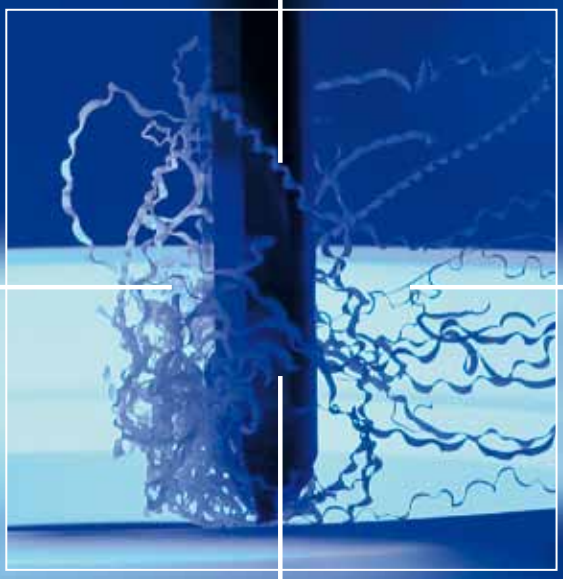
Hochleistungskunststoffe



Focus on details

POLYTRON
KUNSTSTOFFTECHNIK

Einleitung

Die POLYTRON Kunststofftechnik GmbH & Co. KG ist einer der führenden europäischen Hersteller von technischen Bauteilen aus Sonder- und Hochleistungskunststoffen.

Seit 1961 fertigen wir die verschiedensten Bauteile – auch in geringen Stückzahlen und als Einzelstücke – aus mehr oder weniger allen verfügbaren Sonder- und Hochleistungskunststoffen.

Da die Auswahl an geeigneten Kunststoffen sehr umfangreich ist und viel Erfahrung benötigt, bieten wir unseren Kunden eine umfassende Anwendungsberatung und anwendungsorientierte Materialauswahl an. Zusätzlich unterstützen wir sie bei Anwendungsversuchen sowie bei der kunststoffgerechten Konstruktion und offerieren darüber hinaus auf die Anforderungen der Kunden abgestimmte Materialschulungen.

Die vorliegende Broschüre beschreibt die wesentlichen Sonder- und Hochleistungskunststoffe und ihre Eigenschaften. Dazu werden die Eigenschaften der Materialien detailliert besprochen und miteinander verglichen. Zusätzlich werden Hinweise für die Nutzung der Sonder- und Hochleistungskunststoffe in unterschiedlichen Anwendungen gegeben.

Die Unterlage soll dem Leser nicht nur Verkaufsbroschüre sein, sondern umfangreiche technische Informationen geben und zur Vermeidung von Missverständnissen beim Einsatz von Hochleistungskunststoffen beitragen.

Sollten Sie einen bestimmten Hochleistungskunststoff suchen und in dieser Broschüre nicht finden, so sprechen Sie uns bitte an. Wir kennen den größten Teil der am Markt verfügbaren Produkte und werden uns bemühen, den richtigen Kunststoff für Ihre Anwendung zu finden.

„Kunststoff ist nur die halbe Lösung, …
… wir bieten die ganze!“

Inhaltsverzeichnis

Einleitung 02
Inhaltsverzeichnis 03
Sonder- und Hochleistungskunststoffe 04
Allgemeines..... 04
Fluorkunststoffe 05
Polytetrafluorethylen – PTFE..... 05
Fluorosint® 06
Polyvinylidenfluorid – PVDF..... 07
Polysulfide und –sulfone 08
Polysulfon – PSU..... 08
Polyethersulfon – PES 08
Polyphenylensulfon – Radel® 09
Polyphenylensulfid – Techtron®..... 09
Polyaryletherketone – Victrex® 10
Polyimide 12
Polyether-imid – Ultem®..... 12
Polybezimidazole – Celazole® 13
Polyamid-imid – Torlon® 14
Polyimid - DuPont™ Vespel® S..... 16
Zusammenfassung..... 17
Physikalische Eigenschaften..... 18
Einleitung..... 18
Isotropie..... 18
Mechanische Eigenschaften 19
Zugeigenschaften 19
Biegeeigenschaften 21
Druckfestigkeit 21
Kriechfestigkeit..... 22
Schlagzähigkeit..... 23
Härte..... 24
Thermische Eigenschaften..... 25
Schmelztemperatur..... 25
Dauergebrauchstemperatur 26
Formbeständigkeit in der Wärme 26
Wärmeleitfähigkeit..... 27
Thermische Ausdehnung..... 28
Entflammbarkeit und Brandverhalten..... 29
Elektrische Eigenschaften 31
Isolationsverhalten 31
Dielektrische Eigenschaften 32
Tribologische Eigenschaften..... 33
Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse 35
Chemikalienbeständigkeit..... 35
Verklebbarkeit 36
Einfluss von Kraftstoffen und Schmiermitteln 36
Wasseraufnahme und Hydrolysebeständigkeit..... 37
Sterilisationsbeständigkeit 38
Witterungsbeständigkeit 39
Beständigkeit gegen energiereiche Strahlung 39
Vakuumverhalten 40
Ionenkontamination 41
Materialzulassungen 42
Zusammenfassung..... 43
Verarbeitung 44
Allgemeines..... 44
Zerspanungstechnik..... 45
Spritzgusstechnik 47
Pressformtechnik 48
Fertigungstoleranzen..... 48
Wärmebehandlung..... 50
Zusammenfassung..... 51
Anwendungen 52
Allgemeines..... 52
Lagerbuchsen und Gleitelemente..... 52
Materialien 53
Konstruktionshinweise 54
Dichtungen und Dichtelemente 56
Materialien 56
Konstruktionshinweise 59
Rollen, Walzen und Räder..... 60
Materialien 60
Konstruktionshinweise 61
Bauteile für Lebensmittelindustrie..... 62
Materialien 63
Konstruktionshinweise 64
Bauteile für die Bio-, Pharma- und Medizintechnik..... 66
Materialien 67
Konstruktionshinweise 68
Bauteile für die Luft- und Raumfahrttechnik.. 69
Materialien 69
Konstruktionshinweise 71
Bauteile für die Halbleiter, Solar und Elektroindustrie 72
Materialien 72
Konstruktionshinweise 74
Abbildungen 75
Tabellen 76
Literaturhinweise..... 76
Technische Daten.....Einleger

Sonder- und Hochleistungs-kunststoffe

Allgemeines

Hochleistungskunststoffe haben zu Beginn des Jahrtausends deutlich an Bedeutung gewonnen. Obwohl die relativ hohen Materialpreise zunächst abschrecken mögen, erkennen immer mehr Anwender das sehr gute Kosten/Nutzen-Verhältnis; denn diese Kunststoffe sind metallischen oder auch keramischen Werkstoffen in ihren Eigenschaften teilweise weit überlegen.

Nachgefragt werden Hochleistungskunststoffe nicht nur für extreme Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt oder der Verteidigungstechnik, auch nicht nur für Massenmärkte wie Automobil- oder Elektrotechnik sondern zunehmend für die weiten Anwendungsbereiche der Lebensmittel- und Medizintechnik, der Verpackungstechnik und des allgemeinen Maschinenbaus.

Die so genannten Hochleistungskunststoffe sind in erster Linie technische Kunststoffe, also Polymere, die sich durch ihre mechanischen, elektrischen und thermischen Eigenschaften auszeichnen. Sie genügen weniger optischen oder haptischen Ansprüchen sondern sind für rein technische Anwendungen gedacht.

Die Abgrenzung der Hochleistungs- von den technischen Kunststoffen erfolgt in aller Regel über die Dauergebrauchstemperatur. Technische Thermoplaste können üblicherweise bis gut 130 °C, entsprechende Duroplaste bis 150 °C dauerhaft eingesetzt werden. Hochleistungskunststoffe hingegen können Temperaturen von über 150 °C dauerhaft widerstehen. So gesehen könnte man diese Materialien auch als Hochtemperatur-Kunststoffe bezeichnen.

Allerdings können diese Materialien deutlich mehr, als nur hohe Einsatztemperaturen aushalten. Einige widerstehen auch kryogenen Bedingungen mit Temperaturen von unter minus 200 °C, andere weisen eine hohe Beständigkeit gegen Chemikalien, radioaktive Strahlung oder andere Umgebungseinflüsse auf. Hochleistungskunststoffe können extrem verschleißfest, hoch rein oder besonders elektrisch isolierend sein.

Die POLYTRON Kunststofftechnik bietet Sonder- und Hochleistungskunststoffe aus verschiedenen Materialgruppen für unterschiedliche Anforderungen und Einsatzbedingungen an.

Fluorkunststoffe

Fluorkunststoffe sind teilkristalline Thermoplaste aus perfluorierten Monomeren. Diese Fluorbindungen sind relativ stabil, so dass Fluorpolymere eine hohe Chemikalien- und Temperaturbeständigkeit besitzen. Die Materialien zeigen einen verhältnismäßig hohen Kristallisationsgrad und eine für Kunststoffe hohe Dichte von bis zu 2,2 g/cm³. Darüber hinaus weisen diese Materialien im Allgemeinen gute elektrische Eigenschaften auf.

Polytron PTFE

Polytetrafluorethylen (PTFE) ist ein linear aufgebauter, teilkristalliner Thermoplast mit fast universeller Chemikalienbeständigkeit. Darüber hinaus zeichnet sich PTFE durch sehr gute elektrische und dielektrische Eigenschaften und eine Dauergebrauchstemperatur von 260 °C aus. PTFE besitzt einen extrem niedrigen statischen und dynamischen Reibungskoeffizienten, weswegen es häufig auch zur tribologischen Modifikation anderer Kunststoffe genutzt wird. Allerdings ist der Verschleißwiderstand recht gering. Des weiteren zeigt PTFE ohne Füllstoffe nur eine geringe mechanische Festigkeit und verformt sich stark unter Belastung.

Haupteigenschaften:

- Fast universelle Chemikalienbeständigkeit,
- Gute elektrische und dielektrische Eigenschaften,
- Geringe mechanische Festigkeit.

Aufgrund ihres Eigenschaftsbildes eignen sich alle PTFE Typen nur eingeschränkt für mechanisch belastete Anwendungen. Es wird aber insbesondere für Dichtungen und Dichtungselemente, für Isolationsbauteile und für mechanisch sehr gering belastete Gleitelemente verwendet.

PTFE lässt sich gut mit hohen Füllstoffanteilen vermischen und ist daher in vielen verschiedenen Typen lieferbar. Gleichzeitig ist PTFE Basis für verschiedene Sonderkunststoffe. Die POLYTRON bietet neben der ungefüllten Standardqualität POLYTRON PTFE 1000 auch Qualitäten mit verschiedenen Füllstoffen an.

Polytron PTFE GL – durch Glasfaserverstärkung erhöhte Druckfestigkeit

Polytron PTFE G – durch Grafit reduzierten Reibungskoeffizienten

Polytron PTFE C – durch Kohle erhöhte Druck- und Verschleißfestigkeit

Die Füllstoffe erhöhen je nach Anteil vor allem die mechanische Festigkeit. Sie können auch die Dimensionsstabilität und/oder die Wärmeleitfähigkeit verbessern sowie dem PTFE besondere Eigenschaften verleihen, wie z. B. elektrische Leit- oder Ableitfähigkeit oder ferromagnetische Eigenschaften. Eine Übersicht der verschiedenen Füllstoffe bietet die nachfolgende Tabelle.

Füllstoff/Modifikation		Füllstoffanteil	Verbesserung relativ zu PTFE ungefüllt	Bezeichnung
Bronze	BR	bis zu 60%	Druckfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit	Polytron PTFE B
Edelstahl	VA	bis zu 25%	Druckfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit	Polytron PTFE V
Feineisen	FE	über 25%	magnetische Eigenschaften	Ferrotron® und Fluxtrol®
Glasfaser, gemahlen	GF	bis zu 40% - Standard: 25%	Druck- und Verschleißfestigkeit	Polytron PTFE GL
Glimmer	MI	bis zu 70%	Festigkeit, Dimensionsstabilität	Fluorosint®
Grafit	GR	bis zu 20%	Wärmeleitfähigkeit, Reibungskoeffizient	Polytron PTFE G
Keramik	CMF	bis zu 15%	Druckfestigkeit	Polytron PTFE CMF
Kohle	C	bis zu 35% - Standard: 25%	Druck- u. Verschleißfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit	Polytron PTFE C
Molybdändisulfit	MO	bis zu 3% (mit BR oder GF)	Reibungskoeffizient, Verschleißfestigkeit	Polytron PTFE MO
Polyimid	PI	bis zu 40%	Festigkeit, Verschleißfestigkeit	Polytron PTFE PI
chem. Modifikation	PPVE	kleiner 1%	Kriechfestigkeit, Rückstellverhalten, Schweißbarkeit	Polytron PTFE TFM
chem. Modifikation	ESD	k.A.	elektrostatische Ableitfähigkeit	Semitron® ESD 500

Tab. 1 – Übersicht der verschiedenen PTFE-Füllstoffe

Fluorosint® (PTFE MI)

Fluorosint® ist eine spezielle Variante des bereits beschriebenen PTFE mit synthetischem Glimmer (MI) als Füllstoff. Der verhältnismäßig hohe Glimmeranteil wird in einem speziellen Herstellverfahren direkt mit dem PTFE verbunden und verleiht dem Material für Fluorkunststoffe außergewöhnlich gute mechanische Eigenschaften, ohne die PTFE-typischen Fähigkeiten zu verlieren.

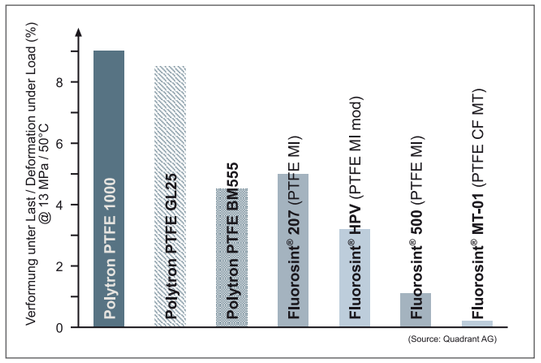


Abb. 1 – Druckfestigkeit verschiedener PTFE-Typen

Haupteigenschaften:

l Für PTFE hohe Druckfestigkeit,
l Geringer thermischer Längenausdehnungskoeffizient,
l Hohe Chemikalienbeständigkeit.

Fluorosint® wird im Press-Sinter-Verfahren zu Halbzeug verpresst, um danach spangebend zu technischen Bauteilen verarbeitet zu werden. POLYTRON bietet verschiedene Typen mit auf die Haupteinsatzbereiche abgestimmten Eigenschaften an.

Fluorosint® 500 (PTFE MI) – hohe Festigkeit, geringer thermischer Ausdehnungskoeffizient

Fluorosint® 207 (PTFE MI) – reduzierter Glimmeranteil, für Lebensmittelkontakt

Fluorosint® HPV (PTFE MI mod.) – tribologisch optimierte Type, für Lebensmittelkontakt

Fluorosint® MT-01 (PTFE CF MT) – hoch fest, äußerst geringe Kriechneigung

Die meisten Fluorosint® Typen übertreffen in Druckfestigkeit und E-Modul die mit Glas oder Bronze verstärkten PTFE Compounds deutlich. Der thermische Längenausdehnungskoeffizient von Fluorosint® ist fast so gering wie der von Aluminium, ohne dass die Chemikalienbeständigkeit durch die Füllstoffe beeinträchtigt wird. So kann das Material zu sehr genauen Bauteilen, wie z. B. Hochleistungsdichtungen verarbeitet werden. Fluorosint® eignet sich auch für hochbelastete Gleit- und Dichtungsteile, da der Glimmer die meisten Gegenlaufpartner nicht angreift.

Polytron PVDF

Polyvinylidenfluorid (PVDF) ist ein hochkristalliner, thermoplastischer Fluorkunststoff mit relativ ausgewogenen mechanischen Eigenschaften. Im Vergleich zum PTFE verfügt PVDF über eine deutlich bessere Steifigkeit und Druckfestigkeit, aber auch über eine erheblich geringere Dauergebrauchstemperatur von nur 150 °C. PVDF weist eine hohe Beständigkeit gegen energiereiche Strahlung auf und gilt als physiologisch unbedenklich. Darüber hinaus erfüllt dieser Kunststoff höchste Reinheitsansprüche, weswegen er gerne für Anwendungen in der Chemie-, Lebensmittel- und Halbleiterindustrie eingesetzt wird. Aufgrund seiner polaren Molekularstruktur sind die elektrischen und dielektrischen Eigenschaften von PVDF beschränkt und es kann daher nur begrenzt in Hochfrequenzanwendungen eingesetzt werden. Auf Anfrage ist auch eine statisch ableitende Type lieferbar.

Haupteigenschaften:

l Dauergebrauchstemperatur 150 °C,
l Hohe mechanische Festigkeit,
l Gute Strahlenbeständigkeit.

Bauteile aus PVDF können zudem mit einer Unbedenklichkeitsbescheinigung zum Kontakt mit Lebensmitteln gemäß Verordnung (EG) Nr. 1935/2004 geliefert werden.

Weitere thermoplastische Fluorkunststoffe wie PCTFE, PFA, FEP, ECTFE, ETFE etc. sind auf Anfrage lieferbar.

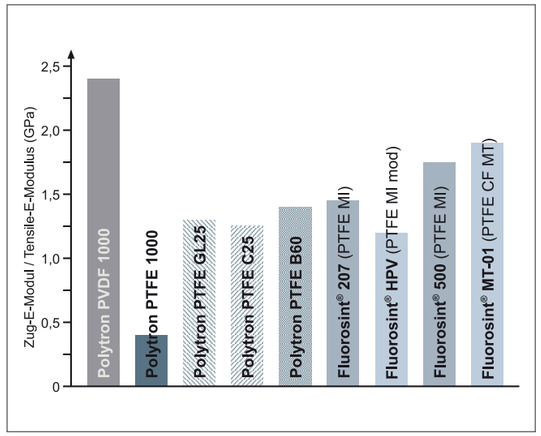


Abb. 2 – Zug-Elastizitätsmodul verschiedener Fluorkunststoffe

Polysulfide und –sulfone

Polysulfide- und -sulfone sind Hochleistungskunststoffe, deren aromatische Monomereinheiten über Schwefelbrücken miteinander verbunden sind. Zu den amorphen Polyarylsulfonen gehören Polysulfon (PSU), Polyethersulfon (PES) sowie Polyphenylensulfon (PPSU). Bei den Polyarylsulfiden ist nur das in aller Regel teilkristalline Polyphenylensulfid (PPS) von technischer Bedeutung. Alle diese Hochleistungskunststoffe weisen eine verhältnismäßig hohe mechanische Festigkeit zusammen mit einer guten Temperaturbeständigkeit auf und gelten als lebensmittelkompatibel.

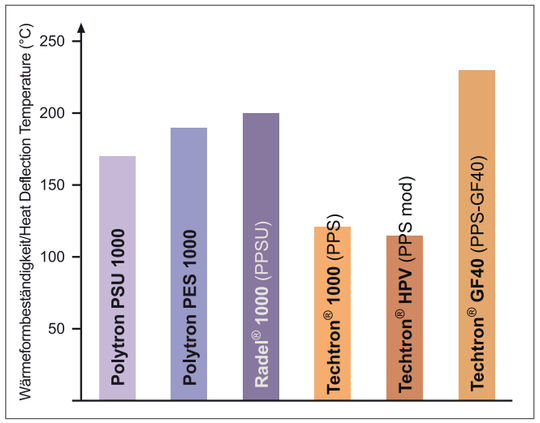


Abb. 3 – Wärmeformbeständigkeit der Polysulfone und -sulfide

Die amorphen Polyarylsulfone (PSU, PES, PPSU) zeigen darüber hinaus eine relativ gute Transparenz. Zwar sind diese Hochleistungskunststoffe nicht vollkommen transparent sondern leicht gelb bis rötlich, aber sie weisen doch eine vergleichsweise gute Lichtdurchlässigkeit von 75 bis 85 % auf. Im Vergleich zu anderen transparenten Kunststoffen (PMMA oder PC) haben sie allerdings eine deutlich höhere Temperaturbeständigkeit.

POLYTRON bietet standardmäßig folgende Polyarylsulfide- und sulfone an.

Polytron PSU 1000

Polysulfon (PSU) ist ein amorpher Thermoplast mit guter Hydrolysebeständigkeit und einer Dauergebrauchstemperatur von 150 °C. PSU hat im Vergleich zu den anderen Polyarylsulfonen das schlechteste Eigenschaftsprofil und wird daher häufig als Ersatz für Polycarbonat (PC) verwendet, wenn z. B. höhere Temperatur- und bessere Hydrolysebeständigkeit gefordert werden. Das Material findet hauptsächlich Verwendung für Bauteile der Lebensmittel- und Medizintechnik.

Haupteigenschaften:

l Dauergebrauchstemperatur 150 °C,
l Hohe Transparenz,
l Gute Hydrolysebeständigkeit.

POLYTRON PSU 1000 ist gelb-transparent und verfügt mit einem Wert von 85 % über die höchste Lichtdurchlässigkeit aller Hochleistungskunststoffe.

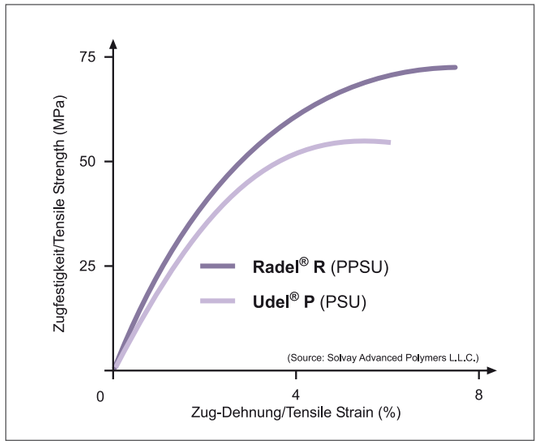


Abb. 4 – Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Polysulfone

Polytron PES 1000

Polyethersulfon (PES) ist ebenfalls ein amorpher Thermoplast, der mit seinem Eigenschaftsprofil zwischen den Polyarylsulfonen PSU und PPSU einzuordnen ist. Das Material ragt mit seiner Temperaturbeständigkeit fast an die Werte von PPSU heran, fällt jedoch bei der Hydrolysebeständigkeit hinter PSU und PPSU zurück, da PES unter den Polyarylsulfonen die höchste Wasseraufnahme aufweist.

Haupteigenschaften:

l Dauergebrauchstemperatur 165 °C,
l Braungelb transparent,
l Eigenschaftsprofil zwischen PSU und PPSU.

PES wird vornehmlich im Spritzguss verarbeitet und hat bei spangebend hergestellten Bauteilen kaum eine Bedeutung, da hier entweder PSU und PPSU bevorzugt werden.

Radel® 1000 (PPSU)

Radel® 1000 ist ein Polyphenylensulfon (PPSU), das aus dem original Radel® R Rohstoff der Firma SOLVAY Advanced Polymers hergestellt wird. Es verfügt im Vergleich zu den anderen Polyarylsulfonen über eine bessere Schlagzähigkeit und chemische Beständigkeit. PPSU zeichnet sich durch eine extreme Hydrolysebeständigkeit aus, wodurch das Material fast unbegrenzt oft mit Heißdampf sterilisiert werden kann. Aus diesem Grund wird Radel® 1000 insbesondere für medizintechnische Teile verwendet, die immer wieder Autoklavierzyklen unterzogen werden.

Haupteigenschaften:

l Dauergebrauchstemperatur 180 °C,
l Relativ hohe Schlagzähigkeit,
l Beste Hydrolysebeständigkeit.

Radel® 1000 ist zwar ein amorpher und daher grundsätzlich transparenter Kunststoff, er wird aber meist eingefärbt geliefert. Die Standardfarbe ist schwarz, andere Farben sind auf Anfrage lieferbar.

Techtron® (PPS)

Das teilkristalline Polyphenylensulfid (PPS) hat einen relativ hohen Kristallisationsgrad und ist deshalb im ungefüllten Zustand hart und spröde. Üblich sind daher mit Glas- oder Mineralfaser gefüllte oder tribologisch modifizierte Typen, die sich besser verarbeiten lassen.

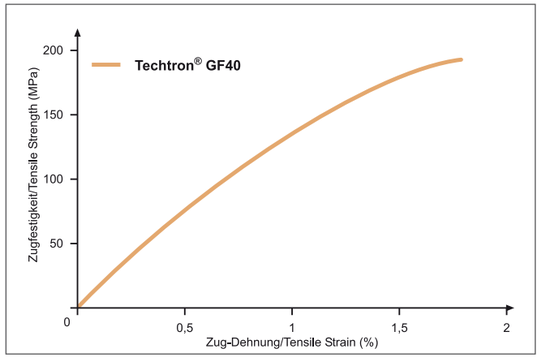


Abb. 5 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm Techtron® GF40

PPS ist mit seiner Dauergebrauchstemperatur von bis zu 240 °C und seiner außergewöhnlichen Chemikalienbeständigkeit ein relativ günstiger und weit verbreiteter Hochleistungskunststoff, der in bestimmten Anwendungen mit gutem Erfolg anstatt des deutlich teureren PEEK eingesetzt werden kann.

Haupteigenschaften:

l Dauergebrauchstemperatur 220 °C,
l Hohe Korrosions- und Chemikalienbeständigkeit,
l Gute mechanische Festigkeit.

Aufgrund seiner Eigenschaften wird PPS häufig für verschiedene statische und dynamische Bauteile in der Lebensmittelindustrie und bei der Halbleiterherstellung eingesetzt. POLYTRON bietet verschiedene Techtron® Typen mit unterschiedlichen Eigenschaften an.

Techtron® 1000 (PPS) – ungefüllte Sondertype für mechanisch belastete, chemische Prozesse

Techtron® GF40 (PPS GF40) – mit 40 % Glasfaserverstärkung für hochbelastete statische Bauteile

Techtron® HPV (PPS mod.) – tribologisch modifizierte Type für den Lebensmittelkontakt

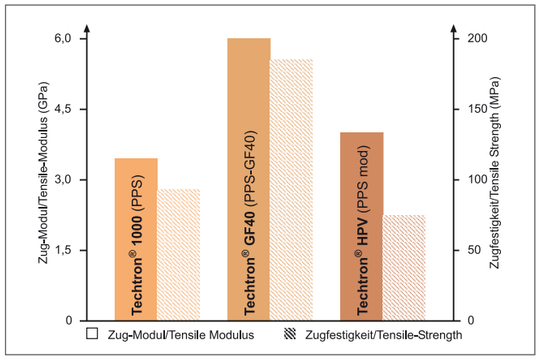


Abb. 6 - Zug-Eigenschaften verschiedener PPS-Typen

Insbesondere das faserverstärkte und gleichzeitig tribologisch optimierte Techtron® HPV zeichnet sich durch ein ausgewogenes Eigenschaftsbild aus. Es zeigt sowohl gute Gleit- und Verschleißeigenschaften als auch eine hohe mechanische Festigkeit. Bauteile aus Techtron® HPV können auch mit einer Unbedenklichkeitsbescheinigung zum Kontakt mit Lebensmitteln gemäß Verordnung (EG) Nr. 1935/2004 geliefert werden.

Polyaryletherketone – Victrex®

Polyaryletherketone (PAEK) sind teilkristalline Hochleistungspolymere, die den meisten Kunststoffen in vielen Eigenschaften, unter anderem in Temperatur- und Medienbeständigkeit überlegen sind.

PAEK enthalten in der Polymerkette Ether- und Keton-Gruppen. Der Anteil der Keton- im Verhältnis zu den Ether-Gruppen bestimmt die Schmelz- und Glasübergangstemperatur der unterschiedlichen PAEK und beeinflusst damit insbesondere die mechanische Belastbarkeit unter Temperatureinfluss. Grundsätzlich sind unterschiedliche Kombinationen von Ether- und Keton-Gruppen und damit unterschiedliche Schmelz- und Glasübergangstemperaturen möglich. Die Dauergebrauchstemperatur aller PAEK liegt bei 260 °C.

Die PAEK zeigen eine hohe Festigkeit und Steifigkeit, sind hydrolysebeständig und gegen fast alle organischen und anorganischen Chemikalien beständig. Sie gelten als hoch rein, gasen im Vakuum kaum aus und sind als physiologisch unbedenklich eingestuft und damit für den Kontakt mit Lebensmitteln geeignet. Sie erfüllen auch die höchsten Anforderungen für die Biokompatibilität und können in Medizin- und Pharmaanwendungen eingesetzt werden. Die PAEK sind selbstverlöschend und zeigen eine geringe Rauchentwicklung im Brandfall. Die elektrischen und dielektrischen Eigenschaften sind auch bei hohen Temperaturen hervorragend.

Typen	Glasübergangstemperatur (T_G)	Schmelztemperatur (T_C)	Wärmeformbeständigkeit HDT-A	Dauergebrauchstemperatur
Victrex® HT (PEK)	152°C	373°C	163°C	250°C
Victrex® PEEK™	143°C	343°C	152°C	250°C
Victrex® ST (PEKEKK)	162°C	387°C	172°C	250°C

Tab. 2 - Thermische Eigenschaften der Polyaryletherketone

Haupteigenschaften:

- Dauergebrauchstemperatur 250 °C,
- Hohe mechanische Festigkeit und Steifigkeit,
- Hoch rein und physiologisch unbedenklich.

Aufgrund ihrer Eigenschaften werden die PAEK für die verschiedensten, thermisch belasteten Bauteile in allen erdenklichen Anwendungen eingesetzt. POLYTRON bietet PAEK Typen nur aus original Victrex® Rohstoffen an.

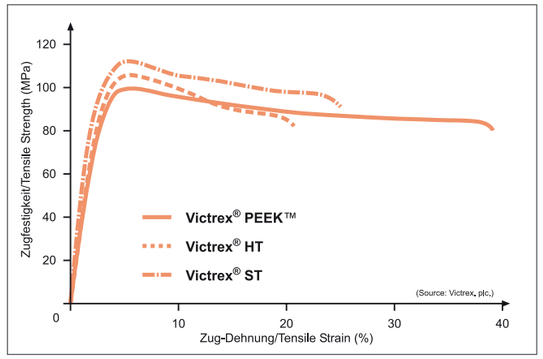


Abb. 7 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Victrex®-Typen

Neben der Basistype Victrex® PEEK™, die in verschiedenen Modifizierungen erhältlich ist, gibt es eine Hochtemperaturtype Victrex® HT (PEK) sowie eine mechanisch besonders feste, nochmal temperaturbeständigere Sondertype Victrex® ST (PEKEKK).

Victrex® PEEK™ – ungefüllte PEEK-Standardtype

Victrex® PEEK™ GL30 (PEEK GF30) – mit 30 % Glasfaserverstärkung

Victrex® PEEK™ CA30 (PEEK CF30) – mit 30 % Kohlefaserverstärkung

Victrex® PEEK™ FC30 (PEEK mod.) – tribologisch modifizierte Type mit je 10 % GR, CF, TF

Ketron® HPV (PEEK mod.) – tribologische Sondertype mit BAM-Zulassung für O_2-Kontakt

Ketron® TX (PEEK TF) – tribologische Sondertype für Lebensmittelkontakt

Victrex® HT – ungefüllte PEK-Standardtype

Victrex® ST – ungefüllte PEKEKK-Standardtype

Bauteile aus unverstärktem Victrex® PEEK™ können auch mit einer Unbedenklichkeitsbescheinigung zum Kontakt mit Lebensmitteln gemäß Verordnung (EG) Nr. 1935/2004 geliefert werden.

Sonder- und Hochleistungskunststoffe

Polyimide

Polyimide sind je nach Type amorphe oder teil-kristalline Materialien mit einer allgemein relativ hohen Dauergebrauchstemperatur von über 200 °C. Namensgebend und verantwortlich für die guten thermischen Eigenschaften der Polyimide ist die so genannte Imid-Gruppe, bestehend aus einer aromatischen Monomereinheit, Stickstoff und zwei Carbonyl-Gruppen, die alle Polyimide in ihrer Molekularstruktur aufweisen. Rein aromatische Polyimide bilden eine mehr oder weniger vernetzte Struktur und sind somit de facto duroplastisch. Durch Modifikationen in der Molekülkette lassen sich jedoch thermoplastisch verarbeitbare Polyimide herstellen. Insofern kann man die Polyimide in die besonders temperaturfesten, duroplastischen Polyimide und in die besser verarbeitbaren, thermoplastischen Polyimide unterteilen. Prinzipiell sind die unterschiedlichen thermo- und duroplastischen Polyimide mit verschiedenen Füllstoffen und Modifikationen lieferbar.

Polyether-imid – Ultem®

Ultem® ist ein amorphes Polyimid, das durch den Einbau aromatischer Ether-Gruppen in die Molekülkette eine gute thermoplastische Verarbeitbarkeit aufweist. Allerdings ist dieses Polyetherimid (PEI) mit einer Wärmeformbeständigkeit von nur knapp 200 °C auch das am wenigsten temperaturbeständige Polyimid.

Ultem® bietet gute mechanische und elektrische Eigenschaften. Das Material ist im Brandfall schwer entflammbar bei geringer Rauchentwicklung und verfügt über eine gute Durchschlagfestigkeit bei gleich bleibenden dielektrischen Eigenschaften.

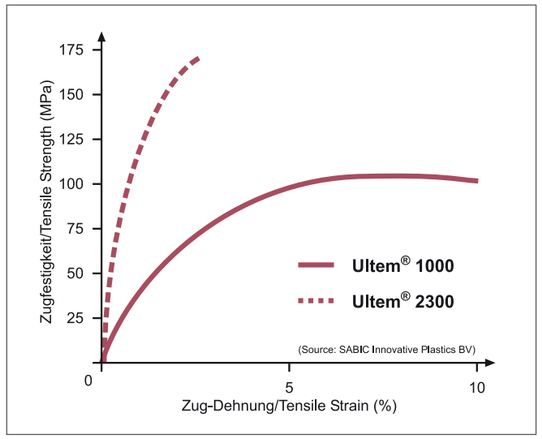


Abb. 8 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Ultem®-Typen

Haupteigenschaften:

- Wärmeformbeständigkeitstemperatur 195 °C,
- Hohe Festigkeit über einen weiten Temperatureinsatzbereich,
- Geringe Rauchgasentwicklung im Brandfall.

Das im ungefüllten Zustand braun-rot-transparente Ultem® hat zudem eine hohe Beständigkeit gegen Hydrolyse und energiereiche Strahlung, sodass es sich besonders für Bauteile in der Lebensmittel- und Medizintechnik empfiehlt. POLYTRON bietet standardmäßig zwei verschiedene Ultem® Typen an.

Ultem® 1000 (PEI) – ungefüllte, braun-rot-transparente Standardqualität

Ultem® 2300 (PEI GF30) – mit 30 % Glasfaserverstärkung

Insbesondere das mit Glasfasern verstärkte Ultem® 2300 wird häufig für maßstabile Isolationsbauteile eingesetzt.

Polybenzimidazole – Celazole®

Polybenzimidazol (PBI) ist ein amorphes Kondensationspolyimid mit extremer Temperaturbeständigkeit, das unter dem Namen Celazole® im Markt eingeführt ist.

Kurzzeitig kann PBI Temperaturen von über 500 °C widerstehen. In Sauerstoffatmosphäre beginnt die thermisch oxydative Zersetzung jedoch bereits oberhalb von 300 °C, so dass es nur unter Sauerstoffabschluss dauerhaft noch höheren Temperaturen ausgesetzt werden kann. Aufgrund seines molekularen Aufbaus wird PBI selbst nach Überschreiten der Glasübergangstemperatur nicht schmelzfließfähig.

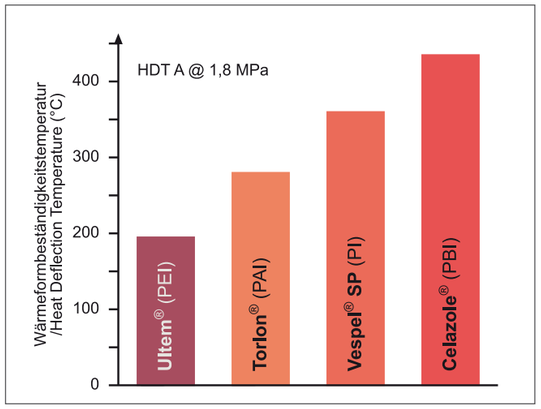


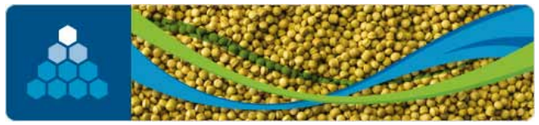
Abb. 9 - Wärmeformbeständigkeit der Polyimide

Celazole® besitzt außergewöhnlich gute mechanische Eigenschaften über den gesamten Temperatureinsatzbereich. Es zeigt eine hohe mechanische Festigkeit und einen sehr guten Verschleißwiderstand in dynamischen Anwendungen. Außerdem verfügt Celazole® über eine exzellente Plasma- und Strahlenbeständigkeit. Nachteilig jedoch ist die hohe Feuchtigkeitsaufnahme von bis zu 14 %.

Aufgrund der relativ hohen Kosten und der schwierigen Verarbeitbarkeit macht der Einsatz von Celazole® auch nur in den Anwendungen Sinn, in denen es insbesondere auf die außerordentliche Temperaturbeständigkeit des Materials ankommt. Wegen des begrenzten Einsatzbereichs ist nur eine ungefüllte Standard Celazole® Type lieferbar.

Polyamid-imid – Torlon®

Polyamidimid (PAI) ist ebenfalls ein amorphes Polyimid, das aber im Gegensatz zum PEI seine thermoplastische Verarbeitbarkeit durch den Einbau von aromatischen Amid-Gruppen erhält. Das aus dem original Rohstoff der Firma SOLVAY Advanced Polymers hergestellte Torlon® ist nicht transparent sondern wird ausschließlich eingefärbt geliefert. Es ist ein extrem fester, biegesteifer und verschleißfester Kunststoff mit einem weiten Einsatztemperaturbereich von minus 200 °C bis plus 260 °C.



Im Gegensatz zu anderen thermoplastischen Hochleistungskunststoffen, die in der Kälte verspröden und deren Festigkeitswerte mit zunehmender Temperatur deutlich abfallen, behält Torlon® seine mechanischen Festigkeitswerte weitestgehend über den gesamten Einsatztemperaturbereich bei und schmilzt selbst nach Erreichen der Glasübergangstemperatur nicht auf. Darüber hinaus verfügt Torlon® über eine sehr geringe Wärmeausdehnung und erlaubt, insbesondere mit den faserverstärkten Typen, extrem dimensionsstabile Bauteile.

Haupteigenschaften:

l Wärmeformbeständigkeit 280 °C,
l Extreme Verschleißfestigkeit,
l Ausgezeichnete mechanische Festigkeit.

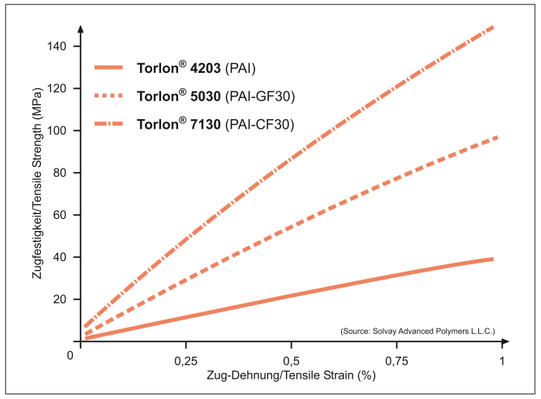


Abb. 10 – Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Torlon®-Typen

Zur Sicherstellung der hervorragenden mechanischen und chemischen Eigenschaften muss das fertige Produkt einem exakten Temperaturzyklus, Postcuring genannt, unterzogen werden, der von Geometrie

Sonder- und Hochleistungskunststoffe

bzw. Wandstärke der Bauteile abhängig ist. Diese Maßnahme ist für die anwendungsgerechte Nutzung von Torlon® unerlässlich und sollte nur von darauf spezialisierten Fachbetrieben ausgeführt werden. Torlon® ist in verschiedenen, verstärkten und tribologisch optimierten Ausführungen lieferbar. POLYTRON bietet Bauteile aus folgenden Qualitäten an.

Torlon® 4203 (PAI) – Standardtype mit guten Isolationseigenschaften

Torlon® 5030 (PAI GF30) – mit 30 % Glasfaserverstärkung für hohe Steifigkeit

Torlon® 7130 (PAI CF30) – mit 30 % Kohlefaserverstärkung für hohe Ermüdungsfestigkeit

Torlon® 4275 (PAI GR20) – tribologische Type mit 20 % Grafitanteil für hohe Geschwindigkeiten

Torlon® 4301 (PAI GR12) – tribologische Standardtype mit 12 % Grafitanteil

Torlon® 4435 (PAI mod.) – tribologische Type für hohe Belastungen

Torlon® 4630 (PAI GR TF) – tribologische Sondertype für den trockenen Einsatz

Torlon® 4645 (PAI CF, TF) – tribologische Sondertype für den geschmierten Einsatz

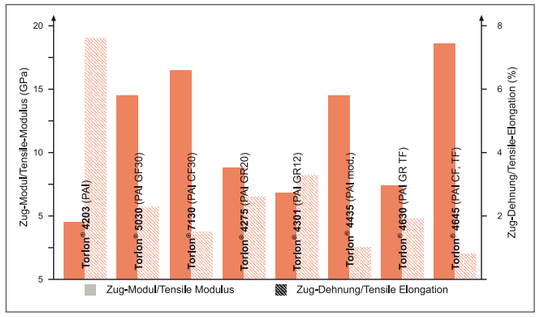


Abb. 11 - Zug-Eigenschaften verschiedener Torlon®-Typen

Bei der Konstruktion mit PAI ist die Feuchtigkeitsaufnahme von bis zu 3,5 % und die für Spritzgussteile äußerst geringe Schwindung von nur 1 % zu berücksichtigen. Große Bauteile mit Querschnitten größer 25 mm müssen in aller Regel aus gepressten Halbzeugen gefertigt werden. Die Pressqualitäten können jedoch bis zu 50 % geringere physikalische Eigenschaftswerte aufweisen als die Extrusions- und Spritzgussqualitäten.

Polyimid - DuPont™ Vespel® S

DuPont™ Vespel® S bezeichnet eine Gruppe von faktisch nicht schmelzbaren, aromatischen Polyimiden (PI). Diese Materialien verfügen über herausragende Hochtemperatureigenschaften. Sie zeichnen sich durch einen weiten Einsatzbereich von kryogenen Temperaturen bis kurzzeitig sogar weit über 400 °C aus. Die mechanischen Eigenschaften der Vespel® S Typen bleiben dabei über den gesamten Temperatureinsatzbereich annähernd stabil.

DuPont™ Vespel®

Die Materialien haben einen niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, eine hohe Verschleißfestigkeit und eine geringe Kriechneigung. Darüber hinaus zeichnen sie sich durch eine hohe Reinheit und ein geringes Ausgasungsverhalten aus.

Haupteigenschaften:

l Wärmeformbeständigkeit > 300 °C,
l Hohe Verschleißfestigkeit,
l Hohe Reinheit und geringes Ausgasungsverhalten.

Die Gruppe der Vespel® S Polyimide umfasst das teilkristalline Vespel® SP sowie das mechanisch festere und thermisch nochmal stabilere Vespel® SCP.

Das teilkristalline Vespel® SP hat keine feststellbare Glasübergangstemperatur oder andere Erweichungspunkte unterhalb einer Zersetzungstemperatur, die deutlich über 400 °C liegt.

Das Material kann bis zu 300 °C, kurzzeitig sogar bis fast 500 °C eingesetzt werden. Aufgrund dieser thermischen Eigenschaften verhält sich Vespel® SP fast wie ein duroplastischer Kunststoff und zeigt über den gesamten Temperatureinsatzbereich eine nahezu lineare Veränderung der mechanischen Eigenschaften. Für den Einsatz in Verschleißanwendungen gibt es spezielle mit Grafit und Fluorkohlenstoff modifizierte Materialtypen. Nachfolgend aufgeführte Vespel® SP Typen sind als gespante oder direkt geformte Bauteile lieferbar.

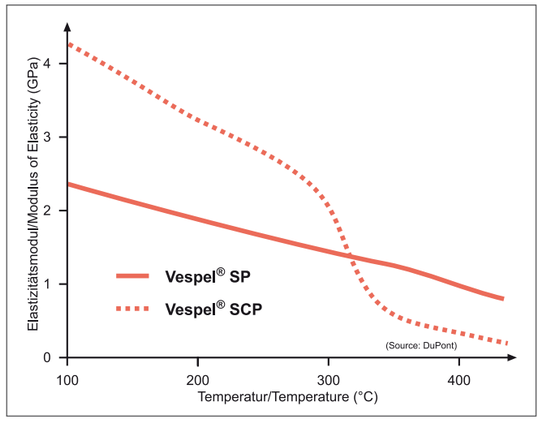


Abb. 12 - Elastizitätsmoduln der Vespel® S Typen

Vespel® SP-1 (PI) – ungefüllte Standardtype

Vespel® SP-21 (PI GR15) – tribologische Standardtype mit 15 % Grafitanteil

Vespel® SP-211 (PI GR TF) – tribologische Type mit 15 % Grafit und 10 % Fluorkohlenstoff

Vespel® SP-22 (PI GR40) – tribologische Type mit 40 % Grafitanteil für geringe Wärmeausdehnung

Vespel® SP-3 (PI MO) – tribologische Sondertype für Vakuumanwendungen

Das noch relativ neue Vespel® SCP zeichnet sich im Vergleich zum Vespel® SP durch eine deutlich höhere mechanische Festigkeit über einen weiten Temperatureinsatzbereich aus. Bei Temperaturen bis über 250 °C ist es den bisher bekannten Polyimiden überlegen. Erst oberhalb 300°C fällt die Festigkeit signifikant ab. Auch bei der Dimensionsstabilität ist Vespel® SCP den meisten Kunststoffen überlegen. Der Ausdehnungskoeffizient der mit Grafit hoch gefüllten Type Vespel® SCP-5050 ist mit dem von Edelstahl vergleichbar. Zudem zeigt Vespel® SCP eine bessere Chemikalienbeständigkeit als die bekannten Polyimide und ist diesen auch beim Widerstand gegen den thermisch-oxydativen Abbau überlegen. Für den Einsatz als Dicht- oder Gleitelemente sind nachfolgend aufgeführte Vespel® SCP Typen als gespante oder direkt geformte Bauteile lieferbar.

Vespel® SCP-5000 (PI) – ungefüllte Sondertype

Vespel® SCP-5009 (PI) – für erhöhte Temperaturen, mit besserer Druckfestigkeit

Vespel® SCP-50094 (PI) – tribologische Standardtype mit hoher Verschleißfestigkeit

Vespel® SCP-5050 (PI) – tribologische Sondertype mit besten Gleiteigenschaften

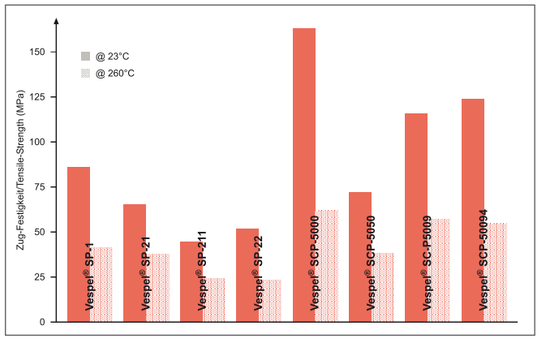


Abb. 13 - Zug-Eigenschaften verschiedener Vespel® Typen

Die verschiedenen Vespel® S Typen sind beständig gegen die meisten Lösungsmitteln, werden aber von starken Säuren und Laugen angegriffen. Wie die meisten Polyimide sind auch die Vespel® S Typen hygroskopisch und daher nicht hydrolysebeständig. Allerdings sind die Materialien gut für Vakuumanwendungen geeignet. Sie gasen auch im Hochvakuum kaum aus und verfügen über gute Trockenlaufeigenschaften.

Nachteil der Vespel® S Typen ist, dass sie nicht thermoplastisch verarbeitet werden können. Daher müssen Bauteile entweder spangebend aus Halbzeug oder bei größeren Stückzahlen in einem Press-Sinter-Verfahren direkt geformt werden.

Zusammenfassung

Mit den aufgeführten Materialien wird ein Einsatztemperaturbereich von minus 200 °C bis plus 500 °C abgedeckt. Gleichzeitig finden sich darunter sowohl hoch feste als auch zähe, anpassungsfähige Kunststoffe, so dass allen möglichen Anwendungsanforderungen entsprochen werden kann. Nachfolgend werden die physikalischen Eigenschaften der genannten Hochleistungskunststoffe näher betrachtet.

Eigenschaften der Hochleistungskunststoffe

Einleitung

Wie bereits erwähnt, sind die so genannten Sonder- und Hochleistungskunststoffe in erster Linie Polymere für technische Anwendungen. Sie zeichnen sich vor allem durch ihre mechanischen, aber auch durch ihre thermischen, elektrischen und sonstigen Eigenschaften aus.

Zur Darstellung der physikalischen Eigenschaften sei angemerkt, dass die angegebenen Daten entweder in eigenen Versuchen ermittelt oder den Angaben der Rohstoffhersteller entnommen worden sind. Die Werte wurden, wenn nicht anders angegeben, bei Raumtemperatur, an aus Halbzeug erstellten Probekörpern, gemäß Norm ermittelt. Zur besseren Übersicht wurde teilweise auf die Angabe von Markennamen verzichtet und stattdessen nur die DIN-Bezeichnung der Materialien angegeben. Die DIN-Bezeichnungen korrespondieren mit den Angaben in der Materialbeschreibung.

Isotropie

Wichtig für die Bewertung der physikalischen Eigenschaften ist das Wissen um die Isotropie bzw. Anisotropie der unterschiedlichen Kunststoffe. Isotropie bedeutet in diesem Zusammenhang, dass Materialien in alle Richtungen über die gleichen physikalischen Eigenschaften verfügen.

In der Praxis haben die Verarbeitungsverfahren einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Eigenschaften der Kunststoffe. Nur wenige Verarbeitungsverfahren führen zu einer weitgehenden Isotropie der Eigenschaften. In aller Regel zeigen die Kunststoffe entlang der Verarbeitungsrichtung bzw. parallel zur Fließrichtung günstigere Eigenschaften als quer dazu. Sie sind also anisotrop. Dies liegt an der Ausrichtung der Molekülketten und bei gefüllten Kunststoffen auch an der Orientierung der Füllstoffe. Daher ist die Anisotropie vor allem bei faserverstärkten Materialien stark ausgeprägt. Einzig gepresste, insbesondere isostatisch gepresste oder drucklos gegossene Kunststoffe zeigen annähernd isotrope Eigenschaften.

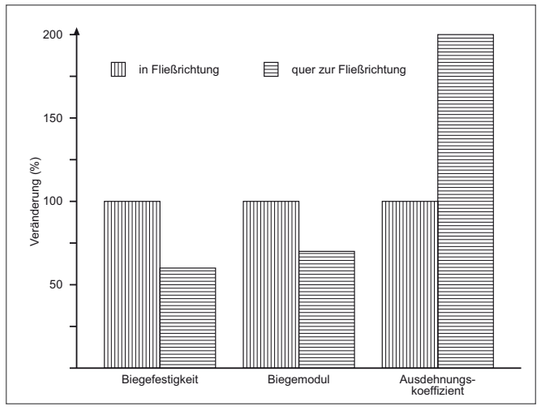


Abb. 14 - Anisotropie glasfaserverstärkter Kunststoffe

Die physikalischen Eigenschaften der Kunststoffe werden üblicherweise an genormten Probekörpern ermittelt. Diese sind häufig gespritzt und weisen z. B. für die Zugversuche im Bereich der Kraftaufnahme gerichtete Molekülketten auf. Dadurch sind die gemessenen Eigenschaftswerte an gespritzten Probekörpern höher, als die an spangebend aus Halbzeug hergestellten Probekörpern gemessenen. Insofern können sich durchaus Unterschiede zwischen den Angaben in dieser Broschüre und den Angaben in den Unterlagen der Rohstoffhersteller ergeben.

Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften der meisten Hochleistungskunststoffe sind bei Raumtemperatur mindestens mit denen der technischen Kunststoffe vergleichbar. Die Fluorkunststoffe allerdings weisen nur verhältnismäßig geringe mechanische Festigkeiten auf. Andere Hochleistungskunststoffe wie PPS, PAI oder die PAEK haben hingegen schon bei Raumtemperatur bessere mechanische Eigenschaften als die meisten technischen Kunststoffe. Sie werden daher besonders häufig für mechanisch hoch beanspruchte Bauteile ausgewählt.

Zugeigenschaften

Die Zugeigenschaften eignen sich besonders, um das mechanische Verhalten der Kunststoffe zu charakterisieren. Sie beschreiben den Zusammenhang zwischen Krafteinwirkung (Spannung) und der daraus resultierenden Verformung (Dehnung) des Werkstoffs.

Im Zugversuch nach ISO 527 werden stabförmige, sich mittig verjüngende Probekörper mit konstanter Geschwindigkeit gedehnt. Dabei werden Zug-Spannung (MPa oder N/mm²) und Zug-Dehnung (%) ermittelt. Aus dem Verhältnis von Spannung zu Dehnung wird der Elastizitätsmodul errechnet.

Die Zugeigenschaften der Hochleistungskunststoffe variieren je nach Typ recht stark, wie man dem nachfolgenden Spannungs-/Dehnungsdiagramm entnehmen kann.

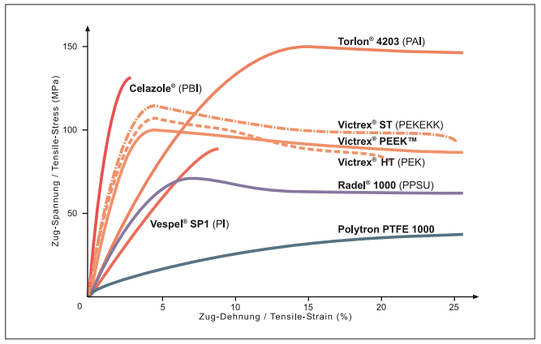


Abb. 15 - Spannungs-/Dehnungsdiagramm verschiedener Hochleistungskunststoffe

Die Abbildung zeigt nur einige ungefüllte Hochleistungskunststoffe. Sie macht aber die Unterschiede der einzelnen Materialgruppen deutlich. Auf der einen Seite stehen die bereits im ungefüllten Zustand recht spröden und harten duroplastischen Polyimide PBI und PI. Auf der anderen Seite findet sich das PTFE mit seiner zwar geringen Festigkeit aber gleichzeitig hohen Dehnbarkeit. Die PEAK (PEEK, PEK, PEKEKK) und PPSU geben den typischen Verlauf zäh-harter Thermoplaste wider.

PAI zeigt im Vergleich eine deutlich höhere Festigkeit. Es kann bereits als unverstärkte Type verhältnismäßig hohe Kräfte aufnehmen und weist dabei trotzdem noch eine gute Elastizität auf. Das Material besitzt folglich eine sehr ausgeglichene mechanische Festigkeit.

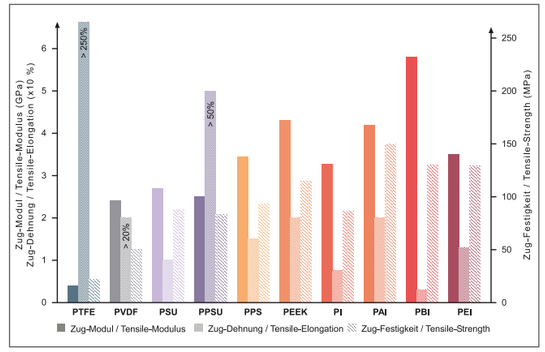


Abb. 16 - Zug-Eigenschaften verschiedener Hochleistungskunststoffe

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Materialtypen werden bei genauerer Betrachtung der Zugeigenschaften noch deutlicher. Die vorstehende Abbildung gibt die Zugfestigkeit, den Elastizitätsmodul sowie die Zugdehnung der unterschiedlichen Hochleistungskunststoffe wieder.

Die relativ geringe Festigkeit von PTFE mit einem Elastizitätsmodul von 750 bis 800 MPa und einer Zugfestigkeit von weniger als 50 MPa bei einer gleichzeitig sehr hohen Dehnbarkeit von über 300 % wird deutlich. Alle anderen Hochleistungskunststoffe weisen höhere Festigkeitswerte mit Zugmoduln von deutlich über 2 GPa, aber auch mit signifikant geringerer Dehnbarkeit auf.

Das duroplastische Polyimid PBI bildet dabei das Gegenstück zum PTFE mit einem recht hohen Zugmodul von fast 6 GPa und mit einer Bruchdehnung von nur rund 3 %.

Relativ ausgewogene Zugeigenschaften bieten PPS, PEEK und PAI. Alle drei Materialien weisen vergleichbar hohe Elastizitätsmoduln von gut 4 GPa auf, wobei für PPS die geringste und für PAI die höchste Festigkeit und Dehnung der drei betrachteten Materialien festgestellt worden ist.

Die bisher gemachten Aussagen gelten für die unverstärkten Basispolymere. Durch die Verstärkung mit Glas- oder Kohlenstofffasern verändern sich die Zugeigenschaften deutlich. Die Festigkeit steigt erheblich, während die Dehnungswerte stark abnehmen.

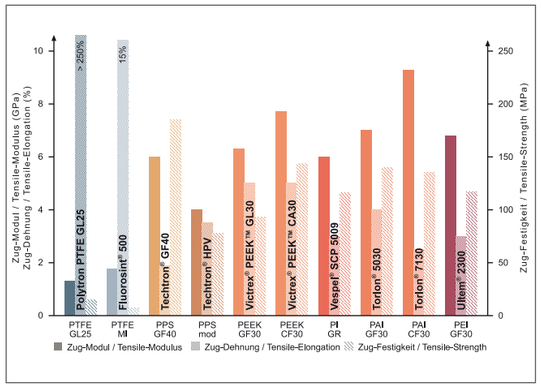


Abb. 17 - Zug-Eigenschaften verschiedener verstärkter Hochleistungskunststoffe

Die Abbildung zeigt die deutlich höheren Festigkeitswerte der verstärkten gegenüber den unverstärkten Hochleistungskunststoffen. Der bereits festgestellte relative Unterschied zwischen den einzelnen Gruppen der Hochleistungskunststoffe bleibt dennoch erhalten. Durch den Zusatz von Glas, Kohlenstofft oder Glimmer lassen sich zwar die Festigkeitswerte von PTFE deutlich verbessern. Die mechanischen Eigenschaften dieses Materials reichen aber in keinem Fall an die Werte der anderen Hochleistungskunststoffe heran, insbesondere nicht, wenn diese ebenfalls verstärkt sind.

Die Grundfestigkeit eines Kunststoffs lässt sich zwar durch Verstärkungsstoffe erhöhen. Unter zunehmendem Temperatureinfluss aber nimmt die mechanische Festigkeit auch der Hochleistungskunststoffe ab. Diesen Zusammenhang verdeutlicht die Abbildung über die Veränderung der Elastizitätsmoduln unter Temperatureinwirkung.

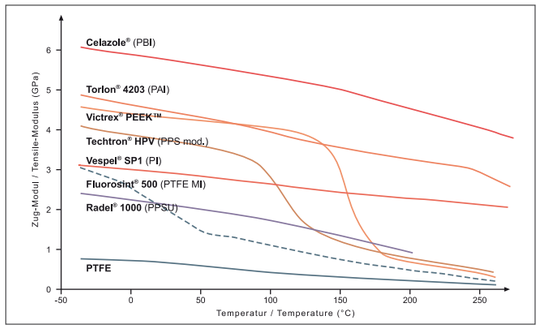


Abb. 18 - Zug-Modul verschiedener Hochleistungskunststoffe unter Temperatur

Unter Temperatureinfluss verhalten sich amorphe und duroplastische Polymere grundsätzlich anders als teilkristalline. Während die amorphen und duroplastischen Materialien fast einen linearen Verlauf der Festigkeitskurven bis hin zum Schmelzpunkt aufweisen, zeigen die teilkristallinen Thermoplaste einen eher stufenförmigen Verlauf. Bereits weit vor Erreichen der Dauergebrauchstemperatur tritt ein deutlicher Abfall der mechanischen Eigenschaften auf. Die Eigenschaften können sich innerhalb weniger Grade Temperaturunterschied um mehr als 50 % reduzieren. Dies trifft vor allem für die Materialien PPS und die PAEK sowie die thermoplastisch verarbeitbaren Fluorkunststoffe zu.

Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht dieses Phänomen nochmals. Während die amorphen Polyimide PAI, PBI, PI bei 200 °C Temperaturbelastung noch Festigkeitswerte aufweisen, wie technische Kunststoffe bei Raumtemperatur, ist die Zugfestigkeit der teilkristallinen Hochleistungskunststoffe (PPS, PEEK) auf einen Minimalwert abgesunken.

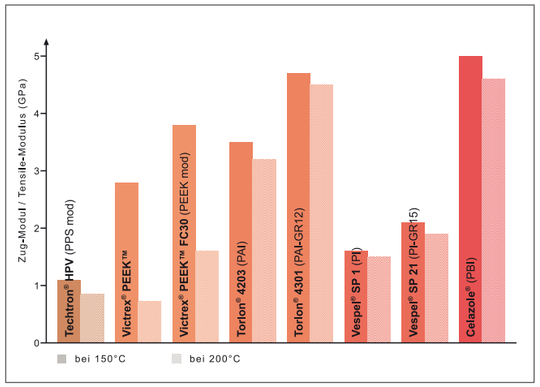


Abb. 19 - Zug-Modul verschiedener Hochleistungskunststoffe bei 150° und 200° C

Insbesondere bei PEEK lässt sich der starke Festigkeitsabfall innerhalb weniger Grade Temperaturunterschied deutlich erkennen. Bei 150° C hat PEEK noch ein E-Modul von fast 3000 MPa, aber bereits bei 200° C ist der Wert auf deutlich unter 1000 MPa abgefallen. Die Polyimide (PI, PAI, PBI) aber zeigen selbst bei 200 °C noch eine hohe Festigkeit. Diese Feststellung unterstreicht, dass für Anwendungen unter Temperaturbelastung eine sorgfältige Materialauswahl notwendig ist!

Biegeeigenschaften

Im Biegeversuch nach ISO 178 werden balkenförmige Probekörper an beiden Enden aufgelegt und mittig mit konstanter Geschwindigkeit zunehmend belastet. So lassen sich, ähnlich dem Zugversuch, Spannungs- und Dehnungswerte für Kunststoffe ermitteln.

Allerdings ergeben sich durch den versuchsbedingten einseitigen Druck auf den Probekörper unterschiedliche Randfaserspannungen; während der Probekörper auf der einen Seite gestaucht wird, wird er auf der anderen Seite gedehnt. Eine gleichmäßige Spannung wie bei Zugversuch entsteht folglich nicht. Es besteht grundsätzlich die Gefahr, dass der Biegeversuch bei Maximalbelastung höhere Festigkeitswerte ergibt als der Zugversuch. Daher muss bei einer Belastung des Materials über den Zugmodul hinaus mit einer nachhaltigen Schädigung gerechnet werden. Die Aussagekraft des Biegeversuchs ist somit begrenzt.

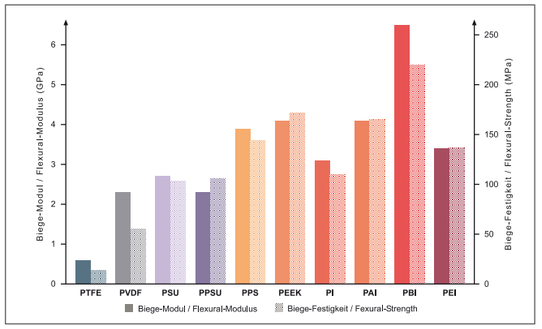


Abb. 20 - Biege-Eigenschaften verschiedener Hochleistungskunststoffe

Die Biegeeigenschaften der Hochleistungskunststoffe spiegeln im Grunde die Erkenntnisse aus den Zugversuchen wider. Auch bei der Biegefestigkeit überzeugen PEEK und PAI sowie das besonders biegefeste PBI, während die Fluorkunststoffe (hier PVDF) nur eine relativ geringe Biegefestigkeit zeigen.

Druckfestigkeit

Im Druckversuch nach ISO 604 wird der Verformungswiderstand von Kunststoffen gemessen. Ein zylindrischer Probekörper wird dafür axial, bei gleichbleibender Geschwindigkeit zunehmend belastet. Ermittelt wird die Spannung, bei der das Material um einen festgelegten Wert, in aller Regel ein, zwei oder zehn Prozent gestaucht wird. Je höher die Stauchungsgrenze festgelegt wird, desto mehr Last kann der Kunststoff aufnehmen.

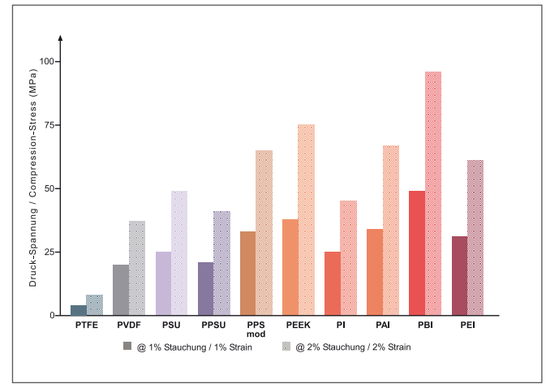


Abb. 21 - Druckfestigkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe

Insbesondere PEEK und PBI zeigen eine besonders hohe Druckaufnahme, die nur von den mit Kohle- oder Glasfasern verstärkten Typen übertroffen wird. Auch die thermoplastischen Polyimide PAI und PEI weisen eine relativ hohe Druckfestigkeit auf. Alle anderen Materialien fallen deutlich dahinter zurück.

PTFE beweist erneut seine geringe mechanische Festigkeit und die hohe Kriechneigung. Dieser Nachteil kann allerdings zu einem Vorteil werden, wenn z. B. ein verformbares Material gesucht wird, das sich an ein entsprechendes Gegenstück anpasst, um eine hohe Dichtwirkung zu erzielen. Unter diesen Bedingungen ist PTFE allen anderen Kunststoffen überlegen.

Die verstärkten Hochleistungskunststoffe können bei nur geringer Verformung noch höhere Kräfte aufnehmen als die unverstärkten.

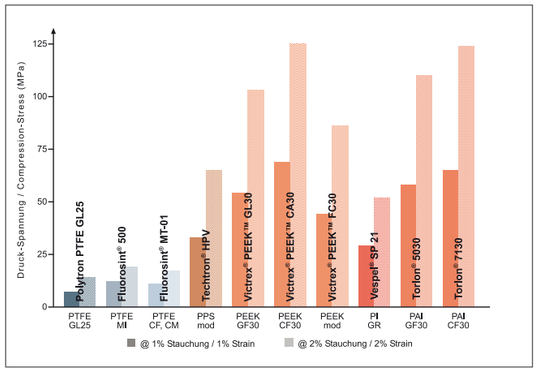


Abb. 22 - Druckfestigkeit verschiedener verstärkter Hochleistungskunststoffe

Sowohl die faserverstärkten PEEK als auch die faserverstärkten PAI Typen nehmen Spannungen von über 50 MPa auf und verformen sich dabei um nicht mehr als ein Prozent! Die verstärkten PTFE Typen zeigen sich wiederum deutlich schwächer und bleiben mit ihrer Spannungsaufnahme selbst hinter den unverstärkten PI und PAEK zurück.

Kriechfestigkeit

Unter Kriechen versteht man die Deformation eines Materials über die Zeit unter konstant anliegender Spannung und bei konstanten Umgebungsbedingungen. Im Versuch nach ISO 899-1 wird die Verformung im Zugversuch ermittelt (Zeitstand-Zugfestigkeit). Hierbei werden, wie beim einfachen Zugversuch, stabförmige, sich mittig verjüngende Probekörper über eine bestimmte Zeit hinweg mit einer bestimmten Kraft beaufschlagt. Dabei wird die Anfangsspannung widergegeben, bei der der Kunststoff z. B. nach eintausend Stunden Belastung eine Verformung von einem Prozent zeigt.

Diese Informationen sind vor allem wichtig, wenn Bauteile konstruiert werden sollen, die über einen längeren Zeitraum, dauerhaft hohen Belastungen ausgesetzt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich ändernde Umgebungsbedingungen das Kriechverhalten beeinflussen. Insbesondere bei zunehmender Temperatur sinkt die Kriechfestigkeit.

Insbesondere PAI und PBI zeigen sich als ausgesprochen kriechfeste Kunststoffe. Selbst das bei Raumtemperatur ebenfalls sehr kriechfeste PEEK lässt mit zunehmendem Temperatureinfluss stark nach und fällt bei 150 °C auf einen Wert von 8 MPa zurück. Selbstverständlich können die Werte durch entsprechende Faserverstärkung nochmals verbessert werden, dennoch kommt kohlefaserverstärktes PEEK bei 150 °C nicht über die Kriechfestigkeit von unverstärktem PAI hinaus.

Die Zeitstandzugfestigkeit beweist deutlich, dass die teilkristallinen Materialien bei zunehmendem Temperatureinfluss deutlicher nachlassen als die amorphen bzw. duroplastischen Materialien. Zeigte PEEK bei 100 °C eine noch bessere Spannungsaufnahme als PAI, so fällt es bei über 150 °C deutlich zurück.

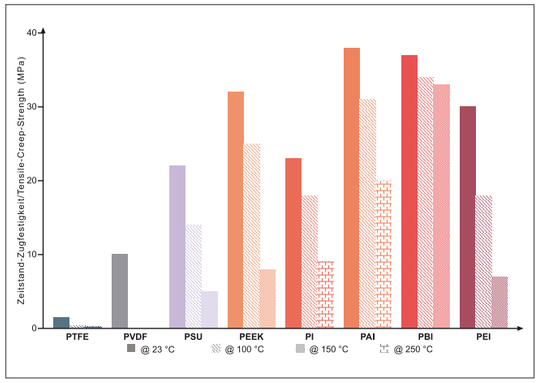


Abb. 23 - Zeitstand-Zugfestigkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe

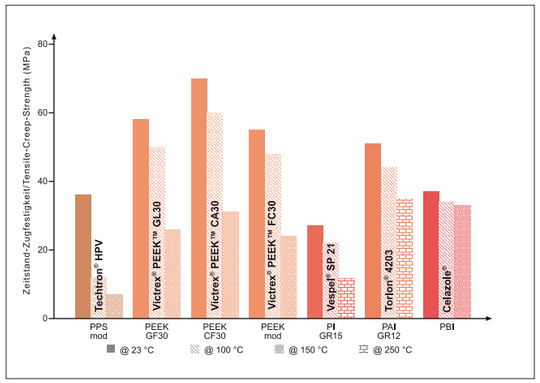


Abb. 24 - Zeitstand-Zugfestigkeit verschiedener verstärkter Hochleistungskunststoffe

Schlagzähigkeit

Die Schlagzähigkeit ist ein Indikator für die Widerstandsfähigkeit eines Kunststoffes gegenüber stoßender oder schlagender Belastung. Zur Ermittlung der Schlagzähigkeit nach der ISO 179 schlägt ein Pendelschlagwerk mit bestimmter Energie gegen einen rechteckigen, entweder gekerbten oder ungekerbten Probekörper. Dabei liegt der Probekörper und ist an zwei Seiten aufgelegt (Charpy-Schlagzähigkeit) oder er ist einseitig stehend befestigt (Izod-Schlagzähigkeit). Gemessen wird die Energieaufnahme im Verhältnis zum belasteten Querschnitt des Probekörpers (kJ/m²).

Bei dem gekerbten Probekörper wird quasi eine Schädigung vorweggenommen, da der Probekörper an der Hauptbelastungsstelle durch eine Kerbe geschwächt ist. Die Kerbschlagzähigkeit gibt somit gute Information über das Verhalten eines Kunststoffbauteils unter stoßender oder schlagender Belastung, insbesondere wenn das Bauteil eine Geometrie mit scharfen Kanten ohne Radien aufweist.

Zähe Materialien können Schlagbelastungen besser aufnehmen als feste, spröde. Für die Konstruktion ist dies insofern von Wichtigkeit, als bei der Verwendung von spröden Kunststoffen möglichst ausreichende Radien bei der Bauteilgeometrie berücksichtigt werden sollten.

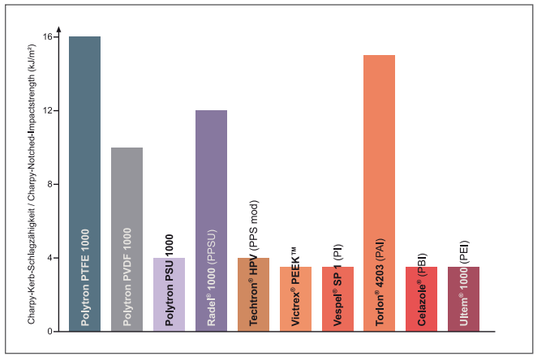


Abb. 25 - Charpy-Kerbschlagzähigkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe

Grundsätzlich kann natürlich auch die Schlagzähigkeit mit ungekerbten Probekörpern zum Vergleich der mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe herangezogen werden. Allerdings sind einige Kunststoffe so zäh, dass sie bei ungekerbten Probekörpern nicht brechen und sich deshalb keine Werte ermitteln lassen. Aus diesen Gründen bezieht sich diese Betrachtung ausschließlich auf die Kerbschlagzähigkeit der Hochleistungskunststoffe.

Wie nach den Zugeigenschaften zu erwarten, zeigt das mechanisch wenig feste, dafür aber äußerst dehnbare PTFE eine sehr hohe Zähigkeit. Aber auch die amorphen Hochleistungskunststoffe PPSU und PAI weisen eine hohe Schlagzähigkeit auf. Die teilkristallinen Hochleistungskunststoffe PPS und PEEK sowie die besonders steifen Polyimide PI und PBI sind hingegen spröde und können nur eine vergleichsweise geringe Schlagenergie aufnehmen.

Die verstärkten Hochleistungskunststoffe sind nochmals spröder als die unverstärkten und können entsprechend weniger Energie aufnehmen. Wieder zeigen die auf PTFE basierenden Compounds eine

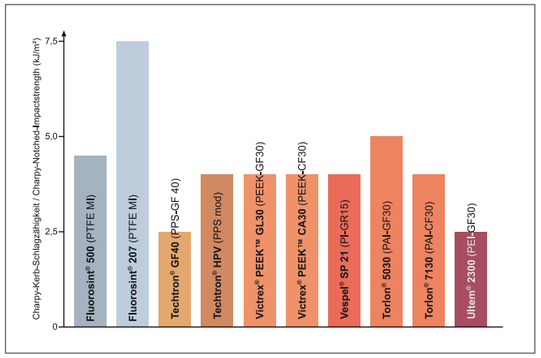


Abb. 26 - Charpy Kerbschlagzähigkeit verstärkter Hochleistungskunststoffe

höhere Energieaufnahme als die restlichen Hochleistungskunststoffe. Allerdings verändert der Zusatz von Verstärkungsstoffen die Eigenschaften nicht immer gleich. Während bei PEEK der Zusatz von Verstärkungsfasern keinen großen Einfluß auf die Schlagzähigkeit hat, nimmt bei PAI die Kerbschlagzähigkeit durch Verstärkungsstoffe deutlich ab. Mit Glasfasern verstärktes PAI ist allerdings deutlich zäher als kohlefaserverstäktes.

Härte

Die Härte von Kunststoffen ist aufgrund des elastischeren Verhaltens schwieriger zu bestimmen als bei anderen Konstruktionswerkstoffen. Es gibt unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung der Härte. Neben der von den metallischen Werkstoffen bekannten Härte nach Rockwell und der, insbesondere bei elastischen Materialien verwendeten, Shore-Härte hat sich zur Härtebestimmung von Kunststoffen insbesondere die so genannte Kugeldruckhärte durchgesetzt.
Nach der ISO 2039-1 wird ein flacher Probekörper mittels eines kugelförmigen Eindringkörpers mit einer bestimmten Prüfkraft beaufschlagt. Nach 30 Sekunden wird die Fläche des Eindrucks gemessen. Der Quotient aus aufgebrachter Kraft und Eindruckfläche ergibt die Kugeldruckhärte (MPa).

Aus der Beschreibung wird bereits deutlich, dass die Kugeldruckhärte nicht geeignet ist, Kunststoffe mit anderen Werkstoffen zu vergleichen. Sie dient einzig zum Vergleich der Kunststoffe untereinander.

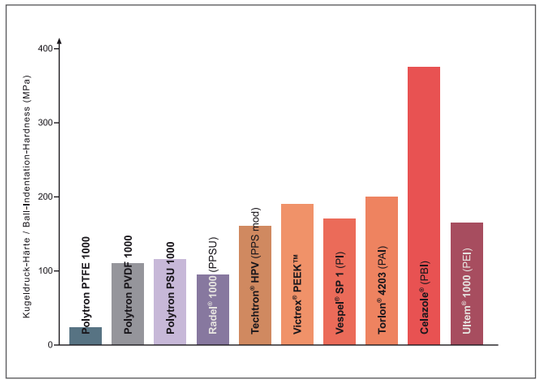


Abb. 27 - Kugeldruckhärte verschiedener Hochleistungskunststoffe

Wie bereits bei den anderen mechanischen Eigenschaften festgestellt, zeigt das wenig feste PTFE auch bei der Kugeldruckhärte die geringsten Werte. Alle anderen Hochleistungskunststoffe weisen signifikant höhere Werte auf. Dabei bieten die teilkristallinen Hochleistungskunststoffe PPS und PEEK und die Polyimide, PAI, PEI und PI ähnlich gute Härtewerte. Einzig das PBI zeigt eine, gegenüber auch diesen bereits sehr harten Hochleistungskunststoffen, nochmal deutlich höhere Kugeldruckhärte.

Die Kugeldruckhärte von PBI übertrifft sogar die der mit Glas- oder Kohlefaser verstärkten Hochleistungskunststoffe deutlich.

Obwohl sich durch Glas- oder Kohlefasern die Kugeldruckhärte der Hochleistungskunststoffe nochmal um ca. 50 Prozent steigern lässt, kommen die Materialien nicht an die Härte von PBI heran.

Abschließend lässt sich zu den mechanischen Eigenschaften der Hochleistungskunststoffe festhalten, dass alle gezeigten Materialien, abgesehen von den Fluorkunststoffen, im Vergleich zu den technischen

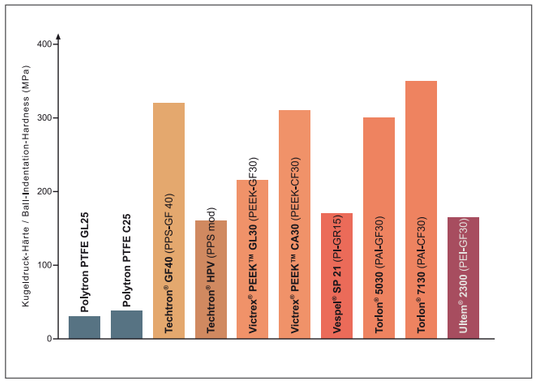


Abb. 28 - Kugeldruckhärte verschiedener verstärkter Hochleistungskunststoffe

Kunststoffen gute bis sehr gute Festigkeitswerte, mit graduellen Unterschieden bei den Einzeleigenschaften aufweisen und daher für mechanische Anwendungen grundsätzlich gut geeignet sind. Unter Temperatureinfluss ändern sich die mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe allerdings deutlich.

Thermische Eigenschaften

Schmelztemperatur

Die Schmelztemperatur (T_M) ist ein materialspezifischer Wert, der auch durch Zusatz- und Verstärkungsstoffe nicht mehr verändert werden kann. Bei Erreichen der Schmelztemperatur geht der thermoplastische Kunststoff vom festen bzw. elastischen in den plastischen Zustand über. Die Schmelztemperatur bezeichnet somit eine physikalische Grenze, über die hinaus Thermoplaste nicht weiter eingesetzt werden können.

Allerdings zeigen nicht alle Kunststoffe einen deutlichen Schmelzpunkt. Sowohl die duroplastischen Kunststoffe als auch einige thermoplastische Hochleistungskunststoffe können nicht aufgeschmolzen werden, zeigen also keine messbare Schmelztemperatur im eigentlichen Sinn! Bei fortgesetzter Temperaturbelastung über die maximale Einsatztemperatur, auch Dauergebrauchstemperatur genannt, hinaus beginnt bei diesen Materialien der sogenannte thermisch-oxidative Abbau. Das Material reagiert mit Sauerstoff und zersetzt sich; es verkohlt oder verbrennt.

Die meisten Thermoplaste hingegen erweichen bei Überschreitung der Dauergebrauchstemperatur. Dabei verhalten sich amorphe grundsätzlich anders als teilkristalline Thermoplaste.

Während die amorphen Thermoplaste fast einen linearen Verlauf der Festigkeitskurven bis hin zur Glasübergangstemperatur (T_G) aufweisen, zeigen die teilkristallinen Thermoplaste einen eher stufenförmigen Verlauf. Sie haben quasi zwei Erweichungspunkte: zum einen die Glasübergangstemperatur, bei der die amorphen Gefügebestandteile erweichen und zum andern die Kristallitschmelztemperatur (T_C), bei der die deutlich temperaturbeständigeren kristallinen Gefügebestandteile aufschmelzen. In der Regel liegt die Glasübergangstemperatur der teilkristallinen Kunststoffe deutlich unterhalb der Kristallitschmelztemperatur. Die Festigkeit der teilkristallinen Thermoplaste lässt folglich schon bei Erreichen der Glasübergangstemperatur deutlich nach, obwohl das Material da noch eine feste Form zeigt. Erst bei Überschreiten der Kristallitschmelztemperatur wird der Schmelzbereich erreicht und das Material lässt sich verformen.

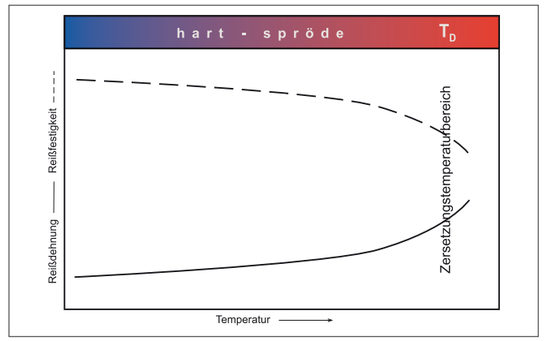


Abb. 29 - Duroplaste unter Temperatureinfluss

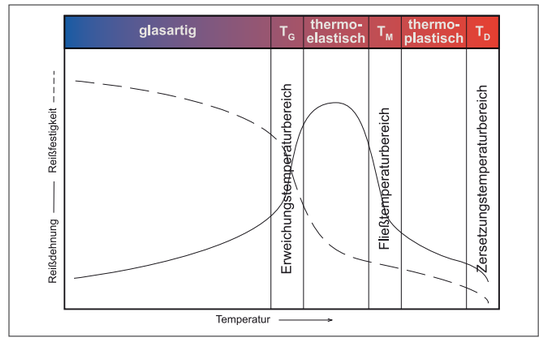


Abb. 30 - Amorphe Thermoplaste unter Temperatureinfluss

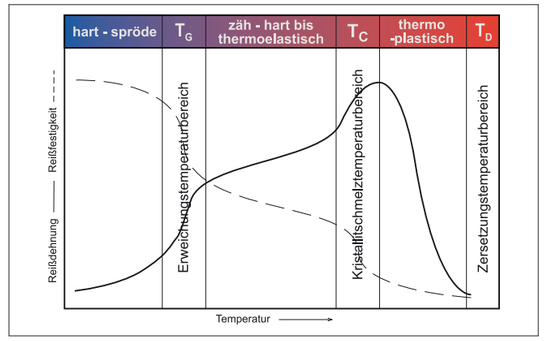


Abb. 31 - Teil-Kristalline Thermoplaste unter Temperatureinfluss

Dass bestimmte thermoplastische Hochleistungskunststoffe, wie PTFE, PAI, PBI, PI selbst bei Erreichen der Glasübergangstemperatur oder des Kristallitschmelzbereiches nicht aufschmelzen, liegt an der besonderen molekularen Struktur dieser Materialien. Sie können dennoch nicht über die Dauergebrauchstemperatur hinaus eingesetzt werden, da oberhalb dieser Temperaturen der thermisch-oxidative Abbau beginnt.

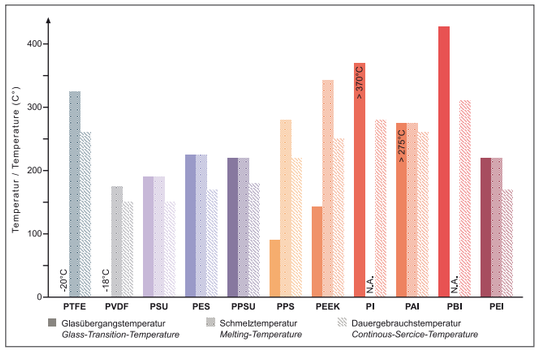


Abb. 32 - Schmelz- und Einsatztemperaturen verschiedener Hochleistungskunststoffe

Die Abbildung zeigt die Glasübergangs- und Kristallitschmelztemperaturen der verschiedenen Hochleistungskunststoffe, wobei deutlich wird, dass die Polyimide (PI, PAI, PBI) die anderen Hochleistungskunststoffe deutlich übertreffen. Für die Einschätzung des Einsatztemperaturbereiches sollte folglich vor allem auf die Glasübergangstemperatur der einzelnen Hochleistungskunststoffe geachtet werden.

Dauergebrauchstemperatur

Im Gegensatz zur Schmelztemperatur, die die Grenze der thermischen Belastbarkeit darstellt und im Gegensatz zur Wärmeformbeständigkeitstemperatur, die Aufschluss über das thermo-mechanischen Verhalten bei kurzzeitiger Temperaturbelastung gibt, ist die Dauergebrauchstemperatur ein Wert, der die maximale Einsatztemperatur eines Kunststoffes bei langanhaltender Exposition wiedergibt. Neben der Erweichung kann eine dauerhafte Temperaturbelastung auch zur Oxidation und damit zur Zerstörung des Materials führen.

Als Dauergebrauchstemperatur eines Kunststoffs wird die Temperaturgrenze bezeichnet, bei der das Material nach einer definierten Expositionsdauer (meist fünf- oder zwanzigtausend Stunden) nur noch 50 % seiner Ausgangsfestigkeit bei Raumtemperatur aufweist.

Bei Betrachtung der Dauergebrauchstemperatur wird deutlich, dass die meisten Hochleistungskunststoffe ähnliche Dauergebrauchstemperaturen um 250 bis 280 °C aufweisen. Einzig das PBI kann in Inert-Atmosphäre bis zu 500 °C dauerhaft eingesetzt werden.

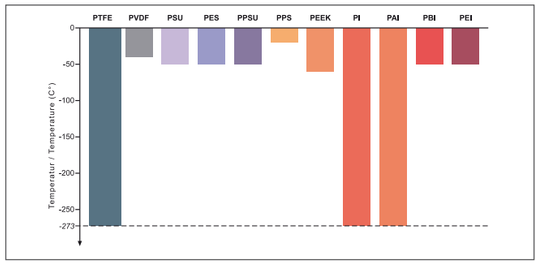


Abb. 33 - Minimale Einsatztemperatur verschiedener Hochleistungskunststoffe

Der Einsatz von Kunststoffen bei tiefen Temperaturen ist teilweise ähnlich problematisch wie bei hohen Temperaturen. Bei abnehmender Temperatur verspröden die meisten Kunststoffe und und neigen bei mechanischer Belastung zu Bruch- und Rissbildung. Üblicherweise können Kunststoffe noch gut bis -40 °C eingesetzt werden. Die Hochleistungskunststoffe machen hier keine Ausnahme. Einsatztemperaturen von bis zu -50 °C sind in aller Regel möglich. Für den Einsatz bei kryogenen Temperaturen, nahe dem absoluten Nullpunkt, sind jedoch nur wenige Materialien geeignet. Einzig PTFE, PAI und PI können bei diesen Temperaturen dauerhaft eingesetzt werden. In der Praxis sind die Polyimide (PI und PAI) bereits erfolgreich bei -270 °C genutzt worden.

Formbeständigkeit in der Wärme

Bereits bei den mechanischen Eigenschaften wurde der Einfluss von Temperatur auf die unterschiedlichen Kunststoffe deutlich. Um einen Eindruck über das Erweichungsverhalten unter mechanischer Belastung zu erhalten, bieten sich Testverfahren an, die die Formbeständigkeit des Kunststoffs in der Wärme beschreiben. Neben der Formbeständigkeit nach Martens oder Vicat ist insbesondere die Wärmeformbeständigkeit HDT (Heat Deflection Temperature) nach ISO 75 ein guter Indikator für die kurzzeitige thermisch-mechanische Belastbarkeit der Kunststoffe.

Die Wärmeformbeständigkeit HDT bezeichnet die Temperatur, bei der ein balkenförmiger Probekörper eine durch die Norm festgelegte Durchbiegung unter einer definierten Belastung (Randfaser- oder Biegespannung) erreicht. Die ISO 75-2 sieht drei unterschiedliche Belastungsstufen vor. Üblicherweise wird bei den Hochleistungskunststoffen eine Belastung mit 1,8 MPa (Methode A) verwendet.

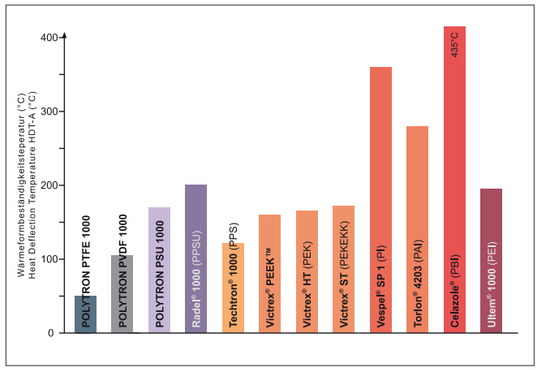


Abb. 34 - Wärmeformbeständigkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe

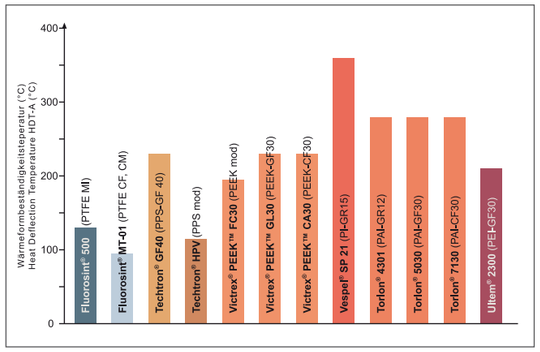


Abb. 35 - Wärmeformbeständigkeit verschiedener verstärkter Hochleistungskunststoffe

Grundsätzlich zeigt sich ein Unterschied zwischen den einzelnen Hochleistungskunststoffen, wie er auch bei den mechanischen Eigenschaften zu erkennen war. Dabei wird deutlich, dass die amorphen den teilkristallinen Kunststoffen bei der Wärmeformbeständigkeitstemperatur HDT zunächst überlegen sind. Allerdings hat der Einsatz von Verstärkungsstoffen, wie Glas- oder Kohlefasern, bei den teilkristallinen Kunststoffen (PPS, PAEK) einen deutlich größeren Effekt; die Formbeständigkeit in der Wärme wird signifikant verbessert. Die amorphen Kunststoffe hingegen zeigen mit Glas- oder Kohlenstofffasern keine höhere Wärmeformbeständigkeitstemperatur. Dieser Unterschied wird bei spritzgegossenen Bauteilen nochmals deutlicher. Der Grund hierfür liegt in der kristallinen Phase der teilkristallinen Hochleistungskunststoffe, die durch die Verstärkungsstoffe länger und besser unterstützt wird.

Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit ist eine Kennzahl für die Temperaturübertragungsfähigkeit von Werkstoffen. Kunststoffe haben im Vergleich zu metallischen Materialien (45 W/mK) in aller Regel eine deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit. Teilkristalline Kunststoffe zeigen eine geringfügig höhere Wärmeleitfähigkeit als amorphe Thermoplaste, da die kristallinen Phasen die Wärme besser leiten als die ungeordneten, amorphen Phasen. Auch ist die Wärmeleitfähigkeit in Verarbeitungs- bzw. Orientierungsrichtung häufig etwas höher als quer dazu. Dieser Effekt verstärkt sich vor allem bei spritzgegossenen Bauteilen mit geringen Wandquerschnitten. Allerdings haben diese Effekte, ebenso wie der Effekt der abnehmenden Wärmeleitfähigkeit, bei zunehmender Temperatur in der Praxis nur relativ geringe Bedeutung.

Im Vergleich der Hochleistungskunststoffe fällt auf, dass die einzelnen Materialien sich in ihrer unverstärkten Grundausführung bei der Wärmeleitfähigkeit nur gering voneinander unterscheiden. Der Zusatz

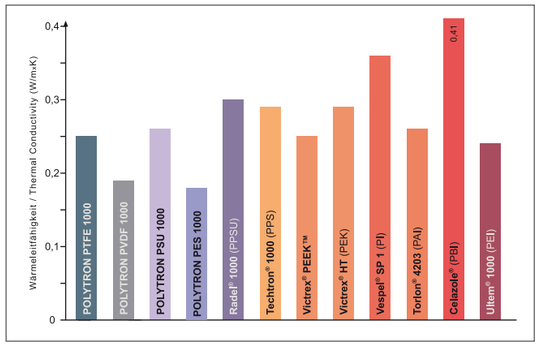


Abb. 36 - Wärmeleitfähigkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe

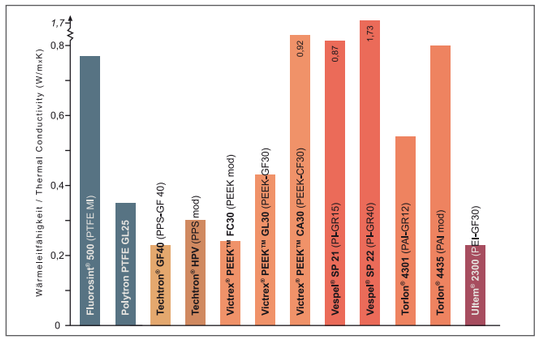


Abb. 37 - Wärmeleitfähigkeit verschiedener verstärkter Hochleistungskunststoffe

von auf Kohlenstoff basierenden Füllstoffen, wie z. B. Kohlefasern oder Grafit erhöht die Wärmeleitfähigkeit signifikant. Insbesondere in Hochtemperaturanwendungen kann eine höhere Wärmeleitfähigkeit zu einem besseren Temperaturübergang zwischen metallischem Gehäuse und Kunststoffbauteil und somit zu einer höheren mechanischen Belastungsfähigkeit oder längeren Standzeit beitragen.

Thermische Ausdehnung

Der lineare thermische Längenausdehnungskoeffizient ist eine Kennzahl für die Maßstabilität von Werkstoffen in Abhängigkeit der Temperatur. Grundsätzlich dehnen sich Kunststoffe unter Temperatureinfluss relativ stark aus. Längenänderungen in Millimetergröße bei nur 10 K Temperaturunterschied sind nicht ungewöhnlich. Dieser Effekt ist zudem parallel und quer zur Verarbeitungs- bzw. Fließrichtung des Kunststoffs unterschiedlich. In Orientierungsrichtung ist die Ausdehnung relativ geringer als quer dazu. Bei der Konstruktion von Spritzgussbauteilen lässt sich dieser Effekt durch die Fließweggestaltung bedingt beeinflussen. Bei aus Halbzeug spangebend hergestellten Bauteilen ist eine Berücksichtigung kaum möglich, da die Orientierung mit zunehmenden Querschnitten deutlich komplexer wird.
Darüber hinaus erhöht sich der thermische Längenausdehnungskoeffizient mit zunehmender Temperatur. Daher werden für den Längenausdehnungskoeffizienten in der Regel mittlere Werte angegeben, die aber in der Praxis abweichen können.

Beim Vergleich fällt auf, dass die Fluorkunststoffe mit deutlich größeren Maßänderungen auf eine Temperatursteigerung reagieren als die anderen Hochleistungskunststoffe. Hierzu ist anzumerken, dass PTFE bei ca. 21 °C eine Phasenumwandlung durchläuft. Diese Umwandlung bedingt eine gut einprozentige Volumenvergrößerung und eine nicht linear verlaufende, relative Längenänderung. Diese starke temperaturabhängige Maßinstabilität ist bei der Konstruktion mit PTFE undbedingt zu beachten.

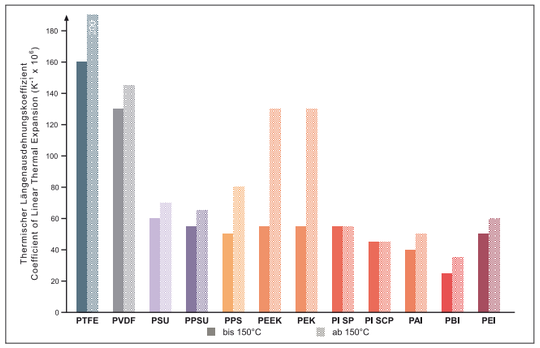


Abb. 38 - Ausdehnungskoeffizient verschiedener Hochleistungskunststoffe

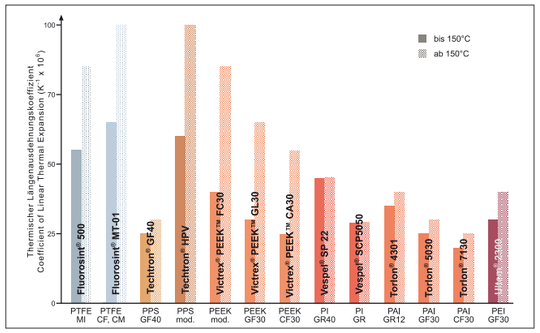


Abb. 39 - Ausdehnungskoeffizient verschiedener verstärkter Hochleistungskunststoffe

Gleichzeitig wird aber auch deutlich, dass Füll- und Verstärkungsstoffe die thermische Ausdehnung aller Materialien deutlich reduzieren. Insbesondere die Verwendung von Kohlenstofffasern führt insgesamt zu geringeren Ausdehnungskoeffizienten. Die verstärkten und modifizierten Polyaryletherketone und besonders die Polyamidimide dehnen sich unter Temperatureinfluss nur unwesentlich stärker aus als Aluminium. Manche Typen zeigen sogar einen geringeren Ausdehnungskoeffizienten als Aluminium.

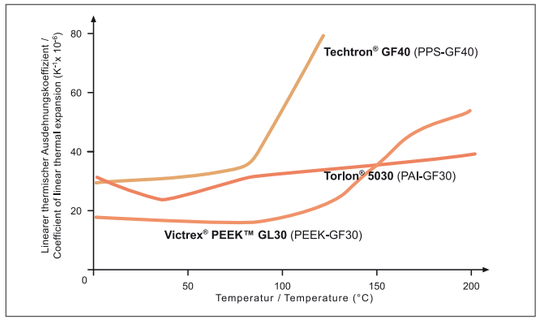


Abb. 40 - Ausdehnungskoeffizienten unter Temperatureinfluss

Entflammbarkeit und Brandverhalten

Insbesondere für den Einsatz in Fahrzeugen aller Art, aber auch für Anwendungen in anderen Bereichen, spielt das Brandverhalten der Werkstoffe eine entscheidende Rolle. Ein Großteil der Kunststoffe gilt als leicht brennbar. Oftmals muss für die Anwendung die Brennbarkeit durch flammhemmende Zusätze reduziert werden. Die Hochleistungskunststoffe sind jedoch bereits ohne Additive sehr stabil und zeigen ein vergleichsweise vorteilhaftes Brandverhalten. Traditionell wird das Brandverhalten der Kunststoffe durch die UL94 Versuche der Underwriter Laboratories gemäß ISO 9772 und 9773 sowie durch den so genannten Sauerstoffindex (LOI) gemäß ISO 4589 kategorisiert.

Bei den Flammversuchen nach UL94 wird zwischen horizontalen und vertikalen Versuchen unterschieden. Beim horizontalen Versuch wird ein waagerecht eingespannter Probekörper im 45° Winkel entflammt und die Brenngeschwindigkeit abhängig von der Probenstärke ermittelt. Hiernach als horizontal brennbar (HB) eingestufte Materialien gelten als relativ leicht entflammbar und werden daher dem anspruchsvolleren vertikalen Flammversuch nicht mehr unterzogen. Beim vertikalen Versuch wird ein senkrecht eingespannter Probekörper von unten befeuert und seine Brennbarkeit anhand verschiedener Prüfkriterien in drei Kategorien (V-0, V-1, V-2) bewertet. Die Kategorie V-0 umfasst dabei die höchsten Prüfkriterien.

Prüfkriterium	Einheit	HB	V-0	V-1	V-2
Brenngeschwindigkeit	mm/min	76,2 @ < 3mm 38,1 @ > 3mm	-	-	-
Nachbrenndauer	sek	-	< 10	< 30	< 30
Gesamtbrenndauer *Summe aller 5 Proben*	sek	-	< 50	< 250	< 250
Brenn- und Glühdauer *nach der zweiten Beflammung*	sek	-	< 30	< 60	< 60
Brand bis zur Halteklammer	-	-	Nein	Nein	Nein
Bildung brennender Tropfen	-	-	Nein	Nein	Ja

Tab. 3 - Prüfkriterien nach UL94

Der Sauerstoffindex bezeichnet die Sauerstoffkonzentration in Prozent, die in einem Sauerstoff-Stickstoffgemisch gerade noch benötigt wird, um die Verbrennung einer definierten Materialprobe aufrecht zu erhalten. Je höher die benötigte Sauerstoffkonzentration ist, umso eher wird das Material bei Sauerstoffmangel verlöschen.

Beim Vergleich wird zunächst deutlich, dass alle hier besprochenen Hochleistungskunststoffe bis auf PSU die höchste Einstufung erhalten und damit in die Gruppe der selbstverlöschenden Kunststoffe einzuordnen sind. Bei der zum Brennen benötigten Sauerstoffmenge ergeben sich jedoch deutlichere Unterschiede. Herausragend ist das PTFE, das bereits bei einer Sauerstoffkonzentration von weniger als 95 % verlischt. Die Sauerstoffindizes der anderen Hochleistungskunststoffe liegen relativ nahe beieinander mit kleinen Vorteilen für die imidisierten Kunststoffe (PI, PAI, PBI, PEI). Einzig das PSU fällt unter die Grenze von 35 % und erhält nur die Einstufung HB.

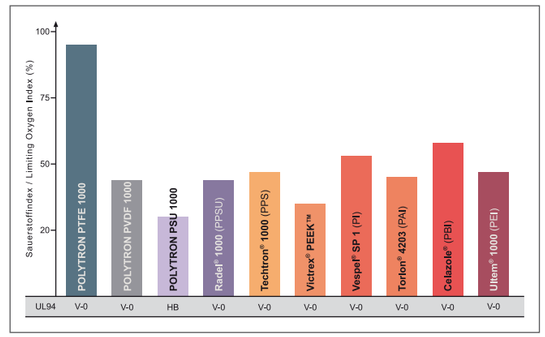


Abb. 41 - Brandklasse und Sauerstoffindex verschiedener Hochleistungskunststoffe

Abgesehen von der reinen Brennbarkeit sind auch Rauchgasdichte und Emission toxischer Gase im Brandfall wichtige Eigenschaften zur Bewertung des Brandverhaltens von Kunststoffen. Die unvollständige Verbrennung von Kunststoffen erzeugt nicht nur Rauch, der die Sicht einschränkt, sondern gegebenenfalls auch giftige Gase, die unter Umständen verherender wirken als das Feuer selbst. Die chemische Reinheit der Kunststoffe spielt eine große Rolle bei diesen Eigenschaften. Umso reiner ein Kunststoff ist, desto geringer sind auch die Rauchentwicklung und die Emission toxischer Gase.

Alle Hochleistungskunststoffe zeigen eine relativ geringe Rauchgasdichte, mit einer gemessenen spezifischen optischen Dichte von unter 100. Insbesondere die Polyaryletherketone, z. B. PEEK fallen durch eine extrem niedrige Rauchgasentwicklung auf. Ähnlich verhält es sich bei der Emission toxischer Gase. Bei der Verbrennung von Kunststoffen entstehen vorwiegend Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO_2) sowie teilweise Schwefelgase (SO_2, H_2S) oder Stick-

oxide (NO, NO_2). Es können aber auch aggressive Brandgase wie Fluorwasserstoff (HF) und Chlorwasserstoff (HCl) entstehen. Insbesondere bei der Pyrolyse von Fluorkunststoffen (PTFE, PVDF) entwickeln sich solche toxische Gase. Die meisten anderen Hochleistungskunststoffe aber emittieren nur geringe Mengen der genannten Brandgase und bleiben im Allgemeinen unterhalb der Anforderungen.

Das Brandverhalten der Kunststoffe wird auch – z. B. durch die US-amerikanische Luftfahrtbehörde FAA – durch ihre Wärmefreisetzung bestimmt. Diese

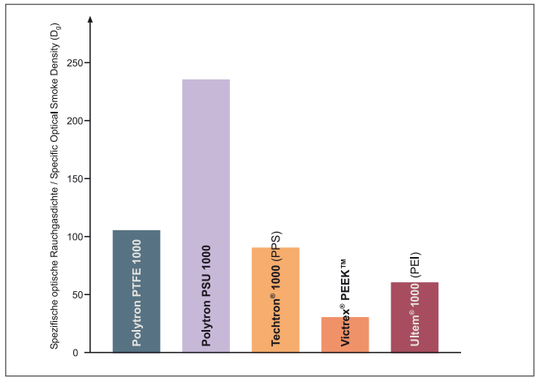


Abb. 42 - Rauchgasdichte verschiedener Hochleistungskunststoffe

Kennzahl gibt an, wie viel Energie ein bestimmtes Material im Brandfall freisetzt. Danach und korrespondierend mit dem Sauerstoffindex können Kunststoffe in drei Gruppen unterteilt werden.

Zu den leicht entflammbaren Kunststoffen zählen Materialien mit einer Wärmefreisetzung von mehr als 400 J/(g x K), die in aller Regel einen Sauerstoffindex von unter 21 % aufweisen und daher auch nach Entfernen einer Zündquelle weiterbrennen. Die zweite Kategorie umfasst Kunststoffe mit einer Wärmefreisetzung zwischen 200 und 400 J/(g x K) und einem Sauerstoffindex zwischen 21 und 35 %. Diese Materialien zeigen bereits ein akzeptables Brandverhalten, gelten als normal entflammbar, können aber in der Regel nicht in Fahrzeugen, insbesondere Luftfahrzeugen eingesetzt werden. Darüber hinaus gibt es eine dritte Gruppe von Materialien mit einer Wärmefreisetzung von unter 200 J/(g x K) und einem Sauerstoffindex von über 35 %. Diese Materialen gelten als schwer entflammbar und erfüllen im Allgemeinen auch die hohen Anforderungen der Luftfahrtindustrie.

Abschließend lässt sich zu den thermischen Eigenschaften der Hochleistungskunststoffe festhalten, dass alle gezeigten Materialien den technischen Kunststoffen deutlich überlegen sind. Die thermischen Eigenschaften sind das Hauptunterscheidungskriterium der Hochleistungs- gegenüber den technischen Kunststoffen und der Grund dafür, dass die Hochleistungskunststoffe auch Hochtemperaturkunststoffe genannt werden. Dennoch gibt es teilweise deutliche Unterschiede innerhalb der Hochleistungskunststoffe, die bei der Konstruktion zwingend zu berücksichtigen sind.

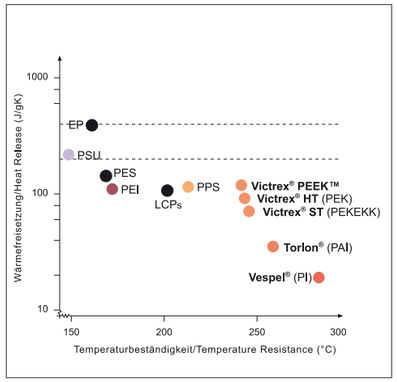


Abb. 43 - Brennbarkeit verschiedener Kunststoffe

Elektrische Eigenschaften

Isolationsverhalten

Das Isolationsvermögen der Kunststoffe wird über den elektrischen Widerstand beschrieben. Dabei wird zwischen Durchgangs- und Oberflächenwiderstand unterschieden.

Der spezifische Durchgangswiderstand eines Kunststoffes, bezogen auf die Fläche (Ω x cm), wird nach Norm mit je einer Elektrode auf der Ober- und einer Elektrode auf der Unterseite des Probekörpers ermittelt und ist ein Maß für die Fähigkeit des Materials, elektrischen Strom zu leiten.

Der spezifische Oberflächenwiderstand (Ω) hingegen wird nur an einer Seite des Probekörpers mit zwei Elektroden ermittelt und gibt Auskunft über das Isolationsverhalten an der Oberfläche eines Materials.

Alle nicht modifizierten Hochleistungskunststoffe haben einen Durchgangswiderstand von mehr als 10^{14} Ω x cm und einen Oberflächenwiderstand von mehr als 10^{13} Ω. Sie sind also gute elektrische Isolatoren. Elektrisch leitende Füllstoffe, wie z. B. Kohlenstofffasern oder Grafit, reduzieren das Isolationsverhalten der Kunststoffe. Je nach Anteil und Verteilung der Füllstoffe entstehen elektrisch leitende bzw. elektrostatisch ableitende Kunststoffe.

DIN-Bezeichnung	Durchgangs-widerstand (Ω x cm)	Oberflächen-widerstand (Ω)	Durchschlag-festigkeit (kV/mm)
PTFE	> 10^{14}	> 10^{13}	> 50
PVDF	> 10^{14}	> 10^{13}	18
PSU	> 10^{14}	> 10^{13}	30
PPSU	> 10^{14}	> 10^{13}	30
PPS	> 10^{14}	> 10^{13}	21
PEEK	> 10^{14}	> 10^{13}	24
PI	> 10^{14}	> 10^{13}	28
PAI	> 10^{14}	> 10^{13}	24
PBI	> 10^{14}	> 10^{13}	22
PEI	> 10^{14}	> 10^{13}	27

Tab. 4 - Elektrischer Widerstand verschiedener Hochleistungskunststoffe

Das Isolationsverhalten wird aber auch durch Temperatur und Feuchtigkeit beeinflusst. Mit zunehmender Temperatur sinken aufgrund der größeren Molekularbeweglichkeit Oberflächen- und Durchgangswiderstand. Neben der Temperatur können aber auch die Aufnahme von Feuchtigkeit und andere Umgebungseinflüsse zu einer Reduzierung des Isolationsvermögens beitragen. Insbesondere bei den hygroskopischen Hochleistungskunststoffen, wie den Polyimiden (PI, PAI, PBI), ist dieser Effekt zu beachten.

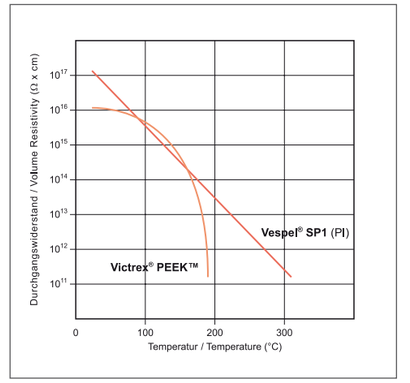


Abb. 44- Durchgangswiderstand von PEEK und PI

Durchschlagfestigkeit

Die Durchschlagfestigkeit ist eine Kennzahl für das Werkstoffverhalten bei hohen elektrischen Wechselspannungen. Sie ist definiert als die Spannung in Kilovolt (kV), bei der, bei einem ein Millimeter starken Probekörper, der Durchschlag erfolgt. Zur Ermittlung der Durchschlagfestigkeit nach Norm wird ein Probekörper zwischen zwei Elektroden in Transformatoröl gelegt. Eine Wechselspannung von 50 Hertz wird angelegt und um ein kV pro Sekunde bis zum Durchschlag gesteigert.

Die Durchschlagfestigkeit ist eine spezifische Materialeigenschaft, die von der Materialstärke, aber auch von der Umgebungstemperatur, dem Luftdruck, der Materialfeuchtigkeit und der Geschwindigkeit der Spannungssteigerung abhängig ist. Aufgrund empirischer Untersuchungen kann man festhalten, dass die spezifische Durchschlagfestigkeit eines Materials multipliziert mit der Wurzel aus der gewählten

Materialstärke die maximal zulässige Wechselspannung ergibt. Allerdings ist die Durchschlagfestigkeit kein Maß für die dauerhafte sondern nur für die kurzfristige Beanspruchung mit hoher Wechselspannung.

Die Durchschlagfestigkeit der meisten Hochleistungskunststoffe liegt zwischen 20 und 30 kV/mm. Herausragend ist die Durchschlagfestigkeit von PTFE, die mit einem Wert von über 50 kV/mm alle anderen Hochleistungskunststoffe überragt. Durch leitfähige Zusätze wie Grafit oder Kohle nimmt die Durchschlagfestigkeit signifikant ab. Da eine schwarze Einfärbung der Kunststoffe in aller Regel durch Ruß erfolgt, ist die Durchschlagfestigkeit von schwarz gefärbtem Material ebenfalls deutlich geringer.

Dielektrische Eigenschaften

Die dielektrischen Eigenschaften beschreiben das Verhalten schwach- oder nicht leitender Materialien, wie z. B. der Kunststoffe bei angelegter elektrischer Spannung. Die Isolationseigenschaften werden durch die Dielektrizitätskonstante (ε_r) beschrieben. Durch das Anlegen einer Wechselspannung werden die unterschiedlichen elektrischen Ladungen eines Stoffes (Dipole) ständig umpolarisiert. Die daraus resultierenden Effekte werden durch den dielektrischen Verlustfaktor (tan δ) beschrieben. Bei polaren Kunststoffen, wie zum Beispiel PVDF, sind die auftretenden Effekte stärker als bei nicht polaren.
Die Dielektrizitätskonstante (ε_r) eines Materials ist die Kapazität eines Kondensators mit dem Material als Dielektrikum im Verhältnis zur Kapazität eines Kondensators mit Vakuum als Dielektrikum. Je geringer die Dielektrizitätskonstante eines Materials, desto besser ist seine Isolationseigenschaft. Die Isolationseigenschaft wird allerdings durch die Durchschlagfestigkeit des Materials begrenzt.

Der dielektrische Verlustfaktor (tan δ) hingegen beschreibt die Energieverluste in einem Material, die durch Anlegen einer Wechselspannung entstehen. Die ständige Umpolarisierung führt zu einer mehr oder weniger starken Verlusterwärmung im Material. Je höher der dielektrische Verlustfaktor eines Materials, desto höher ist die Wärmeentwicklung durch die Energieverluste. Der Verlustfaktor steigt mit zunehmender Frequenz der Wechselspannung.

Sowohl bei der Dielektrizitätskonstante als auch beim dielektrischen Verlustfaktor weist PTFE die geringsten Werte aller Hochleistungskunststoffe auf und beweist seine außerordentlich guten Isolationseigenschaften. Das polare PVFD, obwohl ein Fluorkunststoff wie PTFE, hat die im Vergleich höchsten Dielektrizitätswerte und ist damit der schlechteste Isolator unter den Hochleistungskunststoffen. Alle anderen Hochleistungskunststoffe weisen vergleichbare dielektrische Eigenschaften über einen weiten Frequenzbereich auf.

Für die elektrischen Eigenschaften kann man abschließend festhalten, dass sich die Hochleistungskunststoffe ähnlich isolierend verhalten wie alle anderen Kunststoffe auch. Selbstverständlich gibt es innerhalb der Gruppe der Hochleistungskunststoffe graduelle Unterschiede, die mit Hinblick auf elektrisch isolierende Anwendungen bei der Konstruktion zu berücksichtigen sind.

DIN-Bezeichnung	Dielektrizitäts-konstante (ε_r) bei 100 Hz	Dielektrizitäts-konstante (ε_r) bei 1 MHz	dielektrischer Verlustfaktor (tan σ) bei 100 Hz	dielektrischer Verlustfaktor (tan σ) bei 1 MHz
PTFE	2,1	2,1	0,0003	0,0007
PVDF	7,4	6,0	0,025	0,165
PSU	3,0	3,0	0,001	0,003
PPSU	3,4	3,5	0,001	0,005
PPS mod	3,3	3,3	0,003	0,003
PEEK	3,2	3,2	0,001	0,002
PI	3,6	3,6	0,002	0,003
PAI	4,2	3,9	0,026	0,031
PBI	3,3	3,2	0,001	-
PEI	3,0	3,0	0,002	0,002

Tab. 5 - Dielektrische Eigenschaften verschiedener Hochleistungskunststoffe

Eigenschaften der Hochleistungskunststoffe

Tribologische Eigenschaften

In vielen Anwendungsbereichen haben sich Kunststoffe als Gleitwerkstoffe durchgesetzt. Dies liegt nicht zuletzt an den besonderen Eigenschaften der Polymere. Insbesondere die guten Not- bzw. Trockenlaufeigenschaften machen den Einsatz von Kunststoffgleitlagern grundsätzlich sinnvoll.

Die Tribologie beschreibt die Wechselwirkung der Oberflächen zweier Gleitpartner zueinander. Betrachtet man Gleitflächen genauer, so sind sie nicht wirklich glatt sondern mehr oder weniger stark zerklüftet. Die Oberflächen der aufeinander ruhenden Gleitpartner sind also quasi miteinander „verzahnt“. Bewegen sich die Gleitpartner nun gegeneinander, so behindert die „Verzahnung“ die Bewegung. Dieser Widerstand wird als Reibung oder Reibungskraft bezeichnet und durch den Reibungskoeffizienten (μ) beschrieben. Das Material, das bei der Bewegung der Gleitpartner zueinander von der Oberfläche abgeschliffen wird, wird als Verschleiß oder Abrieb bezeichnet. Es wird als Quotient aus Volumenverlust und Gleitstrecke (μm/km) beschrieben. Die tribologischen Eigenschaften der Kunststoffe werden folglich durch Reibungskoeffizient (μ) und Verschleiß (μm/km) beschrieben.

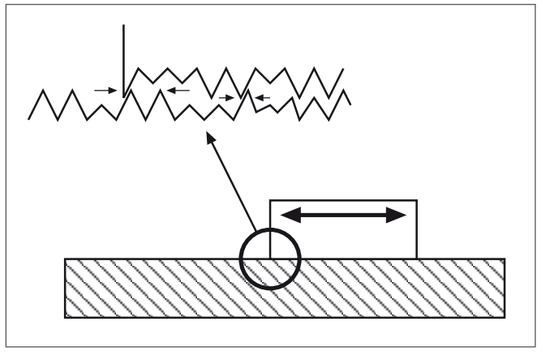


Abb. 45 - schematische Darstellung eines Gleitvorgangs

Zum Vergleich der tribologischen Eigenschaften der Hochleistungskunststoffe wurde das Stift/Scheibe-Prüfsystem gemäß ISO 7148-2 gewählt. Dieses Verfahren ist zwar für Radiallager nicht so praxisnah wie z. B. das Welle/Lager-Prüfsystem, aber es erlaubt zuverlässige Aussagen über die allgemeinen tribologischen Materialeigenschaften in den unterschiedlichsten Gleitanwendungen. Die Aussagen sollen also grundsätzlich auf Radial- aber auch auf Axial- und Linearlager angewendet werden können.

Da tribologische Systeme grundsätzlich sehr komplex sind und von vielen Faktoren beeinflusst werden, ist es kaum möglich, exakte Werte für jeden Anwendungsfall anzugeben. Im Versuch werden nur Wertebereiche ermittelt. Die angegebenen Einzelwerte sind Mittelwerte aus den Wertebereichen.

Beim Vergleich der tribologischen Eigenschaften wird deutlich, dass PTFE einen signifikant geringeren dynamischen Reibungskoeffizienten aufweist als alle anderen Hochleistungskunststoffe. Betrachtet man jedoch zusätzlich den auftretenden Verschleiß, so wird sichtbar, dass PTFE zwar einen äußerst geringen Reibungskoeffizienten hat, aber aufgrund seiner geringen mechanischen Festigkeit einen erheblichen Verschleiß zeigt.

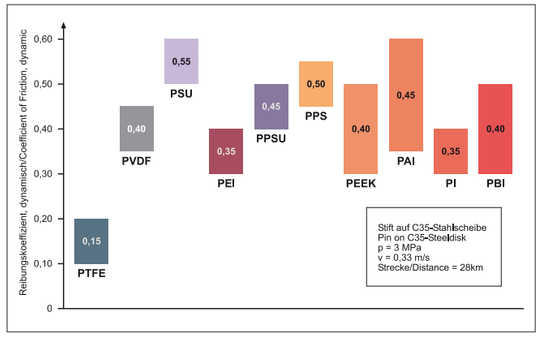


Abb. 46 - Dynamischer Reibungskoeffizient verschiedener Hochleistungskunststoffe

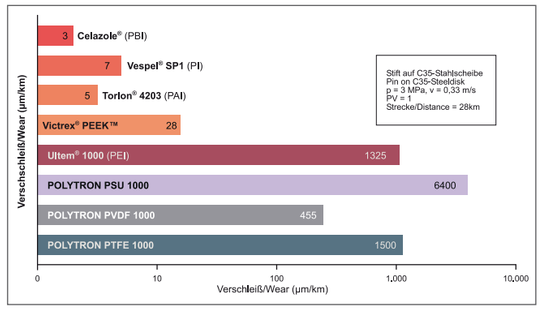


Abb. 47 - Verschleiß im Trockenlauf verschiedener Hochleistungskunststoffe

Außergewöhnlich gute Verschleißwerte zeigen hingegen die Polyimide (PI, PAI, PBI), deren Reibungskoeffizienten um 0,4 liegen. Ziel einer Konstruktion muss es daher sein, Materialien zu verwenden, die

einen niedrigen Verschleiß mit geringem Reibungskoeffizient kombinieren.

Um die tribologischen Eigenschaften zu optimieren, können Kunststoffe mit geeigneten Füllstoffen modifiziert werden. Insbesondere durch den Zusatz von Grafit (GR) und Fluorkohlenstoff (TF) werden Hochleistungskunststoffe tribologisch modifiziert. Aber auch Molybdändisulfid (MO), Kohlenstofffasern (CF) oder Carbon-Nanotubes (CNT) werden zur Optimierung der Gleiteigenschaften beigemischt. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die Füllstoffe, je nach Art und Menge, die mechanische Festigkeit des Basispolymers um 20 bis 50 % reduzieren können.

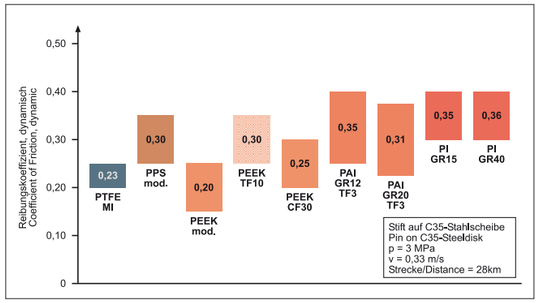


Abb. 48 - Dynamischer Reibungskoeffizient modifizierter Hochleistungskunststoffe

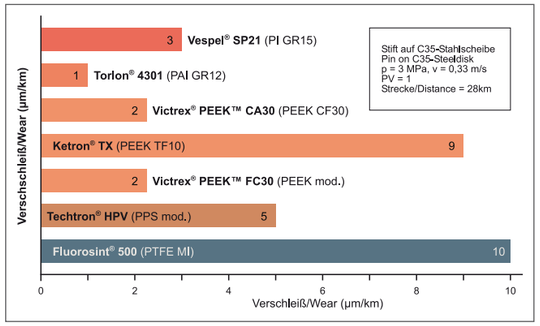


Abb. 49 - Verschleiß im Trockenlauf modifizierter Hochleistungskunststoffe

Die tribologisch optimierten Typen zeigen nochmal bessere Gleiteigenschaften als die ohnehin schon guten ungefüllten Hochleistungskunststoffe. Der Reibungskoeffizient wird nur in Grenzen besser, die Verschleißfestigkeit hingegen steigt durch die Modifizierung insgesamt deutlich. Die Polyimide (PI, PAI, PBI) zeigen insgesamt hervorragende tribologische Eigenschaften, was auf ihre besonders widerstandsfähige Molekularstruktur zurückzuführen ist.

Abschließend lässt sich festhalten dass die angegebenen tribologischen Eigenschaften nur helfen können, die unterschiedlichen Hochleistungskunststoffe miteinander zu vergleichen. Zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit sollten unbedingt Versuche unter Praxisbedingungen erfolgen. Beachten Sie auch unsere Anwendungshinweise zu Lagerbuchsen und Gleitelementen.

Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse

In der Anwendung wirken üblicherweise viele unterschiedliche Faktoren auf die Kunststoffe ein und beeinflussen deren Eigenschaften teilweise stark. Häufig lassen sich diese Umweltfaktoren im Vorfeld nicht hinreichend genau benennen, und in der Wechselwirkung der Einflussfaktoren ergeben sich neue Bedingungen, deren Wirkung nicht simuliert werden kann. Insofern ist es äußerst schwierig, das Verhalten der Kunststoffe bei den mannigfaltigen Umwelteinflüssen exakt zu beschreiben und zu bewerten. Daher können an dieser Stelle nur allgemeine Angaben zum Vergleich der unterschiedlichen Materialien gemacht werden. Die Funktionsfähigkeit kann letztlich nur über anwendungsnahe Versuche sichergestellt werden.

Chemikalienbeständigkeit

Die gute Beständigkeit von Kunststoffen gegenüber allen möglichen Arten von selbst aggressiven Chemikalien ist allgemein bekannt. Dennoch können diese Stoffe unter bestimmten Bedingungen in das Polymergefüge eindringen und dabei die physikalischen Eigenschaften des Kunststoffs beeinträchtigen oder sogar das Gefüge zerstören.
In aller Regel lässt die Chemikalienbeständigkeit mit zunehmender Einsatztemperatur nach. Die Hochleistungskunststoffe haben daher aufgrund ihrer ausgezeichneten Temperaturbeständigkeit bereits natürliche Vorteile gegenüber herkömmlichen technischen Kunststoffen.

Aufgrund ihres molekularen Aufbaus verfügen die amorphen Hochleistungskunststoffe (PSU, PES, PPSU), ebenso wie die Polyimide (PI, PAI, PBI, PEI) nur über eine bedingt gute Chemikalienbeständigkeit. Die Hochleistungskunststoffe PTFE, PPS und PEEK jedoch zeigen eine außergewöhnlich gute, fast universelle Chemikalienbeständigkeit über einen breiten Temperatureinsatzbereich hinweg. In einem Temperaturbereich bis 200 °C sind für PTFE und PPS keine organischen Lösungsmittel bekannt, und PEEK ist nur in Schwefelsäure löslich!

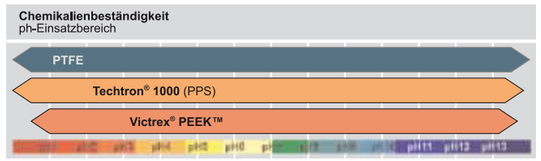


Abb. 50 - Nutzbarer pH-Einsatzbereich von PTFE, PPS und PEEK

Allgemein weisen PPS und PEEK eine etwas geringere Chemikalienbeständigkeit als PTFE auf, sind aber mechanisch höher belastbar. PTFE wird einzig durch Alkalimetalle in geschmolzener oder gelöster Form angegriffen, was man sich z. B. für das Verkleben dieses Fluorkunststoffs zu Nutze macht. Die mechanische Festigkeit von PPS wird nur durch konzentrierte Salpetersäure und andere oxidierende Säuren beeinträchtig.

Chemikalie	PTFE*	PVDF	PSU	PPSU	PPS	PEEK	PI	PAI	PBI	PEI
Säuren, verdünnt	+	+	(+)	(+)	+	+	(±)	+	±	+
Säuren, konzentriert	+	+	±	±	+	(+)	(±)	+	-	+
Laugen, verdünnt	+	+	+	+	+	+	-	±	±	+
Laugen, konzentriert	+	±	(+)	(+)	(+)	+	-	-	-	-
Kohlenwasserstoffe, aromatisch	+	(+)	-	(±)	+	+	+	+	+	-
Kohlenwasserstoffe, aliphatisch	+	(+)	+	+	+	+	+	+	+	+
Ester und Ketone	+	+	-	-	+	+	+	+	+	(±)
Ether	+	+	±	±	+	+	+	+	+	+
Lösungsmittel, chloriert	+	+	±	-	±	+	+	+	+	(±)
Alkohole	+	+	±	±	+	+	±	+	+	+

+: beständig (+): teilweise beständig ±: bedingt beständig (±): teilweise unbeständig -: unbeständig

Tab. 6 - Chemikalienbeständigkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe

Klebstoff	PTFE*	PVDF	PSU	PPSU	PPS	PEEK	PI	PAI	PBI	PEI
Epoxydharzklebstoffe	±	+	±	±	+	+	+	+	+	±
Polyurethanklebstoffe	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Kautschukklebstoffe	-	+	±	±	+	+	+	+	+	±
Cyanacrylatklebstoffe	-	±	±	±	+	+	+	+	+	±
Acrylklebstoffe, schlagzäh mod.	-	-	±	±	+	+	+	+	+	±
Schmelzklebstoffe	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Dichtungsmassen	-	-	±	±	+	+	+	+	+	±

+: verklebbar ±: bedingt verklebbar -: unverklebbar *) ausschließlich nach vorheriger chemischer Aktivierung der Klebefläche

Tab. 7 - Verklebbarkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe

Aufgrund der besonderen Chemikalienbeständigkeit können diese Hochleistungskunststoffe auch sehr gut mehrmals mit Chemikalien, wie z. B. Ethylenoxid-Gas, sterilisiert werden, ohne dass die physikalischen Eigenschaften der Materialien nachlassen.

Verklebbarkeit

Eng mit der Chemikalienbeständigkeit ist die Frage nach der Verklebbarkeit der Kunststoffe verbunden. Aufgrund der relativ guten Chemikalienbeständigkeit ist die Lösbarkeit der meisten Kunststoffe beschränkt und dementsprechend anspruchsvoll ist das Verkleben.

Klebeverbindungen haben jedoch einige Vorteile gegenüber herkömmlichen, mechanischen Verbindungsmethoden. Vor allem unter mechanischer Belastung erlauben Klebeverbindungen eine gleichförmigere Kraftverteilung über die gesamte Klebefläche hinweg. Dadurch können punktuelle Spannungsspitzen sowie eine Materialvorschädigung z. B. durch Bohrlöcher vermieden werden.
Aber auch mit Hinblick auf Dichtigkeit und Gewichtsersparnis bieten Klebeverbindungen deutliche Vorteile. Zudem können ganz unterschiedliche Werkstoffe miteinander verbunden werden.

Mittlerweile gibt es eine Vielzahl guter Industrieklebstoffe, mit denen Kunststoffe untereinander oder auch mit anderen Werkstoffen dauerhaft verbunden werden können. Die Auswahl des geeigneten Klebstoffs ist jedoch nicht nur von den zu verklebenden Materialien abhängig, sondern auch von den Einsatzbedingungen. Es gibt feste oder flexible, temperatur- und/oder chemikalienbeständige, elektrisch leitende oder isolierende, langsam oder schnell aushärtende sowie mit anderen Eigenschaften versehene Klebstoffe. Selbst für die extrem chemikalienbeständigen Fluorkunststoffe (PTFE, PVDF) sind entsprechende Klebstoffe erhältlich. Für die Auswahl eines geeigneten Klebstoffs sollte man die erfahrenen Anwendungsberater der bekannten Industrieklebstoffhersteller kontaktieren. Wir helfen gerne bei der Kontaktaufnahme und nennen Ihnen geeignete Klebstoffhersteller.

Einfluss von Kraftstoffen und Schmiermitteln

Kunststoffe weisen im Allgemeinen eine gute Beständigkeit gegenüber Kraftstoffen, Ölen und Fetten auf. Für den Einsatz in bestimmten Anwendungen, wie z. B. der Luft- und Raumfahrttechnik, wird aber auch eine Beständigkeit gegenüber aggressiveren Schmiermitteln gefordert. Vor allem Hydraulikflüssigkeit oder Turbinenöl können aufgrund ihrer Zusammensetzung Kunststoffe angreifen.

Insbesondere PEEK, PI und PAI werden häufiger in der Luftfahrttechnik eingesetzt und wurden daher tausend Stunden im Kontakt mit Hydraulikflüssigkeit (Skydrol) getestet, ohne einen signifikanten Abfall der mechanischen Festigkeit feststellen zu können. Die Zugeigenschaften der untersuchten Materialien reduzierten sich um weniger als 5 % im Vergleich zum Ausgangswert. PI und PAI behalten ihre Eigenschaften sogar bei Temperaturen von 120 °C annähernd bei. Auch im Kontakt mit Turbinenöl und Kerosin wurde die Beständigkeit von PEEK, PI und PAI nachgewiesen.

Medium	PTFE	PVDF	PSU	PPS	PEEK	PI	PAI	PEI
Benzin	+	+	+	+	+	+	+	±
Diesel	+	+	±	+	+	+	+	NT
Erdöl	+	+	+	+	+	+	+	NT
Hydrauliköl	+	NT	±	+	+	+	+	±
Kerosin	+	+	±	+	+	+	+	NT
Mineralöl	+	+	+	+	+	±	+	+
Silikonöl	+	NT	NT	NT	+	±	+	NT

+: beständig ±: bedingt beständig -: unbeständig NT: nicht untersucht

Tab. 8 - Ölbeständigkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe

Wasseraufnahme und Hydrolysebeständigkeit

Kunststoffe können grundsätzlich im Kontakt mit Wasser eingesetzt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass, abhängig von Geometrie und Kontaktdauer, Wasser in den Kunststoff hinein diffundieren und dessen Eigenschaften beeinflussen kann.

Bei vielen Kunststoffen lagern sich Flüssigkeiten, abhängig von der Rauigkeit, nur an der Oberfläche bzw. direkt darunter an. Bei einigen Polymeren jedoch kann das Wasser in das Gefüge eindringen und die zwischenmolekularen Bindungskräfte verringern und damit die Molekülbeweglichkeit erhöhen. Dadurch können die mechanische Festigkeit reduziert und die elektrischen und anderen physikalischen Eigenschaften beeinflusst werden. Darüber hinaus

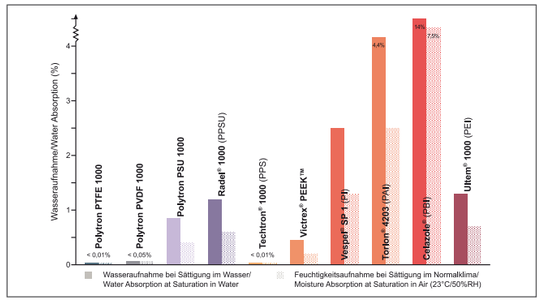


Abb. 51 - Wasseraufnahme verschiedener Hochleistungskunststoffe

geht mit einer Wasseraufnahme in der Regel auch eine Volumenänderung einher. Kunststoffe die derart reagieren werden als hygroskopisch bezeichnet.

In aller Regel sind die beschriebenen Vorgänge rein physikalischer Natur und somit reversibel. Das heißt, dass durch einen entsprechenden Trocknungsvorgang die Ausgangseigenschaften wieder hergestellt werden können. Dies gilt jedoch nicht, wenn durch das Wasser Gefügebestandteile aus dem Kunststoff herausgelöst oder chemische Reaktionen hervorgerufen werden. Insbesondere beim Kontakt mit Wasserdampf besteht die Gefahr der Hydrolyse. Dies ist vor allem dann zu berücksichtigen, wenn Kunststoffe häufig mit Wasserdampf gereinigt bzw. sterilisiert werden sollen.

Die Fluorkunststoffe PTFE und PVDF sowie der Hochleistungskunststoff PPS nehmen so gut wie kein Wasser auf. Auch die amorphen Hochleistungskunststoffe PSU, PPSU und PEI sowie die Polyaryletherketone (PEEK, PEK, PEKEKK) absorbieren nur geringe Mengen Wasser. Die Hydrolysebeständigkeit dieser Materialien ist ausgezeichnet, sodass selbst nach wiederholter Dampfsterilisation die mechanischen Eigenschaften nicht oder nur wenig nachlassen.

Alle Polyimide hingegen gelten als hygroskopisch und nehmen bereits im Normalklima bei 50 % Luftfeuchtigkeit eine erhebliche Menge an Wasser auf. Im direkten Kontakt ist die Wasseraufnahme nochmals höher und kann beim PBI bis zu 14 % betragen! Zwar ist die Wasseraufnahme auch hier reversibel, die Hydrolysebeständigkeit der Polyimide ist dennoch schlecht. Durch dauerhaften Kontakt mit heißem Wasser bzw. Wasserdampf können sich Risse bilden und das Material zerstören. Die hohe Wasseraufnahme der Polyimide ist auch in Hochtemperaturanwendungen problematisch. Ist das Material feucht und wird dabei zu schnell er-

hitzt, so wird es durch die Expansion des aufgenommenen Wassers von innen heraus zerstört.

Darüber hinaus kann bereits eine geringe Wasseraufnahme die physikalischen Eigenschaften stark beeinflussen. So steigt die Dehnung von PAI bereits bei nur 2 % Wasseraufnahme um mehr als 10 %, die Schlagzähigkeit sogar um 20 % im Vergleich zum Ausgangswert. Dieser Einfluss von Feuchtigkeit kann allerdings auch vorteilhaft sein. Insbesondere zu Montagezwecken wird häufig eine erhöhte Dehnbarkeit der Bauteile gefordert, die durch Wasserkonditionierung erreicht werden kann.

Eigenschaftsveränderung bei 2% Wasseraufnahme	**Torlon® 4203**
Zugfestigkeit	**- 7 %**
Zugmodul	**- 11 %**
Zugdehnung	**+ 13 %**
Schlagzähigkeit	**+ 20 %**
Dielektrizitätskonstante	**+ 18 %**
Dielektrischer Verlustfaktor	**+ 53 %**

Tab. 9 - Eigenschaftsveränderung von PAI durch Wasseraufnahme

Sterilisationsbeständigkeit

Bauteile in der Lebensmittel-, Pharma-, Bio- oder Medizintechnik sowie in anderen Anwendungsbereichen müssen je nach Einsatzzweck häufig sterilisiert werden, um eine Kontamination mit Viren und Bakterien zu vermeiden. Folglich müssen die eingesetzten Kunststoffe ohne Verlust der wesentlichen Eigenschaften mehrere Sterilisationszyklen durchlaufen können.

Neben der Chemikalien- sind auch die Hydrolyse-, Strahlen- und Temperaturbeständigkeit bestimmend für die Sterilisierbarkeit der Kunststoffe, denn die Sterilisation kann durch unterschiedliche Verfahren erfolgen.

Die *Dampfsterilisation*, auch Autoklavieren genannt, ist das einfachste und am weitesten verbreitete Sterilisationsverfahren. Bei diesem Prozess werden die zu sterilisierenden Teile bei ca. 2 bar Heißdampf 15 bis 20 Minuten auf 121 bis 134 °C erhitzt.
Bei der *Heißluftsterilisation* dagegen werden die zu sterilisierenden Teile, je nach Verfahren, entweder mindestens 30 Minuten auf 180 °C, 60 Minuten auf 170 °C oder 120 Minuten auf 160 °C gehalten, um sie zu entkeimen.
Darüber hinaus kann eine Sterilisation auch über *ionisierende Strahlung* (z. B. Gamma-Strahlung) erfolgen. Die Strahlung führt zu einem extrem beschleunigten Zerfall von Mikroorganismen etc.
Bei der *Plasmasterilisation* werden durch künstlich angeregte Entladungen UV-Strahlung, Ionenbeschuss und so genannte Freie Radikale erzeugt, die Keime abtöten. Dazu wird als Reagenzmedium häufig Wasserstoffperoxid verwendet, das eine zusätzliche sterilisierende Wirkung hat.
Bei der *Gassterilisation* hingegen werden die zu sterilisierenden Teile Gasen ausgesetzt, die zellzerstörend wirken. Neben Wasserstoffperoxid wird insbesondere Ethylenoxid verwendet, da es bereits bei geringen Temperaturen eine sehr gute Sterilisationswirkung besitzt.

Bei der Bewertung der Hochleistungskunststoffe hinsichtlich ihrer Sterilisierbarkeit wird deutlich, dass die bereits allgemein als besonders beständig eingestuften teilkristallinen Kunststoffe, wie die Polyaryletherketone (PEEK, PEK, PEKEKK) und die Fluorkunststoffe (PEEK, PVDF) auch hier überzeugen.

Sterilisationsverfahren	PTFE	PVDF	PSU	PPSU	PPS	PEEK	PEI
Dampfsterilisation bei 121°C	++	+	+	++	++	++	++
Dampfsterilisation bei 134°C	++	+	+	++	+	++	+
Heißluftsterilisation bei 160°	++	-	±	+	++	++	+
Gamma-Strahlensterilisation	+	+	+	+	+	++	+
Plasmasterilisation	+	+	+	++	+	++	+
Gassterilisation (Ethylenoxid)	+	+	+	++	++	++	+

++: besonders geeignet, +: beständig, ±: bedingt beständig -: unbeständig

Tab. 10 - Sterilisationsbeständigkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe

Sie sind gegenüber fast allen Sterilisationsverfahren gut oder sogar besonders gut beständig. Auch die amorphen Hochleistungskunststoffe PSU, PPSU und PEI zeigen eine durchweg gute Sterilisierbarkeit.

Die Materialbeständigkeit gegenüber der Dampfsterilisation hängt eng mit der Hydrolysebeständigkeit zusammen. Hygroskopische Kunststoffe, wie z. B. die Polyimide, können nicht oder nur schlecht mit Dampf sterilisiert werden. Aber auch bei Kunststoffen mit anderem chemischen Aufbau kann der Wasserdampf das Gefüge beeinflussen und die mechanischen Eigenschaften teilweise drastisch reduzieren. Versuche, bei denen die mechanischen Eigenschaften von mehrfach mit Dampf sterilisierten Kunststoffen untersucht wurden, haben gezeigt, dass insbesondere PEEK und PPSU selbst nach 500 Sterilisationszyklen keinen Abfall ihrer mechanischen Eigenschaften zeigen. Diese beiden Hochleistungskunststoffe eignen sich also besonders für Anwendungen, in denen häufig mit Dampf sterilisiert wird.

Bezeichnung	vor der Sterisisation	nach 250 Zyklen	nach 500 Zyklen
PTFE	100 %	101 %	99 %
PVDF	100 %	105 %	100 %
PSU	100 %	62 %	54 %
Radel® 1000 (PPSU)	100 %	102 %	102 %
Techtron® HPV (PPS mod.)	100 %	99 %	98 %
Victrex® PEEK™	100 %	105 %	102 %
Ultem® 1000 (PEI)	100 %	95 %	94%

Tab. 11 - Einfluss der Dampfsterilisation auf verschiedene Hochleistungskunststoffe

Witterungsbeständigkeit

Die Beständigkeit gegenüber Witterungseinflüssen ist nicht ausschließlich von UV-Strahlung abhängig. Neben der UV-Strahlung und der dadurch auftretenden Wärme spielen z. B. auch die allgemeine Luftfeuchtigkeit sowie der Kontakt mit der Umgebungsluft oder mit Ozon, Staub und Regen eine Rolle. Da die Witterungseinflüsse überall unterschiedlich sind, ist eine allgemein gültige Aussage nicht möglich. Folglich geben die nachfolgenden Aussagen nur einen Anhalt für die zu erwartende Witterungsbeständigkeit der Hochleistungskunststoffe.

Grundsätzlich weisen die Hochleistungskunststoffe eine gute Witterungsbeständigkeit auf. Herausragend ist die Beständigkeit der Fluorkunststoffe PTFE und PVDF, die trotz ihrer sehr hellen Farbgebung eine außerordentlich gute Witterungsbeständigkeit zeigen. Nur wenig schlechter verhalten sich der größte Teil der amorphen und teilkristallinen Hochleistungskunststoffe, wie PEI, PPSU, PPS und PAEK. Die ansonsten sehr strahlenbeständigen Polyimide, PI, PAI und PBI weisen aufgrund ihrer hygroskopischen Eigenschaften eine immer noch gute, gegenüber den anderen Hochleistungskunststoffen jedoch reduzierte Witterungsbeständigkeit auf.

Beständigkeit gegen energiereiche Strahlung

Zur energiereichen oder ionisierenden Strahlung werden alle Wellenstrahlen gezählt, deren Energie größer ist als die molekulare Bindungsenergie. Dazu zählen vor allem Röntgen- und Gammastrahlung. Die Beständigkeit gegen diese energiereiche Strahlung hängt davon ab, welche Energiedosis ein Material

Beständigkeit	PTFE	PVDF	PSU	PPSU	PPS	PEEK	PI	PAI	PBI	PEI
Witterungsbeständigkeit	+	+	-	+	+	+	±	±	±	+
Beständigkeit gegen Röntgen- und Gammastrahlung	-	±	+	+	+	+	+	+	+	+
Strahlungsindex (RI)	3,5	5	6	6	7	7	7,5	> 7,5	7	7

+: beständig ±: bedingt beständig -: unbeständig

Tab. 12 - Witterungs- und Strahlenbeständigkeit der Hochleistungskunststoffe

aufnehmen kann, ohne dass die Materialeigenschaften signifikant beeinträchtig werden.

Neben der Einwirkung der Strahlung selbst können auch parallel dazu ablaufende Oxidationsprozesse das Material schädigen. Bei langanhaltender Strahleneinwirkung ist die Wahrscheinlichkeit einer zusätzlichen Schädigung durch Oxidation natürlich höher als bei einer nur kurzen Einwirkungsdauer.

Zur Bewertung der Strahlenbeständigkeit von Kunststoffen kann der Strahlungsindex (Ri) herangezogen werden. Der Strahlungsindex ist definiert als Logarithmus der Basis 10 der absorbierten Strahlendosis in Gray (J/kg), bei der die Biegefestigkeit des Materials nur noch mindestens 50 % des Ausgangswertes beträgt. Die Versuche wurden bei Raumtemperatur mit einer Strahlendosis von 200 kJ/kg (20 Mrad) pro Stunde durchgeführt.

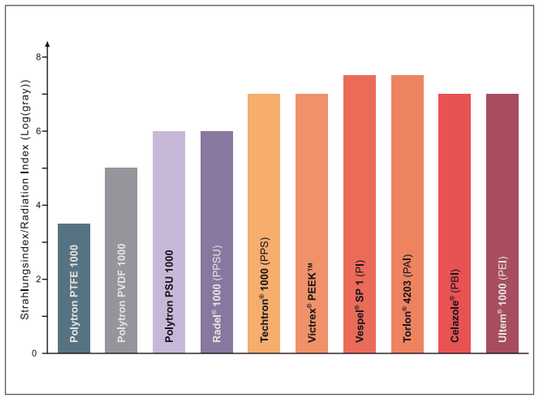


Abb. 52 - Strahlungsindex verschiedener Hochleistungskunststoffe

Es wird deutlich, dass die Hochleistungskunststoffe grundsätzlich eine relativ hohe Strahlenbeständigkeit aufweisen. Insbesondere die Polyimide PI und PAI zeigen eine außergewöhnlich hohe Beständigkeit gegenüber energiereicher Strahlung. Die Fluorkunststoffe gelten im Allgemeinen als nicht besonders beständig gegenüber energiereicher Strahlung, was durch den vergleichsweise geringen Strahlungsindex von PVDF und PTFE bestätigt wird. PVDF vernetzt darüber hinaus bei der Bestrahlung, was zu einer Veränderung der mechanischen Eigenschaften führt.

Vakuumverhalten

Bei Einsatz von Kunststoffen im Vakuum besteht die Gefahr, dass das Polymer durch den Unterdruck ausgast bzw. dass kleinste Partikel und Verunreinigungen aus dem Material herausgelöst werden und dadurch eine Kontamination der Umgebung entsteht. In speziellen Prüfverfahren kann die Abgabe von Materialbestandteilen unter Temperatur und Vakuum ermittelt werden. Äußere Verunreinigungen z. B. durch Bearbeitungsreste (Reinigungsflüssigkeiten, Öle etc.) oder andere Anhaftungen müssen natürlich für den Vakuumeinsatz vermieden werden.

Das Ausgasungsverhalten wird anhand des Material-Masseverlustes (TML = Total Mass Loss) und anhand der kondensierten flüchtigen Bestandteile (CVCM = Collected Volatile Condensed Material) ermittelt. Allerdings haben insbesondere hygroskopische Kunststoffe, wie die Polyimide einen hohen TML, da ihnen im Vakuum ggf. Wasser entweicht. Grundsätzlich kann ein erhöhter TML akzeptiert werden, wenn der aufgefangene Gewichtsverlust (RVL = Recovered Mass Loss) unterhalb des geforderten Grenzwertes liegt. In diesen Fällen geht man davon aus, dass der Kunststoff vornehmlich Wasser und keine anderen, stark kontaminierenden Stoffe abgibt. Allgemein akzeptierte Grenzwerte sind ein TML bzw. RML von weniger als 1 % und ein CVCM von weniger als 0,01 %.

Wie bereits angesprochen, zeigen die hygroskopischen Kunststoffe, insbesondere die Polyimide Masseverluste (TML) deutlich oberhalb von 1 %. Die aufgefangenen flüchtigen Bestandteile (CVCM) sind außer beim PBI jedoch nicht höher als die der anderen Hochleistungskunststoffe. Kontrolliert man die Feuchtigkeitsaufnahme der Polyimide vor dem Einsatz im Vakuum, so lässt sich der Masseverlust nochmals reduzieren. Folglich können die meisten Polyimide ebenso wie die anderen Hochleistungskunststoffe im Vakuum eingesetzt werden, zumal ihre insgesamt besseren Trockenlaufeigenschaften sie für dynamische Vakuumanwendungen prädestinieren.

	Total Mass Loss TML (%)	Recovered Mass Loss RML (%)	Collected Volatile Condensed Material CVCM (%)
PTFE	0,01	0,00	0,000
PVDF	0,05	0,02	0,006
PSU	0,49	0,09	0,002
PPS	0,08	0,04	0,000
PEEK	0,26	0,03	0,003
PI	1,40	0,75	0,003
PAI	1,90	0,93	0,007
PBI	2,20	0,84	0,014
PEI	0,82	0,32	0,002

Tab. 13 - Ausgasungsverhalten verschiedener Hochleistungskunststoffe

Ionenkontamination

Für den Einsatz von Kunststoffen in hoch reinen Anwendungen, wie z. B. der Halbleiter- und Solarindustrie aber auch in der Bio-, Pharma- oder Medizintechnik spielt die Materialreinheit eine große Rolle. Vor allem in der Anwendung frei werdende Fremdionen können aufgrund ihrer elektrischen Ladung zur Kontamination hoch reiner Prozesse führen.

Für ausgesuchte Hochleistungskunststoffe wurde die Kontamination mit häufig vorkommenden Ionen untersucht. Dazu wurden die Probekörper vollkommen verbrannt (verascht) und die verbliebene Asche nach Anteilen von Metallionen untersucht.

Ionen-Konzentration (ppm)	PEEK	PAI	PI	PBI
Aluminium (Al)	< 1	-	< 1	-
Calzium (Ca)	< 1	-	< 1	-
Eisen (Fe)	< 1	-	< 1	> 10
Kalium (K)	< 1	< 4	< 1	< 2
Kupfer (Cu)	< 1	-	-	-
Magnesium (Mg)	< 1	-	< 3	-
Zink (Zn)	< 1	-	0	-

Tab. 14 - Inonenkontamination verschiedener Hochleistungskunststoffe

Es zeigt sich, dass die untersuchten Hochleistungskunststoffe insgesamt eine sehr geringe Verunreinigung mit Fremdionen aufweisen. Vor allem PEEK zeigt eine durchweg geringe Ionenkontamination. Die hygroskopischen Polyimide weisen nur bei einigen Ionen erhöhte Konzentrationsgrade auf.

Materialzulassungen

Kunststoffe müssen immer häufiger für den Einsatz in bestimmten Anwendungen auch entsprechende normative Anforderungen erfüllen. Dies ist vor allem immer dann der Fall, wenn der Materialeinsatz Einfluss auf Leben oder Gesundheit von Mensch oder Tier haben kann. So ist der Einsatz von Kunststoffen im Kontakt mit Lebensmitteln, im Kontakt mit dem menschlichen Körper, für den Einsatz in Luftfahrzeugen, Automobilen oder anderen Transportmitteln durch nationale und internationale Vorschriften geregelt. Sollen Kunststoffe nun in diesen Anwendungen eingesetzt werden, so müssen sie ggf. speziell für die Anwendung zugelassen werden. Oder sie müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllen, bevor sie angewandt werden dürfen.

Darüber hinaus haben auch nichtstaatliche Organisationen und Unternehmen teilweise Normen und Spezifikationen für die Auswahl und Anwendung von Kunststoffen erarbeitet und erwarten eine entsprechende Übereinstimmung der Materialien mit ihren Anforderungen.

Ein Großteil der Anwendungszulassungen, Spezifikationen und Kompatibilitätsbescheinigungen gelten in erster Linie für den verwendeten Rohstoff und bedeuten nicht gleichzeitig, dass auch das aus diesem Rohstoff gefertigte Bauteil zugelassen, spezifiziert oder kompatibel ist! Die unterschiedlichen Verarbeitungsverfahren können einen Einfluss auf die Materialeigenschaften haben und müssen daher für eine Zulassung unter Umständen ebenfalls berücksichtigt werden. Teilweise schreiben die verantwortlichen Prüfinstitute und Ämter direkte Prüfungen oder Zulassungen des einzelnen Bauteils vor!
Im Einzelfall sollte immer genau geprüft werden, ob eine verfügbare Rohstoffzulassung oder Kompatibilitätsbescheinigung für die jeweilige Anwendung ausreicht. In den nachfolgenden Anwendungsbeschreibungen werden detaillierte Informationen für den Einsatz der Hochleistungskunststoffe gegeben.

Weiterhin gibt es allgemeine, nicht materialspezifische gesetzliche Regelungen, die die Konsumenten und/oder die Natur vor schädlichen Produkten und Materialien schützen und eine Wiederverwertung der Rohstoffe ermöglichen sollen. Hierunter fallen z. B. die europäischen Regelungen zur Registrierung und Zulassung von Chemikalien (REACH), die so genannte Altautoverordnung oder die Direktive zur Einschränkung des Gebrauchs bestimmter gefährlicher Substanzen in Elektro- und Elektronikgeräten (RoHS).

Sowohl die Kunststoffe selbst als auch die daraus gefertigten Produkte unterliegen bei der Drucklegung nicht den REACH Registrieranforderungen! Die bei der Kunststoffherstellung eingesetzten Monomere hingegen müssen registriert und zugelassen werden. Nach dem aktuellen technischen Stand beinhalten die von POLYTRON gelieferten Hochleistungskunststoffe und daraus gefertigte Bauteile keine besonders besorgniserregenden Stoffe (SVHCs - Substances of Very High Concern) im Sinne der REACH Verordnung.

Für die von POLYTRON gelieferten Hochleistungskunststoffe und daraus gefertigte Bauteile gilt ferner, dass sie nach dem aktuellen technischen Stand den Anforderungen der EU-Richtlinie 2002/95/EC (RoHS) und der EU-Richtlinie 2000/53/EC (Altautoverordnung) entsprechen.

Über die Materialzulassungen hinaus gilt sowohl in Europa (EU-Verordnung 2000/1334/EC) als auch in den USA (Export Administration Regulations – EAR) ein Exportverbot für so genannte Dual-Use-Güter. Damit sind Produkte gemeint, die sowohl in zivil als auch in militärisch relevanten Anwendungen eingesetzt werden können. Ob Kunststoffbauteile unter die jeweiligen Exportbeschränkungen fallen, hängt grundsätzlich von der Verwendbarkeit der Bauteile ab.

Darüber hinaus sind aber auch Materialien von den genannten Exportbeschränkungen erfasst. Sowohl die europäischen als auch die amerikanischen Regelungen schränken den Export von folgenden Hochleistungskunststoffen ein:

- aromatische Polyamidimide (PAI)
- aromatische Polyimide (PI)
- Polyetheretherketon (PEEK)
- Polyetherketonketon (PEKK)
- Polyetherketonetherketonketon (PEKEKK)
- Polyetherketon (PEK)

Die genannten Hochleistungskunststoffe und Produkte daraus dürfen nur mit Genehmigung der entsprechenden Behörden exportiert werden.

Zusammenfassung

Die Hochleistungskunststoffe weisen im Vergleich zu den einfachen technischen Kunststoffen häufig bessere mechanische und physikalische Eigenschaften auf. Darüber hinaus haben sie einige besondere Eigenschaften, durch die sie teilweise auch metallischen und keramischen Werkstoffen überlegen sind. Dennoch gibt es deutliche Unterschiede, auch innerhalb der Hochleistungskunststoffe, weshalb die Materialauswahl mit größter Sorgfalt erfolgen sollte. Wir helfen Ihnen gerne sowohl bei der Materialauswahl als auch bei der kunststoffgerechten Auslegung ihrer Bauteile.

Verarbeitung der Hochleistungskunststoffe

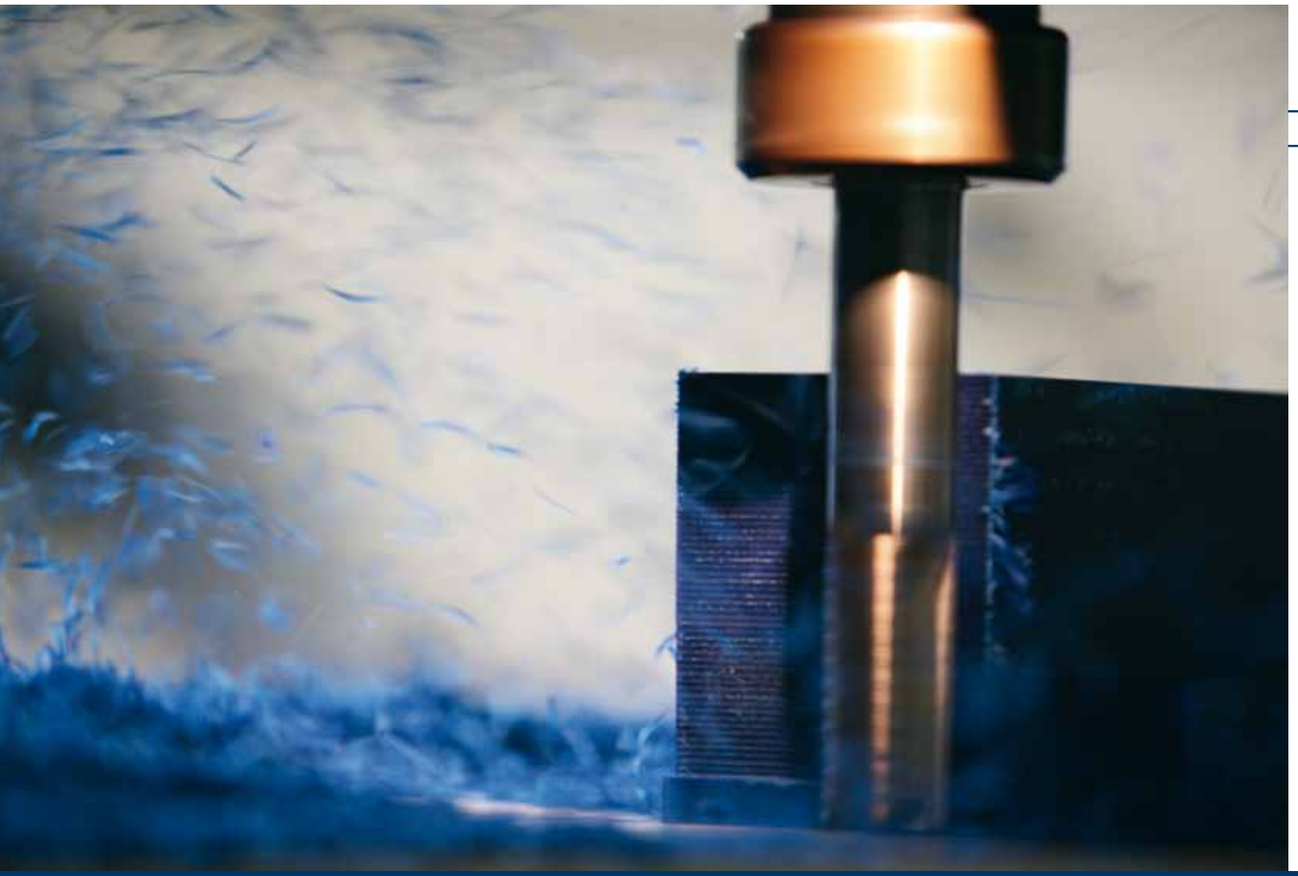
Allgemeines

Die Verarbeitung hat einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Eigenschaften der Kunststoffe. Sowohl die kunststofftechnische Verarbeitung als auch die mechanische Bearbeitung beeinflussen die Eigenschaften der Kunststoffe.

Neben den Materialeigenschaften spielen auch die technische und ökonomische Umsetzbarkeit eine nicht unerhebliche Rolle für die Auswahl des geeigneten Verarbeitungsverfahrens. Nicht jeder Kunststoff lässt sich mit jedem Verfahren verarbeiten und bestimmte technische Anforderungen erfordern ggf. besondere Verarbeitungsverfahren.

Technische Kunststoffbauteile lassen sich im Wesentlichen mittels zweier Verfahren herstellen; zum einem mit der Spritzgusstechnik, bei der die Bauteile direkt aus dem plastifizierten Kunststoff unter Druck in eine Form gegossen werden; zum anderen mit der Zerspanungstechnik, bei der die Bauteile durch spangebende Bearbeitung (Drehen, Fräsen, Bohren etc.) in Form gebracht werden. Teilweise werden beide Verfahren kombiniert eingesetzt, um eine effiziente Materialverwendung einerseits und enge Fertigungstoleranzen andererseits gewährleisten zu können.

Darüber hinaus gibt es Hochleistungskunststoffe wie z. B. PTFE oder PI, die sich nicht thermoplastisch, sich also nicht in der Schmelze verarbeiten lassen! Solche Materialien werden in einem Press/Sinter-Verfahren zu Halbzeug für die spangebende Bearbeitung verarbeitet oder direkt zu Bauteilen verpresst. Dieses Verfahren erlaubt die Herstellung von Halbzeugen mit mehr oder weniger isotropen Eigenschaften oder die direkte Formgebung von Bauteilen mit einfacher Geometrie.



Bezeichnung	Zerspanung *Machining*	Pressformen *Direct Forming*	Spritzguss *Injection Molding*	Halbzeug *Stock Shapes*
PTFE	X	(x)	-	X
PVDF	X	-	(x)	X
PSU	X	-	(x)	X
Radel® (PPSU)	X	-	(x)	X
Techtron® (PPS)	X	-	(x)	X
Victrex® PEEK™	X	-	X	X
Vespel® (PI)	X	(x)	(x)	X
Torlon® (PAI)	X	-	X	X
Celazole® (PBI)	X	-	-	X
Ultem® (PEI)	X	-	(x)	X

X: möglich, (x) bedingt möglich, - nicht möglich

Tab. 15 - Verarbeitungsverfahren für verschiedene Hochleistungskunststoffe

Zerspanungstechnik

Komplexe und hoch belastete Bauteile in geringen bis mittleren Stückzahlen werden mit den Verfahren der Zerspanungstechnik hergestellt. Dieses Verarbeitungsverfahren bietet grundsätzlich die Möglichkeit, auch Einzelstücke aus Kunststoff ohne zusätzliche Werkzeugkosten zu fertigen.

Abhängig vom Material lassen sich mit der Zerspanungstechnik für Kunststoffe extrem enge Bauteiltoleranzen sicherstellen. Aus diesem Grund werden manchmal auch spritzgegossene oder gepresste Bauteile spangebend nachbearbeitet!

Ein weiterer Vorteil der Zerspanungstechnik ist die Möglichkeit, Bauteile mit großen Wandstärken produzieren zu können. So lassen sich auch Stücke mit mehreren Zentimeter dicken Querschnitten fertigen. Auch Hinterschneidungen, Metalleinsätze und komplexe Bohrungen, die nachträglich wieder verschlossen werden, sind technisch möglich.

Die für die Zerspanung benötigten extrudierten oder gepressten Halbzeuge verfügen zudem meist über bessere mechanische Eigenschaften als die in der Spritzgusstechnik verwendeten Granulate. Spritzgießbare Kunststoffe benötigen verfahrensbedingt eine geringere Viskosität und weisen in der Regel einen niedrigeren Kristallisationsgrad auf. Extrudierte Halbzeuge zeigen hier häufig deutlich bessere Eigenschaften! Direkte Vergleiche haben bewiesen, dass zum Beispiel aus Halbzeug gedrehte Gleitlager eine 30 bis 40 Prozent höhere Lebensdauer haben als die vergleichbare spritzgegossene Ausführung.

Bei den Hochleistungskunststoffen, die häufig mehr als fünfzig Euro pro Kilogramm kosten, kommt es teilweise auch zu einer Kombination von Zerspanungs- und Spritzgusstechnik: Um hohe Material- und Werkzeugkosten zu sparen, wird ein einfacher Rohling im Spritzgussverfahren hergestellt. Dieser wird nachträglich spangebend in Form und Toleranz gebracht. So werden die Vorteile beider Verarbeitungsverfahren optimal kombiniert!

	Halbzeuge extrudiert			Halbzeuge gepresst		
	Rundstäbe Round Rods	Platten/Folien Plates/Sheets	Hohlstäbe Tubes	Rundstäbe Round Rods	Platten/Folien Plates/Sheets	Hohlstäbe Tubes
PTFE	4 - 150	-	10 - 100	100 - 700	1 - 150	100 - 900
PVDF	10 - 500	1 - 80	OR	-	10 - 60	OR
PSU	10 - 100	10 - 40	OR	-	-	-
PPSU	20 - 50	20 - 30	OR	-	-	-
PPS	10 - 100	8 - 50	OR	OR	-	OR
PAEK	5 - 200	5 - 100	40 - 180	OR	OR	OR
PI	-	-	-	6 - 80	6 - 50	40 - 300
PAI	6 - 50	6 - 25	30 - 130	6 - 50	6 - 25	30 - 130
PBI	-	-	-	OR	12 - 25	OR
PEI	12 - 60	12 - 60	OR	-	-	-

OR = Auf Anfrafe/On Request

Tab. 16 - Halbzeug-Abmessungen verschiedener Hochleistungskunststoffe

Die Zerspanungstechnik ermöglicht zwar eine relativ freie Konstruktion, allerdings sind auch hier einige Restriktionen zu beachten.

Grundsätzlich sind die zu erreichenden Oberflächen bei der spangebenden Bearbeitung schlechter als beim Spritzguss oder der Pressformtechnik. Rauhigkeitswerte von R_z 10 bis 6,3 sind möglich. Besonders hochwertige Oberflächen (kleiner R_z 6,3) sind nur durch aufwendige mechanische, teils manuelle Verfahren (Schleifen, Polieren, Läppen etc.) zu erreichen, die die Bearbeitungskosten deutlich steigern.

Zerspante Kunststoffbauteile müssen immer aus entsprechend großen Halbzeug-Stücken gefertigt werden. Dabei besteht die Gefahr, dass durch die Bearbeitung Materialspannungen freigesetzt werden. Im schlimmsten Fall verzieht sich das Bauteil dadurch extrem. Selbst nach Wochen können vor allem unter Temperatureinfluss noch starke Maß- und Formänderungen auftreten! Durch eine aufwendige Bearbeitung mit Liegezeiten und/oder thermischer Zwischenbehandlung können solche spannungsbedingten Bauteilveränderungen auf ein Mindestmaß reduziert werden.

Die Berücksichtigung aller Aspekte bei der Bauteilkonstruktion ist schwierig und aufwendig und sollte daher nur von mit Kunststoffen erfahrenen Konstrukteuren vorgenommen werden. Die POLYTRON hilft bei der kunststoffgerechten Auslegung der Bauteile.

Spritzgusstechnik

Wenn technische Bauteile in großen Stückzahlen benötigt werden, ist die Spritzgusstechnik wirtschaftlich von erheblichem Vorteil. Insbesondere bei den Hochleistungskunststoffen kann aufgrund der möglichen Materialersparnis das Spritzgussverfahren auch bei kleineren Stückzahlen (ab 500 bis 1000 Stück) ökonomisch sein.

Ein weiterer Vorteil der Spritzgusstechnik ist die Möglichkeit der Fließweggestaltung, mit der die Materialeigenschaften unter bestimmten Bedingungen ausgerichtet werden können. Darüber hinaus kann z. B. eine komplexe Geometrie durch ein entsprechendes Werkzeug bei größeren Mengen wirtschaftlich gefertigt werden.

Allerdings gibt es einige Restriktionen, die zu beachten sind. Zunächst können nur thermoplastisch verarbeitbare Kunststoffe im Spritzguss genutzt werden; der Spritzguss von PTFE, PI und PBI ist daher nicht möglich! Darüber hinaus verarbeitet POLYTRON nur ausgesuchte Hochleistungskunststoffe im Spritzguss.

Wir bieten Spritzgussbauteile aus

| **Victrex® PEEK™**
| **Torlon®**

an!

Insbesondere auf die Verarbeitung von Torlon® (PAI) sind wir spezialisiert.

Bei der Auswahl der Spitzgusstechnik ist zu berücksichtigen, dass grundsätzlich ein Werkzeug benötigt wird, dass je nach Komplexität mehrere zehntausend Euro kosten kann. Bei solchen Werten wird eine bestimmte Mindestproduktionsmenge benötigt, um die Kosten kalkulatorisch vernünftig verteilen zu können.

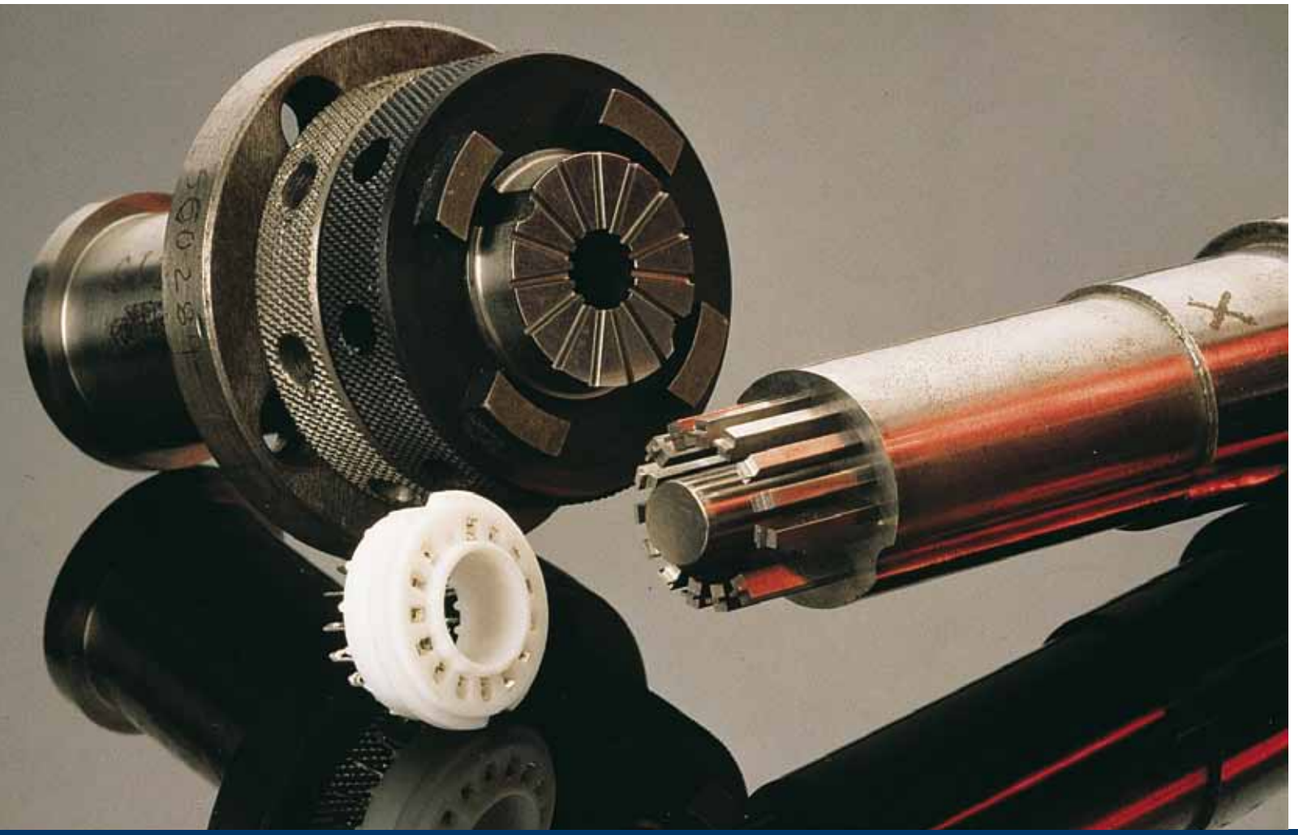
Darüber hinaus gibt es einige technische Einschränkungen bezüglich des Bauteildesigns. Für den Spritzguss werden bestimmte Wandquerschnitt- und Fließweglängen-Verhältnisse benötigt.
Aufgrund der hohen Viskosität sollten Spritzgussbauteile aus Torlon® eine Wandstärke von 1,5 mm nicht unterschreiten. Beim Einsatz von unverstärktem Victrex® PEEK™ sind auch Wandstärken von einem Millimeter möglich. Bei Wandstärken von mehr als 10 mm müssen Rippen vorgesehen werden, um Einfallstellen zu vermeiden.

Aufgrund ihrer allgemein großen Wärmeausdehnung schrumpfen (schwinden) spritzgegossene Kunststoffe beim Erkalten teilweise stark. Hochleistungskunststoffe jedoch zeigen nur eine geringe Schwindung! Victrex® PEEK™ hat Schwindungswerte von unter 2,5 %, Torlon® sogar nur von 1 % und weniger. Die Schwindung ist in der Regel in Fließrichtung etwas geringer als quer dazu. Bei der Konstruktion müssen somit ausreichende Schrägen (ca. 2°) vorgesehen werden, damit das Bauteil problemlos dem Werkzeug entnommen werden kann.

Hinterschneidungen, Einlegeteile, Klipps und andere Konstruktionselemente sind mit entsprechenden Werkzeugen grundsätzlich möglich. Die tatsächliche Realisierbarkeit hängt aber von verschiedenen Faktoren ab und sollte daher im Einzelfall geprüft werden.

Aufgrund der schlechteren Viskosität der Hochleistungskunststoffe, insbesondere von Torlon®, muss unbedingt auf den Zusammenfluss der Schmelze in der Kavität geachtet werden. Die sich beim Einspritzen bildenden Fließfronten verbinden sich häufig nur schlecht und stellen daher potentielle Bruchstellen dar.

Die wenigen Hinweise machen deutlich, dass bei der Konstruktion von Spritzgussbauteilen auf die Besonderheiten und Anforderungen des Verarbeitungsverfahrens geachtet werden muss. Ein Wechsel zwischen den Verarbeitungsverfahren ohne konstruktive Änderungen ist in aller Regel nicht möglich. POLYTRON hilft bei der kunststoffgerechten Auslegung der Bauteile.



Pressformtechnik

Die Pressformtechnik, auch Direct Forming (DF) genannt, ist analog zum Spritzguss ein Verfahren zur Großserienherstellung von technischen Bauteilen aus Kunststoffen, die eine thermoplastische Verarbeitung aufgrund ihrer rheologischen Eigenschaften nicht erlauben.

Bei der Pressformtechnik wird in aller Regel ein Kunststoffpulver kalt verpresst und danach im einem thermischen Verfahren gesintert. Ähnliche Verfahren sind aus der Pulvermetallurgie bekannt.

Die Werkzeuge für die Pressformtechnik sind deutlich günstiger als Spritzgusswerkzeuge, da sie einfacher aufgebaut sind und nicht beheizt werden müssen. Aufgrund des Verfahrens sind aber nur Bauteile mit relativ einfacher Geometrie technisch realisierbar.

Ähnlich wie bei der Spritzgusstechnik gibt es auch bei der Pressformtechnik einige Restriktionen, die bei der Bauteilkonstruktion berücksichtigt werden müssen.

Bei der Konstruktion sollte darauf geachtet werden, dass direktgeformte Bauteile eine Wandstärke von mindestens einem und höchstens 50 Millimeter aufweisen. Die Bauteilgröße ist fertigungsbedingt auf eine Oberfläche von ca. 2500 mm² beschränkt, und runde Teile können nur bis zu einem Durchmesser von maximal 300 mm gefertigt werden.
Hinterschneidungen sind grundsätzlich nicht möglich und scharfe Kanten müssen zur besseren Entformbarkeit verrundet werden. Winkel bis zu 30°, ausgehend von der Pressebene sind möglich, größere Schrägen und Fasen aber müssen 0,1 bis 0,3 mm abgeflacht werden.

Darüber hinaus sind weitere, von der Bauteilgeometrie abhängige Faktoren zu berücksichtigen, die aber im Einzelfall geprüft werden müssen. Auch hier wird deutlich, dass bei der Konstruktion auf die Besonderheiten der Verarbeitungstechnik Rücksicht genommen werden muss.

Fertigungstoleranzen

Aufgrund ihrer Eigenschaften erfordern Kunststoffe grundsätzlich größere Fertigungstoleranzen als metallische Werkstoffe! Insbesondere die im Vergleich zu metallischen Werkstoffen deutliche höhere thermische Längen- und Volumenausdehnung sowie gegebenenfalls auch die Feuchtigkeitsaufnahme haben einen Einfluss auf die Maßhaltigkeit der Kunststoffe. Darüber hinaus weisen alle Kunststoffprodukte mehr oder weniger starke fertigungsbedingte Materialspannungen auf, die zwangsläufig durch die Temperaturdifferenz zwischen Kern und Außenhaut der erstarrenden Kunststoffschmelze entstehen.

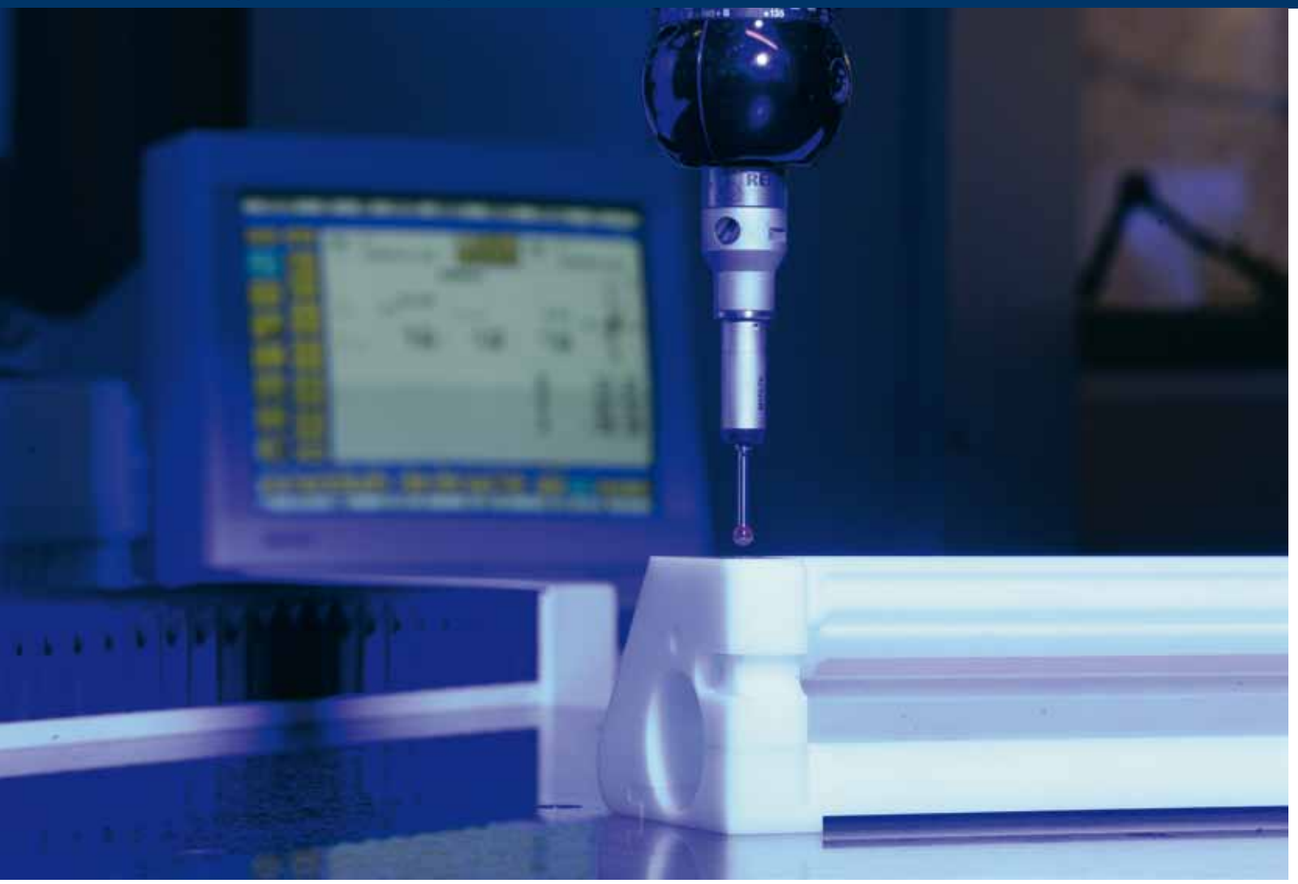
Für die Festlegung von Fertigungstoleranzen ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass Maßänderungen aufgrund der genannten physikalischen Effekte nur selten isotrop, also in alle Richtungen gleichmäßig auftreten. Häufig unterscheiden sich diese Effekte entlang und quer zur Verarbeitungsrichtung deutlich. In Verarbeitungsrichtung sind die Effekte durch die starken Hauptvalenzkräfte in aller Regel geringer als quer dazu.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass wie bereits erwähnt, durch die spangebende (Nach-)Bearbeitung häufig das Spannungsgleichgewicht durchbrochen wird. Dies kann zu starkem Materialverzug führen, der sich häufig erst Tage nach der Bearbeitung oder bei Temperatureinfluss zeigt.

Für Kunststoffe werden daher allgemein die im ISO-System für Grenzmaße und Passungen festgelegten Grundtoleranzgrade IT 9 bis IT 12 verwendet. Der Toleranzgrad ist dabei vom gewählten Material und den darin verwendeten Füllstoffen abhängig.

Bei extrem maßstabilen Kunststoffen, wie z. B. PI, können Grundtoleranzgrade von IT 9 oder IT 10 eingehalten werden. Extrem weiche Materialien, wie z. B. PTFE, können nur nach IT 11 oder IT 12 bearbeitet werden.
Unter bestimmten Voraussetzungen können durchaus Toleranzfelder von weniger als 0,05 mm eingehalten werden.

Kunststoffgerechte Toleranzen berücksichtigen allerdings mögliche Maßänderungen durch Temperatur



und Feuchtigkeit sowie Materialspannungen und liegen in aller Regel in einem Bereich oberhalb von 0,1 mm.

Im Spritzguss und der Pressformtechnik sind die Fertigungstoleranzen neben den genannten Parametern auch von der Materialschwindung und den Weg-Querschnitt-Verhältnissen abhängig und insofern noch schwieriger festzulegen.

Mit Materialien wie Torlon® oder Victrex® PEEK™ lassen sich aber durchaus Toleranzen von bis zu 0,03 % des Nennmaßes erreichen. Allerdings ist dafür in der Konstruktion und bei der Fertigung ein entsprechender Aufwand zu betreiben. Die Pressformtechnik lässt, abhängig vom Material, nur Toleranzen von 0,1 bis 0,2 mm und mehr zu.

Zur Berücksichtigung aller wesentlichen Aspekte und zur Sicherstellung der Bauteilfunktion in der Anwendung sollten Sie die Festlegung der Fertigungstoleranzen mit unseren Anwendungstechnikern absprechen. Wir übernehmen gerne die kunststoffgerechte Bauteilauslegung für Sie.

Wärmebehandlung

Aufgrund der bereits mehrfach angesprochenen fertigungsbedingten Materialspannungen ist es häufig notwendig, die Kunststoffe thermisch zwischen- oder nachzubehandeln. Materialspannungen entstehen durch das fertigungsbedingte rasche Abkühlen der Außenhaut eines im Kern noch heißen, teilweise plastischen Kunststoffs.

Durch eine korrekt durchgeführte Wärmebehandlung können die Spannungen zwar nicht gänzlich vermieden, aber doch deutlich reduziert werden. Aus diesem Grunde werden Kunststoff-Halbzeuge grundsätzlich thermisch nachbehandelt.

Die Wärmebehandlung kann aber durchaus auch zu Nachteilen führen. Eine zu heiße Wärmebehandlung kann den Kunststoff nachhaltig schädigen. Darüber hinaus muss mit Maßänderungen durch den Prozess gerechnet werden. Bei der thermischen Behandlung von hygroskopischen Kunststoffen ist zu berücksichtigen, dass das Material durch den Prozess getrocknet wird. Nach der Wärmebehandlung wird das Material bis zum Gleichgewicht wieder Feuchtigkeit aufnehmen. Folglich entsteht ein zusätzlicher Maßeffekt.

Bei komplexen, spangebend herzustellenden Bauteilen ist es manchmal sinnvoll, die gewünschte Form vorzufertigen, das Material thermisch zwischen zu behandeln und dann erst fertig zu bearbeiten. Dadurch kann der Prozess der Spannungsfreisetzung beschleunigt werden, so dass das Bauteil maßstabiler bleibt.

Der Wärmebehandlung des Polyamidimid Torlon® kommt eine besondere Bedeutung zu.

Torlon® muss zur Sicherstellung seiner hervorragenden mechanischen und chemischen Eigenschaften einer speziellen Wärmebehandlung unterzogen werden. Insbesondere die außerordentlich hohe Verschleißfestigkeit von Torlon® ist nur durch die thermische Nachbehandlung zu erreichen.

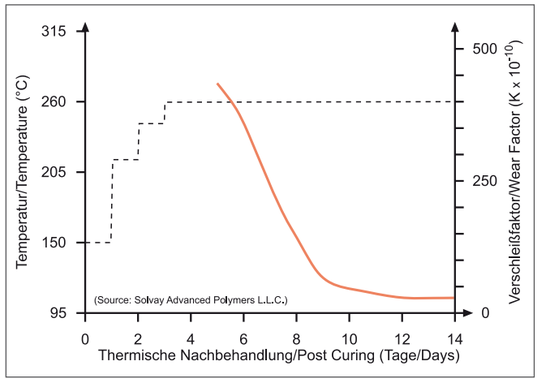


Abb. 53 - Verschleiß von Torlon® in Abhängigkeit der Wärmebehandlungsdauer

In diesem Postcuring genannten, thermischen Verfahren wird durch eine exakte Temperaturführung ein chemischer Prozess ausgelöst. Torlon® erhält erst dadurch seine einzigartigen Eigenschaften.

Neben der Verschleißfestigkeit werden auch andere mechanische Eigenschaften durch die Wärmebehandlung positiv beeinflusst. Festigkeit und Elastizität nehmen zu. Aber auch die Wärmeformbeständigkeit und die Glasübergangstemperatur (T_G) werden durch das Postcuring deutlich erhöht.

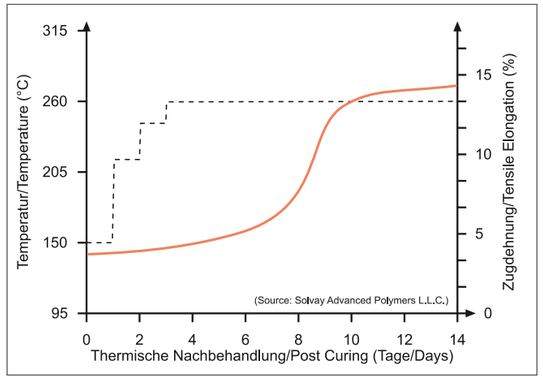


Abb. 54 - Zugdehnung von Torlon® in Abhängigkeit der Wärmebehandlungsdauer

Der Prozess verlangt allerdings eine exakte, ± 2K genaue und vom Materialquerschnitt abhängige Temperaturführung, die nur von darauf spezialisierten Fachbetrieben ausgeführt werden sollte.

Zusammenfassung

Bei der Herstellung von technischen Bauteilen aus Hochleistungskunststoffen ist die Auswahl eines geeigneten Verarbeitungsverfahrens von besonderer Bedeutung. Neben den rein fertigungstechnischen Aspekten sind vor allem auch ökonomische Belange zu berücksichtigen.

Es bieten sich verschiedene, in ihren Vor- und Nachteilen unterschiedliche Verfahren an. Vor der Konstruktion von technischen Bauteilen aus Hochleistungskunststoffen sollte das notwendige Verarbeitungsverfahren ausgewählt und die Konstruktion entsprechend darauf abgestimmt werden. Unterstützung hierbei bieten unsere erfahrenen Anwendungsberater.

Anwendungen mit Hochleistungskunststoffen

Allgemeines

POLYTRON hat bereits in einer großen Zahl von Anwendungen Hochleistungskunststoffe erfolgreich eingeführt, und regelmäßig werden neue Einsatzgebiete erschlossen. Trotz vergleichbarer Anwendungen sind die Anforderungen an die Kunststoffe in der Regel aber sehr unterschiedlich. Aus diesem Grunde sind allgemeingültige Anwendungsempfehlungen nur bedingt möglich.

Nachfolgend werden zunächst allgemeine Anwendungen, wie Gleitlager, Dichtungen sowie Räder und Rollen, mit besonderem Hinblick auf die Hochleistungskunststoffe besprochen. Dann werden die besonderen Anforderungen in speziellen Anwendungsbereichen, wie der Lebensmittelindustrie oder der Luftfahrt, näher erläutert. Dabei werden sowohl die allgemeinen Vorteile der Kunststoffe in diesen Anwendungen sowie anwendungsspezifische Materialanforderungen erörtert. Zudem werden auf die Anwendungen zugeschnittene Sondertypen der Hochleistungskunststoffe gezeigt und entsprechende Konstruktionshinweise auf Basis unserer langjährigen Anwendungserfahrung gegeben.

In diesem Zusammenhang weisen wir nochmals darauf hin, dass alle Empfehlungen, Informationen und Daten nach bestem Wissen und Gewissen weitergegeben werden und dem aktuellen Stand der Technik entsprechen. Allerdings bleibt der Anwender verpflichtet, sowohl die Hinweise als auch die Produkte selbstständig zu kontrollieren. Der Anwender trägt die ausschließliche Verantwortung für die Anwendung!

Lagerbuchsen und Gleitelemente

Gleitelemente im weitesten Sinne sind ein typisches Anwendungsfeld für Kunststoffe. In vielen unterschiedlichen Bereichen werden Polymere wegen ihrer allgemein guten tribologischen Eigenschaften genutzt. Insbesondere die guten Not- bzw. Trockenlaufeigenschaften, aber auch das hohe Dämpfungsvermögen sowie die vergleichsweise hervorragende Medienbeständigkeit sind Gründe für den Einsatz von Kunststoffen in Lagerbuchsen und Gleitelementen.

Vorteile der Kunststoffe allgemein:

- Gute Not- bzw. Trockenlaufeigenschaften,
- Hohes Dämpfungsvermögen,
- Hervorragende Medien- und Korrosionsbeständigkeit.

Hochleistungskunststoffe bieten zusätzliche Vorteile aufgrund ihrer höheren Temperaturbeständigkeit. Sie können der beim Einsatz zwangsläufig entstehenden Reibungswärme besser widerstehen und daher höhere Lagerlasten und/oder höhere Laufgeschwindigkeiten vertragen.

Besondere Vorteile der Hochleistungskunststoffe:

- Hohe Temperaturbeständigkeit,
- Höhere Lastaufnahme,
- Höhere Laufgeschwindigkeiten.

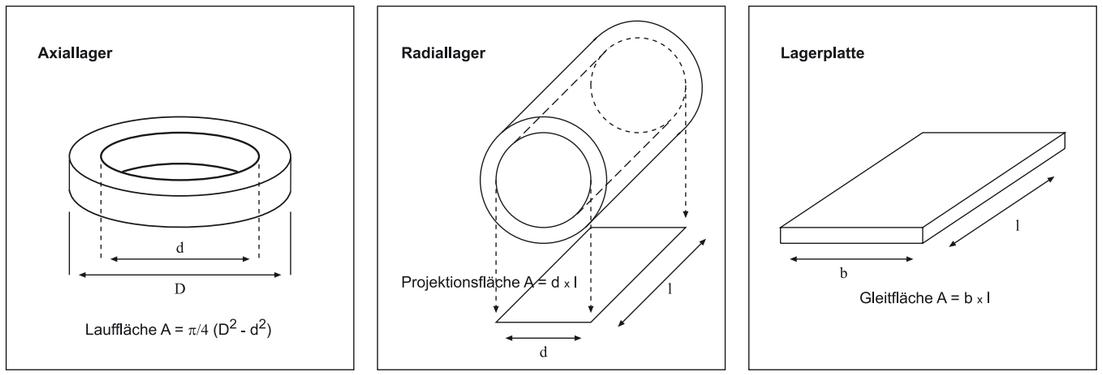


Abb. 55 - Typische Arten von Gleitlagern

Es gibt verschiedene Arten von Gleitlagern, die aus Kunststoffen gefertigt werden. Darüber hinaus sind viele andere Anwendungen bekannt, in denen man sich die guten Gleiteigenschaften zunutze macht, um eine Konstruktion zu vereinfachen. So wird z. B. eine Rolle in der Aufnahmebohrung als Gleitlager ausgelegt, anstatt diese mit einem extra Lager zu versehen.

Materialien

Für den tribologischen Einsatz gibt es speziell modifizierte Hochleistungskunststoffe. Durch den Zusatz von Grafit (GR), Fluorkohlenstoff (TF), Kohlenstofffasern (CF), MoS_2 (MO) oder anderen Festschmierstoffen lassen sich die allgemein guten tribologischen Eigenschaften der Hochleistungskunststoffe nochmals verbessern. Neben den ungefüllten Standardtypen werden vor allem die nachfolgend aufgeführten modifizierten Hochleistungskunststoffe erfolgreich in tribologischen Anwendungen eingesetzt:

Fluorosint® 500 (PTFE MI) – ähnlich reinem PTFE, aber mit deutlich höherer Festigkeit
Fluorosint® HPV (PTFE MI mod.) – für Gleitanwendungen in der Lebensmittelindustrie

Techtron® HPV (PPS mod.) – für mäßige Lagerbelastungen, günstiger als PEEK

Victrex® PEEK™ FC30 (PEEK mod.) – Standardgleitlagerqualität für erhöhte Belastungen

Ketron® HPV (PEEK mod.) – Gleitlagerqualität mit BAM Zulassung für den O_2-Kontakt
Ketron® TX (PEEK TF) – für mäßige mechanische Belastungen in der Lebensmittelindustrie

Torlon® 4301 (PAI GR12) – Standardgleitlagerqualität mit hoher Druckfestigkeit
Torlon® 4275 (PAI GR20) – für hohe Geschwindigkeiten bei geringer Belastung
Torlon® 4435 (PAI mod.) – für extrem hohe p x v - Belastungen
Torlon® 4630 (PAI GR, TF) – extrem verschleißfest für Trockenlauf
Torlon® 4645 (PAI CF, TF) – extrem verschleißfest für geschmierte Gleitanwendungen

Für alle Torlon® Typen wird darauf hingewiesen, dass die besonders hohe Verschleißfestigkeit nur durch eine spezielle thermische Behandlung (Postcuring) erzielt werden kann. Daher sollten Bearbeitung bzw. Herstellung sowie die thermische Nachbehandlung nur von erfahrenen Fachbetrieben ausgeführt werden.

Vespel® SP 21 (PI GR15) – Standardgleitlagerqualität für den universellen Einsatz
Vespel® SP 211 (PI GR TF) – für Trockenlauf bei geringer Belastung
Vespel® SP 22 (PI GR40) – mit geringer Wärmeausdehnung und hoher Kriechfestigkeit
Vespel® SP 3 (PI MO) – für Gleitanwendungen im Vakuum
Vespel® SCP 5050 (PI GR) – optimierte Verschleißfestigkeit für extreme Belastungen
Vespel® SCP 50094 (PI GR) – optimierte Verschleißfestigkeit für höhere Belastungen

Konstruktionshinweise

Die Belastungsverhältnisse in tribologischen Systemen sind extrem komplex! Sie sind von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig. Aber Kunststoffe werden in viel stärkerem Maße als Metalle von Temperatur, Feuchtigkeit, Dauer, Höhe und Art der Belastung sowie anderen Umgebungsbedingungen beeinflusst. Insofern lassen sich die Belastungsverhältnisse niemals exakt vorherbestimmen. Daher empfehlen wir für jeden Einsatzfall einen Versuch unter Praxisbedingungen.

Einflussfaktoren der Gleitlagerbelastung:

- Werkstoffpaarung
- Oberflächeneigenschaften (Rauigkeit)
- Schmierstoff
- Belastung bzw. Flächenpressung
- Gleitgeschwindigkeit
- Einschaltdauer

Im Prinzip werden die Grenzen der Belastbarkeit von Polymer-Gleitlagern durch die beim Einsatz auftretende Druckbelastung und die Lagertemperatur bestimmt! Die Lagertemperatur wiederum ist eine Funktion von Einschaltdauer und Laufgeschwindigkeit.

Bei kleineren bzw. extrem langsamen oder seltenen Bewegungen kann die maximal zulässige Flächenpressung bzw. die Druckfestigkeit der Kunststoffe als Grenzbelastung angenommen werden. Dabei müssen aber gegebenenfalls erhöhte Einsatztemperaturen und Feuchtigkeitsaufnahme berücksichtigt werden. Bei allseitig eingefassten (gekammerten) Gleitlagern sind auch höhere Belastungen erlaubt, wenn die Verformung tatsächlich hinreichend eingeschränkt werden kann.

Bei höheren Laufgeschwindigkeiten bzw. schnelleren Bewegungen reicht die maximal zulässige Flächenpressung als Wert für die Grenzbelastbarkeit von Kunststoffgleitlagern nicht mehr aus! Allgemein bestimmt hier das Produkt aus mechanischer Belastung bzw. Druck (p) und Laufgeschwindigkeit (v) die Belastbarkeit der Kunststoffe in tribologischen Systemen.

Als Grenzwert wird das Produkt aus Druck und Geschwindigkeit (p x v-Wert) angenommen, bei der das Material übermäßigen Verschleiß, Aufschmelzen der

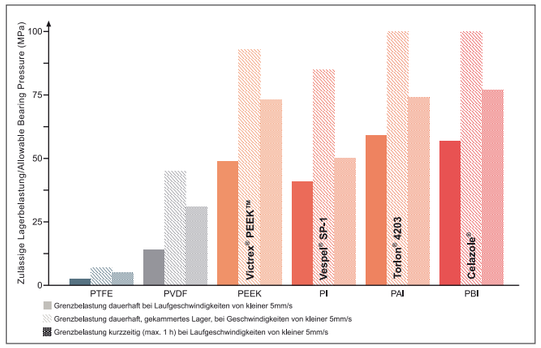


Abb. 56 - Lager-Grenzbelastung verschiedener Hochleistungskunststoffe

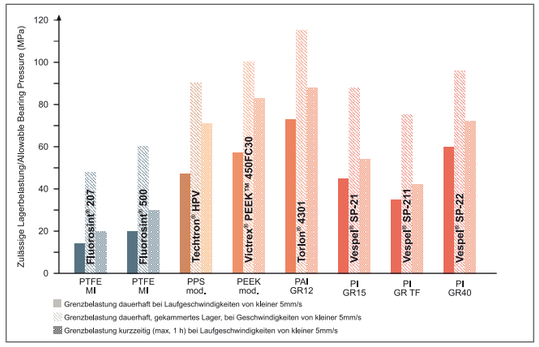


Abb. 57 - Lager-Grenzbelstung modifizierter Hochleistungskunststoffe

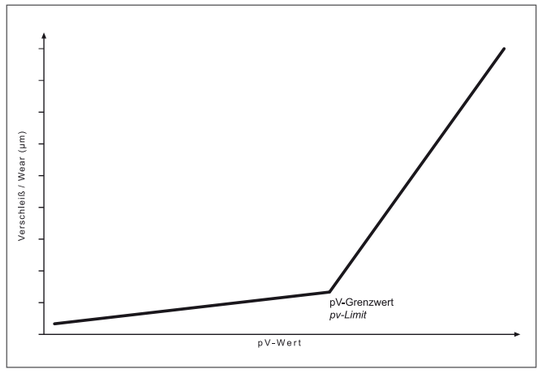


Abb. 58 - Typischer Verschleißverlauf von Kunststofflagern

Lauffläche oder Riss- bzw. Lochbildung zeigt. Bei relativ geringen p x v-Werten zeigen die meisten Kunststoffe nur geringen, kaum steigenden Verschleiß; erhöht man das Produkt jedoch, so stellt sich ab einem bestimmten Wert ein rapide ansteigender Verschleiß ein. Dieser Punkt bezeichnet den p x v-Grenzwert.

	p x v - Grenzwerte, **trocken**			p x v - Grenzwerte, **geschmiert**		
	$V_{max.}$ (m/s)	v = **0,1 m/s** (MPa x m/s)	v = **1 m/s** (MPa x m/s)	$V_{max.}$ (m/s)	v = **0,1 m/s** (MPa x m/s)	v = **1 m/s** (MPa x m/s)
FLUOROSINT® 207 (PTFE MI)	2	0,40	0,25	3	1	0,63
FLUOROSINT® 500 (PTFE MI)	2	0,40	0,25	3	1	0,63
TECHTRON® HPV (PPS mod.)	2	0,43	0,27	3	0,85	0,54
VICTREX® PEEK™	2	0,33	0,21	3	0,95	0,60
VICTREX® PEEK™ FC30 (PEEK mod.)	5	0,66	0,42	5	0,95	0,60
Torlon® 4203 (PAI)	2	0,32	0,20	5	0,95	0,60
Torlon® 4301 (PAI GR12)	5	1,10	0,69	5	1,20	0,76
Vespel® SP1 (PI)	2	0,46	0,29	5	0,95	0,60
Vespel® SP21 (PI GR15)	5	2,10	1,32	5	1,70	1,07
Vespel® SP211 (PI GR15 TF10))	5	1,20	0,76	5	1,50	0,95
Vespel® SP22 (PI GR40)	5	2,55	1,61	5	1,70	1,07
CELAZOLE® (PBI)	5	1,80	1,14	5	1,00	0,63

Tab. 17 - Lager-Grenzbelastungen verschiedener Hochleistungskunststoffe

Bei den Hochleistungskunststoffen sollten die in der Tabelle aufgeführten p x v-Grenzwerte zugrunde gelegt werden. Die Grenzwerte beziehen sich auf eine Daueranwendung bei Raumtemperatur im Normalklima. Ändern sich Einflussfaktoren wie Einsatztemperatur, Einsatzdauer, Feuchtigkeit etc., so müssen die p x v-Grenzwerte korrigiert bzw. reduziert werden.

Unter extremen Bedingungen bestehen nur noch wenige Hochleistungskunststoffe. In Grenzfällen reicht der p x v-Wert alleine zur Materialauswahl nicht aus. Bei gleichem p x v-Wert können Anwendungen mit hohen Geschwindigkeiten und niedrigem Druck zu anderen Verschleißwerten führen als der umgekehrte Fall mit hohem Druck und niedriger Geschwindigkeit. Bei hohen Geschwindigkeiten kann u.U. eine besonders hohe Reibungswärme entstehen, der nur noch besonders temperaturbeständige und tribologisch optimierte Hochleistungskunststoffe wie Torlon® oder Vespel® widerstehen können.

Als Gegenlaufpartner für Kunststoffgleitlager sollten Stähle mit einer Rockwellhärte von mindestens 50 HRC verwendet werden. Bei besonders staubiger Umgebung empfiehlt es sich, gehärtete Stähle zu verwenden, da sich Staub in den Kunststoff einbetten und ungehärtete Stahlwellen angreifen kann. NE-Metalle sind aus gleichem Grund nur bedingt als Gleitpartner zu empfehlen.

Die Wandstärke von Radiallagern ist häufig durch die gegebenen Wellen- und Gehäuse-Abmessungen vorgegeben. Bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten sollte eine möglichst geringe Wandstärke vorgesehen werden, um eine gute Wärmeabfuhr zu ermöglichen. Allerdings darf ein gewisses Mindestmaß nicht unterschritten werden, um ausreichende Festigkeit und Zähigkeit gewährleisten zu können. Insbesondere bei hohen Kantenpressungen sollte die Wandstärke nicht unter einen Millimeter fallen.

Zur Befestigung können Radiallager gut mit einem entsprechenden Übermaß in das Lagergehäuse eingepresst werden. Versuche haben gezeigt, dass sich eingepresste Lagerbuchsen praktisch nicht verdichten. Diese Tatsache hängt mit dem Verhältnis vom Außendurchmesser zur Wandstärke zusammen. Insofern ist es sinnvoll, statt Außen- und Innendurchmesser Außendurchmesser und Wandstärke einer Lagerbuchse, unter Berücksichtigung des gewünschten Lagerspiels, zu tolerieren. Das Lagerspiel sollte im Grundsatz ca. 0,15 % bis 0,4 % des Wellendurchmessers betragen.

Dichtungen und Dichtelemente

Neben Gleitlagern sind Dichtungen ein weiteres typisches Anwendungsfeld für Kunststoffe. Nicht nur ihre hohe Korrosions- und Chemikalienbeständigkeit sondern auch ihre Verschleißfestigkeit und ihre guten Gleiteigenschaften prädestinieren Kunststoffe allgemein für den Einsatz in Dichtanwendungen!

Vorteile der Kunststoffe allgemein:

l Hervorragende Medien- und Korrosionsbeständigkeit,
l Hohe Verschleißfestigkeit,
l Gute Gleiteigenschaften.

Hochleistungskunststoffe können dort eingesetzt werden, wo herkömmliche Kunststoffe bereits versagen. Dichtringe aus diesen Materialien können je nach Type von – 273 °C bis über 300 °C, in Spitzen sogar bis zu 500 °C eingesetzt werden. Neben guter Verschleißfestigkeit und niedrigen Reibwerten besitzen Hochleistungskunststoffe je nach Type thermische Ausdehnungskoeffizienten, die denen metallischer Werkstoffe sehr nahe kommen. Ein weiterer Vorteil ist, dass viele Typen ohne Schmierung eingesetzt werden können, da sie über hervorragende Trockenlaufeigenschaften verfügen.

Besondere Vorteile der Hochleistungskunststoffe:

l Weiter Temperatureinsatzbereich,
l Geringere thermische Ausdehnung,
l Gute Trockenlaufeigenschaften.

Materialien

Es gibt verschiedene Dichtungsarten, die aus Kunststoffen gefertigt werden. Hochleistungskunststoffe bieten deutliche Vorteile und werden, abhängig von mechanischer, thermischer und chemischer Belastung, für die verschiedensten Anwendungen eingesetzt. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von Bauelementen, die ebenfalls Dichtungsfunktionen übernehmen müssen, wie z. B. Ventile, Kolben, Stopfbuchsen oder Pumpenteile. Auch diese können gut aus Hochleistungskunststoffen hergestellt werden. Bei den Material- und Konstruktionshinweisen beschränken wir uns jedoch auf die typischen Dichtungsanwendungen.

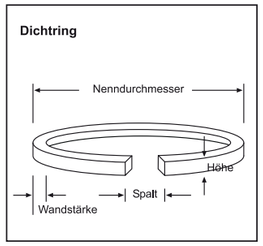


Abb. 60 - Schematische Darstellung eines Dichtrings

Statische Dichtungen in verschiedenen Querschnitten aus massiven Hochleistungskunststoffen, insbesondere zur Abdichtung von Rohren und Armaturen, haben sich in vielen Fällen bewährt.
Zur Anwendung kommen aufgrund ihrer überragenden Chemikalienbeständigkeit vor allem Fluorkunststoffe und Polyaryletherketone.

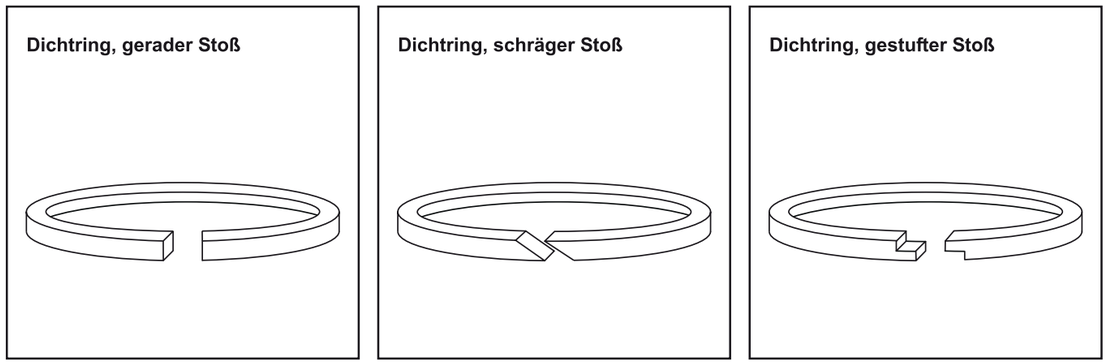


Abb. 59 - Typische Arten von Dichtring-Schlössern

Polytron PVDF 1000 – für höhere Belastungen bei hoher Chemikalienbeständigkeit
Polytron PTFE 1000 – für hohe Temperaturen und beste Chemikalienbeständigkeit
Polytron PTFE Compounds – für leicht erhöhte mechanische Belastungen
Fluorosint® 500 (PTFE MI) – für hohe Temperaturen und höhere mechanische Belastung

Victrex® PEEK™ – für erhöhte Temperaturen und höhere mechanische Belastung
Victrex® HT (PEK) – für erhöhte Temperaturen und starke mechanische Belastung
Victrex® ST (PEKEKK) – für erhöhte Temperaturen und nochmals höhere mechanische Belastung

Bei geringeren Anforderungen an die Korrosions- und Hydrolysebeständigkeit und gleichzeitig hohen mechanischen Belastungen, wie sie z. B. in hydraulischen Systemen auftreten, können auch gut Polyimide (PI und PAI) eingesetzt werden.

Torlon® 4203 (PAI) – für erhöhte Temperaturen und extreme mechanische Belastungen
Torlon® 5030 (PAI GF) – für erhöhte Temperaturen und maximale mechanische Belastungen

Vespel® SP 1 – für extreme Temperaturen und hohe mechanische Belastung
Vespel® SCP 5000 – für extreme Temperaturen und hohe mechanische Belastung

Die Abdichtung dynamischer Systeme (Wellen, Kolben) stellt eine ungleich größere Herausforderung für Kunststoffdichtungen dar. Neben den bereits genannten Belastungen sind hier vor allem Verschleißfestigkeit und die Gleiteigenschaften der Kunststoffe gefordert.

Aufgrund der besonderen Belastungsanforderungen werden für dynamische Dichtungen modifizierte Hochleistungskunststoffe eingesetzt. Insbesondere die tribologisch optimierten Hochleistungskunststoffe sind dafür geeignet. Die nachfolgend aufgeführten Materialien sind neben den bereits genannten Fluorkunststoffen und Polyaryletherketonen in vielen Dichtungsanwendungen erfolgreich eingesetzt worden.

Fluorosint® HPV (PTFE MI mod.) – für den Kontakt mit Lebensmitteln bei erhöhten p x v-Werten
Fluorosint® MT-01 (PTFE CF MT) – höchste Druckfestigkeit aller PTFE-Typen

Victrex® PEEK FC30 (PEEK mod.) – für erhöhte Temperaturen und höhere Belastung
Victrex® PEEK CF30 (PEEK CF) – für hohe Druckfestigkeit und geringe Ausdehnung
Ketron® HPV (PEEK mod.) – für höhere Belastung mit BAM-Zulassung für O_2 Kontakt

Torlon® 4301/4503 (PAI GR12) – für hohe Temperaturen und extreme mechanische Belastungen
Torlon® 4435 (PAI mod.) – für hohe p x v-Belastungen
Torlon® 7130 (PAI CF) – für höchste Druckfestigkeit und geringste Ausdehnung

Vespel® SP 21 (PI GR15) – für hohe Temperaturen und hohe mechanische Belastung
Vespel® SP 211 (PI GR TF) – für hohe Temperaturen und gute Gleiteigenschaften
Vespel® SP 22 (PI GR40) – für höchste Temperaturen und geringste Ausdehnung
Vespel® SCP 5050 (PI GR) – für extreme Temperaturen und höchste Festigkeit
Vespel® SCP 50094 (PI GR TF) – für extreme Temperaturen und gute Gleiteigenschaften

Die Auswahl der geeigneten Typen erfordert eine genaue Untersuchung der Anforderungen und der Materialeigenschaften. Bei den Materialeigenschaften ist neben den mechanischen Eigenschaften vor allem die chemische Beständigkeit zu prüfen, da diese bei den gefüllten Materialien und vor allem bei den Polyimid-basierten Hochleistungskunststoffen (PI und PAI) reduziert sein kann.

Eine besondere Form der dynamischen Dichtung ist die so genannte Labyrinthdichtung. Sie wird zum Abdichten von mit hoher Drehzahl rotierenden Elementen (Wellen etc.) eingesetzt, bei denen zusätzlich hohe Drücke und/oder Temperaturen auftreten, wie z. B. in Turbinen.

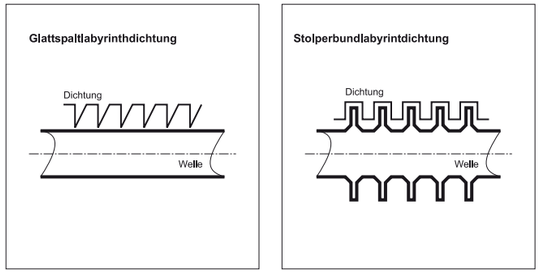


Abb. 61 - Typische Arten von Labyrinthdichtungen

Aufgrund der hohen mechanischen und thermischen Belastungen werden für Labyrinthdichtungen zwar häufig metallische Werkstoffe verwendet. Hochleistungskunststoffe jedoch bieten in bestimmten Temperaturgrenzen deutliche Vorteile und sind selbst metallischen Werkstoffen überlegen. Besonders bewährt haben sich Labyrinthdichtungen aus den nachfolgend aufgeführten Materialien:

Fluorosint® 500 (PTFE MI) – für mäßig belastete Dichtungen, auch mit O2-Kontakt
Fluorosint® MT-01 (PTFE CF MT) – für hoch belastete Dichtungen

Ketron® HPV (PEEK mod.) – für hoch belastete Dichtungen mit BAM-Zulassung

Torlon® 4301/4503 (PAI GR12) – für höchst belastete Dichtungen
Torlon® 7130 (PAI CF30) – für höchst belastete Dichtungen mit geringster Ausdehnung.

Mit dem Einsatz von Hochleistungskunststoffen können signifikant höhere Dichtleistungen erbracht werden. Je nach Einsatzfall lässt sich die Effizienz pro Dichtstufe um 0,5 bis 2 % erhöhen. Die geringeren Leckage-Raten werden erzielt, da die Hochleistungskunststoffe deutlich geringere Spaltmaße zulassen. Aufgrund der guten Zähigkeit und der hohen Verschleißfestigkeit werden bei Kontakt, anders als bei metallischen Dichtungen, weder Dichtung noch Welle beschädigt. Auch ein Einarbeiten (Fressen) von Dichtung und Gegenlaufpartner ist aufgrund der guten Trockenlaufeigenschaften der Hochleistungskunststoffe in aller Regel unmöglich.

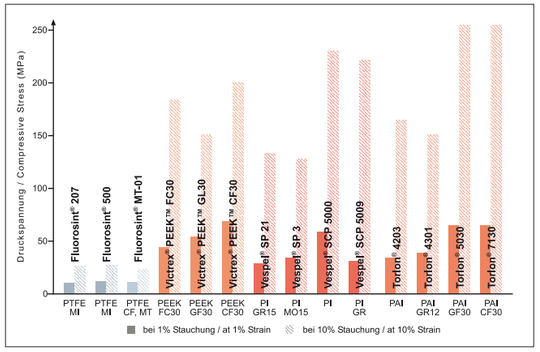


Abb. 62 – Druckfestigkeit verschiedener, modifizierter Hochleistungskunststoffe

Eine weitere Sonderform der dynamischen Dichtung ist der so genannte Faltenbalg. Mit Faltenbälgen werden vor allem axiale Bewegungen abgedichtet. Eingesetzt werden sowohl spitz gekerbte als auch rund geformte Faltenbälge. Die spitz eingekerbten Faltenbälge bieten zwar eine höhere Dehnbarkeit und Flexibilität, sie sind aber bauartbedingt deutlich kerbempfindlicher und daher nur für geringere Drücke geeignet.

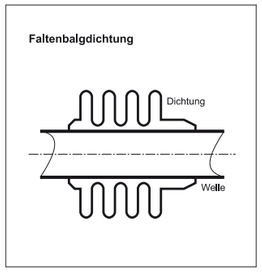


Abb. 63 - Schematische Darstellung eines Faltenbalgs

Aufgrund der Form können nur relativ zähe und wenig kerbempfindliche Hochleistungskunststoffe als Faltenbälge eingesetzt werden. Modifizierte oder verstärkte Kunststoffe können daher nicht verwendet werden. Neben den Fluorkunststoffen mit ihrer vergleichsweise hohen Dehnbarkeit werden vor allem noch ungefüllte Polyaryletherketone genutzt. Bei hohen Belastungen haben sich insbesondere Faltenbälge aus Victrex® PEEK™ bewährt.

Polytron PVDF 1000 – für mäßige Temperaturen und höhere Belastung
Polytron PTFE 1000 – für hohe Temperaturen und beste Chemikalienbeständigkeit

Victrex® PEEK™ – für erhöhte Temperaturen und höhere mechanische Belastung
Victrex® HT (PEK) – für erhöhte Temperaturen und starke mechanische Belastung
Victrex® ST (PEKEKK) – für erhöhte Temperaturen und nochmals höhere mechanische Belastung

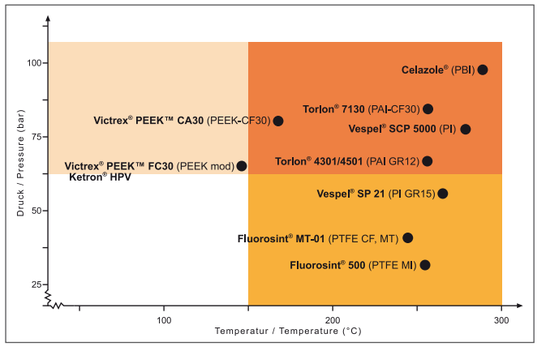


Abb. 64 - Einsatzbereiche für Dichtungen aus Hochleistungskunststoffen

Konstruktionshinweise

Aufgrund der Kriechneigung von Kunststoffen, vor allem von PTFE, sollten statische Dichtungen eingefasst (gekammert) werden. Insbesondere bei höheren Belastungen kommt man nicht umhin, die zum Kriechen neigenden Materialien in eine Nut einzulegen, um eine zu starke Deformation zu verhindern.

Neben den reinen Materialeigenschaften spielt die Auslegung der Dichtungen eine nicht zu unterschätzende Rolle. Insbesondere aufgrund der höheren Wärmeausdehnung der Kunststoffe sind genaue Berechnungen unerlässlich. Nicht nur zur Kompensation der Wärmeausdehnung sondern auch aus Montagegründen werden häufig geschlitzte Dichtringe eingesetzt.

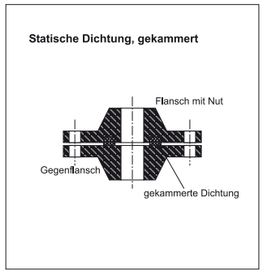


Abb. 65 - Schematische Darstellung einer eingefassten Dichtung

Die einfachste und auch günstigste Schlitzform ist der so genannte Geradestoß. Er schließt sich – richtige Konstruktion vorausgesetzt – bei Erwärmung und reagiert auf Druck ohne bleibende Verformung. Der Schrägstoß mit einem Schnitt von normalerweise 20 °C kommt häufig bei Dichtringen vor. Die Leckagerate ist jedoch etwas höher als bei den Dichtungen mit geradem Stoß. Allerdings haben Dichtringe mit Schrägstoß leichte Vorteile bei relativ geringem Systemdruck. Deutlich aufwendiger in Konstruktion und Fertigung ist der gestufte Stoß, der die Vorteile von geradem und Schrägstoß miteinander vereint.

Aufgrund der hohen Elastizität können die geschlitzten Ringe in aller Regel ohne besondere Vorsichtsmaßnahmen montiert werden. Nach der bei der Montage notwendigen Spreizung schnappen die Dichtringe in den Nutgrund und verbleiben dort. Vorsicht ist bei der Montage von Dichtringen aus Fluorkunststoffen (PTFE) geboten, da diese einen deutlich geringeren Biege-Modul aufweisen als die anderen Hochleistungskunststoffe und daher schnell überdehnt werden können.

Wir übernehmen gerne die genaue Auslegung der Dichtung unter Berücksichtigung aller Einsatzbedingungen.

Rollen, Walzen und Räder

Rollen, Walzen und Räder sind ein weiteres typisches Anwendungsfeld für Kunststoffe. In fast allen industriellen aber auch kommerziellen Anwendungsbereichen findet man Räder und Rollen aus Kunststoffen. Neben der Chemikalien- und Korrosionsbeständigkeit sind meist die guten Dämpfungseigenschaften und das schonende Verhalten gegenüber den Laufflächen Gründe für den Einsatz von Kunststoffen.

Vorteile der Kunststoffe allgemein:

l Gute Geräusch- und Schwingungsdämpfung
l Hohe Chemikalien- und Korrosionsbeständigkeit
l Schutz des Gegenlaufpartners

Die bevorzugten Kunststoffe für Rollen und Räder sind Polyamide (PA) und Polyurethane (PUR), weil diese gute Steifigkeit, Härte und Abriebwiderstand mit der nötigen Schlagzähigkeit verbinden. Für Zahnräder wird neben den Polyamiden auch häufig Polyacetal (POM) verwandt, da diese Materialien gut Schockbeanspruchungen aufnehmen können.

Hochleistungskunststoffe kommen vor allem immer dann für Rollen, Walzen und Räder zum Einsatz, wenn eine erhöhte Temperaturbeständigkeit und/oder eine höhere mechanische Festigkeit gefordert werden. Auch ihre besonders guten tribologischen Eigenschaften machen die Anwendung von Hochleistungskunststoffen sinnvoll.

Besondere Vorteile der Hochleistungskunststoffe:

l Hohe Temperaturbeständigkeit
l Höhere Lastaufnahme
l Hervorragende tribologische Eigenschaften

Materialien

Rollen, Walzen und alle Arten von Rädern sind ein extrem weites Einsatzfeld. Neben Lauf-, Transport- und Führungsrollen sind es oft auch Walzen, Zahnräder oder Seilrollen, die für besondere Einsatzfälle aus Hochleistungskunststoffen gefertigt werden.

Wie bereits beschrieben, sind die guten Dämpfungseigenschaften der Kunststoffe ein wesentlicher Grund für ihren Einsatz als Rollen und Räder. Insofern kommen vor allem die Hochleistungskunststoffe zur Anwendung, die sich durch gute Zähigkeit und Elastizität auszeichnen.

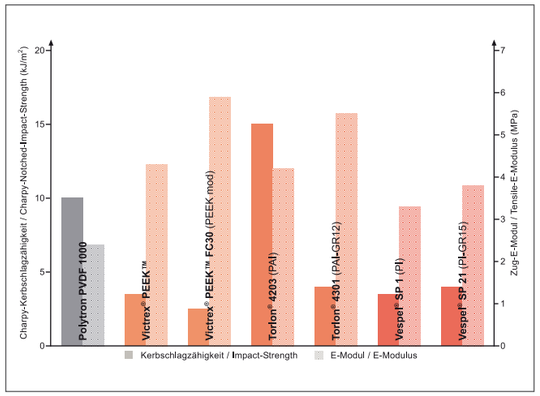


Abb. 66 - Schlagzähigkeit und Elastizitätsmodul verschiedener Hochleistungskunststoffe

Für Zahnräder sollte das Material nicht allein nach dem E- Modul und der Biegefestigkeit beurteilt werden. Ein hochfestes und dabei sprödes Material eignet sich weniger als ein zäher Kunststoff mit geringerem E- Modul aber mit hohem Verschleißwiderstand. Faserverstärkte Typen werden folglich nur in Ausnahmefällen verwandt.

Abb. 67 - Typische Arten von Rollen und Rädern

Polytron PVDF 1000 – gute Festigkeit bei hoher Chemikalienbeständigkeit

Victrex® PEEK™ – hohe Festigkeit mit guter Temperaturbeständigkeit
Victrex® PEEK™ FC30 (PEEK mod.) – hohe Festigkeit und tribologisch optimiert

Torlon® 4203 (PAI) – sehr hohe Festigkeit mit guten Dämpfungseigenschaften
Torlon® 4301 (PAI GR12) – sehr hohe Festigkeit und tribologisch optimiert

Vespel® SP1 (PI) – besonders hohe Temperaturbeständigkeit
Vespel® SP21 (PI GR15) – hohe Temperaturbeständigkeit und tribologisch optimiert

Konstruktionshinweise

Für die Konstruktion von Rädern und Rollen, insbesondere auch von Zahnrädern und Seilrollen gibt es eine Vielzahl von Hinweisen, die eine eigene Broschüre füllen können. Daher sollen hier nur einige grundlegende Informationen gegeben werden.

Aufgrund der guten tribologischen Eigenschaften, besonders im Bereich der Mischreibung und des Trockenlaufes, können Hochleistungskunststoffe grundsätzlich unmittelbar auf der Achse gelagert werden. Es gelten analog die Konstruktionshinweise für Gleitanwendungen.

Durch die Verwendung von Wälzlagern können allerdings die Antriebskräfte deutlich reduziert werden. Dadurch ist auch eine bessere Temperaturabführung möglich. Wälzlager können direkt in eine entsprechende Aufnahmebohrung eingepresst werden. Neben dem grundsätzlichen Lagerspiel ist insbesondere ein an die zu erwartende Temperaturbelastung angepasstes Einpressübermaß zu berücksichtigen.

Bei Kunststoffzahnrädern ist die höhere Wärmeausdehnung gegenüber Metallen zu berücksichtigen. Durch die Wärmedehnung wird während des Laufes unter Last sowohl das Flankenspiel als auch das Kopfspiel verkleinert. Dadurch kann es sowohl zu Laufgeräuschen als auch zu erhöhtem Verschleiß kommen. Das Flankenspiel lässt sich durch eine Profilrücknahme über die gesamte Zahnhöhe oder durch Vergrößerung der Zahnweiten erreichen. Der Einlaufstoß kann durch Zahnkopfkürzung gemindert werden.

Das Zahnflankenspiel und Kopfspiel sollte nach mehrstündigem Lauf bzw. nach Erreichen der Betriebstemperatur überprüft werden und mind. 1 % vom Modul betragen.

Die Zahnbreite durch eine Schrägverzahnung zu vergrößern, um dadurch die Tragfähigkeit zu erhöhen, führt bei Kunststoffen nicht zum gleichen Erfolg wie bei Stahlzahnrädern. Durch die Schrägverzahnung wird zwar die Kraft auf mehrere Zahnpaare verteilt, jedoch werden die Zähne ungleichmäßig belastet und verformt, so dass ein hoch belastetes, schrägverzahntes Kunststoffzahnrad durchaus höhere Geräusche verursachen kann als ein geradeverzahntes.

Wenn die Kraftübertragung von Rädern oder Rollen durch eine Passfeder erfolgt, ist die Konstruktion an den Keilnutflanken rechnerisch zu überprüfen. Die zulässige Flächenpressung an den Keilnutflanken sollte nicht überschritten werden. Ist die Keilnutfläche nicht ausreichend, muss eine Stahlnabe oder eine andere Befestigung vorgesehen werden.

Wir übernehmen in der Regel gerne die kunststoffgerechte Auslegung der Räder und Rollen unter Berücksichtigung aller Einsatzbedingungen.

Bauteile für die Lebensmittelindustrie

Die Lebensmittel- und Verpackungstechnik ist einer der speziellen Anwendungsbereiche, in dem traditionell viel Kunststoff eingesetzt wird und das nicht nur als Verpackungswerkstoff. Insbesondere in den Anlagen und Maschinen der Lebensmittel- und Verpackungsindustrie kommen häufig Bauteile aus technischen Kunststoffen zum Einsatz.

Der Trend, immer schnellere Prozesse und immer höhere Ausstoßmengen realisieren zu müssen, führt zwangsläufig zur Forderung nach Massenreduktion in den Maschinen. Das Gewicht der Maschinen aber lässt sich nur durch leichtere Bauelemente reduzieren. Kunststoffe helfen, das Gewicht – insbesondere der bewegten Teile – drastisch zu reduzieren.

Darüber hinaus sind die Anforderungen an Sauberkeit und Hygiene in den letzten Jahren gestiegen. Die hohen Anforderungen führen zu immer häufigeren Sterilisations- und Reinigungszyklen mit immer aggressiveren Medien und Verfahren. Hier bieten die Kunststoffe aufgrund ihrer grundsätzlich guten Korrosionsbeständigkeit deutliche Vorteile gegenüber metallischen Werkstoffen.

Ein dritter Aspekt, der für den Einsatz von Kunststoffen in der Lebensmittel- und Verpackungstechnik spricht, ist der Wunsch, Verunreinigungen möglichst zu vermeiden. Schmiermittelfreiheit ist dabei eine der konstruktiven Forderungen, die sich durch die allgemein guten Gleit- und Trockenlaufeigenschaften der Kunststoffe realisieren lässt.

Aber auch die guten thermischen und elektrischen Isolationseigenschaften, das hohe Dämpfungs- und Schwingungsvermögen sowie der teilweise extrem hohe Verschleißwiderstand macht die Verwendung von Kunststoffen für Bauteile in den Maschinen der Lebensmittel- und Verpackungsmaschinenindustrie sinnvoll.

Vorteile der Kunststoffe allgemein:

- Geringes Gewicht
- Gute Chemikalien- und Korrosionsbeständigkeit
- Gute Gleit- und Trockenlaufeigenschaften

Hochleistungskunststoffe bieten nochmals deutliche Vorteile gegenüber den einfacheren technischen Kunststoffen. Insbesondere aufgrund ihrer deutlich höheren Temperaturbeständigkeit und der besseren Chemikalienbeständigkeit können Hochleistungskunststoffe dort eingesetzt werden, wo bisher auf den Einsatz von Kunststoffen verzichtet werden musste; zum Beispiel im Bereich der Heißverarbeitung von Lebensmitteln oder beim Siegeln von Verpackungsstoffen. Natürlich werden Hochleistungskunststoffe auch für Gleit- und Antriebselemente, Führungen oder Dichtungen in der Lebensmittel- und Verpackungstechnik verwandt.

Besondere Vorteile der Hochleistungskunststoffe:

- Höhere spezifische Festigkeit
- Temperatureinsatzbereich bis 250 °C
- Hervorragende Hydrolyse- und Chemikalienbeständigkeit

Materialien

Der Einsatz von Kunststoffen in den Maschinen der Lebensmittel- und Verpackungstechnik ist jedoch durch eine Vielzahl von nationalen und internationalen Gesetzen und Normierungen reglementiert. Insbesondere wenn der Kunststoff direkt mit dem entsprechenden Lebensmittel in Kontakt gerät oder geraten kann, dürfen in der Regel nur bestimmte, als unbedenklich oder kompatibel eingestufte Materialien benutzt werden.

Den Einsatz von Kunststoffen im Kontakt mit Lebensmitteln regeln in Europa die Verordnung (EU) Nr. 10/2011 und in den USA die Empfehlungen der Food and Drug Administration (FDA).

Die alle europäischen Mitgliedsländer rechtlich direkt bindenden Verordnungen (EU) Nr. 10/2011 für Kunststoffe zusammen mit der (EG) Nr. 1935/2004 für alle Gegenstände im Kontakt mit Lebensmitteln ersetzen die bisher geltende Richtlinie 2002/72/EG, die die Mitgliedsländer nur in ihrer Gesetzgebung band! Damit verlieren auch die einzelnen nationalen Regelungen wie z. B. die Empfehlungen des Bundesinstituts für Risikobewertungen (BfR) ihre Geltung. Eine europaweit einheitliche Rechtsgrundlage für Gegenstände im Kontakt mit Lebensmitteln wurde geschaffen.

Anwendungen mit Hochleistungskunststoffen

Allerdings gehen die Anforderungen der Verordnung (EG) Nr. 1935/2004 weit über die Vorgaben der Richtlinie 2002/72/EG hinaus! Galten bisher alle Kunststoffe, deren Monomere, Additive und sonstige Ausgangsstoffe der Richtline entsprachen, als lebensmittelkompatibel, so muss jetzt die Unbedenklichkeit durch Migrationsversuche nachgewiesen werden. Die Grenzwerte sind gewichtsabhängig (mg/kg) und für die verschiedenen Lebensmittelkategorien (Fleischprodukte, Milcherzeugnisse, Fette und Öle, Fleisch etc.) unterschiedlich. Die Migrationsversuche werden an Ersatzstoffen (Simulanzien) durchgeführt und bewertet.

Entsprechend diesen neuen Regelungen muss die Unbedenklichkeit eines einzelnen Materials für den Kontakt mit einer bestimmten Menge Lebensmittel anhand von Versuchen belegt werden. Dabei können die Einsatzbedingungen z. B. auf bestimmte Temperaturbereiche hin eingeschränkt werden. Gleichzeitig wird eine entsprechende Rückverfolgbarkeit des Materials bis hin zum Rohstoff gefordert.

Durch die Darstellung wird bereits deutlich, dass es sich bei den europäischen Verordnungen um sehr umfangreiche Einschränkungen handelt, deren Einhaltung vor allem der Maschinenproduzent sicherzustellen hat. Auf Anfrage können Bauteile aus entsprechend qualifiziertem Material hergestellt werden, ansonsten muss die Einhaltung der Grenzwerte am Bauteil unter Berücksichtigung des Einsatzfalls einzeln nachgewiesen werden.

Die Food and Drug Administration (FDA) ist für die öffentliche Gesundheit in den USA verantwortlich. Im Rahmen von jährlichen Veröffentlichungen, dem so genannten Code of Federal Regulations, werden unter dem Titel 21 (CFR, Title 21) Empfehlungen und Spezifikationen für den Lebensmittelkontakt von unterschiedlichen Materialien herausgegeben. Darüber hinaus werden in den Food Contact Notifications (FCN) Mitteilungen über den sicheren Einsatz von Materialien im Kontakt mit Lebensmitteln gemacht.

Die nachfolgend aufgeführten Hochleistungskunststoffe sind mit den angegebenen US-amerikanischen Regelungen für den Kontakt mit Lebensmitteln kompatibel. Bei einer rechtzeitigen Anforderung kann auch eine Bescheinigung unter Angabe der Grenzwerte gemäß den europäischen Regelungen erstellt werden.

l PTFE – FDA 21 CFR 177.1380 sowie 177.1550
l PVDF – FDA 21 CFR 177.2510 und Verordnung (EG) Nr. 1935/2004
l PSU – FDA 21 CFR 177.1655
l PES – FDA 21 CFR 177.1560 sowie 177.2440
l PPSU – FDA 21 CFR 177.2500 sowie FCN No. 83
l PPS – FDA 21 CFR 177.2490 sowie FCN No. 40 und Verordnung (EG) Nr. 1935/2004
l PEEK – FDA 21 CFR 177.1556 sowie 177.2415 und Verordnung (EG) Nr. 1935/2004
l PEK – FDA 21 CFR 177.1556 sowie 177.2415
l PEI – FDA 21 CFR 177.1595

Die oben nicht aufgeführten Hochleistungskunststoffe, insbesondere die Polyimide (PI, PAI, PBI), sind folglich nicht für den direkten Kontakt mit Lebensmitteln geeignet.

Weder die EU-Behörden noch die FDA testen jedoch die Bauteile oder Halbzeuge. Vielmehr müssen die verwendeten Materialien den Empfehlungen und Anforderungen entsprechen. Insofern können auch keine Zertifikate ausgestellt werden sondern nur Kompatibilitätsbescheinigungen oder Prüfbescheinigungen, die die Übereinstimmung der gelieferten Materialien mit den entsprechenden Gesetzen und Normierungen bestätigen.

Neben den bereits beschriebenen Anforderungen für den Lebensmittelkontakt gibt es eine Vielzahl weiterer Regelungen für spezifische Anwendungsbereiche, insbesondere für den Einsatz im Einflussbereich der USA.

Das United States Department of Agriculture (USDA) ist für die Herstellung, Verpackung und Behandlung von Agrarprodukten verantwortlich. In diesem Zusammenhang erstellt die USDA Anforderungen für die Verarbeitung von Fleisch und Geflügel, bezieht sich aber dabei auf die Anforderungen der FDA.

3-A® Dairy ist eine amerikanische Branchenorganisation, die Standards für Anlagen in der Milch- und Molkereiindustrie festlegt. Die sogenannten 3-A-Sanitary-Standards No. 20 beinhalten Anforderungen für den Einsatz von Kunststoffen bei der Herstellung, Verarbeitung und Behandlung von Milch- und Molkereiprodukten. Ähnlich der FDA veröffentlicht die 3-A® Dairy jährlich eine Liste von zugelassenen Materialien.

Die amerikanische National Sanitation Foundation (NSF) stellt Standards für Lebensmittel, Trinkwasser, Luft und Verbrauchsgüter auf und stellt auf Antrag entsprechende Produktzertifikate aus und prüft deren Einhaltung. Für den Einsatz von Kunststoffen sind insbesondere NSF Standard 51 Plastics in Food Equipment und NSF Standard 61 Drinking Water System Components wichtig. Eine entsprechende Kompatibilität kann nur am Endprodukt nachgewiesen werden. Dafür müssen die einzelnen Komponenten den Standards entsprechen.

Die bundesdeutschen Kunststoff-Trinkwasser-Empfehlungen wiederum beinhalten Regelungen für den Einsatz von Kunststoffen in Kontakt mit Trinkwasser. Ähnlich wie bei den NSF Standards kann die Kompatibilität nur am Endprodukt nachgewiesen werden. Dafür müssen die Endprodukte unter Angabe der Materialzusammensetzung von zertifizierten Prüfstellen auf ihre Eignung hin untersucht werden.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die grundsätzliche Übereinstimmung der gezeigten Hochleistungskunststoffe mit den genannten Regelungen. Eine Bestätigung kann, wie bereits beschrieben, für bestimmte Standards nur von entsprechenden Prüfinstituten ausgestellt werden.

Für den Lebensmittelkontakt ist weiter zu prüfen, ob über den Kunststoff hinaus auch die möglicherweise

	1935/2004/EC	BfR	FDA	USDA	3A-Dairy	NSF 51/61	KTW
PVDF	+	-	+	-	(+)	+/-	(+)
PTFE	(+)	+	+	+	-	-/-	-
PSU	(+)	-	+	+	+	+/+	-
PPSU	(+)	+	+	-	-	+/+	(+)
PPS	+	+	+	-	-	-/(+)	-
PEEK	+	-	+	+	+	-/-	-
PEI	(+)	-	+	+	-	+/-	-

+: kompatibel; (+): unter bestimmten Bedingungen oder in bestimmten Typen kompatibel; -: nicht kompatibel

Tab. 18 - Lebensmittelkompatibilität verschiedener Hochleistungskunststoffe

verwendeten Farb-, Verstärkungs- und Zusatzstoffe die notwendigen Anforderungen erfüllen. Kohlenstofffasern zum Beispiel führt die FDA nicht in ihren Veröffentlichungen auf. Somit sind mit Kohlenstofffasern verstärkte Kunststoffe nicht FDA-kompatibel.

Vor allem die tribologisch optimierten Kunststoffe erfüllen aufgrund ihrer Füllstoffe die notwendigen Anforderungen für den Lebensmittelkontakt meist nicht. Nur bei wenigen Materialien sind sowohl der Kunststoff als auch die verwendeten Füllstoffe für den Kontakt mit Lebensmitteln geeignet.
Folgende tribologisch optimierte Hochleistungskunststoffe entsprechen den Anforderungen für den Kontakt mit Lebensmitteln.

Fluorosint® 207 (PTFE MI) – für gering belastete Gleit- und Dichtanwendungen
Fluorosint® HPV (PTFE MI mod.) – für höher belastete Gleitanwendungen

Techtron® HPV (PPS mod.) – für hoch belastete Gleitanwendungen

Ketron® TX (PEEK TF) – Beste Gleit- und Verschleißeigenschaften.

Für Anwendungen, bei denen der Kunststoff direkt mit dem Lebensmittel in Berührung kommt und bei denen die Gefahr besteht, dass Kunststoffteile das Lebensmittel kontaminieren könnten, gibt es detektierbare Kunststoffe. Diese mit metallischen Zusätzen versehenen Materialien können durch Metalldetektoren erkannt und über magnetische Verfahren aus dem Lebensmittel herausgefiltert werden. Im Bereich der Hochleistungskunststoffe gibt es derzeit nur ein detektierbares PEEK.

Polytron PEEK MD – detektierbar, mit den typischen PEEK-Eigenschaften.

Konstruktionshinweise

Bei der Konstruktion von Bauteilen für die Lebensmittel- und Verpackungstechnik sind neben den Zulassungsbeschränkungen für das Material vor allem die allgemeinen Hinweise zur Konstruktion von Gleitelementen, Dichtungen, Rädern- und Rollen etc. zu berücksichtigen.

Wichtig für den Einsatz von Bauteilen in Kontakt mit Lebensmitteln ist vor allem die Oberflächenbeschaffenheit. Raue Oberflächen, ebenso wie Spalten, Ritze und Ähnliches sind sorgfältig zu vermeiden, um das Eindringen und Festsetzen von Schmutz oder Lebensmittelresten zu verhindern. In diesem Sinne sollten auch scharfkantige Ecken vermieden und durch genügend große Radien ersetzt werden.

In Bezug auf die Hygieneanforderungen muss darüber hinaus geprüft werden, ob die ausgewählten Kunststoffe sowohl den angewandten Reinigungs- und Sterilisationsverfahren als auch den mit ihnen in Kontakt kommenden Lebensmitteln widerstehen können. Gemäß der aktuellen Verordnung (EG) 1935/2004 muss für Produkte mit Lebensmittelkontakt sowieso der Migrationsgrenzwert bestimmt werden. Wir verweisen hier auf die weiter oben gemachten Aussagen zur Chemikalien- und Sterilisationsbeständigkeit sowie zu den entsprechenden rechtlichen Voraussetzungen.

Es wird deutlich, dass die Hochleistungskunststoffe gegenüber den meisten Lebensmitteln beständig sind. Es wird an dieser Stelle jedoch darauf hingewiesen, dass für bestimmte Lebensmittel spezifische Kontakteinschränkungen bestehen, die gesondert zu beachten sind. Insbesondere Tabak und Zigaretten dürfen nicht mit Fluorkunststoffen (PVDF, PTFE etc.) oder PTFE modifizierten Kunststoffen in Kontakt kommen, da bei der Verbrennung von geringen Mengen Fluorkunststoffen bereits toxische Gase entstehen können.

Lebensmittelarten	PTFE	PVDF	PSU	PPSU	PPS	PEEK	PEI
Essig	+	+	+	+	+	+	k.A.
Fruchtsäfte	+	+	+	+	+	+	+
Milch	+	+	+	+	+	+	+
Pflanzenöle	+	+	(+)	+	+	+	+
Tafelsalz	+	+	+	+	+	+	k.A.
Wein und Spirituosen	+	+	+	+	+	+	+

+: kompatibel; (+): unter bestimmten Bedingungen oder in bestimmten Typen kompatibel; -: nicht kompatibel; k.A. keine Angaben

Tab. 19 - Lebensmittelbeständigkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe

Bauteile für die Bio-, Pharma- und Medizintechnik

Kunststoffe werden standardmäßig in vielen Bereichen der Bio-, Pharma– und Medizintechnik eingesetzt. Im Allgemeinen sind die Anforderungen mit denen der Lebensmitteltechnik vergleichbar. Kunststoffe, die als lebensmittelkompatibel eingestuft sind, können folglich problemlos in vielen Anwendungen der Bio-, Pharma- und Medizintechnik eingesetzt werden.

Können die Kunststoffe allerdings direkt oder indirekt mit dem menschlichen Organismus in Kontakt kommen, so werden deutliche höhere Anforderungen formuliert! Die nationalen und internationalen Gesetzgeber wollen sichergestellt wissen, dass von den Materialien keine Gefährdung für den menschlichen Organismus ausgeht.

Insbesondere die bereits als lebensmittelkompatibel eingestuften Kunststoffe bieten gute Voraussetzungen, um die erhöhten Anforderungen im Kontakt mit dem menschlichen Organismus erfüllen zu können. Die relativ hohe Reinheit sowie die gute Beständigkeit gegen Sterilisations- und Reinigungsverfahren und die allgemein guten mechanischen Eigenschaften sind die Hauptvorteile der Kunststoffe in solchen Anwendungen. Aber auch die geringe Wärmeleitfähigkeit gilt als Vorteil, da Kunststoffe im Hautkontakt angenehmer empfunden werden als die „kalten“ metallischen oder keramischen Werkstoffe.

Vorteile der Kunststoffe allgemein:

l Lebensmittelkompatibilität
l Chemikalien- und Korrosionsbeständigkeit
l Wärmeleitfähigkeit

Hochleistungskunststoffe bieten nochmals Vorteile aufgrund ihrer deutlich höheren Temperaturbeständigkeit, ihrer teilweise größeren Festigkeit und ihrer höheren Reinheit. Insbesondere die Polyaryletherketone zeigen darüber hinaus ein Festigkeitsverhalten, das in bestimmten Bereichen mit dem der menschlichen Knochen vergleichbar ist. Daher wird vor allem PEEK häufig zur Herstellung von mechanisch belasteten Implantaten eingesetzt.

Besondere Vorteile der Hochleistungskunststoffe:

l Hohe spezifische Festigkeit
l Hervorragende Hydrolyse- und Chemikalienbeständigkeit
l Hohe Abriebfestigkeit

Materialien

Als Materialien kommen, wie bereits erwähnt, grundsätzlich alle als lebensmittelkompatibel eingestuften Hochleistungskunststoffe infrage. Nicht selten aber wird für den Einsatz – insbesondere in der Medizintechnik – ein Nachweis über die physiologische Unbedenklichkeit bzw. Biokompatibilität gefordert.

In Europa schreibt die Richtlinie 93/42/EWG den Mitgliedsstaaten verbindliche Regelungen für sogenannte Medizinprodukte vor. Diese Richtlinie definiert allgemeine Anforderungen an Medizinprodukte und deren Bestandteile sowie für deren Auslegung und Konstruktion. Die Überwachung dieser Anforderungen ist vom Gefährdungspotential des einzelnen Medizinproduktes abhängig.

Ähnlich den europäischen Regelungen teilt auch die amerikanische Food and Drug Administration (FDA) Medizinprodukte entsprechend ihrem Überwachungsaufwand in Klassen ein. Produkte der hohen Überwachungsklassen unterliegen gemäß CFR, Title 21 Part 820 besonderen Untersuchungen und Qualitätsanforderungen.

Neben diesen wichtigsten staatlichen Regelungen gibt es auch industrielle Normen und Standards. Sowohl die amerikanische United States Pharmacopeia (USP) als auch die International Organization for Standardization (ISO) als ein Zusammenschluss nationaler Normungsinstitute haben Standards für Medizinprodukte und deren Beurteilung mit Hinblick auf das Gefährdungspotential für den Menschen festgelegt.

Die USP hat unter anderem Testverfahren zur biologischen Beurteilung von Kunststoffen entwickelt. Nach diesen Testverfahren werden die Kunststoffe in Klassen (Class I bis VI) mit steigenden Anforderungen eingeteilt, die die Anwendbarkeit einschränken.

Biokompatibilitätstests[1]	POLYTRON PSU LSG	POLYTRON PPSU LSG	POLYTRON PEI LSG	TECHTRON® HPV LSG	KETRON® LSG	Victrec® PEEK Classix™
1. Systemische Toxizität[2] gem. ISO 10939-11 und USP 88	nicht toxisch	nicht toxisch	nicht toxisch	nicht toxisch	nicht toxisch	nicht toxisch
2. Intrakutane Reaktivität[2] gem. ISO 10939-10 und USP 88	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar
3. Implantationstest gem. USP 88 (7 Tage)	kein Befund	kein Befund	kein Befund	kein Befund	nicht getestet	kein Befund
USP Class Einstufung als Ergebnis aus den Tests 1 bis 3	*Class VI*	*Class VI*	*Class VI*	*Class VI*	*Class V*	*Class VI*
4. Sensibilisierung[3] gem. ISO 10939-10	kein Befund	kein Befund	kein Befund	kein Befund	nicht getestet	kein Befund
5. Zytotoxizität[4] gem. ISO 10939-5 und USP 87	nicht toxisch	nicht toxisch	nicht toxisch	nicht toxisch	nicht toxisch	nicht toxisch
6. Hämokompatibilität[5] gem. ISO 10939-4	nicht hämolytisch	nicht hämolytisch	nicht hämolytisch	nicht hämolytisch	nicht hämolytisch	nicht hämolytisch

Anmerkungen:

1) Die Untersuchungen wurden einzig zurVereinfachung der Produktauswahl durchgeführt. Die angegebenen Untersuchungsergebnisse spiegeln den Stand der Technik wieder, stellen aber keine zugesicherten und rechtlich verbindlichen Eigenschaften dar. Einzig der Endanwender kann die Eignung der Produkte für seine Anwendung prüfen und feststellen. Für die Anwendung, Verwendung, Verarbeitung oder den sonstigen Gebrauch der Produkte und der damit verbundenen Empfehlungen, Informationen sowie für die sich daraus ergebenden Folgen übernimmt die POLYTRON Kunststofftechnik keinerlei Haftung!
   Die Untersuchungen wurden an Probekörpern vorgenommen, die aus Rundstäben, Durchmesser 50mm hergestellt wurden.
2) Systemischer Injektionstest (121°C/1h, 72 h Exposition) mit Lösungen in a) 0,9% NaCl, b) 1:20 Ethanol und NaCl, c) pflanzlichem Öl und d) Polyethylen Glykol 400.
3) Magnusson & Klingman Maximization Method
4) Auswasch-Verfahren mit L929 Säugetier Zellkulturen in MEM-Extrakt von 37°C/24h. Die Inkubationszeit betrug 48h bei 37°C.
5) Indirekte in-vitro Hämolyse bei 121°C/1h in 0,9% NaCl – Lösung.

Tab. 20 - Physiologische Unbedenklichkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe

Nach der ISO 10993 werden Medizinprodukte in unterschiedliche Kategorien eingeteilt. Die Kategorisierung orientiert sich an der Art und Dauer des Kontakts mit dem menschlichen Organismus. Abhängig von Art und Dauer des Kontakts müssen die Medizinprodukte verschiedene Prüfverfahren durchlaufen bzw. bestehen. Einige Prüfverfahren der ISO 10993 entsprechen denen der USP.

Für den Einsatz in medizinischen Anwendungen mit den höchsten Gefährdungsstufen, z. B. als Implantat, invasives Produkt oder chirurgisches Besteck, muss letztlich die Übereinstimmung des Kunststoffs mit den entsprechenden Gesetzen und/oder Normierungen nachgewiesen werden. Bei diesen Anforderungen reicht eine einfache Kompatibilitätsbescheinigung nicht mehr aus. Vielmehr muss dokumentiert werden, dass der Kunststoff die entsprechenden Testverfahren durchlaufen und bestanden hat.

POLYTRON bietet Hochleistungskunststoffe an, die entsprechenden Biokompatibilitätstests unterzogen wurden und deren Übereinstimmung durch Prüfzertifikate nachgewiesen werden kann. Diese als Life Science Grades (LSG) bezeichneten Materialien bieten eine durchgängige Rückverfolgbarkeit bis hin zum einzelnen Rohstoffbatch.

Polytron PSU LSG – für thermisch mäßig belastete Bauteile und Instrumente
Polytron PPSU LSG – für medizinische Instrumente, die häufig sterilisiert werden
Polytron PEI LSG – für Bauteile und Instrumente mit hoher Festigkeit
Ketron® LSG (PEEK) – für hohe Festigkeit, auch mit Glas- oder Kohlenstofffasern
Victrex® PEEK™ Classix™ (PEEK) – kann bis zu 30 Tage in Kontakt mit dem menschlichen Körper verbleiben

Über diese LSG Qualitäten hinaus gibt es auf Anfrage Hochleistungskunststoffe für die Bio-, Pharma- und Medizintechnik in speziellen Farbeinstellungen (PPSU, PEEK) oder mit entsprechenden Kontrastmitteln, so dass die Kunststoffkomponenten auch bei Röntgendurchleuchtung sichtbar sind.

Konstruktionshinweise

Bei der Konstruktion von Bauteilen für die Bio-, Pharma- und Medizintechnik sind neben den besprochenen Zulassungsbeschränkungen und Kompatibilitätsanforderungen für das Material vor allem die allgemeinen Hinweise zur Konstruktion mit Kunststoffen zu berücksichtigen. Darüber hinaus weisen wir ausdrücklich darauf hin, dass die von uns gefertigten Bauteile und die dafür benötigten Materialien nicht für eine Verwendung als bzw. in oder an medizinischen oder zahnmedizinischen Implantaten geeignet sind!

Wichtig für den Einsatz von Bauteilen für die Bio-, Pharma- und Medizintechnik ist die Oberflächenbeschaffenheit. Raue Oberflächen ebenso wie Spalten, Ritze und Ähnliches sind sorgfältig zu vermeiden, um das Eindringen und Festsetzen von Schmutz oder Bioresten zu verhindern. In diesem Sinne sollten auch scharfkantige Ecken vermieden und durch genügend große Radien ersetzt werden.

In Bezug auf die Hygieneanforderungen muss darüber hinaus geprüft werden, ob die ausgewählten Kunststoffe sowohl den angewandten Reinigungs- und Sterilisationsverfahren als auch den mit ihnen in Kontakt kommenden Flüssigkeiten und Sekreten widerstehen können. Wir verweisen hier auf die weiter oben gemachten Aussagen zur Chemikalien- und Sterilisationsbeständigkeit.

Bauteile für die Luft- und Raumfahrttechnik

Der Einsatz von Kunstoffen in der Luftfahrtindustrie entspricht dem Stand der Technik. In einem modernen Verkehrsflugzeug ist man überall von Kunststoffen umgeben. Nicht zuletzt aus Gewichtsgründen sind Innenverkleidung, Ausstattung sowie Licht- oder Klimakonsolen wenigstens teilweise aus Kunststoff gefertigt. Selbst Strukturteile aus Composite-Kunststoffen (GFK, CFK) sind spätestens seit den neuesten Modellen von Airbus und Boeing einer breiten Öffentlichkeit bekannt.

Technische Kunststoffe übernehmen aber auch mechanische Funktionen in Flugzeugen! Insbesondere im Bereich der Flügelsteuerung und der Fahrwerkstechnik kommen immer häufiger mechanische Bauteile aus Kunststoffen zum Einsatz. Bauteile aus Kunststoff sind um ca. 50 % leichter als vergleichbare Teile aus Aluminium, verfügen aber je nach Type über eine ähnlich hohe spezifische Festigkeit. Darüber hinaus weisen Kunststoffbauteile im Gegensatz zu metallischen eine deutlich höhere Korrosionsbeständigkeit auf und zeigen in dynamischen Anwendungen ausgesprochen günstige Verschleißeigenschaften.

Für den Einsatz in der Raumfahrttechnik spricht die allgemein gute Beständigkeit der Hochleistungskunststoffe gegenüber allen möglichen Umgebungseinflüssen. Die hervorragenden Trockenlaufeigenschaften sind ein weiterer Grund für den Einsatz von Hochleistungskunststoffen in Satelliten oder anderen Raumfahrtanwendungen.

Vorteile der Kunststoffe allgemein:

- Niedriges Gewicht und hohe spezifische Festigkeit
- Hohe Chemikalien- und Korrosionsbeständigkeit
- Gute Trockenlaufeigenschaften

Die Anforderungen an Kunststoffe in den mechanischen Anwendungen der Luft- und Raumfahrtindustrie sind jedoch extrem hoch. Zunächst wird von den eingesetzten Materialien häufig eine hohe Temperaturbeständigkeit gefordert. Die Kunststoffbauteile müssen nicht nur funktionieren, wenn das Flugzeug stundenlang mit laufenden Triebwerken unter der Äquatorsonne gestanden hat und Temperaturen von gut 80 °C und mehr entstehen können, sondern auch bei bis

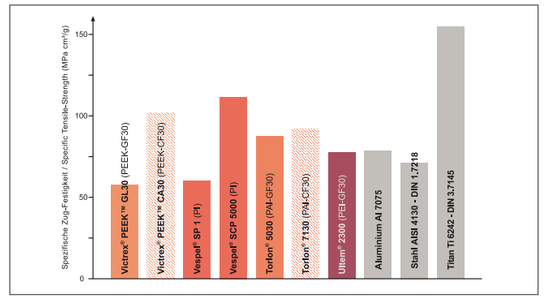


Abb. 68 - Spezifische Festigkeit verschiedener Luftfahrt-Werkstoffe

zu minus 80 °C in den Höhen, in denen sich Flugzeuge üblicherweise bewegen. Bei Anwendungen im Triebwerksbereich werden sogar noch deutlich höhere Anforderungen an die Temperaturbeständigkeit gestellt.

Darüber hinaus werden von den Kunststoffen bei diesen Temperaturen auch eine entsprechende mechanische Festigkeit und eine hohe Verschleißfestigkeit erwartet. Nicht zuletzt werden eine niedrige Brennbarkeit und im Brandfall eine geringe Rauchgasentwicklung vorausgesetzt (JAR/FAR 25.853).

Hochleistungskunststoffe erfüllen diese spezifischen Anforderungen in besonderem Maße und werden daher immer häufiger als Material für mechanische Bauteile in der Luft- und Raumfahrtindustrie verwandt.

Besondere Vorteile der Hochleistungskunststoffe:

- Weiter Temperatureinsatzbereich
- Hohe Festigkeit, auch bei erhöhten Temperaturen
- Niedrige Brennbarkeit und geringe Rauchgasentwicklung im Brandfall

Materialien

Als Materialien für den Einsatz in der Luft- und Raumfahrttechnik kommen grundsätzlich alle Kunststoffe in Frage. Hochleistungskunststoffe empfehlen sich insbesondere für die sowohl mechanisch als auch thermisch höher belasteten Anwendungen. Dabei spielt es vielfach eine große Rolle, ob die einzelnen Materialien auch von den Anwendern, sprich von der Luftfahrzeugindustrie, für die entsprechende Anwendung freigegeben worden sind.

Eine Materialfreigabe kann aber letztlich nur durch die zur Entwicklung und Konstruktion von Luftfahrttechnik berechtigten Unternehmen erfolgen. Häufig müssen der Nutzung umfangreiche Tests vorausgehen, um die Tauglichkeit des entsprechenden Kunststoffs in der Anwendung nachweisen zu können. Auf dieser Basis haben die Hersteller und Systemlieferanten der Luft- und Raumfahrtindustrie teilweise zusammen mit den nationalen und internationalen Normungsinstituten Werkstoffnormen und Standards entwickelt. Nachfolgend sind einige Normen und Standards für Hochleistungskunststoffe aufgeführt.

Polytetrafluorethylen (PTFE) – **Polytron PTFE**

- DIN 65374 - Halbzeug und Formteile aus PTFE; Technische Lieferbedingungen
- LN 9298 - Tafeln aus PTFE; Maße, Massen
- LN 9394 - Hohlstäbe aus PTFE; Maße, Massen
- LN 9395 - Rohre aus PTFE; Maße, Massen
- LN 9406 - Rundstäbe aus PTFE; Maße, Massen
- SAE AMS 3656 bis 3662 - Polytetrafluoroethylene (PTFE)
- SAE AMS 3666 bis 3669 - Polytetrafluoroethylene (PTFE)
- SAE AMS 3678 - Filled Virgin Polytetrafluoroethylene (PTFE) Moldings or Extrusions
- SAE AMS 3756 - Moldings, Glass Fiber Filled PTFE, 75 PTFE, 25 Glass, As Sintered
- WL 5.11 - Polytetrafluorethylen (PTFE); Allgemeine Hinweise
- WL 5.1129 - Polytetrafluorethylen (PTFE)

Polyetheretherketon (PEEK) – **Victrex® PEEK™**

- 75-T-2-3007-4-1 – Airbus; PEEK Materialnorm
- BMS 8-317A – Boeing; PEEK ungefüllt, glass- und kohlefaserverstärkt
- MBBN6030 – Stäbe aus Polyetheretherketon
- MIL-P-46183 – Plastic Molding and Extrusion Material, PEEK

Polyamidimid (PAI) – **Torlon®**

- ASTM D 5204 - Standard Classification System for PAI Molding and Extrusion Materials
- ASTM D 7292 - Extruded, Compression-Molded, and Injection-Molded PAI Shapes
- MIL-P-46179 - Plastic Molding and Extrusion Material, PAI
- SAE AMS 3670 - Polyamide-Imide Bar, Rod, and Shapes

Polyetherimid (PEI) – **Ultem®**

- DIN 65498 - Halbzeug und Formteile aus PEI; Technische Lieferbedingungen
- ASTM D 5205 - Standard Classification System for PEI Materials
- ASTM D 7293 - Standard Test Method for Extruded and Compression-Molded Shapes PEI

Polyimid (PI) – **Vespel®**

- ASTM 6456 - Standard Specification for Finished Parts Made from Polyimide Resin
- SAE AMS 3644G - Polyimide, Molded Rod, Bar, and Tube, Plaque, and formed Parts
- SAE AMS-P-46112 - Plastic Sheet and Strip, Polyimide

Es ist immer im Einzelfall zu prüfen, ob das geforderte Material den gestellten Anforderungen entspricht. Lieferungen mit entsprechenden Materialzertifikaten sind in diesem Bereich die Regel. Die nachfolgend aufgeführten Hochleistungskunststoffe erfüllen die meisten Anforderungen und haben sich bereits in vielen Luft- und Raumfahrtanwendungen bewährt.

Polytron PTFE – für Dichtungs- und Isolationsanwendungen
Polytron PVDF – für Flüssigkeitsanwendungen

Ultem® 1000 (PEI) – für Isolationsanwendungen
Ultem® 2300 (PEI GF30)– für mechanisch höher belastete Isolationsanwendungen

Victrex® PEEK™ - für allgemeine Anwendungen, hohe Materialreinheit
Victrex® PEEK™ GL30 (PEEK GF30) – für mechanisch höher belastete Strukturbauteile
Victrex® PEEK™ CA30 (PEEK CF30) – für mechanisch stark belastete Bauteile
Victrex® PEEK™ FC30 (PEEK mod.) – für tribologische Anwendungen

Torlon® 4203 (PAI) – für mechanisch und thermisch belastete Bauelemente
Torlon® 4301 (PAI GR12) – für tribologische Anwendungen
Torlon® 5030 (PAI GF30) – für thermisch und mechanisch höher belastete Strukturbauteile
Torlon® 7130 (PAI CF30) – für thermisch und mechanisch stark belastete Bauteile

Vespel® SP 1 (PI) – für Hochtemperaturanwendungen, hohe Materialreinheit
Vespel® SP 21 (PI GR15) – für tribologische Anwendungen
Vespel® SCP 5000 (PI) – für nochmals höher belastete Hochtemperaturanwendungen
Vespel® SCP 5050 (PI GR) – für Hochtemperaturanwendungen mit geringer Ausdehnung

Konstruktionshinweise

Bei der Konstruktion von Bauteilen für die Luft- und Raumfahrttechnik sind neben den besprochenen Anforderungen an das Material vor allem die allgemeinen Hinweise zur Konstruktion mit Kunststoffen zu berücksichtigen.

Darüber hinaus müssen die thermischen Belastungen betrachtet werden. Neben der reinen Temperaturbeständigkeit hat vor allem die thermische Ausdehnung eine Bedeutung bei der Konstruktion von Bauteilen für die Luft- und Raumfahrt. Dabei spielen häufig nicht nur besonders hohe sondern auch entsprechende Tiefsttemperaturen eine wichtige Rolle. Nur wenige Kunststoffe vertragen Temperaturen unterhalb von minus vierzig Grad Celsius. Die meisten Polymere verspröden stark bei kryogenen Bedingungen.

Weiterhin sollte bei Bauteilen für die Luft- und Raumfahrtindustrie unbedingt auf das Brandverhalten und die Beständigkeit gegen die üblicherweise verwendeten Flüssigkeiten (Hydraulikflüssigkeit, Turbinenöl) geachtet werden. Insbesondere bei den Brandeigenschaften machen die entsprechenden Behörden strenge Vorgaben.

Für Raumfahrtanwendungen spielen auch Ausgasungsverhalten und die Materialreinheit (Ionenkontamination) eine nicht unwichtige Rolle, da die Bauteile häufig im Vakuum eingesetzt werden und dabei empfindliche Messinstrumente nicht beeinträchtigen dürfen.

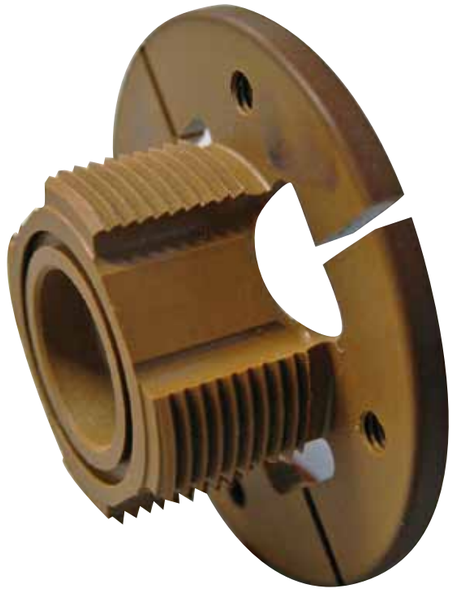
Bauteile für die Halbleiter-, Solar- und Elektroindustrie

Bei der Herstellung von Solarmodulen, Halbleitern und anderen elektronischen Bauteilen kommen immer häufiger Kunststoffe zum Einsatz. Insbesondere beim Handling der meist empfindlichen Elemente haben Kunststoffe aufgrund ihrer Zähigkeit, ihrer Verschleißfestigkeit und ihrer chemischen Beständigkeit deutliche Vorteile gegenüber metallischen und auch keramischen Werkstoffen.

Hinzu kommen die allgemein guten Isolations- und dielektrischen Eigenschaften. Beim Einsatz von Kunststoffen besteht zwar dadurch grundsätzlich die Gefahr der elektrostatischen Aufladung, aber die Materialien können durch entsprechende Zusätze eine definierte elektrostatische Ableitfähigkeit (ESD) erhalten. Somit kann die Gefahr von elektrostatischer Entladung nicht nur bei der Fertigung von empfindlichen elektronischen Bauteilen sondern auch in anderen, z. B. explosionsgefährdeten Bereichen drastisch gemindert werden.

Vorteile der Kunststoffe allgemein:

l Hohe Zähigkeit und spezifische Festigkeit
l Hohe Chemikalien- und Korrosionsbeständigkeit
l Elektrostatisch ableitende Einstellungen möglich



Hochleistungskunststoffe bringen über die bereits beschriebenen Eigenschaften hinaus weitere Vorteile mit ein. Vor allem die Prozesse der Silizium-Bearbeitung bzw. Wafer-Herstellung fordern eine extreme Chemikalienbeständigkeit verbunden mit hohen Anforderungen an die Materialreinheit, die Verschleißfestigkeit und die Maßstabilität. Die Hochleistungskunststoffe sind hier den meisten anderen Werkstoffen überlegen. Sie sind hoch rein, gasen im Vakuum kaum aus, haben nur eine geringe Kontamination mit Fremdstoffionen und zeigen eine hohe Plasmaresistenz. Wie alle anderen Kunststoffe können auch die Hochleistungskunststoffe mit einer elektrostatischen Ableitfähigkeit (ESD) versehen werden.

Besondere Vorteile der Hochleistungskunststoffe:

l Hohe Materialreinheit mit geringer Ionenkontamination
l Hohe Plasmabeständigkeit
l Hohe Maßstabilität

Vor allem bei den Prozessschritten der Silizium-Bearbeitung, beim Schneiden und Polieren, bei den Beschichtungs- und Ätzprozessen sowie beim Handling und bei den Mess-, Prüf- und Verpackungsprozessen werden die Hochleistungskunststoffe eingesetzt.

Materialien

Grundsätzlich können alle Kunststoffe bei der Herstellung von Solarmodulen, Halbleitern und anderen elektronischen Bauteilen eingesetzt werden. Allerdings stellen die guten elektrischen Isolationseigenschaften der Kunststoffe oft ein Problem dar, da es in der Anwendung zu elektrostatischer Aufladung und dadurch zu Potentialentladungen kommen kann.

Kunststoffe sind im Allgemeinen elektrische Isolatoren mit einem Oberflächenwiderstand von mehr als 1012 Ohm. Sie können aber durch die Zugabe bestimmter Füllstoffe elektrisch leit- (AST) bzw. ableitfähig (ESD) gemacht werden. Die Auswahl dieser Substanzen muss jedoch sorgfältig erfolgen, da anwendungsbedingter Abrieb gegebenenfalls zur Kontamination des Fertigungsprozesses bzw. der elektronischen Komponenten führen kann.

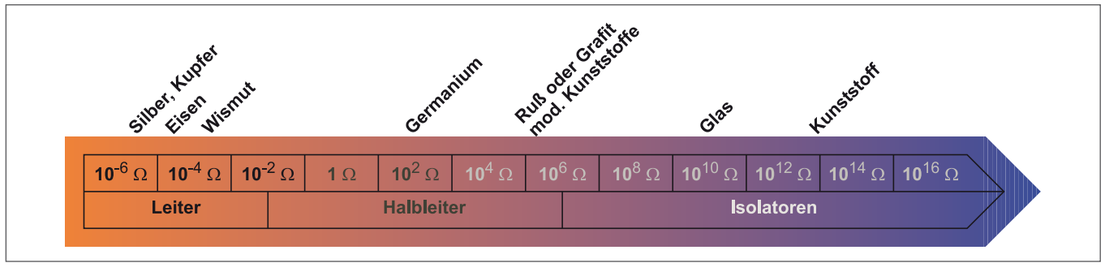


Abb. 69 - Elektrischer Widerstand verschiedener Werkstoffe

Üblicherweise wird Kohlenstoff in Form von Russ oder Graphit verwendet, um Kunststoffen antistatische Eigenschaften (AST) zu verleihen. Der Abrieb dieser mit Kohlenstoff modifizierten Materialien ist dadurch leitend und wirkt gegebenenfalls Prozess kontaminierend.

Durch den Zusatz von Kohlenstofffasern lässt sich ebenfalls eine Leitfähigkeit (AST) erzeugen. Kohlenstofffasern erhöhen nicht nur die Leitfähigkeit sondern auch die Materialfestigkeit. Da sie üblicherweise fest in das Material eingebettet sind, ist ihre Kontaminationswirkung geringer als bei Russ oder Grafit. Dennoch besteht eine grundsätzliche Kontaminationsgefahr.

Polytron PTFE C25 – Polytetrafluorethylen mit 25 % Kohlenstoff
Victrex® PEEK™ CA30 – Polyetheretherketon mit 30 % Kohlenstofffasern
Victrex® PEEK™ FC30 – Polyetheretherketon mit je 10 % CF, GR und TF
Victrex® PEEK™ CNT – Polyetheretherketon mit Carbon Nanotubes
Torlon® 7130 – Polyamidimid mit 30 % Kohlenstofffasern

Durch den Zusatz leitfähiger Mikrofasern, hydrophiler Polymere oder anderer inhärent leitfähiger Stoffe lassen sich permanent statisch ableitende Eigenschaften (ESD) erzeugen, die eine deutlich geringere Kontaminationsgefahr darstellen. Diese Zusätze sind darüber hinaus deutlich abriebfester und folglich für Einsätze in der Elektroindustrie oder der Halbleiterfertigung zu bevorzugen. POLYTRON hat eine Serie von Hochleistungskunststoffen, die entsprechend modifiziert sind und sich daher besonders für den Einsatz zur Untersuchung bzw. zum Test von Halbleitern und anderen elektronischen Bauteilen eignen.

Semitron® ESD 410 – Polyetherimid (PEI) elektrostatisch ableitend
Semitron® ESD 480 – Polyetheretherketon (PEEK) elektrostatisch ableitend
Semitron® ESD 500 – Polytetrafluorethylen (PTFE) elektrostatisch ableitend
Semitron® ESD 520 – Polyamidimid (PAI) elektrostatisch ableitend

Bezeichnung	Durchgangs-widerstand (Ω x cm)	Oberflächen-widerstand (Ω)
elektrostatisch ableitende (ESD) Kunststoffe		
Semitron® ESD 410	10^4 - 10^6	10^4 - 10^6
Semitron® ESD 480	-	10^6 - 10^9
Semitron® ESD 500	10^{10} - 10^{12}	10^{10} - 10^{12}
Semitron® ESD 520	10^{10} - 10^{12}	10^{10} - 10^{12}
elektrisch isolierende Kunststoffe		
Techtron® 1000 (PPS)	>10^{14}	>10^{13}
Victrex® PEEK™ GL30	>10^{14}	>10^{13}
Ultem® 2300 (PEI-GF30)	>10^{15}	10^{15}
Torlon® 4203 (PAI)	>10^{14}	>10^{13}
Torlon® 5030 (PAI-GF30)	>10^{17}	10^{18}
Vespel® SP 1 (PI)	10^{16}	10^{15}
Vespel® SCP 5000 (PI)	10^{15}	10^{15}

Tab. 21 - Elektrischer Widerstand verschiedener Hochleistungskunststoffe

Die Materialien Semitron® ESD 500 und 520 zeichnen sich darüber hinaus noch durch eine besonders stabile Durchschlagfestigkeit auch bei hohen Spannungen aus. Während vor allem durch Kohlenstoff ableitfähige Kunststoffe beim Anlegen höherer Spannungen (bis 1000 V) schnell eine höhere Leitfähigkeit erreichen, bleibt der Oberflächenwiderstand der so genannten „High Resistivity“ Materialien Semitron® ESD 500 und 520 mehr oder weniger konstant erhalten.

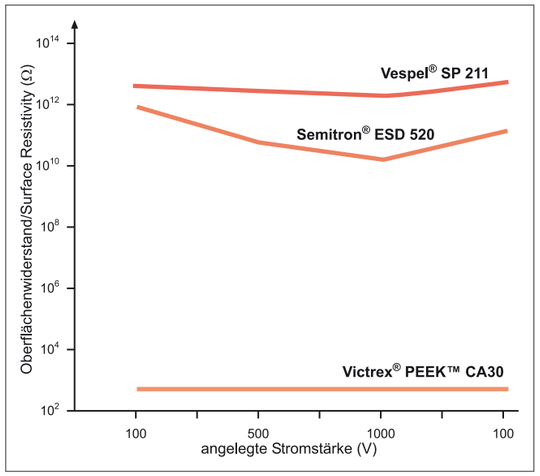


Abb. 70 - Oberflächenwiderstand verschiedener Hochleistungskunststoffe

Konstruktionshinweise

Bei der Konstruktion von Bauteilen für Halbleiter-, Solar- und Elektroindustrie ist zunächst auf die ausführlich beschriebene Isolations- bzw. Ableitfähigkeit der Kunststoffe zu achten, um einerseits elektrostatische Entladungen, andererseits Kontaminationen durch elektrisch leitenden Abrieb zu vermeiden. Kontaminationen können aber auch durch eine ionische Verunreinigung der Materialien entstehen. Insofern ist sowohl das Ausgasungsverhalten als auch die Materialreinheit ein zusätzliches Auswahlkriterium.

Darüber hinaus ist die Maßstabilität der Materialien, vor allem unter Temperatureinfluss, ein weiteres wichtiges Konstruktionskriterium. Insbesondere im Bereich des so genannten „Back End Testing“, also bei den Funktionstests an elektronischen Bauteilen und Halbleitern, werden Kunststoffe mit geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten für Halter, Aufnahmen oder Testsockel benötigt. Maßänderungen durch Temperatureinfluss können die Messergebnisse signifikant beeinflussen.
Hier kommen häufig die sehr maßstabilen Hochleistungskunststoffe auf Basis von Torlon® oder Vespel® zum Einsatz. Bei der Herstellung von Bauteilen für diesen speziellen Anwendungsbereich ist neben dem Ausdehnungskoeffizienten auch auf Maßänderungen durch das Freisetzen innerer Spannungen zu achten. Bauteile aus gepressten Halbzeugen bieten hier Vorteile.

Weiter werden Bauteile in den Prozessen der Halbleiter-, Solar- und Elektroindustrie häufig sehr aggressiven Umgebungen ausgesetzt. Sowohl beim chemischen Polieren (CMP) als auch beim Plasmaätzen der Silizium-Scheiben werden besonders korrosionsbeständige und verschleißfeste Materialien benötigt. Aufgrund der hervorragenden Chemikalienbeständigkeit werden für diese Prozesse Materialien wie Techtron® 1000 und Victrex® PEEK™ eingesetzt. Fluorkunststoffe scheiden trotz ihrer hohen Korrosionsbeständigkeit meist aufgrund ihrer geringen mechanischen Festigkeit aus.

Anwendungen in der Halbleiter-, Solar- und Elektroindustrie		Semitron® ESD 410	Semitron® ESD 480	Semitron® ESD 500	Semitron® ESD 520	Ultem® 2300	Techtron® 1000	Victrex® PEEK™	Victrex® PEEK™ CM	Torlon® 4203	Torlon® 5030	Vespel® SP 1	Vespel® SCP 5000
Wafer-Handling	Flat- und Notch-Finder						X	X					
	Schrauben und Abdeckungen							X				X	
	Vakuumpinzetten						X	X		X		X	X
	Vakuumgreifer							X		X		X	X
	Vakuumhalter	X				X		X				X	X
	Waferhalter							X				X	X
	Waferkämme	X		X				X					
	Waferkörbe							X			X	X	X
CMP	Retainer-Ringe						X	X					
Plasmaätzen	Clamp-Ringe											X	X
	Focus-Ringe											X	X
Test Equipment	Halter für Kontaktstifte		X		X				X		X	X	X
	Isolatoren			X		X				X		X	X
	Kontaktsockel		X		X				X		X		
	Kontaktstecker		X		X				X	X			
	Testsockel	X			X	X			X		X		

Tab. 22 - Anwendungen verschiedener Hochleistungskunststoffe bei der Waferbearbeitung

Abbildungen

Abb. 1 - Druckfestigkeit verschiedener PTFE-Typen ... 06
Abb. 2 - Zug-Elastizitätsmodul verschiedener Fluorkunststoffe ... 07
Abb. 3 - Wärmeformbeständigkeit der Polysulfone und -sulfide ... 08
Abb. 4 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Polysulfone ... 08
Abb. 5 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm Techtron® GF40 ... 09
Abb. 6 - Zug-Eigenschaften verschiedener PPS-Typen ... 09
Abb. 7 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Victrex®-Typen ... 11
Abb. 8 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Ultem®-Typen ... 12
Abb. 9 - Wärmeformbeständigkeit der Polyimide ... 13
Abb. 10 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Torlon®-Typen ... 14
Abb. 11 - Zug-Eigenschaften verschiedener Torlon®-Typen ... 15
Abb. 12 - Elastizitätsmoduln der Vespel® S Typen ... 16
Abb. 13 - Zug-Eigenschaften verschiedener Vespel® Typen ... 17
Abb. 14 - Anisotropie glasfaserverstärkter Kunststoffe ... 18
Abb. 15 - Spannungs-/Dehnungsdiagramm verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 19
Abb. 16 - Zug-Eigenschaften verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 19
Abb. 17 - Zug-Eigenschaften verschiedener verstärkter Hochleistungskunststoffe ... 20
Abb. 18 - Zug-Modul verschiedener Hochleistungskunststoffe unter Temperatur ... 20
Abb. 19 - Zug-Modul verschiedener Hochleistungskunststoffe bei 150° und 200° C ... 20
Abb. 20 - Biege-Eigenschaften verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 21
Abb. 21 - Druckfestigkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 21
Abb. 22 - Druckfestigkeit verschiedener verstärkter Hochleistungskunststoffe ... 22
Abb. 23 - Zeitstand-Zugfestigkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 22
Abb. 24 - Zeitstand-Zugfestigkeit verschiedener verstärkter Hochleistungskunststoffe ... 22
Abb. 25 - Charpy-Kerbschlagzähigkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 23
Abb. 26 - Charpy Kerbschlagzähigkeit verstärkter Hochleistungskunststoffe ... 23
Abb. 27 - Kugeldruckhärte verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 24
Abb. 28 - Kugeldruckhärte verschiedener verstärkter Hochleistungskunststoffe ... 24
Abb. 29 - Duroplaste unter Temperatureinfluss ... 25
Abb. 30 - Amorphe Thermoplaste unter Temperatureinfluss ... 25
Abb. 31 - Teil-Kristalline Thermoplaste unter Temperatureinfluss ... 25
Abb. 32 - Schmelz- und Einsatztemperaturen verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 26
Abb. 33 - Minimale Einsatztemperatur verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 26
Abb. 34 - Wärmeformbeständigkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 27
Abb. 35 - Wärmeformbeständigkeit verschiedener verstärkter Hochleistungskunststoffe ... 27
Abb. 36 - Wärmeleitfähigkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 27
Abb. 37 - Wärmeleitfähigkeit verschiedener verstärkter Hochleistungskunststoffe ... 27
Abb. 38 - Ausdehnungskoeffizienten verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 28
Abb. 39 - Ausdehnungskoeffizienten verschiedener verstärkter Hochleistungskunststoffe ... 28
Abb. 40 - Ausdehnungskoeffizienten unter Temperatureinfluss ... 28
Abb. 41 - Brandklasse und Sauerstoffindex verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 29
Abb. 42 - Rauchgasdichte verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 29
Abb. 43 - Brennbarkeit verschiedener Kunststoffe ... 30
Abb. 44 - Durchgangswiderstand von PEEK und PI ... 31
Abb. 45 - schematische Darstellung eines Gleitvorgangs ... 33
Abb. 46 - Dynamischer Reibungskoeffizient verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 33
Abb. 47 - Verschleiß im Trockenlauf verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 33
Abb. 48 - Dynamischer Reibungskoeffizient modifizierter Hochleistungskunststoffe ... 34
Abb. 49 - Verschleiß im Trockenlauf modifizierter Hochleistungskunststoffe ... 34

Abbildungen

Abb. 50 - Nutzbarer pH-Einsatzbereich von PTFE, PPS und PEEK ... 35
Abb. 51 - Wasseraufnahme verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 37
Abb. 52 - Strahlungsindex verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 40
Abb. 53 - Verschleiß von Torlon® in Abhängigkeit der Wärmebehandlungsdauer ... 51
Abb. 54 - Zugdehnung von Torlon® in Abhängigkeit der Wärmebehandlungsdauer ... 51
Abb. 55 - Typische Arten von Gleitlagern ... 52
Abb. 56 - Lager-Grenzbelastung verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 54
Abb. 57 - Lager-Grenzbelstung modifizierter Hochleistungskunststoffe ... 54
Abb. 58 - Typischer Verschleißverlauf von Kunststofflagern ... 54
Abb. 59 - Typische Arten von Dichtring-Schlössern ... 56
Abb. 60 - Schematische Darstellung eines Dichtrings ... 56
Abb. 61 - Typische Arten von Labyrinthdichtungen ... 58
Abb. 62 - Druckfestigkeit verschiedener, modifizierter Hochleistungskunststoffe ... 58
Abb. 63 - Schematische Darstellung eines Faltenbalgs ... 58
Abb. 64 - Einsatzbereiche für Dichtungen aus Hochleistungskunststoffen ... 59
Abb. 65 - Schematische Darstellung einer eingefassten Dichtung ... 59
Abb. 66 - Schlagzähigkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 60
Abb. 67 - Typische Arten von Rollen und Rädern ... 61
Abb. 68 - Spezifische Festigkeit verschiedener Luftfahrt-Werkstoffe ... 69
Abb. 69 - Elektrischer Widerstand verschiedener Werkstoffe ... 73
Abb. 70 - Oberflächenwiderstand verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 74

Tabellen

Tab. 1 - Übersicht der verschiedenen PTFE-Füllstoffe ... 05
Tab. 2 - Thermische Eigenschaften der Polyaryletherketone ... 10
Tab. 3 - Prüfkriterien nach UL94 ... 29
Tab. 4 - Elektrischer Widerstand verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 31
Tab. 5 - Dielektrische Eigenschaften verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 32
Tab. 6 - Chemikalienbeständigkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 35
Tab. 7 - Verklebbarkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 36
Tab. 8 - Ölbeständigkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 37
Tab. 9 - Eigenschaftsveränderung von PAI durch Wasseraufnahme ... 38
Tab. 10 - Sterilisationsbeständigkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 39
Tab. 11 - Einfluss der Dampfsterilisation auf verschiedene Hochleistungskunststoffe ... 39
Tab. 12 - Witterungs- und Strahlenbeständigkeit der Hochleistungskunststoffe ... 40
Tab. 13 - Ausgasungsverhalten verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 41
Tab. 14 - Inonenkontamination verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 41
Tab. 15 - Verarbeitungsverfahren für verschiedene Hochleistungskunststoffe ... 45
Tab. 16 - Halbzeug-Abmessungen verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 45
Tab. 17 - Lager-Grenzbelastungen verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 55
Tab. 18 - Lebensmittelkompatibilität verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 64
Tab. 19 - Lebensmittelbeständigkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 65
Tab. 20 - Physiologische Unbedenklichkeit verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 67
Tab. 21 - Elektrischer Widerstand verschiedener Hochleistungskunststoffe ... 73
Tab. 22 - Anwendungen verschiedener Hochleistungskunststoffe bei der Waferbearbeitung ... 74

Literaturhinweise

Bei der Erstellung dieser Broschüre wurde unter anderem auf die nachfolgend aufgeführte Literatur zurückgegriffen. Der Hinweis auf diese Informationsquellen soll dem geneigten Leser eine intensivere Auseinandersetzung mit dem Thema Hochleistungskunststoffe ermöglichen.

BASF: Technische Kunststoffe – Brandschutztechnische Aspekte, neueste Ausgabe

Baur, Brinkmann, Osswald, Schmachtenberg: Saechtling Kunststoff Taschenbuch, 30. Ausgabe, Hanser Verlag, August 2007

Becker, Braun: Kunststoffhandbuch 3/3 – Hochleistungskunststoffe, Hanser Verlag, 1994

Braun, Dietrich: Kunststofftechnik für Einsteiger, Hanser Verlag, 2003

Campbell, William A. Jr., und John J. Scialdone, „Outgassing Data for Selecting Spacecraft Materials," NASA Reference Publication 1124, Revision 3, November 1990

Carlowitz, Bodo: Tabellarische Übersicht über die Prüfung von Kunststoffen, 6. Auflage, Giesel Verlag, Januar 1992

DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: diverse Normen wie angegeben, aktuelle Auflage, Berlin

DSM Engineering Plastic Products: Tables and Graphs for Bearings, Tielt, Februar 2000

DSM Engineering Plastic Products: Tables and Graphs for Rollers, Tielt, Februar 2000

DSM Engineering Plastic Products: Hinweise zum Verkleben von Kunststoffen, Bergisch Gladbach 1998

DSM Engineering Plastic Products: Advanced Engineering Plastic Solutions for the Semiconductor Industry, Lyon, April 1997

DSM Engineering Plastic Products, Polymer: Turbo-Compressor Seals, Reading, PA, 1998

Du Pont de Nemours: Vespel® S Line Konstruktionshandbuch, Februar 2006

Du Pont de Nemours: DuPont™ Vespel® SCP, K-21998-2, Februar 2010

Dyneon LLC: Dyneon™ Polytetrafluorethylene – Product Comparison Guide, März 2003

Dyneon LLC: Dyneon™ TFM™ PTFE – Improved Performance and Design Flexibility, 11/2002

ESA European Space Agency: General Requirements for for Outgassing, keine Zeitangabe

Hellerich, Harsch, Haenle: Werkstoff-Führer Kunststoffe, 9. Auflage, Hanser Verlag, 2004

Hoechst AG: Hostaflon®, Juli 1984

International Association of Plastic Distribution – IAPD: Introduction to Plastics, 11th Edition, 2011

Loctite: Klebetechnik, Programmauswahl für Industrie, Werkstatt und Reparatur, Ausgabe 2, Henkel KGaA, 2007

Moeller, Elvira (Hrsg.): Handbuch Konstruktionswerkstoffe, Hanser Verlag, 2008

Polypenco Kunststofftechnik GmbH: Informationen für die Verwendung von Kunststoffen bei Kontakt mit Chemikalien, Bergisch Gladbach, 1996

Polypenco Kunststofftechnik GmbH: Konstruktionshinweise, Bergisch Gladbach, August 1994

Polytron Kunststofftechnik GmbH & Co. KG: Ingenieurlösungen mit technischen Kunststoffen, Bergisch Gladbach, Februar 2003

Sabic Innovative Plastics: Ultem® and Siltem® Resins – Products and Markets Guide, 2008

Santer, Erich e.a.: Reibung und Verschleiß von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen, Expert Verlag, 2004

Anwendungen mit Hochleistungskunststoffen

Literaturhinweise

Solvay Advanced Polymers, LLC: Torlon® Polyamide-Imide, Design Guide, Version 2.1, 2003

Solvay Advanced Polymers, LLC: Torlon® Polyamide-Imide, Molding Guide, Version 1.2, 2003

Solvay Advanced Polymers, LLC: Udel® Polysulfon, Technisches Handbuch, August 2004

Solvay Advanced Polymers, LLC: Radel®, Technisches Handbuch, Dezember 2004

Solvay S.A.: Solef® Polyvinylidenfluorid von Solvay, Technisches Handbuch, August 1999

Ticona GmbH: Fortron® Polyphenylensulfid (PPS), Werkstoffbroschüre, August 2008

Underwood; Geoffrey S.: Wear Performance of Ultra-Performance Engineering Polymers at high PVs, SAE Technical Paper Series, März 2002

U.S. Department of Transportation, FAA Federal Aviation Administration: Thermal Analysis of Polymer Flammability, Washington, DC, April 2007

VDI Verein deutscher Ingenieure: Kunststoffe in der Medizintechnik, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 2004

Victrex plc: Victrex® Polymere und ihre Materialeigenschaften, November 2010

Victrex plc: Victrex® For Lightweight Aerospace Components, neueste Ausgabe

Victrex plc: Victrex® PEEK™ Polymer – Chemikalienbeständigkeit, neueste Ausgabe

Celazole® ist ein eingetragenes Warenzeichen der PBI Performance Products, Inc.

Ultem® ist ein eingetragenes Warenzeichen der SABIC Innovative Plastics IP BV

Ferrotron® und Fluxtrol® sind eingetragene Warenzeichen der Fluxtrol Inc.

Das DuPont Oval Logo, DuPont™, Vespel® und Teflon® sind eingetragene Marken von E.I. du Pont de Nemours and Company oder einer ihrer Tochtergesellschaften

Victrex® ist ein eingetragenes Warenzeichen und PEEK™ ein Warenzeichen der Victrex, plc.

Radel® und Torlon® sind eingetragene Warenzeichen der SOLVAY Advanced Polymers, L.L.C.

Duraspin®, Fluorosint®, Ketron®, Semitron®, Techtron® sind eingetragene Warenzeichen der Quadrant AG

DISCLAIMER

Alle von der oder im Namen der POLYTRON Kunststofftechnik abgegebenen Empfehlungen, Informationen und Daten können als zuverlässig betrachtet werden. Für die Anwendung, Verwendung, Verarbeitung oder den sonstigen Gebrauch der Produkte und der damit verbundenen Empfehlungen, Informationen sowie für die sich daraus ergebenden Folgen übernimmt die POLYTRON Kunststofftechnik keinerlei Haftung. Die von der POLYTRON Kunststofftechnik angebotenen Kunststoffe sind nicht für eine Verwendung in bzw. an medizinischen oder zahnmedizinischen Implantaten geeignet!

Der Anwender und Käufer ist verpflichtet Qualität und Eigenschaften der Empfehlungen, Informationen und Daten sowie der Produkte selbstständig zu kontrollieren. Er übernimmt die volle Verantwortung für die Anwendung, Verwendung und Verarbeitung oder den sonstigen Gebrauch der Produkte sowie der sich daraus ergebenden Folgen.

Die POLYTRON Kunststofftechnik übernimmt keinerlei Haftung für irgendwelche Verletzungen von im Besitz oder unter Verwaltung Dritter befindlicher Patent-, Urheber- oder sonstiger Rechte durch Anwendung, Verwendung, Verarbeitung oder sonstigen Gebrauch ihrer Empfehlungen, Informationen, Daten oder Produkte.

POLYTRON KUNSTSTOFFTECHNIK GmbH & CO KG

An der Zinkhütte 17 • 51469 Bergisch Gladbach

Phone: +49 (0) 22 02–10 09-0
Fax: +49 (0) 22 02–10 09-33

E-Mail: info@polytron-gmbh.de
Internet: www.polytron-gmbh.de

Copyright 2011 POLYTRON Kunststofftechnik GmbH & Co. KG - Alle Rechte vorbehalten!
Nachdruck und Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung
der POLYTRON Kunststofftechnik GmbH & Co. KG!

AIDA 99900001 - 10/11

Konzept & Realisation: ZILLGEN MEDIEN GmbH · www.zillgen-gruppe.de