

V E S P E L[®]

S

L I N E

KONSTRUKTIONS HANDBUCH



DuPont[™] Vespel[®]
forward engineering



The miracles of science[™]

VESPEL® Konstruktionshandbuch

Inhalt

	Seite		Seite
Einleitung	3	Buchsen und Gleitlager	33
Allgemeines	3	VESPEL® im Vergleich zu anderen Materialien	33
Chemische Zusammensetzung	3	Auswahl eines Lagerwerkstoffes	33
Fertigungsverfahren	3	Konstruktion von Gleitlagern aus VESPEL®	35
Richtungsabhängige Eigenschaften	3	Schmierung und andere Faktoren bei der Lagerkonstruktion	37
Erstellung aussagekräftiger Spezifikationen	4	Berechnungsbeispiel	39
Qualität.....	4	Geschmierte Gleitlager.....	40
Materialtypen und Eigenschaften	5	Dichtungsringe	43
Anleitung zur Materialauswahl	5	Warum Polyimide?.....	43
Physikalische Eigenschaften	6	Konstruktionsparameter	43
Einfluß der Temperatur	11	Standardkonstruktion direktgeformter Dichtungsringe mit Geradstoß	43
Hochschlagzähes ST	12	Weitere Gestaltungsrichtlinien	44
Spannungs-Dehnungsdiagramme.....	12	Toleranzen	45
Kriechverhalten und Spannungsrelaxation	14	Speziell konstruierte Dichtungsringe	46
Einfluß der Feuchtigkeitsaufnahme	15	Beschreibung der Tabellen und Abbildungen	48
Thermische Ausdehnung.....	17	Anhang	
Dauerfestigkeit und Schlagfestigkeit	18	Abmessungen von Standard-Halbzeugen	49
Elektrische Eigenschaften	18	ISO Toleranzen.....	50
Chemikalienbeständigkeit	20	Sicherheitsdatenblatt	52
Sonstige Eigenschaften	22		
Direktformverfahren	23		
Direktgeformte Teile	23		
Toleranzen und allgemeine Gestaltungsrichtlinien	25		
Nachbearbeitung direktgeformter Teile	27		
Bearbeitete Teile aus Halbzeug	27		
Allgemeine Bearbeitungsverfahren.....	28		
Kleben	31		
Umspritzen und Beschichten.....	31		
Strahlungsbeständigkeit	31		

Einleitung

Allgemeines

Eine Reihe von jüngsten Innovationen in den Bereichen Produktentwicklung und Fertigungstechnik hat zu einer Familie von Polyimidprodukten geführt, die dem Konstrukteur praktische und wettbewerbsfähige Lösungen für Probleme in Hochtemperatur-Anwendungen bietet.

Fertigteile und Halbzeuge aus VESPEL® SP sind seit über 25 Jahren auf dem Markt und insbesondere auf Anwendungen abgestimmt, die Bauteile mit hoher thermischer Stabilität, guten elektrischen Eigenschaften und einem ausgezeichneten Verschleiß- und Reibungsverhalten erfordern.

Zusätzlich zu diesen halbkristallinen Produkten führte DuPont unlängst eine neue Familie an VESPEL® ST Polyimiden mit einer verbesserten Festigkeit und Zähigkeit ein. Der wichtigste Unterschied zu VESPEL® SP: sie weisen so gut wie keine kristalline Struktur auf.

Aus diesen Polyimiden stellt DuPont nach genauen Kundenvorgaben Fertigteile aus VESPEL® her. Spanend bearbeitbare Halbzeuge sind außerdem für die Herstellung von Prototypen und kleine Chargen verfügbar.

In der heutigen Wettbewerbssituation hat der Konstruktions-Ingenieur eine wichtige Rolle zu erfüllen. Dies gilt sowohl für die Konstruktion neuer als auch bei der Umgestaltung vorhandener Produkte. Bei Teilen aus VESPEL® werden die gleichen Gestaltungsregeln angewendet wie für andere Kunststoffe und es gelten die gleichen physikalischen Gesetze wie für andere Werkstoffe. Daher soll dieses Handbuch den Konstrukteuren bei der Umsetzung dieser Prinzipien für die Auswahl, Prüfung und Spezifikation von Teilen aus VESPEL® helfen.

Dieses Konstruktionshandbuch enthält umfangreiche Daten über die Eigenschaften der SP Polyimid Harze, aus denen Teile aus VESPEL® hergestellt werden. Die Datenauswahl für dieses Handbuch basiert auf Gesprächen mit Konstrukteuren unserer Kunden, die Teile aus VESPEL® einsetzen. Alle Daten* in den folgenden Abschnitten sind das Ergebnis umfangreicher Forschungsarbeit in den Labors von DuPont in Wilmington, Delaware: Dennoch ist es immer empfehlenswert, Prüfungen unter Praxisbedingungen durchzuführen.

Heute werden Teile aus VESPEL® in Newark / USA, Utsunomiya / Japan und Mechelen / Belgien hergestellt.

Chemische Zusammensetzung

Polymer

VESPEL® ist ein Kondensationspolyimid, hergestellt aus Pyromellitdianhydrid (PMDA) und 4,4' Diaminodiphenylether (ODA).

VESPEL® hat keine feststellbare Glasübergangstemperatur oder einen Schmelzpunkt unterhalb einer Zersetzungstemperatur, die weit über 400°C liegt.

Dieses Fehlen einer Glasübergangstemperatur oder eines Schmelzpunktes hat einen wesentlichen Einfluß auf die

SP Polyimid

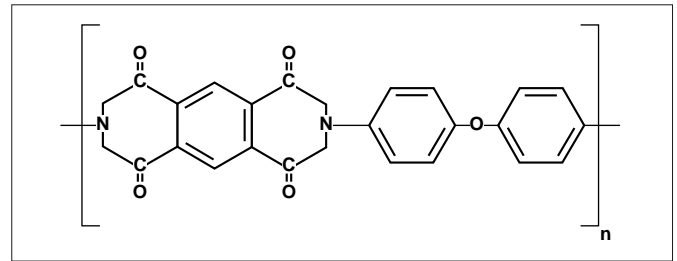


Abb. 1 Chemische Formel von VESPEL® SP

Produkteigenschaften und ist der Grund dafür, daß sich VESPEL® wie ein Duroplast verhält.

Der Hauptunterschied zwischen dem als SP bezeichneten Polyimid und dem neuen ST Polyimid ist die kristalline Struktur des SP Kunststoffes. Typische SP Kunststoffe weisen einen geschätzten Kristallinitätsgrad zwischen 25 und 50% auf.

ST Polyimid hat keine oder nur eine sehr geringe Kristallinität. Das Infrarotspektrum für diesen Kunststoff hat jedoch einen Imidgehalt von fast 100% im Gegensatz zu den amorphen SP Polyimiden mit 40% Imidgehalt.

Fertigungsverfahren

DuPont stellt Präzisionsteile aus VESPEL® in verschiedenen, grundlegenden Fertigungsverfahren her. Die letztlich gewählte Methode basiert auf einer Reihe von Faktoren – Betriebsanforderungen, Kundenspezifikation, Teilegeometrie und Wirtschaftlichkeit.

Kleine Stückzahlen und Teile mit einer großvolumigen und/oder komplexen Form werden in der Regel aus Stäben, Platten oder Rohren spanend gefertigt. Somit können alle gängigen Metallbearbeitungstechniken eingesetzt und enge Toleranzen eingehalten werden.

Bei Großserienfertigung können Teile mit einer entsprechenden Geometrie nach einem Verfahren direktgeformt werden, wie es ähnlich auch in der Pulvermetallurgie üblich ist. Direktgeformte Teile lassen sich zu beträchtlich niedrigeren Kosten herstellen als bearbeitete Teile. Falls spezielle Toleranzen oder die Komplexität der Geometrie das Direktformverfahren überfordern, wird häufig eine Kombination von direkter Formgebung mit spanender Nachbearbeitung eingesetzt.

Richtungsabhängige Eigenschaften

Wie die meisten Kunststoffe, weisen Teile aus VESPEL® je nach der Pressrichtung während der Fertigung anisotrope Eigenschaften auf. So sind zum Beispiel senkrecht zur Pressrichtung (⊥) Eigenschaften wie Zugfestigkeit und Dehnung höher und Wärmeausdehnungskoeffizienten niedriger als parallel zur Preßrichtung (||).

VESPEL® Teile, die aus Halbzeugen bearbeitet wurden, weisen in der Regel dieses Verhalten nicht auf.

Die typischen Eigenschaften von spanend bearbeiteten Teilen wurden an Proben aus isotropem Material gemessen. Das Material wird so hergestellt, daß die Eigenschaften richtungsunabhängig sind.

© Marke von DuPont.

* Gegenwärtig nach ASTM ermittelt; Werte nach ISO-Spezifikation werden im nächsten überarbeiteten Konstruktions-Handbuch angegeben.

Bei direktgeformten Teilen wird der Preßdruck in einer Richtung ausgeübt, was zu einer geringen Anisotropie der Eigenschaften führt. Die Richtungsabhängigkeit erhöht sich mit der Zugabe von Füllstoffen. Die höchste Festigkeit und Dehnung und der niedrigste Wärmeausdehnungskoeffizient ergeben sich in den meisten Teilen senkrecht zur Preßrichtung. Die hier dargestellten Daten für direktgeformte Teile wurden mit Ausnahme der Druckwerte und der thermischen Leitfähigkeit senkrecht zur Preßrichtung gemessen. Es ist sehr wichtig, VESPEL® in einer Anwendung mit dem Material zu erproben (entweder Halbzeug oder direktgeformt), das serienmäßig verwendet werden soll. Aus diesem Grund bietet DuPont direktgeformte Materialien (Rohlinge) für die Prototypenherstellung an.

Erstellung aussagekräftiger Spezifikationen

Spezifikationen werden in der Regel erst erstellt, nachdem mehrere andere wichtige Schritte bei der Entwicklung einer neuen Anwendung für Präzisionsteile aus VESPEL® vorausgegangen sind. Ein notwendiger erster Schritt ist, die Anforderungen an das Bauteil zu definieren.

Entwürfe der vorläufigen Konstruktion, Vorbereitung der Prototypen und Prüfungen der Konstruktion sind Schritte, die normalerweise folgen. Nur nach erfolgreichem Abschluß dieser wichtigen Phasen sollten schriftliche Spezifikationen erstellt werden.

Der Zweck einer Spezifikation liegt darin, starke Abweichungen bei den Teilen zu vermeiden. Diese würden verhindern, daß die in früheren Phasen festgelegten funktionellen und wirtschaftlichen Kriterien erfüllt werden. Die Spezifikation – durch die Zusammenarbeit von Endkunde und Lieferant entstanden – legt schriftlich fest, welche Anforderungen die Fertigteile erfüllen müssen.

Die verschiedenen Fertigungstechniken für die Herstellung von Präzisionsteilen aus VESPEL® gestatten eine hohe Flexibilität bei der Erfüllung der Kundenanforderungen.

Der Konstrukteur sollte sich immer bewußt machen, daß bei der Gestaltung von Kunststoffteilen in der Regel höhere Toleranzen erforderlich sind als bei Metall.

Dieses Handbuch liefert typische Eigenschaftswerte für direktgeformte und bearbeitete Teile. Da es sich bei diesen veröffentlichten Angaben um Durchschnittswerte handelt, wird empfohlen, einer Spezifikation keine Höchstwerte zugrunde zu legen.

Qualität

Teile aus VESPEL® werden von DuPont nach Kundenwunsch hergestellt, um die strengen Qualitätsanforderungen der anspruchsvollsten Hersteller der Welt zu erfüllen – Teil für Teil und Auftrag für Auftrag. Unsere statistische Prozeßkontrolle (SPC) erlaubt es im Vergleich zu herkömmlichen Prozeßkontrollverfahren, hochwertige Teile kostengünstiger herzustellen. Dank der Genauigkeit von SPC können unseren Kunden sogar auf eigene Prüfungen der gelieferten Teile verzichten, was zu beträchtlichen Kosteneinsparungen führt.

Die Verfahren umfassen sowohl Laserprüfungen und Computer-Video-Scanning für Maßtoleranzen und Gleichmäßigkeit sowie Ultraschall-Prüfungen für die einwandfreie Materialqualität.

Da die individuellen Produktionsdaten für jeden Auftrag gespeichert werden, kann man gegebenenfalls jedes Fertigprodukt bis zur verwendeten Materialcharge zurückverfolgen.

Alle VESPEL® Fertigungsstätten sind nach ISO 9001 und QS 9000 eingestuft.

Wie sehr sich DuPont höchster Qualität verpflichtet fühlt, beweist zum Beispiel die Verleihung zweier Ford Q1 Preise und des Chrysler Penta Star an das VESPEL® Werk in Mechele, das von der Rolls Royce Aero Engines Company als bevorzugter Lieferant eingestuft wurde.

DuPont hat weltweit ein vollständiges Qualitätsmanagement-System eingeführt, um in allen Bereichen höchste Qualität sicherzustellen. Was die Teile betrifft, so bedeutet dies Qualitätssicherung vom angelieferten Rohmaterial bis zur termingerechten Lieferung an den Kunden.

Die Qualitätsphilosophie von DuPont basiert auf dem Prinzip, Fehler zu vermeiden, statt Aufgaben zu beseitigen. Wir sind ständig bestrebt, Verbesserungen zu erreichen, die den Richtlinien des Ford Q1, des VDA (Verband der Automobilindustrie e.V.) und allen anderen Qualitätsanforderungen entsprechen, die von unseren Kunden festgelegt werden. Hierfür setzen wir folgende Hilfsmittel ein:

- FMEA Fehlermöglichkeits- und -einfluß-Analyse
- SPC Statistische Prozeßkontrolle
- RMI Rohmaterialprüfung
- PITA Produktions- und Prüfmittelverwaltung

Alle der Qualitätssicherung dienenden Mittel werden im Qualitäts-Handbuch aufgelistet, das ständig auf den neuesten Stand gebracht wird.

Materialtypen und Eigenschaften

Präzisionsteile aus VESPEL® werden aus einer Reihe von Standard- und Spezialtypen hergestellt. Einige Typen enthalten Füllstoffe, um gewisse Eigenschaften des Polyimidmaterials zu verbessern.

Anleitung zur Materialauswahl

VESPEL® SP für anspruchsvolle Anwendungen

Typ	Typische Anwendungsgebiete	Typenbeschreibung
SP1	Mechanische und elektrische Teile bei hohen Temperaturen. Ventilsitze, Dichtungen, Isolatoren.	Ungefüllter Grundtyp. Maximale Festigkeit und Dehnung: niedrigster Modul und geringste thermische Leitfähigkeit; optimale elektrische Eigenschaften.
SP21	Für geschmierte oder ungeschmierte Anwendungen, die geringe Reibungs- und Verschleißseigenschaften erfordern. Ventilsitze, Dichtungen, Lager, Anlaufscheiben, Dichtungsringe.	15% Graphit (Gewichtsprozent). Verbessert die Verschleißfestigkeit und die Wärmealterung.
SP22	Anwendungen, bei denen ein niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient wichtiger ist als die Festigkeit (die leicht reduziert ist). Lagerbuchsen, Anlaufscheiben usw.	40% Graphit (Gewichtsprozent). Reduziert den Wärmeausdehnungskoeffizienten, maximale Kriechfestigkeit
SP211	Anwendungen, die niedrige Reib- und Verschleißseigenschaften bei gemäßigten Temperaturen und PV-Werten erfordern. Lagerbuchsen, Anlaufscheiben usw.	15% Graphit und 10% TEFLON® PTFE (Gewichtsprozent). Niedrigste Haftreibung.
SP3	Für Anwendungen, die im Vakuum oder inerten Gasen Reibung und Verschleiß unterworfen sind Lager, Kolbenringe und Dichtungen	15% MoS ₂ (Gewichtsprozent). Beste Verschleißseigenschaften in trockener Umgebung.
SP221	Für ungeschmierte Anwendungen, die geringen Verschleiß gegen Leichtmetalle wie Aluminium-Legierungen, Messing, Sinterbronze erfordern. Gleitlager (Buchsen, Anlaufscheiben, etc.)	40% Graphit (Gewichtsprozent) und 15% TEFLON® PTFE. Niedrigste Verschleißrate gegen Leichtmetalle in ungeschmierter Umgebung.
SP262	Anwendungen, wo geringe Wärmeausdehnung und niedriger Reibungskoeffizient wichtiger sind als Festigkeit. Gleitlager.	57% Graphit (Gewichtsprozent) and 5% Kohlenstofffasern. Niedrigster Wärmeausdehnungskoeffizient und höchste thermische Leitfähigkeit.

VESPEL® ST erfüllt anspruchsvollere Aufgaben – ST Typen für höchste Zähigkeit, Festigkeit und Temperaturbeständigkeit

Typ	Typische Anwendungsgebiete	Typenbeschreibung
ST2010	Für geschmierte oder ungeschmierte Anwendungen, die geringe Reib- und Verschleißseigenschaften fordern. Ventilsitze, Dichtungen, Lager, Anlaufscheiben, Dichtungsringe.	Hervorragende Verschleiß- und Reibeigenschaften in Verbindung mit guter Zähigkeit, Festigkeit und Isoliereigenschaften. Enthält 10 % Graphit. Höchste Dehnung.
ST2030	Anwendungen, bei denen ein niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient wichtiger ist als die Festigkeit (die leicht reduziert ist). Lagerbuchsen, Anlaufscheiben usw.	Niedrigerer Wärmeausdehnungskoeffizient, geringere Dehnung als ST2010. Enthält 30 % Graphit. Höchste Oxidations- und Wärmebeständigkeit.

Wir hoffen, daß diese Broschüre Anregungen gibt, wie VESPEL® Ihnen bei der Lösung eines Konstruktionsproblems helfen kann. Falls Sie Fragen haben oder weitere Informationen benötigen, setzen Sie sich bitte vor Beginn Ihrer Konstruktionsarbeit mit Ihrem zuständigen VESPEL® Vertriebsbeauftragten von DuPont in Verbindung. Er wird Ihnen gerne Informationen über direktgeformte Teile geben, ähnliche Anwendungen mit Ihnen besprechen und Ihnen bei der Beschaffung von VESPEL® Material für Testzwecke und die Prototypenherstellung helfen.

Physikalische Eigenschaften

Präzisionsteile aus VESPEL®, die aus Polyimiden von DuPont geformt werden, zeichnen sich durch eine einzigartige Kombination an physikalischen Eigenschaften aus und erweitern den Anwendungsbereich, den die derzeit verfügbaren technischen Kunststoffe abdecken. Diese Eigenschaften umfassen einen Anwendungsbereich von Tiefsttemperaturen bis 500°C, Dauerbetriebstemperaturen bis 300°C in Luft, sehr hohe PV-Werte für Lageranwendungen (bis 12 MPa · m/s, bei Schmierung noch höher), hohe Durchschlagfestigkeit, ausgezeichnete mechanische Festigkeit und Lösungsmittelbeständigkeit, geringe Ausgasung und hohe Beständigkeit gegen ionisierende Strahlung. Zusammengefaßt werden die typischen Eigenschaften in den Tabellen 1, 2, 3 und 4. Die nachfolgenden Graphiken und Tabellen enthalten kennzeichnende Einzelheiten.

Tabelle 1 Zusammenstellung der typischen Eigenschaften der SP Polyimide

Eigenschaften	Temp. °C	ASTM Methode	Einheiten	SP1		SP21		SP22		SP211		SP3		
				M	DF	M	DF	M	DF	M	DF	M		
Zugfestigkeit	23	D1708 oder E8†	MPa	86,2	72,4	65,5	62,0	51,7	48,3	44,8	51,7	58,5		
	260			41,4	36,5	37,9	30,3	23,4	26,2	24,1	24,1			
Bruchdehnung	23	D1708 oder E8†	%	7,5	7,5	4,5	5,5	3,0	2,5	3,5	5,5	4,0		
	260			6,0	7,0	3,0	5,2	2,0	2,0	3,0	5,3	–		
Biege-Festigkeit	23	D790	MPa	110,3	82,7	110,3	82,7	89,6	62,1	68,9	68,9	75,8		
	260			62,1	44,8	62,0	48,3	44,8	37,9	34,5	34,5	39,9		
Biege-Modul	23	D790	MPa	3102	2482	3792	3171	4826	4826	3102	2758	3275		
	260			1724	1448	2551	1792	2758	2758	1379	1379	1862		
Druckfestigkeit	23	D695	MPa											
				bei 1 % Stauchung	24,8	24,1*	29,0	22,8*	31,7	24,1	20,7	14,5*	34,5	
				bei 10 % Stauchung	133,1	112,4*	133,1	104,8*	112,4	93,8*	102,0	75,8*	127,6	
				bei 0,1 % Plast-Verformung	51,0	33,1*	45,5	33,8*	41,4	25,5*	37,2	27,6*		
Druck-Modul	23	D695	MPa	2413	2413*	2895	2275*	3275	2654*	2068	1379*	2413		
Axiale Dauerfestigkeit	23		MPa	bei 10 ³ Zyklen	55,8		46,2							
					260	26,2	22,8							
	bei 10 ⁷ Zyklen			23	42,1	32,4								
				260	16,5	16,5								
Biegewechselfestigkeit	23		MPa	bei 10 ³ Zyklen	65,5	65,5								
					bei 10 ⁷ Zyklen	44,8	44,8							
Scherfestigkeit	23	D732	MPa	89,6		77,2								
Izod-Kerbschlagzähigkeit	23	D256	J/m	42,7		42,7						21,3		
Izod-Schlagzähigkeit	23	D256	J/m	747		320						112		
Poissonzahl	23			0,41		0,41								
ABRIEB UND REIBUNG	Verschleißrate ††			m/s × 10 ⁻¹⁰	17-85	17-85	6,3	6,3	4,2	4,2	4,9	4,9	17-23	
	Reibungskoeffizient**													
	PV = 0,875 MPa · m/s				0,29	0,29	0,24	0,24	0,30	0,30	0,12	0,12	0,25	
	PV = 3,5 MPa · m/s						0,12	0,12	0,09	0,09	0,08	0,08	0,17	
	Im Vakuum												0,03	
Statisch in Luft				0,35		0,30		0,27		0,20				
THERMISCHE	Längenausdehnungs- koeffizient	23–260 –62 bis +23	D696	µm/m/°C	54	50	49	41	38	27	54	41	52	
					45	34								
	Wärmeleitfähigkeit	40			W/m/°C	0,35	0,29*	0,87	0,46*	1,73	0,89*	0,76	0,42*	0,47
	Spezifische Wärme				J/kg/°C	1130								
	Verformung unter 14 MPa Belastung	50	D621	%	0,14	0,20	0,10	0,17	0,08	0,14	0,13	0,29	0,12	
Formbeständigkeitstemperatur bei 2 MPa		D648	°C	~360		~360								

Bitte beachten Sie zu allen Angaben die Hersteller-Garantieerklärung auf der Rückseite dieser Broschüre.

Tabelle 2 Zusammenstellung der typischen Eigenschaften der SP Polyimide

Eigenschaften	Temp. °C	ASTM Methode	Ein- heiten	SP1		SP21		SP22		SP211		SP3	
				M	DF	M	DF	M	DF	M	DF	M	
Dielektrizitätszahl	23	D150											
				bei 10 ² Hz	3,62		13,53						
				bei 10 ⁴ Hz	3,64		13,28						
				bei 10 ⁶ Hz	3,55		13,41						
Dielektrischer Verlustfaktor	23	D150											
				bei 10 ² Hz	0,0018		0,0053						
				bei 10 ⁴ Hz	0,0036		0,0067						
				bei 10 ⁶ Hz	0,0034		0,0106						
Durchschlagfestigkeit kurzfristig, 2 mm dick		D149	MV/m	22		9,84							
Spezifischer Durchgangswiderstand	23	D257	Ω · m	10 ¹⁴ –10 ¹⁵		10 ¹² –10 ¹³							
Spezifischer Oberflächenwiderstand	23	D257	Ω	10 ¹⁵ –10 ¹⁶									
Wasseraufnahme		D570	%										
	24 h			23	0,24		0,19		0,14		0,21		0,23
	48 h			50	0,72		0,57		0,42		0,49		0,65
	Sättigung, 50 % r.L.				1,0–1,3	1,0–1,3	0,8–1,1	0,8–1,1					
Spezifisches Gewicht		D792		1,43	1,34	1,51	1,42	1,65	1,56	1,55	1,46	1,60	
Sauerstoffindex		D2863	%	53		49							

† Aus Halbzeug gefertigte Teile für Zugfestigkeitsprüfung gemäß D708 und direkt geformte Proben gemäß E8 (Standardabmessungen wie in der Pulvermetallurgie; Proben getestet nach D638).

* Eigenschaften von direktgeformten Teilen (DF), die mit einem* versehen sind, wurden parallel zur Preßrichtung gemessen. Alle anderen direktgeformten Eigenschaften wurden senkrecht zur Preßrichtung gemessen. Eigenschaften von bearbeiteten Teilen (M) sind richtungsunabhängig.

†† Ungeschmiert in Luft (PV 0,875 MPa · m/s).

** stationär, ungeschmiert in Luft.

Bemerkung:

M: Teile aus Halbzeug.
DF: Teile aus direktgeformtem Polyimid.

Tabelle 3 Vorläufige Eigenschaften der neuen SP Polyimide

Eigenschaften	Temp. °C	ASTM Methode	Einheiten	SP221	SP262	
Zugfestigkeit	23	D638 oder E8	MPa	38,6	37,9	
	260				19,3	
Bruchdehnung	23	D638 oder E8	%	3,5	1	
	260				0,7	
Biege-Festigkeit	23	D790	MPa	55,1		
	260			31		
Biege-Modul	23	D790	MPa	3445		
	260			2205		
Zug-Modul	23	D638 oder E8	MPa		8410	
	260				3720	
Druckspannung		D695	MPa			
	maximal	23		111,7	100	
	maximal	260		57	59	
	bei 1 % Stauchung	23		14,5	40	
	bei 1 % Stauchung		260		7,6	21,4
	bei 10 % Stauchung		23		78,6	
bei 10 % Stauchung		260		46,5		
Druck-Modul	23	D695	MPa	1412	2860	
	260			790	1790	
Spezifisches Gewicht		D732		1,6	1,74	
PV Grenze			MPa·m/s	10,5	10,5	
Reibungskoeffizient					0,10-0,14	
	PV = 0,875 MPa·m/s				0,05-0,08	
	PV = 3,5 MPa·m/s					
Verschleißfaktor			mm ³ /Nm × 10 ⁻⁶		0,44	
	PV = 0,875 MPa·m/s				0,66	
	PV = 3,5 MPa·m/s					
Verschleiß und Reibung gegen 6061 geschmiedetes Aluminium						
	PV = 0,875 MPa·m/s	Reibungskoeffizient		0,21		
	PV = 0,875 MPa·m/s	Verschleißrate von VESPEL® und Alu	mm/s 10 ⁻⁶	2,3 / 0		
Verschleiß und Reibung gegen ADC 12 gegossenes Aluminium						
	PV = 0,5 MPa·m/s	Reibungskoeffizient		0,15		
	PV = 0,5 MPa·m/s	Verschleißrate von VESPEL® und Alu	mm/s 10 ⁻⁶	1,2 / 0		
	PV = 4,7 MPa·m/s	Reibungskoeffizient		0,12		
PV = 4,7 MPa·m/s	Verschleißrate von VESPEL® und Alu	mm/s 10 ⁻⁶	3,7 / 0,3			
Längenausdehnungskoeffizient		D696	µm/m·°C			
	senkrecht zur Preßrichtung	23-300		29	13,1	
	Parallel zur Preßrichtung	23-300			48,9	
Wärmeleitfähigkeit	23		W/m·K		2,46	
	200				1,98	
Spezifische Wärme	23		J/kg·K		792	
	40				837	

Bitte beachten Sie zu allen Angaben die Hersteller-Garantieerklärung auf der Rückseite dieser Broschüre.

Tabelle 4 Typische Eigenschaften von direktgeformten Teilen aus VESPEL® ST

Eigenschaften	Temp. °C	ASTM Methode	Einheiten	ST2010	ST2030	
MECHANISCHE	Zugfestigkeit	23	D 638	MPa	68	57
		150			49	
		260			32	
		300			26	
	Bruchdehnung	23	D 638	%	10,0	4,9
		150			10,0	
		260			9,8	
		300			9,7	
	Zug-Modul	23	D638	MPa	2758	3930
	Izod-Kerbschlagzähigkeit	23	D256	J/m	53	
	Druckfestigkeit		D695	MPa		
	1% Stauchung	23			15	
	10% Stauchung				82	
	maximal				269	155
	Druck-Modul	23	D695	MPa	1827	1207
	ELEKTRISCHE	Durchschlagfestigkeit	23	D149	kV/mm	10,4
Dielektrizitätszahl		23	D150			
100 Hz					4,80	300
10 kHz					4,78	110
1 MHz					4,70	40,6
Dielektrischer Verlustfaktor		23	D150			
100 Hz					0,0014	6,90
10 kHz					0,0023	0,65
1 MHz					0,0075	0,30
Spezifischer Durchgangswiderstand		23	D257	ohm·cm	$3,2 \times 10^{16}$	$4,8 \times 10^7$
Spezifischer Oberflächenwiderstand	23	D257	ohm	$2,0 \times 10^{16}$	$2,6 \times 10^6$	
SONSTIGE	Wärmeleitfähigkeit	23	F433	$[W \cdot cm/cm^2 \cdot ^\circ C]$ $\times 10^{-3}$	5,0	9,7
	Längenausdehnungskoeffizient	23–260	D696	$\mu/m/^\circ C$	48	32
	Wasseraufnahme (Gewichtsänderung in %)					
	24 h	23	D570		1,3	0,5
	48 h				3,1	1,3
	Verformung unter 14 MPa Belastung	23	D621	%	0,18	
		50			0,38	
Spezifisches Gewicht	23	D272		1,38	1,44	

Anmerkung: Halbzeuge aus ST Polyimid sind derzeit noch nicht verfügbar.

Einfluß der Temperatur

Da SP und ST Polyimide nicht schmelzen, keine Glasübergangstemperaturen (T_g) oder Erweichungspunkte aufweisen, die sich mit gängigen Methoden messen ließen, reduzieren sich Festigkeit und Module nahezu linear mit der Temperatur. Dies steht im Gegensatz zu den herkömmlichen technischen Thermoplasten, die bei Annäherung an T_g einen starken Abfall dieser Eigenschaften verzeichnen. Abbildungen 2 bis 5 zeigen typische temperaturabhängige Änderungen der Zugfestigkeit und des Elastizitätsmoduls bei aus Halbzeug bearbeiteten und direktgeformten Teilen.

Die maximale Einsatztemperatur der SP und ST Polyimide wird durch ihren thermischen Abbau begrenzt und nicht durch einen Erweichungspunkt, an dem sie ihre Belastbarkeit verlieren würden. Teile können dauernd bis 300°C und kurzfristig bis 500°C eingesetzt werden.

Abb. 6 zeigt die Verwendungsfähigkeit bei hohen Temperaturen durch Ermittlung des Zeitraumes, der zu einer 50%igen Reduzierung der ursprünglichen Zugfestigkeit führt. So behalten zum Beispiel SP1 Polyimide die Hälfte ihrer ursprünglichen Festigkeit nach einer Dauereinwirkung von

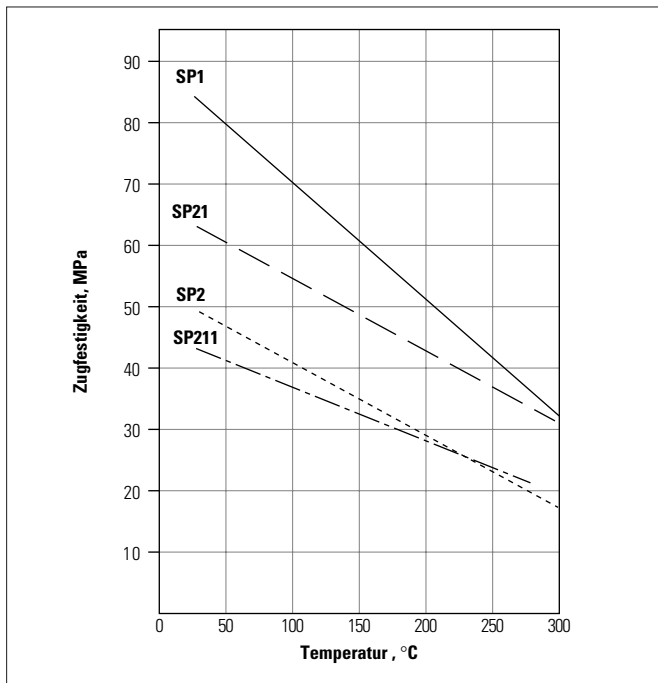


Abb. 2 Halbzeug aus SP Polyimid. Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur, ASTM D1708

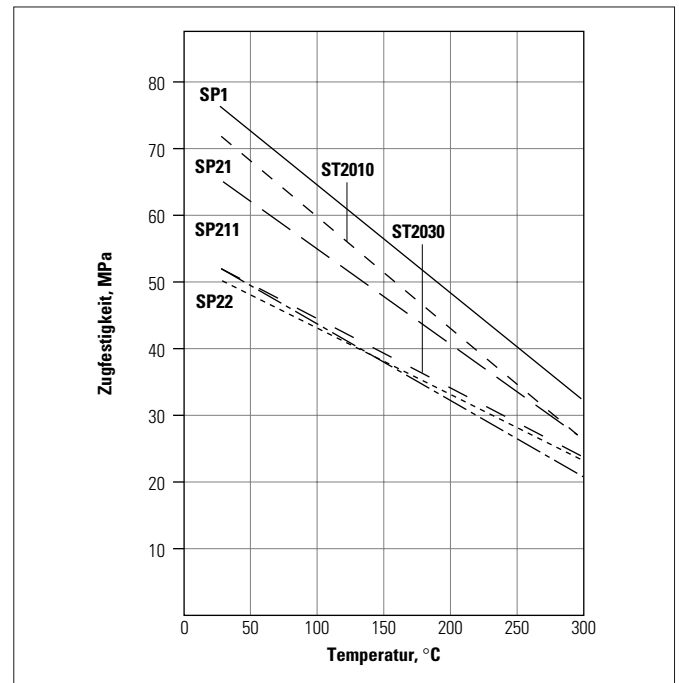


Abb. 3 Direktgeformte SP und ST Polyimide. Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur, ASTM E8

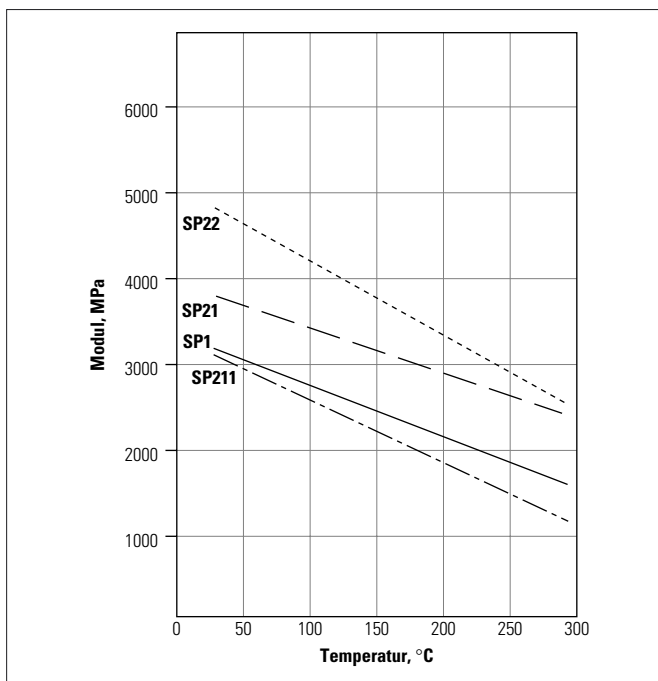


Abb. 4 Halbzeug aus SP und ST Polyimid. Biege-E-Modul in Abhängigkeit der Temperatur, ASTM D740

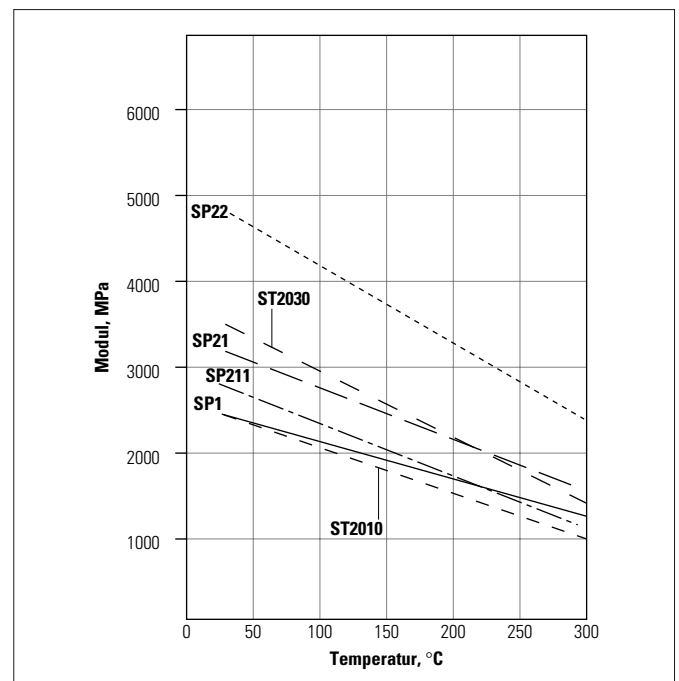


Abb. 5 Direktgeformte SP und ST Polyimide. Biege-E-Modul in Abhängigkeit der Temperatur, ASTM D790

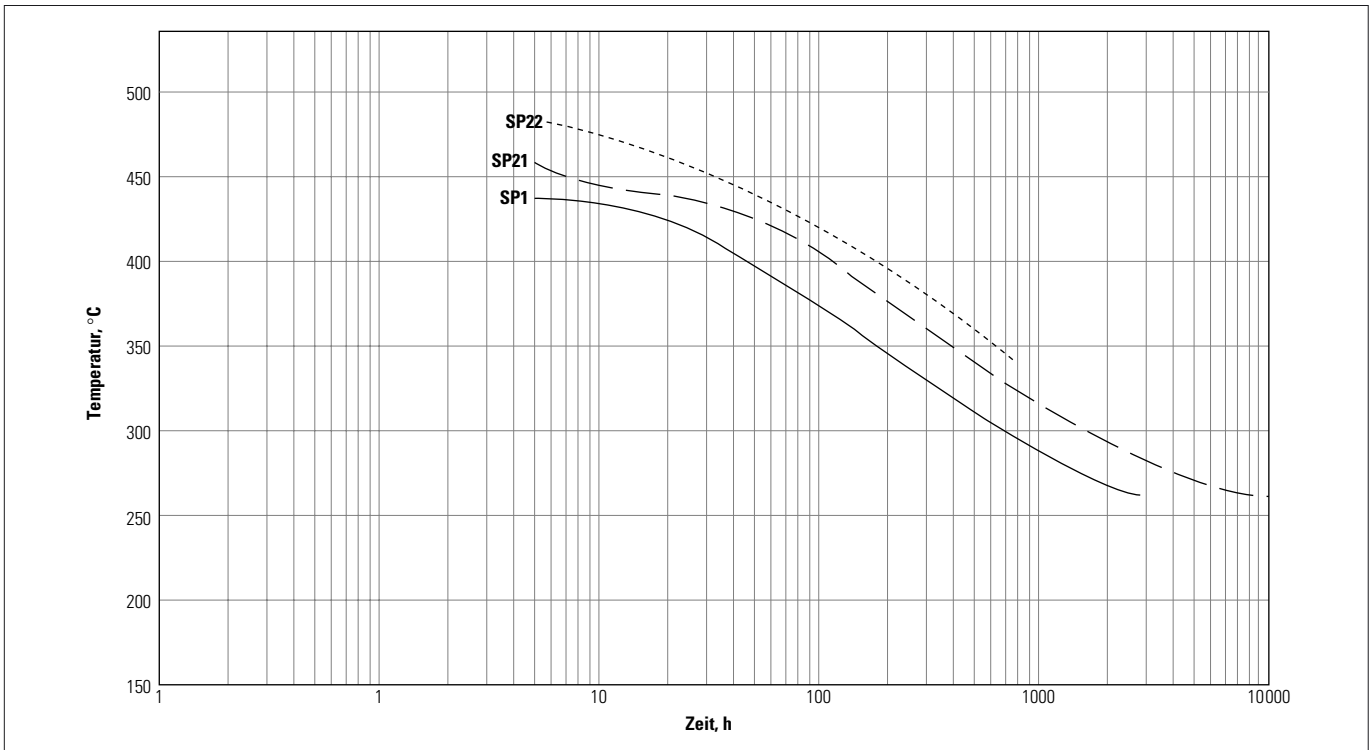


Abb. 6 **SP Polyimide in Luft bei hohen Temperaturen. Ungefährer Zeitraum bis zum Erreichen einer um 50% reduzierten Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur**

100 Stunden. Graphit als Füllstoff in den SP21 und SP22 Polyimiden führt dazu, daß die Eigenschaften über einen längeren Zeitraum besser erhalten bleiben. Bei SP21 (15% Graphit) sind etwa 200 Stunden bei 370°C und bei SP22 (40% Graphit) 350 Stunden erforderlich, um eine Festigkeit von 50% zu erreichen. Die zeitabhängige Verminderung der Eigenschaften bei Temperaturen über 400°C beruht fast ausschließlich auf einem Abbau durch Oxidation. Bei Temperaturen bis mindestens 340°C weisen SP Teile in inerten Umgebungen wie Stickstoff oder Vakuum nur eine geringfügige zeitabhängige Verschlechterung der Eigenschaften auf.

Selbstverständlich sind die Daten in Abbildung 6 nur als Richtwerte zu betrachten, da die wirkliche Lebensdauer von VESPEL® Teilen in der Regel weitaus höher ist. Der Grund: die Temperaturen in realen Einsätzen sind häufig nicht kontinuierlich, und die Teile werden in der Regel bis zu einem gewissen Grad durch ein Gehäuse oder eine Halterung geschützt. In Hochtemperatur-Anwendungen sind Teile aus VESPEL® selten völlig der Luft ausgesetzt.

Hochschlagzähes ST

- **Höhere Temperaturbeständigkeit**

Da Teile aus VESPEL® ST derart gute mechanische Eigenschaften aufweisen, bewahren sie ihre Zähigkeits- und Festigkeitswerte über längere Zeiträume als SP Polyimid.

- **Außergewöhnliche Zähigkeit**

Teile aus VESPEL® ST weisen etwa die doppelte Dehnung auf als SP Polyimide (Abb. 7). Die Kerbschlagzähigkeit nach Izod ist etwa 50% höher (siehe Tabelle 3).

- **Höhere Festigkeit**

Bauteile aus VESPEL® ST weisen eine höhere maximale Druckfestigkeit und Zugfestigkeit auf als vergleichbare SP Teile, wie Abbildungen 8 und 9 zeigen.

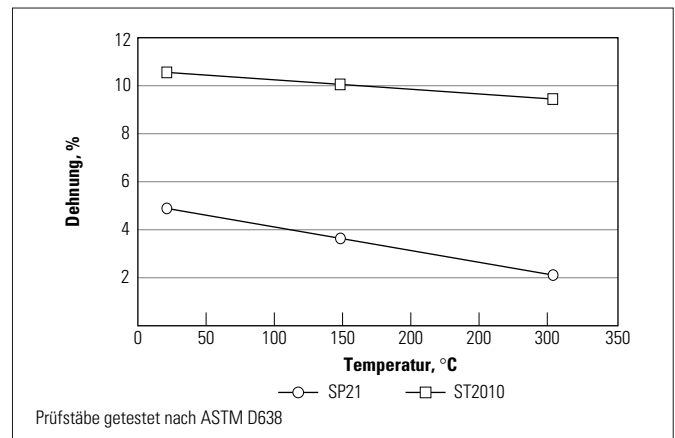


Abb. 7 **Reißdehnung in Abhängigkeit der Temperatur SP21 gegenüber ST2010**

Spannungs-Dehnungsdiagramme

Abbildungen 10 und 11 zeigen typische Zugspannungs-Dehnungsdiagramme für aus Halbzeug bearbeitete SP Polyimidteile bei 23°C und 260°C. Abbildungen 12 und 13 zeigen ähnliche Kurven für direktgeformte Teile. Es ergeben sich unterschiedliche Kurven, da die direktgeformten Teile eine niedrigere Dichte aufweisen.

Abbildungen 14 bis 16 zeigen Druckspannungs-Dehnungskurven. Obwohl die meisten SP Polyimidtypen unter Druck hohe Dehnungen (>30%) aushalten können, ohne daß sie ihre maximale Festigkeit erreichen, würde dies in der Praxis zu einem stark verformten Teil führen. Die Kurven für geringe Dehnungen (bis 5%) verdeutlichen die praktische Grenzbelastung ohne eine beträchtliche Überschreitung der Elastizitätsgrenze des Materials. Tabelle I gibt zudem die Druckspannung von SP Polyimid an, bei der eine bleibende Verformung des Teils von 0,1% auftritt. Im Gegensatz

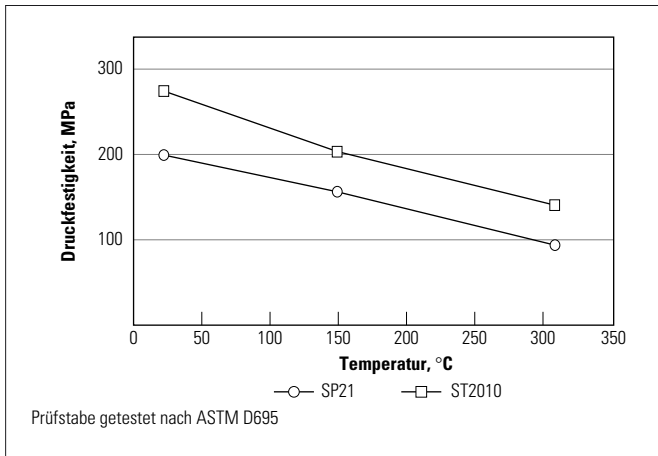


Abb. 8 **Maximale Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur. SP21 gegenüber ST2010**

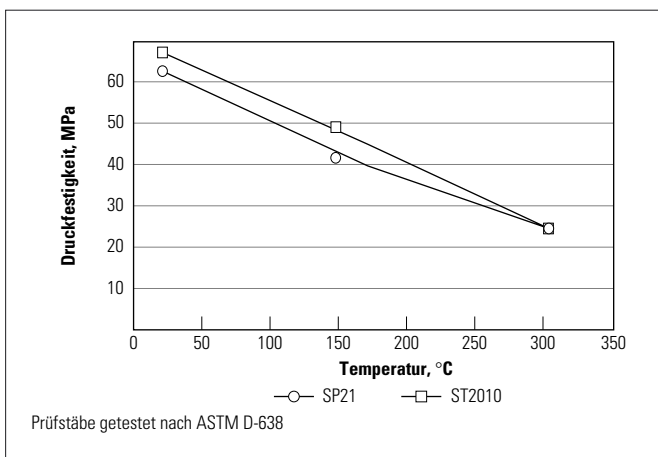


Abb. 9 **Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur. SP21 gegenüber ST2010**

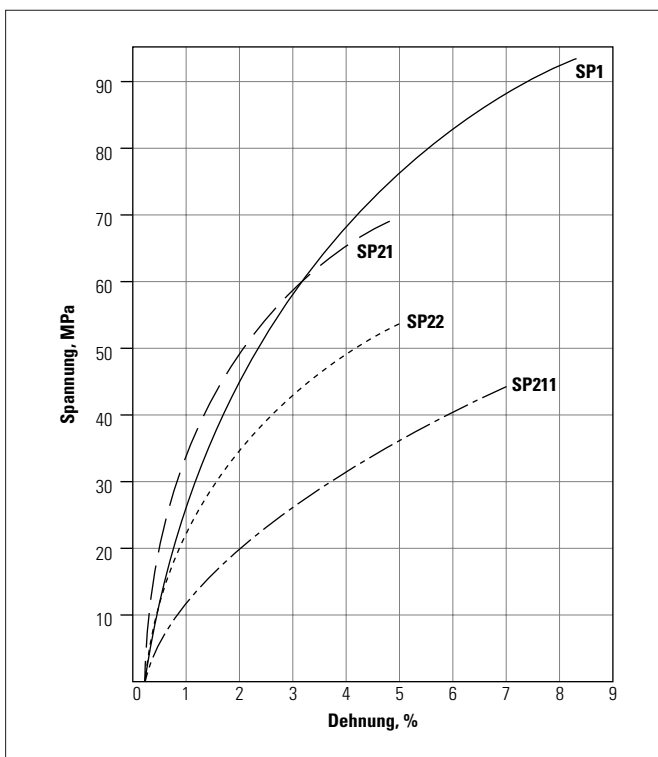


Abb. 10 **Halbzeug aus SP Polyimid. Typische Zugspannungs-Dehnungskurven bei 23°C, ASTM D1708**

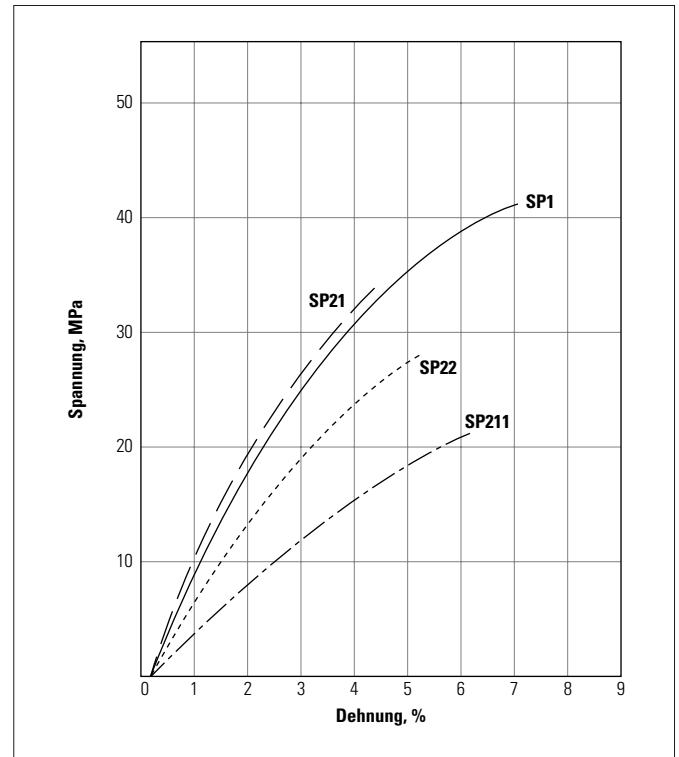


Abb. 11 **Halbzeug aus SP Polyimid. Typische Zugspannungs-Dehnungskurven bei 260°C, ASTM D1708**

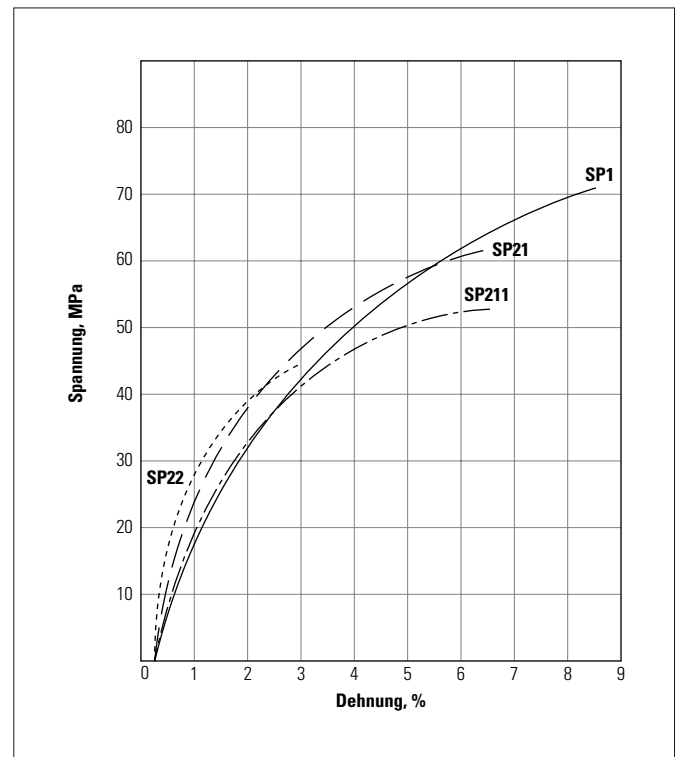


Abb. 12 **Direktgeformtes SP Polyimid. Typische Zugspannungs-Dehnungskurven bei 23°C, ASTM E8 (⊥ zur Preßrichtung)**

zu den meisten Duroplasten lassen sich Polyimide um mehrere Prozent zusammendrücken, bevor sie diesen Verformungsgrad erreichen. Die Materialien zeichnen sich durch eine hohe elastische Verformung aus und eignen sich für die Herstellung vieler Dichtungstypen.

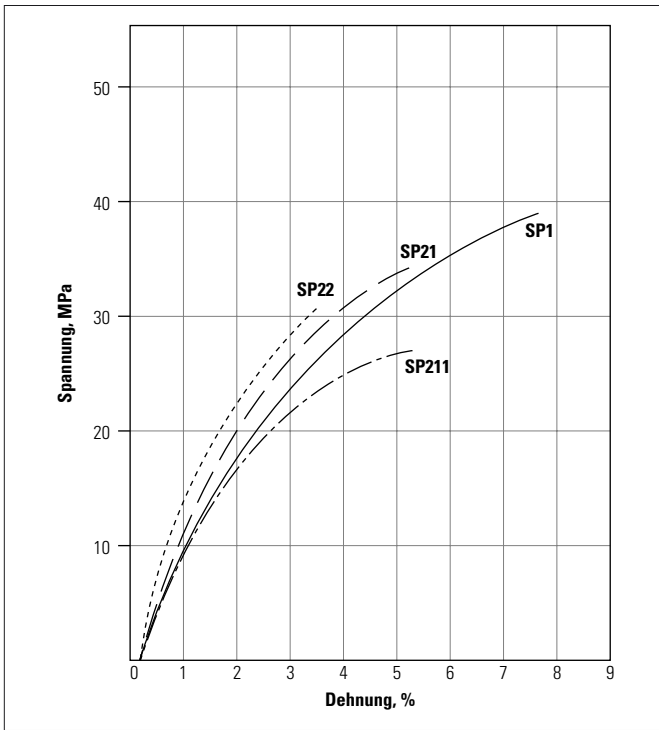


Abb. 13 Direktgeformtes SP Polyimid. Zugspannungs-Dehnungskurven bei 260°C, ASTM E8 (⊥ zur Preßrichtung)

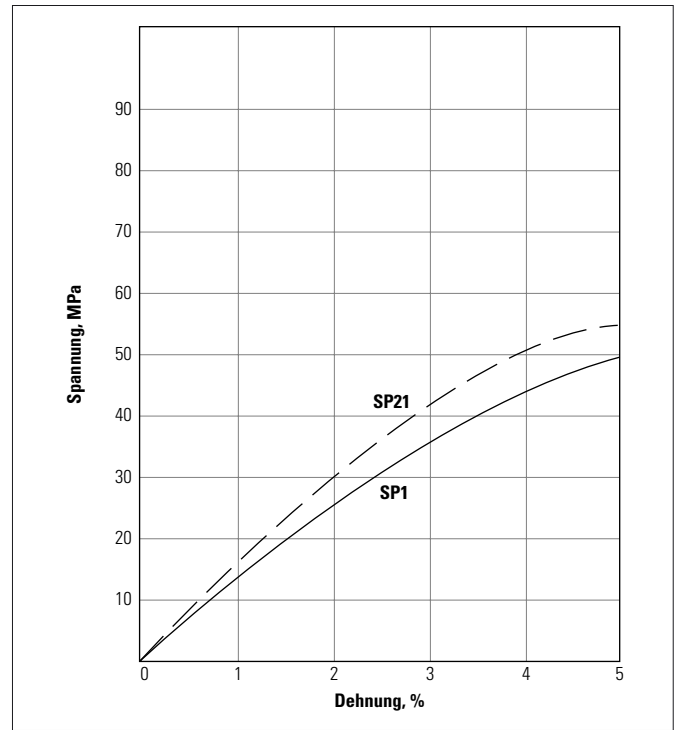


Abb. 15 Halbzeug aus SP Polyimid. Druckspannungs-Dehnungskurven bei 300°C, ASTM D695

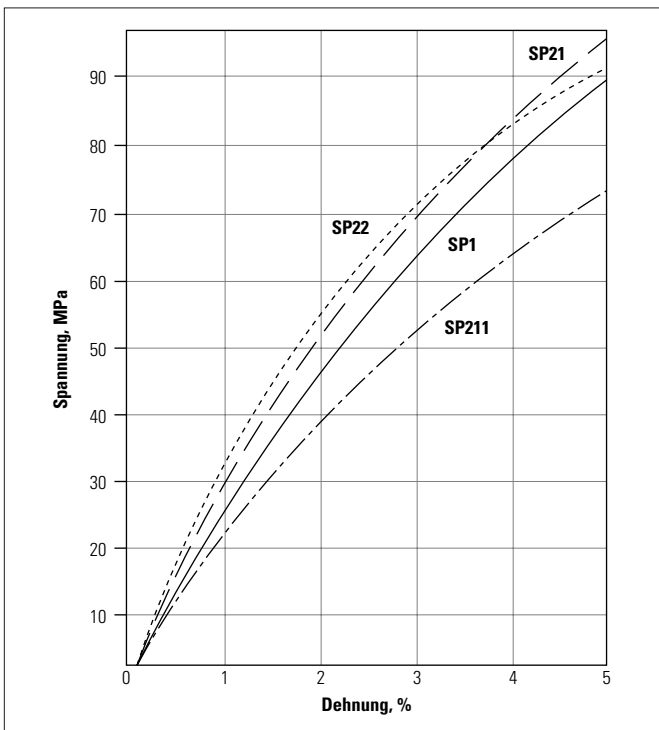


Abb. 14 Halbzeug aus SP Polyimid. Druckspannungs-Dehnungskurven bei 23°C, ASTM D695

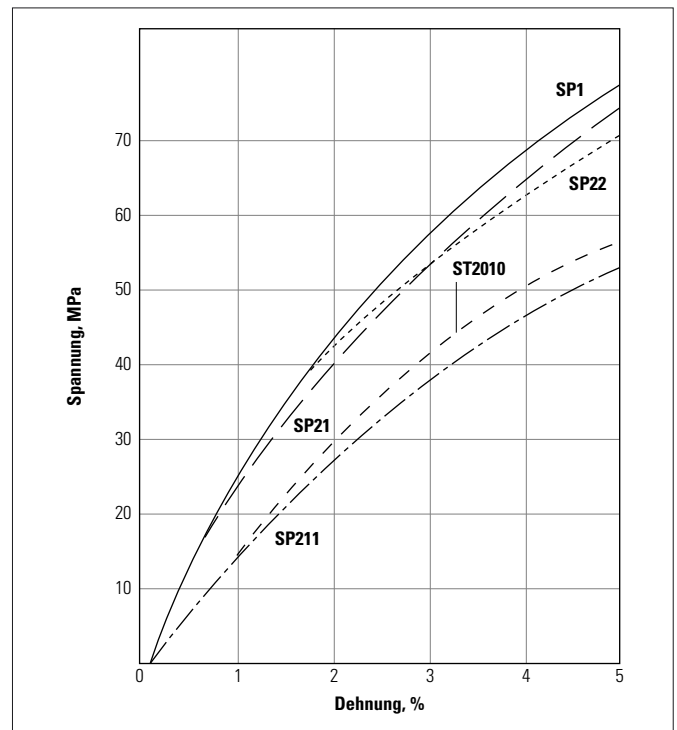


Abb. 16 Direktgeformte SP und ST Polyimide. Typische Druckspannungs-Dehnungskurven bei 23°C, (|| zur Preßrichtung), ASTM D695

Kriechverhalten und Spannungsrelaxation

Die zeitabhängige Verformung unter konstanter Belastung wird als Kriechen bezeichnet.

Die Größe des Kriechens zu einem gegebenen Zeitpunkt ist die Differenz zwischen der gesamten Verformung und der Anfangsdehnung, die bei der Lasteinwirkung stattfindet.

Die zeitabhängige Abnahme der Spannung, die erforderlich ist, um eine Dehnung konstant zu halten, wird als Spannungsrelaxation definiert.

Abbildungen 17, 18 und 19 zeigen die gesamte Verformung oder Dehnung als Funktion der Zeit mit 10,3 und 17,2 MPa für Halbzeuge aus SP1, SP21 und SP22 Polyimid bei zwei Temperaturen.

Da SP Polyimide nicht erweichen und thermisch widerstandsfähig sind, sind sie bei Temperaturen belastbar, bei denen die meisten Kunststoffe versagen und dies bei extrem geringer Kriechneigung. Bei SP21 und SP22 wird die Kriechfestigkeit durch Graphit als Füllstoff weiter verbessert. Abbildung 19 zeigt zum Beispiel, daß SP22 nach 1000 Stunden bei 17,2 MPa und 300°C nur eine Verformung von 0,5% aufweist.

Abbildungen 20 bis 22 zeigen die Veränderung des Kriechmoduls als Funktion der Zeit, entsprechend den Abbildungen 17 bis 19. Durch Einsatz des entsprechenden zeitabhängigen Kriechmoduls in Standardgleichungen lassen sich die Einflüsse durch Kriechen und Relaxation vorherbestimmen.

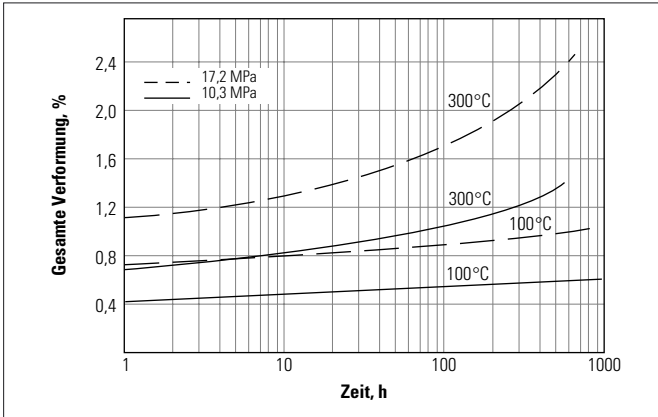


Abb. 17 Halbzeug aus SP1 Polyimid. Gesamtverformung unter Last als Funktion der Zeit

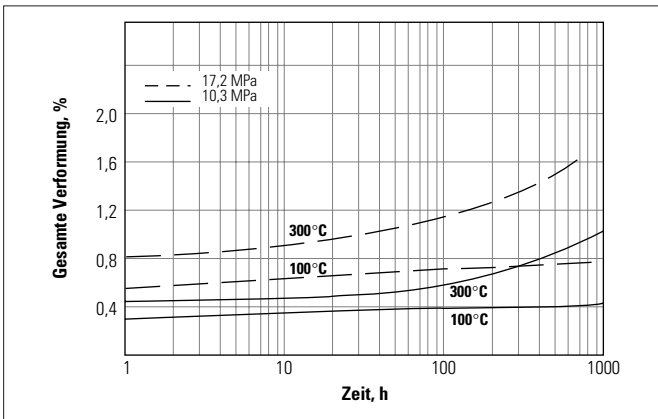


Abb. 18 Halbzeug aus SP21 Polyimid. Gesamtverformung unter Last als Funktion der Zeit

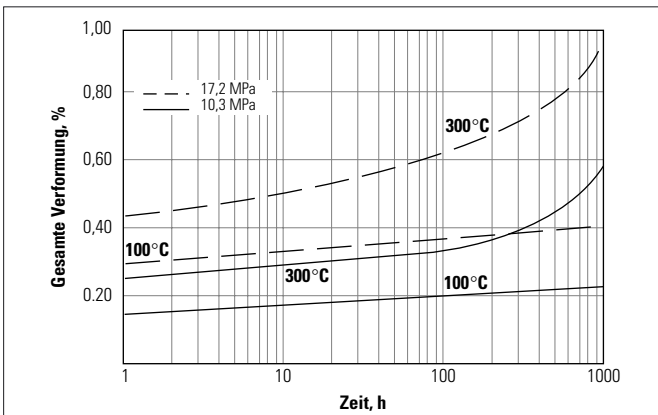


Abb. 19 Halbzeug aus SP22 Polyimid. Gesamtverformung unter Last als Funktion der Zeit

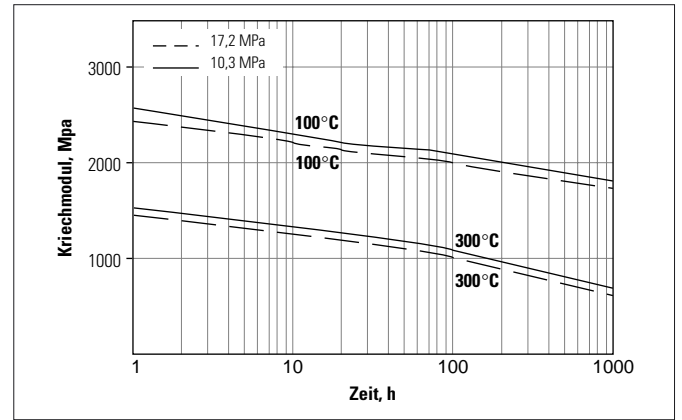


Abb. 20 Halbzeug aus SP1 Polyimid. Kriechmodul unter Belastung als Funktion der Zeit

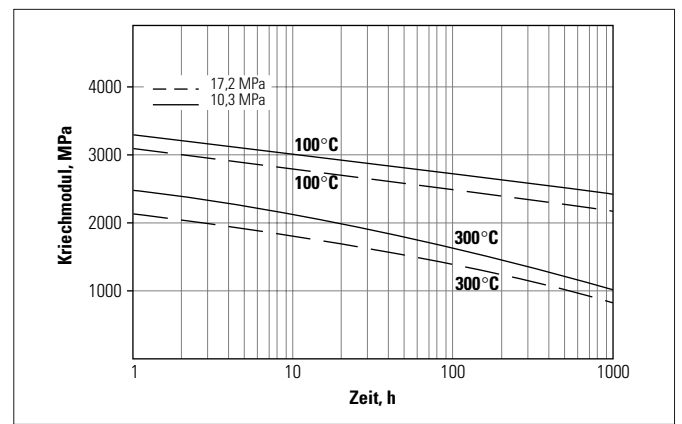


Abb. 21 Halbzeug aus SP21 Polyimid. Kriechmodul unter Belastung als Funktion der Zeit

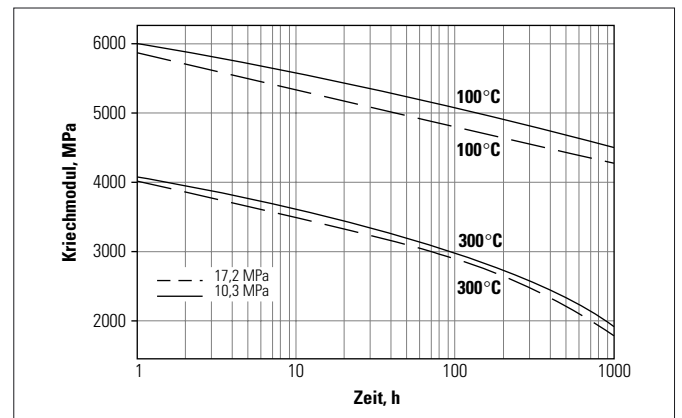


Abb. 22 Halbzeug aus SP22 Polyimid. Kriechmodul unter Belastung als Funktion der Zeit

Einfluß der Feuchtigkeitsaufnahme

Abbildungen 23 bis 25 zeigen die typischen Maßänderungen, die durch die Feuchtigkeitsaufnahme von Halbzeug und direktgeformten Teilen aus SP Polyimid verursacht werden. Ausgehend vom trockenen Zustand dauert es sehr lange, bis ein ausgeglichener Feuchtegehalt in einer kontrollierten Umgebung erreicht wird, d.h. Tausende von Stunden. Da die Feuchtigkeitsaufnahme von der Diffusionsgeschwindigkeit abhängig ist, sind die Werte entsprechend niedriger für dickere und höher für dünnere Teile.

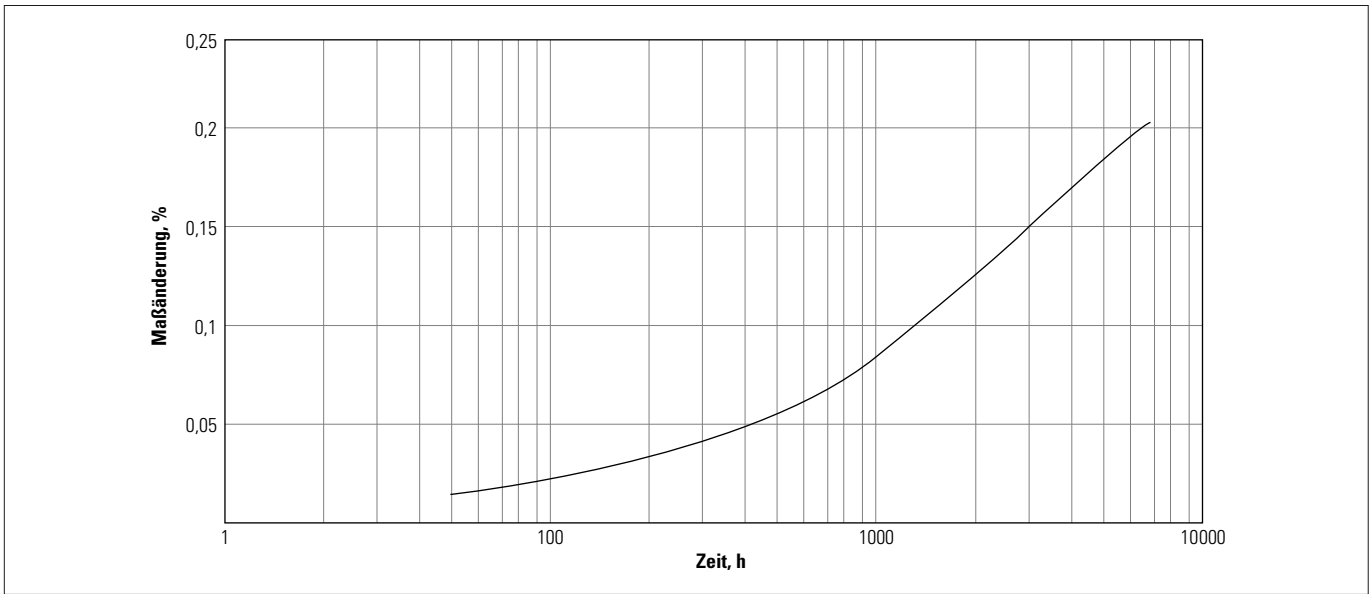


Abb. 23 Halbzeug aus SP1 und SP21 Polyimid. Typische zeitabhängige Maßänderung bei 23°C, 50% r.L., 3,2 mm Platten

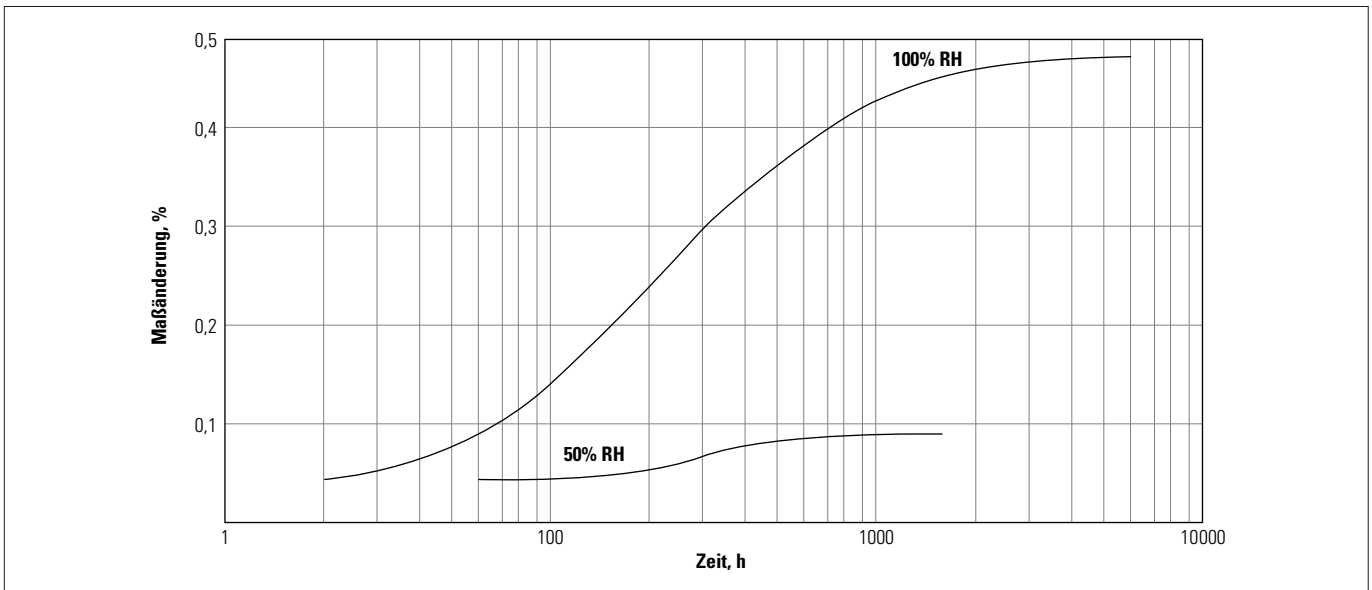


Abb. 24 Direktgeformtes SP1 Polyimid. Typische zeitabhängige Maßänderung bei 23°C, 50 und 100% r.L., Scheiben: 25 mm Durchmesser, 2,5 mm Dicke

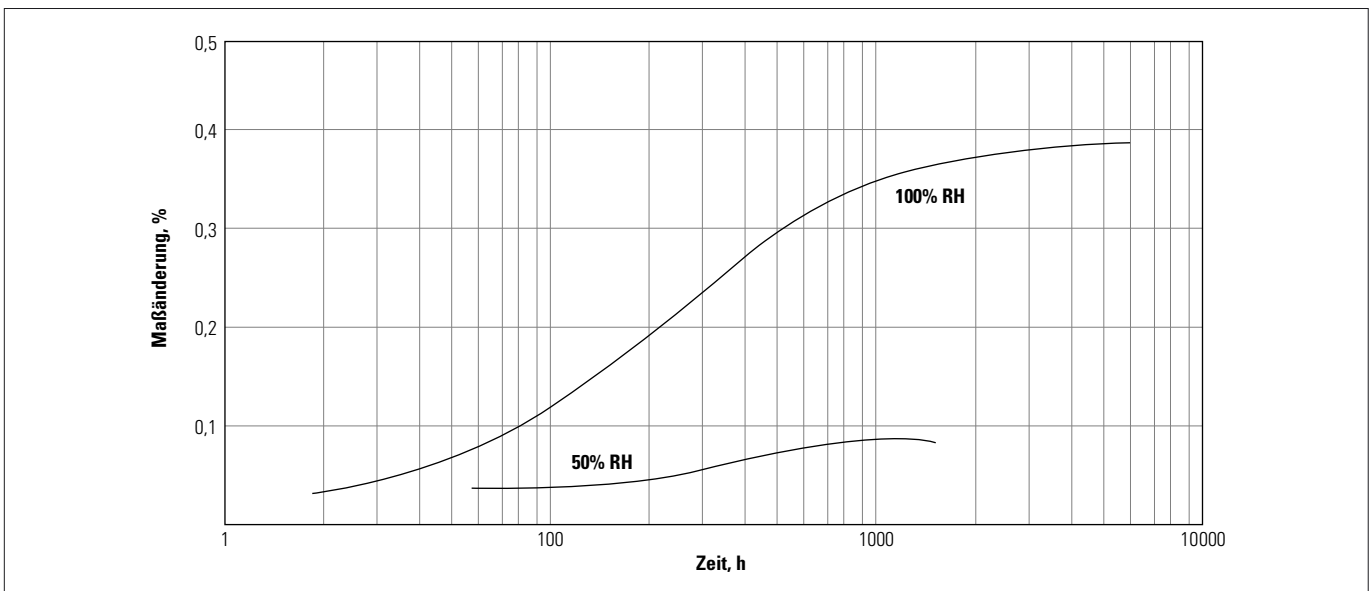


Abb. 25 Direktgeformtes SP21 Polyimid. Typische zeitabhängige Maßänderung bei 23°C, 50 und 100% r.L., Scheiben: 25 mm Durchmesser, 2,5 mm Dicke

Abbildungen 26 und 27 zeigen typische Einflüsse der relativen Luftfeuchtigkeit (r.L.) bei 23°C auf die Abmessungen von aus Halbzeug bearbeiteten und direktgeformten Teilen. Ein Teil erreicht seine vollständige Maßänderung bei einem gegebenen Feuchtigkeitsniveau erst dann, wenn es in der Umgebung sein Gleichgewicht erreicht hat. Wenn ein völlig trockenes Teil sein Gleichgewicht bei 100% r.L. und 23°C erreicht hat, führt dies zu einer maximalen Maßänderung von etwa 0,5% oder 0,005 mm/mm.

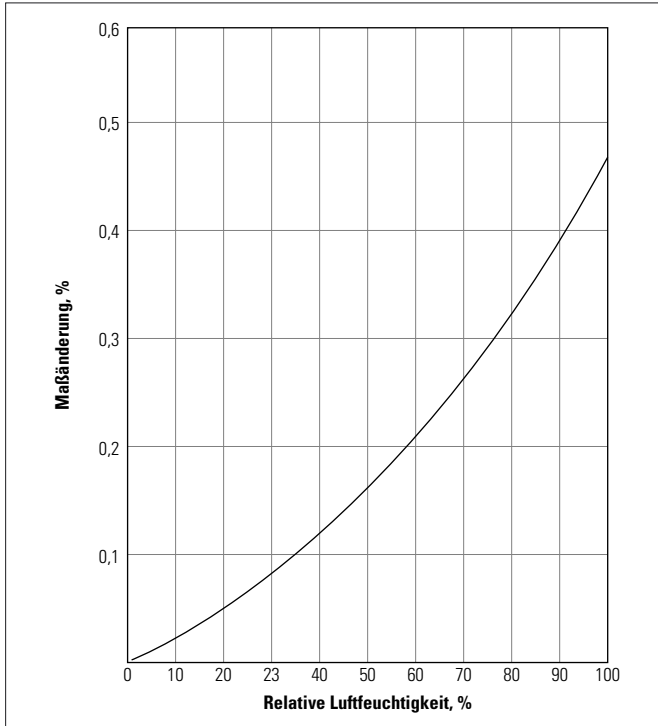


Abb. 26 Halbzeug aus SP1 und SP21 Polyimid. Typische Maßänderung bei relativer Luftfeuchtigkeit im Gleichgewichtszustand, 23°C

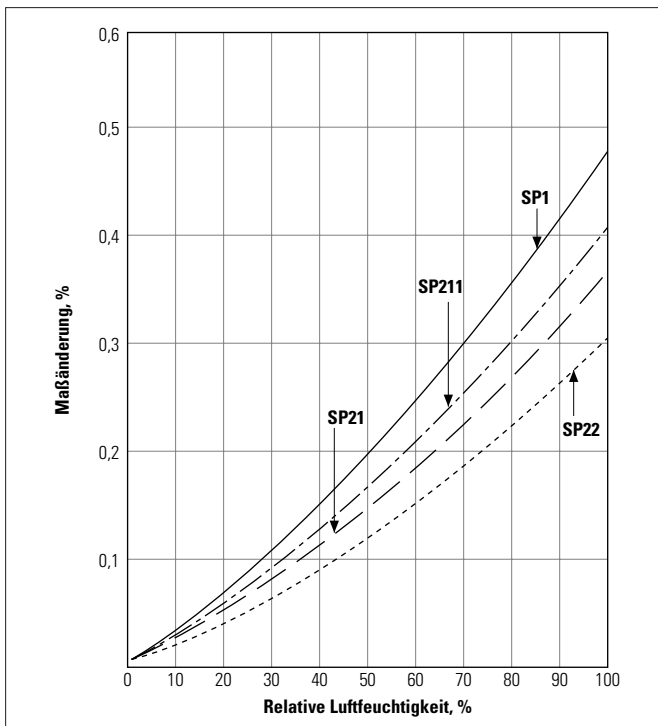


Abb. 27 Direktgeformtes SP Polyimid. Typische Maßänderung bei relativer Luftfeuchtigkeit im Gleichgewichtszustand, 23°C

Thermische Ausdehnung

Die lineare Maßänderung in Abhängigkeit von der Temperatur wird in Abbildung 28 für Halbzeug aus SP Polyimid und in Abbildung 29 für direktgeformtes Polyimid angegeben. Jedes Diagramm enthält den mittleren Wärmeausdehnungskoeffizienten über einen Temperaturbereich von 23°C bis 300°C. Der Koeffizient für jeden anderen Temperaturbereich kann leicht abweichen und aus den Kurven bestimmt werden, indem die prozentuale Maßänderung über den gewünschten Bereich durch 100 geteilt und mit der Temperaturänderung in Grad (ΔT) multipliziert wird.

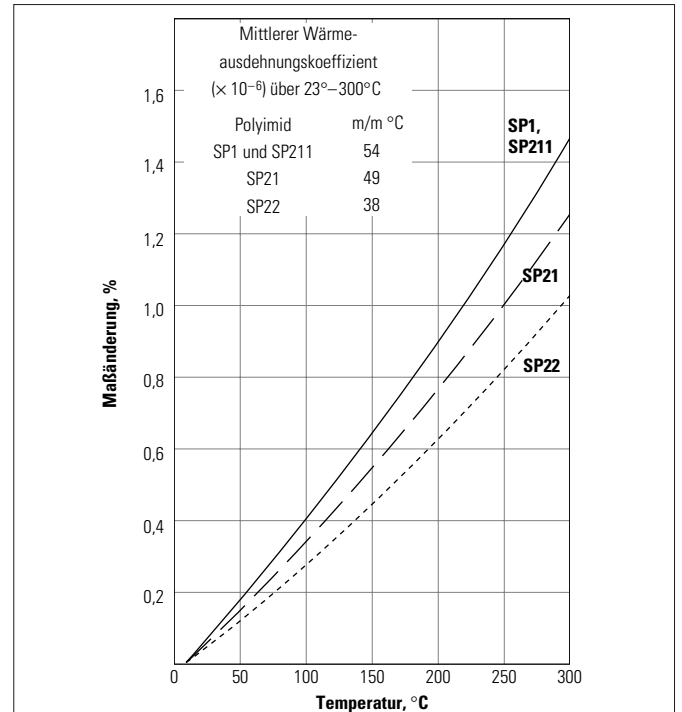


Abb. 28 Halbzeug aus SP Polyimid. Lineare Wärmeausdehnung, ASTM D696

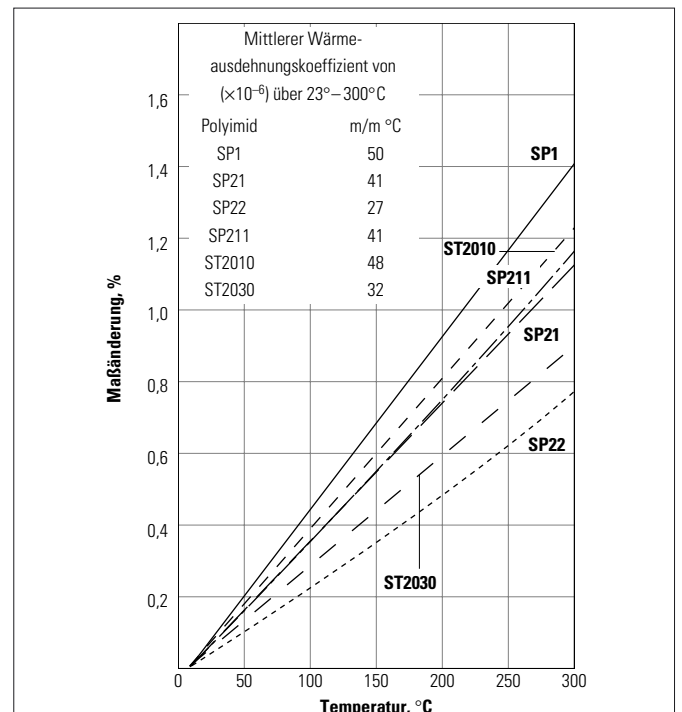


Abb. 29 Direktgeformte SP und ST Polyimide. Lineare Wärmeausdehnung (\perp zur Preßrichtung) ASTM D696

Bei allen Typen ist die thermische Ausdehnung von direktgeformten Teilen geringer als bei Teilen aus Halbzeug – eine Folge der bereits erwähnten «Richtungsabhängigkeit» von direktgeformten Teilen.

Graphit als Füllstoff reduziert die thermische Ausdehnung. Daher weisen SP21 und SP22 Polyimide eine niedrigere thermische Ausdehnung auf als ungefülltes SP1. Der Wärmeausdehnungskoeffizient von SP22 nähert sich dem von Aluminium an und der von SP262 dem von Stahl.

Dauerfestigkeit und Schlagfestigkeit

Werden Werkstoffe zyklisch belastet, neigen sie bereits bei Spannungen zum Versagen, die unterhalb ihrer Reißfestigkeit liegen. Abbildung 30 zeigt die Spannungswerte bis zum Bruch bei Teilen aus Halbzeugen von SP1 und SP21 Polyimid nach 10⁵ bis 10⁷ Zyklen Lastwechseln bei Temperaturen bis 260°C. Die Proben wurden einer Zug- und Druckbelastung mit einer Frequenz von 1800 Lastwechseln pro Minute unterworfen. Diese Frequenz führt zu keiner oder nur zu einer geringfügigen Überhitzung der Probe, die einen vorzeitigen Bruch verursachen könnte.

Obwohl die mit Prüfverfahren ermittelten Werte bei der Konstruktion von Teilen als Richtlinie dienen können, sollten sie nicht verwendet werden, ohne die Umgebungsbedingungen und Spannungskonzentrationen zu berücksichtigen. Während Proben in der Regel glatte Oberflächen aufweisen, können Kerben, Kratzer, Löcher oder scharfe Kanten Spannungskonzentrationen hervorrufen. Kein Dauerversuch kann die wirkliche oder simulierte Erprobung eines Teiles unter Betriebsbedingungen ersetzen.

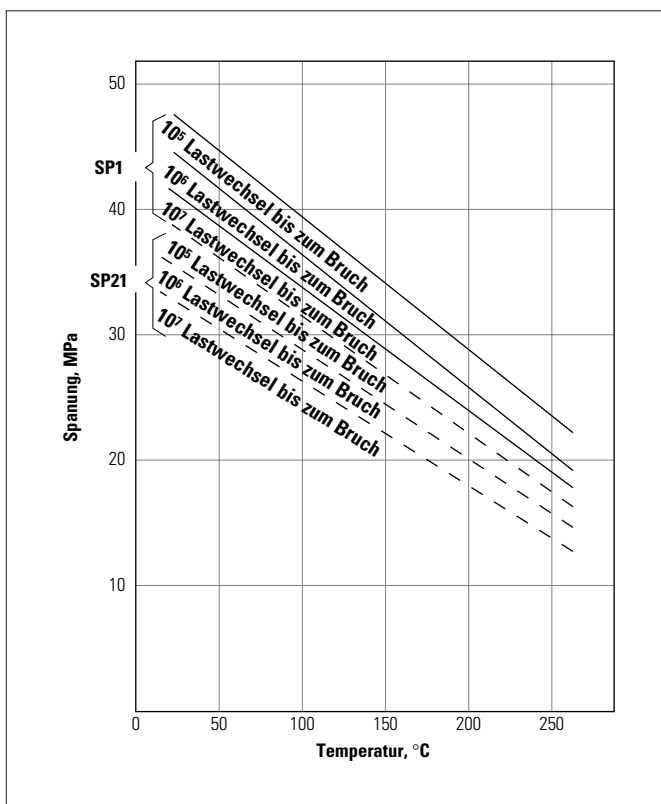


Abb. 30 Halbzeug aus SP Polyimid. Typische Dauerfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur bei zyklischer Zug- und Druckbelastung, 1800 Lastwechsel/min (30 Hz)

Vorhersagen über die Schlagfestigkeit sind schwierig, da die Teilegeometrie, Spannungskonzentrationen und die Belastungshöhe insgesamt einen Einfluß ausüben. Um die Schlagfestigkeit zu erhöhen, sollten Teile so konstruiert werden, daß sie eine maximale Lastaufnahme fläche aufweisen. Wird ein Bauteil flexibel ausgelegt, ist es außerdem hilfreich, die Fläche zu erhöhen, über die sich die Schlagenergie verteilt.

Wie die meisten anderen Kunststoffe sind SP und ST Polyimide kerbempfindlich, wie die Kerbschlagzähigkeitswerte nach Izod in den Tabellen 1 und 3 zeigen. Scharfe Kanten und andere spannungserhöhende Formen sind zu vermeiden, wie es für die meisten Werkstoffe gilt.

Elektrische Eigenschaften

Aufgrund ihrer Kombination von sehr guten elektrischen Eigenschaften, hoher Festigkeit und hervorragender Wärme- und Strahlungsbeständigkeit eignen sich Teile aus VESPEL® ideal für elektrische Anwendungen unter schwierigen Betriebsbedingungen. Noch wichtiger ist, daß Teile aus VESPEL® ihre guten elektrischen Eigenschaften bei hohen Temperaturen behalten.

Die Dielektrizitätszahl (Abb. 31) nimmt schrittweise von 3,5 bei Raumtemperatur auf 3,0 bei 260°C ab. Bei einer gegebenen Temperatur bleibt die Dielektrizitätszahl im wesentlichen

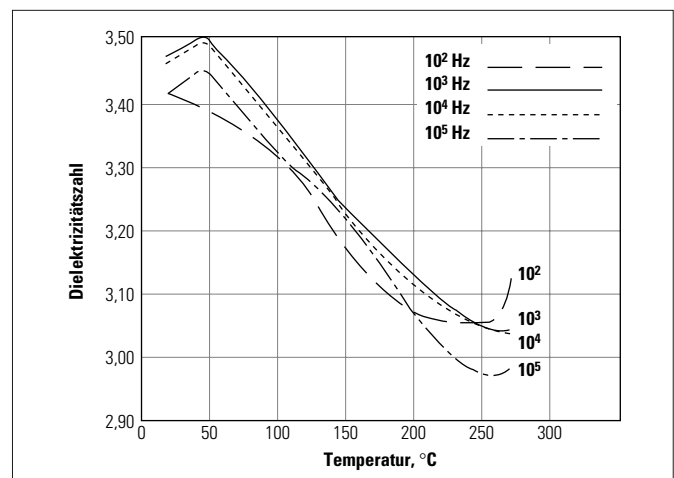


Abb. 31 Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit der Temperatur (SP1), ASTM D150

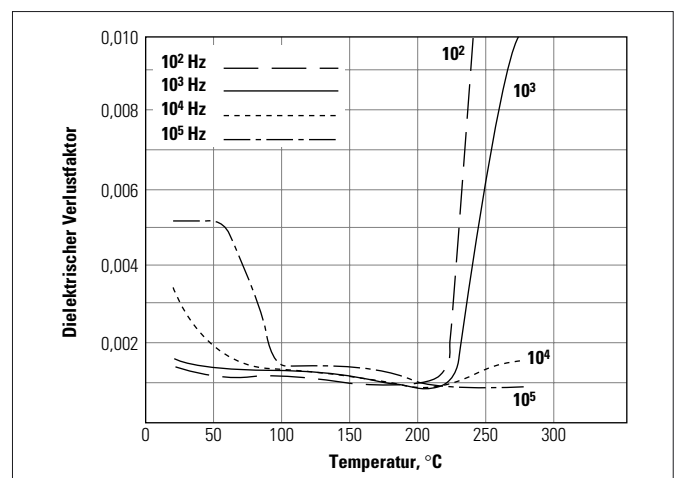


Abb. 32 Dielektrischer Verlustfaktor in Abhängigkeit der Temperatur (SP1), ASTM D15

unverändert bei Frequenzveränderungen im Bereich von 10^2 bis 10^5 Hz. Der dielektrische Verlustfaktor (Abb. 32) wird sowohl von der Temperatur als auch von der Frequenz beeinflusst. Bis 100°C steigt der Verlustfaktor mit ansteigender Frequenz. Von 100 bis 200°C hat die Frequenz im wesentlichen keinen Einfluß, während der Verlustfaktor bei über 200°C mit steigender Frequenz abnimmt. Sowohl die Dielektrizitätszahl als auch der dielektrische Verlustfaktor steigen mit erhöhtem Feuchtigkeitsgehalt an.

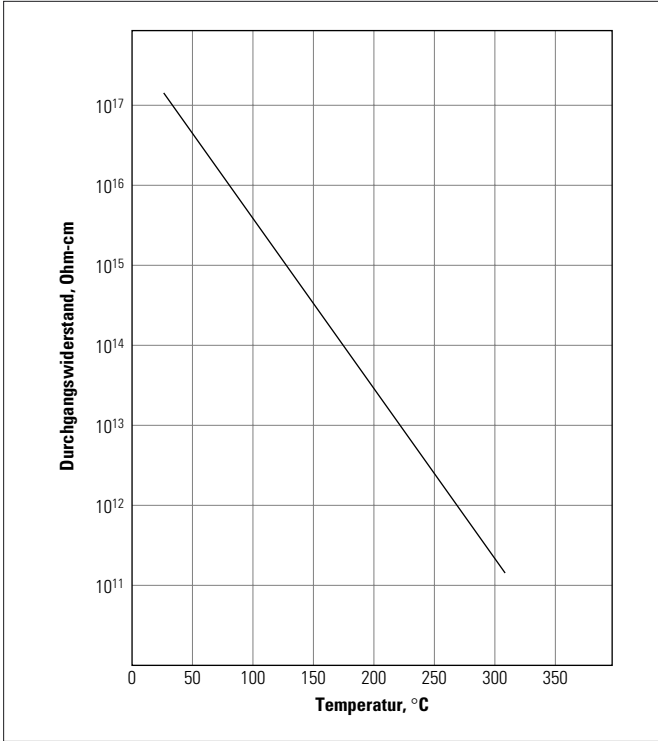


Abb. 33 Halbzeug aus SP1 Polyimid. Durchgangswiderstand in Abhängigkeit der Temperatur, ASTM D257

Bei 10^3 Hz und Raumtemperatur beträgt zum Beispiel die Dielektrizitätszahl eines trockenen Prüfstabes (aus SP1 Polyimid) 3,1 und der Verlustfaktor 0,001. Bei einem Feuchtigkeitsgehalt von 2,4% (erreicht nach 300 Stunden Eintauchen in Wasser bei Raumtemperatur) liegen diese Werte jeweils bei 4,0 und 0,002. Ein Trocknen ergibt wiederum die ursprünglichen Werte. Der Feuchtigkeitsgehalt hat einen relativ geringen Einfluß auf die Durchgangs- und Oberflächenwiderstände.

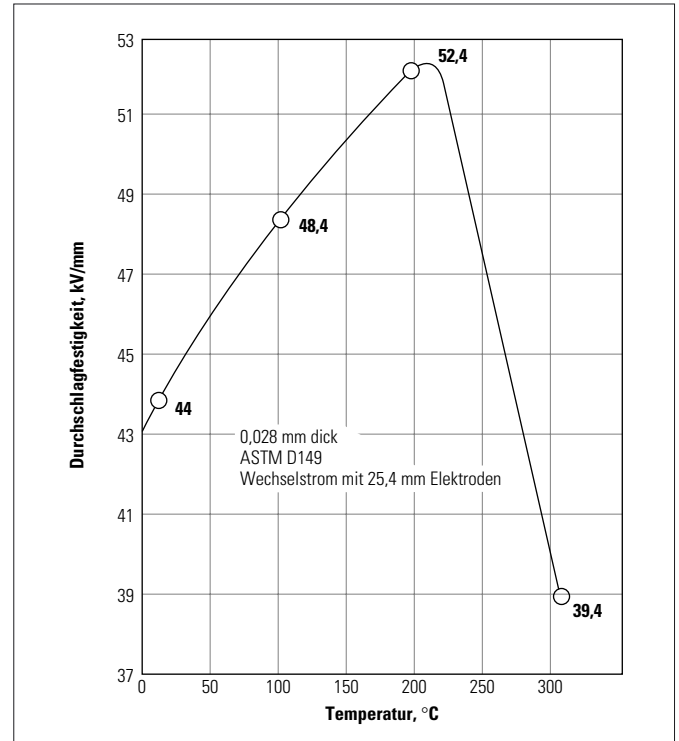


Abb. 35 Halbzeug aus SP1 Polyimid. Durchschlagfestigkeit in Luft in Abhängigkeit der Temperatur, ASTM D149

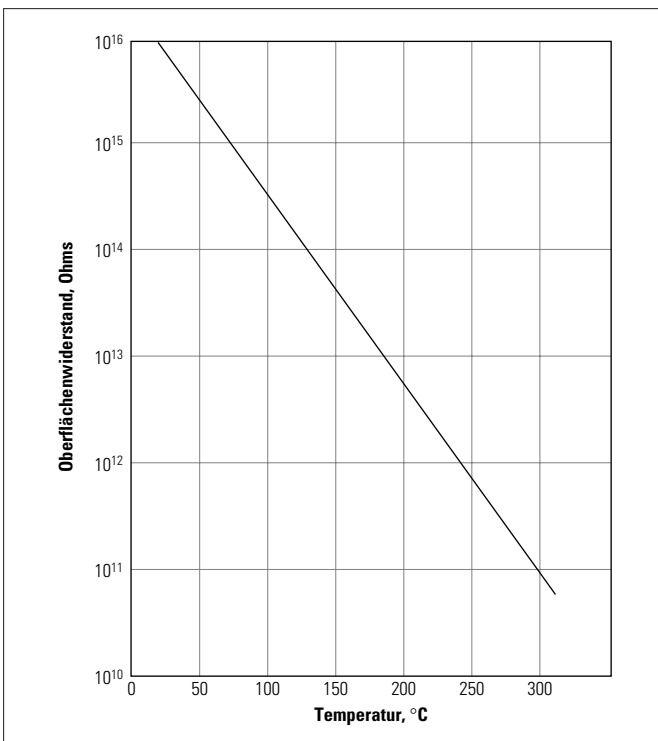


Abb. 34 Halbzeug aus SP1 Polyimid. Oberflächenwiderstand in Abhängigkeit der Temperatur, ASTM D257

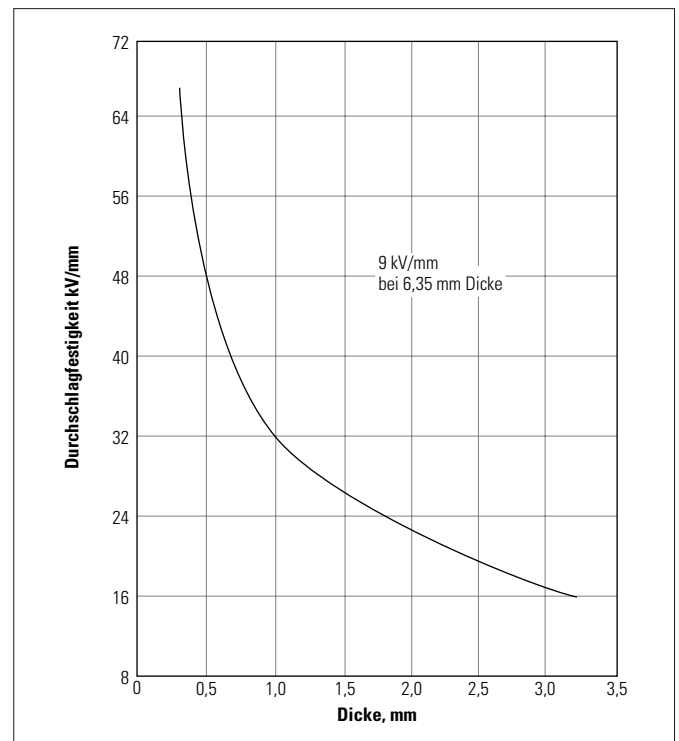


Abb. 36 Halbzeug aus SP1 Polyimid. Durchschlagfestigkeit in Abhängigkeit von der Dicke, ASTM 149 – in A-8 Öl

Der Durchgangswiderstand von Proben aus ungefüllten Polyimiden beträgt 10^{17} Ohm-cm bei Raumtemperatur (Abb. 33). Dieser Wert nimmt linear auf 10^{11} Ohm-cm bei 300°C ab. Der Oberflächenwiderstand (Abb. 34) beträgt 1016 Ohm bei Raumtemperatur und reduziert sich linear auf 5×10^{10} bei 300°C .

Die Lichtbogenfestigkeit von Teilen aus VESPEL[®] ist derjenigen von Fluorkohlenstoffharzen und Polyäthylen überlegen. So beträgt die Standzeit unter einer Korona-Entladung von 8 kV/mm bei 60 Hz und Raumtemperatur 2200 Stunden.

Chemikalienbeständigkeit

Teile aus VESPEL[®] SP zeigen eine gute Beständigkeit gegen eine Vielzahl von chemischen Stoffen. Die in Tabelle 5 aufgeführten Zugfestigkeitswerte wurden bei Prüfungen nach ASTM Methode D 543-67, «Beständigkeit von Kunststoffen gegen chemische Reagenzien», ermittelt.

Verbesserte Chemikalienbeständigkeit

Teile aus VESPEL[®] ST zeichnen sich zudem durch eine verbesserte Chemikalienbeständigkeit (insbesondere in Säuren und Basen) und Hydrolysestabilität aus, während die ausgezeichnete Lösungsmittelbeständigkeit von Teilen aus SP Polyimid bewahrt wird.

A. Lösungsmittel

1. Organische Lösungsmittel haben generell einen geringen Einfluß auf die mechanische und Dimensionsstabilität von Polyimidteilen.
2. Chlorierte und fluorierte Lösungsmittel wie Perchlorethylen, Trichlorethylen und Axarel^{®*} werden für die Reinigung der Oberfläche von VESPEL[®] Teilen empfohlen.
3. Lösungsmittel auf Kohlenwasserstoffbasis wie Toluol und Kerosin haben keinen Einfluß auf Polyimide.
4. Bei hohen Temperaturen können einige Lösungsmittel, die funktionelle Gruppen wie m-Cresol und Nitrobenzol enthalten, ein Quellen der SP Teile verursachen, ohne jedoch ihre mechanische Festigkeit wesentlich zu reduzieren.
5. Hier einige Lösungsmittel, die getestet wurden:

Perchlorethylen: 1900 Stunden bei 100°C
100% Zugfestigkeit
0,4% Gew.-Verlust

Toluol 1900 Stunden bei 100°C
85% Zugfestigkeit
0,1% Gew.-Verlust

Ethanol: 1900 Stunden bei 100°C
100% Zugfestigkeit
0,2% Gew.-Zunahme

Diethylketon 1900 Stunden bei 100°C
75% Zugfestigkeit
0,3% Gew.-Zunahme

JP-4 Triebwerk-
kraftstoff: 1900 Stunden bei 100°C
80% Zugfestigkeit
0,8% Gew.-Verlust

o-Dichlorbenzol 1000 Stunden bei 100°C
100% Zugfestigkeit
2,4% Gew.-Zunahme

m-Cresol: 1000 Stunden bei 100°C
75% Zugfestigkeit
3% Dimensionszunahme

Nitrobenzol 1000 Stunden bei 100°C
85% Zugfestigkeit
9% Gew.-Zunahme
2,5% Dimensionszunahme

B. Öle

1. **Triebwerköle:** Teile aus SP1 und SP21 wurden einem MIL L 7808 Öl und einem Öl Typ 2 bei 260°C ausgesetzt. In beiden Ölen behielt SP1 60% seiner Zugfestigkeit und 30% seiner Dehnung nach 600 Stunden, während SP21 jeweils 90% und 70% dieser Eigenschaften behielt. Nach 1000 Stunden betrug die Zugfestigkeit von SP1 30% und von SP21 60%. SP1 behielt eine Dehnung von 10% und SP21 eine Dehnung von 30%. Beide Typen hatten nach 1000 Stunden in den MIL L 7808 Ölen etwa 0,2% und im Öl Typ 2 0,5% an Gewicht zugenommen. Die Abmessungen parallel zur Preßrichtung stiegen bis 0,3%, während sie senkrecht zur Preßrichtung bis 0,1% abnahmen.
2. **Silikonflüssigkeiten:** Bei 260°C behielt SP1 70% seiner Zugfestigkeit und 35% seiner Dehnung nach 1000 Stunden. SP21 behielt 85% seiner Zugfestigkeit und 50% seiner Dehnung unter den gleichen Bedingungen. Beide Typen nahmen 0,3% an Gewicht zu. Die Dimensionszunahme parallel zur Preßrichtung betrug 0,2 Prozent, während sie in der Richtung senkrecht dazu unter 0,1% lag.
3. **Raffiniertes Mineralöl:** Bei 200°C betrug die Zugfestigkeit von SP1 nach 1000 Stunden 70% und von SP21 90%. SP1 behielt eine Dehnung von 40% und SP21 von 65%. Gewichtszunahmen betragen etwa 0,3%. Die Dimensionszunahme lag bei etwa 0,1% parallel zur Preßrichtung und unter 0,1% senkrecht zur Preßrichtung.
4. **Polyphosphatester-Hydraulikflüssigkeit:** nach 1000 Stunden bei 120°C waren keine Veränderungen der Eigenschaften festzustellen.
5. **Tricresylphosphat (Ölzusatz):** nach 1000 Stunden bei 260°C nahm SP1 1,5% an Gewicht zu und behielt 80% seiner Zugfestigkeit. Die Dimensionszunahme betrug etwa 0,25%.

C. Wasser

1. Bei 100°C werden die Zugfestigkeit und Dehnung von SP Polyimid nach etwa 500 Stunden auf jeweils 45% und 30% der ursprünglichen Werte reduziert und stabilisieren sich auf diesem Niveau.
2. Meist läßt sich der Abfall der Zugfestigkeit durch die Einwirkung von 100°C heißem Wasser durch Trocknung beheben, was darauf hinweist, daß die Verschlechterung der Eigenschaften nicht auf chemische Veränderungen zurückzuführen ist.
3. Teile aus VESPEL[®] eignen sich für Anwendungen, bei denen sie Wassertemperaturen bis 100°C ausgesetzt sind. Voraussetzung ist jedoch, daß die Belastungen niedrig genug sind, so daß die reduzierten mechanischen Eigenschaften berücksichtigt werden.

* Axarel ist ein Marke von E.I. du Pont de Nemours and Company für seine Fluorkunststoffe.

- Wie alle Polyimide sind auch SP Polyimide anfällig für Hydrolyse. Starke Risse können sich in Wasser oder Dampf bei Temperaturen über 100°C bilden.

D. Säuren

- Konzentrierte Mineralsäuren verursachen in relativ kurzer Zeit eine starke Versprödung von Polyimidteilen
- Konzentrierte (38%) Salzsäure reduzierte nach einer Einwirkungszeit von 120 Stunden bei Raumtemperatur die Zugfestigkeit um 30% und die Dehnung um 40%.
- Konzentrierte (70%) Salpetersäure reduzierte nach einer Einwirkungszeit von 120 Stunden bei Raumtemperatur die Zugfestigkeit um 60% und die Dehnung um 75%. Diese starken Abfälle beruhen wahrscheinlich teilweise auf einer Oxidation durch die Säure.
- Fünfprozentige (5%) Salzsäure reduzierte die Zugfestigkeit von SP um 80% nach 1900 Stunden bei 100°C.
- Fünfzehnprozentige (15%) Essigsäure reduzierte die Zugfestigkeit von SP um 80% nach 1900 Stunden bei 100°C.
- In der Regel haben verdünnte Salzlösungen und anorganische Salzlösungen auf Wasserbasis mit sauren pH-Werten in etwa die gleichen Auswirkungen auf SP Polyimid wie Wasser.

E. Basen

- In der Regel sind Polyimide anfällig gegen die Einwirkung von Alkalien. Wässrige Basen greifen Teile aus VESPEL® chemisch an und verursachen eine schnelle Verschlechterung der Eigenschaften.
- Eine 5%ige Lösung von Natriumhydroxid reduzierte die Zugfestigkeit von SP um 45% nach einer Einwirkungszeit von 120 Stunden bei Raumtemperatur. Die normalerweise braune Farbe der SP Oberfläche wurde schwarz und es trat eine Gewichtszunahme von 27% auf.
- Alle Basen, einschließlich Salzlösungen, mit einem pH-Wert von 10 oder höher sollten vermieden werden.
- Von dem Gebrauch von Reinigungsmitteln mit basischem Charakter wird abgeraten.
- Nicht-wässrige Basen wie wasserfreies Ammoniak (flüchtig oder Dampf) und Hydrazine greifen Polyimid unmittelbar SP chemisch an.
- Starke Ribbildungen von SP Polyimid traten nach relativ kurzer Einwirkungszeit von flüssigem, wasserfreiem Ammoniak auf.
- Blasen und sonstige Anzeichen eines chemischen Angriffes bildeten sich durch die Einwirkung von Ammoniakdampf.
- Sowohl flüssige als auch gasförmige unsymmetrische Dimethylhydrazine reduzierten nach relativ kurzer Zeit die Zugfestigkeit um 55% und die Dehnung um 35%.
- Primäre und sekundäre Amine können Teile aus SP chemisch angreifen.
- Alle basischen Chemikalien sollten in Anwendungen von Polyimidteilen vermieden werden.

F. Oxidationsmittel

- Chemische Reagenzien, die als starke Oxidationsmittel wirken, können selbst unter günstigsten Bedingungen ein Oxydieren der VESPEL® Teile verursachen. (Siehe Säuren, Auswirkung von Salpetersäure).
- Stickstoff-Tetroxid (N₂O₄) verursachte nach 120 Stunden bei Raumtemperatur eine Verminderung von 40% sowohl der Zugfestigkeit als auch der Dehnung. Außerdem nahm das Gewicht um drei Prozent zu.

Tabelle 5 Einfluß von Chemikalien

Medium	°C	Zeit Stunden	Von der ursprüngl. Zugfestigkeit verbliebene Werte in %
Organische Lösungsmittel			
M-Cresol	200	1000	75 ¹
o-Dichlorbenzol	180	1000	100
Diethylketon	100	1900	100
Ethanol	100	1900	100
Nitrobenzol	215	1000	85 ¹
Perchloroethylen	100	1900	100
Toluol	100	1900	85
Hydrauliköle			
Hydraulikflüssigkeit («Skydrol») Polyphosphatester	120	1000	100
JP-4 Düsentreibstoff	100	1900	80
Triebwerköle (MIL L 7808G)	260 260	600 1000	60 (90) ² 30 (60) ²
Mineralöl	200	1000	70 (90) ²
Silikon-Flüssigkeit	260	1000	80
Tricresylphosphat (Ölzusatz)	260	1000	80
Säuren			
Säuregehalt, 15%	100	1900	20
Salzsäure, 38%	23	120	70
Salzsäure, 5%	100	1900	15
Salpetersäure, 70%	23	120	40
Basen			
Natriumhydroxid, 5%	23	120	55
Oxidationsmittel			
Stickstofftetroxid	23	120	60

¹ Quellen.

² SP21 Polyimid (15% Graphitfüllung).

G. Sauerstoffverträglichkeit

Eine wichtige Eigenschaft von SP21 Polyimid ist seine Verträglichkeit mit flüssigem und gasförmigem Sauerstoff.

SP21 Polyimid von DuPont wurde von der National Aeronautics and Space Administration getestet und erfüllt die MSFC-SPEC-106B, «Testing Compatibility of Materials for Liquid Oxygen Systems». Zur Zeit beruht diese Einstufung auf einer ausgewählten SP-Charge.

In ähnlicher Weise wurde SP21 vom Naval Air Engineering Center, einer Abteilung der Navy, getestet und erwies sich als verträglich gemäß MIL-V-5027C, «Non-Metallic Materials Compatible with Oxygen».

Der anderen Labors wurde auch festgestellt, daß ST2010 ebenso wie SP21 mit Sauerstoff verträglich ist.

Wahrscheinlich werden auch andere gefüllte SP Polyimid-typen obige Spezifikationen erfüllen, wurden jedoch noch nicht geprüft. Ungefülltes SP1 Polyimid erfüllt diese Normen nicht.

Sonstige Eigenschaften

Witterungsbeständigkeit

Durch dauernde Aussetzung im Freien vermindert sich die Zugfestigkeit von Teilen aus SP Polyimid. Sie sollten daher für solche Anwendungen nur nach eingehenden Prüfungen eingesetzt werden. Teile aus VESPEL® sind hundertprozentig beständig gegen Schimmelpilzbefall und Prüfstäbe erfüllten die Anforderungen der MIL-E 5272 und der Federal Specification CCC-T-191b, Methoden 5762 und 5751 für die Beständigkeit gegen Mehltau und Fäulnis.

Toxikologische Aspekte

An Labortieren konnten keine Vergiftungserscheinungen nach dem Einatmen und Schlucken von SP Polyimiden oder nach einem Hautkontakt festgestellt werden. Eine Zulassung für den Einsatz von Teilen aus VESPEL® in Kontakt mit Nahrungsmitteln bei der Food and Drug Administration wurde nicht beantragt.

SP Polymer ist im Vergleich zu den meisten organischen Werkstoffen extrem wärmebeständig, kann jedoch Kohlenstoffmonoxid (CO) bei der Verbrennung freisetzen. Um sicherzustellen, daß die CO-Konzentrationen den akzeptierbaren Sicherheitsbereich nicht überschreiten, ist auf eine ausreichende Entlüftung zu achten, wenn Teile aus VESPEL® in abgegrenzten Räumen hohen Temperaturen ausgesetzt werden.

Ausgasung

Sobald die absorbierte Feuchtigkeit aus VESPEL® Teilen entfernt wurde, ist der Gewichtsverlust im Vakuum bei hohen Temperaturen sehr gering. NASA-Tests im Lewis Forschungszentrum ergaben bei Prüfstäben, die zunächst bei 93°C getrocknet wurden, einen Gewichtsverlust von weniger als 10^{-10} g/cm² bei Temperaturen unterhalb von 260°C. Bei 350°C betrug der Gewichtsverlust 10^{-7} g/cm²/s.

Entflammbarkeitseinstufung, UL 94

VESPEL® ist in der Klasse UL 94 nach 5V und V-0 eingestuft. Dies gilt für SP1, SP21, SP22 und SP211 mit einer Mindestdicke von 1,6 bis 1,7 mm. ST Produkte wurden bisher noch nicht bewertet.

Lagerung

Um die maximalen Eigenschaftswerte zu gewährleisten, werden Fertigteile und Halbzeuge aus VESPEL® am besten unter normalen Umgebungsbedingungen in Räumen gelagert. Die Temperaturen sollten 40°C nicht überschreiten. Empfohlen wird, die Einwirkung von Sonnenlicht, UV-Licht oder anderer Strahlung sowie direkten Kontakt mit Wasser und Chemikalien zu vermeiden.

Sauerstoffindex (LOI)

ASTM D 2863

Definition:

LOI ist die minimale Sauerstoff-Konzentration in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch, bei der ein vertikal angeordneter Prüfkörper abbrennt.

VESPEL® SP1	53% O ₂
VESPEL® SP21	49% O ₂

Glühdrahtprüfung, UL 746 A

Die VESPEL® Polyimide SP1, SP21, SP22 und SP211 sind bei 1,6 und 3,2 mm Dicke bei 0 eingestuft. ST Polyimid wurde bisher noch nicht bewertet.

Direktformverfahren

Für die Großserienfertigung von Präzisionsteilen aus VESPEL® ist das von DuPont entwickelte Direktformverfahren besonders wirtschaftlich. Beim Direktformen werden Herstellungsverfahren verwendet, wie sie für die Produktion von Präzisionsteilen oder Rohlingen in der Pulvermetallurgie üblich sind. Diese sind nahezu identisch mit den aus Halbzeugen bearbeiteten Teilen mit dem Vorteil, daß Materialabfälle entweder völlig vermieden oder auf ein Minimum reduziert werden. In den meisten Fällen ist das Formgebungsverfahren so präzise, daß keine Nachbearbeitung mehr erforderlich ist. Zwar lassen sich für die entsprechenden Mindeststückzahlen keine Grundregeln aufstellen, da jeder Auftrag individuell bearbeitet wird. Einsparungen werden in der Regel jedoch ab 1000 Teilen pro Auftrag erzielt.

Die erforderlichen Präzisionswerkzeuge zur Herstellung der Formteile werden von DuPont gekauft und bleiben im Besitz von DuPont. Der Kunde wird jedoch mit der Konstruktions- und Entwicklungsarbeit belastet, die für die Auslegung und Prüfung der Werkzeuge erforderlich ist.

Die direkte Formgebung von Teilen ist mit Einschränkungen verbunden. Nicht alle Formen und Größen lassen sich herstellen, obwohl viele Teile, die früher als nicht herstellbar galten, heute routinemäßig gefertigt werden.

Einfache geometrische Teile wie Buchsen und Scheiben mit oder ohne Bohrungen sowie Teile, deren Umrisse sich mit identischen oberen und unteren Preßstempeln herstellen lassen, werden routinemäßig gefertigt. Kernstangen werden für Bohrungen mit allen radialen Geometrien verwendet.

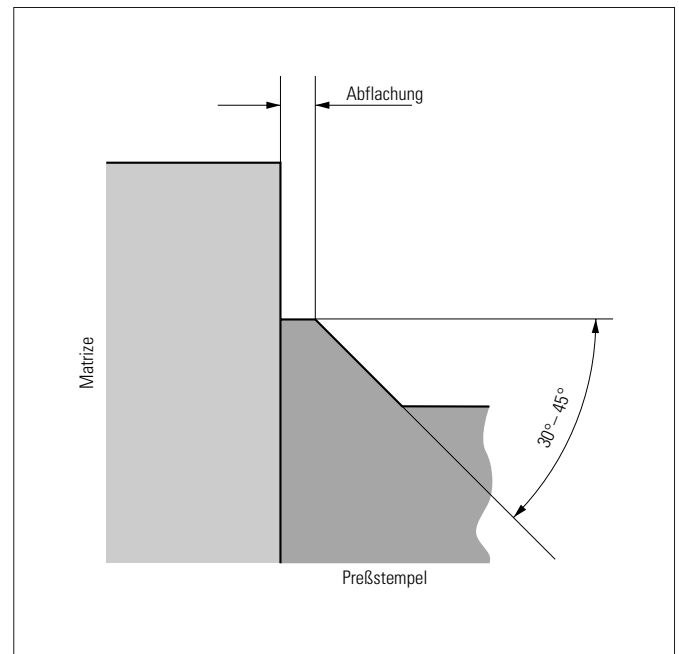
Abflachungen, Keile und Verzahnungen lassen sich so unkompliziert formen wie runde Löcher. In einigen Fällen können Sacklöcher vorgesehen werden. Eine kleine Stufe oder Vertiefung läßt sich in ein flaches Teil einbringen, wobei die unter dem Abschnitt «Gestaltungsrichtlinien» beschriebenen Einschränkungen zu berücksichtigen sind.

Mehrflächige Teile erfordern mehrere Preßbewegungen, da das Pulver nicht sofort von einer Ebene zur anderen Ebene fließt. Zweiflächige Teile, wie zum Beispiel Flanschbuchsen, lassen sich herstellen. Solche Teile erfordern zwei Preßbewegungen von unten und eine Preßbewegung von oben. Teile mit mehr als zwei Ebenen erfordern in der Regel eine Nachbearbeitung.

Die Teilegeometrie muß ein Ausstoßen aus dem Preßwerkzeug erlauben. Nicht gepreßt werden können Hinterschneidungen, rechtwinklig zur Preßrichtung angeordnete Löcher und Gewinde. Häufig lassen sich jedoch nicht formbare Konturen nachträglich bearbeiten, ohne den wirtschaftlichen Vorteil, den das Direktform-Verfahren bietet, völlig zu verlieren.

Wandstärken sind eine Funktion der Teilehöhe. Ein höheres Teil erfordert eine dickere Wand, da das Pulver in die Kavität fließen und diese gleichmäßig ausfüllen muß.

Falls abgeschrägte Kanten (Fasen) erforderlich sind, sollte der Winkel ausgehend von der Horizontalen, d.h. im rechten Winkel zur Preßrichtung, 30° nicht überschreiten. Fasen von 45° verkürzen die Lebensdauer des Werkzeugs und erfordern Preßstempel mit einer Abflachung von 0–0,3 mm, um scharfe Kanten zu vermeiden.



Teile mit Dicken bis ca. 58 mm lassen sich im Direktformverfahren herstellen.

Die physikalischen Eigenschaften von direktgeformten Präzisionsteilen aus VESPEL® weichen geringfügig von den Teilen ab, die aus einem Halbzeug bearbeitet werden. Bei den meisten Anwendungen spielt diese geringe Abweichung der Eigenschaftswerte keine Rolle für den Konstrukteur. Liegen jedoch schwierige Anwendungen vor, empfehlen wir eine Erprobung eines aus direktgeformtem Material hergestellten Teils.

Direktgeformte Teile

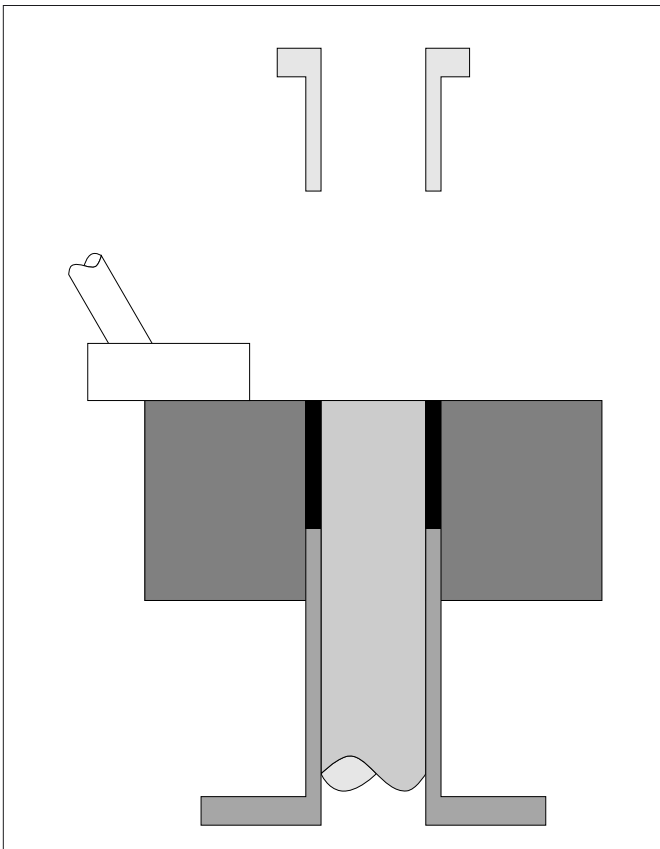
Das von DuPont entwickelte Direktformverfahren wird in der Regel in zwei Schritten ausgeführt.

Schnell laufende vertikale Kniehebelpressen, die mit Formmatrizen ausgerüstet sind, erzeugen Formteile aus Polyimidpulver. Dies ähnelt sehr stark dem Preßvorgang von Keramikpulver. Doch aufgrund der weitaus engeren Toleranzen muß der Preßvorgang streng kontrolliert werden und innerhalb engerer Parameter bleiben. Das Fließverhalten des Pulvers und das elastische Verhalten sind zu berücksichtigen, um eine homogene Dichte und stabile Dimensionen sicherzustellen.

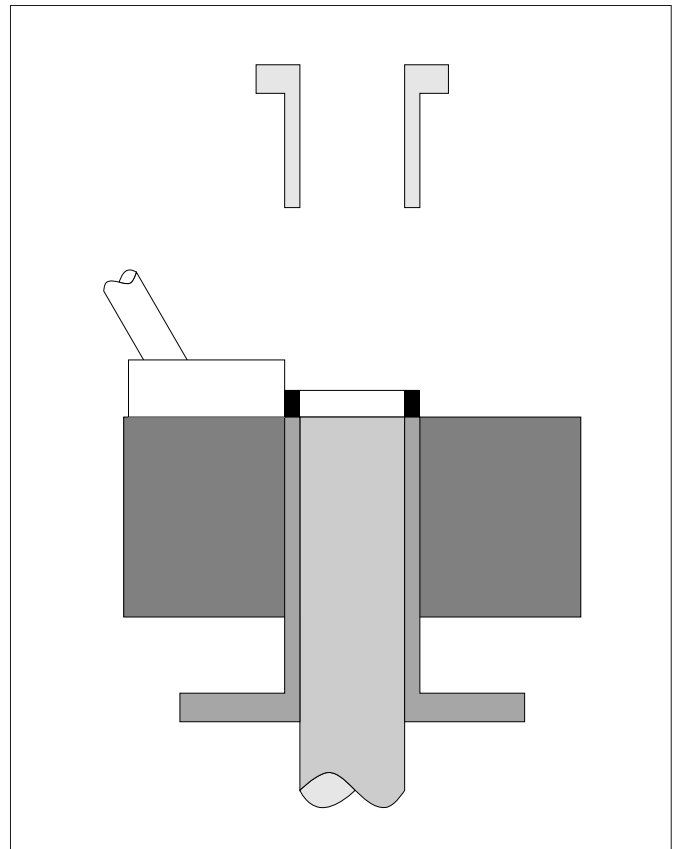
Das aus diesem Verfahren hervorgehende Produkt ist ein massives Teil aus Polyimidpulver mit speziellen Bestandteilen, dessen Eigenschaften von den Einsatzbedingungen bestimmt werden. Eine große Anzahl Rohlinge kann in Kisten oder Behältern ohne Probleme zum nachfolgenden Sinterverfahren weitergeleitet werden.

Die in Metallbehältern gelagerten Teile werden in großen Sinteröfen bei hohen Temperaturen gesintert. Es ist notwendig, daß Sauerstoff bei den hohen Temperaturen ferngehalten wird. Nach einigen Stunden ist der Sinterprozeß abgeschlossen und die Teile besitzen ihre endgültigen Eigenschaften.

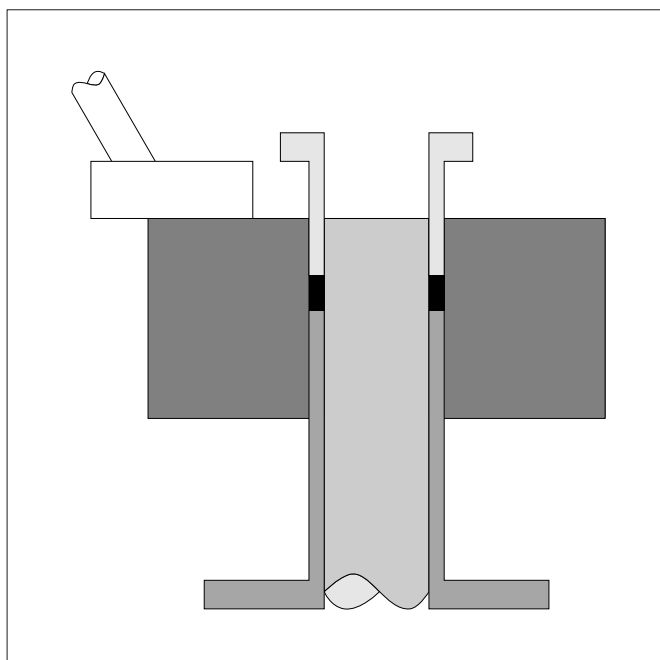
Während des Sinterns sind die Teile entsprechend ihrer Größe, Form und Preßrichtung einer Formschwindung unterworfen. Diese Schwindung ist bereits bei der Konstruktion



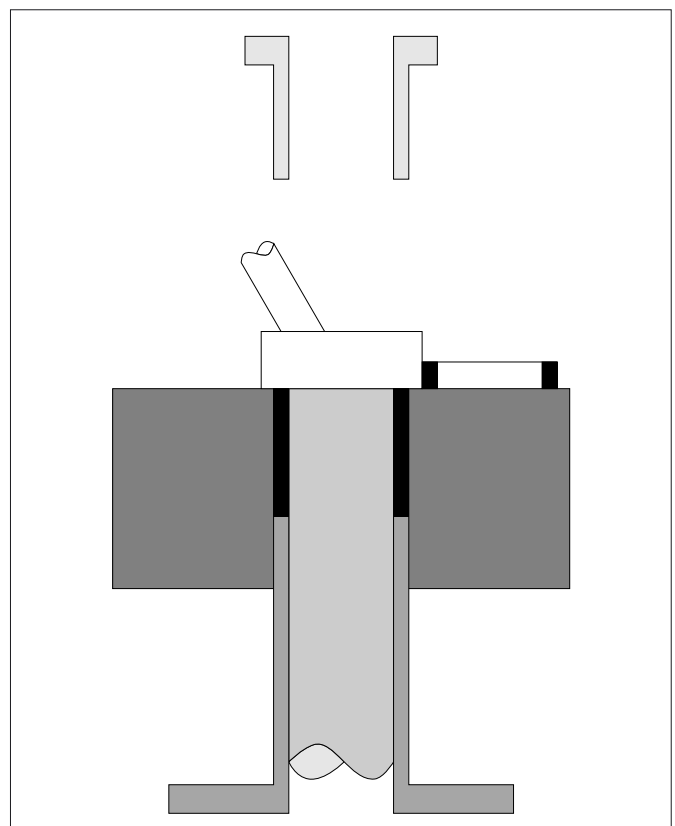
1. Der Füllschuh fährt zurück, nachdem das Pulver in die Matrize gefüllt wurde. Oberer und unterer Stempel befinden sich an ihrer oberen und unteren Position.



3. Der obere Stempel fährt hoch, während der untere Stempel das gepresste «grüne» Teil aus der Matrize preßt.



2. Oberer und unterer Stempel fahren aufeinander zu, um das Pulver zu komprimieren und das Teil zu pressen.



4. Der untere Stempel fährt nach unten, während der Füllschuh über die Matrize fährt, um sie mit Pulver zu befüllen. Gleichzeitig wird das ausgestoßene Teil von der Matrize transportiert.

und Herstellung des Werkzeugs zu berücksichtigen, was ein hohes Maß an Erfahrungen und Kenntnissen erfordert, da verschiedene Füllstoffe die dreidimensionale Formschwindung zusätzlich beeinflussen.

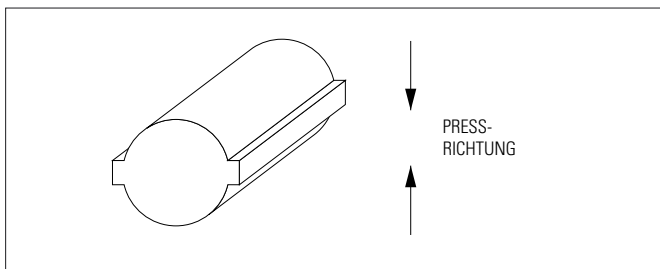
Während der Formschwindung finden einige weitere Veränderungen statt. Der Rohling hat in der Regel die Merkmale und Werkzeugmarkierungen der Oberfläche der Matrize und Stempel. Während des Sinterns verändern sich alle Flächen zu einem leichten Walzprofil mit einer Rauigkeit von etwa Rz 7 (metrisch, DIN 4786). Ein Querschnitt des Rauheitsprofils zeigt unter dem Mikroskop eine Oberfläche, die weichen Sinuslinien sehr ähnlich ist. Daher kann VESPEL® in Kontakt mit Metallteilen in Gleitlagern arbeiten, ohne daß eine zusätzliche Bearbeitung der Lagerflächen nötig ist.

Alle scharfen Kanten des Rohlings werden in einer Form abgerundet, die einem Radius von 0,05 mm ähnelt. Dieses Merkmal ist sehr nützlich, da Teile nicht mit Fasen ausgelegt werden müssen, wie es bei Metallteilen nötig ist.

Entsprechend den Kundenanforderungen werden die Teile einer abschließenden Prüfung unterzogen und dokumentiert. Anschließend werden sie entweder nachbearbeitet oder verpackt und ausgeliefert.

Bedingungen für das Direktformen

Min. Teiledicke:	~1 mm
Max. Teiledicke:	~58 mm*
Max. Außendurchmesser:	~300 mm
Min. Innendurchmesser:	~0,5 mm
Max. Oberfläche	~2800 mm ² kann durch Heißpressen auf ~7000 mm ² erhöht werden
Oberflächengüte	~1 µm (Ra)
Abflachung an Fasen	0–0,3 mm



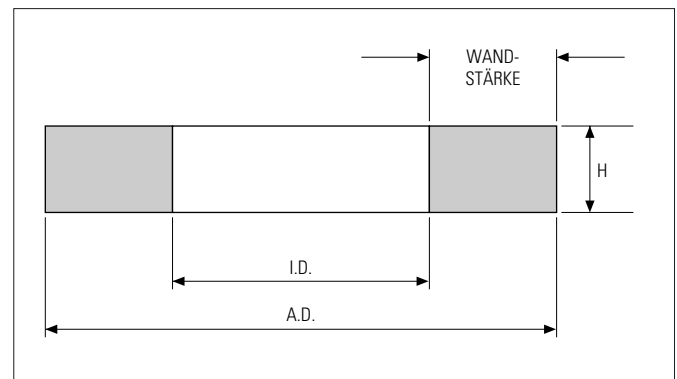
* Zylindrische Teile mit Längen über 58 mm können horizontal statt vertikal gepreßt werden. Diese Teile werden jedoch zwei Abflachungen aufweisen (siehe Zeichnung).

Toleranzen und allgemeine Gestaltungsrichtlinien

Toleranzen und Gestaltungsrichtlinien für typische direktgeformte Teile werden unten dargestellt. Jedes Teil wird jedoch individuell betrachtet, so daß Abweichungen und Ausnahmen je nach Funktion und Betriebsbedingungen der Teile möglich sind.

Standard-Toleranzen

Abmessung	Standard-Toleranz
Durchmesser, mm	µm
7,5–12,5	± 40
12,5–19	± 50
>19	± 65
Höhe, mm	µm
0,4–2,5	± 75
2,5–6,5	± 100
6,5–12,5	± 125
12,5–25	± 150



Anmerkung: Um den Toleranzbereich von VESPEL® optimal auszuschöpfen, legen Sie A.D. und I.D. nicht fest, sondern nur den wichtigsten Durchmesser und die Wandstärke!

Weitere Toleranzrichtlinien (in mm)

Durchmesser	⊙ Konzentrität	→ Rundheit	// Parallelität	∥ Ebenheit*
< 25,4	0,040	0,050	0,040	0,050
25,4 - 50,8	0,050	0,125	0,075	0,125
> 50,8	0,050 + ¹	0,125 + ²	0,075 + ³	0,125 + ²

1 = 0,0005* (d – 50,8) mm
2 = 0,005* (d – 50,8) mm
3 = 0,001* (d – 50,8) mm

* für einfache Teile

Gestaltungsrichtlinien

A

0-0,3
Abflachungen an Fasen

$\phi (30^\circ \pm 2^\circ \text{ empfohlen})$

$D_{\text{max}} = 0,15 H$

$D_{\text{max}} = 0,3 H$

B

Einfache Teile wie Buchsen oder Anlaufscheiben, die mit flachen Stempeln geformt werden können, verursachen geringere Produktionsstörungen.

C

45° Min.

ZU VERMEIDEN

Vorzugsweise 60°

0-0,3

D

H

D

VORZUZIEHEN

a. Fasen mit Winkeln $< 45^\circ$ zur Vertikalen sind zu vermeiden.
b. Abflachungen (0-0,3 mm) sind an der Basis aller 45-60° Fasen erforderlich.
c. Tiefe «D» einer Fase oder die Gesamttiefe von Fasen an beiden Teileenden ist auf maximal 30% der Teilehöhe «H» begrenzt.

D

1,25 Min.

15° Max.

Ein spitzer Winkel (max. 15°) für eine Einführungsschräge läßt sich in den meisten Fällen in einer Matrize formen. Ein kleiner, parallel verlaufender Teil (mindestens 1,25 mm) ist über dem spitzen Winkel erforderlich, um ein Verkeilen des oberen Stempels zu vermeiden.

E

a.

ZU VERMEIDEN

b.

VORZUZIEHEN

a. Hinterschnidungen lassen sich nicht formen.
b. Ein Radius (0 bis 0,5 mm) ist zwischen Flansch und Nabe des Teils erforderlich.

ZU VERMEIDEN

VORZUZIEHEN

F

Siehe Detail

0,3 H Max.

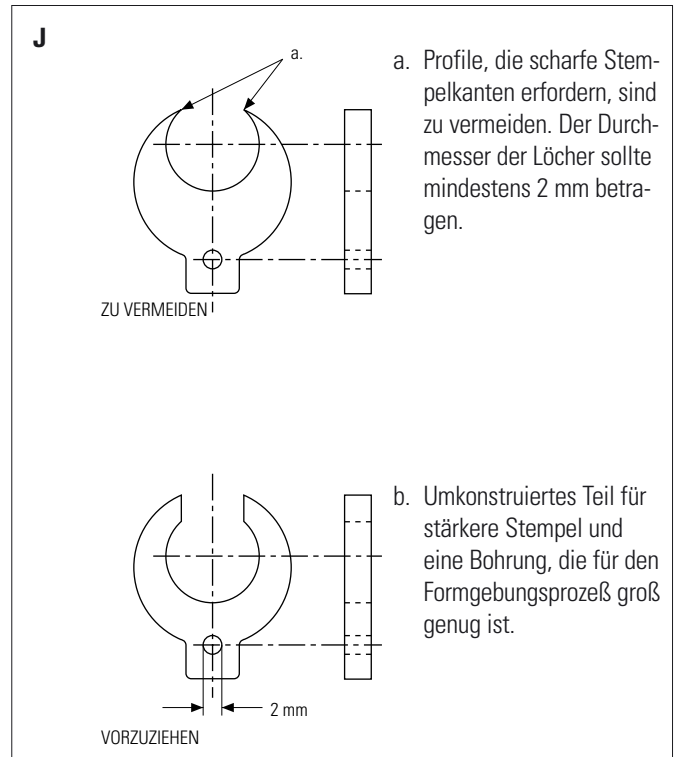
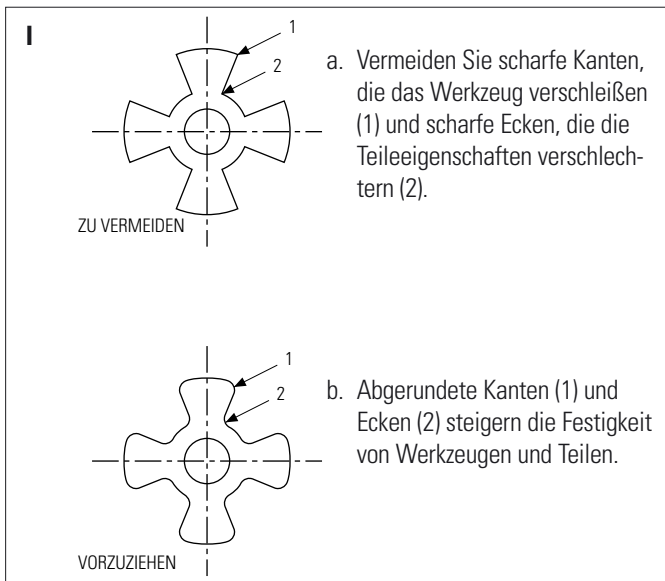
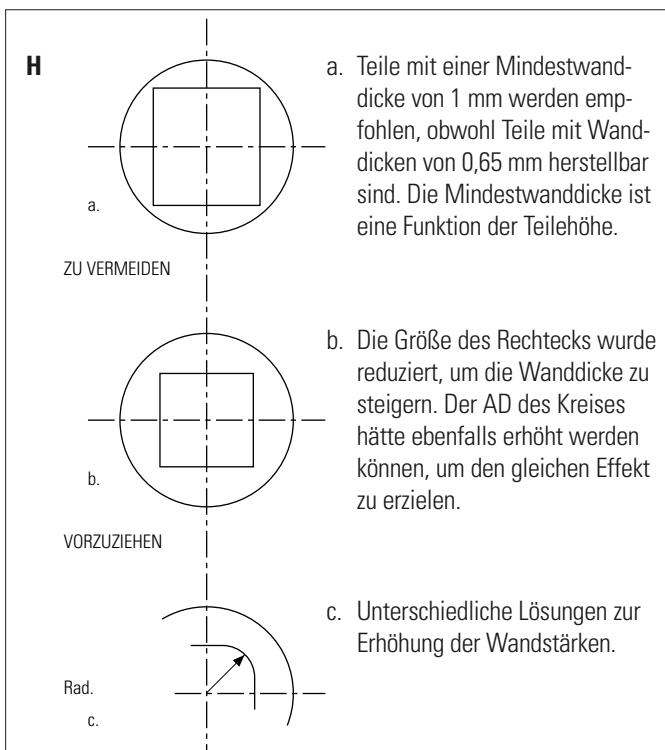
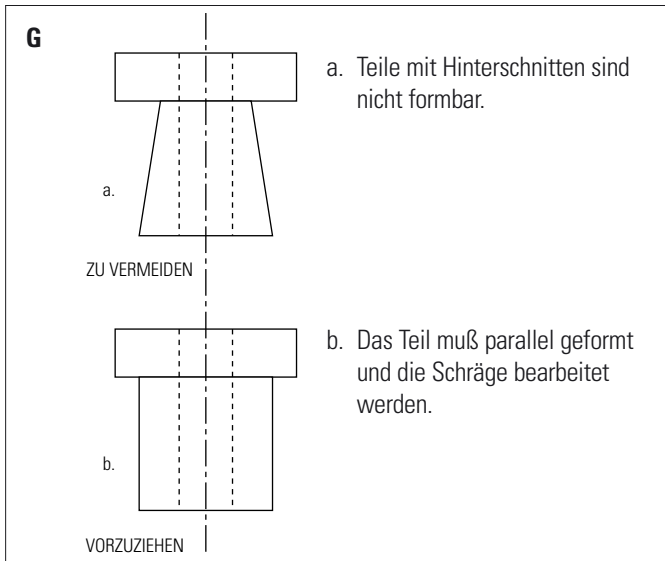
H

Detail

R

Typisch

Gebogene oder halbrunde Nuten lassen sich mit einer maximalen Tiefe von 30% der gesamten Teilehöhe formen.



Nachbearbeitung direktgeformter Teile

Da direktgeformte Teile in Vertikalpressen hergestellt werden, begrenzt der eindimensionale Hub der Presse die Gestaltung dieser Teile.

Aus diesem Grund ist die Form der Preßwerkzeuge einigen Beschränkungen unterworfen. Das Teil darf keine Hinterschnidungen senkrecht zur Preßrichtung aufweisen. Diese würden ein Auswerfen des Teils nach dem Preßhub verhindern.

Im Unterschied zu vielen anderen Polymeren läßt sich VESPEL® mit allen herkömmlichen Werkzeugmaschinen leicht bearbeiten. Jeder Schneidvorgang ist leicht auszuführen und ergibt sehr glatte Oberflächen.

Die Bearbeitung wird auf Kundenanfrage entweder von DuPont oder von einem Werk ausgeführt, das der Kunde bestimmt.

In der Regel sind Toleranzen der Qualität 8 durch die Bearbeitung von VESPEL® Teilen leicht zu erreichen. (Siehe Anhang B für ISO Toleranzen).

Bearbeitete Teile aus Halbzeug

Halbzeuge aus VESPEL® werden von DuPont aus Hochleistungs-SP Polyimid hergestellt und sind als Stäbe, Rohre, Platten, Ringe, Scheiben und Stangen verfügbar (siehe Anhang A).

Bearbeitete Teile aus VESPEL® Halbzeugen eignen sich ideal für die Prototypenherstellung von Teilen bei niedrigen Stückzahlen und komplexen Geometrien. Zu bedenken bleibt jedoch, daß bei einer Stückzahl von über 1000 Teilen eine Herstellung mit dem «Direktformverfahren» von DuPont weitaus kostengünstiger sein kann.

Es ist sehr wichtig, VESPEL® in einer Anwendung zu erproben und das Material zu verwenden (entweder spanend aus Halbzeug bearbeitet oder direktgeformt), das später kommerzialisiert wird. Aus diesem Grund bietet DuPont direktgeformtes Material (Rohlinge) für die Prototypenherstellung an.

Halbzeuge aus ST Polyimid sind derzeit noch nicht verfügbar.

Allgemeine Bearbeitungsverfahren

Halbzeuge aus VESPEL® lassen sich aufgrund ihrer mechanischen Festigkeit, Steifigkeit und Dimensionsstabilität relativ leicht bearbeiten. Außerdem kann man mit herkömmlichen Werkzeugmaschinen Toleranzen einhalten, die vormals für Kunststoffteile als zu eng erachtet wurden. In den meisten Fällen sind die bei der Metallbearbeitung verwendeten Bearbeitungsverfahren direkt anwendbar.

Vorgeschlagene Werkzeuge

- **Hartmetallwerkzeug:** C-2 Typ
- **Kennametal K-11, Carbaloy 895** oder gleichwertige Stähle: wenn die Lebensdauer des Werkzeugs besonders wichtig ist.
- **Hochleistungsschnellschnittstahl:** Für kurze Bearbeitungszeiten mit mehrschneidigen Werkzeugen wie Stirnfräsern, Senkern und Reibahlen.

Spezielle Hinweise

- **Überhitzen:** Verhindern Sie, daß das Material so heiß wird, daß Sie es mit der bloßen Hand nicht mehr greifen können. Falls ein Überhitzen auftritt, schärfen Sie das Werkzeug und/oder reduzieren Sie die Schnittgeschwindigkeit.
- **Leichte Bearbeitung:** Verwenden Sie Werkzeuge, wie sie für die Bearbeitung von Messing verwendet werden.
- **Vibrieren der Werkzeuge:** Werkzeuge sollten einen Einstellwinkel von 0° bis 5° und einen Neigungswinkel von 0° aufweisen.
- **Spezielle Abmessungen:** VESPEL® Teile mit großen Durchmessern oder dünnen Wandstärken wurden erfolgreich mit engen Toleranzen bearbeitet. Um die Dimensionsstabilität zu bewahren, kann das Teil bis auf 0,4–0,5 mm Übermaß geschruppt werden und anschließend vor dem Schlichten in den Gleichgewichtszustand von 23°C und 50% relative Feuchtigkeit gebracht werden.

Einspannen

Die wichtigste Vorsichtsmaßnahme beim Einspannen von Teilen aus VESPEL® für die Bearbeitung zielt darauf ab, jegliche Verformungen zu verhindern, die durch Haltevorrichtungen, Spannanzgen oder -futter verursacht werden. Im Gegensatz zu Metallen verformen sich Kunststoffe, wenn sie zu fest eingespannt sind.

Zuverlässige Spanntechniken

- **Außen- oder Innen-Spannzange:** Dies ist die zuverlässigste Spannvorrichtung mit ausreichendem Druck, der ein gutes Einspannen sicherstellt.
- **Spannfutter:** Ein 6-Backenfutter wird für eine bessere Verteilung der Spannkraft empfohlen.

Sägen

Halbzeuge aus VESPEL® lassen sich leicht mit Kreis- oder Bandsägen schneiden. Befolgen Sie folgende Hinweise, um die besten Resultate zu erzielen:

Kreissägen:

- Verwenden sie ein scharfes Blatt ohne «Schränkung».
- Säge mit 254 mm Durchmesser und 3 bis 5 Zähnen pro cm, die bei einer Oberflächengeschwindigkeit von 1800 bis 2400 m/min. arbeitet und Wasser als Kühlmittel verwendet, ergab gute Resultate beim Sägen eines 75 mm dicken VESPEL® Materials.

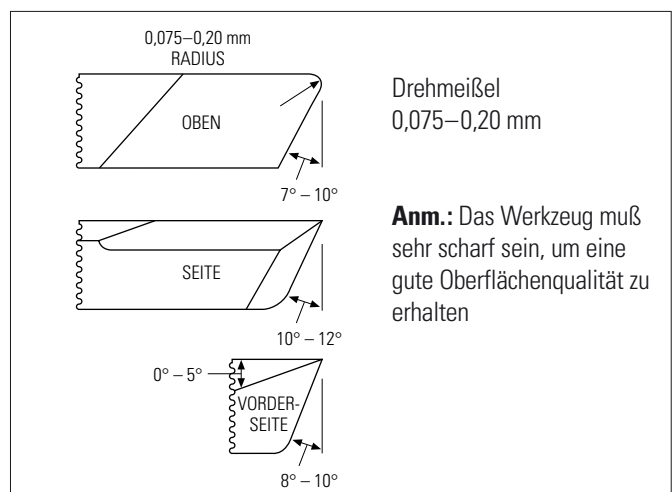
Bandsägen

- 125 mm dicke Profile aus VESPEL® lassen sich mit einer Bandsäge ohne Kühlmittel sägen, die ein scharfes Blatt mit 4 Zähnen/cm und Standardschränkung aufweist.
- Feinere Blätter eignen sich zum Sägen dünnerer Profile.
- Verwenden Sie Blätter mit Speziallegierung für die meisten gefüllten Typen.

Drehen

Um gute Oberflächengüten an gedrehten VESPEL® Teilen zu erhalten, befolgen Sie folgende Hinweise:

- Drehen mit Standard-Drehmaschinen, Futter- oder Drehautomaten.
- Verwenden Sie Hartmetall-Werkzeuge bei Teilen mit engen Toleranzen.
- Spanbrechende Werkzeuge sind gut geeignet.
- Halten Sie die Schnittkanten scharf, mit einem Spitzenradius von 0,08–0,2 mm. Stellen Sie die Schärfe sicher, indem Sie die Schneidkante unter 10facher Vergrößerung prüfen und honen Sie gegebenenfalls Kanten und Spitzenradius mit einem 800körnigen Diamant-Hohnstein.
- Empfohlen werden Schnittgeschwindigkeiten, die für die Messingbearbeitung verwendet werden. Der Materialvorschub kann über einen weiten Bereich mit guten Ergebnissen variiert werden.
- Ein Kühlmittel kann verwendet werden, um thermische Einflüsse auf ein Minimum zu reduzieren und die Dimensionsstabilität zu bewahren.
- Ein Vibrieren des Materials kann auf ein stumpfes Schneidwerkzeug hinweisen.



Betriebsbedingungen der Drehmaschine

	Planvorschub pro Umdrehung, mm
Schruppen und Planen	0,25–0,50
Schlichten und Planen	0,25–0,05
Vorbohren	0,5–0,1
Ein- und Abstechen	0,075–0,20

Fräsen

In der Regel sind die Fräsverfahren, die für Metalle angewendet werden, auch für Halbzeuge aus VESPEL® geeignet. Was Wärmebildung, Einspannen, Werkzeugschärfe, Einatmen von Stäuben usw. betrifft, gelten die bereits erwähnten Vorsichtsmaßnahmen.

Ein Ausbrechen der Kanten läßt sich vermeiden durch:

- Abstützen der Kanten mit anderem Material.
- Gleichlaufräsen.
- Verlangsamen des Planvorschubs auf maximal 50 mm pro Minute bei Durchbrechen einer Kante.
- Fliegend angeordnete Fräser erbringen besonders gute Leistungen.

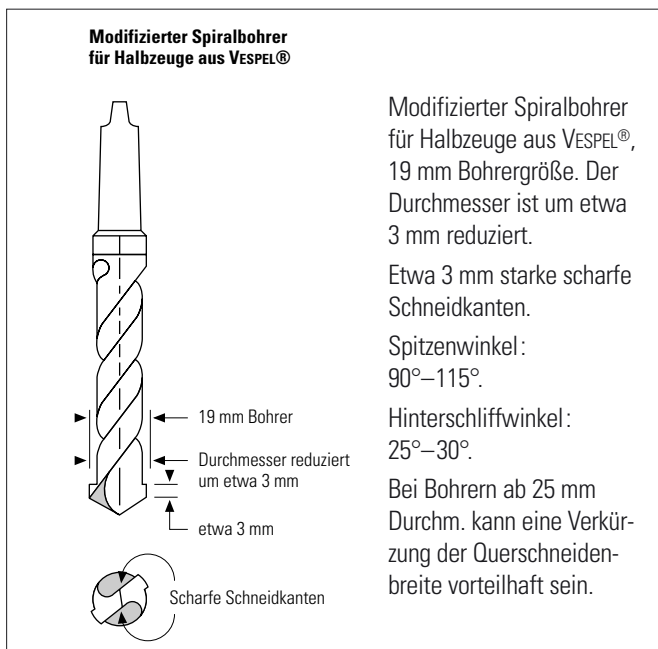
Vermeiden von Ausbrüchen

Um dünne Querschnitte ohne Ausbrüche zu bohren, gelten folgende Regeln:

- Verwenden Sie einen Bohrer mit einem Freiwinkel oder Zuschärfungswinkel von 5°. Falls möglich, mit automatischem Vorschub arbeiten oder den Vorschubdruck am Durchbruch reduzieren. Schnittgeschwindigkeiten von 12–15 m/min führen zu akzeptablen Ergebnissen.

Bohren

Teile aus VESPEL® sind elastischer als Metall und weisen einen höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten auf. Aus diesem Grund ist ein Festfressen wahrscheinlicher als bei Metall. Je nach Anwendung können folgende Bohrer und modifizierte Bohrer die Möglichkeit eines Festfressens reduzieren:



Es ist möglich, daß am Ende einer Bohrung ein Grat stehen bleibt. Ein weiterer Bearbeitungsschritt kann deshalb nötig werden, um den Grat zu entfernen (Kapitel «Entgraten»).

• Standard-Spiralbohrer

Er kann für Bohrungen mit geringer Tiefe (bis etwa 50% des Bohrdurchmessers) verwendet werden. Bohrlöcher, die tiefer sind als 50% des Bohrdurchmessers steigern das Risiko des Festfressens.

• Modifizierter Spiralbohrer

Er unterscheidet sich vom Standard-Spiralbohrer auf mehrere Weise: Der Durchmesser ist über die gesamte Länge des Bohrkörpers reduziert, mit Ausnahme der ersten 3 mm hinter den Führungsfasen.

Hinterschliffwinkel wird auf 25–30° erhöht (gegenüber Standard 12–15°)

An Bohrern ab 25 mm Durchmesser kann eine Verkürzung der Querschnittenbreite vorteilhaft sein.

Geschwindigkeiten, wie sie für die Bearbeitung von unlegierten Stählen verwendet werden, führen zu Löchern mit hoher Oberflächengüte.

• Spitzbohrer

Ergeben gute Oberflächengüten und vermindern das Ausbrechen, wenn der Bohrer die andere Seite durchstößt.

Sacklöcher

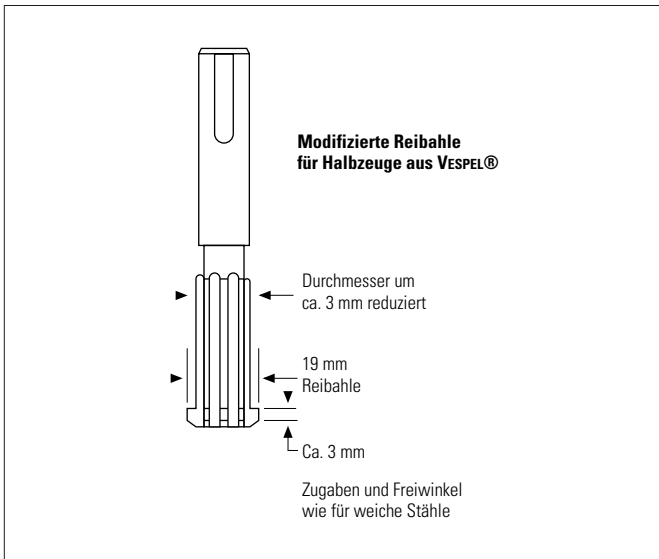
Engtolerierete tiefe Sacklöcher lassen sich schwer herstellen. Soweit wie möglich sind rohe Bohrungen vorzunehmen. Tiefbohrer mit Hochdruck-Kühlmittel können verwendet werden, um den Abtransport der Späne zu gewährleisten.

Gewindeschneiden

Formteile aus VESPEL® können mit herkömmlichen Metall-Gewindebohrern bearbeitet werden. Hierbei darf sich jedoch das Werkstück nicht soweit erwärmen, daß sich z.B. ein Gewindebohrer infolge der Wärmedehnung festfressen kann. Soweit vorhanden, sollten Gewindewerkzeuge mit einer einzigen Hartmetallschneide verwendet werden, die ein Nachstellen in Schritten von 30° ermöglichen. Die Vorschubtiefe sollte beim ersten Durchlauf 0,13 mm und eine stufenweise Reduzierung auf 0,05 mm pro Arbeitsgang bis zur Fertigstellung nicht überschreiten. Obwohl dieses Verfahren die Zykluszeiten der Einzelteilerfertigung verlängert, stellt es eine gute Gewindequalität sicher.

Reiben

Wie beim Bohren erfordert das Reiben von Halbzeugen aus VESPEL® ein modifiziertes Werkzeug, wie es unten gezeigt wird, um ein Festfressen zu vermeiden. Nach dem Reiben kann eine Bohrung wegen der Wärmebildung während der Bearbeitung 0,025–0,05 mm größer sein als gewollt. Bei engeren Toleranzen ist das Bohrverfahren besser geeignet. Zu diesem Zweck ist ein Übermaß von mindestens 0,4 mm erforderlich. Tiefe Bohrungen können mit Techniken gerieben und gebohrt werden, wie sie normalerweise für die spanende Bearbeitung von weichen Stählen eingesetzt werden.



Schleifen

Ein engtoleriertes Schleifen von Formteilen aus VESPEL® erfolgt auf Plan-, Doppel- oder spitzenlosen Schleifmaschinen bei einer Tischgeschwindigkeit von ca. 24 m/min. für die Schruppbearbeitung und ca. 12 m/min. für die Schlichtbearbeitung mit Planschleifmaschinen. Eine 32A46-H8VG Scheibe mit 305 mm Durchmesser eignet sich gut bei Schnittgeschwindigkeiten von 900 – 1200 m/min. Wie für das Feinschleifen von Stahl sollte die Scheibe mit einem Diamanten abgezogen werden.

VESPEL® Stangen und kleine Rohre lassen sich für Futter-Drehautomaten und Gewindeschneidmaschinen durch spitzenloses Schleifen vorbereiten. Die für Stahl verwendeten Standardeinrichtungen mit großzügigem Kühlmittelfluß sind in der Regel geeignet.

Vorsicht: Das Material darf nur so heiß werden, daß es leicht mit den bloßen Händen angefaßt werden kann.

Schwabbeln und Polieren

VESPEL® Teile können mit herkömmlichen Schwabbel-scheiben auf Hochglanz poliert werden. Neben den üblichen Vorkehrungen sind keine besonderen Vorsichtsmaßnahmen zu beachten.

Entgraten

Grat kann mit den gleichen Methoden entfernt werden, wie sie für Metallteile üblich sind. Teile aus VESPEL® lassen sich auch zusammen mit Schleifmitteln, Poliermitteln und Wasser in vibrierenden oder rotierenden Trommeln entgraten.

Läppen

Um ein Eindringen von Diamant- oder Aluminiumoxid-Compounds in VESPEL® Halbzüge zu vermeiden, sind folgenden Läppregeln für flache, hochpolierte Flächen zu beachten:

- Verwenden Sie feuchtes oder trockenes Schmirgelpapier (wie 600-Korn Norton Tufbak Durite), bei dem die Schleifkörnung erhalten bleibt.
- Verwenden Sie eine Granitscheibe oder Gleichwertiges, um die Ebenheit zu gewährleisten.
- Leichtes Maschinenöl kann als Binde- und Schmiermittel verwendet werden.

- Ein abschließendes Läppen mit Polierleinwand führt zu einer feineren Oberflächengüte.
- Ein zusätzlicher Oberflächenglanz läßt sich erreichen, indem die VESPEL® Halbzüge auf Kraft- oder Hartpapier geläppt werden.

Sicherheitsvorkehrungen bei der Bearbeitung von SP211 mit TEFLON®* Füllung

Teile und Halbzüge aus VESPEL® aus SP211 enthalten 10 Gewichtsprozent TEFLON® PTFE. Während der spanenden Bearbeitung können daher Schwebestäube aus PTFE-Partikeln entstehen. Daher sind folgende Vorkehrungen zu treffen:

- Verwenden Sie bei der Bearbeitung ein Kühlmittel – vorzugsweise Schneidöl oder wasserlösliches Kühlöl. Schleifen Sie SP211 nicht ohne eine ausreichende Entlüftung.
- Sorgen Sie dafür, daß sich keine Rauchwaren wie Zigaretten und Pfeifen im unmittelbaren Arbeitsbereich befinden, da schwebende PTFE-Partikel diese verunreinigen können.
- Vermeiden Sie das Einatmen von Staub, waschen Sie die Hände vor dem Essen oder Rauchen gründlich.

Siehe Sicherheitsdatenblatt in Anhang C.

Das Messen von Teilen

Obwohl für das Messen von VESPEL® Teilen die gleichen Werkzeuge verwendet werden können wie für Metallteile, unterscheiden sich die Techniken aufgrund der größeren Verformungen von Kunststoffteilen infolge des Meßdruckes. Teile sollten gemäß ASTM D 616, Verfahren AA, geprüft werden, bei dem Proben mindestens 40 Stunden in einer üblichen Laboratmosphäre (23°C bei einer relativen Feuchtigkeit von 50% ± 5%) lagern.

Mikrometer

Bei der Messung des Außendurchmessers eines Rings wird das Mikrometer nicht in der üblichen Weise eingesetzt (Drehen der Mantelhülse, bis sie fest anliegt oder bis die Sperre einrastet), da hierdurch das Teil verformt und das Ergebnis verfälscht werden kann. Stellen Sie daher die Mikrometeranzeige auf die Mindesttoleranz ein, und versuchen Sie, das Teil durch den Spalt zu führen, wobei das Mikrometer wie die «GUT»-Seite einer Rachenlehre funktioniert. Das Teil muß sich ohne jeden Druck zwischen den beiden Meßstiften hindurchschieben lassen. Um einen Verzug von dünnwandigen Querschnitten zu vermeiden, kann ein korrekt dimensionierter Dorn in das Teil eingesetzt werden.

Lehrdorn

Vermeiden Sie bei der Messung von Bohrungen mit einem Lehrdorn, den Dorn in das Loch zu pressen, da es je nach der Teilekonstruktion absolut möglich ist, einen Lehrdorn in ein Loch zu drücken, das nur 0,1 mm kleiner ist als die Lehrdorngröße.

In der Regel eignen sich Lehrdorne besser als Mikrometer, da die Mikrometer eine Verformung verursachen können. Luft-Meßgeräte eignen sich gut für die Messung von Innendurchmessern.

Meßgeräte mit optischen oder Kontakt-Sensoren erzielen genauere Meßergebnisse.

* TEFLON ist ein Marke von E.I. du Pont de Nemours and Company.

Tempern

Das Tempern oder die Wärmebehandlung von VESPEL® ist ein Verfahren, das dem Abbau von Spannungen dient, die während der Verarbeitung und/oder Bearbeitung im Material erzeugt wurden. Dieser Spannungsabbau erfolgt während der Erwärmung des Materials auf eine bestimmte Temperatur, bei der die Molekularstruktur von einem hohen auf ein niedrigeres Spannungsniveau übergeht. In der Regel wird dieser Vorgang von einer Schwindung des Materialvolumens begleitet.

Die in den verschiedenen Formen von VESPEL® vorhandenen Spannungen können aus ihrer unterschiedlichen Verarbeitung resultieren. Der Spannungsabbau erfolgt mit dem Ziel, das Material schrittweise bis zu einem bestimmten Grad oberhalb der erwarteten maximalen Einsatztemperatur zu erhitzen, diese Temperatur zu halten, um eine gleichmäßige Erwärmung des gesamten Materials zu gewährleisten und es anschließend schrittweise abzukühlen, um die Möglichkeit einer Spannungsrissbildung durch Überhitzen zu reduzieren.

Da VESPEL® wie die meisten Polymere oberhalb einer bestimmten Temperaturgrenze einem thermischen oder oxidativen Abbau unterworfen ist, wird empfohlen, jeden Tempergang entweder in einem Vakuumofen durchzuführen oder in einem Ofen, der mit Inertgas ausgeblasen wird.

Tempervorgang

Anm: Prüfen Sie dieses Verfahren immer mit mindestens einem Teil, um sicherzustellen, daß das Material die zulässige Maßänderung erlaubt.

Nach dem Tempern sollte das Teil den maximalen Betriebstemperaturen ausgesetzt werden können, ohne weitere Maßänderungen aufzuweisen.

1. Bearbeiten Sie VESPEL® bis auf 0,5 bis 1,5 mm der Endabmessungen.
2. Führen Sie das Material in einen Vakuum- oder Inertgasofen bei Raumtemperatur ein.
3. Erhitzen Sie das Material in Schritten von 1 bis 1,5°C pro Minute auf eine Temperatur von 20°C über der erwarteten maximalen Betriebstemperatur. Wir empfehlen eine Mindesttemperatur von 150°C für alle Teile mit einer erwarteten Betriebstemperatur von maximal 120°C.
4. Halten Sie das Material zwei Stunden bei dieser maximalen Temperatur (bei Material mit einer Mindestabmessung von 25 mm oder mehr sollten es drei Stunden sein).
5. Reduzieren Sie die Ofentemperatur und lassen Sie das Material schrittweise im geschlossenen Ofen auf 70°C abkühlen, bevor Sie es entfernen.
6. Es hat sich erwiesen, daß es ideal ist, das Tempern kurz vor jeder Art der Bearbeitung durchzuführen. Ein mehrfaches Tempern ist nicht erforderlich.
7. Alle Temperaturen sollten innerhalb von $\pm 3^\circ\text{C}$ liegen.

Platten-, Stab-, Rohr- und Stangenmaterial sollte aufgrund seiner Verarbeitung getempert werden, wenn die Maßtoleranzen innerhalb von 3% bleiben müssen und von einer thermischen Einwirkung auszugehen ist. Alle bearbeiteten Halbzeuge oder Teile müssen getempert werden, wenn enge Toleranzen gefordert werden.

Ein Tempern oberhalb von 370°C wird nicht empfohlen. Eine thermische Zersetzung kann stattfinden und die Wärmeausdehnung ist wahrscheinlich höher als Maßänderungen aufgrund von Spannungsabbau.

Kleben

VESPEL® Teilen können miteinander oder mit anderen Kunststoffen, Metallen und Elastomeren mit einer Vielzahl von Klebstoffen zusammengefügt werden. Die Wahl des Klebstoffes hängt von der speziellen Anwendung ab, insbesondere von den Einsatztemperaturen. Die Sauberkeit der zu verklebenden Flächen und eine genaue Beachtung der Herstellerangaben sind wesentlich, um gute Resultate zu erzielen. Zu verklebende Fügeflächen sind korrekt aufeinander abzustimmen, da eine optimale Haftung eine dünne, gleichmäßige Kleberschicht erfordert.

Klebstofftypen

Epoxid-, Phenol- und Polyimidkleber wurden erfolgreich mit VESPEL® Teilen verwendet.

Oberflächenvorbereitung von VESPEL® Teilen

Um die Oberflächen von Teilen aus VESPEL® für das Kleben vorzubereiten, sollte nur mechanisch durch Strahlen aufgeraut werden.

Oberflächenverunreinigungen wie Schmutz und Öle sind mit Lösungsmittel zu entfernen. Die Reinigung in Perchloräthylen wird empfohlen.

Umspritzen und Beschichten

Da VESPEL® nicht schmilzt, kann es bei komplexen oder großvolumigen Teilen von Vorteil sein, ein Einlegeteil aus VESPEL® mit einem anderen technischen Kunststoff zu umspritzen.

Durch die Nutzung der ausgezeichneten Eigenschaften von VESPEL® in nur dem Bereich, in dem sie gebraucht werden, während der umspritzte Teil aus einem Spritzgießmaterial besteht – kann Ihnen die kostengünstigste Lösung für Ihre technische Anforderung geboten werden.

Hochleistungsteile aus VESPEL® lassen sich – zum Beispiel mit TEFLON® – beschichten, um weitere spezielle Eigenschaften zu erhalten.

Strahlungsbeständigkeit

Der folgende kurze Überblick zeigt, daß VESPEL® Teile in unterschiedlichen radioaktiven Umgebungen selbst bei relativ hohen Dosierungen eine gute Funktionsfähigkeit haben. Die geringen Verluste an Gewicht, Zugfestigkeit und Dehnung bei Dosierungen bis 1×10^8 Rad legen nahe, daß aufgrund der Eigenschaften Teile aus VESPEL® sogar gegen Gamma- oder Elektronenstrahlung beständig sind.

Arbeiten mit Strahlung

Strahlungen aus verschiedenen Quellen können in der Umgebung zahlreicher technischer und industrieller Anwendungen vorhanden sein. Bei hohen Strahlungsdosierungen ist es häufig notwendig, ferngesteuerte oder automatische Anlagen einzusetzen, um das Personal zu schützen. Materialien, die für den Bau solcher Anlagen verwendet werden, müssen der Einwirkung von Strahlen widerstehen können.

Während Metalle in statischen Bauteilen gute Leistungen erbringen, reduziert die Notwendigkeit einer Schmierung ihre Brauchbarkeit in Lagern, Buchsen und Gleitflächen aufgrund einer möglichen Verunreinigung durch das Schmiermittel. Für Anwendungen, die bewegliche Teile erfordern, wie es bei Handhabungssystemen für die Produktion von Radiochemikalien oder beim Transport von nuklearen Brennstäben der Fall ist, können selbstschmierende Hochleistungs-Kunststoffe wie VESPEL® SP Polyimide einige Beschränkungen von Metallen überwinden.

Die Eigenschaften von Teilen aus VESPEL® SP Polyimid bei Einwirkung verschiedener Strahlungsarten und -dosierungen werden unten beschrieben.

Prüfverfahren

Um die Eigenschaften von direktgeformten Stäben aus VESPEL® (SP1, SP21 und SP22) nach einer Strahlungseinwirkung zu bestimmen, werden drei Parameter bewertet:

1. Gewichtsverlust;
2. Veränderung der Zugfestigkeit;
3. Änderung der Dehnung im Vergleich zu willkürlich ausgewählten Kontrollstäben, die keiner Strahlung ausgesetzt wurden.

Gammastrahlung wurde in einer Dosierung von $3,8 \times 10^6$ Rad/Stunde aus einer Kobalt 60 Quelle ausgestrahlt. Einwirkzeiten von 16 Minuten, 2,6 Stunden und 26,3 Stunden ergaben Gesamtdosierungen von 10^6 , 10^7 und 10^8 Rad.

Elektronenstrahlung aus einem 2,0 MV Van de Graaf Generator strahlte eine Dosis von $4,0 \times 10^6$ Rad/Stunde. Einwirkzeiten von 1,6 Minuten, 80 Minuten und 2,7 Stunden ergaben Gesamtdosierungen von 10^6 , 10^7 und 10^8 Rad.

Neutronenstrahlung wurde von einem Neutronenstrom von 5×10^{13} /cm²/sec erzeugt. Zugstäbe wurden dieser Dosierung jeweils 100 und 150 Stunden ausgesetzt. Gleichzeitig mit dem Neutronenstrahl wurden Gammastrahlen mit einer durchschnittlichen Dosierung von $1,2 \times 10^8$ Rad/Std. ausgestrahlt.

VESPEL® Teile und Gammastrahlen

Gewichtsverlust

Bei der Einwirkung von Gammastrahlen bis einschließlich 1×10^8 Rad wiesen VESPEL® Stäbe einen Gewichtsverlust von unter 1% auf.

Zugfestigkeit

Zugstäbe weisen einen Verlust von weniger als 6,5% an Festigkeit bis zu der maximalen Dosierung von 1×10^8 Rad auf.

Dehnung

Alle drei Typen von VESPEL® zeigten eine geringe prozentuale Änderung der Bruchdehnung. Der größte Abfall (19,2% von Kontrollen) fand bei Einwirkung der höchsten Gammastrahlendosis statt.

Teile aus VESPEL® und Elektronenstrahlung

Gewichtsverlust

Bei Einwirkungen von Elektronenstrahlen bis einschließlich 1×10^8 Rad wiesen Prüfstäbe aus VESPEL® einen Gewichtsverlust von unter 2% auf.

Zugfestigkeit

Zugstäbe weisen einen Verlust von weniger als 4,5% an Festigkeit bis zur maximalen Dosierung von 1×10^8 Rad auf.

Dehnung

Alle drei VESPEL® Typen zeigten geringe prozentuale Veränderungen der Bruchdehnung. Der größte Verlust lag bei unter 15% bei Einwirkung der höchsten Elektronenstrahldosis.

Teile aus VESPEL® und Neutronenstrahlung

Obwohl keine der Prüfstäbe eine Quellung oder einen merklichen Verzug aufwies, reduzierte sich die Zugfestigkeit nach Einwirkung hoher Dosen an Neutronenstrahlung. Daher empfehlen wir, bei Anwendungen mit Neutronenstrahlung einen VESPEL® Vertreter zu kontaktieren und spezielle Prüfungen durchzuführen.

Buchsen und Gleitlager

Je früher Sie an VESPEL® denken, umso kostengünstiger kann Ihre gesamte Konstruktion werden

Die Fachleute der Gruppe VESPEL® von DuPont stehen Ihnen jederzeit zur Verfügung wenn es darum geht, die außergewöhnlichen Eigenschaften von Teilen aus VESPEL® optimal zu nutzen. Schreiben Sie einfach an die VESPEL® Vertretung in Ihrer Nähe oder setzen Sie sich telefonisch mit Ihrem VESPEL® Vertriebsingenieur in Verbindung.

Lassen Sie VESPEL® in Ihrem System arbeiten

VESPEL® Gleitlager aus SP Polyimid von DuPont haben sich seit mehr als zwanzig Jahren in Anwendungen bewährt, indem sie die Lebensdauer der Anlagen verlängern und weniger Wartungsaufwand erfordern als herkömmliche Lagerwerkstoffe.

Gleitlager aus VESPEL® sind die kostengünstige Lösung in Tausenden von Anwendungen, da sie selbst bei hohen Temperaturen zäh, leicht, abrieb- und kriechfest bleiben. Sie übertreffen die Leistungsfähigkeit von Metallen und anderen technischen Kunststoffen unter weit gestreuten Einsatzbedingungen.

Dieses Kapitel über die Gestaltung von Gleitlagern soll Ihnen bei der Auswahl des VESPEL® Gleitlagers helfen, das sich für Ihre Anwendung am besten eignet. Hier finden Sie:

- allgemeine Informationen über die Konstruktion von Gleitlagern;
- eine Methode zur Bestimmung der Druckgeschwindigkeitsbelastung (PV) in Ihrer Anwendung;
- Anleitungen zur Auswahl des richtigen SP Polyimids für PV-Belastungen in der Praxis;
- Faktoren bei der Konstruktion von Gleitlagern aus VESPEL® und ein Beispiel eines Problems bei der Gleitlagerkonstruktion.

Gleitlager aus VESPEL® im Vergleich zu anderen Materialien

Die Fähigkeit eines Gleitlagers, in einer gegebenen Anwendung gute Leistungen zu erbringen, hängt in der Regel von folgenden Bedingungen ab:

- Betriebsbedingungen, darunter Temperatur und Schmierung.
- Belastung oder Druckbeanspruchung der Gleitlagerfläche.
- Geschwindigkeit der Gleitflächen bezogen auf das Lager.
- Härte und Oberflächengüte der Kontaktfläche.
- Reibungsverhalten des Gleitlagermaterials.
- Dicke des Gleitlagermaterials in Verbindung mit der Fähigkeit des Materials, Reibungswärme abzuführen.

VESPEL® Teile aus Polyimid von DuPont arbeiten geschmiert und ungeschmiert unter Bedingungen, bei denen die meisten anderen Kunststoffe zerstört und die meisten Metalle in hohem Maße verschlissen werden. Gleitlager aus VESPEL® reduzieren oder beseitigen Probleme in Zusammenhang mit Abrieb, Korrosion, Haftung, Ermüdung und Verschleiß, die die meisten herkömmlichen Lagerwerkstoffe extrem beanspruchen, vor allem wenn sie ohne Schmiermittel arbeiten.

VESPEL® Gleitlager können sich höheren Druckgeschwindigkeitsbelastungen (PV) anpassen als die meisten Hochleistungs-Kunststoffe. Darüber hinaus ist die Funktionsfähigkeit der Gleitlager aus VESPEL® über einen weiten Bereich an Temperaturen und Beanspruchungen unübertroffen, da sie ihre hervorragende Kriechfestigkeit, Abriebbeständigkeit und Festigkeit bewahren. In folgenden ungünstigen Umgebungen weisen sie eine gute Funktionsfähigkeit auf.

- Luft und Inertgase bei 370°C.
- Gamma- und Elektronenstrahlung.
- Hochvakuum (10^{-10} Torr).
- Hydraulikflüssigkeiten und Düsentreibstoffe.
- Flüssiger Wasserstoff.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Kugel-, Nadel- und Rollenlagern bieten Gleitlager aus VESPEL® folgende Vorteile:

- keine Fremdschmierung.
- Einsatz bei Temperaturen, bei denen Schmiermittel versagen.
- gute Funktionsfähigkeit in verschmutzten Umgebungen.
- Geräusch-, Gewichts- und Kostenreduzierung.

Im Vergleich zu Lagern aus Bronze, Messing und Sintermetall bietet VESPEL® folgende Vorteile:

- Verlängerung der Lebensdauer der anderen Bauteile durch Beseitigung des Verschleißes durch Metall/Metall-Paarungen.
- Beständigkeit gegen ein Zusammenspiel von Wärme, Druck und Oberflächengeschwindigkeit, die für ungeschmierte Metalle unerreichbar ist.
- Kriech- und Schlagfestigkeit.
- Probleme wie Schmiermittelverlust bei Anwesenheit von Papier- oder Kartestaub entfallen.

Im Vergleich zu anderen Kunststofflagern bieten VESPEL® Gleitlager folgende Vorteile:

- Einsatz bei Temperaturen, Drücken und Oberflächengeschwindigkeiten, die andere Kunststoffe überfordern;
- erhöhte Kriech- und Schlagfestigkeit;
- bearbeitbar wie Messing bei Einhaltung engerer Toleranzen.

Auswahl eines Lagerwerkstoffes

PV-Wert – ein primärer Faktor bei der Werkstoffauswahl

PV ist das Produkt von Last oder Druck (P) und Gleitgeschwindigkeit (V). Ein Kunststofflager, das erhöhter PV-Belastung unterworfen ist, wird eventuell einen Punkt erreichen, an dem es versagt. Dieser Punkt wird als maximaler PV-Wert bezeichnet und zeigt sich in der Regel in einem abrupten Anstieg der Verschleißrate des Lagermaterials.

Solange die mechanische Festigkeit eines Lagermaterials nicht überschritten wird, ist die Temperatur der Lagerfläche in der Regel der wichtigste Faktor bei der Bestimmung der PV-Grenze. Daher wirken alle Faktoren, die die Oberflächentemperatur beeinflussen – Reibungskoeffizient, Wärmeleitfähigkeit, Schmierung, Umgebungstemperatur, Lagerspiel, Härte und Oberflächengüte der Materialpaarungen – auch auf den maximalen PV-Wert des Lagers ein.

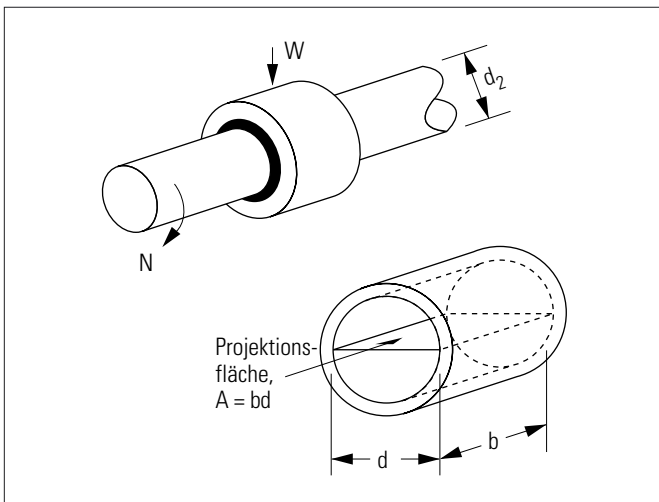
Bei der Bewertung eines Lagermaterials muß zu allererst ermittelt werden, ob die PV-Grenze des Materials in einer Anwendung überschritten wird. In der Regel ist es sinnvoller, einen großzügigen Sicherheitsspielraum bei der Bestimmung des maximalen PV-Wertes vorzusehen, da die realen Betriebsbedingungen häufig härter sind als Versuchsbedingungen.

Festlegung Ihrer PV-Anforderungen

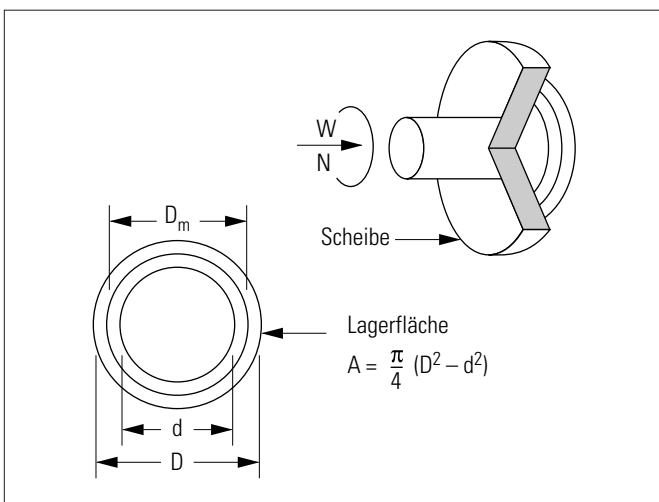
1. Zunächst ist die statische Belastung pro Flächeneinheit (P) zu bestimmen, der das Lager im Einsatz widerstehen muß.

- P = Flächenpressung, MPa
- W = statische Belastung, N
- d = Lagerinnendurchmesser, mm
- B = Lagerlänge, mm
- N = Drehzahl, U/min
- D = Lageraußendurchmesser, mm

Konstruktion von Radiallagern: $P = W / (d \times b)$



Konstruktion von Axiallagern: $P = 4W / \pi (D^2 - d^2)$



Bei beiden Lagerkonstruktionen sollte die Flächenpressung (P) die hier gezeigten Werte bei Raumtemperatur nicht überschreiten:

Zulässige Flächenpressung

VESPEL® Polyimid	SP1	SP21	
Fertigungs- verfahren	Halbzeug	Direkt- geformt	Direkt- geformt
P, MPa	51	33	34

VESPEL® Polyimid	SP22	SP211	
Fertigungs- verfahren	Halbzeug	Direkt- geformt	Direkt- geformt
P, MPa	41	26	28

2. Anschließend wird die Geschwindigkeit (V) des Lagers in bezug zur Kontaktfläche berechnet:

	Radiallager	Axiallager
Kontinuierliche Drehbewegung	$V = \pi (dN)/60$	$V = \pi (D_m N)/60$
Oszillierende Bewegung	$V = \pi (dN) (\theta/180)/60$	$V = \pi (D_m N) (\theta/180)/60$

mit:

- N = Drehzahl, U/min. oder Zyklen/min.
- $D_m = (D + d)/2$, m
- θ = Winkel zwischen Schwinggrenzen, Grad
- V = Oberflächengeschwindigkeit, m/s

3. Schließlich wird der PV-Wert berechnet:

$$PV \text{ (MPa} \cdot \text{m/s)} = P \text{ (MPa)} \times V \text{ (m/s)}$$

PV-Grenzen von ungeschmierten Lagerwerkstoffen

Tabelle 6 zeigt die maximalen PV-Werte für ungeschmierte VESPEL® Teile und mehrere andere ungeschmierte Materialien bei Rotationsbewegung.

Korrekt geschmierte VESPEL® Teile widerstehen ca. 40 MPa · m/s.

Tabelle 6 Richtlinien für maximale PV-Werte**

Material	Füllstoff	MPa · m/s	Max. Oberflächentemperatur (°C)
SP21	15% Graphit	12	395
SP22	40% Graphit	12	395
SP211	15% Graphit 10% PTFE	3,6	260
PTFE*	ungefüllt	0,064	260
PTFE*	15–25% Glasfaser	0,45	260
PTFE*	25% Kohlenstoff	0,71	260
PTFE*	60% Bronze	0,66	260
Polyamid	ungefüllt	0,14	150
Acetal	PTFE ungefüllt	0,27 0,12	120

* Bei 0,5 m/s.

** Diese Richtlinien dienen nur der Orientierung. Maximale PV-Werte aller Materialien variieren bei verschiedenen Druck- und Geschwindigkeitskombinationen sowie unter anderen Versuchsbedingungen. Ausführliche Informationen finden Sie in der Literatur des Herstellers.

Konstruktion von Gleitlagern aus VESPEL®

Einfluß der Oberflächentemperatur auf das Abriebverhalten

Der PV-Wert ist eine sehr nützliche Angabe, um die Eignung eines Materials für eine Lageranwendung zu bestimmen. Flächenpressung und Gleitgeschwindigkeit allein charakterisieren jedoch das Lagermaterial nicht ausreichend. Temperatur, Teilegeometrie und Materialpaarung spielen ebenso wichtige Rollen beim Lagerverschleiß.

Von den gerade genannten Faktoren ist die Temperatur in der Regel der wichtigste Faktor, da sie nicht nur den Reibungskoeffizienten beeinflusst, sondern auch die nutzbaren Kombinationen von Druck und Gleitgeschwindigkeit, d.h. den PV-Wert, bestimmt. Das Abriebverhalten von VESPEL® Gleitlagern wird selbst bei hohen PV-Werten gering bleiben, wenn eine ausreichende Kühlung vorhanden ist. Der Verschleiß kann bei jedem PV-Wert hoch sein, wenn die Umgebungstemperatur zu hoch ist. Die Verschleißfestigkeit von VESPEL® Lagern läßt sich bei einer Betriebstemperatur, die unterhalb ihrer Grenzwerte liegt, durch einen Verschleißfaktor vorhersagen, der in Versuchen ermittelt wurde. Der Verschleißfaktor, der eine von dem tribologischen System bestimmte Größe und nicht nur eine Materialeigenschaft ist, wird aus einer Gleichung abgeleitet, die das durch den Abrieb entfernte Materialvolumen in einem gegebenen Zeitraum pro Lasteinheit und Oberflächengeschwindigkeit berücksichtigt.

$$v = f(KFVT)$$

mit:

v = Abriebvolumen, mm^3

K = Verschleißfaktor, mm^3/Nm

Funktion der Rauigkeit und Härte der Gegenauflfläche, Temperatur und Umgebung

F = Traglast, N

T = Zeit, s

V = Geschwindigkeit, m/s

Für ebene Flächen wird die Gleichung wie folgt geändert:

$$X = f(KPVT)$$

mit:

X = Verschleißtiefe, mm

P = Druck, MPa

Einsatzgrenzen

Die Verschleißrate von ungeschmiertem SP21 in Luft steht in einem direkt proportionalen Verhältnis zu Druck und Geschwindigkeit, wenn die Oberflächentemperatur 395°C nicht überschreitet (siehe Abb. 37).

Der Proportionalitäts-Faktor (den wir Verschleißfaktor nennen) bleibt durch starke Veränderungen der Betriebsbedingungen unbeeinflusst, solange die Temperatur diesen kritischen Wert nicht überschreitet, der Verschleiß-Übergangstemperatur genannt wird. Unterhalb der Übergangstemperatur wird der Verschleiß gering bleiben. Der Verschleißfaktor erhöht sich jedoch, sobald die Temperatur 395°C überschreitet und wird bei ca. 540°C sehr hoch. Über 540°C kann SP Polyimid keine Last mehr tragen, ohne zu «schmieren».

Falls diese hohen Temperaturen jedoch nur kurzfristig auftreten, wird das SP-Bauteil nach Reduzierung der Temperatur

auf ein verträgliches Maß normal funktionieren. Diese Verschlechterung der Abriebfestigkeit bei hohen Temperaturen beruht auf der thermischen Stabilität des Polyimids. Daher gehen wir davon aus, daß sich die Verschleiß-Übergangstemperatur in einer inerten Umgebung oder im Vakuum auf 540°C erhöht.

Abb. 38 zeigt die Druckgeschwindigkeitskurve bei einer Oberflächentemperatur von 395°C für ein Axiallager aus SP21 in Luft bei 23°C , das gegen ungehärteten Stahl läuft. Beachten Sie, daß der PV-Grenzwert von $1 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$ bei $0,07 \text{ MPa}$ bis $12 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$ bei 7 MPa variiert.

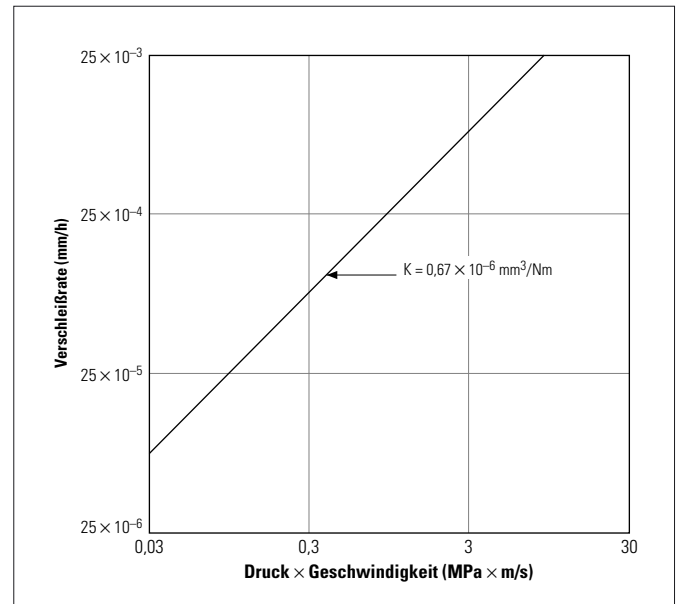


Abb. 37 Verschleißrate als Funktion von Druck \times Geschwindigkeit für SP21 gegen ungehärteten Stahl. Drucklagerprüfstand – ungeschmiert

$P = 0,07 - 22 \text{ MPa}$

$V = 0,025 - 5,0 \text{ m/s}$

Oberflächentemperatur unter 395°C

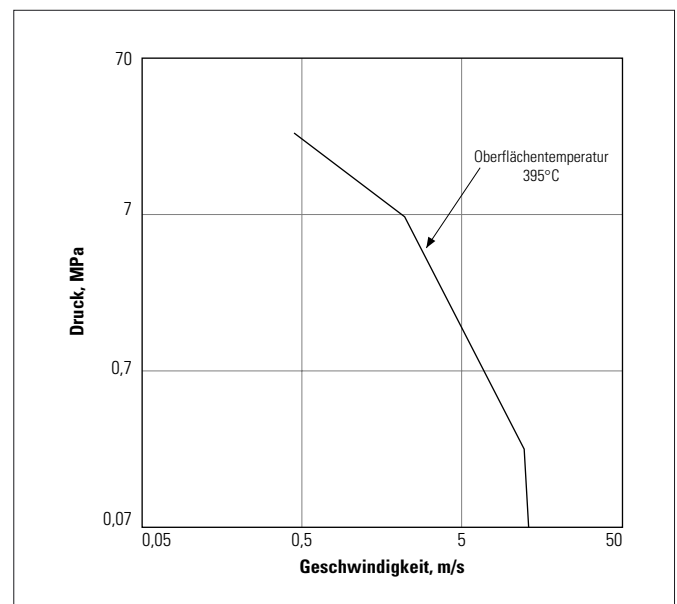


Abb. 38 PV-Grenzwert von SP21 gegen ungehärteten Stahl. Drucklagerprüfstand – ungeschmiert

Reibungsverhalten

Temperatur, Druck und Geschwindigkeit beeinflussen insgesamt den dynamischen Reibungskoeffizienten. Typische Reibungskoeffizienten für verschiedene Polyimidtypen werden in Tabelle 7 aufgeführt.

Die Reibungskoeffizienten für gefüllte Typen erfahren einen Übergang bei etwa 150°C, wie Abb. 39 zeigt. Unterhalb dieser Temperatur ähnelt das Reibungsverhalten dem von Polyamid 66, doch oberhalb von 150°C fallen die Reibungskräfte stark ab und im Bereich von 200 bis 540°C bleiben die Reibungseigenschaften der Typen temperaturunabhängig.

Der Reibungsübergang ist unabhängig vom Verschleißübergang. Die Größenordnung des Übergangs und die Verschleißrate unterhalb von 150°C sind in SP211 (Abb. 40) sehr stark reduziert.

Der Konstrukteur muß die höheren Reibungskräfte berücksichtigen, die durch zwei separate Phänomene während der Inbetriebnahme hervorgerufen werden können. Erstens die Übertragung einer Schicht der Polyimid/Füllstoffmischung auf die Kontaktfläche und zweitens der Temperaturübergang für Polyimide. Während des erneuten Starts ist es unter Einsatzbedingungen nicht unbedingt erforderlich, eine neue Schicht einzubringen, doch ist der Temperatureffekt umkehrbar und wird bei jedem Neustart auftreten.

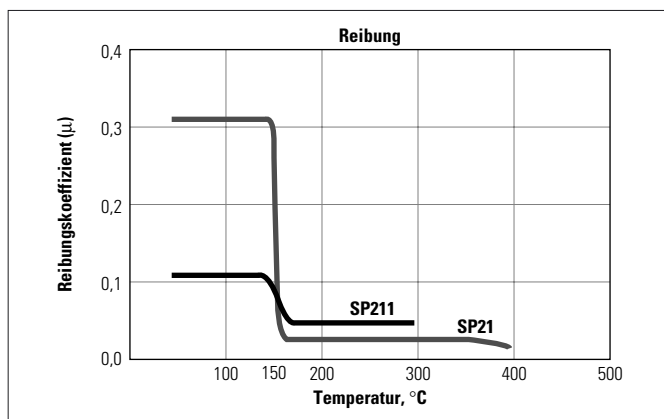


Abb. 39 Reibungskoeffizient von SP21 und SP211 für ungeschmierten Anwendungen gegen ungehärteten Stahl

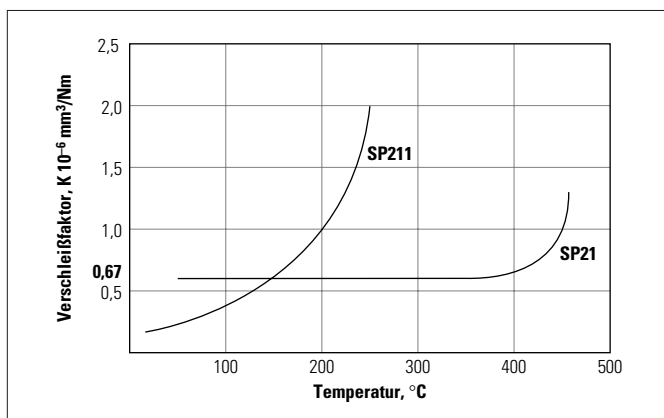


Abb. 40 Verschleißfaktor von SP21 und SP211 für ungeschmierte Anwendungen gegen ungehärteten Stahl

Tabelle 7 Typische Reibungskoeffizienten – Ungeschmierte Drucklagerprüfung

Messung	VESPEL® Polyimid			
	PV (MPa · m/s)	SP21	SP22	SP211
Statisch		0,30	0,27	0,20
P = 0,34 MPa V = 2,54 m/s	0,86	0,24	0,20	0,12
P = 0,69 MPa V = 0,51 m/s	0,35	0,35	–	0,24
P = 0,69 MPa V = 1,52 m/s	1,05	0,17	0,21	–
P = 0,69 MPa V = 5,08 m/s	3,5	0,07	0,09	0,08
P = 6,90 MPa V = 1,6 m/s	11	0,04	–	–

Gleitflächenbeschaffenheit

Das Abriebverhalten von Teilen aus VESPEL® kann in hohem Maße durch die Härte des Gleitpartners und dessen Oberflächengüte beeinflusst werden. Verschleißraten von ungeschmierten Lagern lassen sich durch härtere oder weniger raue Gegenauflagen reduzieren. In der Regel ist eine geschliffene Oberfläche des Gleitmaterials einer gedrehten Fläche vorzuziehen. Ein Feinpolieren ist häufig von Vorteil. Die Bearbeitung sollte entsprechend der Bewegungsrichtung des Lagers in bezug zur Gleitfläche erfolgen. DuPont empfiehlt eine Oberflächengüte von 0,4 μm (Ra) und eine Härte von $R_c = 55$.

Abbildungen 41 und 42 veranschaulichen die Auswirkungen der Härte und Oberflächengüte der Gegenauflage auf das Verschleißverhalten.

Stahl und Grauguß sind für alle VESPEL® Typen im allgemeinen gute Gleitpartner. Bei Lager- und Getriebeanwendungen wurde mit 100 Cr 6 und 20 MnCr 5 Stählen ein sehr gutes Abriebverhalten beobachtet.

Eine Verchromung ist nicht erforderlich und kann einen höheren Verschleiß verursachen als eine polierte Stahlfläche. Die Porosität des Chroms führt zu einer Mikro-Bearbeitung der VESPEL® Fläche. In der Regel sollten Metallflächen so hart und glatt wie möglich sein.

Aluminium und Zink eignen sich nicht gut als Reibpartner für Kunststofflager, da die Weichheit dieser Materialien den Verschleiß beschleunigen kann. Falls Aluminium verwendet wird, sollte es gehärtet oder – noch besser – eloxiert werden. Druckgußaluminium mit hohem Siliziumgehalt hat eine hohe Schleifwirkung auf VESPEL®.

Ein neuer VESPEL® Typ, SP221, wurde kürzlich für ungeschmierte Anwendungen in Verbindung mit weichen Materi-

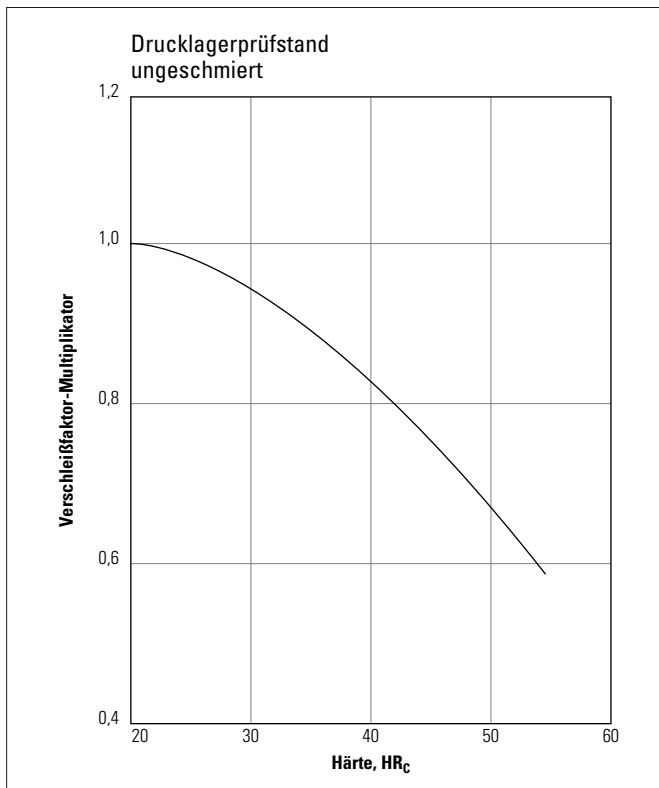


Abb. 41 Einfluß der Härte der Gegenauflfläche auf den Verschleiß

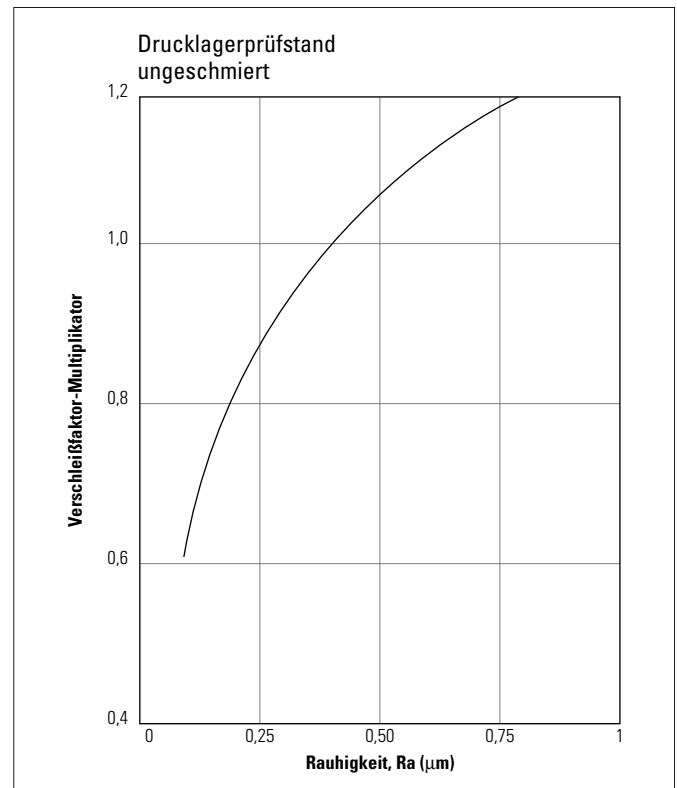


Abb. 42 Einfluß der Oberflächengüte der Gegenauflfläche auf den Verschleiß

Tabelle 8 Wärmeausdehnungskoeffizient α_{SP}

VESPEL® Polyimid	SP1		SP21		SP22		SP211		ST2010	ST2030
	Halb- zeug	Direkt geformt	Halb- zeug	Direkt geformt	Halb- zeug	Direkt geformt	Halb- zeug	Direkt geformt	Direkt geformt	Direkt geformt
α_{SP} $10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$	54	50	49	41	38	27	54	41	48	32

alien wie Aluminium, Zink und Bronze entwickelt. Für mehr Informationen kontaktieren Sie bitte Ihren VESPEL® Vertriebsingenieur.

Kunststoff eignet sich nicht gut als Kontaktmaterial für VESPEL® Gleitlager und sollte, falls er verwendet wird, auf niedrige PV-Werte begrenzt bleiben. Die Weichheit einer Gleitfläche aus Kunststoff kann hohen Verschleiß verursachen. Außerdem laufen sich die Gleitflächen in Kunststoff-Lagersystemen heißer, da sie relativ schlechte Wärmeleiter sind. Metall/Kunststoff-Lagersysteme weisen somit höhere PV-Grenzen auf als Kunststoff/Kunststoff-Systeme.

Schmierung und andere Faktoren bei der Lagerkonstruktion

Bei der Entscheidung, ob Lager geschmiert werden müssen, sollten folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Eine Anfangs-Schmierung, d.h. ein einmaliges Einfetten oder Einbringen von Trockenschmiermittel reduziert in der Regel den Abrieb beim Einlaufen und verbessert die gesamte Abriebfestigkeit.
- Die Schmierung eines Lagers kann den maximalen PV-Wert durch eine Reduzierung des Reibungskoeffizienten steigern und bei der Entfernung von Schmutzpartikeln helfen.

Eine Umlaufschmierung kann die PV-Grenze weiter erhöhen, indem das Lager gekühlt wird.

- Die Schmierung mit einer chemisch verträglichen Flüssigkeit für den Aufbau eines Schmierfilms in VESPEL® Lagern reduziert sowohl die Reibungs- als auch die Verschleißraten. Diese reduzieren sich umso mehr, je dicker die Filmschicht ist, die wiederum mit der Viskosität und Oberflächengeschwindigkeit der Flüssigkeit zunimmt und mit steigendem Lagerdruck abnimmt. Die Lagergeometrie hat ebenso einen Einfluß auf die Reduzierung der Reibung. Selbst dünne Schmiermittelfilme können die Verschleißraten bei Trockenlauf um einen Faktor von 10 oder mehr reduzieren. Eine Schmierung, bei der ein Schmierfilm die Gleitpartner völlig voneinander trennt, kann den Verschleiß theoretisch auf ein unbedeutendes Ausmaß reduzieren.
- Das Reibungsverhalten eines Lagersystems mit Mangel-schmierung wird durch die Eigenschaften des Lagermaterials und des Schmiermittels bestimmt. Bei einer Vollschmierung wird das Reibungsverhalten ausschließlich durch die Eigenschaften des Schmiermittels bestimmt.
- Ungeschmierte Lager können Nuten auf den Oberflächen aufweisen, um Abriebpartikel aus den Laufflächen zu entfernen. In geschmierten Systemen können die Nuten zu einer Verbesserung der Schmiermittelversorgung beitragen.

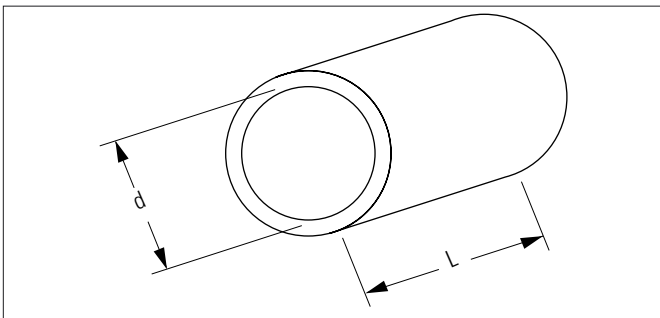
Der Einfluß der Nuten auf den Lagerdruck ist zu berücksichtigen.

- Da Wasser SP Polyimid nicht benetzt, bietet es keine wirksame Mangel- oder Grenzschmierung für VESPEL® Lager. Wasser kann im Gegenteil die Verschleißrate von trockenen VESPEL® Lagern ungünstig beeinflussen. Eine wiederholte Benetzung durch Wasser dürfte jedoch keine Probleme hervorrufen.
- Die Zufuhr von Stickstoff in ungeschmierte VESPEL® Lager kann die Verschleißraten auf unter 20% des entsprechenden Werts in Luft reduzieren. Außerdem liegt die Verschleiß-Übergangstemperatur in Stickstoff um mindestens 50°C über dem Wert in Luft.
- Bei Anwendungen in schmutziger Umgebung ist eine Abdichtung oder Spülung vorzusehen, um eine Verunreinigung der Lagerfläche zu vermeiden.

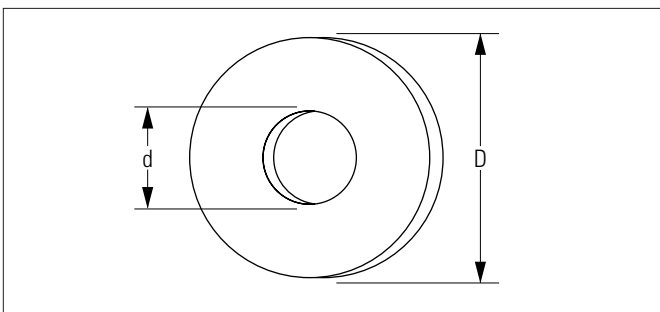
Proportionen

Radiallager: Für eine optimale Funktionsfähigkeit der Radiallager aus VESPEL®, l/d (Länge/Durchmesser) wird ein Verhältnis von $1/2$ bis $3/2$ empfohlen. Falls längere Lager erforderlich sind, erwägen Sie den Einsatz von zwei Lagern, getrennt durch einen Spalt. Kleinere l/d Werte führen zu:

- Wirksamere Entfernung von Abriebpartikeln
- Geringere Anfälligkeit gegen Durchbiegungen und Fluchtungsfehler der Welle
- Bessere Wärmeabfuhr
- Kostenvorteile aufgrund von niedrigeren Fertigungskosten



Axiallager: Damit Axiallager aus VESPEL® ihre optimale Funktionsfähigkeit erbringen, sollte ein Verhältnis von 1:2 von Außen- zum Innendurchmesser (D/d) nicht überschritten werden, da größere Verhältnisse eine Überhitzung der Außenkante verursachen und Probleme durch mangelnde Ebenheit und eingeschlossene Abriebpartikel entstehen können.



Radiallagerspiel

Obwohl VESPEL® Lager einen weitaus niedrigeren linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweisen als die meisten Kunststoffe, sind Mindest-Lagerspiele erforderlich. Normale Lagerspiele für Radiallager aus VESPEL® liegen je nach Anwendung zwischen 0,3 und 0,5% des Wellendurchmessers. In der Regel erfordern höhere Belastungen größere Lagerspiele. Enger tolerierte Lagerspiele lassen sich vorsehen, indem das Lager geschlitzt wird, um damit eine Umfangs-Wärmeausdehnung zu ermöglichen.

Bei der Berechnung des Innendurchmessers von VESPEL® Lagern ist es wichtig, die tatsächliche Temperatur der Welle und der Lagerfläche von VESPEL® zu schätzen. Die durch Reibung erzeugte Wärme muß mit der Umgebungstemperatur addiert werden. In vielen Anwendungsfällen ist die Wärmeausdehnung des Gehäuses unbedeutend, kann jedoch bei hohen Umgebungstemperaturen berücksichtigt werden.

Die folgende Formel zur Festlegung des Innendurchmessers eines VESPEL® Lagers dient als Richtlinie. Für präzisere Berechnungen setzen Sie sich mit Ihrem ansässigen VESPEL® Berater in Verbindung (siehe Tabelle 8, lineare Wärmeausdehnungskoeffiziente von VESPEL®).

Innendurchmesser der Lagerkonstruktion = Wellendurchmesser bei Raumtemperatur + Änderung des Wellendurchmessers aufgrund von Temperaturänderungen + Betriebsspiel der Welle + Änderung der Lagerwandstärke durch die Temperatur

$$I.D. = D (1 + \alpha\Delta T_1 + C) + 2t\alpha SP\Delta T_2$$

mit:

D = Wellendurchmesser bei Umgebungstemperatur

C = Wellenarbeitsspiel, Prozent des Wellendurchmessers

αS = linearer Wärmeausdehnungskoeffizient des Wellen materials

αSP = linearer Wärmeausdehnungskoeffizient des VESPEL® Lagers, Tabelle 8

t = Wanddicke des VESPEL® Lagers

ΔT_1 = Temperaturanstieg der Welle

ΔT_2 = Temperaturanstieg des Lagers

Die Feuchtigkeit muß in der Regel bei der Entwicklung des Lagerspiels von VESPEL® Lagern nicht berücksichtigt werden, da Polyimide sehr wenig Feuchtigkeit aufnehmen. Siehe Feuchtigkeitsaufnahmekurven in den Abbildungen 23 bis 25.

Natürlich variieren die maximalen PV-Werte und Einsatztemperaturen aller Werkstoffe von Anwendung zu Anwendung und hängen von einer Reihe von verschiedenen Faktoren ab. Eine sorgfältige Erprobung sollte die Funktionsfähigkeit von VESPEL® in Ihrer Anwendung ermitteln.

Wandstärke von Radiallagern

Radiallager aus VESPEL® sollten so dünnwandig wie möglich ausgelegt werden, da dünne Wandstärken:

- die Abfuhr von Reibungswärme verbessern
- Schwankungen des Lagerspiels aufgrund von Maßänderungen durch den Einfluß von Wärme oder Feuchtigkeit reduzieren
- Verformung unter hoher Belastung reduzieren

Bei den meisten Anwendungen liegen typische Wandstärken für VESPEL® Lager in einem Bereich von 1–2,5 mm.

Einbau von Radiallagern

Radiallager aus VESPEL® können entweder mechanisch oder durch Verkleben in ein Gehäusebauteil eingebaut werden.

Bei einer Preßverbindung zwischen VESPEL® Gleitlagern und Metallen empfiehlt es sich, mit einem geringen Übermaß des Gleitlager-Außendurchmessers zu arbeiten. Nach dem Einpressen reduziert sich die Lagerbohrung um 90 bis 110% (je nach Wandstärke, Durchmesser und Presspassung) des berechneten Übermaßes, was zu einer geringen Druckspannung in der Lagerwand führt. Ein typisches Übermaß ist 0,5%, doch sollte die Preßverbindung an die Erfordernisse der jeweiligen Anwendung angepaßt werden. Für genauere Berechnungen sollten Sie Ihren VESPEL® Spezialisten kontaktieren.

Teile aus VESPEL® können mit den meisten kommerziellen Klebstoffen zusammengefügt werden. Das Kapitel «Kleben» erklärt die Auswahl der Klebstoffe, Oberflächenvorbereitung und andere Richtlinien. Bei jedem Klebstoff ist es wichtig, die Herstellerangaben zu beachten, um optimale Resultate zu erzielen.

Berechnungsbeispiel

VESPEL® Lager sind für einen Mischrockner mit den folgenden Anforderungen vorgesehen:

- Zwei Lager auf einer Welle mit 38 mm Durchmesser für eine Last von 17 800 N bei Temperaturen zwischen 21 bis 274°C.
- Maximale Lagerlänge: 38 mm, maximal zulässiges Kalt- und Warmlaufspiel 0,40 mm.
- Um eine Verunreinigung des Mischgutes zu vermeiden, können die Lager nicht geschmiert werden und müssen 3 Jahre lang 40 Stunden pro Woche wartungsfrei laufen.
- Die Welle des Mischrockners rotiert intermittierend: 5% an, 95% aus, bei 20 U/min.

Wird VESPEL® diese Anforderungen erfüllen? Siehe Tabelle «Richtlinien für maximale PV-Werte»

Lösung

1. Prüfung der Temperaturgrenze

Die Oberflächentemperatur von SP21 Polyimid ist auf 395°C begrenzt, so daß der Anstieg der Oberflächentemperatur die Differenz zwischen 274 und 395°C, d.h. 121°C, nicht überschreiten sollte, falls die PV-Grenze nicht sehr hoch ist.

2. Prüfung des PV-Wertes

Berechnung des Lagerdruckes:

$$P = \frac{F}{LD} = \frac{8900 \text{ N (pro Lager)}}{38 \text{ mm} \times 38 \text{ mm}} = 6,163 \text{ MPa.}$$

Berechnung der Wellendrehzahl:

$$V = \pi \cdot DN = \frac{\pi \times 0,038 \text{ m} \times 20 \text{ rpm}}{60} = 0,04 \text{ m/s}$$

Berechnung des PV-Wertes:

$$PV = 6,163 \text{ MPa} \times 0,04 \text{ m/s} = 0,245 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$$

Bei diesem niedrigen PV-Wert wird SP21 Polyimid einen niedrigen Verschleiß aufweisen, so daß der PV-Wert keine Begrenzung darstellt, insbesondere angesichts des intermittierenden Betriebes.

3. Prüfung der Abriebfestigkeit

Berechnung der Laufzeit:

$$T = 0,05 \times \frac{40 \text{ Stunden}}{\text{Wochen}} \times \frac{52 \text{ Wochen}}{\text{Jahr}} \times 3 \text{ Jahr} = 312 \text{ Stunden}$$

angenommen $0,67 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ in diesem Fall.

$$\begin{aligned} \text{Radialabrieb} &= \text{Verschleißfaktor (s. Abb. 40)} \times PV \times \text{Laufzeit} \\ &= 0,67 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm} \times 0,245 \text{ MPa} \cdot \text{m/s} \times 1123200 \text{ s} \\ &= 0,183 \text{ mm} \end{aligned}$$

Dieser Verschleiß liegt unterhalb des maximal zulässigen Lagerspiels. Ist die Differenz groß genug, um eine Wärmeausdehnung zu ermöglichen, werden die Teile aus VESPEL® die Anforderungen erfüllen.

4. Bestimmung des Lagerspiels bei Raumtemperatur

An diesem Punkt spielen Erfahrungen und Urteilskraft eine große Rolle. Eine Lösung kann nur ein Annäherungswert sein. Erfahrungen haben erwiesen, daß Welle, Lagerfläche, Außendurchmesser des Lagers und das Gehäuse unterschiedliche Betriebstemperaturen erreichen.

Gehen wir davon aus, daß

- die Lauffläche eine um 56°C höhere Temperatur erreicht als der Trockner
- die Durchschnittstemperatur des Lagerkörpers nur um 28°C höher liegt als die des Trockners, während
- das Gehäuse bei Raumtemperatur bleibt und das Lager sicher hält, so daß
- sich das Lager bei einem Temperaturanstieg nach innen ausdehnen und
- die Welle sich nach außen ausdehnen wird.

Bei diesen Annahmen läßt sich das anfängliche Lagerspiel bei Raumtemperatur, C_d , mit der folgenden Gleichung bestimmen:

$$C_d = D (\alpha S \Delta T_1 + C) + 2 t \alpha SP \Delta T_2$$

mit:

D = Wellendurchmesser

αS = Wärmeausdehnungskoeffizient für die Welle
 $= 11 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$

C = Betriebsspiel, hier 0,1%

t = Lagerwandstärke

αSP = Wärmeausdehnungskoeffizient für Lager aus SP21
 $= 41 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$

ΔT_1 = Temperaturanstieg der Welle

ΔT_2 = Temperaturanstieg des Lagers

Mit der Wandstärke von 1,59 mm ergibt sich

$$C_d = 38 [11 \times 10^{-6} \cdot (330 - 21) + 0,001] + (2 \times 1,59 \times 41 \times 10^{-6}) \times (302 - 21) = 0,167 \text{ mm} + 0,037 \text{ mm} = 0,204 \text{ mm}$$

5. Prüfung des maximalen Lagerspiels

Anfangsspiel plus Verschleiß nach 3 Jahren:

$$0,204 + 0,183 = 0,387 \text{ mm}$$

Dies liegt unterhalb der Anforderungen.

Somit erfüllen Lager aus VESPEL® die Anforderungen für einen ungeschmierten Betrieb in dieser Hochtemperatur-Anwendung.

Falls ein Ausdehnungsproblem auftritt, schlitten Sie das Lager.

Geschmierte Gleitlager

Auch geschmierte VESPEL® Lager bieten eine gute Funktionsfähigkeit. Bei hydrodynamischer Vollschrnerung (Dickfilm) findet kein mechanischer Abrieb statt und Teile aus VESPEL® verhalten sich wie alle anderen herkömmlichen Lagerwerkstoffe. Bei der Grenzschmierung (Dünnschicht) verändert das Schmiermittel das Verschleiß- und Reibungsverhalten von SP Polyimid. Das Zusammenspiel von teilweiser Trennung und chemischer Veränderung der Oberflächen beeinflusst die Funktionsfähigkeit. Die dynamische Viskosität des Schmiermittels (Z), die Umdrehungen (N) und der Flächen-druck (P) bestimmen die Filmdicke des Schmiermittels, die wiederum für die Wirksamkeit eines VESPEL® Lagers verantwortlich ist.

Der Verschleißfaktor eines ebenen Drucklagers aus SP21 Polyimid mit Grenzschmierung fällt bei ansteigendem ZN/P rapide ab (dimensionsloser Parameter, der die Filmdicke beschreibt). In Abbildung 43 wird das Schmierverhalten von SP21, Bronze und Weißmetall verglichen. Mit Ausnahme der dünnsten Filme liegt der Verschleißfaktor von SP21 bei $0,2\text{--}0,4 \times 10^{-7}$, ist also wesentlich besser als der von Bronze und entspricht bei den meisten Filmdicken in etwa dem von Weißblech. SP Polyimid übertrifft jedoch beide herkömmlichen Werkstoffe bei dünnen Filmen ($ZN/P < 3$). Leider wissen wir zu wenig über die Wechselwirkung von Festkörpern und Flüssigkeiten, um den Verschleiß unter allen Dünnschichtbedingungen zuverlässig vorauszusagen.

Die Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von ZN/P für alle drei Werkstoffe ist in den Abbildungen 44, 45 und 46 graphisch dargestellt. Wiederum stellt SP Polyimid seine Überlegenheit unter Beweis. Dünnere Filme sind erforderlich, um die Reibungskräfte zu reduzieren. Diese Ergebnisse wurden (wie bei den Verschleißfaktoren) für ein Axiallager mit drei Segmenten bestimmt, das mit einem Mineralöl ohne Zusätze bei Flächenpressungen bis zu 13,8 MPa und Gleitgeschwindigkeiten von 0,015 m/s bis 15 m/s geschmiert wurde. Der Übergang von der Grenz- zur Vollschrnerung findet bei allen Materialien bei etwa der gleichen Filmdicke statt und die hydrodynamischen Reibungskoeffizienten sind identisch.

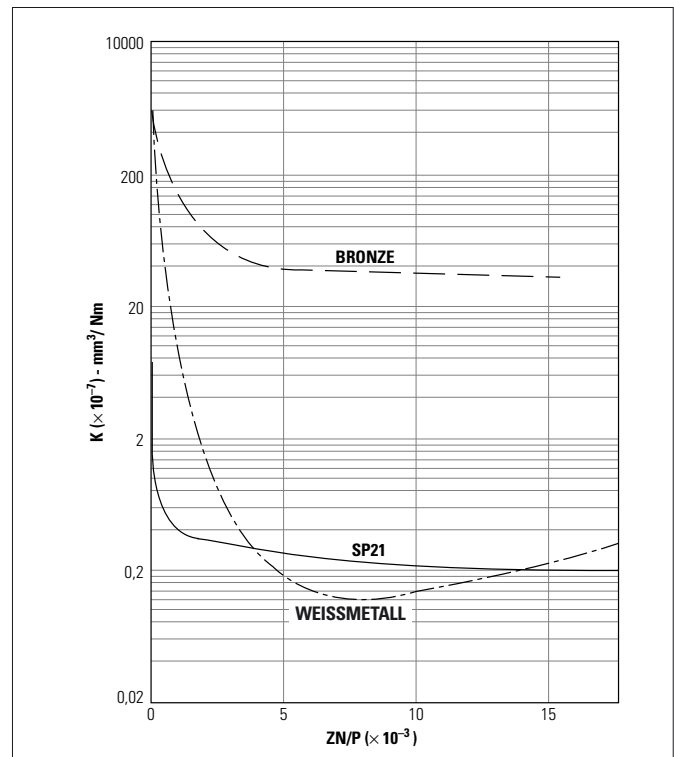


Abb. 43 **Resultate der Verschleißprüfungen von geschmierten Lagern. Verschleißfaktor in Abhängigkeit von ZN/P. Kontaktfläche Stahl AISI 1080, HR_c = 55, Ra = 0,4. Mehrteiliges Axialdrucklager «Sunvis» 31 Öl**

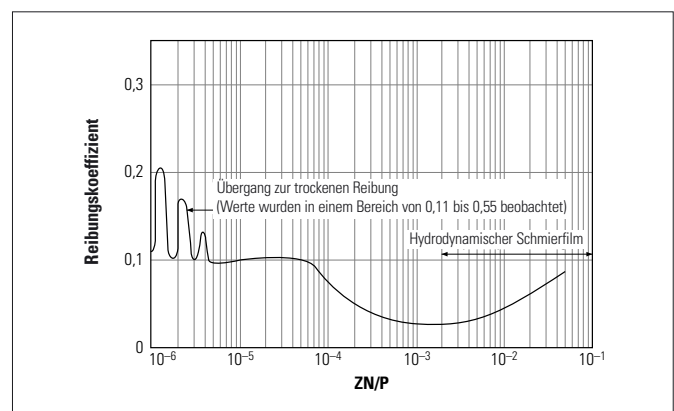


Abb. 44 **Resultate von Reibungsprüfungen von geschmierten Lagern. SP21 gegenüber Stahl AISI 1080, HR_c = 55, Ra = 0,4. Mehrteiliges Axialdrucklager – «Sunvis» 31 Öl**

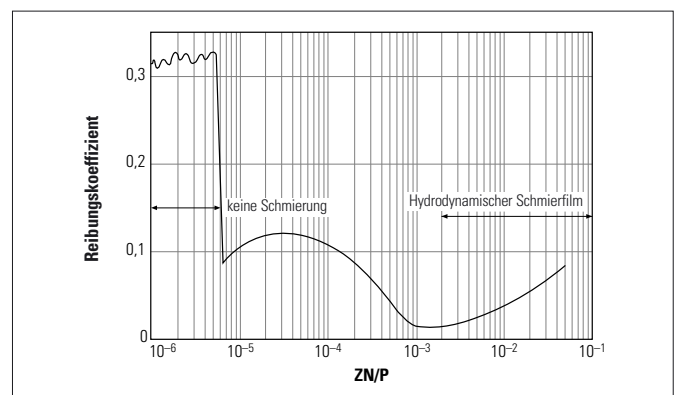


Abb. 45 **Resultate von Reibungsprüfungen von geschmierten Lagern. Bronze gegenüber Stahl (AISI 1080, HR_c = 23, Ra = 0,4). Mehrteiliges Axialdrucklager – «Sunvis» 31 Öl**

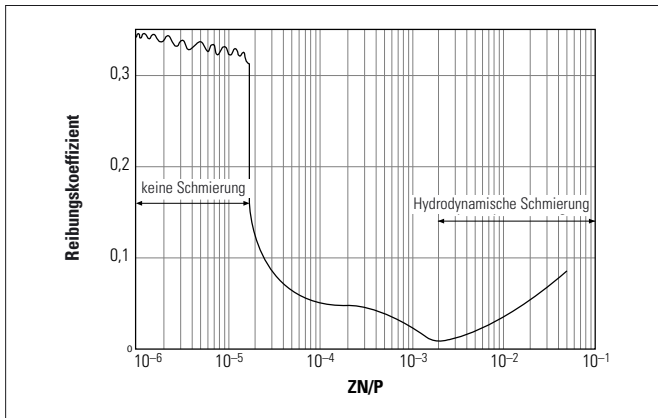


Abb. 46 **Resultate von Reibungsprüfungen von geschmierten Lagern.**
Weißmetall gegenüber Stahl (AISI 1080, HR_c = 23, Ra = 0,4).
Mehrteiliges Radialdrucklager – «Sunvis» 31 Öl

Notlaufeigenschaften

Ein wichtiger Faktor bei der Überlegung, ob ein Schmiermittelmangel in einem ihrer Systeme auftreten kann, sind die Notlaufeigenschaften des Lagers. Während weder Bronze noch Weißmetall ohne Schmiermittel arbeiten, funktionieren Teile aus VESPEL® ohne ein Festfressen oder ein Versagen zu verursachen, solange die Temperaturgrenze nicht überschritten wird. Falls die Schmiermittelversorgung unterbrochen wird, verlagert sich das Verschleiß- und Reibungsverhalten einfach vom Bereich der Grenzschmierung auf den des Trockenlaufs. Die Überlegenheit des Polyimids in dieser Situation wird deutlich in Abb. 47 gezeigt. Sobald die Vorteile der Schmierung wegfallen, steigen die Reibungskräfte in allen drei Systemen schnell an. Beide herkömmlichen Lagerwerkstoffe versagen jedoch, während das Lager aus VESPEL® ohne Unterbrechung weiterarbeitet.

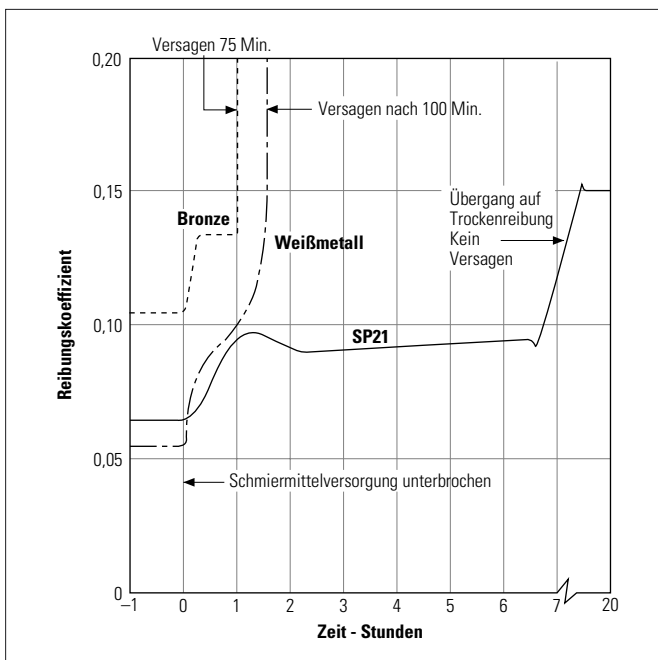


Abb. 47 **Abbruch der Schmiermittelzufuhr – Mehrteiliges Axialdrucklager.**
Kontaktfläche Stahl – HR_c = 55, Ra = 0,4, P = 3,5 MPa, V = 0,1 m/s.
«Sunvis» 31 Öl – ZN/P ≈ 1,4 × 10⁻⁴ bei T = 0.

Radiallager aus SP21 zeigten gute Funktionseigenschaften in Getrieböl vom Typ «A» und F-50 Silikonöl. Dünne Schmierfilme einiger Flüssigkeiten, beispielsweise Wasser, schmierern nicht gut. Um wirksam zu sein, muß die Flüssigkeit die Gleitfläche benetzen. So steigert zum Beispiel ein Wasserfilm, der dick genug ist, um eine ausreichende Flächentrennung zu ermöglichen, die Verschleißrate von Polyimiden. Dieser Effekt ist nicht ungewöhnlich. Er findet auch bei anderen Kunststoffen statt. Die allgemeine Lösung ist der Zusatz eines grenzflächenaktiven Mittels zur Reduzierung der Oberflächenspannung der Flüssigkeit.

Stick-Slip Effekt

Dieser Begriff beschreibt eine stotternde Bewegung in der Anfangsphase, wenn die haftenden Kontaktflächen zu gleiten beginnen. Sie tritt vorrangig bei extrem kleinen Geschwindigkeiten und erhöhtem Reibungskoeffizienten auf. Häufig ist sie die Folge einer zu glatten Oberfläche des metallischen Gleitpartners.

Durch eine Reduzierung der Flächenlast, eine rauhere oder gehärtete Metallfläche und eine Schmierung läßt sich dieser Effekt überwinden.

Dichtungsringe

Warum Polyimide?

In Hochtemperatur-Anwendungen, die Flexibilität und ein ausgezeichnetes Dichtungsverhalten erfordern, steigern Polyimide die Funktionsfähigkeit von Dichtungsringen allgemein. Polyimide eignen sich für einen Dauerbetrieb von Tiefsttemperaturen bis 300°C mit Spitzen bis 500°C und sind bei Temperaturen belastbar, die von anderen Kunststoffen unerreicht bleiben. Sie sind weitaus nachgiebiger als Metalle, aufgrund ihrer Elastizität jedoch beständig gegen bleibende Verformungen.

Polyimide bieten die beste Kombination der Merkmale von Grauguß – einem herkömmlichen Material für Dichtungsringe – und technischen Kunststoffen, darunter hohe Abriebfestigkeit und niedrige Reibungswerte in Verbindung mit einer größeren Stabilität als die meisten anderen Kunststoffe. Ein wichtiger Unterschied zwischen Polyimiden und anderen Werkstoffen für Dichtungsringe ist die Funktionsfähigkeit in ungeschmierten Umgebungen, wie z.B. für Gasdichtungen. Aufgrund ihrer Eigenschmierung zeichnen sich Polyimide durch eine ausgezeichnete Verschleißfestigkeit in ungeschmierten Umgebungen bei maximalen PV-Werten von 12 MPa m/s aus.

Polyimide sind gegen die meisten industriellen Flüssigkeiten, Lösungsmittel, Kohlenwasserstoffe und synthetischen Schmiermittel (Hydrauliköle, Getriebeöle), Inertgase (wie Stickstoff und Argon) und bestimmte Kraftstoffe beständig. Daher eignen sich Dichtungsringe aus Polyimid für Anwendungen in Getrieben, Pneumatik- und Hydraulikzylindern, Gelände-Fahrzeugen, militärische Geräte und Ventile.

Der Einsatz eines VESPEL® Teils kann Garantiekosten, Maschinenausfallzeiten und Herstellungskosten in Ihrer Anwendung reduzieren.

Dieses Kapitel hilft Ihnen, VESPEL® Dichtungsringe auf wirtschaftlichste und rationellste Weise einzusetzen. Sie finden:

- Eine Übersicht über die bei der Konstruktion von Dichtungsringen wichtigen Parameter.
- Gestaltungshinweise für Dichtungsringe aus VESPEL®.
- Empfohlene Toleranzen für Dichtungsringe aus VESPEL®.

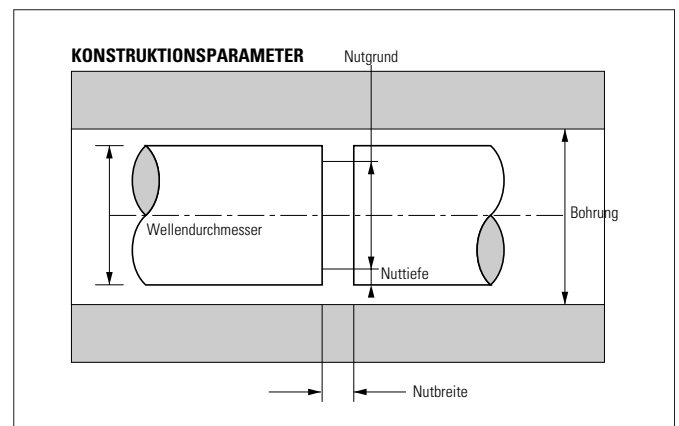
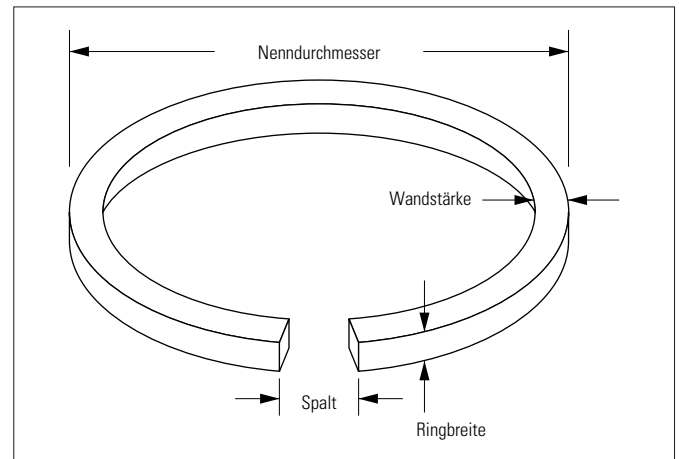
Mehr Informationen über Dichtungsringe aus VESPEL® können Sie der «VESPEL® Automotive» Broschüre, H-11198, und der SAE Veröffentlichung, 980734, «Improving Automatic Transmission Quality with High Performance Polyimide Rotary Seal Rings» entnehmen.

Übersicht über die Konstruktionsparameter

Bei allen Anwendungen für Dichtungsringe sind bestimmte geometrische Parameter identisch, wie in diesen beiden Abbildungen gezeigt wird.

- **Bohrung** – der Innendurchmesser des Zylinders, innerhalb dessen der Dichtungsring sich bewegen muß.
- **Nenndurchmesser** – Außendurchmesser des Dichtungsringes. In der Regel identisch mit der Bohrung.
- **Lehrendurchmesser** – Durchmesser des Meßinstrumentes, in der Regel um ~ 0,2 mm größer als der Nenndurchmesser.

- **Wandstärke** – der Unterschied zwischen Innen- und Außendurchmesser des Dichtungsringes.
- **Ringbreite** – Dicke des Dichtungsringes, gemessen in Axialrichtung.
- **Spalt** – Abstand zwischen den offenen Enden des Dichtungsringes, wenn er im Lehrendurchmesser eingespannt ist.
- **Nennspalt** – Abstand zwischen den offenen Enden des Dichtungsringes, wenn er im Nenndurchmesser eingespannt ist.



Standardkonstruktion direktgeformter Geradstoß-Dichtungsringe

Falls Sie eine vorhandene Anwendung mit einem Dichtungsring aus Metall oder einem anderen technischen Kunststoff haben, sind mehrere Faktoren bei der Spezifizierung von neuen Dichtungsringen aus VESPEL® zu berücksichtigen. Die folgenden Richtlinien legen die Beziehungen zwischen den Abmessungen des vorhandenen Systems und der Größe des neuen Ringes fest. Alle Abmessungen sind in mm angegeben.

1. Nenndurchmesser

Der Außendurchmesser des Dichtungsringes sollte dem Bohrdurchmesser im System entsprechen.

2. $(\text{Ringbreite})_{\max} = (\text{Nutbreite})_{\min} - 0,1 \text{ mm}$

Sehen Sie insgesamt ein seitliches Spiel von 0,1 mm für den Dichtungsring in der Ringnut bei Höchsttemperatur vor.

3. $(\text{Wandstärke})_{\max} = 0,5 [(\text{Bohrung})_{\min} - (\text{Nuktrunddurchmesser})_{\max}] - 0,1 \text{ mm}$

Sehen Sie insgesamt 0,1 mm Radialspiel zwischen Bohrung und Grund bei Höchsttemperatur vor.

4. $(\text{Spalt})_{\min} = \pi \times (\text{Nenn Durchmesser}) (T_{\max} - 20) (\alpha_{\text{SP}} - \alpha_{\text{B}})$

wobei

T = Temperatur, °C.

α_{B} = Wärmeausdehnungskoeffizient des Gehäuses, $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

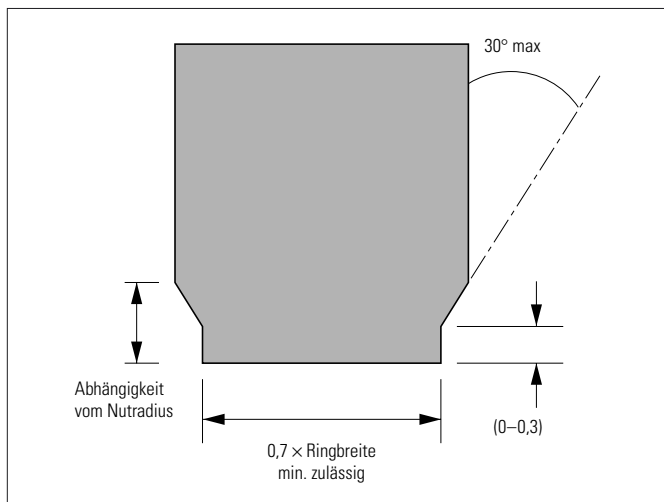
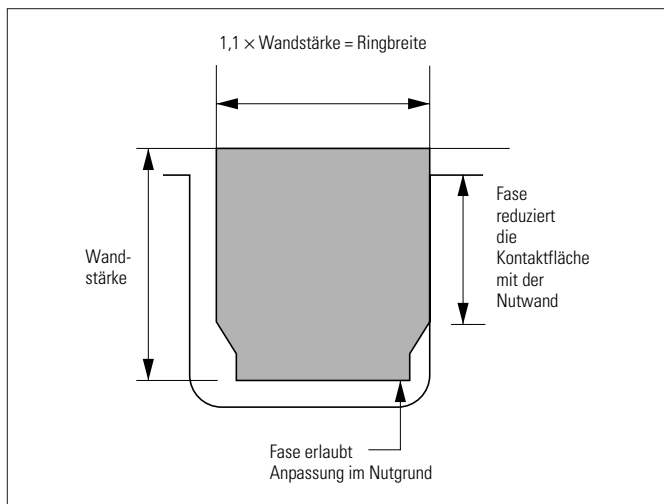
α_{SP} = Wärmeausdehnungskoeffizient des VESPEL® Teils, $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ (siehe Tabelle 8).

Diese Gleichung ergibt den erforderlichen Mindestspalt unter Berücksichtigung der Wärmeausdehnung des Dichtungsringes bei Betriebstemperatur. Der Ring schließt genau bei der berechneten Temperatur.

5. **(Ringbreite) $\geq 1,1$ (Wandstärke)**

Dichtungsringe aus VESPEL® können am Innendurchmesser abgeschragt werden, um den Kontakt zwischen Ring und Nutflächen zu reduzieren, falls die Systemgeometrie eine Ringbreite unter dem 1,1fachen der Wandstärke ergibt.

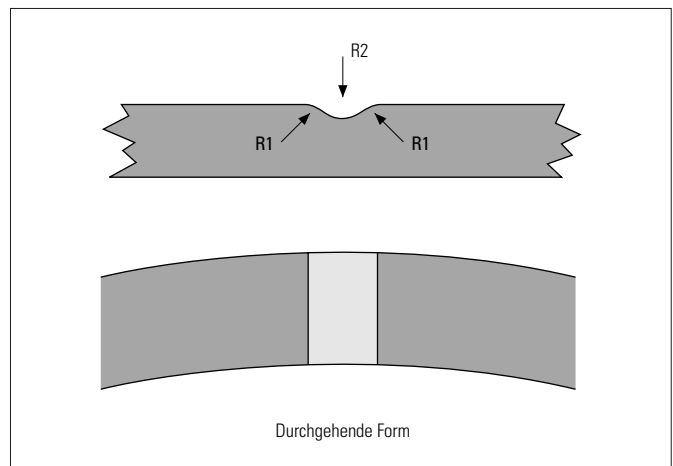
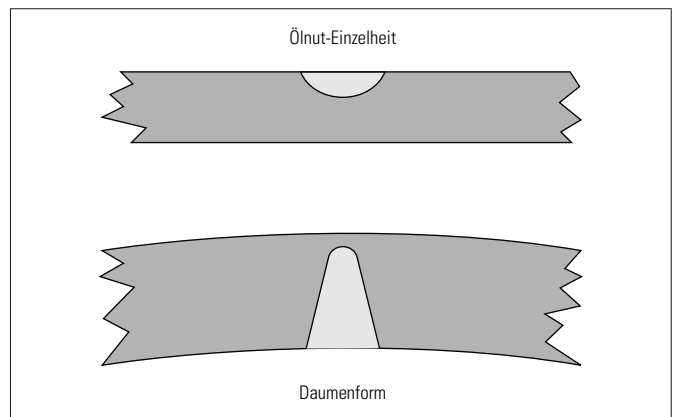
Die Wandstärke wird durch die Länge der Abschragung reduziert und schafft so einen besseren Druckausgleich, wenn der Ring gegen die Bohrung gehalten wird. Ein weiterer Vorteil der Abschragung liegt darin, daß sie ein Spiel bei allen Nutgrundradien erlaubt, die sich durch die Bearbeitung der Ringnut ergeben. Die Abschragung sollte eine Verjüngung von höchstens 30° aufweisen und unter



der Abschragung ist eine Abflachung von 0–0,3 mm vorzusehen. Die Dicke an der Abflachung (d.h. dem dünnsten Teil des Ringes) sollte 70% der Ringbreite nicht überschreiten.

Weitere Gestaltungsrichtlinien

- **Oberflächengüte der Ringnut** – Die Oberflächengüte des Metalls ist ein wichtiger Faktor bei der Gestaltung von Dichtringsystemen und zwar aufgrund der Reibwirkung zwischen den Materialpaarungen. VESPEL® Teile arbeiten extrem gut unter geschmierten Bedingungen. Eine glatte Oberflächengüte von 0,4 µm Ra wird empfohlen. Das Kontaktmaterial der Ringnut sollte so hart wie möglich sein. Falls Grauguß verwendet wird, ist die Oberflächengüte jedoch weniger entscheidend. Erprobungen in der Praxis ergaben, daß der Abrieb im Kontakt mit Grauguß mit einer Oberflächengüte von 2,0 µm Ra, identisch ist mit dem Abrieb bei Flächen, die auf 0,8 µm Ra geschliffen wurden.
- **Messung von Ringspalten** – Die meisten Kunststoffe absorbieren in Luft ein gewisses Maß an Feuchtigkeit. Da der Feuchtigkeitsgehalt die Ringabmessungen beeinflusst, werden Spalte nur gemessen, nachdem der Ring 3 Stunden bei 150°C getrocknet wurde. Damit wird der Zustand des Ringes während des aktuellen Einsatzes simuliert und sichergestellt, daß die Feuchtigkeit völlig beseitigt ist. VESPEL® Ringe können nur präzise gemessen werden, wenn sie in eine Lehre eingesetzt und gegen den Lehrendurchmesser gedrückt werden. Optische Meßmethoden sind erforderlich.



- **Schmierung von Nuten** – Nuten, die für eine Schmiermittelversorgung zur Ringfläche ausgelegt werden, verbessern die Verschleißigenschaften des Ringes. Dichtungsringe aus VESPEL® können wahlweise mit einer Reihe unterschiedlicher Ölnuten geliefert werden. Die beiden gezeigten Konstruktionen wurden in einer breiten Anwendungspalette getestet und haben sich in zahlreichen Fällen erfolgreich bewährt.

Toleranzen

Die Konstruktion von Dichtungsringen mit Polyimiden fordert einen neuen Ansatz hinsichtlich der Toleranzen. Dank ihrer hervorragenden Dichtungsanpassung und Oberflächen mit geringer Reibung können Konstrukteure Dichtungsringe auslegen, die weniger enge Toleranzen erfordern als Metalle. Polyimidringe bieten in der Tat eine bessere Dichtungsanpassung als Metall-Metall-Systeme, die mit weitaus engeren Toleranzen hergestellt werden.

Daher erhalten Konstrukteure die Möglichkeit, Kosten zu senken, indem sie eine aufwendige Oberflächenveredelung und spanende Bearbeitung reduzieren. Die Tabelle unten enthält Richtlinien über die Toleranzen für Standard-Dichtungsringe aus Polyimid.

Dichtungsringe aus Grauguß sind zwar hart, jedoch spröde und brechen häufig während der Montage. Dichtungsringe aus anderen technischen Kunststoffen, die weicher sind als Polyimide, können während der Montage abgeschert werden, ohne daß dies bemerkt wird.

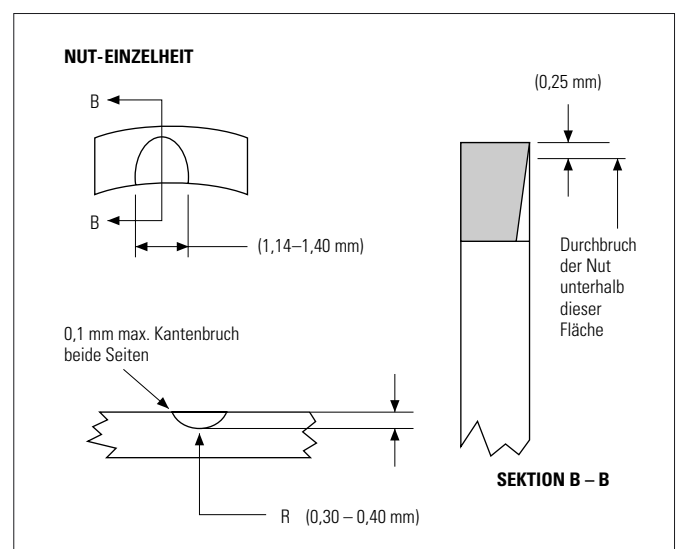
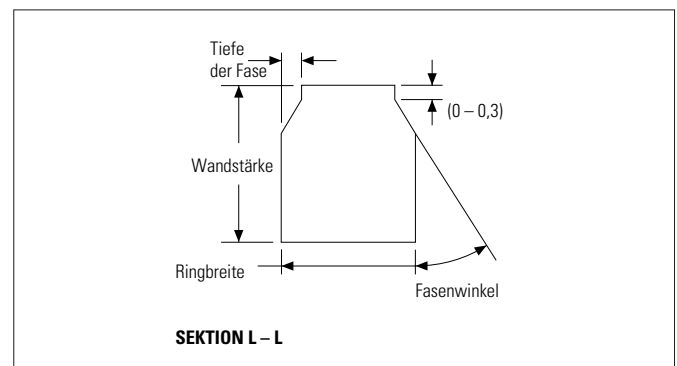
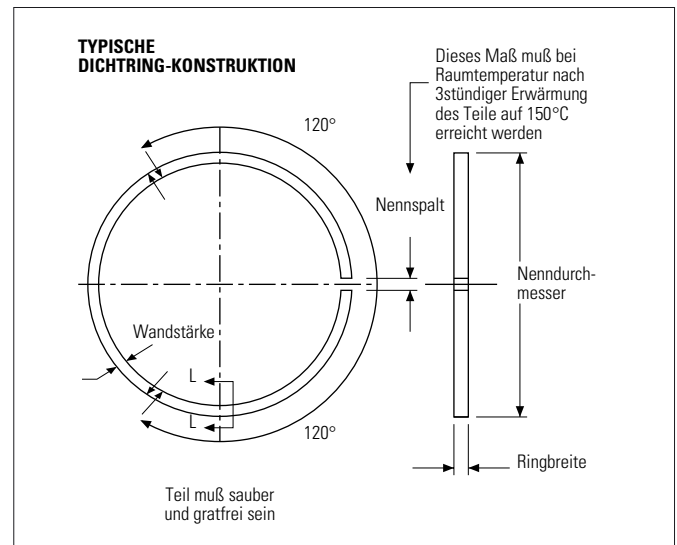
Toleranz-Richtlinien (Abmessungen in mm)

Lehrendurchmesser	Spalt	Ringbreite	Wandstärke
<38	±0,10	±0,10	±0,025
38 to 64	±0,125	±0,125	±0,025
64 to 89	±0,15	±0,15	±0,040
89 to 127	±0,175	±0,175	±0,040
127 to 178	±0,23	±0,23	±0,050

Dichtungsringe aus verschiedenen VESPEL® Typen

- SP21 Standard-Material für Dichtungsringe, da es die beste Kombination aus mechanischer Festigkeit und Abriebfestigkeit bietet.
- SP22 Bietet in etwa die gleichen Abriebeigenschaften, ist aber spröder. Der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient ist jedoch niedriger als bei SP21 Polyimid.
- SP211 Ähnlich wie SP21 Polyimid, bietet jedoch einen niedrigeren Reibungskoeffizienten bis 150°C.

Da das Herstellungsverfahren den linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten beeinflusst (siehe Tabelle 8), sollte der Kunde Teile erproben, die aus dem Material bearbeitet wurden (direktgeformte Teile oder Halbzeuge), welches später im Endeinsatz Verwendung findet.



Aluminium-Kontaktflächen

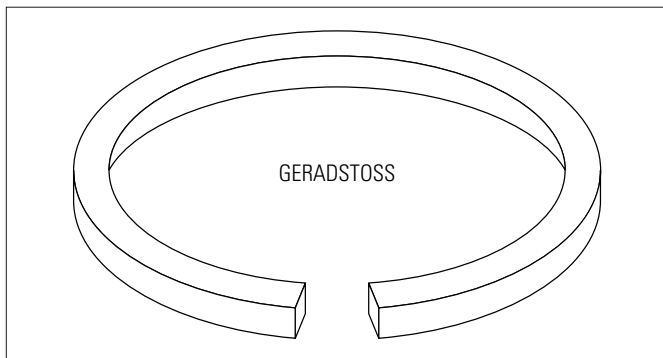
Im Gegensatz zu den meisten anderen Dichtungsringen können VESPEL® Ringe sich entweder gegen die Nutflanke oder die Bohrung bewegen. Handelt es sich bei dem einen Material um Aluminium und bei dem anderen um Stahl/Grauguß, so ist zu empfehlen, den Ring so auszulegen, daß die Relativbewegung zwischen VESPEL® und Stahl/Grauguß stattfindet.

Speziell konstruierte Dichtungsringe

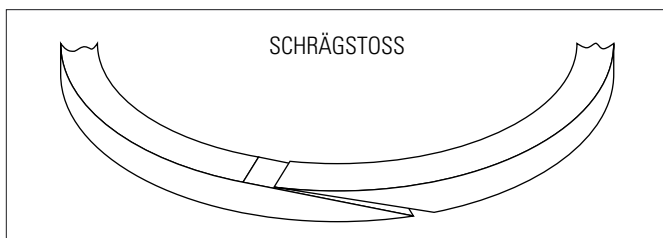
Da immer speziellere Anforderungen an Dichtungsringe gestellt werden – vor allem für Automatikgetriebe von Automobilen – haben sich eine Vielzahl von verschiedenen Gestaltungsrichtlinien für Dichtungsringe herausgebildet.

Spaltgeometrie

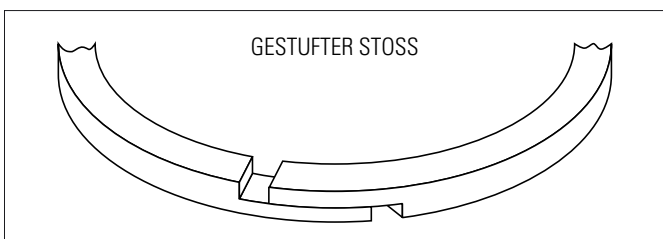
- Geradstoß
- direkt formbar
 - Spalt schließt sich bei Erwärmung und reagiert auf Druck ohne bleibende Verformung
 - Kostengünstige Lösung



- Schrägstoß
- nicht direkt formbar
 - erfordert Schneidbearbeitung
 - Spaltschließeffekt ist weitaus kleiner als beim Geradstoß.



- gestufter Stoß
- je nach Geometrie direkt formbar
 - verhält sich im Prinzip wie eine Geradstoßverbindung mit leicht reduziertem Spiel



Sehr niedrige Leckagen bei komprimierten Geradstoß-Dichtungsringen

Da VESPEL® ein zähes Material ist, kann es ohne bleibende Verformung einem gewissen Druck widerstehen. Daher läßt sich ein Dichtungsring mit einem Geradstoß aus VESPEL® mit einem ab 20°C bis zu maximalen Betriebstemperaturen geschlossenen Spalt («0») konstruieren. Die Wärmeausdehnung des VESPEL® Ringes wird durch elastische Verformung des Materials aufgefangen. Ein Mindest-Öldruck ist erforderlich, um den Ring gleichmäßig gegen die Dichtfläche (Nutflanke) zu pressen, damit die unter Wärmespannung verzogene Ringform in der Nut überwunden wird. Der erforderliche Mindest-Öldruck steigt mit kleineren Durchmessern. Daher ist es sehr wichtig, den Mindestdruck eines Dichtungssystems zu kennen.

Für diese Ringe mit sehr niedrigen konstanten Leckraten, sollte die Ringbreite so groß sein, wie es die Nut und Konstruktionsrichtlinien erlauben. Empfohlen wird eine Relativbewegung des Dichtungsringes zwischen dem Ring selbst und einer Seitenwand der Wellennut, d.h. der Dichtungsring ist in bezug zum Getriebegehäuse nahezu stationär.

Dichtungsringe mit Schrägstoß

Der Einsatz von Schrägstoß-Dichtungsringen mit einem Schnitt von gewöhnlich 20° ist sehr weit verbreitet und bekannt. Diese Ringe lassen sich nicht in einem Arbeitsgang herstellen; der Schnitt muß bearbeitet werden, nachdem der gesamte Ring gepreßt worden ist.

Die Leckagen von Schrägstoß-Dichtungsringen sind etwas höher als die von komprimierten Geradstoß-Dichtungsringen. Sie reagieren allerdings weniger sensibel auf den Mindestöl- druck, der üblicherweise in Automatikgetrieben während des Schaltvorganges anliegt.

Montage

VESPEL® Ringe lassen sich mit einem «elastischen Gedächtnis» herstellen, das die Ringe in den Nutgrund drückt. Diese Ringe werden mit einem geschlossenen Spalt oder mit einer Überlappung der beiden Ringenden geliefert. Sobald diese Ringe an der Welle montiert sind, verbleiben sie am Nutgrund. Dieser Effekt erlaubt eine einfache und sichere Montage der Welle in das Getriebegehäuse ohne den Einsatz von Schmierfett.

Es wird empfohlen, die Ringe bis zur endgültigen Montage in der Verpackung zu behalten und einen Konus zu benutzen, um den Ring in seine vorbestimmte Nut zu setzen. Für mehr Informationen wenden Sie sich bitte an den VESPEL® Spezialisten.

VESPEL® Ringe haben einen höheren Biege-E-Modul als zum Beispiel PTFE-Ringe und können daher in automatischen Montagelinien eingesetzt werden.

Die maximale Wandstärke für Geradstoß-Dichtungsringe muß betragen:

$$0,5 \times (\text{Wellendurchm.}_{\text{min}} - \text{Nutgrunddurchm.}_{\text{max}}) - 0,05 \text{ mm}$$

Um einen Bruch des Dichtungsringes während der Wellenmontage in das Getriebegehäuse zu vermeiden, muß die Wandstärke so eng wie möglich toleriert werden.

Materialauswahl

Die Typenauswahl sollte die unterschiedlichen Wärmeausdehnungs- und Verschleißraten der verschiedenen Materialien berücksichtigen. Die Festlegung von Spalttyp und Spalttoleranzen des Dichtungsringes basieren auf den vorgegebenen Betriebsbedingungen, den Leckageanforderungen und dem Mindestöldruck im Getriebe. Abbildungen 48 bis 51 zeigen den Einfluß des Spalt- und Materialtyps auf die Leckraten.

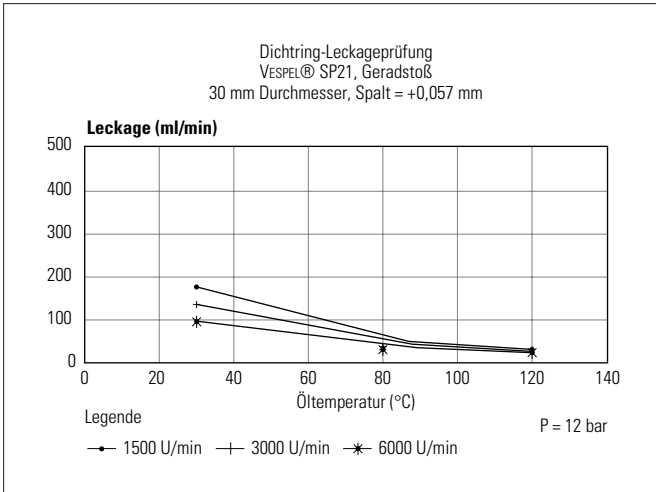


Abb. 48 Leckageprüfung Dichtungsring aus SP21 Geradstoß mit positivem Spalt

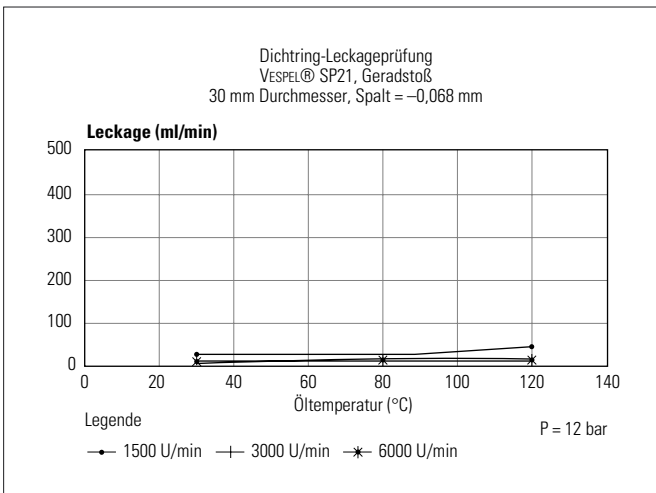


Abb. 49 Leckageprüfung Dichtungsring aus SP21 Geradstoß mit negativem Spalt

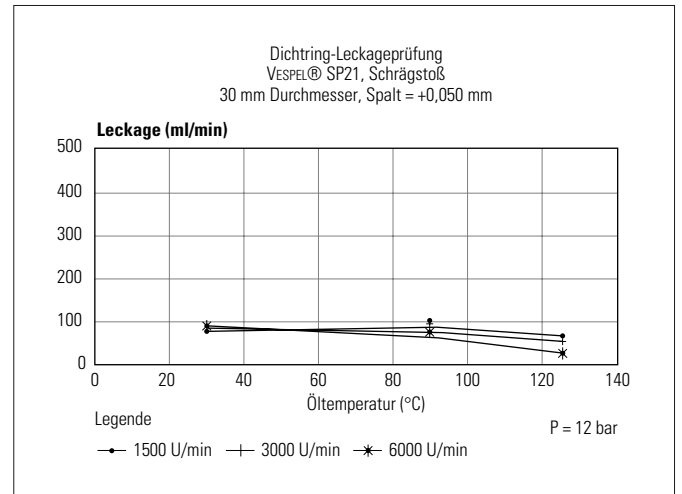


Abb. 50 Leckageprüfung Dichtungsring aus SP21 Schrägstoß

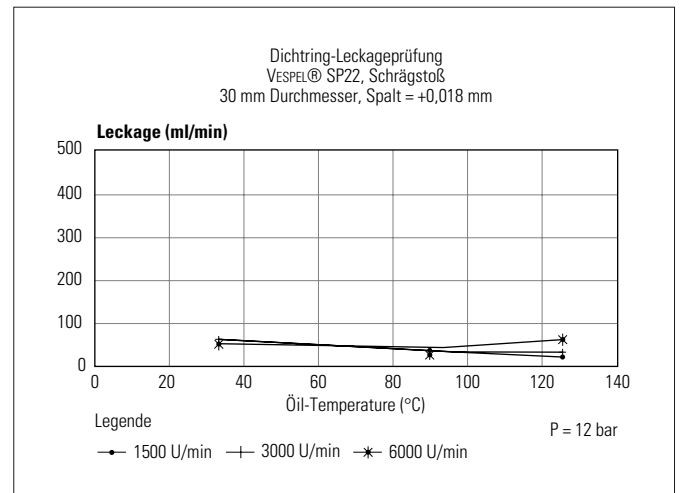


Abb. 51 Leckageprüfung Dichtungsring aus SP22 Schrägstoß

Tabellen und Abbildungen

Tabellen	Seite
1 – Zusammenfassung der typischen Eigenschaften der SP Polyimide	7
2 – Zusammenfassung der typischen Eigenschaften der SP Polyimide	8
3 – Vorläufige Eigenschaften der neuen SP Polyimide.....	9
4 – Typische Eigenschaften von direktgeformten Teilen aus VESPEL® ST	10
5 – Einfluß von Chemikalien	21
6 – Maximale PV-Werte	34
7 – Typische Reibungskoeffizienten – ungeschmierte Drucklagerprüfungen	36
8 – Wärmeausdehnungskoeffizient	37

Abbildungen

1 – Chemische Formel von VESPEL® SP	3
2 – Halbzeuge aus SP Polyimid. Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur	11
3 – Direktgeformte SP und ST Polyimide. Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur	11
4 – Halbzeug aus SP und ST Polyimid. Biege-E-Modul in Abhängigkeit der Temperatur	11
5 – Direktgeformte SP und ST Polyimide. Biege-E-Modul in Abhängigkeit der Temperatur	11
6 – SP Polyimide in Luft bei hohen Temperaturen	12
7 – Reißdehnung in Abhängigkeit der Temperatur. SP21 gegenüber ST2010	12
8 – Maximale Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur. SP21 gegenüber ST2010	13
9 – Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur. SP21 gegenüber ST2010	13
10 – Halbzeug aus SP Polyimid. Typische Zugspannungs-Dehnungskurven bei 23°C	13
11 – Halbzeug aus SP Polyimid. Typische Zugspannungs-Dehnungskurven bei 260°C	13
12 – Direktgeformtes SP Polyimid. Typische Zugspannungs-Dehnungskurven bei 23°C	13
13 – Direktgeformtes SP Polyimid. Typische Zugspannungs-Dehnungskurven bei 260°C	14
14 – Halbzeug aus SP Polyimid. Druckspannungs-Dehnungskurven bei 23°C	14
15 – Halbzeug aus SP Polyimid. Druckspannungs-Dehnungskurven bei 300°C	14
16 – Direktgeformte SP und ST Polyimide. Typische Druckspannungs-Dehnungskurven bei 23°C	14
17 – Halbzeug aus SP1. Gesamtverformung unter Last als Funktion der Zeit	15
18 – Halbzeug aus SP21. Gesamtverformung unter Last als Funktion der Zeit	15
19 – Halbzeug aus SP22. Gesamtverformung unter Last als Funktion der Zeit	15
20 – Halbzeug aus SP1. Kriechmodul unter Belastung als Funktion der Zeit	15
21 – Halbzeug aus SP21. Kriechmodul unter Belastung als Funktion der Zeit	15

Tabellen	Seite
22 – Halbzeug aus SP22. Kriechmodul unter Belastung als Funktion der Zeit	15
23 – Halbzeug aus SP1 und SP21. Maßänderung bei 23°C, 50% r.L.	16
24 – Direktgeformtes SP1. Maßänderung bei 23°C, 50% und 100% r.L.	16
25 – Direktgeformtes SP21. Maßänderung bei 23°C, 50% und 100% r.L.	16
26 – Halbzeug aus SP1 und SP21. Maßänderung bei r.L. im Gleichgewichtszustand, 23°C.	17
27 – Direktgeformtes SP Polyimid. Maßänderung bei r.L. im Gleichgewichtszustand, 23°C.	17
28 – Halbzeug aus SP Polyimid. Lineare Wärmeausdehnung	17
29 – Direktgeformte SP und ST Polyimide. Lineare Wärmeausdehnung	17
30 – Halbzeug aus SP Polyimid. Dauerfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur	18
31 – Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit der Temperatur (SP1)	18
32 – Dielektrischer Verlustfaktor in Abhängigkeit der Temperatur (SP1)	18
33 – Halbzeug aus SP1. Durchgangswiderstand in Abhängigkeit der Temperatur	19
34 – Halbzeug aus SP1. Oberflächenwiderstand in Abhängigkeit der Temperatur	19
35 – Halbzeug aus SP1. Durchschlagfestigkeit in Luft in Abhängigkeit der Temperatur	19
36 – Halbzeug aus SP1. Durchschlagfestigkeit in Abhängigkeit von der Dicke	19
37 – Verschleißrate als Funktion des PV-Wertes für SP21 ..	35
38 – Maximaler PV-Grenzwert von SP21	35
39 – Reibungskoeffizient von SP21 und SP211. Ungeschmierte Anwendung	36
40 – Verschleißfaktor von SP21 und SP211. Ungeschmierte Anwendung	36
41 – Einfluß der Härte der Gegenauflfläche auf den Verschleiß	37
42 – Einfluß der Oberflächengüte der Gegenauflfläche auf den Verschleiß	37
43 – Resultate der Verschleißprüfung von geschmierten Lagern – Verschleißfaktor in Abhängigkeit von ZN/P. 40	40
44 – Resultate der Reibungsprüfungen bei geschmierten Lagern – SP21 gegenüber Stahl	40
45 – Resultate der Reibungsprüfung bei geschmierten Lagern – Bronze gegenüber Stahl	40
46 – Resultate der Reibungsprüfung bei geschmierten Lagern – Weißmetall gegenüber Stahl	41
47 – Abbruch der Schmiermittelzufuhr	41
48 – Leckageprüfung-Dichtungsring aus SP21 – Geradstoß mit positivem Spalt	47
49 – Leckageprüfung-Dichtungsring aus SP21 – Geradstoß mit negativem Spalt.	47
50 – Leckageprüfung-Dichtungsring aus SP21 – Schrägstoß	47
51 – Leckageprüfung-Dichtungsring aus SP22 – Schrägstoß	47

Anhang A

Abmessungen von Standard-Halbzeugen

Rundstangen

Min. Durchmesser mm	Länge mm
6,3	965
9,5	965
11,1	965
12,7	965
15,8	965
19,0	965
25,4	965
31,7	965
38,1	965
50,8	965
63,5	965
82,5	685

Platten

Minimum Dicke mm	Oberfläche	
50,8	} 254 × 254 mm ²	
38,1		
25,4		} 254 × 127 mm ²
12,7		
6,3	} 127 × 127 mm ²	
4,8*		
3,2*		
1,6*		

* Dünne Platten sind nur aus SP1 und SP21 mit einer Fläche von 254 × 254 mm² verfügbar.

Rechteckprofile

Min. Querschnitt- abmessungen Breite × Dicke mm	Max. Länge
101 × 50,8 mm	965 mm / 317,5 mm

Ringe und Scheiben

Eine Vielzahl von Ringen und Scheiben wird in Durchmessern von 15,8 bis 63,5 mm mit Dicken von 3,1 mm bis 6,3 mm angeboten.

Kugeln nur aus SP1

Durchmesser in mm
3,2
6,3
9,5
12,7
15,8

Die Toleranzen der Kugeldurchmesser liegen bei ±0,051 mm.

Rohre

Durchmesser Min.-A.D. mm	Max. I.D. mm	Max Länge mm
180	142	838
170	142	838
162	142	838
170	119	838
149	119	838
142	119	838
165	109	838
154	109	838
144	109	838
137	109	838
121	109	838
137	86,3	838
124	86,3	838
109	86,3	838
94	86,3	838
129	66,0	838
119	66,0	838
101	66,0	838
86,3	66,0	838
124	48,2	838
111	48,2	838
94,0	48,2	838
78,7	48,2	838
43,1	35,5	685
40,6	27,9	685

Die Mehrzahl der oben gegebenen Außenmaße sind Mindestabmessungen. Tatsächliche Innendurchmesser von Rohren sind etwas kleiner als angegeben.

Anhang B ISO Toleranzen

Nenn- maße in mm	WELLE																		Niedrigste und höchste Maßabweichung in μ (0,001 mm)																	
	über	bis	g5	h5	j5	k5	m5	n5	g6	h6	j6	k6	m6	n6	r6	f7	h7	j7	k7	m7	n7	b8	e8	f8	h8	d9	e9	f9	h9	d10	a11	b11	c11	d11	h11	
1	-2	0	+2	+4	+6	+8	+8	-2	0	+4	+6	+8	+10	+16	+10	-6	0	+6	+10	-	+14	-	-14	-6	0	-20	-14	-6	0	-20	-	-	-	-60	-20	0
	-6	-4	-2	0	+2	+4	+4	-8	-6	-2	0	0	+2	+4	+10	-16	-10	-4	0	0	+4	-	-28	-20	-14	-45	-39	-31	-25	-60	-60	-	-	-120	-80	-60
3	-2	0	+2	+4	+6	+8	+8	-2	0	+4	+6	+8	+10	+16	+10	-6	0	+6	+10	-	+14	-14	-6	0	-20	-14	-6	0	-20	-270	-140	-200	-140	-20	0	
	-6	-4	-2	0	+2	+4	-8	-6	-2	0	0	+2	+4	+10	-16	-10	-4	0	0	+4	-154	-28	-20	-14	-45	-39	-31	-25	-60	-330	-200	-300	-200	-120	-60	
3	-4	0	+3	+6	+9	+13	+8	-4	0	+6	+9	+12	+16	+23	-10	0	+8	+13	+16	+20	+140	-20	-10	0	-30	-20	-10	0	-30	-270	-140	-200	-140	-30	0	
	-9	-5	-2	+1	+4	+8	-12	-8	-2	0	0	+1	+4	+8	+15	-22	-12	-4	+1	+4	+8	-158	-38	-28	-18	-60	-50	-40	-30	-78	-345	-215	-145	-105	-75	
6	-5	0	+4	+7	+12	+16	+16	-5	0	+7	+10	+15	+19	+28	+19	-28	0	+16	+21	+25	+150	-25	-13	0	-40	-25	-13	0	-40	-280	-150	-200	-150	-80	0	
	-11	-6	-2	+1	+6	+10	+14	-14	-9	-2	0	+1	+6	+10	+19	-28	-15	-5	+1	+6	+10	-172	-47	-35	-22	-76	-61	-49	-36	-98	-370	-240	-240	-170	-130	-90
10	-6	0	+5	+9	+15	+20	+20	-6	0	+8	+12	+18	+23	+34	+34	-16	0	+12	+19	+25	+30	-150	-32	0	-50	-32	-16	0	-50	-290	-150	-150	-95	-50	0	
	-14	-8	-3	+1	+7	+12	-17	-11	-3	+1	+7	+12	+17	+23	+23	-34	-18	-6	+1	+7	+12	-177	-39	-43	-27	-93	-75	-59	-43	-120	-400	-260	-205	-160	-110	
18	-7	0	+5	+11	+17	+24	+24	-7	0	+9	+15	+21	+28	+41	+34	-20	0	+13	+23	+29	+36	-160	-40	-20	0	-65	-40	-20	0	-65	-300	-160	-110	-65	0	
	-16	-9	-4	+2	+8	+15	-20	-13	-4	+2	+8	+15	+28	+41	+34	-50	-25	-10	+2	+8	+15	-193	-73	-53	-33	-117	-92	-72	-52	-149	-430	-290	-240	-195	-130	
30	-9	0	+6	+13	+20	+28	+28	-9	0	+11	+18	+25	+33	+50	+50	-25	0	+15	+27	+34	+42	-170	-50	-25	0	-80	-50	-25	0	-80	-310	-170	-120	-80	0	
	-20	-11	-5	+2	+9	+17	-25	-16	-5	+2	+9	+17	+23	+34	+34	-50	-25	-10	+2	+9	+17	-180	-89	-64	-39	-142	-112	-87	-62	-180	-320	-180	-130	-240	-160	
50	-10	0	+6	+15	+24	+33	+33	-10	0	+12	+21	+30	+39	+60	+60	-30	0	+18	+32	+41	+50	-236	-60	-30	0	-100	-60	-30	0	-100	-340	-190	-140	-100	0	
	-23	-13	-7	+2	+11	+20	+20	-29	-19	-7	+2	+11	+20	+43	+62	-60	-30	-12	+2	+11	+20	-200	-106	-76	-46	-174	-134	-104	-74	-220	-360	-200	-150	-290	-190	
80	-12	0	+6	+18	+28	+38	+38	-12	0	+13	+25	+35	+45	+73	+73	-36	0	+20	+38	+48	+58	-274	-72	-36	0	-120	-72	-36	0	-120	-380	-220	-170	-120	0	
	-27	-15	-9	+3	+13	+23	+23	-34	-22	-9	+3	+13	+23	+76	+88	-71	-35	-15	+3	+13	+23	-240	-126	-90	-54	-207	-159	-123	-87	-260	-410	-240	-180	-340	-220	
100	-14	0	+7	+21	+33	+45	+45	-14	0	+14	+28	+40	+52	+88	+88	-43	0	+22	+43	+55	+67	-323	-85	-43	0	-145	-85	-43	0	-145	-520	-280	-210	-145	0	
	-32	-18	-11	+3	+15	+27	+27	-39	-25	-11	+3	+15	+27	+93	+93	-83	-40	-18	+3	+15	+27	-343	-148	-106	-63	-245	-185	-143	-100	-305	-770	-530	-460	-395	-250	
140	-14	0	+7	+21	+33	+45	+45	-14	0	+14	+28	+40	+52	+88	+88	-43	0	+22	+43	+55	+67	-323	-85	-43	0	-145	-85	-43	0	-145	-580	-310	-230	-145	0	
	-32	-18	-11	+3	+15	+27	+27	-39	-25	-11	+3	+15	+27	+93	+93	-83	-40	-18	+3	+15	+27	-373	-148	-106	-63	-245	-185	-143	-100	-305	-830	-560	-480	-395	-250	
160	-14	0	+7	+21	+33	+45	+45	-14	0	+14	+28	+40	+52	+88	+88	-43	0	+22	+43	+55	+67	-323	-85	-43	0	-145	-85	-43	0	-145	-660	-340	-240	-145	0	
	-32	-18	-11	+3	+15	+27	+27	-39	-25	-11	+3	+15	+27	+93	+93	-83	-40	-18	+3	+15	+27	-373	-148	-106	-63	-245	-185	-143	-100	-305	-950	-630	-530	-460	-320	
180	-14	0	+7	+21	+33	+45	+45	-14	0	+14	+28	+40	+52	+88	+88	-43	0	+22	+43	+55	+67	-323	-85	-43	0	-145	-85	-43	0	-145	-740	-380	-260	-170	0	
	-32	-18	-11	+3	+15	+27	+27	-39	-25	-11	+3	+15	+27	+93	+93	-83	-40	-18	+3	+15	+27	-412	-172	-122	-72	-285	-215	-165	-115	-355	-1030	-670	-550	-460	-290	
200	-15	0	+7	+24	+37	+51	+51	-15	0	+16	+33	+46	+60	+109	+106	-50	0	+25	+50	+63	+77	-380	-100	-50	0	-170	-100	-50	0	-170	-820	-420	-280	-170	0	
	-35	-20	-13	+4	+17	+31	+31	-44	-29	-13	+4	+17	+31	+113	+113	-96	-46	-21	+4	+17	+31	-452	-172	-122	-72	-285	-215	-165	-115	-355	-1350	-860	-680	-510	-320	
250	-17	0	+7	+27	+43	+57	+57	-17	0	+16	+36	+52	+66	+126	+126	-56	0	+26	+56	+72	+86	-480	-110	-56	0	-190	-110	-56	0	-190	-920	-480	-300	-190	0	
	-40	-23	-16	+4	+20	+34	+34	-49	-32	-16	+4	+20	+34	+130	+130	-108	-52	-26	+4	+20	+34	-621	-191	-137	-81	-320	-240	-186	-130	-400	-1240	-800	-620	-190	0	
280	-18	0	+7	+29	+46	+62	+62	-18	0	+18	+40	+57	+73	+144	+144	-62	0	+29	+61	+78	+94	-600	-125	-62	0	-210	-125	-62	0	-210	-1200	-600	-360	-210	0	
	-43	-25	-18	+4	+21	+37	+37	-54	-36	-18	+4	+21	+37	+150	+150	-119	-57	-28	+4	+21	+37	-689	-214	-151	-89	-350	-265	-202	-140	-440	-1350	-880	-720	-510	-320	
315	-18	0	+7	+32	+50	+67	+67	-20	0	+20	+45	+63	+80	+166	+166	-68	0	+31	+68	+86	+103	-760	-135	-68	0	-230	-135	-68	0	-230	-1500	-960	-720	-210	0	
	-47	-27	-20	+5	+23	+40	+40	-60	-40	-20	+5	+23	+40	+172	+172	-131	-63	-32	+5	+23	+40	-840	-232	-165	-97	-385	-290	-223	-155	-480	-1650	-1160	-840	-630	-400	

Niedrigste und höchste Maßabweichung in μ (0,001 mm)

BOHRUNG

Nenn-
maße
in mm

über | bis

	G6	H6	J6	K6	M6	N6	F7	G7	H7	J7	K7	M7	N7	R7	B8	E8	F8	H8	J8	K8	M8	N8	D9	E9	D10	A11	B11	C11	D11	H11	
-	+8 +2	+6 0	+2 -4	0 -6	-2 -8	-4 -10	+16 +6	+12 +2	+10 0	+4 -6	0 -10	-2 -12	-4 -14	-10 -20	-	+28 +14	+20 +6	+14 0	+6 -8	0 -14	-	-4 -18	+45 +20	+39 +14	+60 +20	-	-	+120 +60	+80 +20	+60 0	
1	+8 +2	+6 0	+2 -4	0 -6	-2 -8	-4 -10	+16 +6	+12 +2	+10 0	+4 -6	0 -10	-2 -12	-4 -14	-10 -20	+154 +140	+28 +14	+20 +6	+14 0	+6 -8	0 -14	-	-4 -18	+45 +20	+39 +14	+60 +20	+330 +270	+200 +140	+120 +60	+80 +20	+60 0	
3	+12 +4	+8 +2	+5 -3	+2 -6	-1 -9	-5 -13	+22 +10	+16 +4	+12 0	+6 -6	+3 -9	0 -12	-4 -16	-11 -23	+158 +140	+38 +20	+28 +10	+18 0	+10 -8	+5 -13	+2 -16	-2 -20	+60 +30	+50 +20	+78 +30	+345 +270	+215 +140	+145 +70	+105 +30	+75 0	
6	+14 +5	+9 0	+5 -4	+2 -7	-3 -12	-7 -16	+28 +13	+20 +5	+15 0	+8 -7	+5 -10	0 -15	-4 -19	-4 -28	+172 +150	+47 +25	+35 +13	+22 0	+12 -16	+10 -12	+6 -21	+1 -21	-3 -25	+76 +40	+61 +25	+98 +40	+370 +280	+240 +150	+170 +80	+130 +40	+90 0
10	+17 +6	+11 0	+6 -5	+2 -9	-4 -15	-9 -20	+34 +16	+24 +6	+18 0	+10 -8	+6 -12	0 -18	-5 -23	-5 -34	+177 +150	+59 +32	+43 +16	+27 0	+15 -12	+8 -19	+2 -25	-3 -30	+93 +50	+75 +32	+120 +50	+400 +290	+260 +150	+205 +95	+160 +50	+110 0	
14	+20 +7	+13 0	+8 -5	+2 -11	-4 -17	-11 -24	+41 +20	+28 +7	+21 0	+12 -9	+6 -15	0 -21	-7 -28	-7 -41	+193 +160	+73 +40	+53 +20	+33 0	+20 -13	+10 -13	+4 -23	+4 -29	-3 -36	+117 +65	+92 +40	+149 +65	+430 +300	+290 +160	+240 +110	+195 +65	+130 0
30	+25 +9	+16 0	+10 -6	+3 -13	-4 -20	-12 -28	+50 +25	+34 +9	+25 0	+14 -11	+7 -18	0 -25	-8 -33	-25 -50	+209 +170	+89 +50	+64 +25	+39 0	+24 -15	+12 -27	+5 -34	+5 -42	+142 +80	+112 +50	+180 +80	+470 +310	+330 +170	+280 +120	+240 +80	+160 0	
40	+29 +10	+19 0	+13 -6	+4 -15	-5 -24	-14 -33	+60 +30	+40 +10	+30 0	+18 -12	+9 -21	0 -30	-9 -39	-30 -62	+236 +190	+106 +60	+76 +30	+46 0	+28 -18	+14 -32	+5 -41	+5 -50	+174 +100	+134 +60	+220 +100	+530 +340	+380 +220	+330 +140	+290 +100	+190 0	
50	+34 +12	+22 0	+16 -6	+4 -18	-6 -28	-16 -38	+71 +36	+47 +12	+35 0	+22 -13	+10 -25	0 -35	-10 -45	-7 -48	+274 +240	+126 +72	+90 +36	+54 0	+34 -20	+16 -38	+6 -48	+6 -58	+207 +120	+159 +72	+260 +120	+600 +410	+440 +240	+390 +180	+340 +150	+220 0	
80	+39 +14	+25 0	+18 -7	+4 -21	-8 -33	-20 -45	+83 +43	+54 +14	+40 0	+26 -14	+12 -28	0 -40	-12 -52	-50 -90	+343 +280	+148 +85	+106 +43	+63 0	+41 -22	+20 -43	+8 -55	+8 -67	+245 +145	+185 +85	+305 +145	+770 +520	+530 +280	+460 +210	+395 +145	+250 0	
100	+44 +15	+29 0	+22 -7	+5 -24	-8 -37	-22 -51	+96 +50	+61 +15	+46 0	+30 -16	+13 -33	0 -46	-14 -60	-63 -109	+452 +380	+172 +100	+122 +50	+72 0	+47 -25	+22 -50	+9 -63	+9 -77	+285 +170	+215 +100	+355 +170	+1030 +740	+670 +380	+550 +260	+460 +170	+290 0	
120	+49 +17	+32 0	+25 -7	+5 -27	-9 -41	-25 -57	+108 +56	+69 +17	+52 0	+36 -16	+16 -36	0 -52	-14 -66	-74 -126	+561 +480	+191 +110	+137 +56	+81 0	+55 -26	+25 -56	+9 -72	+5 -86	+320 +190	+240 +110	+400 +190	+1240 +820	+800 +480	+620 +300	+510 +190	+320 0	
140	+54 +18	+36 0	+29 -7	+7 -29	-10 -46	-26 -62	+119 +62	+75 +18	+57 0	+39 -18	+17 -40	0 -57	-16 -73	-87 -144	+689 +600	+214 +125	+151 +62	+89 0	+60 -29	+28 -61	+11 -78	+5 -94	+350 +210	+265 +125	+440 +210	+1560 +1200	+960 +600	+720 +360	+570 +210	+360 0	
160	+60 +20	+40 0	+33 -7	+8 -32	-10 -50	-27 -67	+131 +68	+83 +20	+63 0	+43 -20	+18 -45	0 -63	-17 -80	-103 -166	+857 +760	+232 +135	+165 +88	+97 0	+66 -31	+29 -68	+11 -86	+6 -103	+385 +230	+290 +135	+480 +230	+1900 +1500	+1160 +760	+840 +440	+630 +230	+400 0	
180	+60 +20	+40 0	+33 -7	+8 -32	-10 -50	-27 -67	+131 +68	+83 +20	+63 0	+43 -20	+18 -45	0 -63	-17 -80	-103 -172	+857 +840	+232 +135	+165 +88	+97 0	+66 -31	+29 -68	+11 -86	+6 -103	+385 +230	+290 +135	+480 +230	+2050 +1650	+1240 +840	+880 +480	+630 +230	+400 0	

Anhang C

Sicherheitsdatenblatt

VESPEL® POLYIMIDTEILE UND HALBZEUGE IN SYNONYMLISTE VSP001

Chemisches Produkt/Firmenkennzeichnung

Material identification

VESPEL® ist ein eingetragenes Warenzeichen von DuPont
MSDS Nummer DU003855

Warenname und Synonyme

VESPEL® SP1, SP3, SP21, SP22,
SP211, SP221,

VESPEL® SP1D, SP21D, SP22D,
SP211D, SP221D,

VESPEL® ST2000, ST2000D, ST2005, ST2005D,
ST2010, ST2010D, ST2030, ST2030D

Firmenkennzeichnung

Hersteller/Händler

DuPont
Polymers
1007 Market Street
Wilmington, DE 19898, U.S.A.

Tel.-Nr.:

Produktinformation 1-800-441-7515
Not-Transport 1-800-424-9300
Medizinischer Notfall 1-800-441-3637

Typen/Informationen über Bestandteile

Bestandteile	CAS Nr.	%
Poly-N,N'-(p,p'-Oxydiphenyl) Pyromellitimid	25038-81-7	50-100
Nur in SP21, 22, 211, 221 und ST: Graphit (nicht in ST2000)	7782-42-5	2-40
Nur im Typ SP3: Molybdän-Disulfid	1317-33-5	15
Nur in SP211, 221 (10-15%) und D-Typen (<1%): Polytetrafluoroethylene (PTFE)	9002-84-0	0,2-15

Bemerkung

Material is not known to contain Toxic Chemicals under Section 313 of Title III of the Superfund Amendments and Reauthorization Act of 1986 and 40 CFR part 372.

Hinweise auf Gefahren

Mögliche gesundheitliche Schädigungen

Teile und Halbzeuge aus VESPEL® Polyimid sind im Lieferzustand ungefährlich.

Bei der Bearbeitung der Polyimidtypen SP211, 221 und D können Partikel freigesetzt werden, die Polytetrafluorethylen (PTFE) enthalten. Stumpfe Werkzeuge oder eine Bearbeitung ohne Kühlmittel kann einen Temperaturanstieg über 260°C bewirken. Die größte Gefahr in Verbindung mit PTFE liegt in dem Einatmen der Dämpfe, die durch Überhitzen (>260°C) oder Brennen von PTFE entstehen. Dies kann ein «Polymer-Rauchfieber» verursachen. Hierbei handelt es sich um eine vorübergehende, etwa 24 Stunden anhaltende grippeähnliche Erkrankung mit Fieber, Schüttelfrost und manchmal mit Husten. Raucher sollten eine Verunreinigung ihrer Tabakprodukte mit diesem Material vermeiden. Kleine Mengen von Carbonylfluorid und Chlorwasserstoff können außerdem bei einer Überhitzung oder Verbrennung von PTFE auftreten.

Poly-N,N'-(p,p'-Oxy-Diphenyl) Pyromellitimid

Das Polymer ist leicht hautreizend, jedoch kein Hautsensibilisator bei Tieren. Die Folgen eines einmaligen Einatmens führt zu Unwohlsein und Atmungsproblemen (4 Stunden LC50 = 15 600 mg/m³ in Ratten). Ein wiederholtes Schlucken führt zu einer reduzierten Nahrungsaufnahme und Gewichtszunahme.

Ein übermäßiger Hautkontakt wirkt sich auf die menschliche Gesundheit durch eine unangenehme Hautreizung oder Ausschlag aus. Das Einatmen kann zu einer Reizung der oberen Atemgänge in Verbindung mit Husten und Übelkeit führen. Es sind keine zuverlässigen Informationen verfügbar, die die Folgen einer übermäßigen Einwirkung durch Augenkontakt oder Schlucken vorhersagen. Eine bedeutende Permeation der Haut und Vergiftungserscheinungen nach einem Kontakt ist unwahrscheinlich. Keinerlei Berichte liegen über eine Sensibilisierung beim Menschen vor.

Graphit

Sehr niedrige Toxizität beim Schlucken (Oral LD50 > 5000 mg/kg in Ratten). Das Compound reizt nicht die Augen. Eine übermäßige Einwirkung durch langfristiges Einatmen kann chronische Lungenerkrankungen mit Symptomen einer Lungeninsuffizienz zur Folge haben. Personen, die bereits lungenkrank sind, können auf die Toxizität einer übermäßigen Graphiteinwirkung empfänglicher reagieren.

Molybdän-Disulfid

Es sind keine zuverlässigen Informationen verfügbar, die die Folgen einer übermäßigen Einwirkung auf die menschliche Gesundheit voraussagen.

Polytetrafluorethylen (PTFE)

Das Compound wirkt nicht hautreizend. Das einmalige Einatmen hoher Staubkonzentrationen führte bei Tieren zu einer Reizung der Lunge. Ein wiederholtes Schlucken bestimmter Dosen führte zu keiner feststellbaren Vergiftungserscheinung, außer einer Veränderung der Anzahl an zirkulierenden weißen Blutzellen nach langfristiger Dosierung (25% der Nahrung über 90 Tage). Tests zeigten keine Entwicklung von Toxizität in Tieren und keine genetischen Schäden bei Tieren oder bakteriellen Zellkulturen.

Folgen einer übermäßigen Einwirkung auf die menschliche Gesundheit

Das Einatmen der Rauchgase von brennendem *TEFLON® PTFE* kann ein Polymergasfieber verursachen, eine vorübergehende, etwa 24 Stunden anhaltende grippeähnliche Erkrankung mit Fieber, Schüttelfrost und manchmal begleitet von Husten.

Die Literatur berichtet über chronische Lungenerkrankungen bei Personen nach wiederholten Polymergasfieberschüben. Dies gilt vor allem für Raucher. Aufgrund komplexer Faktoren, darunter die Einwirkungen von Gemischen und die Krankengeschichte der Raucher, gelten diese Ergebnisse allerdings nicht als gesichert. Ein Schutz gegen akute Einwirkungen sollte mögliche chronische Erkrankungen einbeziehen.

Raucher sollten eine Verunreinigung ihrer Tabakprodukte mit diesem Material vermeiden und ihre Hände vor dem Rauchen waschen. Eine bedeutende Hautpermeation nach einem Kontakt scheint unwahrscheinlich. Es liegen keine Berichte über die Sensibilisierung von Menschen vor. Kleine Mengen von Carbonylfluorid und Fluorwasserstoff können ebenfalls auftreten, falls PTFE überhitzt oder brennt.

Das Einatmen niedriger Konzentrationen an *Fluorwasserstoff* kann zunächst Erstickungssymptome, Husten sowie schwere Augen-, Nasen- und Halsreizungen hervorrufen. Möglicherweise folgen nach einer symptomfreien Zeit von 1 bis 2 Tagen Fieber, Schüttelfrost, Atembeschwerden, Zyanose und Lungenödeme. Akute oder ständige Überdosen von HF können Leber und Nieren schädigen.

Das Einatmen, das Schlucken, Haut- und Augenkontakt mit *Carbonylfluorid* kann zunächst folgende Symptome zur Folge haben: Hautreizung mit Übelkeit oder Ausschlag, Augenkorrosion mit Ulkusbildung in Hornhaut- oder Bindehaut; Reizung der oberen Atemwege oder vorübergehende Lungenreizungen mit Husten, Übelkeit, Atembeschwerden oder Kurzatmigkeit. Die Symptome können sich verzögern.

Personen mit Lungenkrankheiten reagieren eventuell empfänglicher auf die Toxizität einer übermäßigen Einwirkung durch thermische Abbauprodukte.

Karzinogenetische Informationen

Keine der Bestandteile in diesen Materialien wird von IARC, NTP, OSHA oder ACGIH bei Konzentrationen $\geq 0,1\%$ als krebserzeugendes Mittel aufgelistet.

Erste Hilfe-Maßnahmen

Erste Hilfe

Einatmen

Keine spezielle Behandlung ist nötig, da ein Einatmen des Compounds wahrscheinlich keine Gefährdung darstellt. Suchen Sie gegebenenfalls einen Arzt auf.

Hautkontakt

Ein Hautkontakt mit dem Compound stellt wahrscheinlich keine Gefahr dar, doch ist es ratsam, die Haut zu reinigen.

Augenkontakt

Spülen Sie nach einem Kontakt die Augen sofort mindestens 15 Minuten mit reichlich Wasser aus. Begeben Sie sich in ärztliche Behandlung.

Einnahme

Keine spezielle Behandlung ist nötig, da ein Einatmen wahrscheinlich keine Gefährdung darstellt. Suchen Sie gegebenenfalls einen Arzt auf.

Brandbekämpfungs-Maßnahmen

Enflammbarkeitseigenschaften

Brand- und Explosionsgefahren:

Gefährliche Gase und Dämpfe, die bei Feuer freigesetzt werden: Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Rauchgase. SP211, 221 und D-Typen können außerdem Fluorwasserstoff, Carbonylfluorid und Fluorkohlenstoffe mit niedrigem Molekulargewicht freisetzen.

Löschmittel

Verwenden Sie Mittel, die sich für das umgebende Material eignen.

Anweisungen zur Brandbekämpfung

Tragen Sie unabhängige Atemschutzgeräte.

Bei einem Brand setzen SP211, 221 und die D-Typen Fluorwasserstoff-Rauchgase frei, die mit Wasser reagieren und Fluorwasserstoffsäure bilden. Tragen Sie Neoprene-Handschuhe, wenn sie verbrannte Reste entfernen, falls diese Typen bei einem Brand beteiligt waren.

Maßnahmen bei versehentlicher Freisetzung

Schutzvorkehrungen (Personal)

Anm: Lesen Sie die Abschnitte *Brandbekämpfungsmaßnahmen und Handhabung (Personal)* vor der Reinigung. Verwenden Sie während der Reinigung entsprechende *Körperschutzmittel*.

Reinigen von verschütteten Produkten

Sammeln Sie unbeschädigtes und minimal verunreinigtes Material zwecks Weiterverwendung und Reklamation. Schaufeln oder wischen sie es auf.

Transport und Lagerung

Transport (Personal)

Vermeiden Sie die Verunreinigung von Zigaretten und Tabak mit Staub, der von diesem Material stammt.

Vermeiden Sie das Einatmen von Staub.

Transport (physikalische Aspekte)

Vermeiden Sie das Erzeugen von Staub.

Kontrollen/Körperschutz

Technische Kontrollen

Verwenden Sie stationäre Entlüftung für Stäube, die durch das Schneiden und Schmirgeln entstehen.

Körperschuttmittel

Augen-/Gesichtsschutz

Bei Bearbeitungsgängen tragen Sie entsprechende Schuttmittel wie Staubbrillen oder Schutzbrillen mit Seitenschutz.

Atemgeräte

Verwenden Sie während des Schleifens, Schmirgeln oder Sägens ein von NIOSH/MSHA zugelassenes Luftfilter-Atemgerät mit Staub/Nebelpatrone oder Kanister, wenn schwebende Partikelkonzentrationen die zulässigen Werte überschreiten.

Konzentrations-Richtlinien

Konzentrationsgrenzen

Teile und Halbzeuge aus VESPEL® in Synonymliste VSP001
PEL(OSHA) Partikel (keine sonstige Klassifizierung)
15 mg/m³, 8 Stunden TWA, gesamter Staub
5 mg/m³, 8 Stunden TWA, atembare Staub

Andere anwendbare Konzentrationsgrenzen

Poly-N,N'-(p,p'-Oxydiphenyl)Pyromellitimid
PEL(OSHA) nicht vorhanden
TLV (ACGIH) nicht vorhanden
AEL* (DuPont) 10 mg/m³, 8 Stunden TWA, gesamter Staub
5 mg/m³, 8 Stunden TWA, atembare Staub

Graphit (nicht in ST-2000)

PEL (OSHA) 5 mg/m³, atembare Staub, 8 Stunden TWA
TLV (ACGIH) 2 mg/m³, atembare Staub, 8 Stunden TWA
AEL* (DuPont) nicht vorhanden

Molybdän Disulfid

PEL (OSHA) 5 mg/m³, und lösliche Compounds wie Mo
Unlösliche Compounds: 10 mg/m³,
gesamter Staub wie 8 Stunden TWA
TVL (ACGIH) 10 mg/m³, unlösliche Compounds wie Mo
5 mg/m³, lösliche Compounds wie Mo bei
8 Stunden TWA

AEL*(DuPont) nicht erstellt

Polytetrafluorethylen (PTFE)

PEL (OSHA) nicht erstellt
TLV (ACGIH) nicht erstellt
AEL* (DuPont) 10 mg/m³, 8 Stunden TWA, gesamter Staub
5 mg/m³, 8 Stunden TWA, atembare Staub

Physikalische und chemische Eigenschaften

Physikalische Daten

Schmelzpunkt: keiner
% flüchtige Bestandteile: NA
Löslichkeit in Wasser: unlöslich
Geruch: keiner
Form: massive Teile und Halbzeuge
Spezifisches Gewicht: 1,33 bis 1,67

Stabilität und Reaktivität

Chemische Stabilität

Stabil bei normalen Temperatur- und Lagerbedingungen.

Zersetzung

Zersetzung unter Einfluß von Wärme.

Zersetzungstemperatur: Bis 288°C weist das Produkt keine nennenswerte Zersetzung auf. Es widersteht kurzfristigen Spitzen bis 482°C ohne bedeutende Zersetzungserscheinungen.

Ein Erhitzen bis <288°C kann die Entwicklung von Partikeln verursachen, die Polymergasfieber verursachen können. Kleine Mengen an Fluorwasserstoff und Carbonylfluorid können bei 400°C freigesetzt werden, wenn größere Mengen von SP211, SP221 und der D-Typen höhere Temperaturen erreichen.

Gefährliche Gase/Dämpfe sind Kohlenstoffmonoxid bei Temperaturen über 300°C; kleine Mengen an Chlorwasserstoff bei den Typen SP211, 221 und allen D-Typen.

Polymerisation

Eine Polymerisation findet nicht statt.

* AEL ist DuPonts «Acceptable Exposure Limit». Dort wo die von der Regierung festgelegten Grenzwerte niedriger als die AEL-Werte sind, haben AEL-Werte Priorität.

Toxikologische Informationen

Tiere

Polytetrafluorethylen (PTFE)

Das Compound wirkt nicht hautreizend. Das einmalige Einatmen hoher Staubkonzentrationen führte bei Tieren zu einer Reizung der Lunge. Ein wiederholtes Schlucken bestimmter Dosen führte zu keiner feststellbaren Vergiftungserscheinung, außer einer Veränderung der Anzahl an zirkulierenden weißen Blutzellen nach langfristiger Dosierung (25% der Nahrung über 90 Tage). Tests zeigten keine Entwicklung von Toxizität in Tieren und keine genetischen Schäden bei Tieren oder bakteriellen Zellkulturen.

Molybdän-Disulfid

Hautabsorption LD >16000 mg/kg in Kaninchen. Oral LD50 >16000 mg/kg in Ratten.

Wiederholtes Einatmen führte bei Tieren zu einer Steigerung der Atmungsrate. Ein einmaliges Schlucken erzeugte nur eine starke Diarrhöe bei Tieren. Wiederholtes Einatmen bewirkte keine Vergiftungssymptome.

Ökologische Informationen

Ökotoxikologische Informationen

Wassertoxizität

Die Toxizität ist erwartungsgemäß gering aufgrund der Unlöslichkeit des Produktes in Wasser.

Entsorgung

Abfallentsorgung

Vorzuziehende Alternativen für die Entsorgung sind (1) Recycling, (2) Verbrennung mit Energierückgewinnung und (3) Deponierung. Der hohe Kraftstoffwert dieses Produktes macht die 2. Alternative sehr wünschenswert, doch müssen Verbrennungsanlagen in der Lage sein, säurehaltige Verbrennungsprodukte auszuwaschen. Behandlung, Lagerung, Transport und Entsorgung gemäß den Vorschriften des Staates, der Länder und Kommunen.

Transportinformationen

Versandinformation

DOT

Korrekte Versandbezeichnung: nicht vorgeschrieben.

Informationen über Richtlinien

Richtlinien in den USA

TSCA Inventur-Status

Gemäß TSCA Inventur-Anforderungen für kommerzielle Zwecke.

Staatliche Gesetze zur Informationspflicht

Bei der Herstellung der Produkte in diesem Sicherheitsdatenblatt werden keine Stoffe verwendet, die in den Listen gefährlicher Stoffe der unten angegebenen Staaten aufgeführt sind, wobei Ausnahmen angegeben werden.

Stoffe, die in der Liste gefährlicher Stoffe des Staates Pennsylvania aufgeführt werden, weisen eine Mindestkonzentration von 1% (0,01% für besonders gefährliche Stoffe) auf: Graphit in den Typen SP21, 22, 211, 221 und ST Typen. Polytetrafluorethylen in SP211 und 221. Polytetrafluorethylen ist aufgelistet, wir halten dies jedoch für einen Irrtum und haben eine Austragung beantragt.

Warnung: *Stoffe, die im Staat Kalifornien als krebserregend oder als Ursache von Geburtsschäden oder anderen, die Fortpflanzung betreffenden Krankheiten gelten: nicht bekannt.*

Stoffe, die in der Liste gefährlicher Stoffe am Arbeitsplatz von New Jersey enthalten sind, weisen eine Mindestkonzentration von 1% (0,1% für Stoffe, die als Carzinogene, Mutagene oder Teratogene identifiziert wurden) auf: Molybdän Disulfid.

Sonstige Informationen

NFPA, NPCA-HMIS

NFPA Einstufung

Gesundheit: 2

Entflammbarkeit: 1

Reaktivität: 0

Zusätzliche Informationen

MEDIZINISCHE ANWENDUNGEN – VORSICHT:

Nicht in medizinischen Anwendungen einsetzen, die eine dauerhafte Implantation im menschlichen Körper vorsehen. Sonstige medizinische Anwendungen siehe CAUTION-Bulletin Nr. H-50102 von DuPont.

Die Daten in diesem Sicherheitsdatenblatt beziehen sich nur auf die darin genannten speziellen Materialien und stehen in keinem Zusammenhang mit deren Einsatz in Verbindung mit jeglichen anderen Materialien oder Verfahren.

Verantwortlich

für MSDS W.H. Martin

Adresse: DuPont Polymers
Chestnut Run Plaza 715/214
Wilmington, DE 19880-0715

Telefon: 302-999-4658

Weitere Informationen über technische Kunststoffe erhalten Sie von :

Internet location : <http://dupont.com/vespel>

EUROPE

Belgique/België

Du Pont de Nemours (Belgium)
BVBA-SPRL
Antoon Spinostraat 6
B-2800 Mechelen
Tel. (015) 44 15 27
Telefax (015) 44 14 08

Deutschland

Du Pont de Nemours
(Deutschland) GmbH
DuPont Straße 1
D-61343 Bad Homburg
Tel. (06172) 87 0
Telefax (06172) 87 27 01

España

Du Pont Ibérica S.A.
Edificio L'IIIIa
Avda. Diagonal 561
E-08029 Barcelona
Tel. (3) 227 60 00
Telefax (3) 227 62 00

France

Du Pont de Nemours (France) S.A.
137, rue de l'Université
F-75334 Paris Cedex 07
Tel. (01) 45 50 65 50
Telefax (01) 47 53 09 67

Italia

Du Pont de Nemours Italiana S.r.l.
Via Volta, 16
I-20093 Cologno Monzese
Tel. (02) 25 30 21
Telefax (02) 25 30 23 06

Österreich

Biesterfeld Interowa GmbH & Co. KG
Bräuhausgasse 3-5
P.O. Box 19
AT-1051 Wien
Tel. (01) 512 35 71-0
Telefax (01) 512 35 71-31
e-mail : info@interowa.at
internet : www.interowa.at

Schweiz/Suisse/Svizzera

Dolder AG
Immengasse 9
Postfach 14695
CH-4004 Basel
Tel. (061) 326 66 00
Telefax (061) 322 47 81
Internet : www.dolder.com

United Kingdom

Du Pont (U.K.) Limited
Maylands Avenue
GB-Hemel Hempstead
Herts. HP2 7DP
Tel. (01442) 34 65 00
Telefax (01442) 24 94 63

ASIA-PACIFIC

Japan

DuPont K.K.
Arco Tower
8-1, Shimomeguro 1-chome
Meguro-ku, Tokyo 153-0064
Tel. 03-5434-6989
Telefax 03-5434-6982

Taiwan/China

DuPont Taiwan Limited
13th Floor, Hung Kuo Building
167, Tun Hwa North Road
Taipei, Taiwan 105
Tel. 02-719-1999
Telefax 02-712-0460

UNITED STATES

DuPont Engineering Polymers
Pencader Site
Newark, DE 19714-6100
Tel. 800-222-VESP
Telefax (302) 733-8137

Die Informationen zu diesem Thema entsprechen unserem Kenntnisstand zum Zeitpunkt der Veröffentlichung. Sobald neue Erkenntnisse und Erfahrungen vorliegen, können sie revidiert werden. Die aufgeführten Daten liegen im normalen Bereich der Produkteigenschaften und beziehen sich ausschließlich auf das speziell angegebene Material. Falls nicht ausdrücklich vermerkt, sind diese Daten nicht zwangsläufig gültig, wenn das entsprechende Material in Kombination mit anderen Materialien oder Additiven bzw. Verfahren verwendet wird. Die angegebenen Daten sollten weder zur Festlegung von Spezifikationen noch als alleinige Grundlage für Konstruktionen herangezogen werden. Diese Daten ersetzen in keiner Weise Prüfungen die von Ihnen zur Ermittlung der Eignung eines spezifischen Materials für Ihre besonderen Zwecke eventuell durchzuführen sind. Da DuPont nicht alle Bedingungen in aktuellen Endeinsätzen voraussehen kann, übernimmt das Unternehmen keine Garantie und Verpflichtung bzw. Haftung in Verbindung mit diesen Informationen. Diese Veröffentlichung ist weder als Lizenz noch als Empfehlung zu betrachten, jegliche Patentrechte zu verletzen.

Vorsicht: Verwenden Sie dieses Produkt nicht für medizinische Anwendungen, die eine ständige Implantation im menschlichen Körper erfordern. Weitere medizinische Anwendungen finden Sie in der Broschüre «DuPont Medical Caution Statement».



The miracles of science™