
Mechanische Eigenschaften von Polyoxymethylen (POM) aus recycelten Post-Consumer-Abfällen

Jan Finke^{1*}, Jens Sumpf¹, Niels Dallinger¹, Markus Golder¹

¹ TU Chemnitz, Institut für Fördertechnik und Kunststoffe, Professur Förder- und Materialflusstechnik, 09126 Chemnitz, Deutschland

* Correspondence: jan.finke@mb.tu-chemnitz.de

Received 09 December 2024; Accepted 13 December 2024; Available online December 2024

© 2024 by J. Finke and the other authors. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. The INNOTRAC logo and third-party content are excluded from this.

KURZFASSUNG

Als Werkstoff für Kunststoffketten in Stetigförderern wird sehr häufig Polyoxymethylen (POM) eingesetzt. Nach der Nutzung im Fördersystem werden die Ketten derzeit im Restmüll entsorgt. Um einen geschlossenen Materialkreislauf entstehen zu lassen, sollen diese zukünftig nach ihrer industriellen Anwendung recycelt werden und als Ausgangsmaterial für neue Kunststoffförderketten dienen. In Vorgängerprojekten konnte bereits die prinzipielle Eignung des Recyclingmaterials für die Herstellung neuer Ketten nachgewiesen werden [1] [2]. Zielstellung eines aktuellen Projektes ist die Überführung der Recyclingketten vom Prototypenstatus in ein marktreifes Produkt. Im Beitrag wird insbesondere auf die mechanischen und tribologischen Eigenschaften der Kettenwerkstoffe aus recyceltem Material im Vergleich zu Standardketten aus neuem Granulat eingegangen. Es wird aufgezeigt, dass sowohl mechanisch als auch tribologisch nur sehr geringfügige Unterschiede bestehen, welche für den industriellen Einsatz der Ketten aus Recyclingmaterial keinen Einfluss besitzen.

SCHLAGWORTE Kunststoffrecycling, POM, Closed-Loop-Recycling, Post-Consumer-Abfälle, Stetigförderer, Kunststoffketten

1. Einleitung

Der thermoplastische Kunststoff Polyoxymethylen (POM) wird sehr häufig als Material für Kunststoffketten in Stetigförderanlagen eingesetzt. Eine Wiederverwendung dieses Kunststoffes findet aktuell lediglich auf Basis von Pre-Consumer-Abfällen statt. Dabei werden die beim Spritzgussprozess anfallenden Verschnitte (z. B. Angüsse, Ausschussteile oder Ähnliches) granuliert bzw. gemahlen und dem Neumaterial im folgenden Spritzgussprozess anteilig zugegeben. Im Anschluss an die Nutzungsphase werden die Förderketten bislang im Restmüll entsorgt. Ein geschlossener Materialkreislauf (siehe Abbildung 1) von Post-Consumer-Abfällen ist gegenwärtig nicht Stand der Technik.

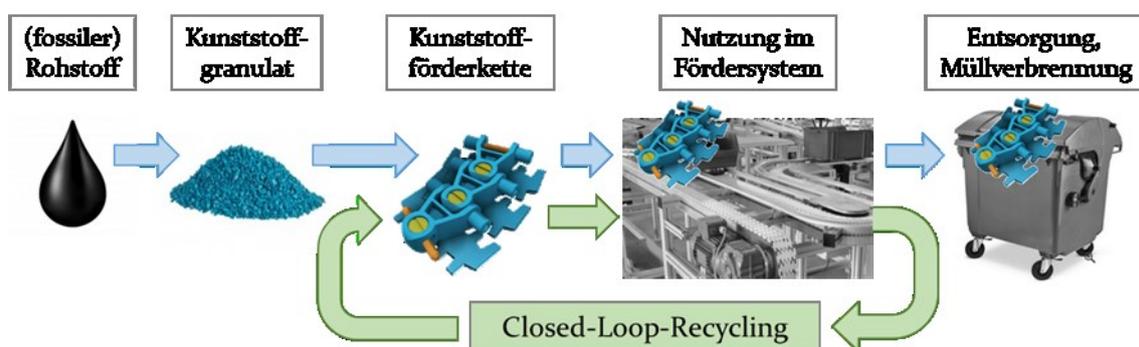


Abbildung 1: Klassischer Lebenszyklus von Kunststoffketten (blau) sowie durch Recycling geschlossener Materialkreislauf (grün) [1]

In vorangegangenen Untersuchungen konnte bereits die prinzipielle Eignung von Post-Consumer-Abfällen als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Kunststoffförderketten nachgewiesen werden. [1] [2] Ob sich diese Rezyklatketten auch für den industriellen Einsatz eignen, ist die Fragestellung eines aktuellen Forschungsprojektes. Im Gegensatz zu den Vorgängerprojekten werden deshalb:

- vermehrt die im Einsatz auftretenden Belastungen fokussiert und
- Mischungen untersucht, die sich am Bestand von Gebrauchtketten bzw. Regranulat beim Hersteller richten.

Da nicht immer vom Vorhandensein von Gebrauchtketten bzw. Regranulat in ausreichender Menge ausgegangen werden kann, wird im Beitrag ebenfalls eine Mischung aus Rezyklatmaterial und neuem Granulat untersucht.

2. Probekörper und Versuchsdurchführung

2.1. Untersuchte Werkstoffe

Zunächst wurde an verschiedenen Förderketten / Granulaten eine dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) durchgeführt, um die vorhandenen Polyacetale näher zu klassifizieren. Tabelle 1 gibt hierzu eine Übersicht. Tabelle 2 zeigt die Zusammensetzung der Varianten, aus denen die Probekörper sowie Kettenglieder für

die mechanischen und tribologischen Untersuchungen gefertigt wurden. Da von der gebrauchten Förderkette 2 nur wenig Material zur Verfügung stand, wurden von Variante VI lediglich Probekörper, jedoch keine Kettenglieder gefertigt.

Tabelle 1: Übersicht zu den verwendeten Förderketten / Granulaten

Nr.	Kette / Granulat	Werkstoff lt. DSC
1	Gelaufene Kette aus Delrin® 500MP, PTFE-Additiv, 6 Jahre Laufzeit in der Pharmaindustrie	POM-H
2	Gelaufene Kette aus nicht bekanntem Material, 12 Jahre Laufzeit in der Papierindustrie	POM-C
3	Neues Granulat aus Delrin® 500MP, PTFE-Additiv	POM-H
4	Neues Granulat aus Delrin® FGI00TL, PTFE-Additiv	POM-H
5	Gelaufene Kette aus Delrin® 500MP, PTFE-Additiv, 1 Jahr Laufzeit in der Automobilindustrie	POM-H

Tabelle 2: Zusammensetzung der Varianten für die Fertigung von Probekörpern und Ketten

Nr.	Kette / Granulat	Varianten			
		V1	V2	V3	V4
1	POM-H, gelaufene Kette	50%	50%		25%
2	POM-C, gelaufene Kette	50%			
3	POM-H, neues Granulat			100%	25%
4	POM-H, neues Granulat				25%
5	POM-H, gelaufene Kette		50%		25%
Farbe	Lindgrün	2%	2%		2%
	Fertigung Probekörper	X	X	X	X
	Fertigung Kettenglieder		X	X	X

2.2. Prüfung der mechanischen Materialeigenschaften

Modellversuche

Folgende Versuche wurden an Probekörpern aus den in Pkt. 2.1 beschriebenen Varianten durchgeführt:

- Zugversuch nach DIN EN ISO 527 mit Schulterstab 1A, Prüfgeschwindigkeit 20 mm/min (für E-Modul Ermittlung 1 mm/min)
- Charpy-Schlagzähigkeitsversuch nach DIN EN ISO 179-2 an ungekerbten Proben, Querschnitt 4 x 10 mm, Arbeitsvermögen des Hammers 25 J
- Kraftgeregeltes Hysteresisverfahren im Zugschwellbereich in Anlehnung an R. Renz [3]

Bei letzterem handelt es sich um ein dynamisches Verfahren, mit dem sich innerhalb einer kurzen Versuchsdauer Schädigungen (z. B. in Form von Mikrorissen) feststellen lassen. Dazu werden die Schulterstäbe einer zyklischen Schwingbeanspruchung im Zugschwellbereich (ähnlich der Belastung der Kette im Förderer) ausgesetzt. Da die Prüfkraft innerhalb des Versuchs gesteigert wird, spricht man auch von einem zyklischen Laststeigerungsversuch. Zum Ende jeder Stufe werden Hysteresemessungen durchgeführt und aus diesen Verformungs-, Steifigkeits-, und Dämpfungsverläufe über

den Laststufen ermittelt. Der Schädigungsbeginn geht dabei mit einer Änderung der Kennwerte über den Laststufen einher. Somit lässt sich das Verhalten der Materialvarianten unter einer dynamischen Belastung vergleichen.

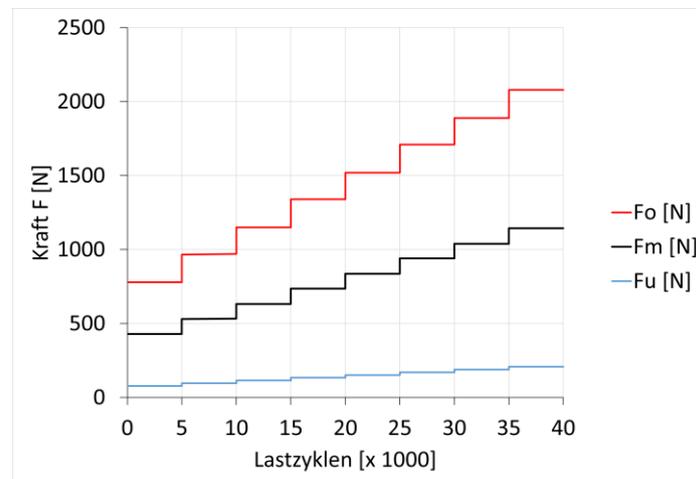


Abbildung 2: Kraftverlauf über den Lastzyklen im Laststeigerungsversuch (F_o – Oberkraft, F_m – Mittelkraft, F_u – Unterkraft)

Die Prüfkraft wurde beginnend mit 30% der in den Zugversuchen ermittelten Maximalkraft (entspricht ca. 2600 N der Varianten V2 bis V4) in 8 Stufen auf 80% der Maximalkraft gesteigert. Für jede Laststufe wurde eine Schwingspielzahl von 5000 bei einer Frequenz von 3 Hz definiert. Das Verhältnis von Unter- zu Oberkraft betrug $R = 0,1$. Abbildung 2 gibt den Verlauf der Prüfkraft über den Lastzyklen im Laststeigerungsversuch wieder.

Bauteilversuche

Bei den Versuchen an den in Abschnitt 2.1 beschriebenen Varianten der Kettenabschnitte stand die Untersuchung der Veränderung typischer Kennwerte durch die im Einsatz auftretenden Belastungen im Fokus.



Abbildung 3: Versuchsaufbau zum Zugversuch an Kettenabschnitten

Zu diesem Zweck wurden zunächst Zugversuche an einem Teil der gefertigten Kettenabschnitte in Anlehnung an DIN EN ISO 527 durchgeführt. Der dabei gewählte Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 dargestellt. Pro Einzelversuch wurden jeweils fünf Kettenglieder zu einem Kettenabschnitt montiert. An der oberen Einspannung wurde der Polyamid-Gelenkpin durch eine Stahlvariante ersetzt, um Brüchen an dieser Stelle entgegenzuwirken. Die Durchführung der Versuche erfolgte bei 23°C und 50% rel. Luftfeuchte. Die Proben wurden mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min gezogen, wobei der Traversenweg ab einer Kraft von 50 N erfasst wurde. Je Materialvariante wurden zehn Einzelmessungen durchgeführt.

Für den Vergleich der Kettenvarianten unter Zugbelastung wurden sowohl die Maximal- bzw. Bruchkraft F_{max} (siehe Abbildung 4a) als auch die Steifigkeit der Kette im Arbeitsbereich $c_{300/500}$ (Abbildung 4b) ermittelt. Als Stützstellen zur Berechnung der Steifigkeit wurden die jeweiligen Dehnungen ε_{300} und ε_{500} bei einer Zugkraft von $F = 300\text{ N}$ bzw. 500 N herangezogen. Die anschließende Berechnung erfolgte nach Gleichung (1).

$$c_{300/500} = \frac{\Delta F}{\Delta \varepsilon} = \frac{500\text{ N} - 300\text{ N}}{\varepsilon_{500} - \varepsilon_{300}} \quad (1)$$

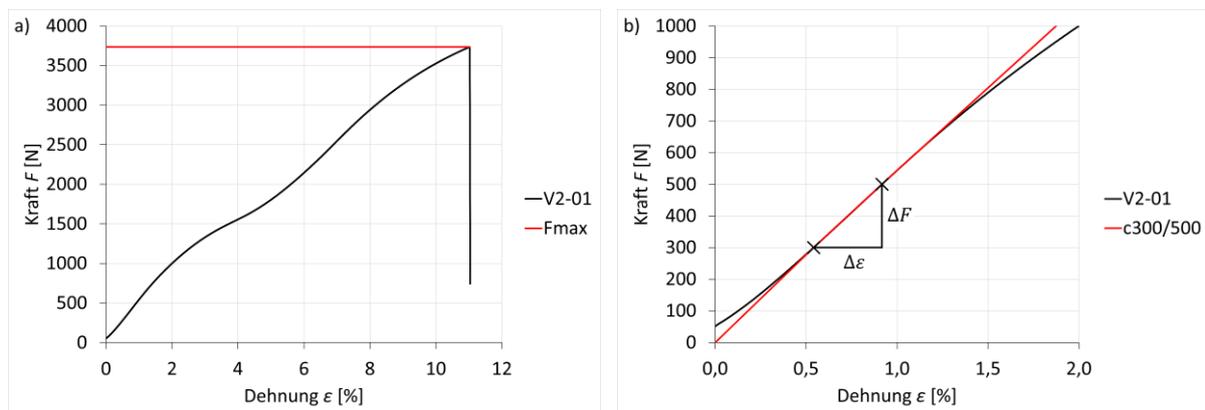


Abbildung 4: Auswertung Kettenzugversuch a) Kraft-Dehnungs-Diagramm der Probe V2-01 und b) Arbeitsbereich der Kette zur Erläuterung der Ermittlung der Steifigkeit

Um die Belastungen im realen Einsatz zu simulieren, wurden die übrigen Kettenabschnitte zu einer Gesamtkette montiert und in einem Versuchsförderer einem Langzeitversuch unterzogen (siehe Abbildung 5). Der Lasteintrag erfolgte durch eine Magnetpulverbremse an der Umlenkung. Geregelt wurde diese durch eine Kraftmessdose (KMD), welche gleichzeitig die Drehmomentstütze der Antriebseinheit darstellt. Mit Hilfe der Steuerung konnte so eine nahezu konstante Kettenzugkraft am Antrieb eingestellt werden. Die eingestellte Fördergeschwindigkeit betrug $v = 0,5\text{ m/s}$ bei einer Kettenzugkraft am Antrieb von $F = 500\text{ N}$. Im Anschluss wurden erneut Zugversuche an den gelaufenen Kettenabschnitten mit den oben beschriebenen Parametern durchgeführt.

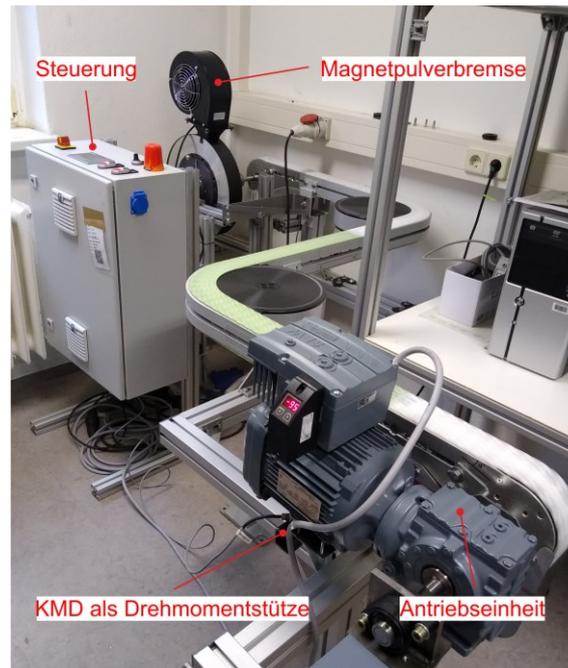


Abbildung 5: Versuchsförderer für Langzeitversuche

2.3. Prüfung der tribologischen Eigenschaften

Modellversuche

Bei der Untersuchung der tribologischen Eigenschaften wurden Proben aus den verschiedenen POM-Materialvarianten mit einer Normalkraft beaufschlagt und auf einer Länge von 100 mm oszillierend über eine ruhende Unterprobe bewegt. Diese befindet sich auf einem reibungsfrei gelagerten Messtisch, welcher durch zwei senkrecht angeordnete Federbleche mit dem Gestell verbunden ist. Die aus der Bewegung resultierende Reibkraft führt zur Auslenkung des Messtisches, wobei sich die über einen Wegsensor erfasste Tischbewegung proportional zur Reibkraft verhält. Mithilfe der eingestellten Normalkraft kann damit der Reibwert bestimmt und über einen langen Zeitraum aufgezeichnet werden. Zusätzlich wird über Pyrometer die Kontaktflächentemperatur an der Oberprobe erfasst und aufgezeichnet.

Bei den tribologischen Untersuchungen wurden zunächst Modellversuche durchgeführt. Dabei wurden die POM-Oberproben mit einer Grundfläche von 10 x 15 mm aus Zugstäben geschnitten, die Oberfläche plangeschliffen und mit 500er Schleifpapier geglättet (Abbildung 6a und b). Als Unterproben fungierten Gleitstreifen 25 x 180 mm

- aus unmodifiziertem PE-UHMW (Röchling, Polystone M natur) mit gefräster Oberfläche (Abbildung 6d) sowie
- aus Edelstahl 1.4310, Rauheit $R_z = 1,4 \mu\text{m}$ bzw. $R_a = 0,19 \mu\text{m}$ (Abbildung 6e).

Beides sind gängige Gleitschienenwerkstoffe für verschiedene Anwendungen in der Kettenfördertechnik.

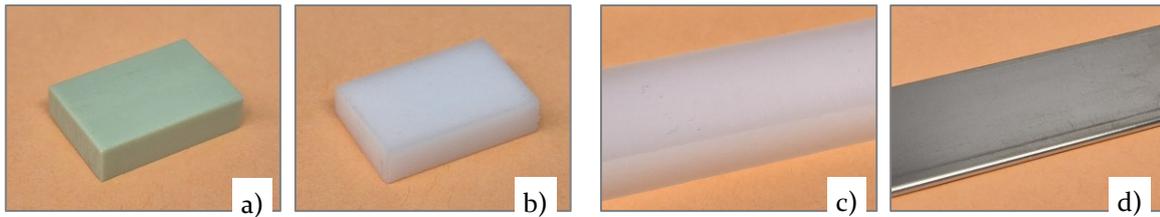


Abbildung 6: Probestkörper für die Modellversuche; Oberproben a) V1, V2 und V4 mit grünem Farbbatch, b) V3 ohne Farbbatch sowie Unterproben aus c) PE-UHMW und d) Edelstahl 1.4310

Es wurden mehrere Testläufe mit einer mittleren Geschwindigkeit von $v = 0,25 \text{ m/s}$ und einer nominellen Flächenpressung von $p = 0,10 \text{ N/mm}^2$ über eine Versuchsdauer von 24 h durchgeführt. Während der Versuche wurden die Reibwerte regelmäßig aller 30 Sekunden aufgezeichnet und für die vergleichende Auswertung jeweils die Mittelwerte der letzten beiden Versuchsstunden herangezogen.

Für die Verschleißbewertung wurden die POM-Oberproben jeweils direkt vor und nach dem Versuch auf einer Feinwaage gewogen und damit der Masseverlust der Proben bestimmt. Zudem wurden nach den Versuchen die Abriebpartikel gewogen und damit ein möglicher Verschleiß der Unterprobe mit berücksichtigt. Zudem wurden die Proben visuell nach Schädigungserscheinungen wie Abrasion oder Anzeichen thermischer Zerstörung beurteilt.

Bauteilversuche

Im zweiten Schritt erfolgten die Messungen praxisnah mit gespritzten Kettengliedern aus den POM-Varianten V2, V3 und V4, welche oszillatorisch 100 mm über den Ausschnitt eines realen Förderprofils bewegt wurden (Abbildung 7).

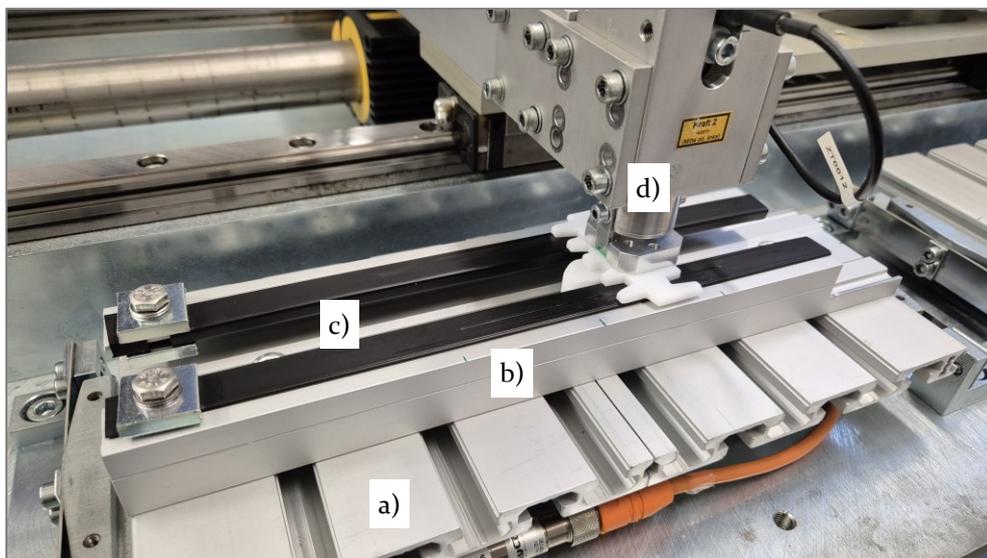


Abbildung 7: Versuchsaufbau der tribologischen Bauteilversuche; a) Messtisch, b) beschnittenes Aluminium-Führungsprofil eines Kettenförderers, c) Gleitprofile aus Kunststoff (hier PE-HD), d) bewegte Probenaufnahme mit individuellem Kettenglied (Oberprobe)

Die Aluminiumbasis wurde dabei bestückt mit extrudierten Gleitleisten aus

- antistatisch ausgerüstetem PE-HD (schwarz), (Abbildung 8b) sowie
- gleitmodifiziertem PE-UHMW (weiß) (Abbildung 8c).

Als Normalkraft wurde jeweils eine praxisrelevante Belastung von $F_N = 20\text{ N}$ aufgebracht. Bei Abschätzung der Kontaktfläche zwischen Kettentrageplatte und Gleitschienen entspricht diese Kraft einer Flächenpressung von ca. $0,1\text{ MPa}$, also einer vergleichbaren Beanspruchung wie bei den Modellversuchen. Verschleißerscheinungen, wie Abriebpartikel, Kratzer oder ggf. thermische Schäden, wurden visuell beurteilt.



Abbildung 8: Probekörper für die Bauteilversuche; a) Oberprobe Kettenglied, b) Gleitprofil aus antistatischem PE-HD, c) Profil aus gleitmodifiziertem PE-UHMW

3. Ergebnisse

3.1. Mechanische Eigenschaften

Modellversuche

Zugversuch

Zum Vergleich der Varianten sind in Abbildung 9 der E-Modul E sowie die Zugfestigkeit σ_m als Boxplot-Diagramm dargestellt. Des Weiteren enthält Tabelle 3 eine Übersicht zu den Mittelwerten MW , der Standardabweichung s sowie des Variationskoeffizienten V der in den Diagrammen dargestellten mechanischen Eigenschaften.

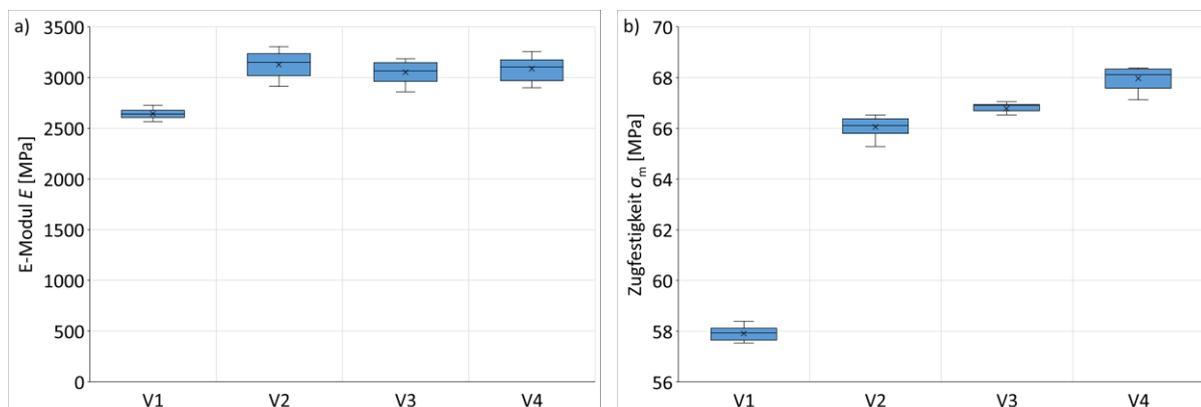


Abbildung 9: Ausgewählte Ergebnisse des Zugversuchs an Schulterstäben als Boxplot-Diagramm, a) E-Modul E und b) Zugfestigkeit σ_m

Prinzipiell ist in den beiden Diagrammen die gleiche Tendenz zu erkennen. Die Variante V1, welche zu 50% aus POM-C besteht, weist gegenüber den anderen Varianten geringere mechanische Kennwerte auf. Bezogen auf den E-Modul lässt sich aufgrund der Streuung der Einzelversuche kein Unterschied zwischen den Varianten mit (V2 und V4) und ohne (V3) Anteilen von gebrauchten Ketten erkennen. Bezogen auf die Zugfestigkeit fallen die Unterschiede zwischen V2 bis V4 aufgrund der geringeren Streuungen größer aus, generell liegen die ermittelten Kennwerte jedoch auf einem ähnlichen Niveau, währenddessen bei Variante V1 ein deutlicher Abfall zu erkennen ist.

Tabelle 3: Übersicht der Ergebnisse des Zugversuchs an Schulterstäben (MW – Mittelwert, s – Standardabweichung, V – Variationskoeffizient)

Variante	E [MPa]			σ_m [MPa]		
	MW	s	V [%]	MW	s	V [%]
V1	2643,4	48,18	1,82	57,9	0,29	0,50
V2	3128,2	122,68	3,92	66,1	0,37	0,56
V3	3052,3	111,47	3,65	66,8	0,32	0,48
V4	3087,2	112,33	3,64	68,0	0,45	0,67

Schlagprüfung

In Abbildung 10 ist die ermittelte Schlagzähigkeit a_K als Boxplot-Diagramm vergleichend dargestellt. Des Weiteren enthält Tabelle 4 eine Übersicht zum Mittelwert, der Standardabweichung sowie des Variationskoeffizienten der geprüften Varianten.

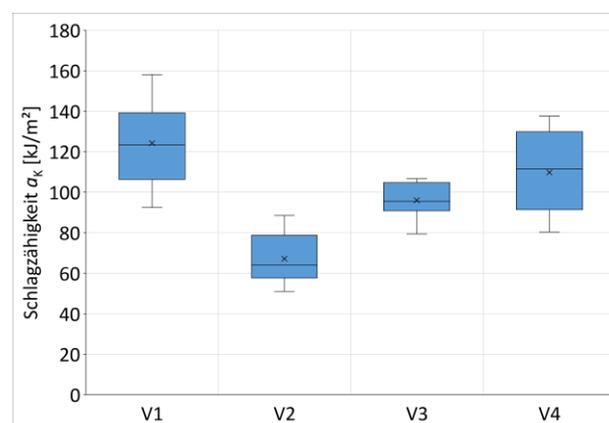


Abbildung 10: Schlagzähigkeit a_K der Varianten V1 bis V4 als Boxplot-Diagramm

Tabelle 4: Ergebnisse der Schlagprüfung (MW – Mittelwert, s – Standardabweichung, V – Variationskoeffizient)

Variante	a_K [kJ/m²]		
	MW	s	V [%]
V1	124,3	21,85	17,59
V2	67,2	12,88	19,17
V3	96,0	8,85	9,21
V4	109,8	19,79	18,03

Die Variationskoeffizienten liegen in einem Bereich von 9,21% bis 19,17% (vgl. Tabelle 4). Aufgrund dieser großen Streuung lassen sich nur sehr schwer Unterschiede zwischen den Varianten detektieren. Betrachtet man nur die Mittelwerte, so wird deutlich, dass Variante V1 mit $124,3 \text{ kJ/m}^2$ eine fast doppelt so hohe Schlagzähigkeit besitzt wie Variante V2 mit $67,2 \text{ kJ/m}^2$. Der Unterschied im Mittelwert der Varianten V3 und V4 beträgt zwar $13,8 \text{ kJ/m}^2$, aufgrund der großen Streuung der Einzelmesswerte bei Variante V4 wird jedoch von einem ähnlichen Absorptionsvermögen wie bei Variante V3 ausgegangen.

Kraftgeregeltes Hysteresisverfahren

Abbildung 11 zeigt die ertragbaren Schwingenspielzahlen der Varianten V1 bis V4 im Laststeigerungsversuch bis zum Bruch der Probekörper. Vergleicht man diese mit dem Kraftverlauf über den Lastzyklen aus Abbildung 2, so wird deutlich, dass alle Proben der Variante V1 in der 7. Laststufe gebrochen sind, währenddessen die Proben der Varianten V2 bis V4 in der 8. Laststufe brachen. Da die Hysteresemessungen im Anschluss an jede Laststufe durchgeführt wurden, kann eine Auswertung der relevanten Kennwerte bei Variante V1 nur bis Laststufe 6 erfolgen. Bei den Varianten V2 bis V4 erfolgte diese bis Laststufe 7 (vgl. Abbildung 12a-d). Dass die Proben der Variante V1 bei einer geringeren Last bzw. einer geringeren Schwingenspielzahl brechen als die der anderen Varianten, deckt sich mit den Ergebnissen des Zugversuchs. Hier wurde bei V1 die geringste Zugfestigkeit aller Varianten ermittelt (siehe Abbildung 9b sowie Tabelle 3).

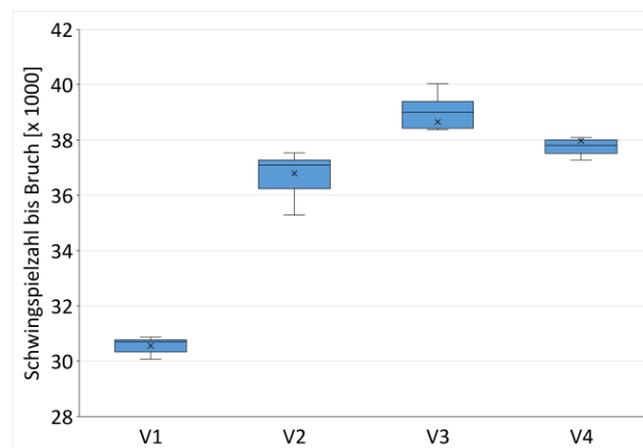


Abbildung 11: Ertragbare Schwingenspielzahlen im Laststeigerungsversuch bis zum Bruch der Probekörper

In Abbildung 12 sind die berechneten Kennwerte zu jeder Laststufe des Hysteresisverfahrens dargestellt. Variante V1 weist bei allen vier Kennwerten im Gegensatz zu den Varianten V2 bis V4 ein anderes Verhalten auf. Aus Abbildung 12a wird deutlich, dass der Umkehrpunkt beim Dämpfungsverhalten in Laststufe 2 zu liegen scheint, währenddessen dieser bei den Varianten V2 bis V4 in Laststufe 3 zu erkennen ist. Des Weiteren knickt die Kennlinie beim Übergang von Stufe 5 zu 6 sehr stark ab. Das Verhalten der Dehnung über den Laststufen ist ähnlich dem der Dämpfung (siehe Abbildung 12b). Auch hierbei knickt die Mittelwertlinie der Variante V1 beim Übergang von Stufe 5 zu 6 stark ab, währenddessen bei den Varianten V2 bis V4 eine größere Veränderung zwischen den Laststufen 6 und 7 zu verzeichnen ist. Die Steifigkeit

(Abbildung 12c) als auch der dynamische Modul (Abbildung 12d) der Varianten V2 bis V4 besitzen in den ersten drei Laststufen ein ähnliches Niveau, welches mit Laststufe 4 zu sinken beginnt. Bei Variante V1 ist dieses schon bei Laststufe 3 zu erkennen, wobei sich, in Analogie zur Dämpfung und Dehnung, die Kennwerte beim Übergang von Laststufe 5 zu 6 stark verringern. Die Unterschiede zwischen den Varianten V2 bis V4 sind über alle Kennwerte und Laststufen nur sehr geringfügig ausgeprägt. Da das Rezyklatmaterial (V2 und V4) im Vergleich zur Neuware (V3) ein sehr ähnliches Verhalten über alle Kennwerte und Laststufen aufweist, kann davon ausgegangen werden, dass bei einer dynamischen Zugschwellbelastung im Einsatz keine Unterschiede zu erwarten sind.

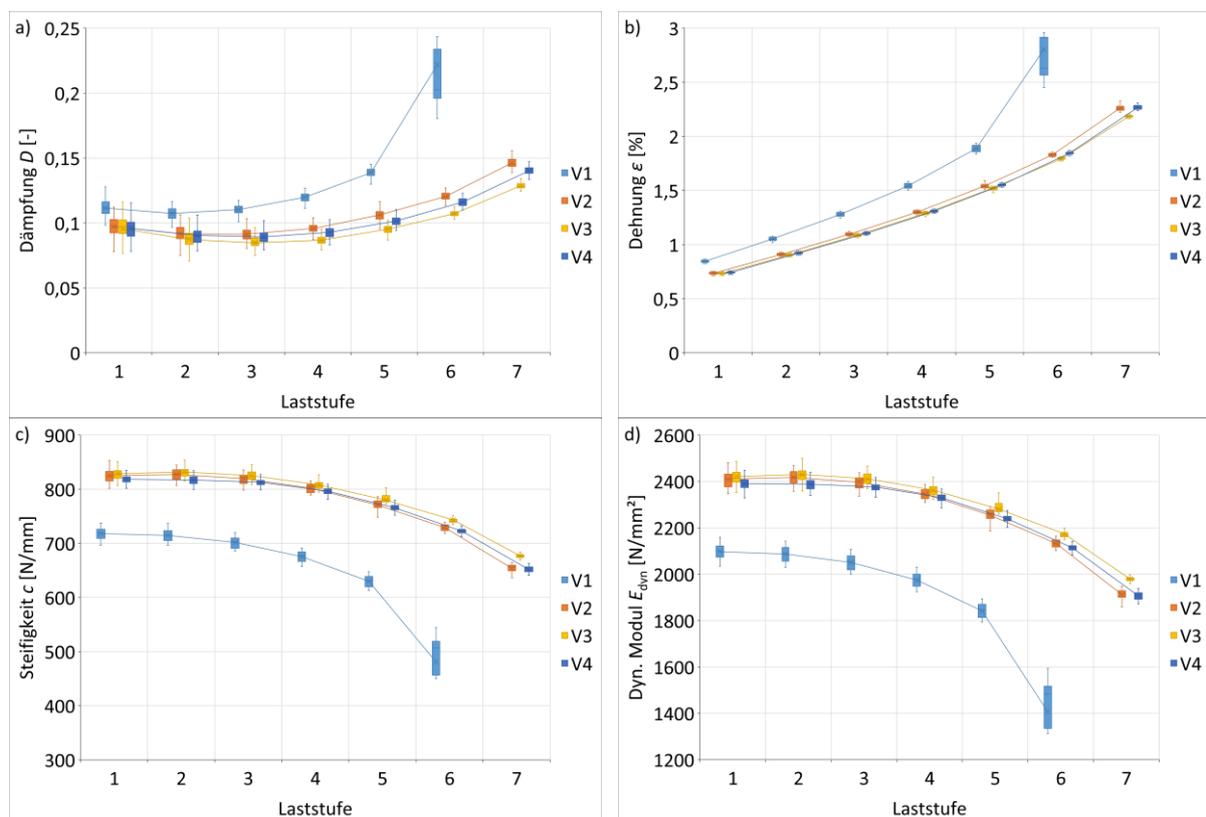


Abbildung 12: Ergebnisse der Hystereseversuche a) Dämpfung D , b) Dehnung ε , c) Steifigkeit c und d) dynamischer Modul E_{dyn}

Bauteilversuche

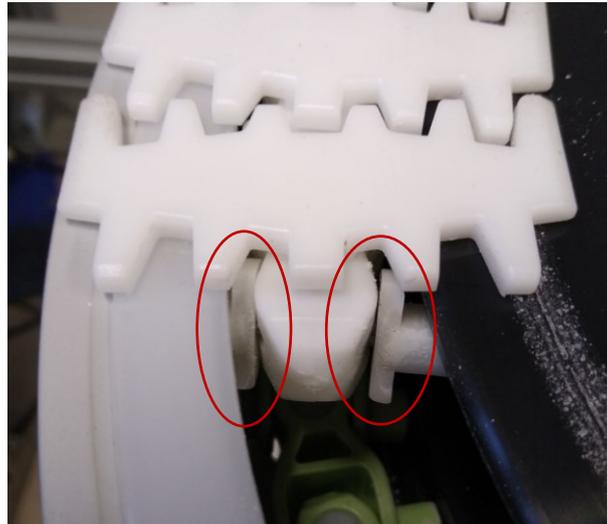


Abbildung 13: Gebrochenes Kettenglied der Variante V3 im Versuchsförderer

Nach ca. 1.430 h bzw. 433.000 Umläufen der verschiedenen Kettenabschnitte brach ein Kettenglied der Variante V3. Der Bruch ereignete sich beim Einlaufen in das Bogenrad vor der Antriebsstation im Obertrum des Förderers (siehe Abbildung 13). Gut zu erkennen sind die abgebrochenen Flügel des Kettengrundkörpers, welche über Durchgangslöcher mit dem Stahlbolzen des nächsten Kettengliedes verbunden sind.

Abbildung 14 zeigt die Veränderungen der Maximalkraft sowie der Steifigkeit, welche sich durch die Belastungen im Versuchsförderer ergeben haben. Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Tabelle 5 enthalten.

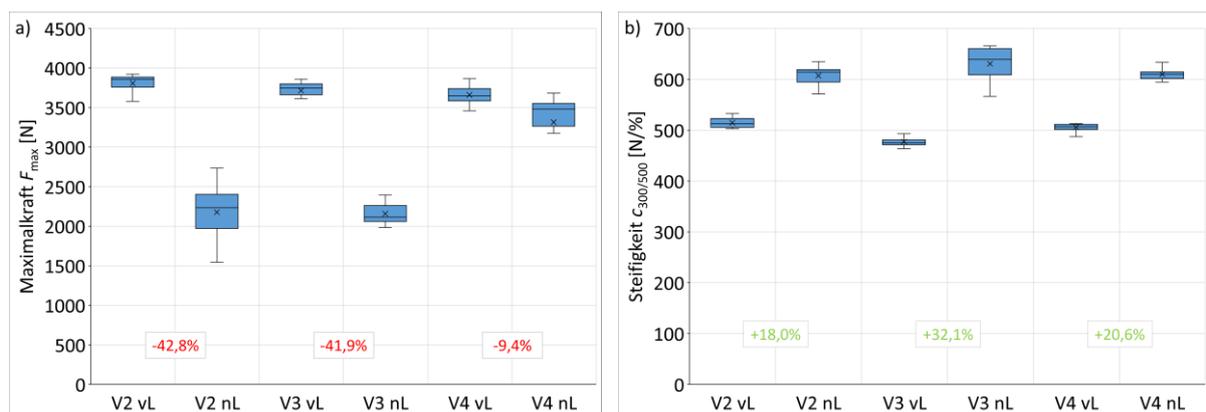


Abbildung 14: Vergleich der a) Maximalkraft F_{max} und b) der Steifigkeit $c_{300/500}$ vor (vL) und nach (nL) dem Langzeitversuch

Die nicht gelaufenen Kettenabschnitte weisen sowohl hinsichtlich ihrer Bruchkraft als auch der Steifigkeit nur sehr geringfügige Unterschiede auf. Nach dem Langzeitversuch sinkt die Bruchkraft aller Varianten ab, wobei Variante V2 und V3 eine nahezu identische prozentuale Differenz aufweisen, währenddessen diese bei Variante V4 mit minus 9,4% wesentlich geringer ausfällt. Hinsichtlich der Steifigkeit ist ein Anstieg nach dem Langzeitversuch auf ein ähnliches Niveau bei allen Varianten zu erkennen. Die

Veränderungen liegen dabei in einem Bereich von + 18,0% bis + 32,1%. Die ermittelten Differenzen beziehen sich auf die arithmetischen Mittelwerte der Einzelmessungen.

Tabelle 5: Übersicht der Ergebnisse des Zugversuchs an Kettenabschnitten (MW – Mittelwert, s – Standardabweichung, V – Variationskoeffizient)

Variante	F_{max} [N]			$c_{300/500}$ [N/%]		
	MW	s	V [%]	MW	s	V [%]
V2 vL	3807,2	117,43	3,08	514,7	10,96	2,13
V2 nL	2176,9	360,04	16,54	607,3	20,00	3,29
V3 vL	3715,5	138,50	3,73	477,5	10,16	2,13
V3 nL	2157,6	137,03	6,35	630,6	36,60	5,80
V4 vL	3661,0	128,68	3,51	505,8	13,08	2,59
V4 nL	3316,3	430,76	12,99	610,1	12,73	2,09

Abbildung 15 zeigt einen Vergleich der Bruchbilder der Ketten im Zugversuch im nicht gelaufenen Zustand (vor Langzeitversuch) sowie nach dem Langzeitversuch. Die Mehrzahl der Kettenabschnitte der Variante V3 brach, in Analogie zum Versuch im Förderer (vgl. Abbildung 13), an den Flügeln des Kettengrundkörpers, wobei keine wesentlichen Unterschiede zwischen dem nicht gelaufenen Zustand und nach dem Betrieb im Förderer erkennbar sind. Ebenso keine Unterschiede im Bruchbild vor und nach dem Langzeitversuch sind bei Variante V2 und V4 zu erkennen, wobei diese Kettenabschnitte am häufigsten an der Einfassung des Polyamid-Gelenkpins im Bereich des Kettengrundkörpers brachen.

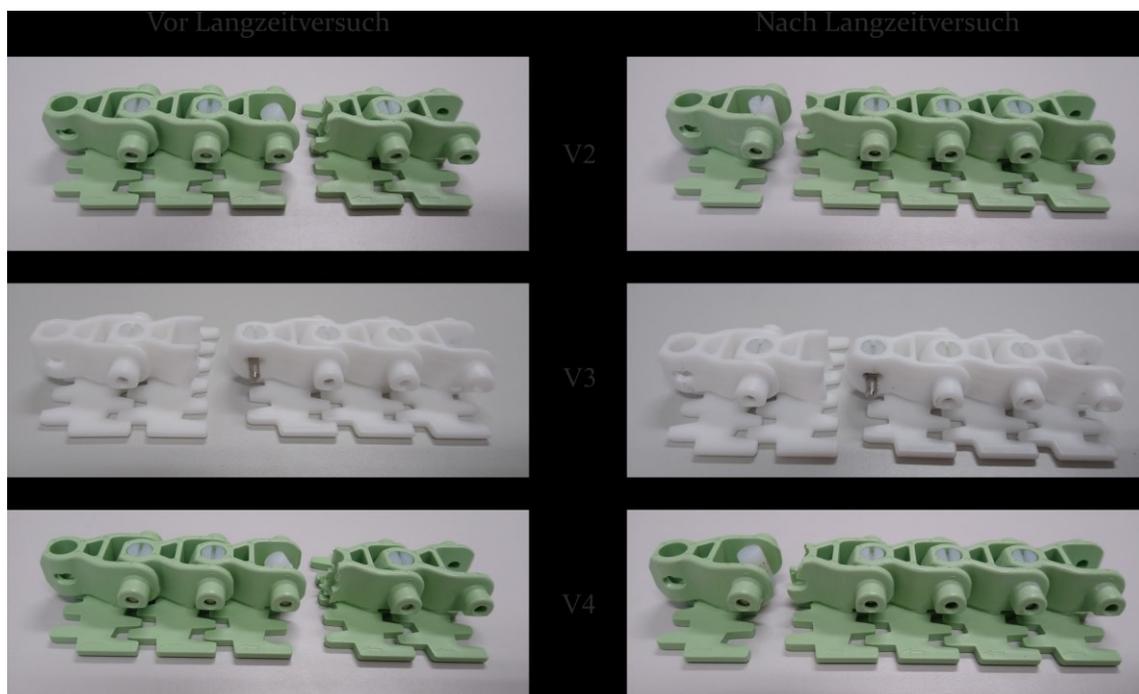


Abbildung 15: Kettenbruchbilder vor und nach dem Langzeitversuch

3.2. Tribologische Eigenschaften

Modellversuche

Die Reibwertverläufe der POM-Proben gegen Gleitschienen aus PE-UHMW und Edelstahl über 24 Stunden bzw. ca. 22 km Laufstrecke sind in Abbildung 16 dargestellt. Zunächst ist dabei festzustellen, dass sich das generelle Einlaufverhalten in Abhängigkeit vom Gleitschienenmaterial unterscheidet. Bei PE-UHMW ist, beginnend bei $\mu \approx 0,2...0,25$, ein stetiger und deutlicher Anstieg der Reibwerte zu beobachten (Abbildung 16a). Auch nach 24 Stunden Betriebsdauer ist noch kein stationärer Verlauf erkennbar, sodass davon ausgegangen werden muss, dass die bis dahin erreichten Reibwerte von $\mu \approx 0,45...0,55$ bei längerer Belastung weiter ansteigen. Im Gegensatz dazu scheint sich gegen Edelstahl wesentlich eher ein stationärer Reibwertverlauf einzustellen (Abbildung 16b). Wahrscheinlich bildet das in den untersuchten POM-Varianten enthaltene Gleitadditive PTFE einen relativ stabilen Schmierfilm, durch den sich die Reibwerte schnell auf einem Niveau von $\mu \approx 0,35...0,45$ einpegeln.

Innerhalb der untersuchten POM-Varianten sind dabei sowohl gegen PE-UHMW als auch gegen Edelstahl keine signifikanten Unterschiede zu erkennen, da sich alle Reibwertkurven in einem sehr engen Band bewegen.

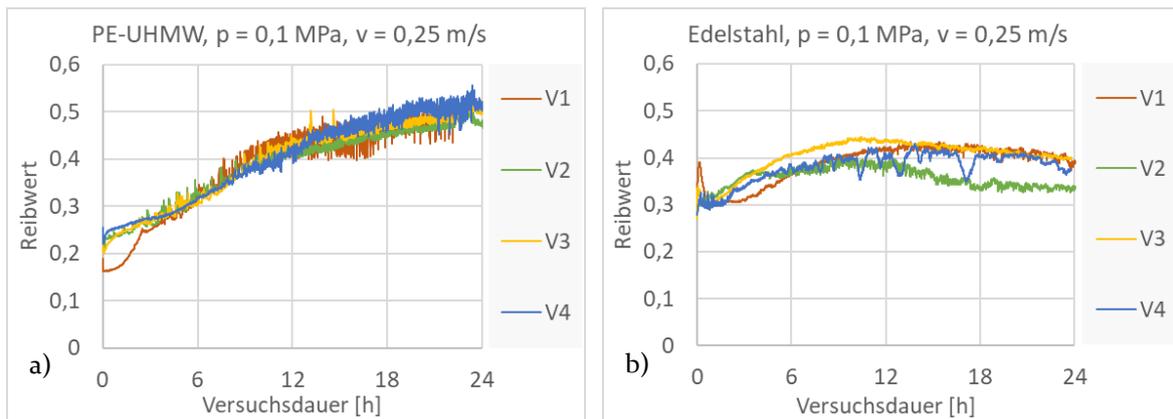


Abbildung 16: Charakteristische Reibwertverläufe der POM-Varianten a) gegen PE-UHMW und b) gegen Edelstahl über jeweils 24 h Belastungsdauer

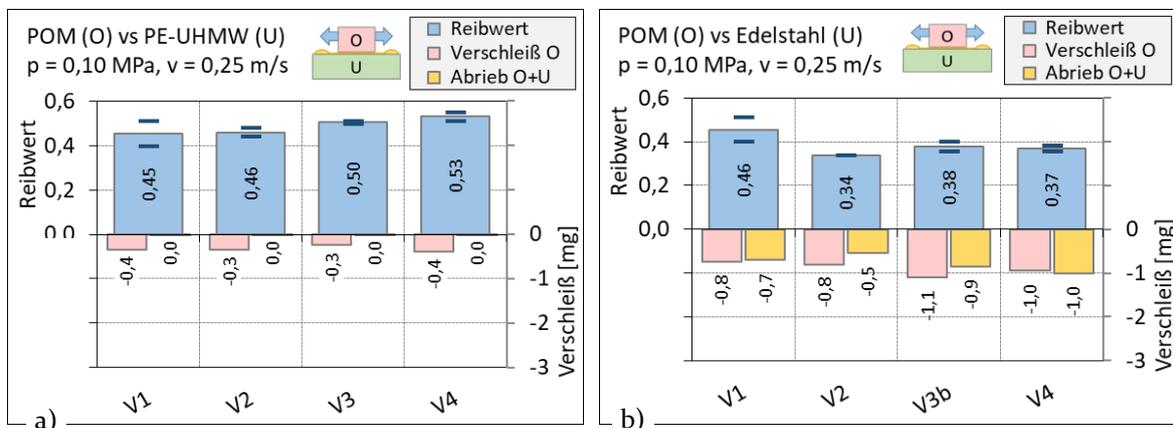


Abbildung 17: Reibwerte und Verschleiß der POM-Varianten nach 24 Stunden Versuchsdauer gegen a) PE-UHMW und b) Edelstahl (Mittelwerte aus jeweils 2-3 Versuchen)

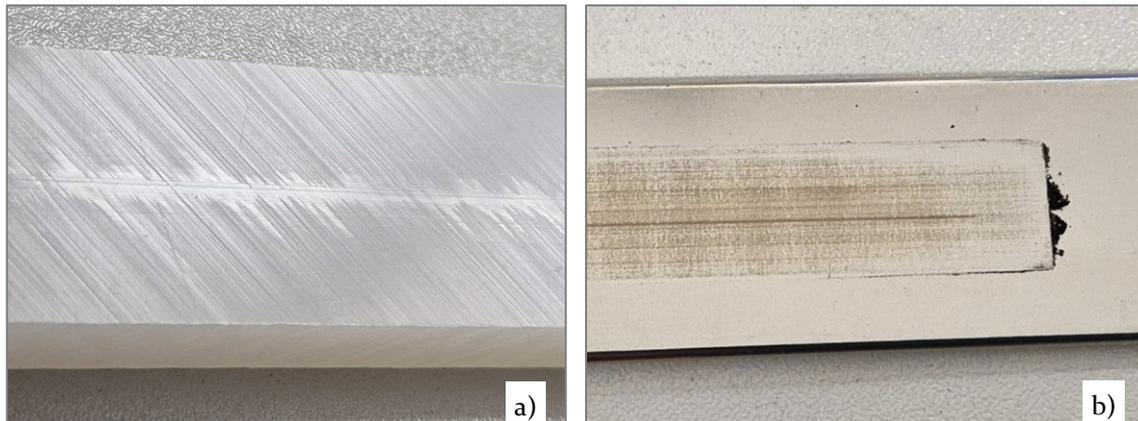


Abbildung 18: Charakteristische Oberflächen der Gleitschienen aus a) PE-UHMW und b) Edelstahl nach 24 Stunden Belastungsdauer gegen die untersuchten POM-Varianten

In Abbildung 17 sind den Reibwerten die Verschleißwerte nach 24 Stunden gegenübergestellt. Auch hier kann gezeigt werden, dass sich unter Berücksichtigung der Schwankungen innerhalb mehrerer, gleich belasteter Tests die POM-Varianten kaum voneinander unterscheiden. Die POM-Oberproben zeigten einen Gewichtsverlust von deutlich unterhalb 1 mg, Abriebpulver trat bei keinem der Versuche auf. An Ober- und Unterprobe war lediglich eine leichte Glättung der Kontaktflächen erkennbar (Abbildung 18a). Bei Edelstahl wurde dagegen abrasiver Verschleiß von ca. 1 mg gemessen, der Abrieb war an den Umkehrpunkten der oszillierenden Bewegung deutlich erkennbar, vgl. Abbildung 18b.

Bauteilversuche

In den Bauteilversuchen wurden die verfügbaren Kettenvarianten V2, V3 und V4 gegen typische Gleitschienen aus antistatischem PE-HD und gleitmodifiziertem PE-UHMW getestet. Im Hinblick auf einen möglichen Reibwertanstieg bei Belastungszeiten größer als 24 Stunden (vgl. Abbildung 16) wurde hier eine Versuchsdauer von 168 Stunden (1 Woche) gewählt.

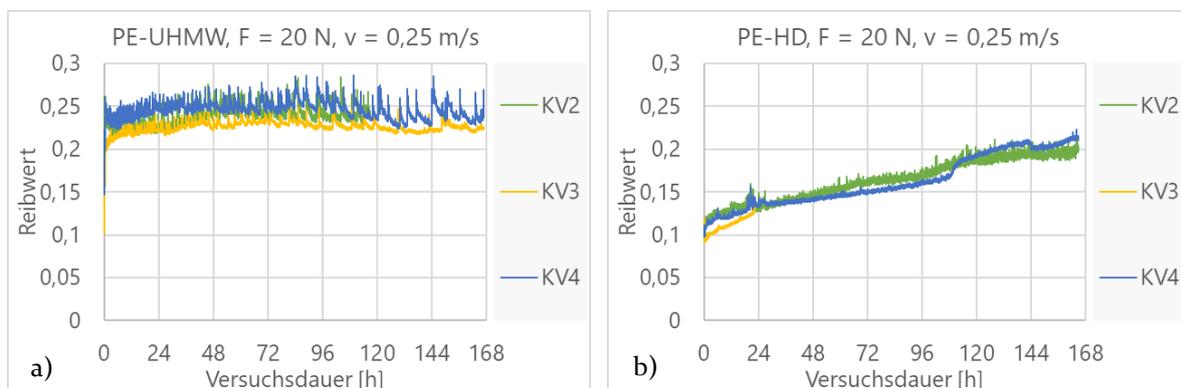


Abbildung 19: Charakteristische Reibwertverläufe der Kettenglieder aus den POM-Varianten gegen Gleitprofile aus a) PE-UHMW und b) PE-HD über jeweils 168 h Belastungsdauer (V3 vs. PE-HD nur 24 h)

Die Reibwertverläufe in Abbildung 19 verdeutlichen das grundsätzlich unterschiedliche Einlaufverhalten der Gleitprofile bei 20 N Normalbelastung. Während sich mit dem

Profil PE-UHMW sehr schnell relativ stabile Reibverhältnisse um $\mu \approx 0,25$ einstellen, erhöhen sich die Reibwerte mit PE-HD von $\mu \approx 0,1$ zu Versuchsbeginn kontinuierlich auf $\mu \approx 0,20$ am Versuchsende und steigen voraussichtlich auch nach 168 h weiter leicht an. Innerhalb der POM-Materialvarianten können auch hier keine klaren Unterschiede festgestellt werden.



Abbildung 20: Glättungsspuren am Gleitprofil aus PE-HD nach 168 h Versuchsdauer mit Kettenglied V4

Verschleiß äußerte sich grundsätzlich durch eine oberflächliche Glättung der Gleitprofile ähnlich Abbildung 20. Die Spuren zeigen, dass die Kettenglieder in der Realität entsprechend einer mehr oder weniger vorhandenen Krümmung der extrudierten Gleitprofile nur teilweise aufliegen. Die Glättung fiel bei PE-HD subjektiv etwas stärker aus als bei PE-UHMW, Abriebpartikel konnten jedoch in keinem der Versuche festgestellt werden. An den Kettengliedern wurden in der Kontaktzone keinerlei Verschleiß- oder Glättungsspuren festgestellt.

4. Zusammenfassung

4.1. Mechanische Eigenschaften

Variante V1 weist bei den Untersuchungen an Schulterstäben unterschiedliche Eigenschaften gegenüber den Varianten V2 bis V4 auf. Begründet werden kann dies durch seine Zusammensetzung. Im Gegensatz zu den Varianten V2 bis V4 besitzt V1 Anteile aus einem POM-Copolymer von 50%. Dieses verhält sich im Allgemeinen gegenüber einem POM-Homopolymer schlagzäher bei geringerer Steifigkeit und Festigkeit [4]. Bei gleicher POM-Art lassen sich keine bzw. nur sehr geringfügige Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften feststellen. Dies bedeutet auch, dass das Rezyklatmaterial (V2 und V4) im Vergleich zur Neuware (V3) ein sehr ähnliches mechanisches Verhalten aufweist und im praktischen Betrieb diesbezüglich keine Nachteile zu erwarten sind.

4.2. Tribologische Eigenschaften

In den tribologischen Untersuchungen wurde prinzipiell das den Kunststoff-Gleitpaarungen typische Einlaufverhalten mit gegenüber den Startwerten teilweise sehr stark ansteigenden Reibwerten nachgewiesen. Die Reibwerte selbst sowie die spezifischen Reibwertverläufe sind abhängig von der Materialpaarung und der aufgetragenen Belastung. Relativ stabile Reibwerte werden erst nach mindestens 24 Stunden, in anderen Fällen aber auch erst nach mehr als 168 Stunden Betriebsdauer erreicht.

Innerhalb aller untersuchten POM-Materialvarianten konnten in den Tests gegen verschiedene Gleitprofile sowohl bei den Reibwerten als auch beim Verschleiß keine klaren Unterschiede festgestellt werden. Das heißt auch, dass das Rezyklatmaterial im Vergleich zur Neuware ein sehr ähnliches tribologisches Verhalten aufweist. Analog zu den mechanischen Eigenschaften sind auch hier keine Einschränkungen im praktischen Betrieb zu erwarten.

Förderhinweis

Dieses Projekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Referenzen

- [1] Sumpf, J., Golder, M.: Closed-Loop-Recycling von Förderketten aus Kunststoff. innoTRAC Journal. 2, 1 (Dec. 2022), 1–24. DOI:<https://doi.org/10.14464/innotrac.v2i1.523>.
- [2] Sumpf, J., Golder, M.: Eignung von POM-Rezyklat aus gemischten Post-Consumer-Abfällen für technische Funktionsbauteile. Technomer 2023: 28. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren, Chemnitz, November 2023, ISBN 978-3-939382-16-4
- [3] Ehrenstein, G. W.: Hysteresis-Messverfahren das flexible Verfahren zur dynamischen Werkstoff- und Bauteilprüfung nach R. Renz. Universität Erlangen-Nürnberg, 1993, ISBN 3-9802740-4-7
- [4] N. N.: Polyoxymethylen (POM) - Das Schweizer Taschenmesser unter den Thermoplasten. Online-Artikel Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, <https://www.kunststoffe.de/a/grundlagenartikel/polyoxymethylen-pom-311432>, Abruf 22.08.2024.