

Analysen von Polyoxymethylenen für Anwendungen in tribologischen Polymer-Polymer-Systemen der Fördertechnik – Teil 1

Dipl.-Ing. (FH) Rene Illek, Dipl.-Ing. (FH) Mareike Hering, Frank Pohli,
Prof.-Dr.-Ing. Karsten Faust
Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt
Fakultät Maschinenbau
Professur Kunststofftechnik und Produktentwicklung, Fachbereich Tribologie

Aufgrund der großen Bedeutung von Polyoxymethylen (POM) für fördertechnische Anwendungen befassen sich die aktuellen Forschungsarbeiten u.a. mit der Charakterisierung und spezifischeren Analytik von POM für den Einsatz in tribologischen Polymer-Polymer-Systemen (PPS). Auf Basis von umfangreichen Produktrecherchen wurden für aktuelle Polymerentwicklungen verschiedene POM-Typen tribologisch, mechanisch und morphologisch untersucht und gegenübergestellt. In der vorliegenden Veröffentlichung soll aus diesen zahlreichen Untersuchungen eine exemplarische Darstellung zum Zusammenhang einiger für Polyoxymethylen typischen Eigenschaften dargestellt werden. Des Weiteren werden explizite und spezifische Erläuterungen zwischen den resultierenden Kenngrößen und des chemischen sowie morphologischen Aufbaus der Polyoxymethylene aufgezeigt und ergründet.

Kategorie und Themenbeschreibung: Polymertribologie und -analyse

Zusätzliche Schlüsselwörter: Polymere, Polyoxymethylen, Polyacetale, Tribologie, Fördertechnik, Kunststofftechnik

1 EINLEITUNG

Der Einsatz technischer Kunststoffe im Bereich der Logistik (Förderung und Lagerung) gewinnt zunehmend an Bedeutung. Eigenschaften wie geringe Dichte, die Möglichkeit zum ungeschmierten Betrieb (Trockenlauf) und eine kostengünstige Serienfertigung unterstützen die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten. So wird ein Großteil (40% Marktanteil in EU + USA [Fau10]) von Förderketten aus Kunststoffen hergestellt. Der Werkstoff Stahl wird zunehmend verdrängt, behält aber seine Berechtigung im höheren Lastsegment. Um die Einsatzgrenzen zu erweitern werden die Werkstoffe durch Additive tribologisch und mechanisch optimiert. Der Antrieb von sowohl Kunststoff-, als auch Stahlketten erfolgt durch Kettenräder aus Kunststoff. Als polymere Werkstoffe für Kettenräder werden häufig Polyamid (PA) und Polyoxymethylen (POM) verwendet [Ill13]. Für Gleitketten- und Mattenkettenwerkstoffe kommen

Autoren: Dipl.-Ing. (FH) R. Illek, Dipl.-Ing. (FH) M. Hering, F. Pohli, Prof.-Dr.-Ing. K. Faust
Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt
Fakultät Maschinenbau, Ignaz-Schön-Straße 11, 97421 Schweinfurt, Bayern, Deutschland
Email: rene.illek@fhws.de, karsten.faust@fhws.de
Telefon: +49 9721 940-9940, Fax: +49 9721 940-900, Website: www.fhws.de

Die Erlaubnis zur Kopie in digitaler Form oder Papierform eines Teils oder aller dieser Arbeit für persönlichen oder pädagogischen Gebrauch wird ohne Gebühr zur Verfügung gestellt. Voraussetzung ist, dass die Kopien nicht zum Profit oder kommerziellen Vorteil gemacht werden und diese Mitteilung auf der ersten Seite oder dem Einstiegsbild als vollständiges Zitat erscheint. Copyrights für Komponenten dieser Arbeit durch Andere als FHWS müssen beachtet werden. Die Wiederverwendung unter Namensnennung ist gestattet. Es andererseits zu kopieren, zu veröffentlichen, auf anderen Servern zu verteilen oder eine Komponente dieser Arbeit in anderen Werken zu verwenden, bedarf der vorherigen ausdrücklichen Erlaubnis.

heute bevorzugt Polyoxymethylen (POM), Polypropylen (PP), Polyamid (PA) und Polyethylen (hoher Dichte, high density) (PE-HD) zur Anwendung, wobei POM und PP am häufigsten Einsatz finden ([Fau10], [Ill13], [Rasch12]).

Polyoxymethylene (Polyacetale) sind technische Kunststoffe, welche sich durch hervorragende mechanische Eigenschaften (Festigkeit, Steifigkeit, Härte, Zähigkeit), tribologische Systemeigenschaften (Gleit- und Abriebverhalten) und sehr gute chemische Beständigkeit auszeichnen. In Abbildung 1 sind die wichtigsten technischen Thermoplaste aus TTS (Tribotechnische Systeme) von fördertechnischen Anwendungen gegenübergestellt. Aus dieser sind die Vorzüge der Polyoxymethylene anhand deren spezifischer Eigenschaften ersichtlich. Da die tribologischen Eigenschaften systemspezifische Parameter sind wurden in dieser Gegenüberstellung auf eine Angabe von Reibungszahlen und Verschleißangaben verzichtet. In tribologischen Paarungen hat jedes Material eigene Vorzüge und Anwendungsgebiete. Allerdings weist POM im Allgemeinen in tribologischen Systemen überragende Eigenschaften auf ([Rös05], [Raa13]). Für die hervorragenden mechanischen und tribologischen Kennwerte spielt die hohe Kristallinität der Polyoxymethylene eine entscheidende Rolle. Das außerordentlich gute Preis/Leistungs-Verhältnis dieses Polymerwerkstoffes ist von entscheidender Bedeutung für eine Vielzahl von Einsatzgebieten.

Werkstoffe	POM	PA 66	PBT	PP
Eigenschaften				
Mechanische Eigenschaften	trocken/feucht	trocken/feucht	trocken/feucht	trocken/feucht
• Zugfestigkeit [MPa]	72	85 / 50	60	33
• Zug-E-Modul [MPa]	3100	3100 / 1100	2500	1450
• Kerbschlagzähigkeit [kJ/m ²]	9	5 / 20	6	5
• Kugeldruckhärte [MPa]	174	160 / 100	130	72
Tribologische Eigenschaften	Systemeigenschaften			
• Reibungszahl				
• Verschleiß				
Dimensionsstabilität				
• Wasseraufnahme (Normalklima) [%]	0,2	2,8	0,25	< 0,1
• Wasseraufnahme (Wasserlagerung) [%]	0,8	8,5	0,5	< 0,1
• Wärmeausdehnung [10 ⁻⁶ /K] längs/quer zur Fließrichtung (FR)	122	70 / 100	130 - 160	100 - 200
Morphologische Eigenschaften	teilkristallin	teilkristallin	teilkristallin	teilkristallin
• Kristallinität [%]	POM-H: 70 - 80% POM-C: 50 - 60%	30 - 45%	40 - 50 %	60 - 70%
• Wärmeleitfähigkeit [W/K·m]	0,37	0,23	0,27	0,22
• Oberflächenenergie [mN/m]	42,1	47,5	43,6	31,2
• Dichte [g/cm ³]	1,42	1,14	1,3	0,9
Richtpreis	2,60 - 2,90 €/kg	3,10 - 3,40 €/kg	3,00 - 3,20 €/kg	ca. 1,20 €/kg

Abbildung 1: Vergleich von Thermoplasten für PPS in der Fördertechnik
([Ehr11], [Kern14], [Hel10], [Czy13], [Sae13])

Auf Basis der zahlreichen Anwendungsgebiete in Automobil-, Elektro-, Konsumgüterindustrie, Feinwerktechnik und Materialflusstechnik ist die globale Nachfrage von POM im vergangenen Jahrzehnt deutlich gestiegen. Dies soll an dieser Stelle kurz anhand einer zusammenfassenden Darstellung in Abbildung 2 verdeutlicht werden. Hierbei ist anzumerken, dass über 90% des weltweiten POM-Verbrauchs im Spritzguss verarbeitet werden. ([Kirn13], [Vaa11], [Vaa10], [Sed08], [For07], [Kut05], [Disch02]).

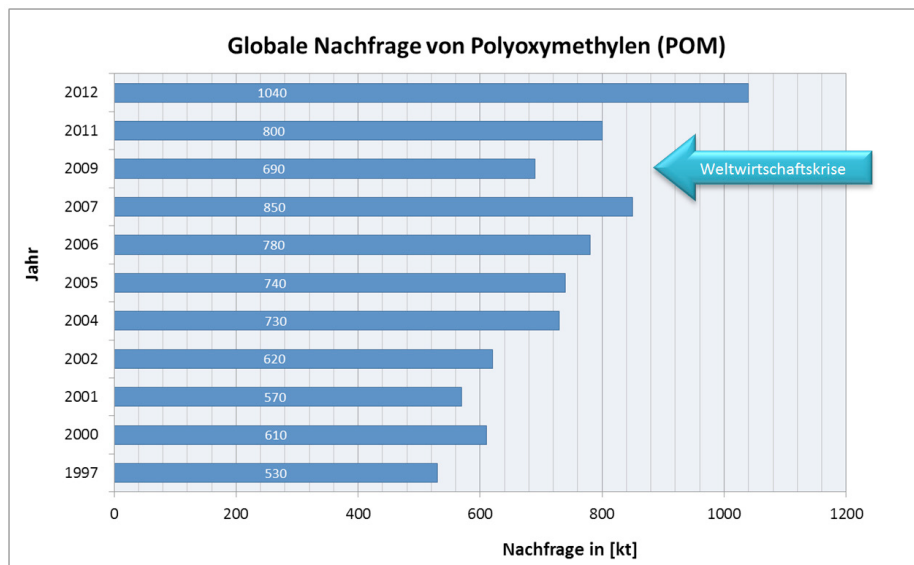


Abbildung 2: Globale Nachfrage von Polyoxymethylen (POM)

2 HERSTELLUNG UND AUFBAU DER POLYOXYMETHYLENE

Die Herstellung von Polyoxymethylen unterteilt sich grundlegend in die Erzeugung von Homopolymerisaten (POM-H) und Copolymerisaten (POM-C). Die nachfolgende Abbildung 3 stellt das grundsätzliche Herstellungsschema der Polyoxymethylenen dar und soll an dieser Stelle einen prinzipiellen Überblick über die Ausgangsprodukte (Edukte) und die einzelnen Verfahrensschritte geben. POM-Homopolymerisate werden durch anionische Polymerisation aus Formaldehyd oder alternativ aus Trioxan (Trimere des Formaldehyds) hergestellt. Dagegen werden POM-Copolymerisate durch kationische Ringöffnungspolymerisation von Trioxan unter Zugabe von 2 - 4 [Gew.-%] Ethylenoxid (Comonomer-Bausteine) erzeugt. Hierbei erfolgt die Verteilung dieser Comonomer-Bausteine statistisch entlang der Polymerkette, wobei zu Beginn des Polymerisationsvorgangs vorwiegend comonomerreiches POM-C entsteht, da die Comonomere schneller polymerisieren als Trioxan. Diese blockartigen Comonomersequenzen werden durch Transacetalisierung, welche parallel zur Wachstumsreaktion abläuft, weitgehend statistisch verteilt. Es treten bei den Copolymeren zusätzlich oftmals sogenannte Fines mit ca. 5 - 7 [Gew.-%] auf, d. h. ein erhöhter Anteil an niedermolekularen Kettenlängen die meist zyklisch verteilt sind. Dieser Fine-Anteil wirkt wie ein innerer Schmierstoff, führt aber gleichzeitig zu veränderten mechanischen Kennwerten. Die Produkte weisen durch die niedermolekularen Anteile (verkürzte Polymerketten - Fines) eine höhere Steifigkeit aber gleichzeitig etwas geringere Zähigkeit auf. ([Kai11], [Gee06], [Gna91], [Wit14]).

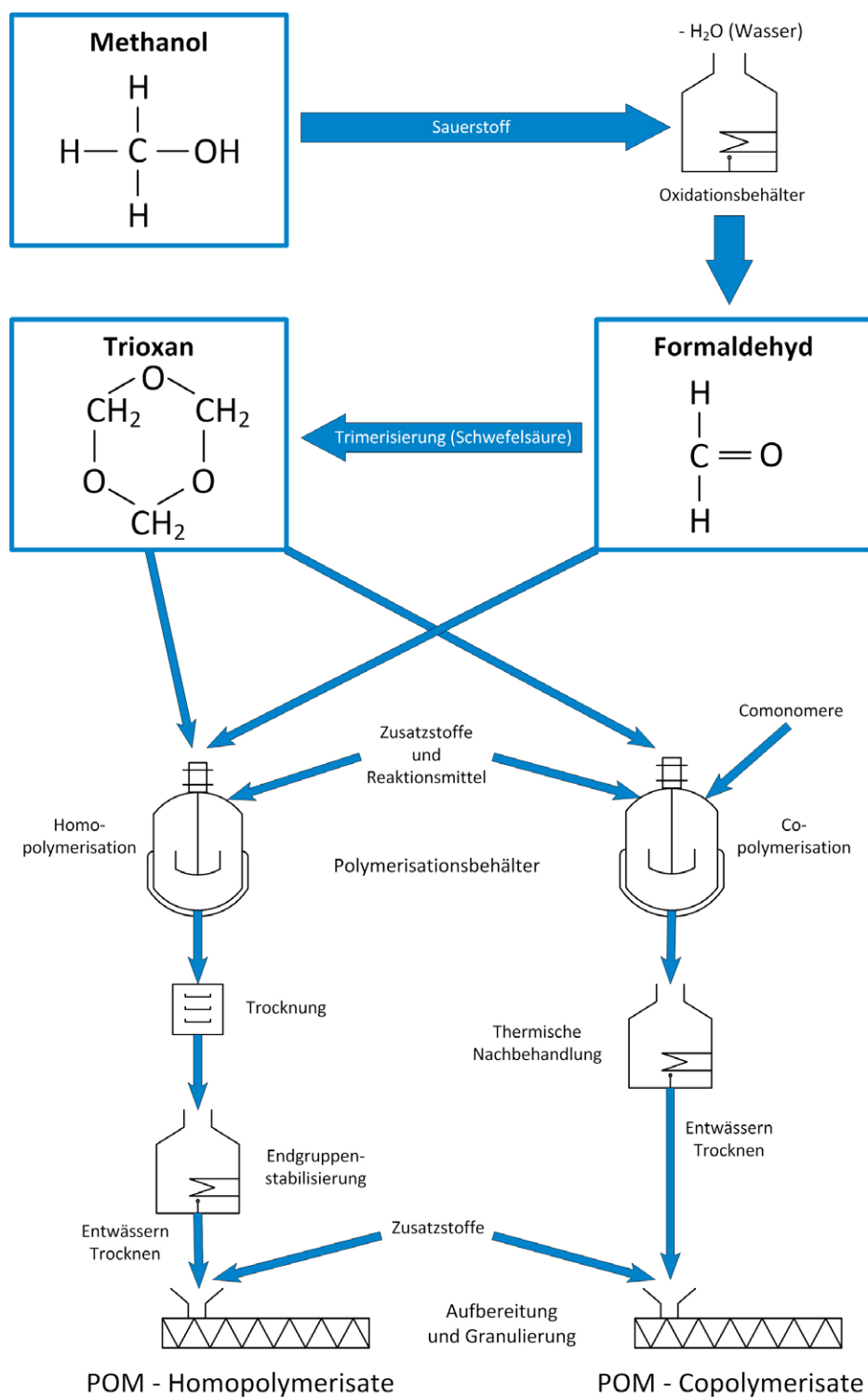
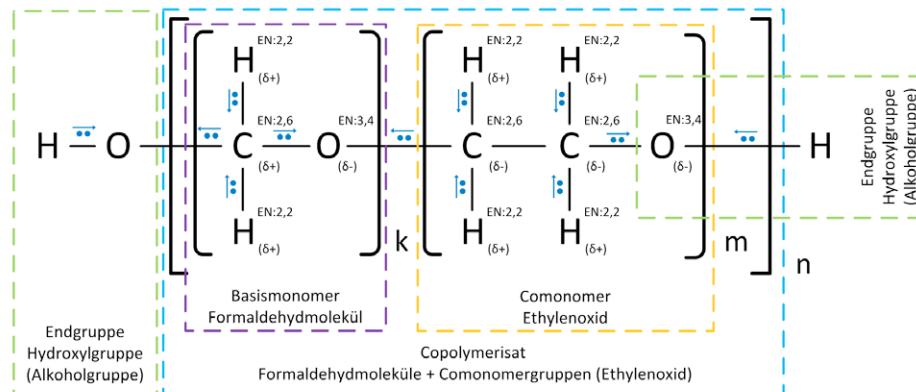


Abbildung 3: Grundsätzliches Herstellungsschema der Polyoxymethylene

Der strukturelle Aufbau von POM-Homopolymersisaten und POM-Copolymerisaten ist in der nachfolgenden Abbildung 4 dargestellt. In dieser sind außerdem die Elektronegativitäten EN der Atome und die aus den Differenzen der Elektronegativitäten resultierenden Dipole mit ihrer jeweiligen Partialladung (δ^+ , δ^-) dargestellt. Die Dipole in Polymerketten bewirken Anziehungskräfte (Dipol-Dipol-Kräfte), auf die nächstliegenden Molekülketten. In den adhäsiven Kontaktstellen von tribologischen Polymerpaarungen bestimmen diese u.a. die adhäsiven Bindungskräfte beziehungsweise Kraftpotentiale zwischen den Reibpartnern.

POM-C



POM-H

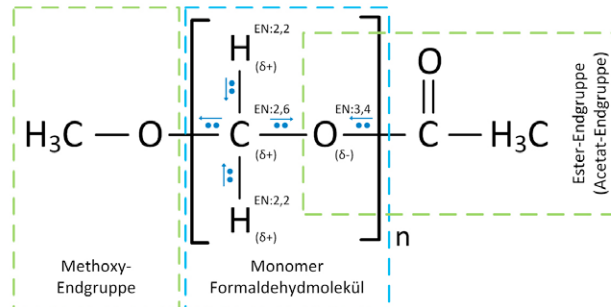


Abbildung 4: Strukturformeln von POM-C und POM-H

Die Comonomer-Bausteine sind in den POM-C-Kettenmolekülen, wie bereits einleitend erwähnt, statistisch verteilt (k und m statistisch verteilt). Es ist anzumerken, dass der Comonomeranteil (CMA) mit 2 - 4 [Gew.-%] gegenüber dem Basismonomeranteil (Formaldehydmolekülen) relativ gering ist. Trotzdem ergeben sich dadurch mannigfaltige Unterschiede zwischen POM-H und POM-C. Ein wesentlicher Unterschied ist die geringere Kristallinität von POM-C (siehe Abbildung 1). In Abhängigkeit vom Kristallisationsgrad ändern sich mechanische, tribologische und morphologische Eigenschaften, welche wiederum auf sehr komplexe Weise voneinander abhängig sind. Mit steigendem Kristallisationsgrad nehmen u.a. die Dichte, Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit (Streckgrenze) und Härte zu. Gleichzeitig nehmen die Schlagzähigkeit, Bruchdehnung (Verstreckbarkeit), mechanische Dämpfung, Beständigkeit gegen Spannungsrissbildung, thermische Ausdehnung, Maßbeständigkeit, Quellung und Lichtdurchlässigkeit ab [Ehr11]. Unterschiedliche molare Massenverteilungen (Polymerisationsgradverteilungen) resultieren in unterschiedlichen Viskositätsklassen der Polymere. Eine

hochviskose Type ist demnach aus längeren Molekülketten (hohe molare Masse) aufgebaut, wobei eine niedrigviskose Type (niedrige molare Masse) kürzere Molekülketten enthält. Mit zunehmender Viskosität (Molekulargewicht) sinkt der Kristallisationsgrad, da die längeren Kettenmoleküle eine Kristallitbildung behindern bzw. erschweren [Ehr11]. Auf Basis dieser Grundlagen sollen die nachfolgenden wissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse begründet werden.

3 VERGLEICH VON POM-HOMOPOLYMEREN UND -COPOLYMEREN

Aufgrund der enormen Bedeutung von POM für zahlreiche Anwendungen speziell in TTS der Fördertechnik, auf Basis von Polymer-Polymer-Paarungen, wurden unterschiedliche Polyoxymethylen-Typen einhergehend untersucht und gegenübergestellt, um grundlegende wissenschaftliche Erkenntnisse zu generieren und zu intensivieren. Es wurden sowohl Homopolymerisate als auch Copolymerisate betrachtet, wobei diese jeweils in unterschiedlichen Viskositätsklassen (Melt-Flow-Rate (MFR)) und weiteren Modifikationen (z.B. Typen mit Nukleierungsmittel (NM) oder Type mit reduziertem Comonomeranteil (R-CMA) analysiert wurden.

Es wurden die verschiedenen POM Werkstoffe anhand Ihrer mechanischen Kenngrößen (Zugfestigkeit, Zug-E-Modul, Schlagzähigkeit und Härte), tribologischen Kenngrößen (Reibungszahl, Reibkontakttemperatur und Verschleiß) sowie Morphologie (Oberflächenenergie, Kristallinität und Molare Massenverteilung) verglichen. Die Untersuchungen wurden anhand von Vielzweckprobekörpern für Kunststoffe nach [DIN 3167] und tribologischen Prüfkörpern (Unterproben (Platte: 200 x 80 x 3 mm), Oberproben (Platte: 15 x 10 x 3 mm)) durchgeführt. Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte im Spritzgussverfahren unter definierten Verfahrensparametern nach den Empfehlungen der Rohstoffhersteller und Anpassung an das Spritzgusswerkzeug.

In diesem ersten Teil sollen die Ergebnisse der mechanischen Untersuchungen dargestellt und ergründet werden. In den nachfolgenden Abbildungen 5 und 6 sind die ausgewählten Polyoxymethylene anhand deren ermittelten Zugfestigkeit, Zug-E-Modul und Schlagzähigkeit gegenüber gestellt. Es ist hieraus ersichtlich, dass keine reproduzierbare Abhängigkeit zwischen der MFR bzw. der Viskosität und der Zugfestigkeit sowie dem Zug-E-Modul festgestellt werden konnte. Hingegen nimmt die Kerbschlagzähigkeit mit abnehmender MFR zu, demnach weisen hochviskose POM-Typen höhere Zähigkeiten auf als niedrigviskose. Dies ist begründet durch die stärkeren Verschlaufungen und die Abgleitbehinderung der längeren Molekülketten hochviskoser Typen. Durch die Anwendung von Nukleierungsmitteln zeigt sich eine Erhöhung der Zugfestigkeit, Zug-E-Modul und Kerbschlagzähigkeit. Dieser Anstieg der getesteten mechanischen Kennwerte resultiert aus der höheren Kristallinität dieser Typen durch die NM. Die höheren mechanischen Kennwerte der POM-H Typen im Vergleich zu den Copolymerisaten (POM-C) sind ebenfalls durch die höhere Kristallinität der Homopolymere begründet. Durch eine Reduzierung des Comonomeranteils (R-CMA) konnte keine wissenschaftlich vertretbare Verbesserung der untersuchten mechanischen Kenngrößen festgestellt werden. Dennoch können über den CMA die Eigenschaften der Polyoxymethylene verändert werden ([Kai11], [Gee06], [Gna91], [Wit14]). Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse scheinen sich die Unterschiede zwischen POM Typen mit differenten CMA allerdings deutlich geringer auszuwirken als zunächst vermutet.

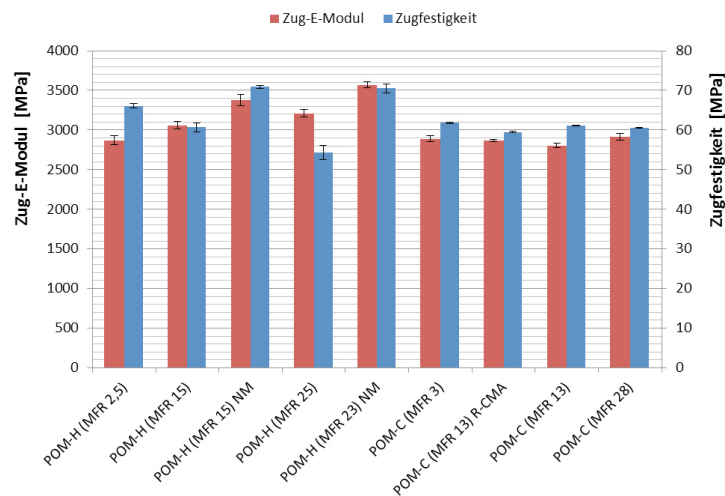


Abbildung 5: Zugfestigkeit und Zug-E-Modul von Polyoxymethylenen

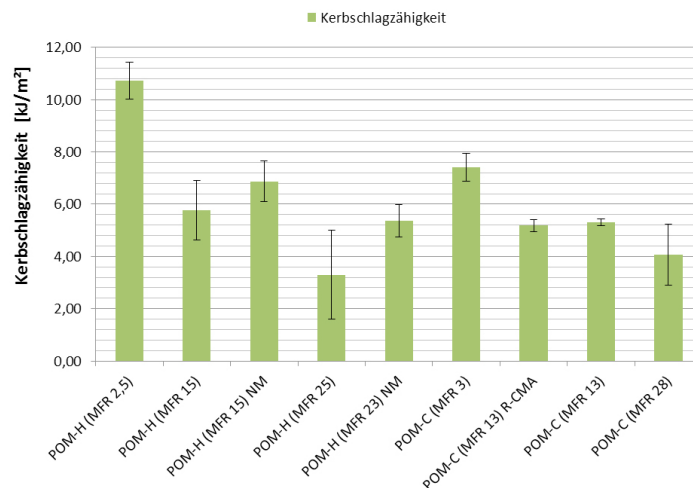


Abbildung 6: Kerbschlagzähigkeit von Polyoxymethylenen

Die Härtemessungen erfolgten mittels Kugeleindruckhärteprüfung nach [DIN 2039] an den tribologischen Probekörpern. Hierzu wurde auf jedem Probekörper eine Matrix an Messpunkten aufgezeichnet. Daraus wurde anschließend eine Härtepunktematrix erzeugt und ausgewertet. Es konnte zum einen nachgewiesen werden, dass sich die Härtewerte an den Rändern der Probekörper deutlich von den Härtewerten in der Probenmitte unterscheiden. Des Weiteren wurden auch Härteunterschiede zwischen angussnahen und angussfernen Messpunkten festgestellt. Diese Phänomene sind begründet durch die schnelleren Abkühlungsbedingungen an den Rändern der Prüfkörper und angussfernen Messpunkten. Aufgrund der langsameren Abkühlung in der Mitte der Probekörper resultiert eine höhere Kristallinität in diesen lokalen Bereichen. Aus diesem Grund weisen diese Segmente höhere Härtewerte auf. Der signifikante Einfluss der Geometrie auf die Härtewerte in geometrisch unterschiedlichen Systemen wird auch beim direkten Vergleich von Abbildung 7 und Abbildung 8 deutlich. Hier zeigen die wesentlich kleineren Oberproben, im Vergleich zu den größeren Unterproben, geringere Härtewerte. Wobei die Differenzen unterschiedlich ausgeprägt ausfallen. Beim Vergleich von POM-Homopolymeren und Copolymeren weisen letztere geringere Härtewerte auf, was

wiederum durch die höhere Kristallinität der Homopolymerisate begründet ist. Durch die Anwendung von Nukleierungsmitteln zeigt sich wiederum eine Erhöhung der Härte, wobei dieser Effekt bei den Oberproben (Abbildung 8) deutlich ausgeprägter ausfällt als bei den Unterproben (Abbildung 7). Dieses Resultat stützt die These, dass sich durch die NM der Kristallisationsgrad erhöht und gerade bei schnellen Abkühlbedingungen während der Herstellung (Geringen Zykluszeiten) sich verbesserte mechanische Kenngrößen ergeben als im Vergleich zu Typen ohne NM. Des Weiteren zeigt sich, dass die Härte mit sinkender MFR abnimmt, d. h. hochviskose Typen lassen niedrigere Härtewerte erkennen als niedrigviskose. Auch dieser Effekt ist je nach geometrischem System unterschiedlich ausgeprägt (Vergleich Abbildung 7 und Abbildung 8). Der R-CMA zeigt wiederum keinen eindeutigen Einfluss sondern verhält sich bei Ober- und Unterprobe gegensätzlich, was potentiell auf die unterschiedlichen geometrischen Gegebenheiten zurückzuführen ist.

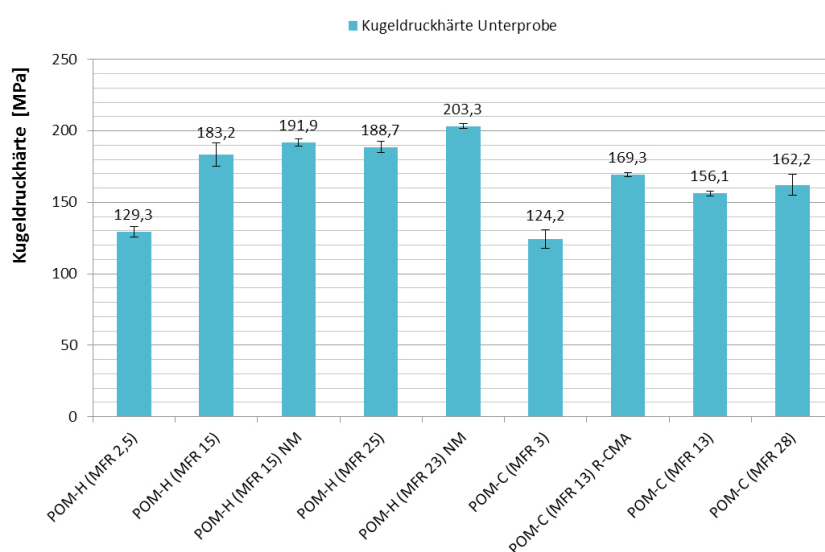


Abbildung 7: Kugeleindruckhärte der Unterproben (Tribologischer Grundkörper) von Polyoxymethylenen

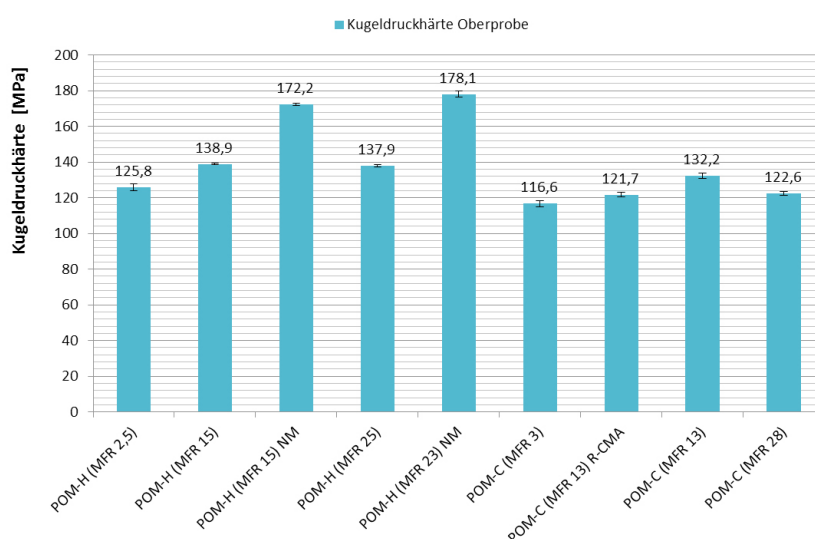


Abbildung 8: Kugeleindruckhärte der Oberproben (Tribologischer Gegenkörper) von Polyoxymethylenen

4 ZUSAMMENFASSUNG

Es wurden verschiedene Polyoxymethylentypen systematisch ausgewählt und einander in puncto mechanischen, tribologischen und morphologischen Gesichtspunkten gegenübergestellt. Als POM-Typen wurden sowohl Homopolymerisate als auch Copolymerisate betrachtet, welche jeweils in unterschiedlichen Viskositätsklassen (Melt-Flow-Rate (MFR)) und weiteren Modifikationen (z.B. Typen mit Nukleierungsmittel (NM) oder Type mit reduziertem Comonomeranteil (R-CMA)) analysiert wurden.

Im ersten Teil dieser Veröffentlichung wurden die mechanischen Kenngrößen (Zugfestigkeit, Zug-E-Modul, Kerbschlagzähigkeit und Härte) der POM Typen ausgeführt. Gerade bei Typen mit NM wurden bessere mechanische Kenngrößen ermittelt. Eine Type mit R-CMA hat dagegen keine eindeutigen Verbesserungen aufgezeigt. Die unterschiedlichen Viskositäten (MFR) haben keine Differenzierung der Zugfestigkeit und des Zug-E-Modul in deren Abhängigkeit zugelassen. Allerdings wurden deutliche Unterschiede bei Kerbschlagzähigkeit und Härte aufgezeichnet. Es hat sich bei den Untersuchungen herausgestellt, dass eine Härteanalyse in Form einer Härtepunktmatrix von sehr zentraler Wichtigkeit ist, gerade auch für Weiterführende tribologische Untersuchungen, um sinnvolle und repräsentative Prüfbereiche auf den Probekörpern festzulegen. Des Weiteren wurde aufgezeigt, dass Härteanalysen bei geometrisch differenten Systemen sehr unterschiedlich ausfallen können, die Tendenzen jedoch durchaus vergleichbar sind.

In den nächsten Teilen der Veröffentlichung sollen die Ergebnisse von morphologischen und tribologischen Untersuchungen dargestellt und anhand der kunststofftechnischen Grundlagen ergründet werden.

REFERENZEN

- [Czy13] Czyborra L.: Fachseminar - Tribologische Eigenschaften von thermoplastischen Kunststoffen: Süddeutsches Kunststoff-Zentrum (SKZ), Würzburg, 2013.
- [Disch02] Disch S.; Szneczana J.; Nenad K.: Polyoxymethylen (POM): Kunststoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung (S. 86 - 93). Carl Hanser Verlag, München, 10/2002.
- [DIN 2039] DIN EN ISO 2039-1: Kunststoffe - Bestimmung der Härte - Kugleindruckversuch: Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe Juni 2003.
- [DIN 3167] DIN EN ISO 3167: Kunststoffe - Vielzweckprobekörper: Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe Dezember 2003.
- [Ehr11] Ehrenstein Gottfried W.: Polymer Werkstoffe - Struktur, Eigenschaften, Anwendung: Carl Hanser Verlag, München, 3. Auflage, 2011.
- [Fau10] Faust Karsten: Neue polymere Werkstoffkonzepte für Fördergleitketten und Systemanalyse der Korrelation von Reibungskoeffizienten: Dissertation, TU Chemnitz, 2010.
- [For07] Forschler B.; Geiser Ch. Polyoxymethylen (POM): Kunststoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung (S. 112 - 114). Carl Hanser Verlag, München, 10/2007.
- [Hel10] Hellerich W.; Harsch G.; Baur E.: Werkstoff-Führer Kunststoffe: Carl Hanser Verlag, München, 10. Auflage, 2010.
- [Ill13] Illek R., Kellner S., Faust K.: Kombination von Produktentwicklung, Kunststofftechnik und Tribologie für neue Werkstoffkonzepte in fördertechnischen Anwendungen: FHWS Science Journal, Jahrgang 1 - Ausgabe 2, Scheinfurt - Würzburg, 2013.
- [Kai11] Kaiser Wolfgang: Kunststoffchemie für Ingenieure: Carl Hanser Verlag, München, 3. Auflage, 2011.
- [Kern14] Kern: KERN RIWETA Material Selector 4.0: Werkstoffdatenbank für Kunststoffe, www.kern.de, 2014.
- [Kirn13] Kirner H.-H.; Palakaya F.: Polyoxymethylen (POM): Kunststoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung (S. 86 - 94). Carl Hanser Verlag, München, 10/2013.
- [Kut05] Kutta S.: Polyoxymethylen (Polyacetale, POM): Kunststoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung (S. 101 - 106). Carl Hanser Verlag, München, 10/2005.
- [Gee06] Geerißen H.: Skript Kunststoffchemie - Einführung in die Allgemeine und organische Chemie: Hochschule Darmstadt, 11. Auflage, 2006.
- [Gna91] Gnauck B.; Fründt P.: Einstieg in die Kunststoffchemie: Carl Hanser Verlag, München, 3. Auflage, 1991.
- [Raa13] Raab Peter: POM ein überraschend vielseitiger Werkstoff: Vortrag und Präsentation, Fachkolloquium Kunststoff-Gleitketten und Tribologie, TU Chemnitz, 2013.

[Rasch12] Rasch Frank: Reibungsminderung an Stütz- und Führungselementen für Kunststoffketten. Dissertation, TU Chemnitz, 2012.

[Rös05] Rösler Jan: Zur Tragfähigkeitssteigerung thermoplastischer Zahnräder mit Füllstoffen: Dissertation, TU Berlin, 2005.

[Sae13] Saechtling: Kunststoff Taschenbuch: Carl Hanser Verlag, München, 31. Auflage, 2013.

[Sed08] Sedler F.: Polyoxymethylen (Polyacetale, POM): Kunststoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung (S. 160 - 165). Carl Hanser Verlag, München, 10/2008.

[Vaa11] Vaahs Tilo: Polyoxymethylen (POM): Kunststoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung (S. 64 - 68). Carl Hanser Verlag, München, 10/2011.

[Vaa10] Vaahs Tilo; Smeets D.: Polyoxymethylen (POM): Kunststoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung (S. 124 - 127). Carl Hanser Verlag, München, 10/2010.

[Wit14] Witan K.: Fachbereich Maschinenbau und Kunststofftechnik, Hochschule Darmstadt, Gesprächs- und Emailnotizen vom Juni 2014.

