

# **GAK** *Gummi* *FASERN* **Kunststoffe**

Fachmagazin für die Polymerindustrie

Crashsimulation für FVK  
Schnelle Permeabilitätsmessung  
Perfluorelastomere  
Carbonfasern aus alternativen  
Rohstoffen  
Elastomerprodukte für Öl und Gas



Wir kennen  
den Weg ...

## ... zu den besten chinesischen Rußen!

Scannen Sie den Code, um mehr zu erfahren.

Die komplette Typenreihe, Top-Qualität, optimale Verfügbarkeit, hervorragender Service und die Expertise und Kompetenz eines lokalen Anbieters. LUVOMAXX ist Ihr Experte für chinesische Ruße in Europa.

Folgen Sie dem QR-Code, um mehr über unser komplettes Produktprogramm an Rußen zu erfahren. Weitere Infos und Details finden Sie unter [luvomaxx.de](http://luvomaxx.de)

[www.luvomaxx.de](http://www.luvomaxx.de)

Lehmann & Voss & Co.



# FFKM für die Bewältigung neuer Anforderungen

## Eine Einführung in Perfluorelastomere

A. Verschuere, E. Cole

*Perfluorelastomere (FFKMs) sind polymere Materialien, die dann zum Einsatz kommen, wenn andere Elastomere bei chemischen Angriffen und/oder extremen Temperaturen versagen. FFKMs besitzen von allen derzeit industriell verfügbaren Elastomeren die höchste thermische und chemische Beständigkeit. Sie bewähren sich immer häufiger in Industrieanwendungen, wenn die Betriebsbedingungen härter werden, und finden sich in Dichtungen für den Chemie-Anlagenbau, für Flugzeugturbinen sowie für die Plasmabehandlung in der Halbleiterproduktion wieder. Mit diesem Artikel sollen technische Einblicke zu FFKMs, ihre Vernetzung, ihre thermische und chemische Beständigkeit und ihre Anwendungsmöglichkeiten vermittelt werden. Zudem werden detaillierte Informationen zum Umgang und zur Verarbeitung von FFKM-Polymeren und entsprechenden Compounds bereitgestellt. Aufgrund ihres Preises ist ordnungsgemäßes Handling und ein angemessener Einsatz von erheblicher Bedeutung.*

*Perfluoroelastomers (FFKMs) are polymer materials that come into play where other elastomers prove insufficient in handling chemical attacks and/or extreme temperatures. These materials have the highest level of chemical and thermal resistance of any elastomer currently available. They prove more and more frequently successful in industry applications as operating conditions become increasingly intense and can be found in seals for engineering chemical installations, airplane turbines and plasma treatment related semiconductor applications. The intention of this article is to provide technical insight in FFKMs, their crosslink chemistry, chemical and thermal resistance, and application considerations. Also detailed information on how to handle and work with FFKM polymers/compounds will be provided. Due to their costs proper handling and use are significantly important.*

## 1. Einleitung

Perfluorelastomere sind wichtige technische Werkstoffe, die ins Spiel kommen, wenn sich andere Elastomere als unzureichend erweisen, härtesten chemischen Umfeldbedingungen und/oder extremen Temperaturen standzuhalten. Diese Materialien

verfügen über die höchste thermische und chemische Beständigkeit von allen derzeit verfügbaren Elastomeren. Perfluorelastomere (FFKMs) werden immer häufiger dann in vielen Industrieanwendungen eingesetzt, wenn sich die Betriebsbedingungen zunehmend verschärfen.

Mit diesem Artikel sollen das technische Verständnis für FFKMs, ihre Vernetzungsschemie, ihre Anwendungsbereiche im Hinblick auf thermische und chemische Beständigkeit und grundsätzliche Überlegungen zum Einsatz sowie detaillierte Informationen zum Umgang und der Arbeit mit FFKM-Polymeren/Compounds vermittelt werden. Diese Werkstoffe haben bekanntlich einen deutlich höheren Preis als typische FKM- oder Kohlenwasserstoff-Elastomere. Daher ist ihre ordnungsgemäße Handhabung und ihre angemessene Verwendung durchaus von Bedeutung.

Ein weitverbreitetes Missverständnis besteht darin, dass besondere Werkzeuge und/oder Arbeitsumgebungen erforderlich sind, um aktuelle FFKMs zu verarbeiten. Es sind jedoch nur wenige spezielle Anforderungen beim Umgang und dem Mischen von FFKMs zu beachten. Die typischen Misch- und Verarbeitungsanlagen für FKM- und Kohlenwasserstoff-Elastomere sind für das Arbeiten mit FFKM-Materialien mehr als ausreichend.

## 2. Was sind FFKMs?

Perfluorelastomere, gemäß Definition in der Norm ASTM D1418 oft auch als FFKMs bezeichnet, bestehen aus Polymeren, die das Verhalten von Elastomeren mit den thermischen und chemischen Eigenschaften von PTFE kombinieren. Es handelt sich hierbei typischerweise um Copolymere aus Tetrafluorethylen (TFE) und einem perfluorierten Vinyl-ether (PFVE). Zum Aufbau eines molekularen Netzwerks mit elastischen Eigenschaften – bei gleichzeitiger Beibehaltung der chemischen Beständigkeit – werden vorzugsweise (per)fluorierte Vernetzungsmonomere (cure site monomers → CSMs) verwendet, die die Vernetzung ermöglichen. Diese Vernetzungsmonomere enthalten normalerweise reaktive Brom- und/oder Iodatome oder besitzen Perfluoralkyl-Nitrilgruppen, die durch Trimerisierung ein perfluoriertes Triazin-Netzwerk aufbauen können.

Ursprünglich in den 1960er-Jahren entwickelt, enthalten FFKM-Polymere ungefähr 72,5 % Fluor bezogen auf das Gesamtgewicht und sollten über keinerlei Kohlenwasserstoffsegmente im Polymerrückgrat verfügen.

Typische Fluorelastomere haben einen niedrigeren Fluorgehalt, etwa im Bereich zwischen 60 und 71 Gew.-%, und durch den molekularen Einbau beträchtlicher Mengen des Monomers Vinylidenfluorid einen gewissen Kohlenwasserstoff-Charakter. Kohlenwasserstoff-Segmente können eine thermodynamische Schwachstelle bei Standardfluorpolymeren darstellen. Die Dissoziationsenergie (bond dissociation energy → BDE) einer Fluor-Kohlenstoff-Bindung liegt etwa 20 – 30 % höher (in Abhängigkeit von der

Alain Verschuere  
averschuere@mmm.com

New Product Deployment Perfluoroelastomers,  
3M Advanced Materials Division,  
3M Belgium, Zwijndrecht, Belgium

Ed Cole  
Applied Materials Engineer, 3M Film Manufacturing + Supply Chain Organization,  
3M, St. Paul, MN, USA

verwendeten Referenz) als bei einer Kohlenstoff-Wasserstoff-Bindung. Die BDE bei einer Fluor-Kohlenstoff-Bindung beträgt 490 kJ/mol im Gegensatz zu einer BDE von 410 kJ/mol bei einer Kohlenstoff-Wasserstoff-Bindung.

Die grundlegende Architektur ist in **Abbildung 1** dargestellt. Diese Struktur ist für Peroxid- und Hochtemperatur-FFKM-Typen im Wesentlichen dieselbe. Das CSM kann entweder ein Iod- oder Bromatom enthaltendes Monomer (peroxidische Vernetzung) oder ein Nitrilgruppen enthaltendes Monomer (katalytische Vernetzung) sein. Die  $R_f$ -Gruppe besteht in der Regel aus einer kurzen Perfluoralkyl-Kette, normalerweise  $CF_3$ .

### 3. FFKM-Vernetzungschemie

Es werden verschiedene chemische Möglichkeiten zur Vernetzung von FFKM-Polymeren genutzt.

Frühere Vernetzungssysteme verwendeten Diamine und spätere Dihydroxy-Verbindungen (bisphenolisch) um Perfluorphenoxy-Gruppen enthaltende Perfluorelastomere zu vernetzen. Um einen angemessenen Vernetzungsgrad zu erhalten, wurden Beschleuniger, wie z. B. zyklische Polyether, benötigt.

Später wurden weitere Systeme entwickelt wie etwa die Vernetzung durch freie Radikale/Coagenzien und die katalysatorinduzierte Triazin-Vernetzung. Beide Methoden sorgen für eine Vernetzung der entsprechenden FFKM-Polymere, verfügen aber dennoch jeweils über bestimmte Vor- und Nachteile. Für die Auswahl der richtigen Vernetzungsmethode und der entsprechenden Polymerkombination ist die jeweilige Endanwendung zu berücksichtigen. 3M Dyneon Perfluorelastomer Compounds

enthalten bereits ein Vernetzungssystem, um optimale Eigenschaften zu erreichen. Im Allgemeinen ist eine Nachtemperung erforderlich, um die Leistungscharakteristiken der verschiedenen Vernetzungssysteme zu maximieren.

#### 3.1 Radikalische Vernetzung

Die Vernetzung durch freie Radikale/Coagenzien wird am häufigsten bei FFKM-Standardtypen verwendet. Unter Verwendung eines halogenhaltigen Vernetzungsmonomers (X-CSM mit  $X \Rightarrow Br$  oder  $I$ ) und eines geeigneten Coagens zum Abfangen der mit Peroxid generierten freien Radikale ist dieser Vernetzungstyp hervorragend für Anwendungstemperaturen von bis zu 230 °C geeignet und kann bei Anwendungen mit Dampf, Säure und heißem Wasser eingesetzt werden. Diese Mischungen verfügen jedoch nicht über ein so gutes thermisches Verhalten, z. B. beim Druckverformungsrest, wie etwa triazin-vernetzte Materialien.

Zur Vernetzung von FFKM-Standardtypen hat Triallylisocyanurat (TAIC) die beste Gesamtleistung als Coagens im Hinblick auf die physikalischen Eigenschaften und die thermische Beständigkeit gezeigt. Leider kann TAIC während des Vernetzungszyklus als Nebenreaktion homopolymerisieren und dadurch die Verarbeitbarkeit, z. B. Formverschmutzung, beeinträchtigen. Daher wird gelegentlich an Stelle von TAIC die analoge Substanz Trimethylallylisocyanurat (TMAIC) verwendet. Einige Verbesserungen

beim Druckverformungsrest wurden durch Verwendung einer Mischung aus TAIC mit TMAIC erzielt, welche die Vernetzungsrate leicht verzögert und damit den Aufbau eines geordneteren molekularen Netzwerks während der Vulkanisation ermöglicht. Die Strukturformeln für TAIC und TMAIC finden sich in **Abbildung 2**.

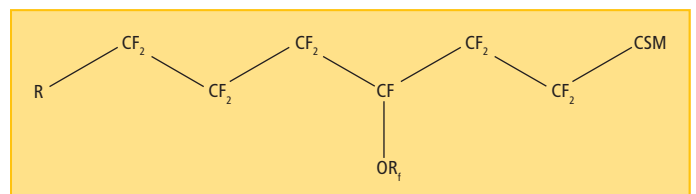
Da diese Reaktionen peroxidisch initiiert sind, können diese Materialien leicht an vulkanisieren. Eine gute Temperaturregelung und Sorgfalt während des Mischens und der Verarbeitung der FFKM-Polymere/Compounds sind somit von größter Bedeutung. Normalerweise werden Dialkylperoxide wie z. B. 2,5-Dimethyl-2,5-di(t-butylperoxy)hexan (DBPH, **Abb. 3**) verwendet, um die Anvulkanisation zu verzögern. Außerdem können verschiedene scorchgeschützte Peroxidinitiatoren in Kombination mit DBPH zur Feinabstimmung der Vernetzungsrate eingesetzt werden.

#### 3.2 Triazin-Vernetzungssystem

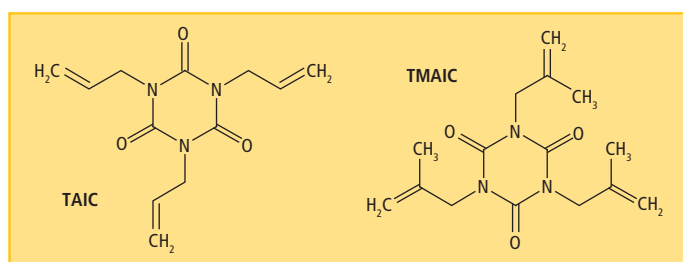
Zur Bildung eines Triazin-Netzwerks bei den FFKM-Hochtemperatur-Typen (HT-FFKM) wird ein proprietärer Katalysator benutzt, der bei hoher Temperatur mit Nitrilgruppen des perfluorierten Elastomers reagiert und eine Triazin-Ringstruktur aufbaut (**Abb. 4**).

Diese aromatische, heterozyklische Struktur ist thermisch sehr stabil und verfügt über eine sehr gute Leistung bei Dauereinsatz bis zu 316 °C. Ihre allgemeine chemi-

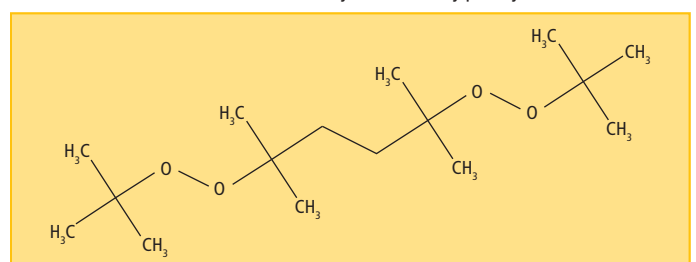
**Abb. 1:** Schematische Strukturformel eines FFKM-Polymers aus Tetrafluorethylen und Perfluorvinylether (CSM  $\rightarrow$  cure site monomer)



**Abb. 2:** Strukturformeln für TAIC und TMAIC



**Abb. 3:** Strukturformel von 2,5-Dimethyl-2,5-di(t-butylperoxy)hexan (DBPH)



sche Beständigkeit ist sehr gut. Das nitrilgruppenhaltige Vernetzungsmonomer (CN-CSM) kann in verschiedenen Konzentrationen in die Polymerkette eingebaut sein, um die Vernetzungsdichte variieren zu können. Die Achillesferse dieser Vernetzungsschemie besteht in ihrer Anfälligkeit für Hydrolyse durch Amine, Dampf und/oder heißes Wasser. Bei entsprechender Exposition öffnet sich der Ring durch aromatische nukleophile Substitution, was sich wegen des damit abnehmenden Moduls negativ auf das Dichtverhalten und die physikalischen Eigenschaften auswirkt.

### 3.3 Sonstige Nitrilvernetzungs-systeme

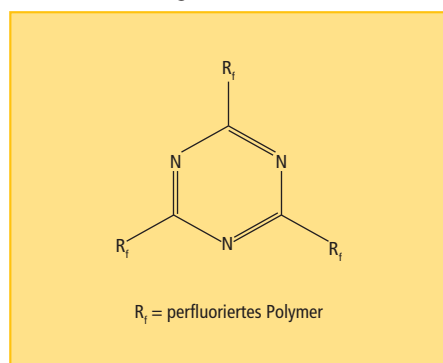
Eine weitere Möglichkeit, Nitrilgruppen enthaltende Perfluorelastomere zu vernetzen, besteht in der Bildung eines Benzoxazol-Netzwerks. Hierfür wird Bisaminophenol als Vernetzungsmittel verwendet. Auf diesem Weg kann eine gute thermische Stabilität bis in den Bereich von etwa 275–280 °C erzielt werden.

Nitrilgruppen enthaltendes FFKM kann ebenfalls peroxidisch mit Unterstützung durch Coagenzien vernetzt werden. Die chemische Beständigkeit ist dabei im Vergleich zur Triazin-Vernetzung erheblich verbessert, aber zu Ungunsten der Temperaturbeständigkeit.

Tab. 1: Mögliche Startrezeptur für das FFKM PFE 90Z

Ingredienz	Anteil / phr
PFE 90Z	100
Ruß MT N990	20
ZnO	5
Trigonox 101-50D	1,5
Luvomaxx TAIC-70 DL	2,5

Abb. 4: Triazin-Ringstruktur



## 4. Verarbeitung von FFKMs

### 4.1 Compoundieren und Mischen

Bei der Formulierung von FFKM-Compounds ist die Vernetzungsschemie auszuwählen, die für den Typ des verwendeten FFKMs und/oder die Anwendungsbedingungen geeignet ist. Soweit wie möglich sind reine Vernetzer und Additive zu verwenden, um das höchste Leistungsniveau zu erzielen. Dies gilt insbesondere für Anwendungen mit Einwirkung von Dampf und Säure. Zu bedenken gilt, dass nicht-fluorierte Additive aufgrund ihrer inhärenten öl- und wasserabweisenden Natur die Tendenz haben, aus dem Perfluorelastomer zu migrieren. Diese Migration kann ggf. so schnell erfolgen, dass sie bereits während des Mischprozesses stattfindet. Jeder Prozessschritt, in dem Scherspannungen auftreten, trägt zusätzlich zu diesem Phasentrennungsverhalten bei.

Sonstige Komponenten sind nach Bedarf einzusetzen. Hinsichtlich der Füllstoffe können sowohl Ruß- als auch mineralische Füllstoffe verwendet werden. Üblicherweise eingesetzte Ruße sind MT-, FEF-, SRF- und HAF-Typen, z. B. MT N990, FEF N550, SRF N770 und HAF N330. Gewöhnliche Mineralfüllstoffe, wie etwa Bariumsulfat und Min-U-Sil 5, können ebenfalls eingesetzt werden.

Ebenfalls können spezifische Prozesshilfsmittel bei FFKMs verwendet werden, jedoch nur nach Bedarf. Peroxidische FFKM-Typen profitieren von der Zugabe von Zinkoxid, das als Säureakzeptor agiert und die Druckverformungsrest-Leistung verbessert. Zu beachten ist, dass die Chemikalienbeständigkeit, z. B. gegen Säuren, durch weitere Mischungsbestandteile beeinflusst wird. Wenn beispielsweise Säureakzeptoren wie Zinkoxid verwendet werden, wird die Säurebeständigkeit des Fertigerzeugnisses negativ beeinträchtigt.

Eine typische Anfangsrezeptur für das FFKM PFE 90Z ist **Tabelle 1** zu entnehmen.

Diese Rezeptur würde zu einer guten Hitzebeständigkeit führen, wenngleich die Menge ZnO verringert werden sollte, um die beste Säurebeständigkeit zu erhalten.

Perfluorelastomere können mit einer Standardausrüstung zum Mischen von herkömmlichen Elastomeren gemischt werden. Um beste Ergebnisse zu erhalten, wird ein Walzenmischer empfohlen. Wie bei jeder Fluorelastomermischung muss die Mischwalze oder der Innenmischer sehr sauber und frei von Verunreinigungen sein, insbesondere frei von Feuchtigkeit - hochtemperaturbeständige HT-FFKM-Typen sind feuchtigkeitsempfindlich. Geringe Mengen an Standard-FKM, bereits 500 ppm, können sich ebenfalls auf die Vernetzungsgeschwindigkeit auswirken. Es wird empfohlen, dass sämtliche Rohingredienzien vorgemischt werden, um ein besseres Einmischen in das Polymer und eine gute Durchmischung zu erhalten.

Beim Start der Mischung muss der Walzenspalt größer als normal sein, hauptsächlich aufgrund der durch den höheren Fluorgehalt verursachten hohen Steifigkeit und des höheren Molekulargewichts. Nachdem das FFKM-Polymer ein- oder zweimal durchgelaufen ist, wird der Walzenspalt auf eine normale Weite eingestellt. Beim Mischen von FFKM ist es von wesentlicher Bedeutung, den Compound handwarm zu halten. Die vorgemischten Ingredienzien sollten in mehreren Portionen hinzugefügt werden. Zu schnelles Hinzufügen kann dazu führen, dass das Polymerfell aufreißt und auseinanderfällt. Wenn dies geschieht, kann das Material mit Geduld wieder zum Fell gewalzt werden, aber durch langsames portionsweises Zugeben der Ingredienzien ist dies vermeidbar.

Es wird empfohlen, bei oder unter der angegebenen Sicherheitstemperatur für peroxidische Mischungen zu bleiben.

### 4.2 Lagerung

FFKM-Compounds werden vorzugsweise in einem versiegelten Beutel im Kühlschrank aufbewahrt. Alternativ ist eine Aufbewahrung in einem klimatisierten Bereich möglich, wobei ein Kontakt mit Feuchtigkeit zu vermeiden ist. Der Beutel muss vor Öffnung und Verwendung immer Raumtemperatur erreicht haben, um eine Kondensation auf dem Compound zu vermeiden.

**4.3 Erneutes Mischen und Vorwärmen**

Wenngleich dies normalerweise nicht erforderlich ist, kann es sinnvoll sein, dass die Compounds vor der Verwendung 5 bis 15 Minuten abgekühlt und/oder erwärmt werden, auf ca. 60 – 70 °C. Dies ist für das Fließverhalten und die Reintegration eines oder mehrerer, bereits ausmigrierender Additive nützlich und verbessert gleichzeitig die Verteilung der Füllstoffe. Wie bei dem vorstehend beschriebenen Mischprozess muss sichergestellt sein, dass mit einem großen Walzenspalt begonnen wird, der entsprechend der Aufwärmung des Materials langsam enger eingestellt wird. Es ist zu beachten, dass kalte FFKM-Compounds und ein enger Walzenspalt die Anlage beschädigen können.

**4.4 Compression-Moulding**

Für die Herstellung von FFKM-Artikeln wird das Compression-Moulding (CM, Formpressen) empfohlen. Die Rohlinge sollten soweit wie möglich der Größe des Fertigerzeugnisses entsprechen, um kürzest mögliche Fließwege zur Füllung der Kavitäten zu gewährleisten und um potenziellen, kostenintensiven Materialaustrieb und damit Verlust an teurer FFKM-Mischung zu begrenzen. Empfohlen werden Formen aus Edelstahl. Es ist jedoch nicht jeder Edelstahl geeignet. Insbesondere wird die Verwendung von Stavax-ESR-Edelstahl empfohlen. Normalerweise sind zwei Entgasungszyklen ausreichend, um eingeschlossene Gase auszutreiben, aber es können auch, abhängig von der Form des Fertigteils, bis zu drei oder vier Zyklen vorgegeben werden. Formtrennmittel können eventuell für peroxidisch vernetzte Compounds aus Gründen verwendet werden, die in dem vorstehenden Abschnitt zur Vernetzungschemie genannt sind. Stoner A373 Fluorelastomer-Formtrennmittel hat sich als sehr gut für das CM von FFKM-Compounds erwiesen. Es ist empfehlenswert, sich dabei streng an die Anwendungsanweisungen des Lieferanten zu halten. Für das von uns gelieferte Compoundsystem sind Formtrennmittel normalerweise nicht erforderlich.

**4.5 Extrusion**

Perfluorelastomere können ebenfalls einfach extrudiert werden, was bei der Herstel-

lung der Rohschnur regelmäßige Praxis ist. Temperaturen von etwa 50 – 80 °C für die Temperierzonen und Düsentemperaturen von 70 – 90 °C führen zu guten Ergebnissen.

**4.6 Spritzgießen**

Wenngleich dies industriell selten genutzt wird, verfügen FFKM-Compounds von 3M über sehr gute Spritzgießeigenschaften. Triazin-vernetzte Compounds benötigen zwar eine längere Zykluszeit von etwa zehn Minuten, aber die Formentrennung ist außerordentlich gut. Ein zusätzlicher Vorteil hinsichtlich der Anpassung des Fließverhaltens der letztgenannten Compounds besteht darin, dass die Zylindertemperaturen bis zu 120 °C betragen dürfen, ohne die Scorch-Sicherheit zu beeinträchtigen, was somit den Formfluss erheblich verbessert.

**4.7 Vulkanisationsbedingungen**

Die Vulkanisationsbedingungen variieren entsprechend dem verwendeten Vernetzungssystem. Für die Peroxidvulkanisation sind 10 min / 177 °C ein empfohlener Startzyklus zur Vernetzung. Die katalysator-induzierten Triazin-Vernetzungen erfordern eine etwas längere Zykluszeit und eine etwas höhere Temperatur. Übliche Vernetzungsbedingungen sind 15 min / 187 °C, um eine ausreichende Formteilstabilität zu erzielen. Für dickere Teile wird empfohlen, die Vernetzungstemperaturen auf 160 °C abzusenken und die Zykluszeit zu verlängern.

Wie die Pressvulkanisationsbedingungen hängen die Bedingungen für die Nachtemperung ebenfalls von der Vernetzungschemie ab. Die empfohlenen Starteinstellungen für peroxidisch initiierte Systeme sind 4 – 16 h bei 200 – 230 °C. Die tatsächliche Zeit hängt von den letztendlichen Leistungsanforderungen ab. Die HT-FFKM-Typen vulkanisieren normalerweise im Verlauf von 24 h an der Luft bei 250 °C aus. Manchmal wird eine Nachtemperung unter Stickstoffatmosphäre bei

bis zu 310 °C angewandt, um hervorragende Druckverformungsreste auch bei hohen Temperaturen zu erzielen. Für dickere Teile ist ggf. eine schrittweise Nachtemperung erforderlich. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein typischer FFKM-Compound nach der Ausvulkanisation eine Schrumpfung von ca. 3,5 % aufweist. Der tatsächliche Wert hängt von der Rezeptur und der Verarbeitung ab.

**Tabelle 2** gibt die empfohlenen Bedingungen zum Vulkanisieren und Nachtempern für das Produktsortiment von 3M wieder.

**4.8 FFKM-Metall-Verbunde**

Beim Herstellen von FFKM-Metall-Verbunden sind lediglich unvernetzte FFKM-Compounds zu verwenden, da es außerordentlich schwierig ist, eine Haftung an vernetzten Perfluorelastomeren zu erzielen. Der Einsatz von Prozesshilfen muss bei der Herstellung von FFKM-Metall-Verbunden, wenn möglich, ebenfalls minimiert oder sogar vollständig ausgeschlossen werden. Während derzeit keine Spezialkleber für perfluorierte Materialien existieren, hat die Erfahrung gezeigt, dass unter Verwendung von Chemlok 5150 der Lord Corporation und Megum 3290-1 von Dow Chemical eine gute Haftung erzielt werden kann.

Wie bei jedem anderen Prozess von Klebeanwendungen sind die Anweisungen des Lieferanten zur Oberflächenvorbereitung und Klebeanwendung strikt einzuhalten. Meistens ist eine Vorerhitzung der Klebeschicht bei niedriger Temperatur, 150 – 160 °C, für ca. 5 min zur Förderung der Haftung an Metalluntergründen vor dem Pressvorgang nützlich. Nach der Formgebung des Verbundartikels ist wahrscheinlich eine Nachtemperung erforderlich. Da die Klebstoffe nicht für längere Zeiträume bei extremen Temperaturen beständig sind, wird geraten, zum „Anbinden“ von FFKM eine kürzere Tempezeit bei üblichen Temperaturtemperaturen, ca. 230 °C, oder eine Temperung für eine längere Zeit bei einer niedrigeren Temperatur, 200 °C, zu verwenden.

**Tab. 2:** Empfohlene Vulkanisations- und Temperungsbedingungen für 3M-Produkte

Produkt	PFE 90Z Cpd	PFE 7502 BZ	PFE 7301 BZ	E-21464	PFE 7403 WZ
Vulkanisation	10 min / 177 °C	15 min / 177 °C	15 min / 187 °C	15 min / 177 °C	15 min / 187 °C
Nachtemperung	16 h / 230 °C	24 h / 250 °C	24 h / 250 °C	in 8 h von 200 auf 310 °C aufheizen	24 h / 250 °C

## 5. FFKM-Märkte und Anwendungen

Historisch betrachtet wurde FFKM primär in sehr spezifischen und/oder technisch speziellen Anwendungen eingesetzt, wie z. B. der Luft- und Raumfahrt und der Halbleiterindustrie. In jüngster Zeit gewinnt das Material aber aufgrund der zunehmend anspruchsvolleren Anwendungsumgebungen eine größere Akzeptanz. Daraus ergibt sich ein erhöhter Bedarf, sowohl in der Luft- und Raumfahrt als auch der Chemieindustrie und den Öl- und Gasmärkten. Die hohen Kosten dieser Materialien können jedoch für viele Anwendungen eine ökonomische Barriere darstellen. FFKM ist mittlerweile häufig in vielen Bereichen zu finden, in denen FKM bereits vor fast 35 Jahren war. Obwohl es im Vergleich zu anderen Materialien teurer ist, wird nun immer häufiger auf FFKMs zurückgegriffen, wenn andere Materialien versagen oder den technischen Anforderungen nicht gerecht werden können. Die mit der Verwendung von FFKM verbundenen Kosten werden in aller Regel durch die Effizienz der durch die Materiallösung gewonnenen Vorteile kompensiert.

Die ursprüngliche Verwendung von FFKM in der Luft- und Raumfahrt war dem Einsatz von sehr korrosiven Schmiermitteln und Kraftstoffadditiven bei Flugzeugen geschuldet sowie den hohen Temperaturen, denen einige Dichtungen und sonstige Elastomerkomponenten ausgesetzt sind. In der Halbleiterindustrie hat die Notwendigkeit von Plasma-, chemischer und thermischer Beständigkeit FFKM zu einer absoluten Grundvoraussetzung in der Halbleiterverarbeitung und dem Einsatz in fertigen elektronischen Geräten gemacht.

Da Automobil- und Schwerlastmotoren und deren entsprechenden Komponenten zunehmend aggressiven Flüssigkeiten und höheren Betriebstemperaturen ausgesetzt werden, wird von einer zunehmenden Verwendung von FFKMs in der Automobil-,

Schwerlast- und Seefahrtindustrie ausgegangen.

Der Ölpreis wird voraussichtlich weiterhin steigen, da die Öl- und Gasindustrie immer aufwendiger daran arbeitet und mehr Geld investiert, um diesen wertvollen Rohstoff aus der Erde zu gewinnen. Die Tage, einfach in den Boden zu bohren und auf sprudelnde Ölquellen zu stoßen, sind vorbei. Es müssen immer tiefere Löcher gebohrt werden, mit immer höheren Temperaturen in chemisch immer aggressiveren Umgebungen. Der Bedarf an Materialien, die auch unter extremen Bedingungen nicht ausfallen, ist größer denn je. FFKM füllt diese Lücke für viele Anwendungen.

Es gibt auch im Bereich der verarbeitenden, chemischen Industrie zahlreiche Anwendungen für FFKM. Von der Verarbeitung und Raffinierung von Öl zu anderen nützlichen Chemikalien über den Transport von Flüssigkeiten und die Handhabungsvorrichtungen für Maschinen/Material, finden FFKMs in vielen Bereichen neue Anwendungen, in denen verbesserte chemische Beständigkeit erforderlich ist. Die Anwendungen umfassen Motoren/Exzentrerschneckenpumpen zum Transportieren von Chemikalien, Leitungsabsperrungen für die Wartung von Chemieranlagen und Dichtungen für Ventile und Pumpen, die aggressiven Medien ausgesetzt sind, und FFKMs verlängern deren Lebensdauer und bieten erhöhte Zuverlässigkeit und Sicherheit.

## 6. Erwägungen in Bezug auf den Einsatz von FFKMs

Vor dem Einsatz von FFKMs für eine Anwendung müssen einige Punkte überdacht werden, um sicherzustellen, dass das richtige FFKM-Polymer und/oder der richtige FFKM-Compound ausgewählt werden. Auch technische Betrachtungen sind zu berücksichtigen. Folgende Fragestellungen sollten im Vorfeld geklärt werden:

- Wie hoch ist die Anwendungstemperatur? Sind höhere Temperaturen möglich? Bis zu welcher Temperatur und wie lange?  
a: Für Temperaturen bis zu < 230 °C können grundsätzlich alle FFKM-Typen verwendet werden. b: Für Temperaturen > 230 °C alle, ausgenommen das Standardprodukt auf PO-Basis.
- Welchen Chemikalien wird das fertige Produkt ausgesetzt?
- Welche Anforderungen gelten für die physikalischen Eigenschaften? a: Zug-, Dehnungs-, Reißfestigkeit, Modul, Härte b: Druckverformungsrest
- Welchem Druck werden die FFKM-Dichtungen in der Anwendung - in Bezug zu einem hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten (CTE → coefficient of thermal expansion, siehe nachfolgendes Kapitel) - ausgesetzt?  
a: Empfehlung < 20 % Stauchung für Temperaturen > 300 °C (z. B. 18 %) b: Empfehlung < 30 % Stauchung für alle anderen Temperaturen (z. B. 25 %)
- Wird der Artikel in einer statischen oder dynamischen Anwendung eingesetzt?
- Muss FFKM auf einen Untergrund geklebt werden?
- Wie wird der Artikel hergestellt?

## 7. FFKM-Wärmeausdehnungskoeffizient

Ein wichtiger zu berücksichtigender Punkt bei FFKM-Materialien besteht in ihrem hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten (CTE) im Vergleich zu anderen Materialien, einschließlich Standard-FKM. In dieser Hinsicht muss besonders auf die Nutausslegung geachtet werden, um Überlast und Spaltextrusion zu vermeiden. Um eine Abschätzung zum Unterschied von Wärmeausdehnungskoeffizienten zu bekommen, wurde ein FFKM mit einem FKM verglichen. Die geprüften Proben waren peroxidisch vernetzte Formulierungen, welche die gleiche Menge und den gleichen Typ Füllstoff (Ruß N990) enthielten.

Die Proben wurden mithilfe eines thermomechanischen Analysegeräts (TMA), Q400 von TA Instruments, bei Temperaturen zwischen -50 °C und 225 °C (Aufheizung und Abkühlung) mit einer Temperaturänderungsrate von 5 °C/min unter Verwendung eines Makroexpansionsfühlers untersucht. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tab. 3: Numerischer Wertevergleich für CTE und T<sub>g</sub> von FKM und FFKM nach TMA-Messung

Proben-ID	Härte in Shore A	CTE (Aufheizung) in µm/m·°C	CTE (Abkühlung) in µm/m·°C	T <sub>g</sub> (Aufheizung) in °C	T <sub>g</sub> (Abkühlung) in °C
FKM 30 phr N990	69	260,5	295,1	-24,35	-25,54
FFKM 30 phr N990	75	340,3	384,2	-1,61	-2,95

menfassung der CTE-Werte, die sich aus der Analyse der TMA-Daten ergeben, ist in **Tabelle 3** wiedergegeben. Die FFKM-Probe zeigt im Vergleich zu FKM bei gleicher Füllung einen ca. 30 % höheren CTE. Der tatsächliche CTE eines fertigen Compounds ist rezepturabhängig. Eine Erhöhung des Füllstoffgehalts führt zu einer Abnahme des CTE, da die Füllstoffe über einen deutlich niedrigeren CTE-Wert verfügen (z. B. Ruß = 0,20 µm/m·°C).

**8. Verfügbare FFKM-Qualitäten**

3M bietet verschiedene FFKM-Typen an. PFE 90Z, als Rohgummi geliefert, kann unter Verwendung eines geeigneten Peroxids und eines Coagens vernetzt werden. Diese Qualität ist für Anwendungen geeignet, bei

denen die chemische Beständigkeit von primärer Bedeutung ist und die Temperaturen 230 °C nicht überschreiten. Diese Qualität ist im Vergleich zu anderen FFKM-Qualitäten eher kostengünstig und gut für Handling und Verarbeitung in der Chemie, Reinigung und hochmoderne chemische Prozesse in zahlreichen Industrien geeignet.

3M Dyneon Perfluoroelastomer PFE 7301BZ und E-21464 HeatShield, als Compounds bereitgestellt, sind sogenannte Hochtemperatur-Typen (HT-Typen), die unternehmens-eigene Katalysatorsysteme zur Triazin-Vernetzung verwenden, und werden bei Temperaturen > 230 °C eingesetzt. Diese perfluorierten Triazin-Netzwerke sind in der Lage, mit nur minimalen Eigenschaftsverlusten und hervorragenden Druckverformungsrest-Bestän-

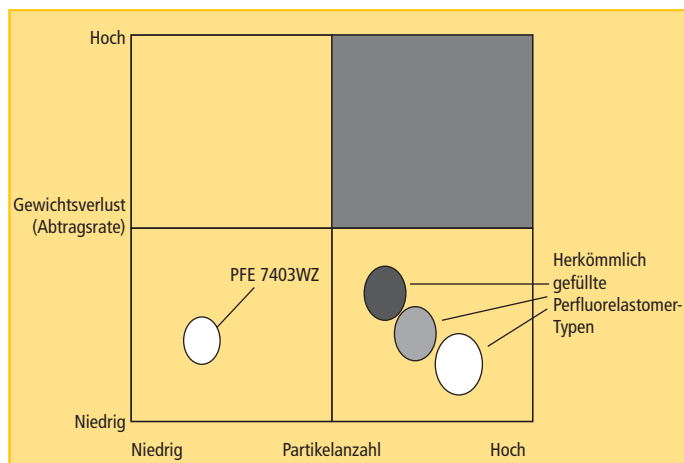
digkeiten dauerhaft Temperaturen von bis zu 316 °C standzuhalten. Herausragende Dichtungseigenschaften bei langanhaltend höchsten Temperaturen und im Kontakt mit aggressiven Medien, wie sie im Luft- und Raumfahrtsektor zum Einsatz gelangen, sind die wesentlichen Anforderungen an FFKM-Materialien, die für Motordichtungsanwendungen an die Luftfahrtindustrie geliefert werden. Das 3M Dyneon Perfluoroelastomer PFE 7301BZ HeatShield beweist bereits seit Jahren, dass es den Bedarf der Luftfahrtindustrie nach Hochtemperaturdichtungslösungen erfüllt. Die jüngste Entwicklung von E-21464 HeatShield belegt eine weitere Verbesserung der bereits hervorragenden Druckverformungsrest-Beständigkeit von PFE 7301BZ bei hohen Temperaturen (bis 316 °C). Es steigert nochmals die Leistungen von FFKM-Hochtempe-

**Tab. 4:** Typische mechanische Eigenschaften der aktuell von 3M lieferbaren Perfluorelastomer-Compounds

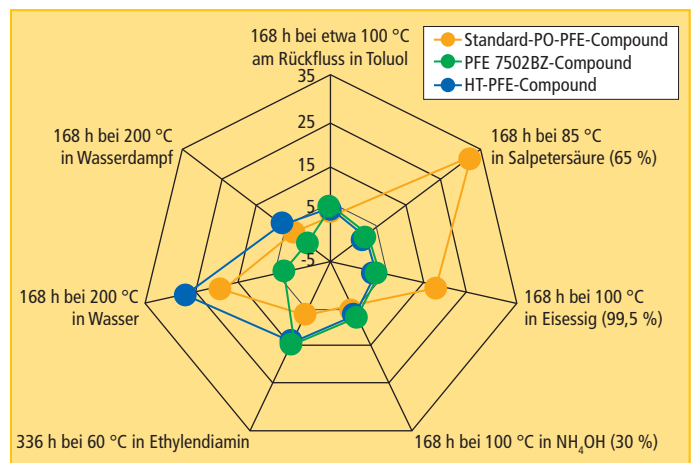
Eigenschaften	HeatShield PFE 7301BZ	HeatShield E-21464 (neu)	ChemShield PFE 7502BZ	PlasmaShield PFE 7403WZ	PFE 90Z Gum (ungefüllt)
Maximale Dauerbetriebs-temperatur in °C	316	316	275	316	230
<b>Druckverformungsrest</b>					
70 h bei 200 °C in %	14	14	15	18	29
70 h bei max. Dauerbetriebs-temperatur in % / °C	44 / 316	29 / 316	40 / 275	58 / 316	37* / 230
<b>Physikalische Eigenschaften</b>					
Zugfestigkeit in MPa	17,0	10,3	15,8	10,6	19,8*
M100 in MPa	12,5	8,8	11,6	4,7	13,1*
Reißdehnung in %	153	149	129	230	134*
Härte in Shore A	80	80	76	74	73*
Farbe	Schwarz	Schwarz	Schwarz	Weiß	Grauweiß/opak
<b>Eignung für</b>	Höchste Temperaturen, Hydrauliköle	Bester Druckverformungsrest und beste Langzeitleistung bei höchsten Temperaturen	Lösemittel, Säuren, Basen, Amine, Wasser und Wasserdampf – entspricht USP VI	Fluor- und Sauerstoffplasma	Weitreichende Beständigkeit gegen Säuren, Basen, Lösemittel, Kraftstoffe und Öle

\* ermittelt an einer typischen Mischungsrezeptur

**Abb. 5:** Vergleich relativer Gewichtsverluste und Partikelemissionen verschiedener Perfluorelastomere bei Plasmabehandlung



**Abb. 6:** Prozentuale Volumenzunahme in verschiedenen Medien – Vergleich PFE 7502BZ-, Standard-PO-PFE- und HT-PFE-Compound



raturmaterialien und eignet sich damit für die zukünftigen Generationen von Hochtemperatur-Triebwerksanwendungen. Die HT-FFKM-Typen sind, neben ihrer Verwendung in der Luft- und Raumfahrtindustrie, hervorragend für viele in Verbindung mit aggressiven Chemikalien stehende, thermisch anspruchsvolle Prozesse in der Öl- und Gasindustrie und für Anwendungen in der chemischen Industrie geeignet. Die einzige Einschränkung besteht in einer geringeren Beständigkeit dieser Produkte bei Kontakt mit Warmwasser, Dampf oder Ethylendiamin.

3M hat ebenfalls ein neuartiges, drittes System eingeführt, das die technischen Nachteile der anderen FFKM-Typen überwindet und die positiven Merkmale in einer einzigen Technologie kombiniert hat. Die neue

**Tab. 5:** Vergleich der chemischen Beständigkeit eines typischen FFKMs mit der von PFE 7502BZ ChemShield

Chemische Beständigkeit (heiße Medien)	FKM	PFE 7502BZ ChemShield
Säuren	-+	++
Salzsäure	-+	++
Salpetersäure	-	++
Schwefelsäure	-+	++
Eisessig	-	++
Lösemittel	-	++
Basen (NH <sub>4</sub> OH, NaOH)	-	++
Ethylendiamin	-	+
Wasser	-+	++
Wasserdampf	-+	++
Dauerbetriebstemperatur in °C	220	275
Druckverformungsrest 70 h, 25 %, 200 °C in %	15	15

Entwicklung 3M Dyneon Perfluoroelastomer PFE 7502BZ ChemShield ist ein eigenentwickelter, schwarzer, 75 Shore A-Compound mit ausgezeichneter chemischer Beständigkeit und Dauerbetriebstemperatur von 275 °C. Dieser Compound entspricht gleichfalls den USP VI- und FDA-Anforderungen, was es zu einem universellen Produkt macht.

Die Halbleiterindustrie verlangt, neben der inhärenten chemischen und thermischen Beständigkeit, hochreine Produkte. Die kleinsten Partikel- oder gasförmigen Verunreinigungen im Produktionsprozess können zu Qualitätsproblemen für das Endprodukt führen. Material- und Prozessreinheit sowie Sauberkeit sind von höchster Bedeutung. 3M Dyneon Perfluoroelastomer PFE 7403WZ PlasmaShield ist für die anspruchsvollsten Prozesse zur Halbleiterherstellung geeignet, wo regelmäßig Plasmabehandlungen eine Grundvoraussetzung ist. Während dieser Plasmabehandlungen sind Gewichtsverlust, Partikelemission und Ausgasung von PFE 7403WZ minimal (**Abb. 5**). Damit von diesen Materialien maximal profitiert werden kann, sollten sie in einer Reinraumumgebung gehandhabt und zu Fertigprodukten verarbeitet werden.

## 9. Typische Eigenschaften von FFKMs

In **Tabelle 4** sind die Eigenschaften der aktuell lieferbaren 3M-Compounds zusammengefasst. Es ist zu beachten, dass für die Messung der Druckverformungsreste bis zu

230 °C eine Druckverformung von 25 % und für Messungen bei > 300 °C aufgrund des wesentlich höheren thermischen Ausdehnungskoeffizienten von FFKM-Polymeren – im Vergleich zu FKM oder Kohlenwasserstoff-Elastomeren – lediglich eine Druckverformung der Probekörper von 18 % erfolgte.

Da aggressive Umgebungen individuelle Materiallösungen erfordern, hat 3M ein Sortiment von spezifischen FFKM-Produkten entwickelt, die auf die spezifischen Herausforderungen von Temperatur und Chemikalien ausgerichtet sind, wie sie in der Luftfahrt, der chemischen Verarbeitung und der Halbleiterindustrie anzutreffen sind.

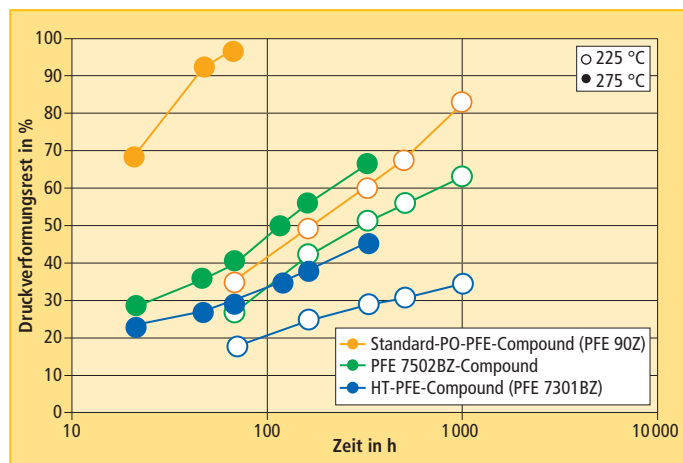
## 10. Beständigkeit von FFKMs

### 10.1 Chemische Beständigkeit

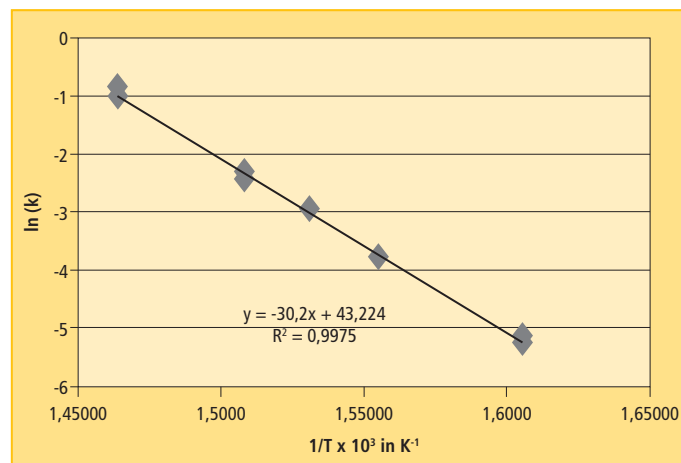
Für alle FFKM-Polymere und Vernetzungstypen sind die Beständigkeiten gegen eine große Bandbreite von Chemikalien, mit verschiedenen Konzentrationen und unter unterschiedlichen Bedingungen, herausragend. Chemikalien, wie z. B. polare Lösemittel, die normalerweise andere Fluorelastomere beeinträchtigen, haben nahezu keine oder gar keine negativen Auswirkungen auf die vollständig fluorierten Elastomere.

Ein Vergleich der chemischen Beständigkeit von PFE 7502BZ ChemShield und eines typischen FFKMs ist **Tabelle 5** zu entnehmen. FFKM bietet gegen jedes aufgeführte Medium eine überlegene Resistenz.

**Abb. 7:** Vergleich der Dauerbeständigkeit des Druckverformungsrests verschiedener FFKM-Typen bei 225 °C und 275 °C



**Abb. 8:** Isotherme TGA-Messungen für PFE 7301BZ – Zeit bis 5 % Gewichtsverlust





In der **Abbildung 6** wird die hervorragende chemische Allroundbeständigkeit des 3M Dyneon Fluoroelastomers PFE 7502BZ ChemShield demonstriert. Die geringe Volumenzunahme belegt die herausragende chemische Beständigkeit gegen Wasser, Dampf, primäre und tertiäre Amine, Säuren, Basen und Lösemittel. Dies macht PFE 7502BZ zu einem idealen Kandidaten zur Erfüllung der Anforderungen der verarbeitenden chemischen Industrie.

10.2 Thermische Beständigkeit

Die thermische Beständigkeit von FFKM-Materialien ist ebenfalls außergewöhnlich, auch in Umgebungen mit aggressiven Chemikalien. Für Peroxid/Coagens-FFKM-Typen ist ein Einsatz bis 230 °C möglich. Der obere Temperaturbereich wird aufgrund der außergewöhnlichen thermischen Stabilität der Triazin-Vernetzung für die HT-Typen bis auf 316 °C erhöht.

Die Beständigkeit des Druckverformungsrests ist ein Indikator für die Fähigkeit des Polymers, sein elastisches Gedächtnis beizubehalten. Die Temperatur ist eine der wichtigsten Ursachen dafür, dass der Druckverformungsrest mit der Zeit zunimmt und die Dichtung ausfällt. Mit steigender Temperatur können die Bindungen des Polymerrückgrats und der Vernetzungsstellen aufgebrochen werden. In **Abbildung 7** kann man die hervorragende Beständigkeit des Druckverformungsrests des triazin-vernetzten PFE 7301BZ erkennen. Es ist daran zu erinnern, dass das normale peroxidisch vernetzte Produkt nicht bei derart hohen Temperaturen verwendet werden kann.

Die weitere Abschätzung zur thermischen Beständigkeit erfolgte unter Anwendung des Arrhenius-Modells. Das Arrhenius-Modell kann verwendet werden, wenn die Kinetik einer chemischen Reaktion (oder eines Eigenschaftswandels) proportional zur Zeit ist. Das Verhältnis von Reaktions-/Abbaugeschwindigkeit zur Temperatur ist in der Arrhenius-Gleichung wiedergegeben:

$$\ln(k) = -E_a/RT + \ln(A) \quad 1$$

- mit
- k → Abbaugeschwindigkeit (z. B. % Gewichtsverlust x min<sup>-1</sup>)
- E<sub>a</sub> → Aktivierungsenergie (J x mol<sup>-1</sup>)
- R → universelle Gaskonstante (8,31451 J x mol<sup>-1</sup> x K<sup>-1</sup>)
- T → Temperatur (K)
- A → Frequenzfaktor

Eine Methode zur Voraussage der Einsatzfähigkeit von Elastomeren bei einer bestimmten Temperatur besteht in der Durchführung der sogenannten isothermen thermogravimetrischen Analyse (TGA). Diese Methode bestimmt den Gewichtsver-

lust, z. B. bis zur 5 %-Grenze, bei konstanter Temperatur in Abhängigkeit vom Temperaturniveau.

Die **Abbildung 8** gibt ein Beispiel der TGA-Messungen für PFE 7301BZ wieder. Bei verschiedenen Vorgabetemperaturen wurde die Zeit für den Verlust von 5 Gew.-% Compound gemessen.

Anhand der Steigung (-30,2x10<sup>3</sup>) der Ausgleichsgeraden (y = ax + b → y = -30,2x + 43,224) lässt sich eine Aktivierungsenergie E<sub>a</sub> (Steigung x R) zur thermischen Zersetzung der Probe von 251 kJ/mol errechnen.

Auch die Temperaturen, bei denen 1, 5 und 10 % Gewichtsverlust nach 1000 h erwartet werden, können durch Gleichung

$$T = -E_a/R \times (\ln(k) - \ln(A)) \quad 2$$

berechnet werden. Dies gibt für PFE 7301BZ folgende Ergebnisse:

- 1 % Gewichtsverlust nach 1000 h bei: 284 °C

Tab. 6: Vergleich der thermischen Beständigkeit der 3M-FFKM-Typen; die Einstufung basiert auf der Aktivierungsenergie für die thermische Zersetzung und dem Gewichtsverlust nach 1000 h in Abhängigkeit von der Temperaturbelastung.

FFKM-Typ	Aktivierungsenergie E <sub>a</sub> in kJ/mol	Für den 1000 h-Gewichtsverlust benötigte Temperatur in °C		
		1 % Gewichtsverlust	5 % Gewichtsverlust	10 % Gewichtsverlust
PFE 90Z Compound	190	241	261	269
PFE 7502BZ	228	270	288	296
PFE 7301BZ	251	284	301	309
E-21464	261	290	307	314
PFE 7403WZ	228	272	290	298

Abb. 9: Langzeitmessung des Druckverformungsrests von PFE 7301BZ bei verschiedenen Temperaturen

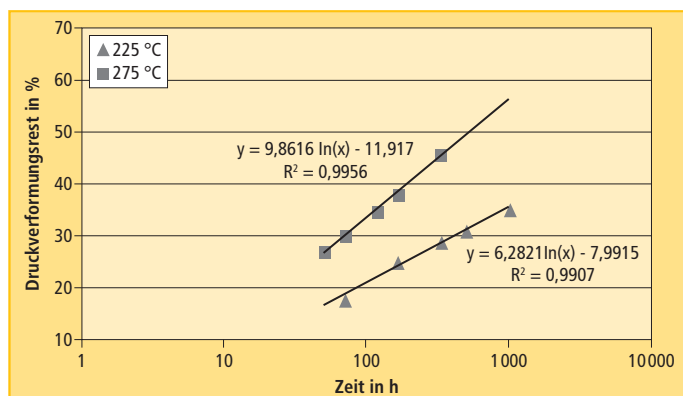
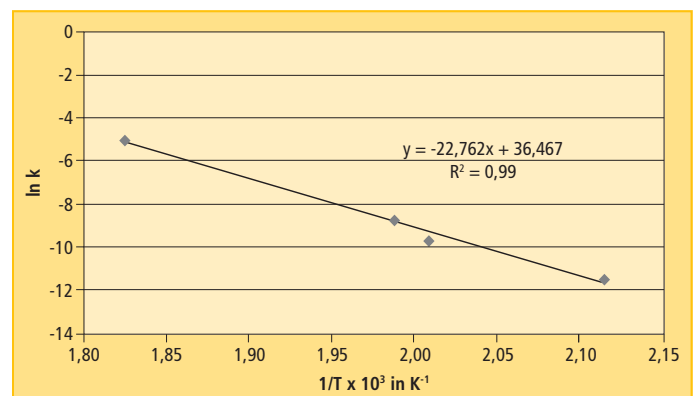


Abb. 10: Grafische Auswertung der Tabelle 8 - Langzeitmessung des Druckverformungsrests von PFE 7301BZ bei verschiedenen Temperaturen



- 5 % Gewichtsverlust nach 1000 h bei: 301 °C
- 10 % Gewichtsverlust nach 1000 h bei: 309 °C

In **Tabelle 6** sind die entsprechenden Daten für die Perfluorelastomer-Produktlinie der 3M zusammengefasst. Bei dieser Betrachtung ist der Hinweis erforderlich, dass diese Werte lediglich für den Gewichtsverlust durch die thermo-oxidative Zersetzung stehen und nichts über die Qualität des Netzwerks aussagen.

Zur Berücksichtigung dieses mitentscheidenden Faktors wurden Langzeitprüfungen zum Druckverformungsrest vorgenommen, um die tatsächliche obere Nutzungstemperatur oder die Lebensdauer abzuschätzen. Als Grenzkriterium für die Lebensdauer wurde das Erreichen eines Druckverformungsrests von 80 % bei der jeweils gewählten Dauereinsatztemperatur gewählt. Dazu erfolgten Langzeitmessungen bei verschiedenen Temperaturen über einen Zeitraum von mindestens einem Monat. In **Abbildung 9** ist dies am Beispiel PFE 7301BZ dargestellt.

Die Zeit zum Erreichen von 80 % Druckverformungsrest (→ Lebensdauer unter Be-

triebsbedingungen) kann gemäß der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$x = e^{(y + b)/a} \quad 3$$

Die Ergebnisse für das in **Abbildung 9** gezeigte Beispiel sind in **Tabelle 7** aufgeführt.

Man beachte, dass PFE 7301BZ in einer statischen Umgebung 138 Jahre (!) hält, wenn es einer Dauertemperatur von 225 °C ausgesetzt wird, bei einer Dauertemperatur von 275 °C 1,3 Jahre. Diese Daten können durchaus die Verwendung dieses teuren Werkstoffs sogar bei geringeren Temperaturen empfehlenswert erscheinen lassen, wenn ein Ausfall vollständig vermieden werden muss.

Erfasst man ähnlich **Abbildung 9** Daten bei weiteren Temperaturen (Grenzkriterium 80 % Druckverformungsrest) kann man unter Anwendung der Arrhenius-Gleichung die maximale Einsatztemperatur für eine vorgegebene Lebensdauer ermitteln. Die entsprechenden Daten für PFE 7301BZ finden sich in **Tabelle 8**.

**Abbildung 10** gibt die grafische Auswertung der **Tabelle 8** wieder.

**Tab. 7:** Lebensdauerdaten für PFE 7301BZ – ermittelt aus den Daten der **Abbildung 9**

PFE 7301BZ bei Einsatztemperatur in °C	Anstieg a	Schnittpunkt b	Zeit bis zum Erreichen des Druckverformungsrests von 80 %			
			Stunden	Tage	Jahre	R <sup>2</sup>
225	6,282	-7,99	1 210 796	50 450	138	0,9956
275	9,8616	-11,92	11 166	465	1,3	0,9907

**Tab. 8:** Lebensdauerdaten und Arrhenius-Berechnung für PFE 7301BZ als Funktion der Temperatur

PFE 7301BZ bei Einsatztemperatur in °C	Zeit in h	Temperatur in K	1/T in K <sup>-1</sup>	k in h	ln (k)
200	7 309 479	473,15	0,002113	0,0000109	-11,422656
225	1 210 796	498,15	0,002007	0,0000661	-9,624762
230	483 973	503,15	0,001987	0,0001653	-8,707758
275	11 166	548,15	0,001824	0,0071646	-4,938602

Mit dem aus **Abbildung 10** folgenden Anstieg  $a = -22\,762 = -E_a/R$  und dem Schnittpunkt  $b = 36,467 = \ln(A)$ , Auflösung der Arrhenius-Gleichung nach T (**Gl. 2**) und dem Einsetzen der Zahlen ergibt sich für eine vorgegebene Lebensdauer von 1 Monat (Grenzkriterium 80 % Druckverformungsrest) für PFE 7301BZ eine maximale Einsatztemperatur von 316 °C. Vergleichsmessungen mit weiteren FFKM-Typen führten für PFE 7502BZ zu einer maximalen Einsatztemperatur von 277 °C, für PFE 90Z Compound zu 229 °C (Grenzkriterien: 80 % Druckverformungsrest, Lebensdauer von 1 Monat).

## 11. Fazit und Ausblick

Perfluorelastomere werden für die extremsten chemischen und thermischen Bedingungen in zahlreichen Industrien verwendet. Wo andere Materialien versagen, kann FFKM erfolgreich eingesetzt werden. Zur Verarbeitung von FFKM-Polymeren ist keine spezialisierte Ausrüstung erforderlich. Ein wenig Schulung und Know-how ist alles, was erforderlich ist. Die tatsächliche Leistung wird von vielen Faktoren vorgegeben, einschließlich u. a. Rezeptur des Compounds, Vernetzungsschemie und -dichte, Molekulargewicht, Herstellungsbedingungen und Anwendungsbedingungen. Alle diese Faktoren sind vor der Auswahl eines FFKM-Typs sorgfältig abzuwägen.

Die hier demonstrierten Verfahren zur Abschätzung von Lebensdauer und maximaler Einsatztemperatur für eine vorgegebene Einsatzzeit ergibt realistischere Daten als die durch die thermogravimetrische Analyse gewonnenen Informationen. Weitere Analysen des vollständigen FFKM Produktportfolios von 3M werden derzeit vorgenommen.

## GAK-Abonnenten haben's gut!

Wussten Sie schon, dass Sie unsere Magazine auch ganz bequem online lesen können?  
Wenn Sie daran interessiert sind, kontaktieren Sie bitte einfach schriftlich oder telefonisch unseren Abonentenservice:

**Noemi Jäger**  
**Telefon: +49 2102 9345-0 · E-Mail: [service@gupta-verlag.de](mailto:service@gupta-verlag.de)**

# Impressum

## Herausgeber

Dr. Heinz B. P. Gupta

## Anschrift

Dr. Gupta Verlag  
Am Stadion 3b,  
40878 Ratingen  
Ust. Nr. DE 157894980

## Postanschrift

Postfach 10 13 30,  
40833 Ratingen

**Tel.** +49 2102 9345-0  
**Fax** +49 2102 9345-20

**E-Mail** [info@gupta-verlag.de](mailto:info@gupta-verlag.de)

**Internet** <http://www.gak.de>

## Chefredaktion

Dr. Ernst Debie (v.i.S.d.P.)

## Redaktion

Dr. Heinz B. P. Gupta  
Dr. Isabella Kappner  
Dipl.-Biol. Markus Linden  
Dr. Stephanie Waschbüsch

*in memoriam Dipl.-Chem. Frank A. Gupta †*

## Freie Mitarbeiter

Dr. Stefan Albus (ALS)  
Jiri G. Drobny (JD)  
Dr. Hermann Fries (HF)  
Prof. Dr. Dr. Günter Grundke (GG)  
Gert F. Hartmann (GFH)  
Siegfried Heimlich (SH)

Dr. Franz Otto (FO)  
David Shaw (DS)  
Dr. Horst-E. Toussaint (HET)  
David Vink (DV)

## Redaktionsassistentz

Patrizia Schmidt  
Tel. +49 2102 9345-12

## Abonnements

Noemi Jäger  
Tel. +49 2102 9345-18

## Anzeigen

Indira Gupta, Julian Bäumer  
Tel. +49 2102 9345-15

## Layout

Ulrich Gewehr, Max Godenrath  
Tel. +49 2102 9345-18

## Erscheinungsweise:

12 Ausgaben 2015  
Postvertriebsnummer 4637  
ISSN 0176-1625

## Bankverbindungen

Deutsche Postbank AG  
IBAN DE95 3004 0000 0858 7982 00  
BIC COBADEFFXXX

Commerzbank Düsseldorf  
IBAN DE43 3007 0024 0470 7170 00  
BIC DEUTDE33XXX

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen. Oft handelt es sich um gesetzlich geschützte eingetragene Warenzeichen, auch wenn sie nicht ausdrücklich als solche gekennzeichnet sind.

## Abonnement-, Bezugs- und Lieferbedingungen:

Jahresabonnementpreis 280,- EUR (zzgl. Versandkosten). Einzelheft 25,- EUR (Inlandspreise verstehen sich inkl. der jeweils gültigen Mehrwertsteuer). Bestellungen nehmen der Verlag und alle Buchhandlungen im In- und Ausland entgegen. Eine neue Abonnementbestellung gilt zunächst nur für das laufende Kalenderjahr. Das Abonnement verlängert sich automatisch, wenn nicht sechs Wochen vor Ablauf des Kalenderjahres schriftlich gekündigt wird. Die Abonnementgelder werden jährlich im Voraus in Rechnung gestellt und bei Teilnahme am Lastschriftverfahren automatisch abgebucht. Sollte die Fachzeitschrift aus Gründen, die nicht vom Verlag zu vertreten sind, nicht geliefert werden können, besteht kein Anspruch auf Nachlieferung oder Erstattung vorausbezahlter Bezugsgelder. Gerichtsstand für Vollkaufleute ist Ratingen, für alle Übrigen gilt dieser Gerichtsstand, sofern Ansprüche im Wege des Mahnverfahrens geltend gemacht werden.

## Urheber- und Verlagsrecht:

Mit Namen oder Signum des Verfassers gekennzeichnete Artikel sind nicht unbedingt die Meinung der Redaktion. Unverlangte Manuskripte werden nur zurückgesandt, wenn Rückporto beigefügt ist. Der Verlag setzt voraus, dass der Autor Inhaber der Urheber- und Verwertungsrechte hinsichtlich sämtlicher Bestandteile der Einsendung ist, also auch bezüglich miteingesandter Abbildungen, Tabellen usw. Mit Annahme des Manuskripts gehen das Recht der Veröffentlichung sowie die Rechte zur Übersetzung, zur Vergabe von Nachdruckrechten, zur elektronischen Speicherung in Datenbanken, zur Herstellung von Sonderdrucken, Fotokopien und Mikrokopien an den Verlag über. Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der durch das Urheberrechtsgesetz festgelegten Grenzen ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig.