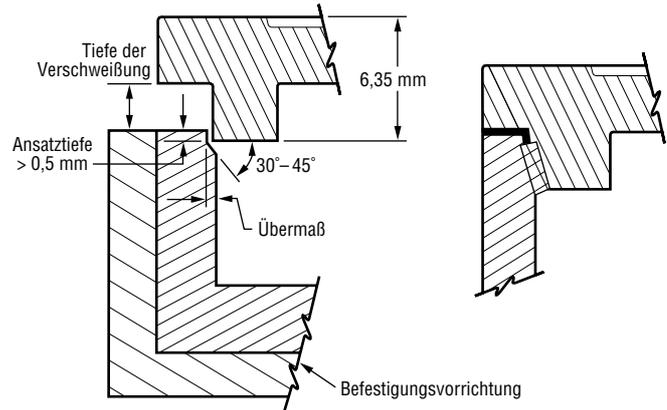
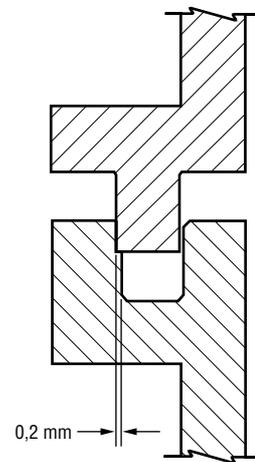


Bild V-17 (b).

## Scherschweißnaht



\* Hinweis: Teile aus hygroskopischen Materialien wie Polyamid sollten „spritztrocken“ verschweißt werden, um spröde Schweißnähte zu vermeiden. Falls dies unmittelbar nach dem Spritzgießen nicht möglich ist, sollten die Teile bis zum Schweißen in feuchtigkeitsabweisenden Trockenbeuteln gelagert werden.

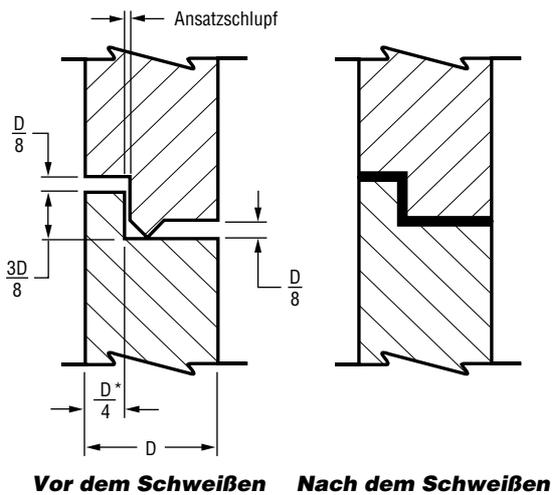
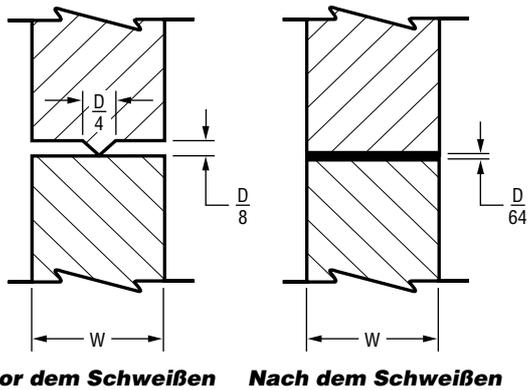
Teilabmessung (mm)	Überlappen per Kante (mm)
< 18	0,2 - 0,3
18 - 35	0,3 - 0,4
> 35	0,4 - 0,5

### Ultraschallkonzentratoren

Ultraschallkonzentratoren sind eingeförmte, dreikantig vorstehende Schweißraupen auf einer der beiden Schnittflächen. Sie konzentrieren die Ultraschallenergie, so daß der Kunststoff schnell erweicht und die Flächen miteinander verschweißt werden.

Ultraschallkonzentratoren werden normalerweise nur bei amorphen Polymeren eingesetzt. Bilder V-18(a-b) und V-19 zeigen typische Konfigurationen, V-19 mit einer „Gratfalle“ für Sichtflächen.

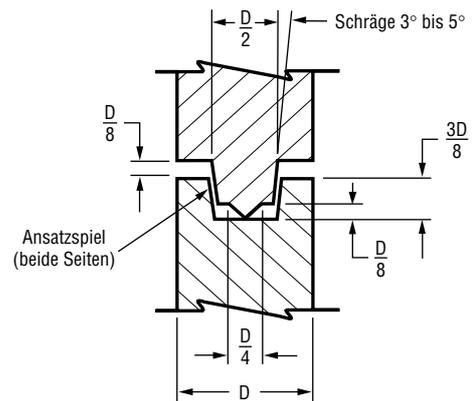
**Bild V-18 (a) & (b).**  
**Ultraschallkonzentratoren**



\*Minimum 0,6 mm für  $\frac{D}{4}$

**Bild V-19.**  
**Gratlose Verschweißung**

Holtz, Richard, „Vibration Welding: Fast, Quiet, Efficient“, Assembly Engineering, Hitchcock Publishing



## Vibrationsschweißen

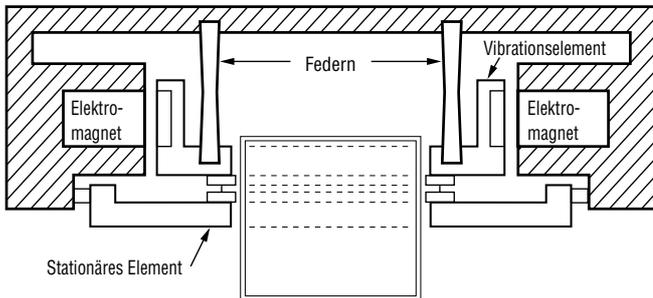
Das Vibrationsschweißen ist eine bevorzugte Fügechnik für große tragende Formteile aus gleichen oder sehr ähnlichen Thermoplasten. Die Teile werden unter Druck gegeneinander hin- und herbewegt. Die dabei entstehende Reibungswärme führt zu einer hermetisch festen Verbindung.

Je nach Ausrüstung wird entweder mit Schweißfrequenzen von 120 oder 240 Hz und Amplituden von 1,5 bis 3,5 bzw. 0,75 bis 1,5 mm gearbeitet. Das Spiel für die Amplitude muß bei der Konstruktion berücksichtigt werden. Die Schweißzeiten liegen in der Regel bei 2 bis 3 s. Der Schweißzyklus ist unten näher beschrieben.

**Bild V-20.**

### Vibrationsschweißstand

Illustration: „Designing Parts for Ultrasonic Welding“, © Branson Ultrasonics Corp., 1980



Auf normalen Anlagen lassen sich Teile von bis zu 400 mm x 600 mm verschweißen. Durch die Relativbewegung der Teile werden die Fügeflächen auch von Verunreinigungen befreit, wie z.B. Rückstände von Formtrennmittel.

Eine wichtige Einschränkung des Vibrationsschweißens betrifft die Schweißnaht: Sie muß so ausgelegt sein, daß die Teile sich beim Schweißen nur linear gegeneinander bewegen. Das schließt jedoch gewölbte und gebogene Teile nicht aus, wie beispielsweise Kfz-Lufteinlaßverteiler. Auch mehrere parallel zur Relativbewegung verlaufende Schweißnähte sind in einem Durchgang realisierbar. Dies wird unter anderem bei der Fertigung von Motorsägegehäusen mit getrennt integrierten Gas- und Öltanks genutzt.

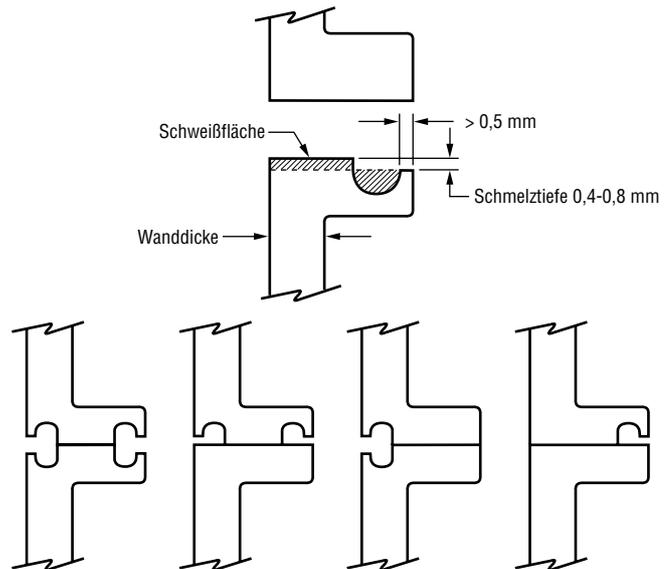
Entscheidend für das Schweißergebnis ist die Fixierung der Teile, die so ausgelegt sein muß, daß sie alle Wandbereiche der Teile gegen Durchbiegung unterstützt. Das relativ neue Orbitalvibrationsschweißen erleichtert diese Anforderung, da sich aufgrund der konstanten Kreisbewegung keine Wand genau senkrecht zur Schweißrichtung befindet.

Bild V-21 zeigt einige typische Konfigurationen, einschließlich „Gratfalle“ für Sichtflächen. Die Gratfalle muß etwa das gleiche Volumen wie die Schmelzfläche haben (schraffierte Bereiche).

**Bild V-21.**

### Vibrationsschweißnähte

Holtz, Richard, „Vibration Welding: Fast, Quiet, Efficient“, Assembly Engineering, Hitchcock Publishing

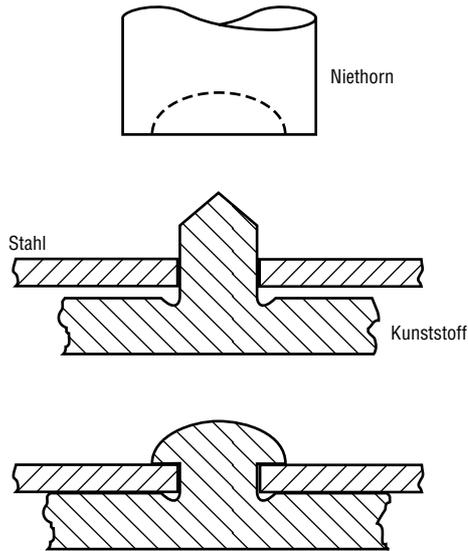


## Sonstige Fügetechniken

### Thermoplastisches Vernieten

Teile aus ungleichen oder inkompatiblen Materialien werden häufig auch unter Ultraschall, Wärme oder Heißgas miteinander vernietet. Bild V-22 illustriert das Prinzip am Beispiel einer gewölbten Schmelznietung: Der in das eine Formteil eingeformte Nietzapfen greift durch eine entsprechende Aussparung im anderen Formteil und wird dort durch ein konturiertes Niethorn ausgeformt. Das Verfahren ist einfach, schnell und ergibt eine permanent feste Verbindung.

**Bild V-22.**  
Schmelznietung mit Kopf



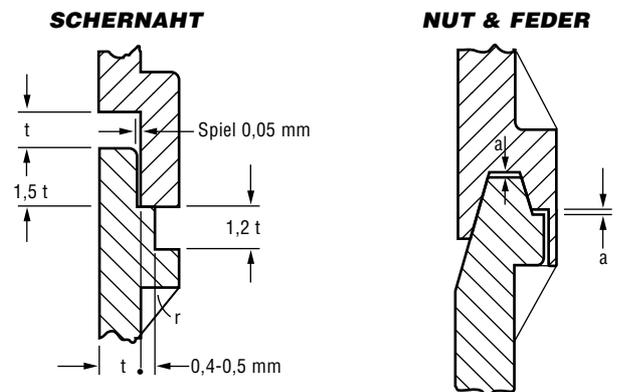
### Rotationsschweißen

Das Rotationsschweißen ist eine schnelle und praktische Fügetechnik für kreisrunde Teile oder Flächen für die meisten Thermoplaste, insbesondere Hartpolymere. Die Verschweißung entsteht durch Drehen des einen Teils mit hoher Geschwindigkeit bei hohem Druck gegen das andere, fixierte Teil. Die Rotation wird gestoppt und der Druck aufrechterhalten, bis sich die Schweißnaht verfestigt hat. Das Verfahren ermöglicht feste, permanente und hermetisch dichte Verbindungen. Es ist jedoch schwierig, die Teile präzise zueinander auszurichten. Die Schweißzeiten liegen bei 1 bis 2 s. Ein normales Schweißgerät genügt. Die Rotation erfordert eine entsprechende Auslegung der Teile und/oder Vorrichtung.

Die Schweißnaht kann plan, winklig oder V-förmig sein und hat meistens einen Flansch, um die Schweißfläche und die Steifigkeit der Verbindung zu erhöhen. Sichtbarer Schweißgrat lässt sich bei gezielter Konstruktion vermeiden.

**Bild V-23.**

Quelle: Forward Technologies Industries

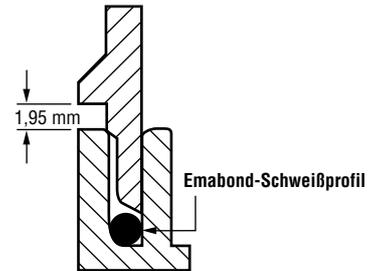
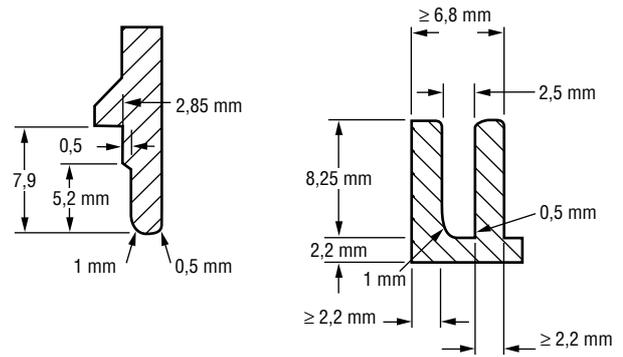


## Induktionsschweißen

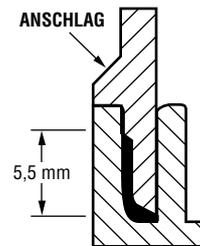
Das Induktionsschweißen ist ein einfaches, schnelles und zuverlässiges Verfahren für feste, hermetische Verbindungen. Entlang der Schweißnaht wird ein spezielles Schweißprofil eingelegt und Induktionswärme aufgebracht, bis das Profil schmilzt und sich mit den beiden ebenfalls erweichten Kunststoffen verbindet. Unsere Untersuchungen haben Scherfestigkeiten der Schweißnaht bis ca. 35 N/mm<sup>2</sup> ergeben. Wie bei den anderen Schweißtechniken kann die Schweißnaht unterschiedlich ausgelegt werden. Bild V-24 zeigt eine Nut-und-Feder-Konstruktion.

Bild V-24.

Quelle: Emabond Systems



**VOR DEM SCHWEIßEN**



**NACH DEM SCHWEIßEN**

## Kunststoffe

Klassifizierung . . . . .	VI-2
Verteilung der Molmasse . . . . .	VI-4
Physikalische Eigenschaften im Vergleich zu Metallen. .	VI-5
Dichte . . . . .	VI-5
Wärmeausdehnung. . . . .	VI-5
Wärmeleitfähigkeit. . . . .	VI-6

## Teil VI: Kunststoffe

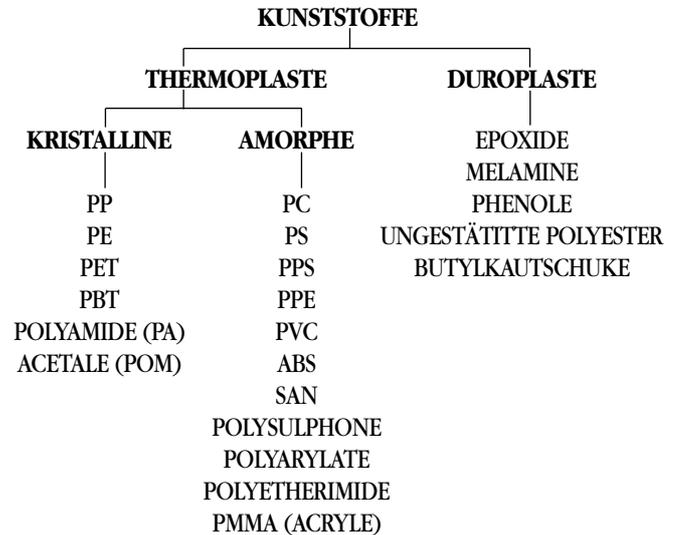
Kunststoffe bestehen aus mehr oder weniger langen Ketten großer Moleküle. Jedes Molekül setzt sich aus einer Vielzahl organischer Teilbausteine zusammen, deren Ketten dann als Polymere (viele Teile) oder auch Makromoleküle bezeichnet werden. Bei Raumtemperatur sind die Materialien fest und hart und halten erheblicher struktureller Belastung stand. Einige Polymere behalten ihre Steifigkeit auch bei relativ hohen Temperaturen bei und eignen sich daher zur Substitution von Metallen in typischen Einsatzbereichen wie unter der Motorhaube von Kraftfahrzeugen.

Die meisten polymeren Anwendungen werden im Spritzgieß- oder im Extrusionsverfahren hergestellt. Oft werden auch Vorformlinge spritzgegossenen oder Halbzeuge (Folien/Platten) extrudiert und in einer zweiten Verfahrensstufe zu Fertigteilen blas- bzw. thermogeformt.

### Klassifizierung

Tabelle VI-1 zeigt eine allgemeine Klassifizierung von Kunststoffen.

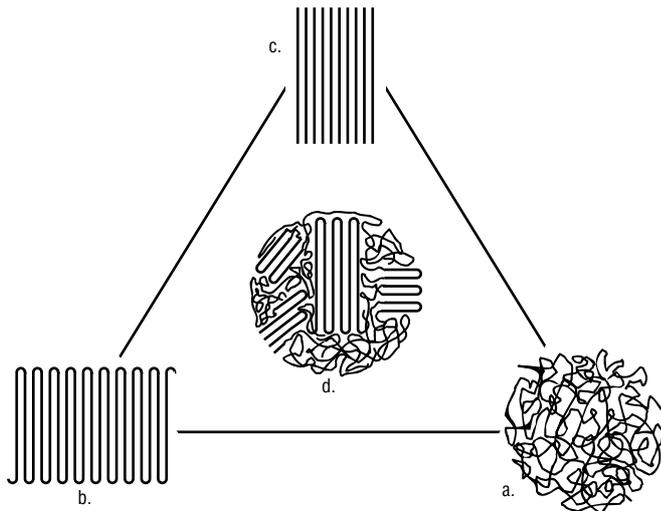
**Tabelle VI-1.**  
**Die Familie der Kunststoffe**



Thermoplastische Materialien werden in geschmolzenem Zustand bei erhöhten Temperaturen verarbeitet und sind wiederholt plastifizierbar. Demgegenüber ist das Aushärten von Duroplasten unter dem Einfluß von Wärme oder Vernetzungsmittel ein irreversibler Prozeß, da Duroplaste keinen Schmelzpunkt haben und sich bei erhöhten Temperaturen zersetzen oder verkohlen.

Thermoplaste werden normalerweise in zwei Kategorien unterteilt: Kristalline und amorphe Polymere. Bild VI-1 illustriert die unterschiedlichen Molekülstrukturen.

**Bild VI-1.**  
Molekülstruktur kristalliner  
und amorpher Polymere



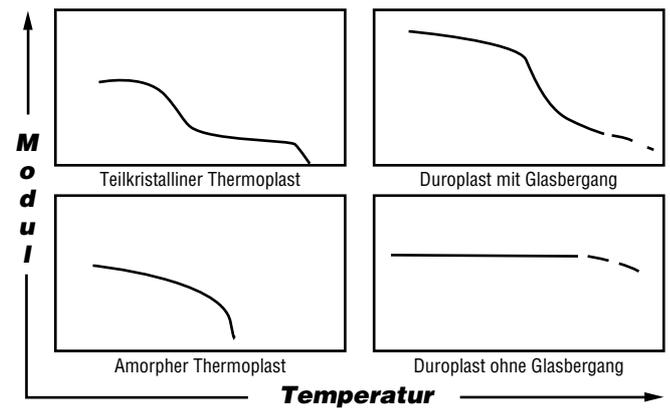
- a) Amorphes Polymer, verfestigt
- b) Polymerkristall mit gefalteter Molekülkette
- c) Gereckte Molekülkette - gezogene Polymerfaser
- d) Teilkristallines Polymer

Kristalline Polymere weisen regelmäßig gefaltete Molekülketten auf. Amorphe Polymere bestehen aus wirt ineinander verknäulten Molekülketten.

Im Gegensatz zum klar definierbaren *Schmelzpunkt* ( $T_m$ ) kristalliner Polymere haben amorphe Polymere nur eine *Glasübergangstemperatur* ( $T_g$ ), ab der sie bei zunehmender Wärme langsam vom festen in einen fließfähigen Zustand übergehen.

Bild VI-2 zeigt E-Modulkurven unterschiedlicher Kunststoffklassen in Abhängigkeit von der Temperatur.

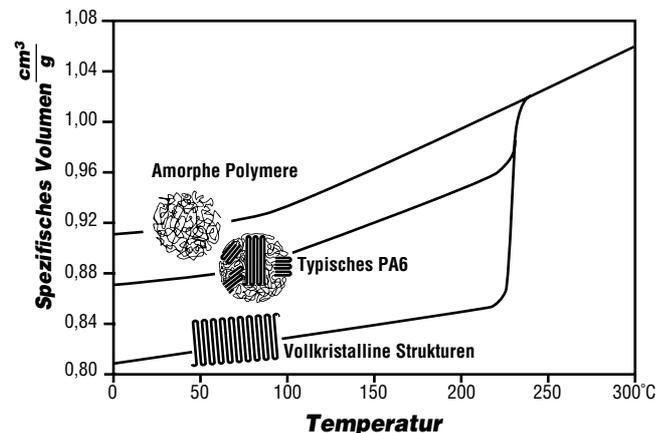
**Bild VI-2.**  
Mechanische Eigenschaften unterschiedlicher  
Kunststoffe in Abhängigkeit von der Temperatur



In den meisten Fällen jedoch erreichen kristalline Polymere bei der Verarbeitung keine vollständige Kristallinität, sondern nur eine gemischte Struktur aus kristallinen und amorphen Phasen. Sie werden daher auch als teilkristalline Polymere bezeichnet. Das Verhältnis der beiden Phasen zueinander hängt von der Geschwindigkeit ab, mit der die Formteile im Werkzeug abkühlen. Je schneller die Abkühlung, desto höher der Anteil der amorphen Bereiche. Bild VI-3 zeigt eine teilkristalline Struktur typisch für Polyamid 6.

Aufgrund ihrer kristallinen und amorphen Phasen haben teilkristalline Polymere sowohl eine Schmelz- als auch eine Glasübergangstemperatur.

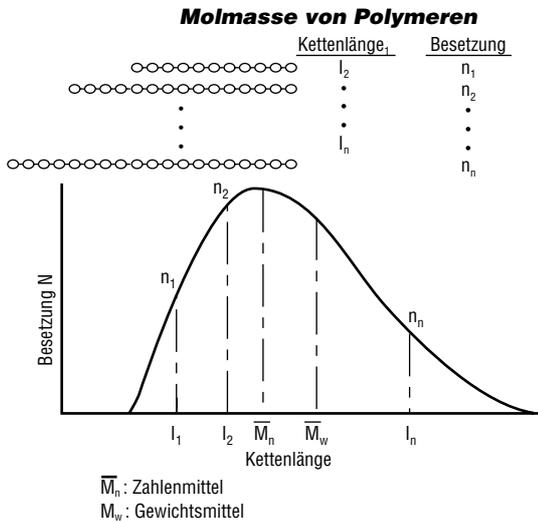
**Bild VI-3.**  
Volumen von PA6 in  
Abhängigkeit von der Temperatur



### Verteilung der Molmasse

Die Länge der Molekülketten in Kunststoffen schwankt von sehr kurz bis sehr lang, und ihre Verteilung – als Molekulargewicht oder Molmasse bezeichnet – kann in Form von Glockenkurven dargestellt werden (Bild VI-4).

**Bild VI-4.**  
Verteilung der molaren Masse bei Polymeren



Von der mittleren molaren Masse ( $M_w$ ) sind wichtige physikalische Eigenschaften abhängig, wie Schmelzeviskosität und Formteilstfestigkeit.

Das komplette Spektrum der Molekulargewichtsverteilung lässt sich mit Hilfe der Gelpermeationschromatografie (GPC) darstellen. Diese Laboranalyse ist jedoch ziemlich zeitaufwendig und teuer. Eine vergleichsweise einfache Methode, um die unterschiedliche mittlere Molmasse von Kunststoffen zu ermitteln, bietet der Schmelzindex (Melt Flow Index, MFI). Der MFI bezeichnet die Masse einer polymeren Schmelze, die unter dem definierten Gewicht eines Kolbens innerhalb einer bestimmten Zeit durch ein konstant erwärmtes Kapillarrisosimeter gepreßt werden kann. Je höher der MFI-Wert, desto niedriger die mittlere Molmasse. Ähnliche, aber kompliziertere Methoden zur Ableitung der mittleren Molmasse sind die Messung der Formylsäure- und der intrinsischen oder Grenzviskosität (FAV und IV). Für Polyamide wird meistens die FAV-Methode eingesetzt; für thermoplastisches PET die IV-Methode.

## Physikalische Eigenschaften im Vergleich zu Metallen

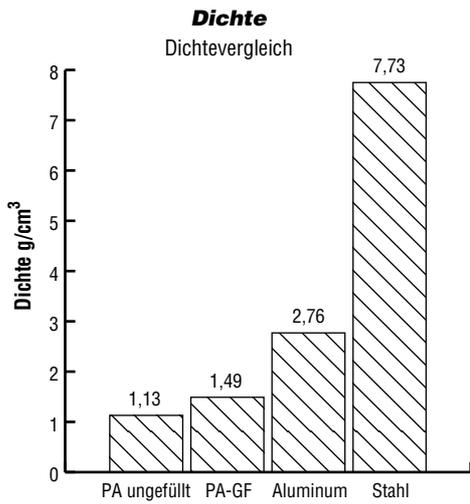
Die physikalischen Eigenschaften von Polymeren unterscheiden sich teilweise deutlich von denen metallischer Werkstoffe.

### Dichte

Kunststoffe sind erheblich leichter als die meisten Metalle (Bild VI-5) und ersetzen diese aus Gewichtsgründen.

Bild VI-5.

### Dichte

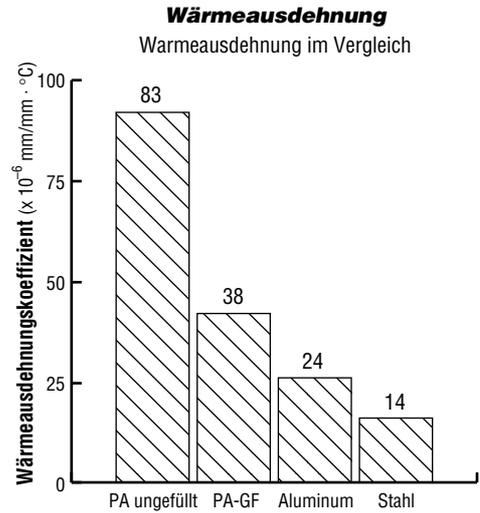


## Wärmeausdehnung

Die Abmessungen von Kunststoffteilen sind temperaturabhängig. Der Konstrukteur sollte daher die effektiven Umgebungs- und Einsatztemperaturen berücksichtigen und sicherstellen, daß alle kritischen Abmessungen innerhalb akzeptabler (spezifizierter) Toleranzen liegen. VI-6 verdeutlicht dies am Beispiel des Wärmeausdehnungskoeffizienten unterschiedlicher Werkstoffe.

Bild VI-6.

## Wärmeausdehnungskoeffizienten

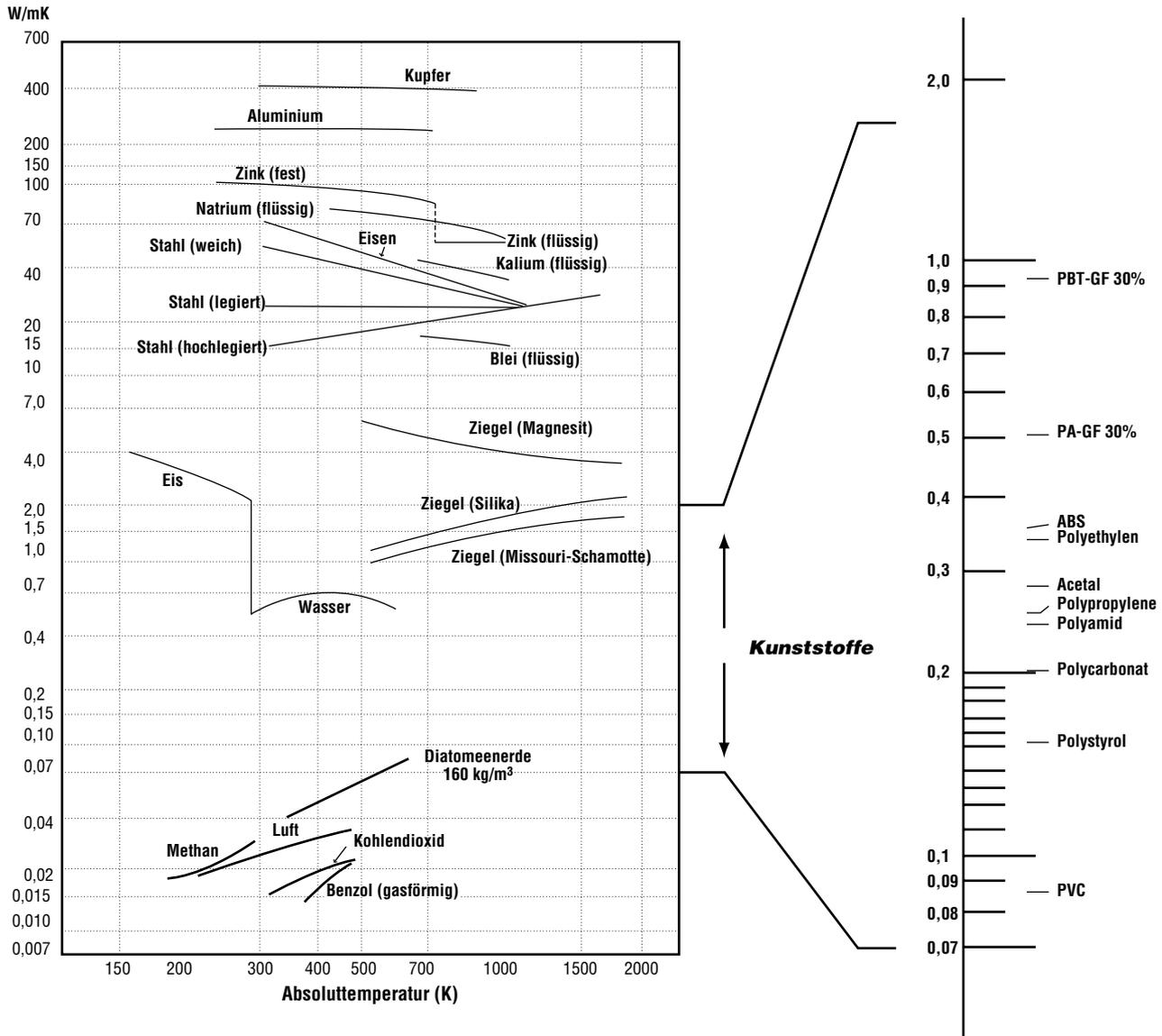


## Wärmeleitfähigkeit

Kunststoffe sind keine guten Wärmeleiter und liegen in dieser Beziehung rund zwei Größenordnungen unter der von Metallen. Das macht sie umgekehrt jedoch zu guten thermischen Isolatoren. Der Vor- oder Nachteil dieser Eigenschaft hängt von der Anwendung ab. Bild VI-7 illustriert die Wärmeleitfähigkeit zahlreicher Polymere im Vergleich zu anderen Materialien und Stoffen.

**Bild VI-7.** Wärmeleitfähigkeit fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe in Abhängigkeit von der Temperatur

Quelle: Arpaci, Vedal S., „Convection Heat Transfer“, Addison-Wesley



## **Physikalische Eigenschaften**

Mechanische Eigenschaften . . . . .	VII-2
Kurzzeiteigenschaften . . . . .	VII-2
Kerben . . . . .	VII-2
Belastungsgeschwindigkeit . . . . .	VII-2
Temperaturbeständigkeit . . . . .	VII-4
Wärmealterung . . . . .	VII-4
Feuchtigkeitsaufnahme . . . . .	VII-5
Berücksichtigung der Feuchtigkeitsaufnahme . . . . .	VII-6
Feuchtebedingte Eigenschaftsänderungen . . . . .	VII-6
Feuchtebedingte Ausdehnung . . . . .	VII-6
Beschleunigte Feuchtkonditionierung . . . . .	VII-6
Prozeßbedingte Eigenschaftsänderungen . . . . .	VII-7
Additive (Farbpigmente) . . . . .	VII-8
UV-Einstrahlung . . . . .	VII-8
Chemikalien . . . . .	VII-8
Langzeiteigenschaften - Kriechen, Spannungsrelaxation und Nutzdauer . . . . .	VII-9
Reibungskoeffizient . . . . .	VII-11

## Teil VII: Physikalische Eigenschaften

### Mechanische Eigenschaften

Die mechanische Belastbarkeit von Kunststoffteilen hängt unter anderem von der Einsatzumgebung, der Belastungsdauer im Einsatz, der Art der Belastung und der Geometrie der Formteile ab. Kurzzeiteigenschaften von Kunststoffen sind daher für Langzeitanwendungen weitgehend unerheblich. Der Konstrukteur sollte nur Eigenschaftsdaten verwenden, die den Einsatzbedingungen und der Nutzdauer der jeweiligen Anwendung entsprechen.

Definitionen physikalischer Eigenschaften siehe Anhang A.

### Kurzzeiteigenschaften

Gängige mechanische Eigenschaften werden normalerweise nach Prüfmethoden der International Standards Organization (ISO) oder nationaler Normungsgremien wie dem Deutschen Institut für Normung (DIN) und der American Society for Testing & Materials (ASTM) gemessen und angegeben (Anhang B). Sie finden diese Eigenschaften in den Produktdatenblättern der meisten Kunststoffe. Produktdaten sämtlicher Kunststoffe von AlliedSignal sind außerdem über das Internet erhältlich. Oder wenden Sie sich an unseren technischen Service.

### Bild VII -1. Standardprüfkörper

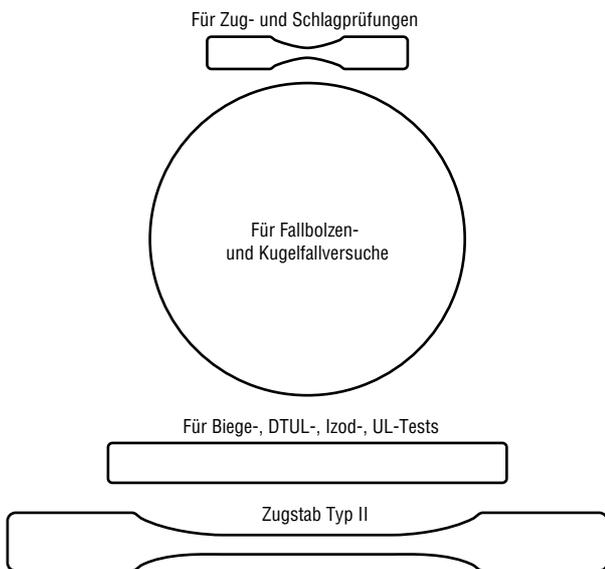


Bild VII-1 zeigt einige der standardisierten Prüfkörper für Normprüfungen. Die ermittelten Prüfwerte werden jedoch von mehreren Faktoren erheblich beeinflusst.

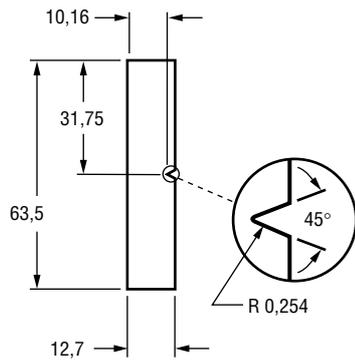
### Kerben

Kerben und scharfe Kanten oder Ecken sind Spannungskonzentratoren und können zu vorzeitigem Versagen der Teile führen. Auch abrupte Wanddickenübergänge sollten vermieden werden.

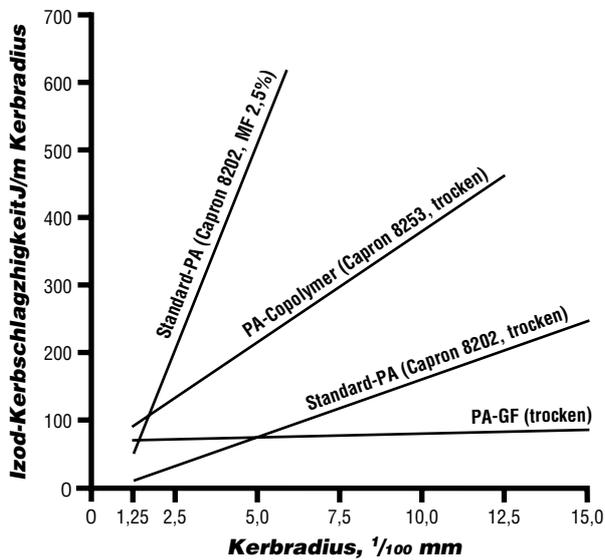
### Belastungsgeschwindigkeit

Kunststoffe neigen bei erhöhten Belastungsgeschwindigkeiten zur Dehnung. Einige sind zähelastisch genug, um dem standzuhalten, bei anderen kommt es zum Sprödbruch. Die Beständigkeit von Materialien gegen die Auswirkung von Kerben und Schlag kann mit der Izod-Kerbschlagprüfung gemessen werden. Die Geometrie der dafür verwendeten Prüfkörper ist in Bild VII-2 erläutert. Bild VII-3 zeigt die Kerbschlagempfindlichkeit in Abhängigkeit vom Kerbradius. Die reine Schlagzähigkeit wiederum lässt sich besser mit Fallversuchen testen (Bild VII-4). Tabelle VII-1 verdeutlicht die unterschiedliche Einstufung gleicher Materialien nach beiden Verfahren.

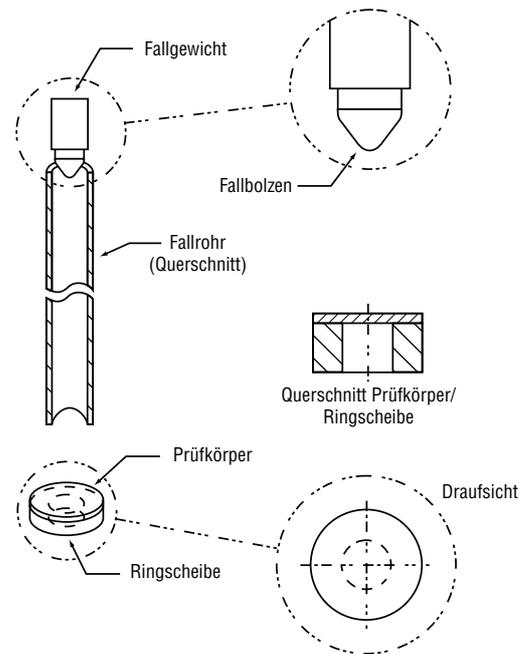
**Bild VII-2.**  
Schlagprüfkörper



**Bild VII-3.**  
Izod-Kerbschlagzähigkeit in Abhängigkeit vom Kerbradius



**Bild VII-4.**  
Fallbolzen-Schlagprüfung



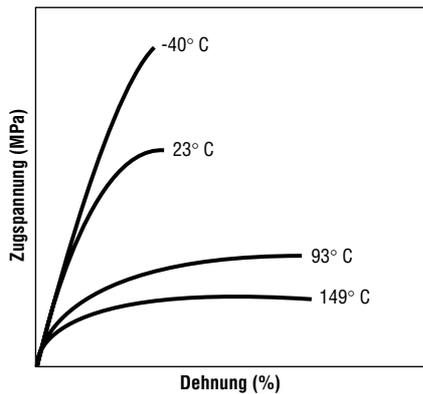
**Bild VII-5.**  
Schlagzähigkeit technischer Thermoplaste im Fallversuch und nach Izod

Fallbolzentest (J)		IZOD-Kerbschlag (J/m)	
Polycarbonat	>240	PA 6.6 modifiziert	160
Polyamid 6	183	PA 6-Copolymer	133
PA 6.6 modifiziert	170	Polycarbonat	123
PA 6 Copolymer	170	PPE modifiziert	101
PBT	129	PC-GF 20%	96
PA 6.6	102	PBT-GR 30%	69
6 nukleiert	102	PA 6-GF 30%	69
PA 6-GF 30%	8	PBT	43
PA-GF 20%	2.7	PA 6.6	32
PA 6.6-GF 30%	2.0	PA 6	27
PBT-GF 30%	1.4	PA 6 nukleiert	21

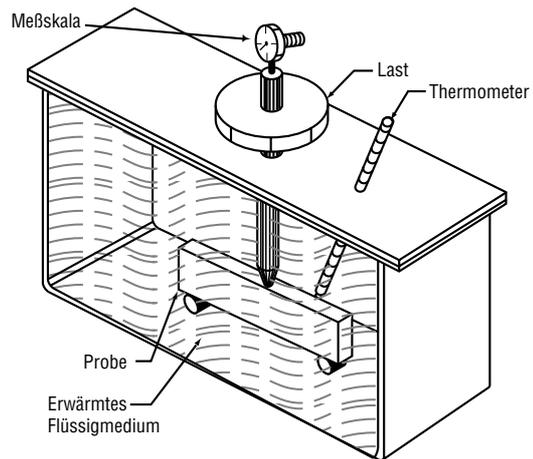
### Temperaturbeständigkeit

Kunststoffeigenschaften sind außerdem sehr temperaturabhängig, wie Bild VII-6 zeigt. Zur Konstruktion sollten nur solche Eigenschaftswerte herangezogen werden, die den tatsächlichen Einsatztemperaturen des Teils entsprechen. Die oft für erhöht wärmeformbeständige Materialien herangezogenen ISO- und ASTM-Tests (HDT und DTUL, Bild VII-7) messen jedoch nur die erforderliche Umgebungswärme bis zu einer bestimmten Durchbiegung der belasteten Prüfkörper und sagen daher nur wenig über das Langzeitverhalten aus. Die Ergebnisse sollten nie ohne entsprechende Zusatzprüfungen verwendet werden.

**Bild VII-6.**  
**Zugspannungs-Dehnungskurve von Petra® 130 bei unterschiedlichen Temperaturen**



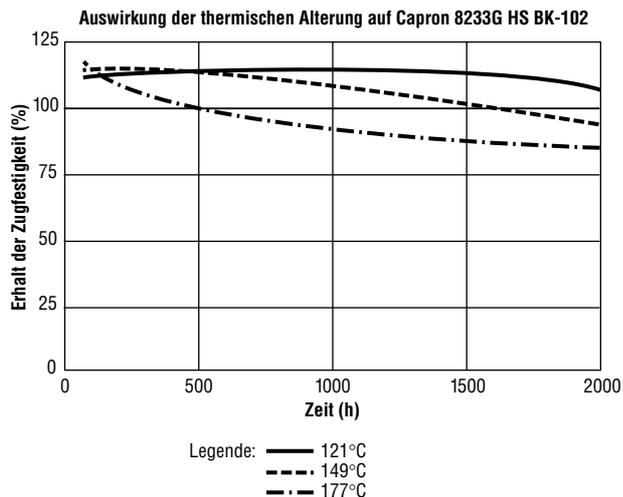
**Bild VII-7. DTUL-Prüfstand**  
**(Wärmeformbeständigkeit unter Belastung)**



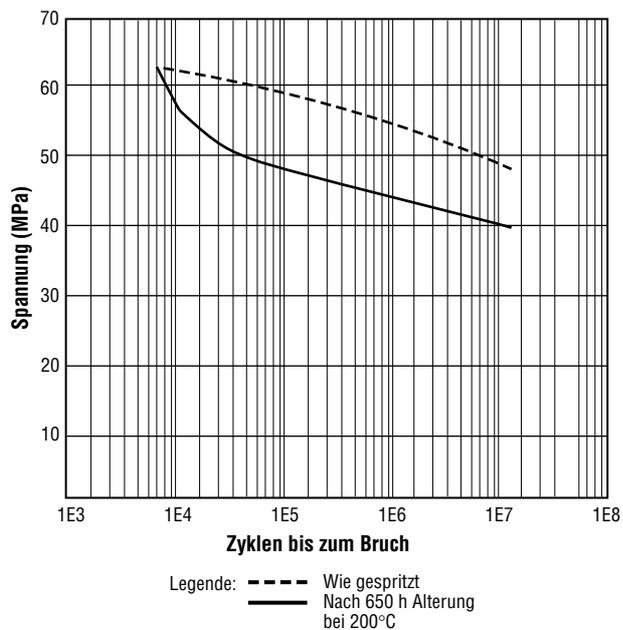
### Wärmealterung

Kunststoffe neigen bei fortgesetzter erhöhter Wärmeeinwirkung zu Polymerabbau. Bilder VII-7 und VII-8 illustrieren die Auswirkung der thermischen Alterung auf ein wärmostabilisiertes, 33% glasfaser-verstärktes Polyamid bzw. 30% glasfaser-verstärktes PET.

**Bild VII-8.**  
**Auswirkung der Wärmealterung auf die Zugfestigkeit**



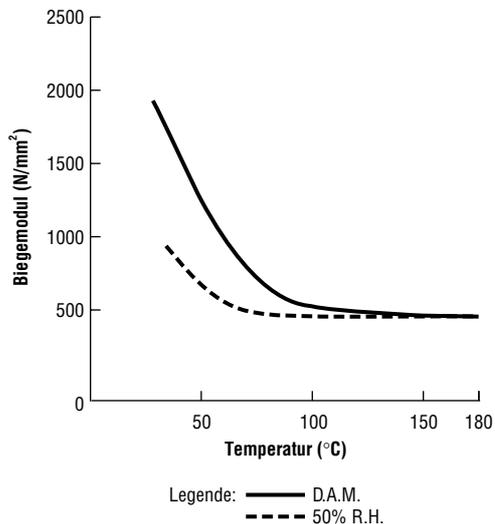
**Bild VII-9.**  
**Ermüdungsfestigkeit von Petra® 130 vor und nach Wärmealterung**



**Feuchtigkeitsaufnahme**

Polyamid 6 und 6.6 nehmen Feuchtigkeit aus der Luft und Umgebung auf. Die effektiven mechanischen Eigenschaften und Abmessungen der Formteile sind von der Feuchtigkeitsaufnahme abhängig. Bild VII-10 zeigt dies am Beispiel des Biegemoduls bei zusätzlicher Wärmeeinwirkung.

**Bild VII-10.**  
**Biegemodul von Capron® 8202 in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchtigkeit**



# Berücksichtigung der Feuchtigkeitsaufnahme

## Feuchtebedingte Eigenschaftsänderungen

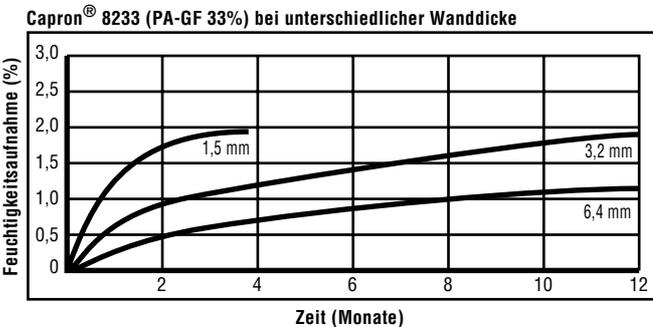
Alle Polyamide sind hygroskopisch. Wie schnell und wie viel Feuchtigkeit absorbiert wird, hängt von den relativen Luftfeuchtigkeit und den Temperatur unter Einsatzbedingungen ab. Die relative Luftfeuchtigkeit in Europa liegt meistens im Bereich von 40% bis 60%.

Dies muß bei der Konstruktion von Teilen aus Polyamid berücksichtigt werden. Die üblichen Eigenschaftswerte gehen aus von 50% relativer Luftfeuchte und 23°C.

Schlagzähigkeit und Ausdehnung von Polyamid erhöhen sich mit zunehmender Feuchtigkeitsaufnahme; Festigkeit und Steifigkeit nehmen ab. Die Zeit bis zur Sättigung hängt von der Wanddicke ab. Bild VII-11 illustriert dies am Beispiel von 33% glasfaserverstärktem Capron® 8233.

Bild VII-11.

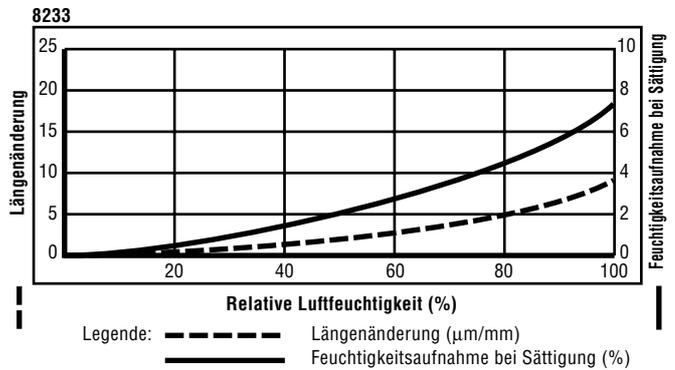
### Feuchtigkeitsaufnahme in Abhängigkeit von der Zeit bei 50% r.L. und 23°C



## Feuchtebedingte Ausdehnung

Wie Bild VII-12 zeigt, spielt die feuchtebedingte Ausdehnung von PA-Teilen normalerweise nur dann eine Rolle, wenn sehr enge Toleranzen eingehalten werden müssen bzw. sehr große Abmessungen vorliegen.

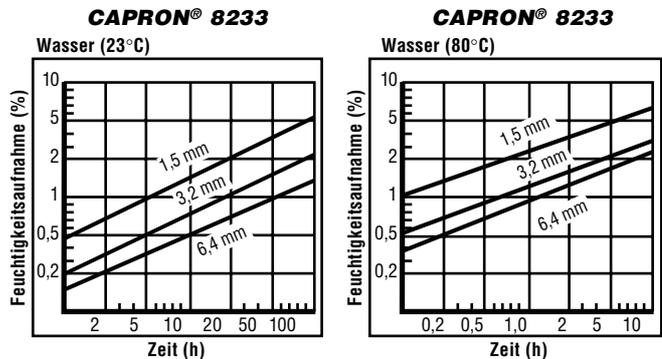
Bild VII-12.



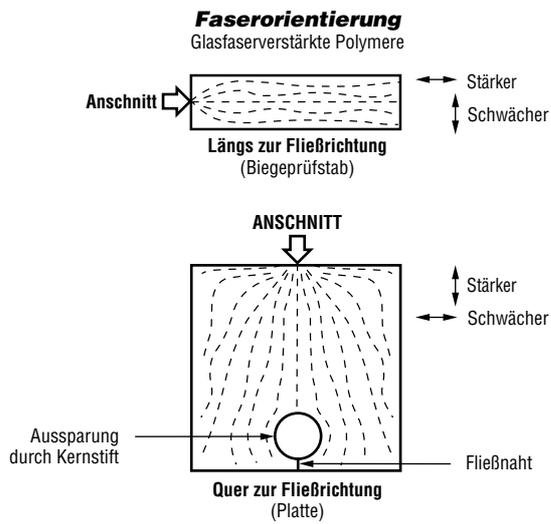
## Beschleunigte Feuchtkonditionierung

Anwendungen mit erhöhter Anforderung an die Maßgenauigkeit oder Eigenschaften wie Schlagzähigkeit müssen unter Umständen vor Einsatz oder Prüfung feuchtkonditioniert werden. Die Zeit bis zum Erreichen des spezifischen Feuchtegehalts kann durch Lagerung der Teile in Wasser mit Raum- oder erhöhter Temperatur beschleunigt werden; vergleiche Bild VII-11 gegenüber VII-13.

Bild VII-13.



**Bild VII-14.**



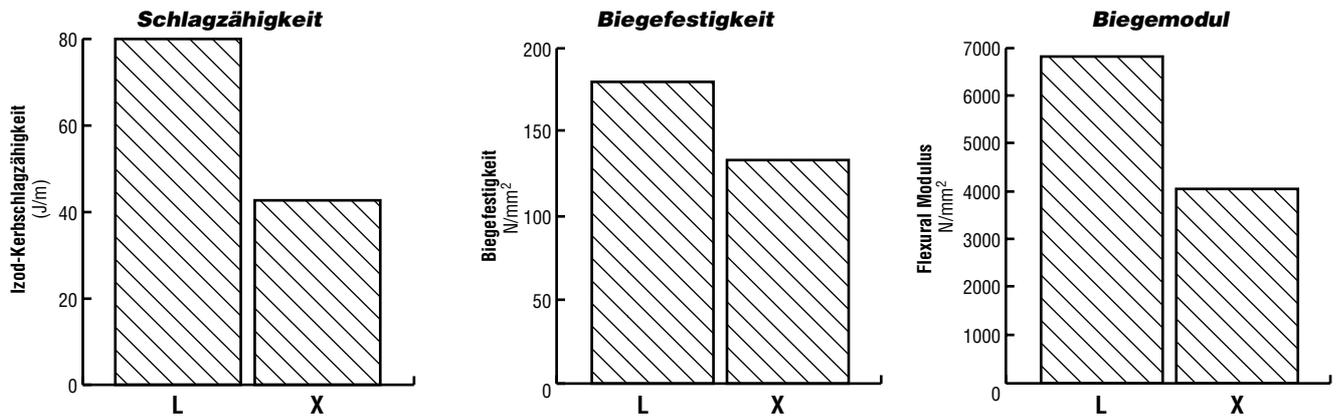
**Prozeßbedingte Eigenschaftsänderungen**

Die bei der Verarbeitung entstehende Faserorientierung erzeugt richtungsabhängige Eigenschaftsunterschiede. So sind die mechanischen Werte in Fließrichtung oft höher als die vergleichbaren Werte quer zur Fließrichtung. Bild VII-15 verdeutlicht dies an einem spritzgegossenen Gehäuseteil aus 30% glasfaserverstärktem Petra® 130.

Fließnähte (Bild VII-14) sind eine weitere potentielle Schwachstelle vor allem bei Formteilen aus glasfaserverstärkten Materialien. Zu hohe Regranulatanteile, mangelhaftes Vortrocknen (falls erforderlich) und falsche Verarbeitungsparameter können die physikalischen und mechanischen Eigenschaften weiter beeinträchtigen.

**Bild VII-15.**

**Eigenschaften in Abhängigkeit von der Faserorientierung bei einem Gehäuseteil aus Petra® 130**



Legende: L-Längs zur Fließrichtung  
X-Quer zur Fließrichtung

**Additive (Farbpigmente)**

Rußschwarz und andere Farbpigmente können je nach Inhaltsstoffen und Anteilen die Festigkeit von Kunststoffen beeinflussen.

**UV-Einstrahlung**

UV-Licht wirkt auf die Polymerstruktur und beeinträchtigt die physikalischen Eigenschaften von Kunststoffen. Der Polymerabbau findet überwiegend in den äußeren Bereichen der Teile statt, ist also insgesamt minimal aber im Bezug auf die Oberflächenqualität kritisch. AlliedSignal bietet UV-stabilisierte Materialtypen, die diesen Effekt minimieren und damit die Nutzdauer der Teile erhöhen.

**Chemikalien**

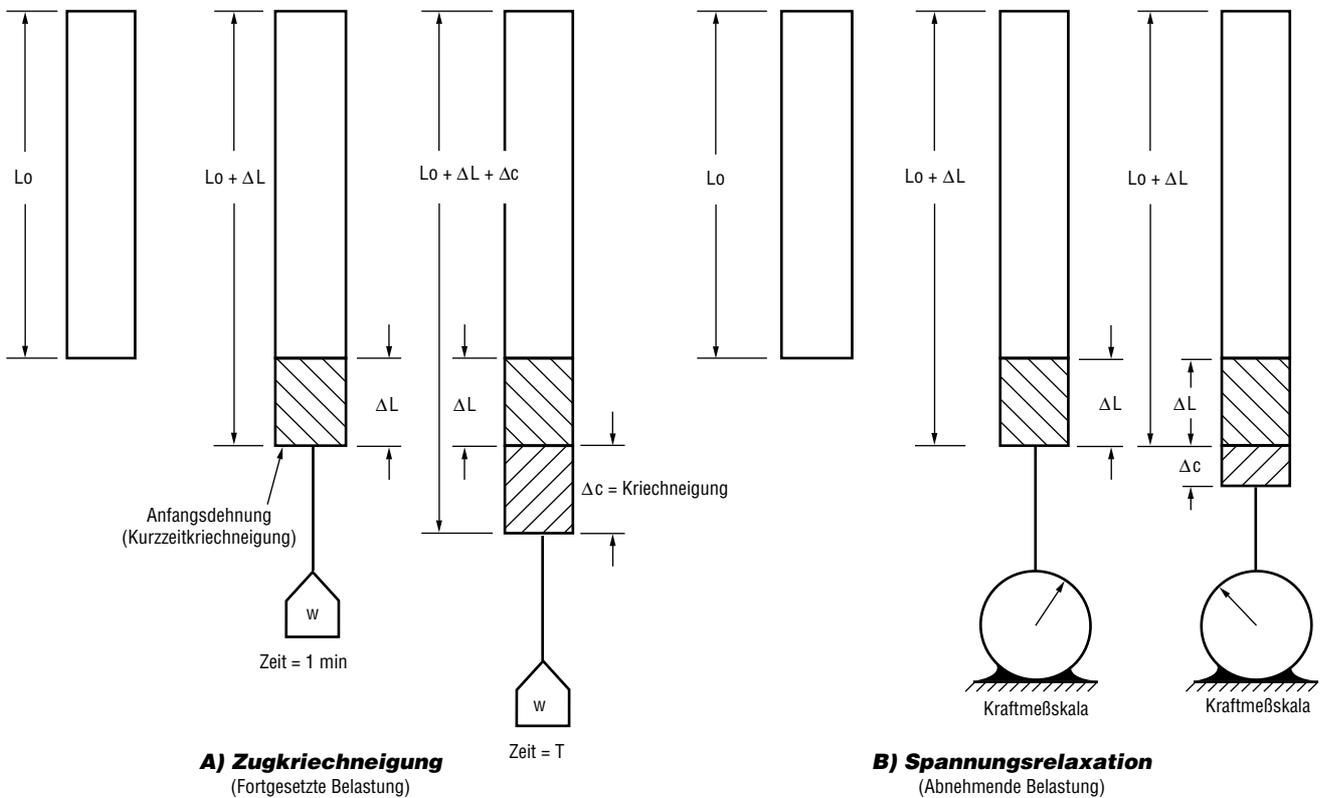
Viele Chemikalien können Polymere angreifen und ihre physikalischen Eigenschaften beeinträchtigen. Jedes Polymer verhält sich dabei sehr unterschiedlich. Der Konstrukteur sollte über entsprechende Daten verfügen, um sicherzustellen, daß der gewählte Kunststoff die erforderliche Chemikalienbeständigkeit bietet; für Capron® und Petra® ist eine entsprechende Druckschrift erhältlich. Darüber hinaus wird empfohlen, Eignungstests unter konkreten Einsatzbedingungen durchzuführen.

**Langzeiteigenschaften – Kriechen, Spannungsrelaxation und Nutzdauer**

Wenn eine Last auf ein Kunststoffteil aufgebracht wird, neigt dieses mit der Zeit zur Dehnung bis hin zum Versagen. Die effektive Dehnung hängt von der Größe der Last, der Belastungsdauer und davon ab, ob die Last konstant bleibt oder im Lauf der Zeit abnimmt. Die zeitabhängige, reversible Dehnung unter konstanter Belastung wird Kriechen genannt. Bild VII-16(a) illustriert diesen Zusammenhang.

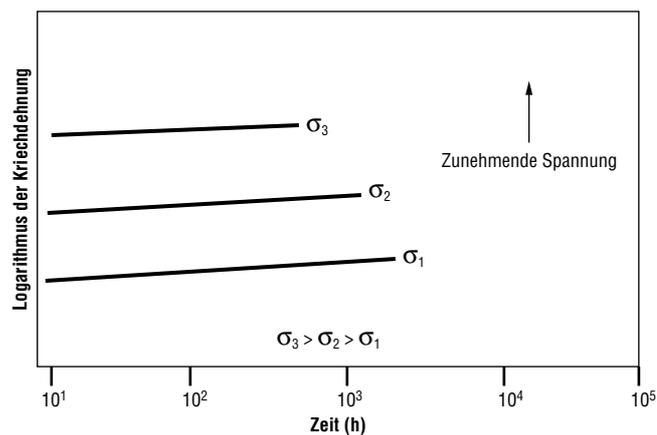
Bei fortgesetzter Belastung kann irreversible Verformung (Fließen) auftreten, bis das Teil schließlich reißt oder bricht. Wird die Last jedoch aufgehoben und dann fixiert, nimmt die Spannung im Lauf der Zeit ab. Dieses Phänomen der Spannungsrelaxation kann bei mechanisch befestigten Kunststoffteilen beobachtet werden und ist in Bild VII-16(b) dargestellt.

**Bild VII-16. Kriechneigung und Spannungsrelaxation**



Während die Dehnung im elastischen Bereich sofort wieder zurückgeht, sobald das Teil entlastet wird, erholt es sich von der Kriechdehnung nur mit zeitlicher Verzögerung. Bei fortgesetzter und erhöhter Belastung bleibt in der Regel ein erheblicher Teil der Gesamtdehnung irreversibel. Die effektive Kriechdehnung und die Dehngeschwindigkeit hängen von der aufgetragenen Last ab: Je höher die Last oder Spannung, desto höher und schneller die Dehnung (Bild VII-17).

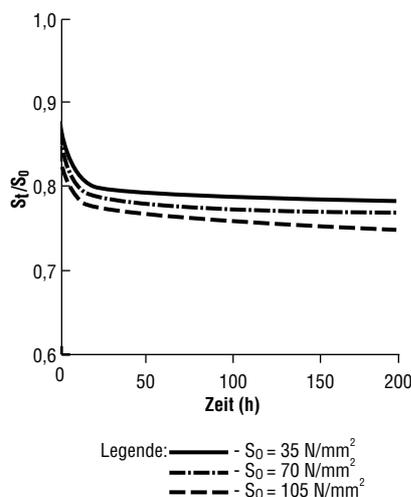
**Bild VII-17.**  
**Kriechneigung als Funktion von Spannung und Zeit**



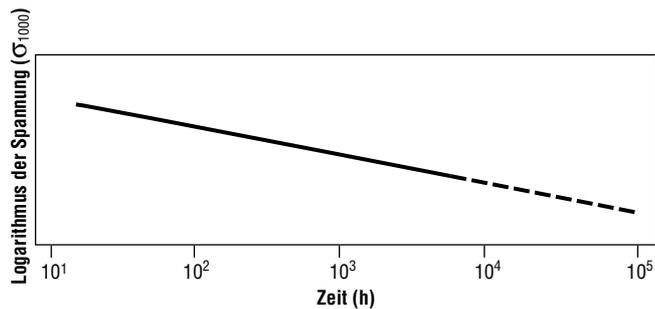
Die Spannungsrelaxation erfolgt um so schneller, je höher die Anfangsspannung ist (Bild VII-18). Wenn daher die Spannung einer mechanischen Verbindung minimiert wird, reduziert sich auch das Nachlassen der Spannkraft.

Die Höhe der irreversible Deformation bis zum Versagen von Kunststoffteilen sind vom Spannungsniveau abhängig. Durch Auftragen der Zeit bis zum Bruch gegen die aufgetragene Spannung in einer Logarithmusgrafik erhält man eine nahezu lineare Kurve, die über die Nutzdauer der Teile bei fortgesetzter Belastung Aufschluß gibt. Es wird davon abgeraten, die Kurve über einen Zeitraum von 10 Jahren hinaus zu extrapolieren. Beispiele für diese Methode der Nutzdauerberechnung zeigen Bilder VII-19 und VII-20.

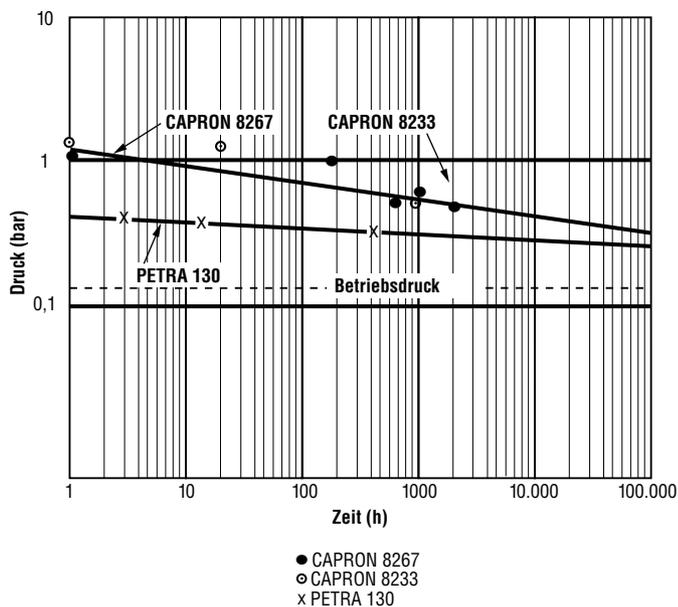
**Bild VII-18.**  
**Druckrelaxation von 33% glasfaserverstärktem Polyamid**



**Bild VII-19.**  
**Extrapolation einer Kriech-Bruch-Kurve zur Abschätzung der Nutzdauer**



**Bild VII-20.**  
**Druck als Funktion der Zeit bis zum Bruch für Räder bei 23°C**



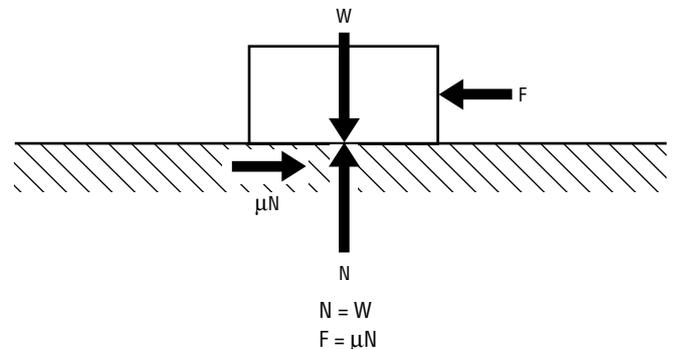
**Reibungskoeffizient**

Als Reibungskoeffizient ( $\mu$ ) gilt der einheitslose Proportionalitätsfaktor aus dem Verhältnis der Reibungskraft ( $F$ ) zur Normalkraft ( $N$ ), mit der Flächen zusammengepreßt werden:  $\mu = F/N$

Der Koeffizient drückt den Widerstand aus, der überwunden werden müßte, um die Flächen gegeneinander zu bewegen. Dabei wird zwischen der anfänglichen Haft- und der weiteren Gleitreibung unterschieden, mit entsprechenden statischen und kinematischen Reibungskoeffizienten ( $\mu_s$  und  $\mu_k$ ).  $\mu_s$  ist normalerweise größer als  $\mu_k$ . Je niedriger der Koeffizient, desto geringer der Reibungswiderstand.

Die in Tabelle VII-2 aufgeführten Reibungskoeffizienten wurden nach ASTM D-1894 mit einem Schlitten (Material 1) ermittelt, der über eine Fläche (Material 2) gezogen wird (Bild VII-20). Die Prüfmethode ist sehr empfindlich für Unebenheiten, Oberflächendefekte und Verzug. Die aufgeführten Faktoren gelten als charakteristisch, sollten im konkreten Anwendungsfall aber durch praxisnahe Tests überprüft werden.

**Bild VII-21.**



**Tabelle VII-1.**  
**Reibungskoeffizienten**

PRODUKT	POLYMER-AUF-POLYMER		POLYMER-AUF-STAHL	
	STATIC	KINETIC	STATIC	KINETIC
<b>CAPRON®</b>				
8200 HS	0,26	0,21	0,17	0,16
8202C HS	0,53	0,33	0,24	0,16
8224 HS	0,48	0,47	0,23	0,17
8253 HS	0,33	0,32	0,25	0,16
8254 HS BK-102	0,48	0,47	0,32	0,22
8350 HS	0,35	0,32	0,25	0,17
8351 HS BK-102	0,4	0,35	0,25	0,18
D-8358 HS BK-102	0,39	0,38	0,25	0,19
8233G HS	0,34	0,32	0,25	0,16
8267G HS	0,3	0,22	0,23	0,17
D-8333G HS GY5723	0,34	0,32	0,26	0,17
8360 HS	0,41	0,22	0,23	0,15
<b>PETRA®</b>				
130	0,22	0,21	0,15	0,13
230	0,37	0,27	0,2	0,15
D-242 BK-112	0,33	0,32	0,21	0,16
132	0,33	0,32	0,18	0,15
<b>DIMENSION®</b>				
D-9000	0,25	0,24	0,18	0,15
D-9130	0,38	0,37	0,17	0,14

Capron®, Petra®, and Dimension® sind eingetragene Warenzeichen von AlliedSignal

## **Gasinjektionsanwendungen**

Hohlformteile .....	VIII-2
Teilfüllung .....	VIII-3
Vollständig gefüllte Form. ....	VIII-3

## Teil VIII: Gasinjektionsanwendungen

Das Gasinjektionsverfahren wird eingesetzt, um Hohlräume in dickwandigen Bereichen von Spritzgussteilen ohne Kern zu erzeugen. Es ermöglicht die Fertigung großer, dimensionsstabiler aber leichter Teile mit guten Oberflächen und mechanischen Eigenschaften. Darüber hinaus verringern sich Zykluszeit und Materialverbrauch, was Kosteneinsparungen erschließt.

Beim Spritzgießen mit anschließender oder auch simultaner Gasinjektion wird das Werkzeug normalerweise nur teilweise gefüllt und in die Schmelze ein inertes Gas (meistens Stickstoff) injiziert. Letzteres geschieht je nach Verfahrensvariante und Einsatzzweck entweder direkt über die Einspritzdüse oder über separate Kanäle. Der Gasdruck, mit dem die Schmelze aufgeblasen und an die Werkzeuginnenwand gedrückt wird, kann bis kurz vor dem Entformen beibehalten werden. Werkzeugschwindung beim Kühlen, Einfallstellen und Eigenspannungen, die zum Verzug der Teile führen können, lassen sich auf diese Weise wirksam minimieren.

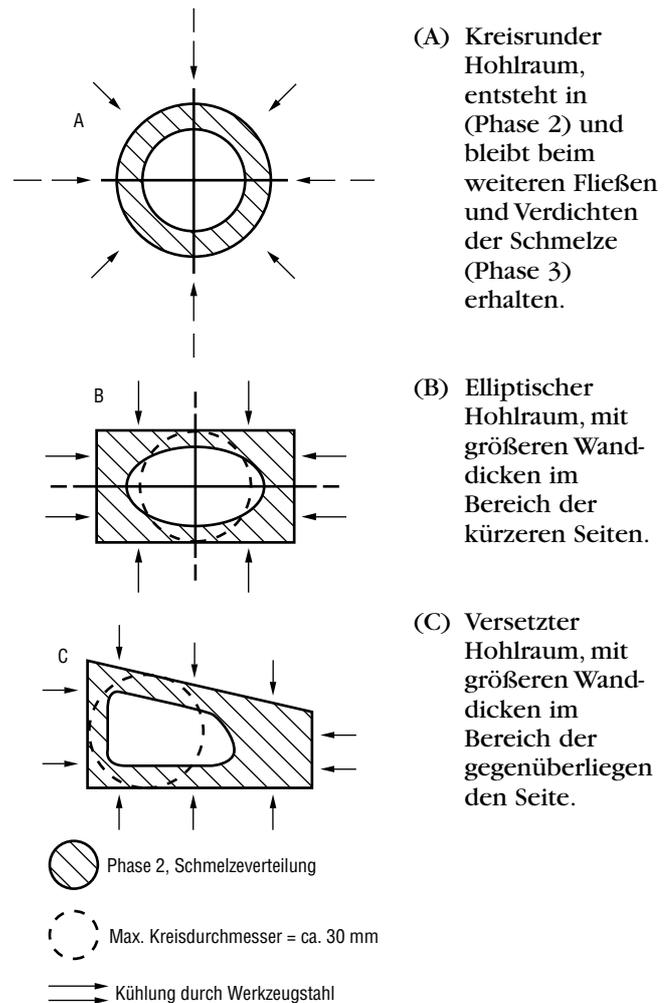
1. Hohlformteile
2. Teilfüllung
3. Vollständige Füllung

### Hohlformteile

Typische Anwendungen sind Großformteile, Stühle und Armlehnen, aber auch zahlreiche Griffe für Kraftfahrzeuge, Kettensägen etc. Der Querschnitt der Hohlformteile hängt von ihrer Geometrie, vom Gas- und Schmelzestrom sowie vom Materialtyp und Füllstoffanteil ab. Bild VIII-1 zeigt drei der häufigsten Varianten. Der maximale Kreisdurchmesser für den Hohlraum beträgt in der Regel 30 mm.

#### Bild VIII-1

Quelle: „Application of Gas Injection Technology“, Matthey Sayer, Cinpress Ltd.



**Phase 1. Einspritzen**

**Phase 2. Gasinjection**

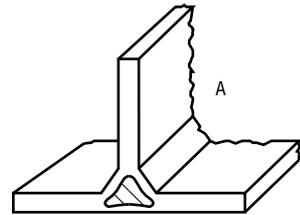
**Phase 3. Verdichten, bis zum Erreichen der Kanalgeometrie**

### Teilfüllung

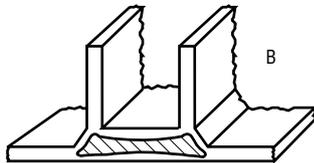
Dieses Verfahren wird normalerweise bei strukturierten Bauteilen eingesetzt, die stärkere Rippen zum Erreichen der geforderten Steifigkeit benötigen. Die Gaskanäle sind im allgemeinen so ausgelegt, daß das Gas unter dem Rippen- bzw. Nockenfuß durchströmt, um Einfallstellen zu vermeiden. Nach demselben Prinzip lassen sich auch Unterstützungen unter Seitenwänden realisieren, um das Formteil zu versteifen und Verzug zu verhindern.

### Bild VIII-2.

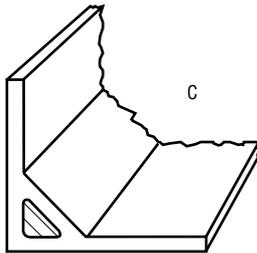
Quelle: "Design Tips for Gas-Assisted Injection Molding," Indra Baxi, Sajar Plastics, Plastics Design Forum (July/August 1990)



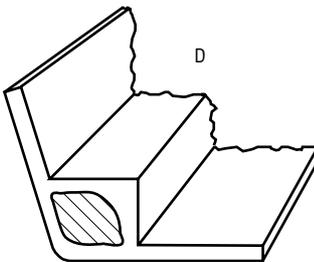
A. Vertikale Rippe



B. Doppelrippe

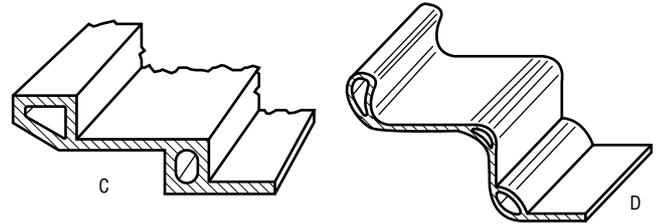
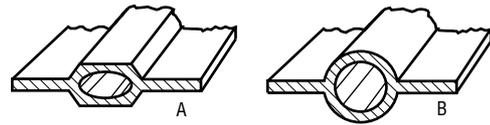


C. Kantenversteifung



D. Seitenwand

### E. Kanäle



### Vollständige Füllung

In diesem Fall wird das Werkzeug vor der Gasinjection vollständig gefüllt. Die Gasinjection wird reduziert auf den Ausgleich der Schwindung des Formteils im Werkzeug. Diese Variante sichert ausgezeichnete Oberflächen und wird vor allem dort eingesetzt, wo Einfallstellen minimiert oder ausgeschlossen werden müssen. Dies gilt speziell für Teile wie Außenspiegelgehäuse und Türgriffe im Fahrzeugbau, die lackiert oder metallisiert werden sollen.



## **Oberflächenveredelung & Nachbearbeitung**

Galvanisieren . . . . .	IX-2
Lackieren . . . . .	IX-2
Bedrucken/Heißprägen . . . . .	IX-2
Schneiden/Sägen . . . . .	IX-3
Oberflächendesign . . . . .	IX-3

## Teil IX: Oberflächenveredelung & Nachbearbeitung

### **Galvanisieren**

Das speziell für galvanisierbare Teile entwickelte Capron® 8260 (mineralgefülltes PA6) bietet ausgezeichnete Metallhaftung und Oberflächenqualität. Das Galvanisieren kann eingesetzt werden, um die Leitfähigkeit, Abschirmung und/oder das Aussehen der Teile zu optimieren. Die Oberflächen werden zunächst elektrolytisch vorverkupfert oder vorvernickelt und dann mit Kupfer, Nickel und Chrom veredelt (in dieser Reihenfolge). Auch andere Metalle sind möglich. Zwei wichtige Konstruktionskriterien für gute Galvanisierbarkeit:

- a) Große Vertiefungen und scharfe Kanten vermeiden
- b) Großzügig abrunden, um überhöhte Metallanreicherungen zu vermeiden

Bei großen Vertiefungen (Taschen) muß mit mangelhafter Metallisierung gerechnet werden. In einigen Fällen kann es erforderlich sein, die Oberflächen vorzubehandeln. Die empfohlene Gesamtdicke der Auftragsmaterialien liegt zwischen 25 und 125 µm. Weitere Details finden Sie im Finishing-Handbuch von AlliedSignal. Oder wenden Sie sich an unseren technischen Service.

### **Lackieren**

Die meisten und vor allem amorphe Polymere sind gut lackierbar. Auf Materialien wie PE, PP und Acetalen, die sehr glatte Oberflächen haben und besonders chemikalienbeständig sind, läßt sich die Lackhaftung durch gezielte Vorbehandlung der Oberflächen verbessern. Sorgfältige Reinigung ist entscheidend.

Die technischen Kunststoffe von AlliedSignal vertragen sich mit den unterschiedlichsten Lacksystemen. PA, PPE/PA-Blends und PET bieten die erforderliche Wärmeformbeständigkeit auch für erhöhte Einbrenntemperaturen.

Als kostensparende Alternative zum Lackieren steht PaintFree™ Petra® in einer Reihe stabiler Farbeinstellungen bereit.

### **Bedrucken/Heißprägen**

Die Polymere von AlliedSignal können mit allen gängigen Drucktechniken veredelt werden. Im Einzelfall kann eine Vorbehandlung der Oberflächen erforderlich sein, um die Haftfestigkeit der Druckfarben zu sichern. Auch hierbei ist eine gründliche Reinigung der Oberflächen das wichtigste Qualitätskriterium.

### **Schneiden/Sägen/Bohren**

PA, PET und PPE/PA-Blends können mit normalen Metallschneidwerkzeugen bearbeitet werden. Die Schneidtechnik unterscheidet sich von der für Metalle. Es sollte insbesondere auf folgende Kriterien geachtet werden:

- Ausreichend Kühlung sicherstellen.
- Schneidwerkzeug (mit ausreichender Schärfe) und vor allem für glasfaserverstärkte Materialien nur Schneidwerkzeuge mit Hinterschliff einsetzen.
- Plane saubere Auflagefläche verwenden.
- Mit niedrigen Schnittkräften arbeiten.
- Möglichst nur hartmetallbestückte Werkzeuge verwenden.
- Schnittspitzen abrunden.

### **Oberflächendesign**

Zahlreiche Oberflächenmerkmale – einschließlich Farbe – lassen sich ohne Nachbearbeitung direkt im Spritzgießwerkzeug realisieren. Konturen und Muster etc. werden von den formgebenden Werkzeugflächen präzise abgebildet.

Funktion der Teile und/oder geforderte optische Eigenschaften diktiert normalerweise die Oberflächen-gestaltung: Glatt und gleichmäßig vorzugsweise für metallisier- und lackierbare Teile, hochglänzend für viele Verbrauchsgüter. Doch auch matte, genarbte und texturierte Teile können sehr attraktiv wirken, sind außerdem griffiger und bieten mehr Kontrast. Einfallstellen, Kratzer und normaler Verschleiß fallen hier weniger auf als bei glatten Flächen.

Die Oberflächenveredelung mit Hilfe der formgebenden Werkzeugflächen ist in der Vergangenheit oft nur willkürlich spezifiziert oder völlig vernachlässigt worden. Als ein praktischer Ratgeber für gezieltes Oberflächendesign hat sich der "Mold Finish Guide" der Society of the Plastics Industry (SPI) bewährt. Vielfach werden heute auch dort aufgeführte SPE/SPI-Nummern für das Finish spezifiziert.

Gleichmäßig matte und texturierte Werkzeugflächen sind normalerweise kostengünstiger als hochpolierte und können mit Dampf- oder Sandstrahlern hergestellt werden. Besondere Muster und Narbungen lassen sich durch spanende Bearbeitung oder Ätzen erzielen. Es gibt außerdem zahlreiche Unternehmen, die sich auf das Gravieren der Werkzeuge für eingeformte Muster, Ornamente und Schriftzüge spezialisiert haben.



## Physikalische Eigenschaften & Terminologie

Anisotropie . . . . .	A-2
Dichte . . . . .	A-2
Duktilität . . . . .	A-2
Elastizität . . . . .	A-2
Gleitfähigkeit . . . . .	A-2
Härte . . . . .	A-2
Isotropie . . . . .	A-2
Kerbempfindlichkeit . . . . .	A-2
Plastizität . . . . .	A-3
Reibung und Verschleiß . . . . .	A-3
Spezifisches Gewicht (relative Dichte) . . . . .	A-3
Sprödigkeit . . . . .	A-3
Verarbeitungsschwindung . . . . .	A-3
Verzug . . . . .	A-3
Wasseraufnahme . . . . .	A-3
Zähigkeit . . . . .	A-3

## Anhang A: Physikalische Eigenschaften & Terminologie

Physikalische Eigenschaften – wie Dichte, spezifisches Gewicht, Verarbeitungsschwindung, Wasseraufnahme, Elastizität, Duktilität, Zähigkeit, Sprödigkeit, Kerbempfindlichkeit, Tribologie (Gleitfähigkeit und Abriebbeständigkeit) und (An-) Isotropie – sind für die Eignung und Haltbarkeit von Kunststoffteilen entscheidend. Nachstehend einige Definitionen:

### **Anisotropie**

Bei anisotropen Materialien sind die Eigenschaften abhängig von der Meßrichtung (in oder quer zur Fließrichtung). Dies gilt insbesondere für glasfaserverstärkte und mineralgefüllte Polymere mit orientierten Fasern.

### **Dichte**

Die Dichte eines Kunststoffs ist die Masse seiner Volumeneinheit an Luft, wird normalerweise bei 23°C gemessen und in g/cm<sup>3</sup> ausgedrückt.

### **Duktilität**

Duktilität ist die Streck-, Zieh- oder Rollbarkeit eines Materials ohne Zerstörung seiner Integrität. Duktiler Versagen (Zähbruch) ist ein typisches Zeichen für gleitende Molekülschichten.

### **Elastizität**

Elastizität ist die Rückstellfähigkeit eines Materials nach Verformung zu seiner ursprünglichen Größe und Form. Sie reicht bis zur Streckgrenze, die das Höchstmaß der Spannung definiert, bis zu der sich der Kunststoff ohne bleibende Dehnung elastisch verhält, und wird als Kraft pro Fläche ausgedrückt. Der elastische Bereich spielt eine bedeutende Rolle in der Finite-Elemente-Analyse von thermoplastischen Formteilen und ist bei den meisten Kunststoffen begrenzt.

### **Gleitfähigkeit**

Gleitfähigkeit bezieht sich auf die Belastbarkeit eines Materials unter Bewegung. Polymere mit guter Gleitfähigkeit haben niedrige Reibungskoeffizienten bei Kontakt mit gleichen oder anderen Materialien und neigen nicht dazu, sich festzufressen.

### **Härte**

Härte ist eng mit Verschleiß-, Kratz- und mechanischer Festigkeit sowie Steifigkeit und Sprödigkeit verbunden. Die unterschiedlichen Härteprüfungen für Kunststoffe liefern Aussagen über deren Widerstandsfähigkeit gegen das Eindringen oder Eindringen von Körpern, über die Kratzfestigkeit bei Kontakt mit anderen Materialien und über die Rückstellfähigkeit.

### **Isotropie**

Isotrope Materialien haben die gleichen physikalischen Eigenschaften unabhängig von der Meßrichtung.

### **Kerbempfindlichkeit**

Kerbempfindlichkeit bezeichnet die Neigung eines Kunststoffs zur Rißweiterbildung in Bereichen mit Spannungskonzentratoren – wie scharfen Ecken/Kanten, Rillen, abrupten Wanddickenübergängen etc. Von den Konstruktionsparametern in diesen Bereichen hängt ab, wie sich die Anwendung unter Schlag- oder zyklischer Belastung verhalten wird.

### **Plastizität**

Plastizität ist die Eignung oder Neigung eines Materials, sich unter der Einwirkung einer Kraft (Spannung) bleibend zu verformen. In den Spannungs-/Dehnungskurven von Polymeren liegt die Plastizität im Bereich jenseits der Streckgrenze. Erhöhte Temperaturen können die Plastizität eines Kunststoffes beeinflussen.

### **Reibung und Verschleiß**

Reibung ist der Widerstand gegen die Relativbewegung von zwei sich berührenden Flächen. Wenn der Kunststoff im Bereich der Kontaktfläche über seine Festigkeit hinaus belastet wird, entsteht Verschleiß- oder Abrieb. Obwohl Kunststoffe meist weniger hart als Metalle sind, weisen sie zum Teil ausgezeichnete Abrieb- und Verschleißfestigkeit auf.

### **Spezifisches Gewicht (relative Dichte)**

Als spezifisches Gewicht oder relative Dichte bezeichnet man die Masse eines Materialvolumens an Luft und bei 23°C im Verhältnis zu einer entsprechenden Wassermenge gleicher Volumendichte an Luft bei gleicher Temperatur. Der Wert wird ohne Einheit angegeben und weicht geringfügig von dem der Dichte ab, da die Dichte von Wasser bei 23°C nicht ganz 1 g/cm<sup>3</sup> beträgt. Die Angabe des spezifischen Gewichts gilt seit Einführung der SI-Einheiten im internationalen Normierungssystem als veraltet, wird jedoch im englischen Sprachraum nach wie vor gepflegt.

### **Sprödigkeit**

Sprödigkeit ist das Gegenteil von Zähigkeit. Generell gilt, daß verstärkte Thermoplaste steifer und weniger schlagzäh, also spröder sind als unverstärkte Thermoplaste.

### **Verarbeitungsschwindung**

Verarbeitungsschwindung ist die Kontraktion von Formteilen beim Abkühlen auf Raumtemperatur im Vergleich zum Volumen oder den Abmessungen des Werkzeugs. Sie beginnt im Werkzeug unmittelbar nach dem Einspritzen der Schmelze und ist meist erst nach dem Entformen abgeschlossen. Durch optimale Wahl der Angußposition(en), Angußdurchmesser, Zykluszeit und ungehinderte Fließwege läßt sich die Schwindung oder Maßdifferenz in allen Bereichen des Formteils minimieren.

Bei gleichen Materialien kann aufgrund spezifischer Konstruktions- und Verarbeitungsparameter - wie Wanddicke, Fließrichtung und Spritzdruck - unterschiedliche Schwindung auftreten. Die Verarbeitungsschwindung ist ein entscheidender Faktor beim Substituieren von Materialien für bestehende Konstruktionen (Metall durch Kunststoff oder Kunststoff durch Kunststoff) und bei Formteilen aus verstärkten Kunststoffen (Vermeidung von Schwindungsdifferenzen bzw. Verzug).

### **Verzug**

Bei Formteilen mit komplexer Geometrie können die Schwindmaße von Bereich zu Bereich schwanken und während der Kühlphase zum Aufbau von Spannungen führen, die schließlich Verzug verursachen.

Verzug und Verwindung treten auch auf, wenn zu hohe Schwindungsdifferenzen (Längs- gegen Querschwindung) vorliegen. Der Verzug kann erheblich größer ausfallen als das Schwindmaß in der Ebene.

### **Wasseraufnahme**

Wasseraufnahme (Hygroskopie) ist die prozentuale Gewichtszunahme eines Formteils bei Lagerung in Wasser oder Einfluß von Umgebungsfeuchtigkeit. Nicht alle Kunststoffe sind hygroskopisch. Die meisten Teile aus technischen Thermoplasten neigen jedoch dazu, in spritztrockenem Zustand Feuchtigkeit aufzunehmen. Die Geschwindigkeit, mit der dies geschieht, ist zum Teil sehr unterschiedlich.

Standardprüfkörper aus Materialien, deren physikalische Eigenschaften bei Temperaturen im Bereich von 110°C merklich beeinflußt werden, sollten nach dem Spritzgießen 24 h bei 50°C getrocknet, in einem Exsikkator gekühlt und sofort auf ein 10.000tel Gramm genau gewogen werden.

Die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme wird bei 50% relativer Luftfeuchtigkeit gemessen. Die Sättigung wird in Prozent des Trockengewichts angegeben. Feuchtigkeit in Kunststoffteilen (Wasseraufnahme) beeinflußt die physikalischen, mechanischen und elektrischen Eigenschaften sowie die Dimensionsstabilität. Feuchtigkeit im Granulat kann zu erheblichem Abbau der physikalischen Eigenschaften des Kunststoffes führen, wenn sie vor der Verarbeitung nicht auf die empfohlene Restfeuchte reduziert wird.

### **Zähigkeit**

Zähigkeit beschreibt die Fähigkeit eines Materials, mechanische Energie zu absorbieren, ohne zu brechen. Dies kann bei elastischer und bei plastischer Deformation beobachtet werden. Die Zähigkeit von Polymeren wird daher oft als Bereich unter der Spannungs-/Dehnungskurve angegeben. Ungefüllte Kunststoffe sind in der Regel sehr zäh. In bestimmten Fällen mißt man die Zähigkeit als die absorbierte Energie pro Flächeneinheit bis zum Bruch.



**Internationale Prüfnormen**

## Anhang B: Internationale Prüfnormen<sup>1</sup>

Typische Nummer nach ISO 10350:1993	Eigenschaft	ISO Prüfnormen <sup>3</sup>	ASTM Prüfnormen <sup>3</sup>	SI Einheit <sup>2</sup> für ISO Test	SI Einheit <sup>2</sup> für ASTM Test	U.S. Einheit für ASTM Test
<b>1</b>	<b>Rheologische</b>					
1.1	Schmelzindex	1133:1991	D 1238	g/10 min	g/10 min	g/10 min
1.2	Volumenfließindex	1133:1991	-	cm <sup>3</sup> /10 min	-	-
1.3	Längsschwindung	-	-	%	%	%
1.3	Querschwindung	-	-	%	%	%
<b>2</b>	<b>Mechanische</b>					
2.1	Zugmodul	527-1 & 2:1993	D 638	MPa	MPa	psi
2.2	Streckspannung	527-1 & 2:1993	D 638	MPa	MPa	psi
2.3	Streckdehnung	527-1 & 2:1993	D 638	%	%	%
2.4	Reißdehnung	527-1 & 2:1993	-	%	-	-
—	Bruchdehnung	527:1966	D 638	%	%	%
2.5	Spannung bei 50% Dehnung	527-1 & 2:1993	-	MPa	-	-
2.6	Bruchspannung	527-1 & 2:1993	-	MPa	MPa	psi
2.7	Bruchdehnung	527-1 & 2:1993	D 638	%	%	%
2.10	Biegemodul	178:1993	D 790	MPa	MPa	psi
2.11	Biegefestigkeit	178:1993	D 790	MPa	MPa	psi
2.12	Charpy-Schlagzähigkeit bei -30°C	179:1993	-	kJ/m <sup>2</sup>	-	-
2.12	Charpy-Schlagzähigkeit bei 23°C	179:1993 -	-	kJ/m <sup>2</sup>	-	-
2.13	Charpy-Kerbchlagzähigkeit bei -30°C	179:1993	-	kJ/m <sup>2</sup>	-	-
2.13	Charpy-Kerbchlagzähigkeit bei 23°C	179:1993	-	kJ/m <sup>2</sup>	-	-
2.14	Zugschlagzähigkeit	8256:1990	D 1822	kJ/m <sup>2</sup>	kJ/m <sup>2</sup>	ft - lb/in <sup>2</sup>
—	Izod-Schlagzähigkeit bei -30°C	180:1993	D 4812	kJ/m <sup>2</sup>	J/m	ft - lb/in
—	Izod-Schlagzähigkeit bei 23°C	180:1993	D 4812	kJ/m <sup>2</sup>	J/m	ft - lb/in
—	Izod-Kerbschlagzähigkeit bei -30°C	180:1993	D 256	kJ/m <sup>2</sup>	J/m	ft - lb/in
—	Izod-Kerbschlagzähigkeit bei 23°C	180:1993	D 256	kJ/m <sup>2</sup>	J/m	ft - lb/in

Typische Nummer nach ISO 10350:1993	Eigenschaft	ISO Prüfnormen	ASTM Prüfnormen	SI Einheit für ISO Test	SI Einheit für ASTM Test	SI Einheit für ASTM Test
<b>3</b>	<b>Thermische</b>					
3.1	Schmelztemperatur	3146:1985	D3418	C	C	F
3.3	HDT - bei 1,8 MPa	75-1&2:1993	D 648	C	C	F
3.4	HDT bei 0,45 MPa	75-1&2:1993	D 648	C	C	F
3.7	VST/B	306:1987	D 1525,rt.B	C	C	F
3.8	CLTE* längs, 23°C bis 55°C	TMA**	E228 or 831	E-4 1/K	1/C	1/F
3.9	CLTE* quer, 23°C bis 55°C	TMA**	E228 or 831	E-4 1/K	1/C	1/F
-	Flammwidrigkeit bei 1,6 mm Wanddicke	(UL94) (UL94)	(UL94) (UL94)	mm	klasse (HB, V-2, V-1, V-0) mm	mm
-	Flammwidrigkeit 5VB, 5VA	(UL94) (UL94)	(UL94) (UL94)	klasse mm	klasse mm	klasse mm
3.16	Sauerstoffindex	4589:1994	D 2863	%	%	%
<b>4</b>	<b>Elektrische</b>					
4.1	Rel. Dielektrizitätskonstante, 100Hz	IEC 250	D 150			
4.2	Rel. Dielektrizitätskonstante, 1MHz	IEC 250	D 150			
4.3	Verlustfaktor, 100 Hz	IEC 250	D 150	E-4		
4.4	Verlustfaktor, 1MHz	IEC 250	D 150	E-4		
4.5	Durchgangswiderstand	IEC 93	D 257	ohm cm	ohm cm	ohm cm
4.6	Oberflächenwiderstand	IEC 93	D 257	ohm	ohm	ohm
4.7	Durchschlagfestigkeit	IEC 243-1	D 149	kV/mm	kV/mm	V/mil
4.9	Kriechstromfestigkeit (CTI)	IEC 112	-			
<b>5</b>	<b>Sonstige</b>					
5.1	Wasseraufnahme nach 24 h, 23°C	2:1980	D570	%	%	%
5.2	Wasseraufnahme bei 23°C, 50% r.L	62:1980	D570	%	%	%
5.3	Spezifisches Gewicht	62:1980	-	%	%	%
5.4	Dichte	1183:1987	D792	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	lb/ft <sup>3</sup>
—	Spezifisches Gewicht	1183:1987	D792			

\* CLTE = Coefficient of Linear Thermal Expansion

\*\* TMA = Thermo-Mechanical Analysis

1 In Anlehnung an: Wigotsky, Victor, „The Road to Standardization“, *Plastics Engineering*

2 Für die jeweils erstgenannte Prüfnorm

3 Nur teilweise vergleichbar

4 HDT/DTUL = Wärmeformbeständigkeit unter Belastung (ISO/ASTM)

VST/B = Vicat-Erweichungstemperatur, Verfahren B/120

CLTE = Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient längs und quer zur Fließrichtung (Thermomechanische Analyse, TMA)

UL-Flammwidrigkeitsklassen: HB, V2, V1, V0, 5VB, 5VA (höchste)



**Literatur**

## Anhang C: Literatur

### **Konstruktionsgrundlagen für Spritzgießteile**

Dym, Joseph B., Injection Molds and Molding, Second Edition, Van Nostrand Reinhold Company.

### **Strukturelle Berechnungen**

Beer & Johnson, Mechanical Material.

Peterson, R.E., Stress Contribution Factors.

Platten-, Torsions- und Spannungsformeln:

Roark, Raymond, and Young, Warren, Formulas for Stress and Strain, McGraw Hill.

### **Montage- & Fügetechniken**

“Designing Parts for Ultrasonic Welding,” ©Branson Ultrasonics Corporation, Danbury, CT.

“Ultrasonic Insertion,” Branson Ultrasonics Corporation, Danbury, CT.

“Vibration Welding,” Branson Ultrasonics Corporation, Danbury, CT.

Holtz, Richard, “Vibration Welding: Fast, Quiet, Efficient,” Assembly Engineering, Hitchcock Publishing.

1987 SPE ANTEC, Chul S. Lee, Alan Dubin and Elmer D. Jones, “Short Cantilever Beam Deflection Analysis Applied to Thermoplastic Snap-Fit Design,” Held in Los Angeles, California, USA.

3M, “Structural Adhesive Guide for Industrial Product Design and Assembly”.

Forward Technology Industries, “Joint Designs”.

Emabond Systems, “Emaweld, Electromagnetic Welding System for Assembling Thermoplastic Parts”.

### **Materialeigenschaften**

Arpaci, Vedal S., “Convection Heat Transfer,” Addison-Wesley.

### **Gasinjektionsverfahren**

Sayer, Matthew, “Application of Gas Injection Technology,” Cinpress, Ltd.

“Design Tips for Gas-Assisted Injection Molding,” diagram of rib designs by Indra Baxi of Sajar Plastics, Plastics Design Forum.

### **Anhang B: Internationale Prüfmethode**

Wigotsky, Victor, “The Road To Standardization,” Plastics Engineering.

### HAFTUNGSAUSSCHLUß

Alle Aussagen und Informationen in dieser Druckschrift ergehen in gutem Glauben und nach bestem Wissen, sind jedoch in keiner Weise als ausdrückliche oder implizierte Garantie zu verstehen. Risiko und Haftung für Folgen aus dem Einsatz hierin beschriebener Produkte, Verfahren oder Maßnahmen liegen beim Anwender. Angaben oder Empfehlungen in dieser Druckschrift zum möglichen Einsatz von Produkten oder Verfahren entbinden den Anwender nicht davon, bestehende Patent- oder Schutzrechte einzuhalten. Der Anwender sollte nicht davon ausgehen, daß alle Toxizitätsdaten und Sicherheitsmaßnahmen aufgeführt bzw. keine weiteren Vorkehrungen erforderlich sind.

*Alle Aussagen und Informationen in dieser Veröffentlichung ergeben in gutem Glauben und nach bestem Wissen, sind jedoch in keiner Weise als ausdrückliche oder implizierte Garantie zu verstehen. Risiko und Haftung für Folgen aus dem Einsatz hierin beschriebener Produkte, Verfahren oder Maßnahmen liegen beim Anwender. Angaben oder Empfehlungen in dieser Druckschrift zum möglichen Einsatz von Produkten oder Verfahren entbinden den Anwender nicht davon, bestehende Patent- oder Schutzrechte einzubalten. Der Anwender sollte nicht davon ausgehen, daß alle Toxizitätsdaten und Sicherheitsmaßnahmen aufgeführt bzw. keine weiteren Vorkehrungen erforderlich sind. Weitere Informationen bezüglich der sicheren Handhabung von Kunststoffen sind die einschlägigen Werkstoff-Sicherheitsdatenblätter zu entnehmen.*

*Capron®, Petra®, Dimension® und Nypel® sind eingetragene Warenzeichen von AlliedSignal Inc.*

Verkaufsbüros:  
Hinckley (Großbritannien),  
Raunheim (Deutschland),  
Le Perreux-sur-Marne (Frankreich),  
Viggiù (Italien)

Technische Zentren:  
Morristown, NJ (U.S.A.),  
Detroit, MI (U.S.A.),  
Heverlee (Belgien),  
Hong Kong, Seoul (Korea)

Kundenberatungszentren:

AlliedSignal Polymers GmbH  
Breitscheidstraße 103  
D-07407 Rudolstadt  
Deutschland  
Tel: +49 3672 52461  
Kostenfrei Tel: 0130 124 106  
Fax: +49 3672 52957

AlliedSignal Europe N.V.  
Engineering Plastics  
Grauwmeer 1  
Haasrode Research Park  
B-3001 Heverlee (Leuven)  
Belgien  
Tel: +32 1639 1267  
Fax: +32 1640 0674

AlliedSignal Inc.  
Engineering Plastics  
101 Columbia Road  
Morristown, New Jersey 07962  
U.S.A.  
Tel: +1 602 496 1000  
Fax: +1 804 530 6670

Internet: <http://www.asresin.com>