

TECHNISCHES PAPIER

## **Der feine Unterschied zwischen FKM und FFKM**

Mohammed Fiaz  
Ryan McNulty

**Precision Polymer Engineering**  
[www.prepol.com](http://www.prepol.com)

FKM und FFKM sind einander sehr ähnliche Werkstoffe. Doch es sind die feinen Unterschiede zwischen diesen beiden Werkstofffamilien, die eine wesentliche Rolle bei der Auswahl der richtigen Dichtungslösung für die jeweilige Anwendung spielen.

In diesem Papier beschäftigen wir uns mit einigen der Grundlagen von FKM- und FFKM-Werkstoffen, analysieren ihre jeweiligen Vor- und Nachteile sowie die strukturbasierten Gründe für ihre Wahl und sehen uns an, für welche kritischen und anspruchsvollen Dichtungsanwendungen sie sich besonders gut eignen.

### Was ist FKM?

FKM ist die ASTM-Bezeichnung für eine Klasse fluorierter kohlenstoffbasierter Synthetikgumme, die auch als Fluorelastomere bezeichnet werden. FKM wurde ursprünglich Ende der 1950er Jahre in Reaktion auf die hohe Nachfrage nach Hochleistungsdichtungen in der Luft- und Raumfahrt entwickelt. Bis in die 80er hinein wurden FKM stetig weiterentwickelt, sodass sie im Laufe der Zeit immer wärme- und lösungsmittelbeständiger sowie druckfester wurden. Heute widerstehen Dichtungen aus FKM-Werkstoffen Temperaturen von über 200 °C. Außerdem sind sie beständig gegenüber hohen Drücken, Chemikalien und anderen Fluiden, zu denen auch unterschiedliche Kraft- und Treibstoffe zählen.

FKM-Werkstoffe werden häufig für die Herstellung von O-Ringen, Dichtungsringen und anderen individuellen Dichtungsprofilen für unterschiedlichste Hochleistungsanwendungen in Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrt, im Energiesektor und in der Halbleiterfertigung eingesetzt.

Auf der anderen Seite sind FKM allerdings kaum beständig gegenüber Ethern, Ketonen, Estern, Aminen und hydraulikflüssigkeitsbasierten Phosphatestern. Für eine angemessene Beständigkeit gegenüber Warmwasser, Dampf und nassem Chlor werden besondere Verbindungen benötigt.

FKM werden typischerweise nicht für den Einsatz mit alkalischen Flüssigkeiten und Aminen empfohlen, da C-H-Bindungen neben C-F-Bindungen im Polymer hochgradig sauer wirken und von alkalischen Substanzen angegriffen werden. FKM-Polymere bestehen aus langen Kohlenstoffatomketten, an die sich eine Kombination aus Fluor- und Wasserstoffatomen bindet.

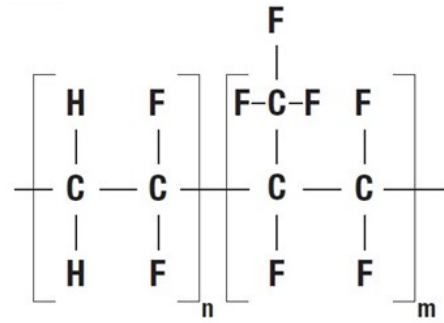


Abbildung 1: FKM-Polymerstruktur

### Was ist FFKM?

FFKM-Werkstoffe, auch als Perfluorelastomere bezeichnet, enthalten einen höheren Fluoranteil als Standard-FKM. Die erste kommerziell erhältliche FFKM-Dichtung wurde Ende der 1960er hergestellt, bis zur weitverbreiteten Herstellung von FFKM-Werkstoffen dauerte es jedoch bis Ende der 1980er. FFKM wird als Dichtwerkstoff in Umgebungen eingesetzt, in denen hohe Temperaturen vorherrschen und aggressive Chemikalien zum Einsatz kommen. Häufige Beispiele sind die Verarbeitung von Halbleitern, die Öl- und Gasbranche, der Bereich Life Sciences und die Luft- und Raumfahrt.

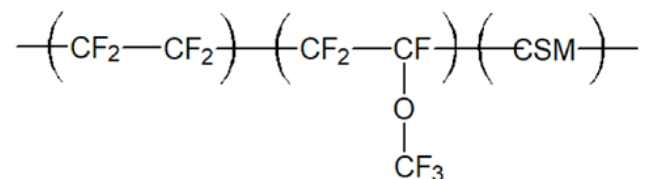


Abbildung 2: FFKM-Polymerstruktur

Die C-H-Bindungen von FKM werden in FFKM durch C-F-Bindungen ersetzt. Diese C-F-Bindungen weisen eine höhere Dissoziationsenergie auf, sodass FFKM bei höheren Temperaturen deutlich stabiler sind. FFKM-Werkstoffe wurden bereits erfolgreich für die Abdichtung in Prozessen mit Temperaturen von über 300 °C eingesetzt. Zwar ist diese deutlich größere Temperaturbeständigkeit ein wesentlicher Vorteil, das Hauptargument für den Vorzug von FFKM gegenüber FKM ist allerdings eindeutig die Chemikalienbeständigkeit, bei der noch größere Fortschritte erzielt werden konnten. FFKM-Werkstoffe sind mit nahezu allen Chemikalien kompatibel. In Kombination mit ihrer größeren Temperaturbeständigkeit macht diese Eigenschaft FFKM zum führenden Dichtungsmaterial für Anwendungen, bei denen die Folgen einer leckenden Dichtung besonders kostenintensiv, wenn nicht sogar katastrophal sind.

Von der Gewinnung und Verarbeitung von Öl und Gas bis hin zur Herstellung von Halbleiterchips: FFKM-Werkstoffe entwickeln sich immer mehr zur beliebtesten Wahl für Hochleistungsdichtungen. Grund hierfür ist die Tatsache, dass sich FFKM leistungstechnisch in einer Reihe von Aspekten bewährt haben, zu denen unter anderem mechanische Festigkeit, Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit und Langlebigkeit zählen. Die Ketten von FFKM-Polymeren sind einige der inertesten Polymerstrukturen, die es gibt. Dank der Chemikalienbeständigkeit von FFKM erfüllt dieser Werkstoff zudem die strengen Vorschriften für Werkstoffreinheit und -sauberkeit, die in der Arznei- und Lebensmittelverarbeitung und -herstellung Anwendung finden.

Doch FFKM ist nicht gleich FFKM. Vielmehr gibt es mehrere unterschiedlich vernetzte FFKM. Das ist einer der Hauptgründe dafür, dass verschiedene FFKM-Werkstoffe so unterschiedliche Temperaturbeständigkeitswerte aufweisen. Einige können bei Temperaturen von bis zu 225 °C eingesetzt werden, andere dagegen bei bis zu 325 °C. Die Vernetzung dieser Polymere ist nicht vollständig fluoriert und ist somit durch Chemikalien angreifbar. Typischerweise sind FFKM mit Hochtemperaturbeständigkeit und geringer Druckverformung weniger chemikalienbeständig als FFKM für niedrigere Betriebstemperaturen und mit etwas höherer Druckverformung. Bei der Auswahl eines Elastomers mit optimaler Dichtungsleistung ist es somit notwendig, sich dieser subtilen Leistungsunterschiede und der genauen Anforderungen der abzudichtenden Anwendung bewusst zu sein.

Allgemein kommen in der Verarbeitung drei Hauptdichtungslösungsklassen zum Einsatz:

- Chemikalienbeständige „Allrounder“-FFKM: Dabei handelt es sich meist um peroxidgehärtete FFKM, die den Großteil aller Anwendungsfälle abdecken.
- Hochtemperatur-FFKM: Bei ihnen kommt meist ein Nitrilaushärtungssystem zum Einsatz.
- Spezial-FFKM für den Bereich Life Sciences: Diese Werkstoffe verfügen über die für Lebensmittel- und Pharmaindustrie notwendigen Zulassungen, z. B. gemäß FDA und USP Class VI.

Precision Polymer Engineering entwickelte mehrere FFKM-Werkstoffgüteklassen mit unterschiedlichen Vernetzungstechnologien.

Zur Veranschaulichung der Unterschiede, die verschiedene Vernetzungseigenschaften in FFKM-Werkstoffen hervorrufen, wurden an mehreren FFKM-Werkstoffen und einem FKM einige Prüfungen durchgeführt. Sie wurden einer Reihe aggressiver Umweltbedingungen ausgesetzt und Veränderungen ihrer physikalischen Eigenschaften, z. B. ein Aufquellen, wurden gemessen.

Neben der Standardvernetzungstechnologie mit Peroxid (FFKM1) wurde eine spezielle Peroxidtechnologie (FFKM2) untersucht, bei der bei gleicher Chemikalienbeständigkeit eine höhere Temperaturbeständigkeit erreicht werden kann. Dieses FFKM2 füllt eine Bedarfslücke, die zwischen der Temperaturbeständigkeit von FFKM1 und nitrilgehärteten FFKM-Werkstoffen besteht, die zum Vergleich ebenfalls untersucht wurden (FFKM3). Letztere dichten dabei bei Temperaturen von bis zu 327 °C zuverlässig ab. Ähnliche Aushärtungstechnologien wie die hier untersuchten sind auch in einer Ausführung in der Farbe Weiß erhältlich und eignen sich somit für Anwendungen im Bereich Life Sciences. Sie sind zudem mit den Anforderungen von FDA und USP Class VI konform.

Abbildung 3 zeigt eine Tabelle, die den Leistungsvergleich von FFKM1, FFKM2, FFKM3 und einem Peroxid-FKM in Hochtemperaturdampf, 70-prozentiger Salpetersäurelösung und Ethylendiamin veranschaulicht. Bilder der entsprechenden Proben nach Abschluss der Prüfung geben Aufschluss darüber, in welchem Ausmaß die verschiedenen Dichtungen beschädigt wurden.

Es ist erkennbar, dass FFKM gegenüber FKM in allen Prüfumgebungen klar überlegen war, doch auch zwischen den verschiedenen FFKM-Werkstoffgüteklassen waren deutliche Leistungsunterschiede erkennbar. Am deutlichsten zeigt sich das beim nitrilvernetzten Werkstoff (FFKM3), bei dem es sowohl beim Hochtemperaturdampf als auch bei Einwirkung von Ethylendiamin zu schweren Beschädigungen kam.

Die Ergebnisse demonstrieren darüber hinaus die Überlegenheit der verbesserten Peroxidvernetzungstechnologie: FFKM2 verfügt über nahezu die gleiche Chemikalienbeständigkeit wie FFKM1, weist dabei aber zusätzlich eine höhere Maximaltemperatur auf.

Diese Prüfung zeigt, dass die Leistungsunterschiede zwischen unterschiedlichen FFKM so deutlich sein können wie die zwischen FKM und FFKM. Deshalb sollte keinesfalls angenommen werden, dass FFKM eine Rundumlösung für alle Dichtungsanwendungen im Bereich Life Sciences sind.

	Vernetzung	Höchsttemperatur	Dampf	70-prozentige Salpetersäurelösung	Ethylendiamin
			168 Std. bei 250 °C	168 Std. bei 80 °C	168 Std. bei 100 °C
FFKM1	Peroxid	260	1	1	1
FFKM2	HT-Peroxid	290	1	1	2
FFKM3	Nitril	327	4	1	3
FKM	Peroxid	225	4	2	4

1 = ausgezeichnet, so gut wie keine Auswirkung auf die physikalischen Eigenschaften

2 = gut, moderates Anschwellen (um 10–20 %) und leichte Veränderung der physikalischen Eigenschaften

3 = nicht zu empfehlen, deutliches Anschwellen (um >20 %) und merkliche Veränderung der physikalischen Eigenschaften

4 = keinesfalls verwenden, extremes Anschwellen (>40 %)

Abbildung 3 – Tabelle der Eigenschaften von FFKM mit verschiedenen Aushärtungstechnologien unter unterschiedlichen Prüfbedingungen

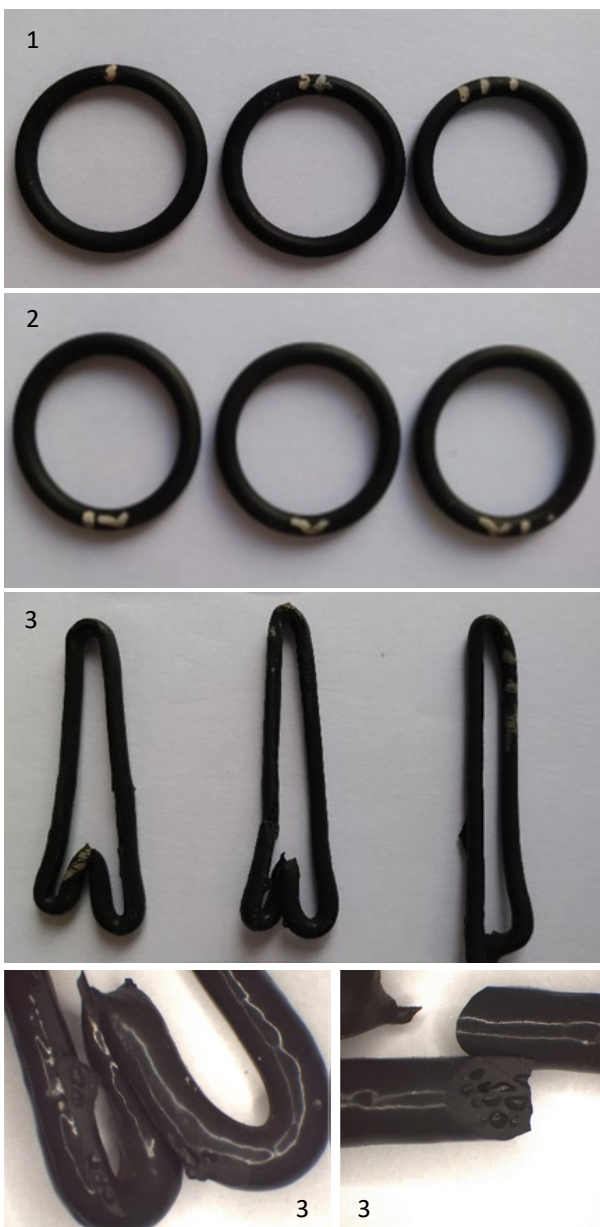


Abbildung 4 – Bilder der O-Ringe nach Dampfexposition (168 Std. bei 250 °C), von oben nach unten: FFKM1, FFKM2, FFKM3, FFKM3

Bei der Dampfexpositionsprüfung (Abbildung 4) wurde die aus FFKM3 hergestellte Probe porös. Wasser wurde im Werkstoff eingeschlossen, sodass sich die Dichtung ausdehnte, weich wurde und somit ihre mechanische Festigkeit einbüßte.

Bei der Salpetersäure-Alterungsprüfung (Abbildung 5) ergaben sich bei keiner der FFKM-Proben sichtbare Schäden.

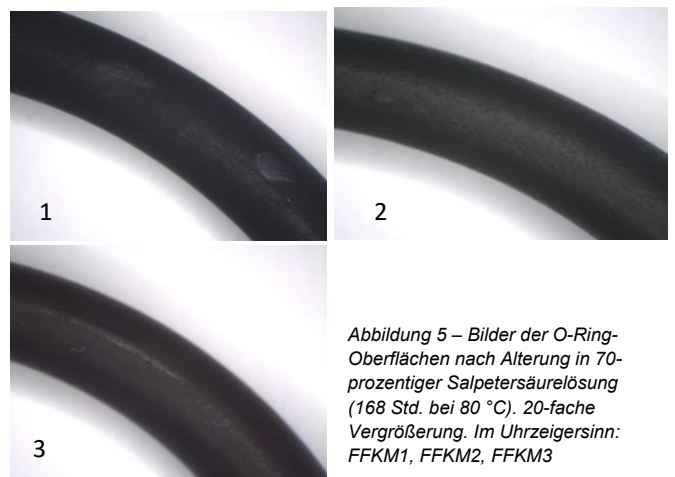


Abbildung 5 – Bilder der O-Ring-Oberflächen nach Alterung in 70-prozentiger Salpetersäurelösung (168 Std. bei 80 °C). 20-fache Vergrößerung. Im Uhrzeigersinn: FFKM1, FFKM2, FFKM3



Abbildung 6 – Bilder der O-Ring-Oberflächen nach Alterung in Ethylendiamin (168 Std. bei 80 °C). FFKM3 wies dabei schwere Schäden auf. 20-fache Vergrößerung.

Im Uhrzeigersinn: FFKM1, FFKM2, FFKM3

In *Abbildung 6* ist die Korrosion des nitrilgehärteten FFKM aufgrund der Wechselwirkung mit Amin deutlich erkennbar.

Es ist erkennbar, dass FFKM gegenüber FKM in allen Prüfungen klar überlegen war, doch auch zwischen den verschiedenen FFKM-Werkstoffgüteklassen waren deutliche Leistungsunterschiede erkennbar. Am deutlichsten zeigt sich das beim nitrilvernetzten Werkstoff (FFKM3), bei dem es sowohl beim Hochtemperaturdampf als auch bei Einwirkung von Ethylendiamin zu schweren Beschädigungen kam.

Die Ergebnisse demonstrieren darüber hinaus die Überlegenheit der verbesserten Peroxidvernetzungstechnologie: FFKM2 verfügt über nahezu die gleiche Chemikalienbeständigkeit wie FFKM1, weist dabei aber zusätzlich eine höhere Maximaltemperatur auf.

Diese Prüfung zeigt, dass die Leistungsunterschiede zwischen unterschiedlichen FFKM so deutlich sein können wie die zwischen FKM und FFKM. Deshalb sollte keinesfalls angenommen werden, dass FFKM eine Rundumlösung für alle Dichtungsanwendungen im Bereich Life Sciences sind.

### Druckspannungsrelaxation (Compressive Stress Relaxation, CSR)

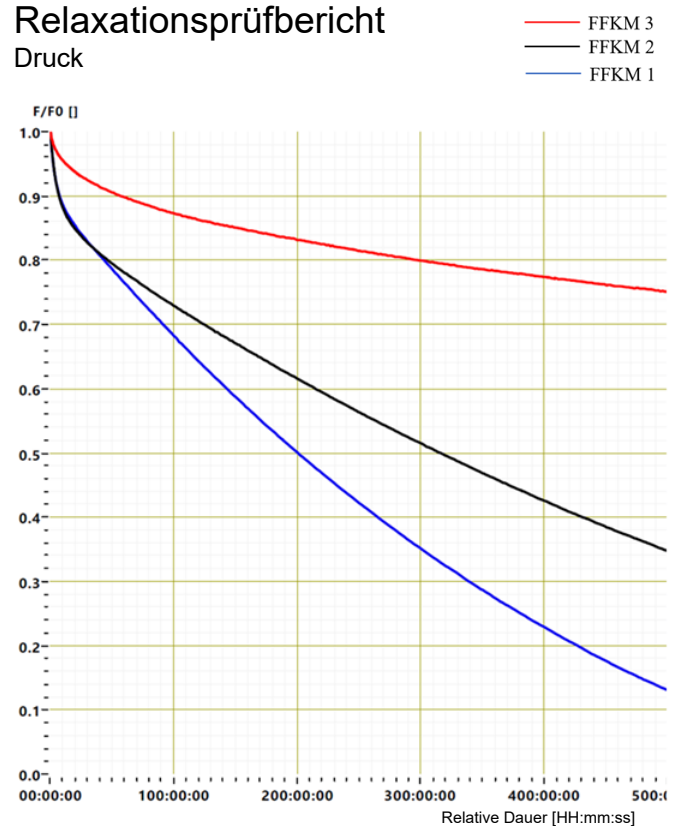
Mithilfe der Druckspannungsrelaxation (Compressive Stress Relaxation, kurz: CSR) wird gemessen, welche Kraft sich in einem zusammengedrückten Werkstoff aufbaut und wie sich diese Kraft im Laufe der Zeit mit Alterung des Werkstoffs reduziert. Eine Prüfung der CSR bietet Ingenieuren eine praktische Möglichkeit, die Lebensdauer einer Elastomerdichtung über längere Zeiträume hinweg abzuschätzen. Früher wurden solche Überprüfungen hauptsächlich in der akademischen Forschung angewandt, doch in den letzten Jahren wuchs der Trend hin zu verstärkten CSR-Prüfungen auch in industriellen Anwendungen. Ein Grund hierfür ist die Einführung von CSR-Prüfungen in Produktnormen, beispielsweise für Dichtungsringe für Rohre. Mithilfe einer CSR-Prüfung kann zwar keine Garantie für Werkstoffleistung und -zuverlässigkeit in realen Anwendungen gegeben werden, sie ist aber trotzdem eine der besten Laborprüfungen für den Eignungsvergleich verschiedener Werkstoffe im Langzeiteinsatz.

Der Prozess, durch den es zur CSR kommt, kann chemischer oder physikalischer Natur sein. Unter normalen Voraussetzungen spielen beide Faktoren eine Rolle. Bei niedrigen oder normalen Temperaturen

und/oder über kürzere Zeiträume hinweg dominieren physikalische Einflüsse die Druckspannungsrelaxation, während bei hohen Temperaturen oder über längere Zeiträume chemische Einflüsse dominieren. Eine der wichtigsten Voraussetzungen für zuverlässige und wiederholbare Ergebnisse bei der Durchführung einer CSR-Prüfung sind konstante Temperaturen und Drücke während aller Messvorgänge.

*Abbildung 7* zeigt einen Relaxationsprüfbericht für drei FFKM-O-Ringe mit verschiedenen Vernetzungssystemen (FFKM1, FFKM2, FFKM3), die bei 250 °C in Luft parallel und laufend auf ihre CSR untersucht wurden.

### Relaxationsprüfbericht Druck



*Abbildung 7 – Druckspannungsrelaxation (Compressive Stress Relaxation, kurz: CSR) – Bericht für drei FFKM-O-Ringe, bei 250 °C in Luft parallel und laufend auf ihre CSR untersucht.*

Die mit Nitrilvernetzungssystem ausgehärtete Probe (FFKM3) wies die beste Leistung auf und dichtete auch nach 500 Stunden noch zuverlässig ab. FFKM1 hingegen hatte seine Dichtkraft nach dieser Zeit vollständig eingebüßt, während FFKM2 eine mittlere Leistung zeigte.

Sowohl diese CSR-Prüfung als auch die oben beschriebene Tauchprüfung illustrieren die großen Leistungsunterschiede zwischen verschiedenen Ausführungen des gleichen Werkstoffs deutlich. Bereits innerhalb der Familie der FFKM-Werkstoffe

gibt es eine große Anzahl an Variablen – ganz ohne dabei überhaupt andere Werkstofffamilien zu berücksichtigen zu haben. Es wäre also stark vereinfacht zu sagen, ein FKM verhielte sich wie X und ein FFKM wie Y. Deshalb ist für die Auswahl und Spezifikation des optimalen Dichtungswerkstoffs für eine bestimmte Anwendung ein deutlich durchdachterer Ansatz notwendig.

## Fazit

Allgemein schneiden FFKM in den meisten Dichtungsanwendungen besser ab als FKM – insbesondere in kritischeren Anwendungen sowie in Branchen, in denen ein Versagen der Dichtung katastrophale Folgen nach sich ziehen könnte. Somit stellt sich Ingenieuren in diesen Anwendungsgebieten die Frage, *welches* FFKM eingesetzt werden sollte. Die Antwort hängt ganz von der Branche ab.

In der Halbleiterindustrie werden besonders temperaturbeständige Dichtungswerkstoffe benötigt, die plasmaresistent sind und eine besonders hohe Werkstoffreinheit aufweisen, um die Kontamination mit Spurenmetallen auf ein möglichst niedriges Niveau zu reduzieren. In der Lebensmittel- und Pharmaindustrie hingegen liegt der Schwerpunkt auf der Identifikation eines Werkstoffs, der die bestmögliche Chemikalienbeständigkeit, sowohl gegen Prozessmedien als auch hochaggressive CIP- und SIP-Verfahren, sowie eine Konformität mit allen notwendigen Sicherheitszertifizierungen und -normen bietet. In der Chemiebranche ist es besonders wichtig, die Prozessmedien und Betriebstemperaturen genau zu kennen, um das am besten geeignete FFKM auswählen zu können.

Es ist somit notwendig, die Anforderungen, die an eine Dichtungslösung gestellt werden, so genau wie möglich kennenzulernen, bevor ein geeignetes FFKM bestimmt werden kann. Es ist empfehlenswert, sich in diesem Fall an einen Dichtungsspezialisten zu wenden.

## **Firmensitz**

Precision Polymer Engineering  
Greenbank Road  
Blackburn  
BB1 3EA  
England

T: +44 (0)1254 295 400  
E: sales@idexcorp.com

## **Amerika**

Precision Polymer Engineering LLC  
PPE, Brenham, USA  
3201 S. Blue Bell Road  
Brenham  
TX 77833  
USA

T: +1 979 353 7350  
E: prepol.sales-usa@idexcorp.com

**Perlast® ist eine eingetragene Handelsmarke der Precision Polymer Engineering Ltd.**

## **Haftungsausschluss**

Der Inhalt dieses technischen Papiers ist ausschließlich für allgemeine Informationszwecke vorgesehen. Er wird unter der Annahme bereitgestellt, dass Autoren und Herausgeber bei der Erstellung angemessene Aufmerksamkeit und Sorgfalt walten ließen. Die hierin enthaltenen Informationen sind nach unserem besten Wissen genau und zuverlässig. Es ist jedoch möglich, dass einige der in diesem Papier enthaltenen Informationen unvollständig, falsch oder nicht auf bestimmte Anwendungen oder Voraussetzungen anwendbar sind. Diese Informationen sollten somit nur mit begleitender Beratung eines qualifizierten und lizenzierten Experten verwendet werden, der individuelle Beratung für einen bestimmten Anwendungsfall bereitstellen kann und dabei alle relevanten Faktoren und gewünschten Ergebnisse berücksichtigt. Wir übernehmen keinerlei Haftung für direkte oder indirekte Verluste, die aus der Nutzung von, dem Verlass auf oder der Handlung auf Basis der in diesem technischen Papier enthaltenen Informationen entstehen.

**TP00119-20**

Precision Polymer Engineering ist eine Geschäftseinheit der IDEX Corporation

