

Closed-Loop-Recycling von Förderketten aus Kunststoff

Jens Sumpf^{1*}, Markus Golder¹

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

* Correspondence: jens.sumpf@mb.tu-chemnitz.de; Tel.: +49-371-531-32853

Received 30 June 2022; Accepted 30 July 2022; Available online 15 December 2022

© 2022 by J. Sumpf and M. Golder. 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

In Transport- und Verkettungsprozessen werden zunehmend Stetigförderer mit Ketten aus technischen Thermoplasten, vorzugsweise aus Polyoxymethylen (POM), eingesetzt. Verschlossene Ketten, die sich im Schnitt ca. 2-10 Jahre im industriellen Einsatz unter verschiedensten Belastungs- und Umgebungsbedingungen befinden, werden ausgetauscht und derzeit ausschließlich im Restmüll entsorgt. Im Beitrag werden die mechanischen und tribologischen Eigenschaften von homo- und copolymerem POM bei mehrfacher Verarbeitung sowie Vermischung der Materialtypen analysiert. Auf dieser Grundlage wurde ein Rezyklat aus mehrjährig in industriellen Anwendungen gelaufenen POM-Ketten hergestellt und daraus Proben und Förderketten für weitere Untersuchungen gefertigt. Es wird gezeigt, dass die wertvollen Kunststoffe durchaus erfolgreich recycelt und wieder zu neuen Bauteilen verarbeitet werden können.

In transport and linking processes, continuous conveyors with chains made of engineering thermoplastics, preferably polyoxymethylene (POM), are increasingly being used. Worn chains, which are used in industrial applications for an average of 2-10 years under a wide variety of load and environmental conditions, are replaced and currently disposed off in the residual waste. The article analyses the mechanical and tribological properties of homo- and copolymeric POM during multiple processing and blending of the material types. Based on this, a recyclate was produced from POM conveyor chains that had been used in industrial applications for several years. Samples and chains were made from this material for further investigations. It is shown that the valuable plastics can be successfully recycled and reprocessed into new components.

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

1. Einführung

Kunststoffe bilden eine relativ junge Werkstoffgruppe, die erst Mitte des 20. Jahrhunderts wirtschaftlich Bedeutung erlangte und heute aufgrund ihrer herausragenden Eigenschaften in nahezu allen Bereichen des Lebens unverzichtbar geworden ist. Trotz ihrer hohen Bedeutung werden Kunststoffe zunehmend kritisch hinterfragt. Gründe hierfür sind z. B. die Herstellung vorwiegend aus knappen fossilen Ressourcen und die dabei entstehenden CO₂-äquivalenten Emissionen sowie nachhaltige Umweltschäden durch Abfalldeponierung, Meeresverschmutzung oder Mikroplastik.

Ein wesentlicher Faktor zur Vermeidung dieser Probleme ist das werkstoffliche Recycling, bei dem thermoplastische Kunststoffabfälle vermahlen und wieder zu verarbeitungsfähigem Kunststoff aufbereitet werden. Auf diese Weise werden die Ausgangsrohstoffe zur Herstellung von Produkten nicht mehr benötigt und die Entsorgung nach der Nutzungsphase entfällt.

Trotz der aufwendigen, aber notwendigen sortenreinen Trennung und den oft auftretenden Eigenschaftsverlusten stieg die Quote für werkstoffliches Recycling in den letzten Jahren kontinuierlich an und betrug 2019 in Deutschland bereits 2,92 Mt bzw. 46,4 % der Gesamtabfallmenge¹ [1]-[3]. Gründe dafür liegen zum einen in Engpässen bei Rohstoff- und Materiallieferungen und der zunehmend effizienten Aufbereitungstechnik, was mit steigender Qualität und sinkenden Rezyklatkosten einhergeht [4]. Zum anderen erhöhen sich seit einigen Jahren das ökologische Bewusstsein der Verbraucher bzw. die ökologische Außenwirkung von Unternehmen, z. B. Sammlungsbereitschaft, Recyclingfähigkeit und Rezyklatanteil von Produkten bzw. Verpackungen usw. [12]-[16], sowie die Fülle an gesetzlichen Regelungen, z. B. Sammlungs-, Rücknahme- und Verwertungspflicht, Kennzeichnungspflicht, CO₂- bzw. Umweltsteuern, Mindest-Rezyklatanteil in Kunststoffprodukten usw. [7]-[11].

Die für das werkstoffliche Recycling erforderlichen Abfälle können unterschieden werden in industrielle Abfälle (Post-Industrial-Abfälle), die bei der Herstellung von Produkten entstehen, und Abfälle von Endverbrauchern (Post-Consumer-Abfälle), welche nach der Nutzungsdauer der Produkte anfallen. Die Verwertung von Post-Consumer-Kunststoffabfällen betrifft vorrangig den Verpackungssektor (PE, PP, PET) mit einem Abfallaufkommen von 59,1 % bzw. 3,16 Mt [1] in Deutschland 2019. Insbesondere durch Sammelkonzepte wie Grüner Punkt / Gelbe Tonne² und Pfandsystem³ lassen sich Kunststoffe so zurückführen, dass der Großteil mit vertretbarem Aufwand sortenrein getrennt, gesäubert und wiederaufbereitet werden kann [5], [6]. Die großen Abfallmengen fördern gleichzeitig die Entwicklung zuverlässiger und wirtschaftlicher Recyclingtechnologien, sodass vermehrt Verpackungen mit hohem Rezyklatanteil oder vollständig aus Rezyklat hergestellt werden [12]-[16].

¹) 6,28 Mt Kunststoffabfälle gesamt (Deutschland, 2019), 2,92 Mt werkstoffliches Recycling, 0,01 Mt rohstoffliches Recycling, 3,31 Mt energetische Verwertung, 0,04 Mt Deponierung [1]

² Recyclingquote der in gelben Tonnen und Säcken gesammelten Kunststoffe 2020: 60,6 % [5]

³ PET-Einweg-Pfandflaschen (Deutschland, 2017): Verbrauch 411.500 t, werkstoffl. Verwertung 97 % [6]

Bei technischen Kunststoffen werden vor allem industrielle Verarbeitungsabfälle, z. B. Angüsse vom Spritzguss, Schnittreste, Späne, Ausschussprodukte o. ä. werkstofflich recycelt. Die Abfälle werden oft direkt vor Ort vermahlen und dem Neumaterial wieder zugeführt. Neuerdings werden jedoch von den Recyclingunternehmen auch Sammlungen direkt bei den Verarbeitern organisiert, wobei hier die Abfälle bereits in den Unternehmen sortenrein in bereitgestellte Behälter vorsortiert werden [17].

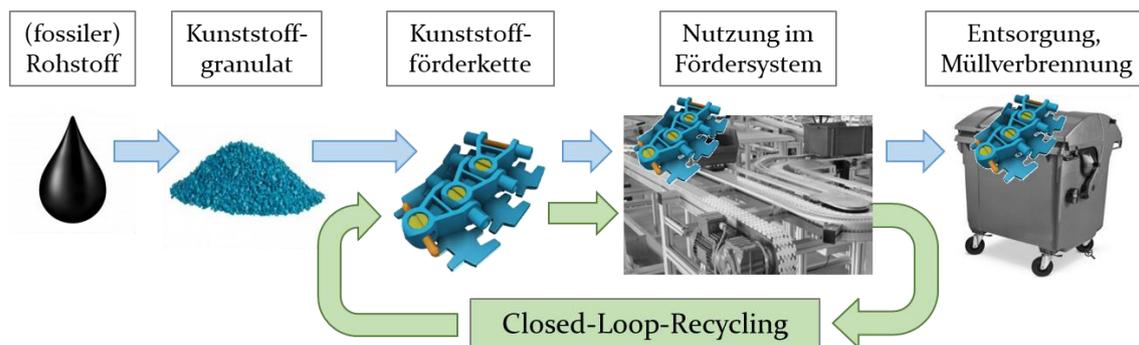


Abbildung 1: Klassischer Lebenszyklus von Kunststoffketten (blau) sowie durch Recycling geschlossener Materialkreislauf (grün)

Eine Wiederaufbereitung von hochwertigen Endverbraucherabfällen in nennenswerter Größenordnung ist nicht bekannt. Im Fall der betrachteten Kunststoffketten erbrachten Umfragen in Unternehmen, dass diese nach der Nutzungszeit ausschließlich im Restmüll entsorgt und somit nur energetisch verwertet werden. In einem gemeinsamen Forschungsprojekt der Professur Förder- und Materialflusstechnik der TU Chemnitz, dem Recyclingunternehmen Kunststoffrecycling CKT aus Bad Langensalza und dem Fördersystemhersteller Modular Automation aus Darmstadt sollte deshalb die Eignung des für Förderketten am häufigsten verwendeten Kunststoffs Polyoxymethylen (POM) zur Herstellung eines hochwertigen Rezyklats untersucht werden. Ziel war es, mehrjährig im Einsatz befindliche Förderketten aus industriellen Anwendungen zu recyceln und daraus im Sinne einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft neue Ketten herzustellen (Abbildung 1). Das Projektteam war sich dabei stets bewusst, dass die Eigenschaften des Rezyklats aufgrund von Verunreinigungen und Alterungsprozessen zwangsläufig nicht die der neuen Werkstoffe erreichen und bestimmte internationale oder firmenspezifische Konformitätserklärungen bzw. Zertifikate nicht beigebracht werden können. Allerdings werden die Förderketten meist in unsensiblen Bereichen und zum weit überwiegenden Teil deutlich unter ihrer Lastgrenze betrieben, sodass sich trotz weitreichender Einsatzgebiete für Recyclingketten ergeben können.

2. Kunststoffketten in der Fördertechnik

Kunststoffketten werden vorzugsweise in intralogistischen Stetigfördersystemen u. a. zur Maschinenverketzung, in Montagelinien oder zur Realisierung sonstiger Materialflussprozesse in nahezu allen Industriebereichen eingesetzt. Gegenüber den klassischen Stahlketten besitzen Kunststoffketten eine Reihe von werkstoffspezifischen Vorteilen,

z. B. große Gestaltungsvielfalt, kostengünstige Fertigung, geringe Kettenmasse, hohes Geräuschkämpfungsvermögen sowie sehr gute tribologische Eigenschaften, welche einen schmierungsfreien und damit wartungsarmen und saubereren Betrieb ermöglichen. Die hohe Gestaltungsvielfalt ermöglicht dabei den Transport von kleinen bis mittelschweren Fördergütern bis hin zu Einzelgewichten über 1 t und Gesamtlasten von mehreren Tonnen pro Fördersystem.

Kunststoff-Förderketten werden grundsätzlich in 3 Gruppen eingeteilt: *Mattenketten*, auch Modulbänder genannt, werden aus einzelnen, mittels Gelenkstäben verbunden Kunststoffmodulen hergestellt und können Förderstrecken bis ca. 5 m Breite und 100 m Länge sowie mehreren Tonnen Transportmasse realisieren. *Scharnierbandketten* sind schmale Zugmittel bis ca. 200 mm Tragbreite. Sie besitzen ein einfaches Scharniergelenk mit Bolzen und Bohrung und bedingter horizontaler Kurvengängigkeit. *Multiflexketten* (Abbildung 2) sind in ähnlichen Größenverhältnissen wie Scharnierbandketten verfügbar. Die Kurvengängigkeit wird jedoch mittels eines kardanisches Gelenks erreicht, was sehr enge Umlenkradien und damit eine hervorragende Raumbeweglichkeit und flexible Gestaltung der Transportstrecken ermöglicht. Je nach Anwendung sind die Ketten etwa 2-10 Jahre in Betrieb, gelegentlich auch mehr als 20 Jahre. Ein Austausch erfolgt meist aufgrund von Verschleiß, z. B. bei funktionsgefährdendem Abrieb oder starker Kettenlängung, sowie bei Bruch der Kette bzw. einzelner Kettenteile. Häufig werden jedoch auch bei Änderung der Förderaufgabe oder des Förderlayouts neue Ketten verwendet.

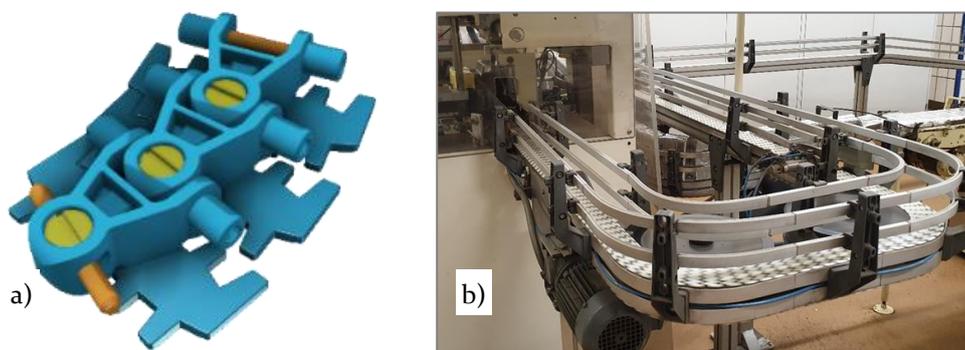


Abbildung 2: a) Multiflexkette mit Kettenglied (blau) und Gelenkpin (gelb) aus Kunststoff sowie Gelenkbolzen aus Stahl (braun); b) Fördersystem mit Multiflexketten an einer Verpackungsmaschine

Kunststoffketten werden aufgrund des ausgewogenen Eigenschaftsbildes vorzugsweise aus Polyoxymethylen (POM) hergestellt. Abhängig von der Bauweise und den Einsatzbedingungen werden jedoch für Ketten bzw. deren Bauelemente auch andere Kunststoffe wie Polybutylenterephthalat (PBT), Polyamid (PA), Polyethylen (PE) oder Polypolypropylen (PP) verwendet. Aufgrund der positiven Materialeigenschaften wird POM auch für andere Spritzgussbauteile in unterschiedlichsten Anwendungen, vor allem für mechanisch und tribologisch beanspruchte Bauteile wie Zahnräder, Rollen oder Gleitelemente verwendet, sodass die Nachfrage nach POM seit einigen Jahren kontinuierlich ansteigt. 2018 wurde eine weltweite Produktionskapazität von 1.900 kt erreicht, wovon etwa 14 % (266 kt) der „allgemeinen Industrie“ zugeordnet werden [19]. Groben Schätzungen zufolge entfallen davon ca. 25-30 kt auf die Herstellung von Förderketten, was

auf eine große Menge an verfügbaren Post-Consumer-Abfällen für ein wirtschaftliches Recycling schließen lässt.

Die im Beitrag untersuchten Multiflexketten werden aufgrund ihrer nicht erforderlichen Zusatzschmierung oft in „sauberen“ Anwendungen wie pharmazeutischen Produktionsanlagen, Verpackungsanlagen usw. genutzt, sodass verschlissene Ketten kaum verunreinigt sind (vgl. Abbildung 3 links). Vielfach sind jedoch auch an den Ketten nach mehrjährigem Betrieb bei unterschiedlichsten Umgebungsbedingungen massive Anhaftungen festzustellen. Diese reichen von leicht lösbaren Verstaubungen bis hin zu klebrigen oder fettigen, stark anhaftenden Belägen, die äußerlich schwer zugänglich sind (Abbildung 3 rechts).

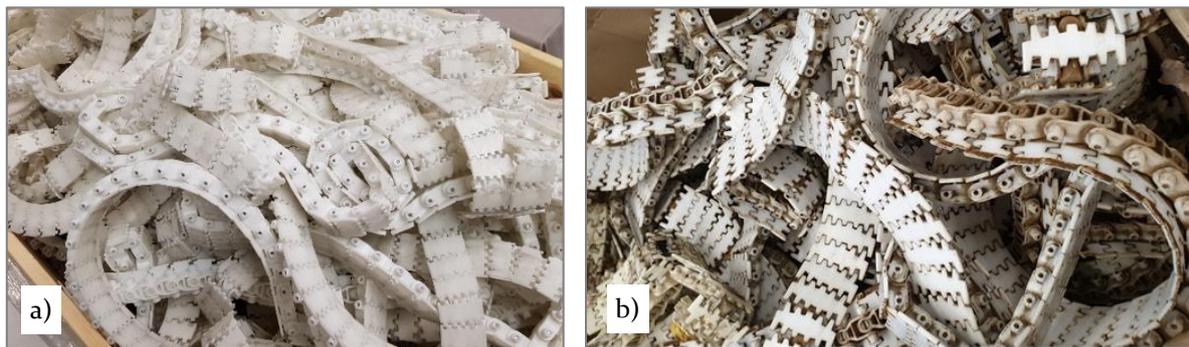


Abbildung 3: Förderketten nach mehrjähriger Anwendung in a) einem Pharmaunternehmen sowie b) einer Kaffeerösterei (rechts)

Weitere Besonderheiten gebrauchter POM-Multiflexketten im Hinblick auf das Recycling sind spezifische Ausführungen wie Ketten mit metallischen Tragplatten, elastomeren Haftbelägen, Staurollen oder integrierten Magneten. Zudem werden artfremde Kunststoffe für Kettenglieder, z. B. Polybutylenterephthalat (PBT), oder für einzelne Kettenbauteile verwendet, z. B. Polyamid (PA6 oder PA66) für Gelenkpins. Häufig sind die Werkstoffe zudem mit Additiven versehen, die der Verbesserung bestimmter Eigenschaften wie Verarbeitbarkeit, Reibungs- und Verschleißverhalten, elektrische Leitfähigkeit bzw. elektrostatische Entladung, Flammhemmung usw. oder auch der spezifischen Farbgebung der Ketten dienen. Um Verunreinigungen und Materialvermischungen mit daraus folgenden Schwierigkeiten bei der Weiterverarbeitung zu vermeiden, bedingt das Recyclingverfahren eine im Bedarfsfall sorgfältige Reinigung sowie die zuverlässige Erkennung und Trennung aller Materialkomponenten.

Neben der meist unbekanntesten Materialzusammensetzung und den Verunreinigungen ist die Degradation der Kunststoffe zu beachten. Diese molekularen Zerfallsprozesse können durch physikalische, chemische oder biologische Einflüsse verursacht werden und führen neben optischen Veränderungen zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften, insbesondere durch Versprödung. In der Regel sind diese Prozesse zeitabhängig, verstärken sich also bei längerer Wirkungsdauer. Im Zusammenhang mit den Einsatzbedingungen der Kunststoffketten sind vor allem hohe oder wechselnde Temperaturen (z. B. in Trockenöfen oder Kühlanlagen), bestimmte Umgebungsmedien (z. B. Reinigungsmittel, Säuren, Öle) oder UV-Strahlung zu nennen. Unabhängig von

der Anwendung kann sich zudem das mehrfache Zerkleinern und Aufschmelzen bei der Verarbeitung auf die Eigenschaften auswirken.

3. Untersuchte Werkstoffe

3.1. Polyoxymethylen Homo- und Copolymer

Polyoxymethylen (POM), häufig auch als Acetal bezeichnet, ist ein teilkristalliner, thermoplastischer Kunststoff, der sich durch hohe mechanische Festigkeit, Steifigkeit, Zähigkeit und Ermüdungsfestigkeit, geringe Feuchteaufnahme sowie sehr gute tribologischen Eigenschaften auszeichnet. Verfahrensbedingt können POM-Homopolymere (POM-H) und POM-Copolymere (POM-C) hergestellt werden. Aufgrund des höheren Kristallisationsgrades ist POM-H durch eine etwas höhere Härte und Festigkeit gekennzeichnet, während POM-C höhere Schlagzähigkeit, Abriebfestigkeit sowie bessere chemische und Hydrolysebeständigkeit bietet. Bezüglich der Verarbeitung ist der höhere Schmelzpunkt von POM-H (175°C) gegenüber POM-C (165-168°C) zu beachten [18].

3.2. Referenzwerkstoffe und Blends

Für die vergleichenden Untersuchungen wurden mit

- POM-H Delrin FG100TL (DuPont) mit 1,5% PTFE-Mikropulver sowie
- unmodifiziertem POM-C Hostaform C9021 (Celanese)

zwei kommerziell erhältliche und typische Kettenwerkstoffe verwendet. Es ist anzumerken, dass es sich beim genannten Hostaform um ein ungefülltes Material handelt, beim Delrin FG100TL dagegen um einen mit PTFE-Mikropulver gleitmodifizierten Werkstoff. Wichtige Eigenschaften aus den Herstellerdatenblättern dieser Werkstoffe sind in Tabelle 1 aufgeführt. Dabei fallen u. a. die ähnlichen Verarbeitungstemperaturen im Spritzguss auf, was die generelle Verarbeitbarkeit einer Materialmischung erwarten lässt.

Tabelle 1: Eigenschaften der Referenzwerkstoffe Delrin FG100TL [21] sowie Hostaform C9021 [20]

| Eigenschaft | Einheit | Delrin FG100TL | Hostaform C9021 |
|---|-------------------|----------------|-----------------|
| Dichte | g/cm ³ | 1,43 | 1,41 |
| Zug-E-Modul | MPa | 3000 | 2850 |
| Streckspannung | MPa | 71 | 64 |
| Streckdehnung | % | 25 | 9 |
| nominelle Bruchdehnung | % | 35 | 30 |
| Charpy Schlagzähigkeit (23°C) | kJ/m ² | 150 | 180 |
| Schmelztemperatur | °C | 178 | 166 |
| Verarbeitungsparameter für Spritzguss: | | | |
| Schmelze-Massefließrate, MFR bei 190°C, 2,16 kg | g/10min | 2,2 | 8,0 |
| Schmelztemperatur | °C | 210-220 | 190-230 |
| Werkzeugtemperatur | °C | 80-100 | 80-120 |

Materialmischungen

Aufgrund der schwierigen Unterscheidung von POM-H und POM-C wurde untersucht, wie sich eine Vermischung beider Werkstofftypen hinsichtlich der Verarbeitung und der Eigenschaften auswirkt. Die beiden Referenzmaterialien Delrin FG100TL und Hostaform C9021 wurden deshalb in den Verhältnissen 3:1, 1:1 und 1:3 Gewichtsanteilen Granulat miteinander vermischt.

3.3. Herstellung und Charakterisierung des Rezyklats

Die aus verschiedenen Anwendungen zurückgeführten Kettenabschnitte müssen aufgrund von Verunreinigungen und unbekanntem Werkstoffen vorsortiert und zur Weiterverwendung einzelner Komponenten, z. B. der im Betrieb oft sehr wenig verschleißenden Verbindungsbolzen aus Edelstahl, demontiert werden. Die Materialerkennung wie auch die Reinigung kann somit vor oder nach der Trennung erfolgen. Im beschriebenen Projekt wurden die verschmutzten Ketten vor der Demontage gesäubert und dabei verschiedene Möglichkeiten wie Ultraschallbad, Wasser- oder Sodastrahlen betrachtet. Die besten Ergebnisse wurden mittels Trockeneisstrahlen erzielt. Das Verfahren basiert auf der Verwendung von festen Kohlenstoffdioxid-Partikeln, die mit hoher Geschwindigkeit auf die zu reinigenden Flächen gesprüht werden, dort zu gasförmigem CO₂ sublimieren und Verunreinigungen effektiv ablösen. Gegenüber anderen Reinigungsverfahren wirkt die Trockeneisreinigung ohne chemische Zusätze, verursacht keine sekundären Abfälle und wirkt nicht abrasiv. Das Trockeneis kann mit entsprechender Technik selbst produziert werden und ist deshalb flexibel sowohl für kurze manuelle als auch für automatisierte Reinigungsprozesse anwendbar [22] [23].

Für die Herstellung des Rezyklats Recl wurden folgende Gebrauchtketten ausgewählt, aus denen eine Materialmischung entsprechend Tabelle 2 zusammengestellt und wie unten beschrieben verarbeitet wurde:

- 50% Kettenglieder aus der Anwendung in einer Kaffeerösterei, Laufzeit ca. 30 Jahre (vgl. Abbildung 3 rechts) und
- jeweils 25% Kettenglieder aus zwei unterschiedlichen Pharmaanwendungen, Laufzeit mehrere Jahre (vgl. Abbildung 3 links).

Die in der Pharmaindustrie eingesetzten Ketten konnte dabei ohne Reinigungsprozess verarbeitet werden. Die Ketten aus der Kaffeerösterei enthielten dagegen starke Verunreinigungen in Form von festen, fettarmen Anhaftungen von Kaffeepulver, die mittels Trockeneis gereinigt wurden. Dabei konnten die groben Verunreinigungen gut entfernt werden, in schwer zugänglichen Spalten und an stark beanspruchten Stellen der Kette blieben allerdings kleinere Schmutzreste haften (Abbildung 4), die sich später auf den Partikeln des Mahlgutes sowie auch im Regranulat wiederfanden. Es wird jedoch eingeschätzt, dass der Einfluss dieser Verunreinigungen auf die Rezyklatqualität infolge der äußerst geringen Menge im Verhältnis zum Kunststoffmaterial vernachlässigbar sein dürfte.

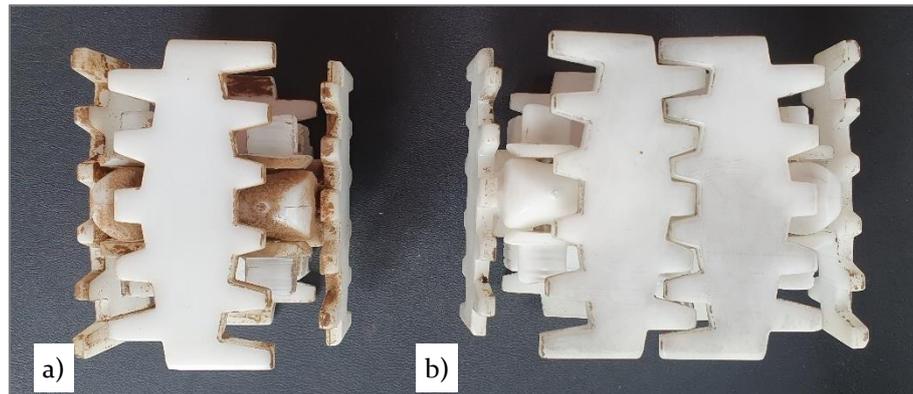


Abbildung 4: Gebrauchte, mit Kaffeestaub verunreinigte Förderkette a) vor und b) nach dem Reinigen mit Trockeneis

Zur Identifikation der Kettenwerkstoffe wurde zunächst eine Infrarot-Spektroskopie (Thermo Scientific Nicolet iS 10) durchgeführt (Abbildung 5). Aufgrund der charakteristischen Spektren konnte das Grundmaterial POM dabei eindeutig zugeordnet werden, eine Unterscheidung zwischen homo- und copolymerem POM war jedoch nicht möglich. Die Messungen zeigten zudem häufig zusätzliche Peaks, die die Existenz weitere Elemente erkennen lassen. Eine Spezifikation des chemischen Aufbaus bzw. die Identifikation spezieller Additive wurde nicht durchgeführt.

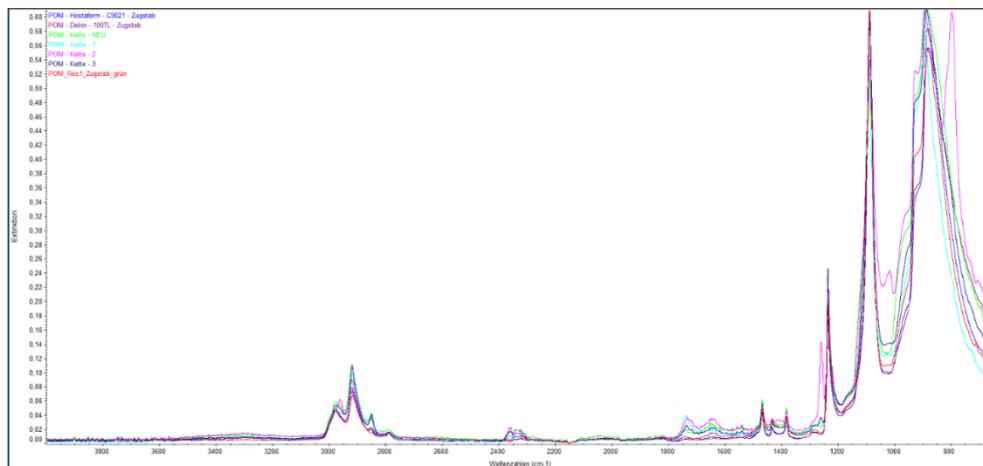


Abbildung 5: IR-Spektroskopie verschiedener Gebrauchtketten im Vergleich mit den Referenzwerkstoffen

Im nächsten Schritt erfolgte eine DSC-Analyse (TA Instruments DSC Q2000) der Proben, wodurch der Kristallschmelzpunkt der Werkstoffe aus der zweiten Aufheizkurve (Abbildung 6, grüne Kurven) ermittelt werden kann. Die unterschiedlichen Schmelzpunkte von POM-H (175°C) und POM-C (165-168°C) [18] ließen sich dabei an den beiden bekannten Referenzwerkstoffen eindeutig nachweisen.

Auch die Gebrauchtkettenmaterialien zeigten deutliche Unterschiede, die Hinweise auf den jeweiligen Materialtyp lieferten. Auffällig war jedoch, dass das gleichermaßen aus beiden Typen bestehende Rezyklat einen Kristallschmelzpunkt von 166°C erbrachte, der theoretisch dem POM-C entsprechen würde. Es wurde deshalb zusätzlich die Schmel-

zenthalpie herangezogen, die ein Maß für die Kristallinität des Werkstoffs darstellt (höhere Enthalpie entspricht höherer Kristallinität). Die Messungen bestätigten die aus dem Kristallschmelzpunkt gewonnenen Aussagen zu den Ausgangsmaterialien. Beim Rezyklat liegt der Wert mit 162,5 J/g zwar unterhalb beider Referenzwerkstoffe, jedoch zwischen denen der Kaffeekette (150 J/g) und den beiden Pharmaketten (186 J/g).

Insgesamt konnten die Kettenglieder aus der Kaffeerösterei als POM-H und die beiden Pharmaketten als POM-C identifiziert werden. Somit ist davon auszugehen, dass das Rezyklat Recl aus einer Mischung von je 50 Masseprozent POM-H und POM-C besteht. Würde jedoch nur das Rezyklat vorliegen, könnte eine Identifikation des Materialtyps bzw. der entsprechenden Anteile mit den beschriebenen Analysemethoden nicht eindeutig vorgenommen werden.

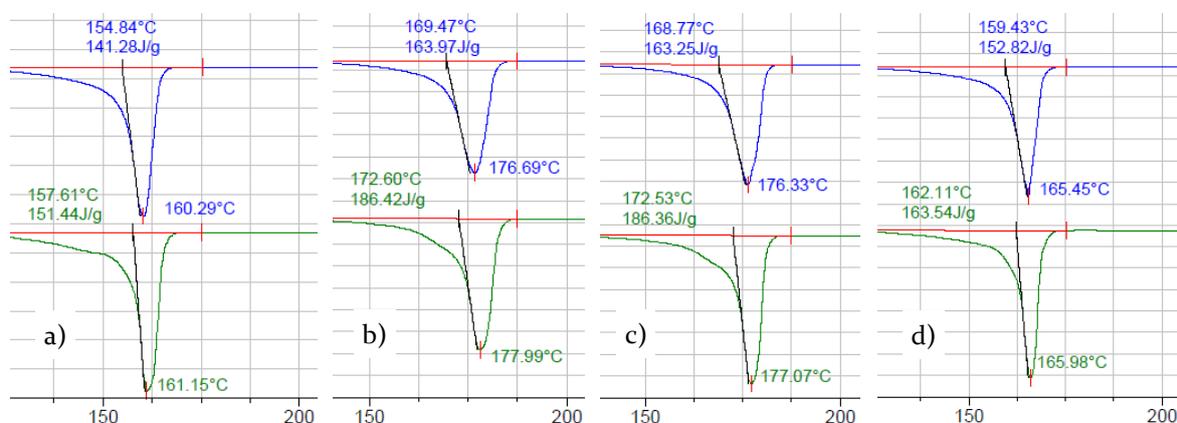


Abbildung 6: Ermittlung der Schmelztemperatur aus DSC-Messungen; Auszüge aus 1. (blau) und 2. Aufheizkurve (grün); a) Kaffeekette, b, c) Pharmaketten 1 und 2, d) Rezyklat Recl

Tabelle 2: Gewichtsanteile zur Herstellung von Recl sowie Materialcharakterisierung aus DSC-Analysen

| | | Delrin FG100T L | Hostaf. C9021 | Kaffeekette | Pharmakette 1 | Pharmakette 2 | Rezyklat Recl |
|--------------------------------------|-----|-----------------|---------------|-------------|---------------|---------------|---------------|
| Gewicht Zugelement POM | g | - | - | 15 | 12 | 12 | - |
| Anzahl Zugelemente | - | - | - | 530 | 335 | 335 | - |
| Materialmenge für Recl | kg | - | - | 8,0 | 4,0 | 4,0 | 16,0 |
| Schmelztemperatur DSC (2. Aufheizen) | °C | 177 | 166 | 162 | 178 | 177 | 166 |
| Schmelzenthalpie DSC (2. Aufheizen) | J/g | 190 | 173 | 150 | 186 | 186 | 162 |
| Identifikation | - | POM-H | POM-C | POM-C | POM-H | POM-H | - |

Nach der Materialbestimmung wurden die Ketten demontiert und entsprechend Abbildung 7 vereinzelt, wobei die Gelenkspins aus PA66⁴ im Bedarfsfall ebenfalls recycelt werden können. Die Prüfung der Stahlbolzen ergab nur sehr selten geometrische Abweichungen oder relevante Verschleißerscheinungen, sodass die Bolzen überwiegend zur Herstellung neuer Ketten weiterverwendet werden können.

⁴ Materialdefinition mittels IR-Spektroskopie und Datenbankabgleich mit Ultramid A3W, Güte 97,67%

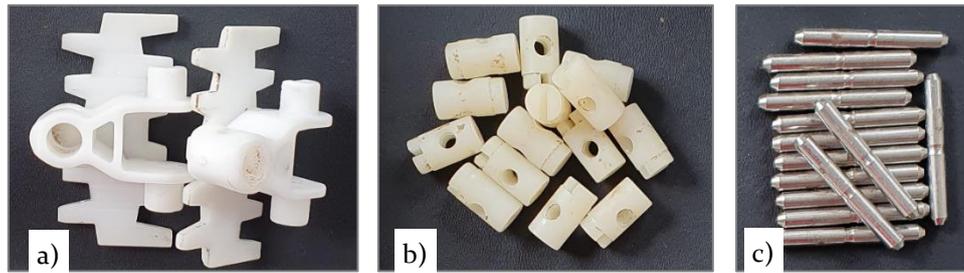


Abbildung 7: Gereinigte und demontierte a) Zugelemente aus POM, b) Gelenkpins aus PA66 und c) Stahlbolzen der Kaffeekette

Die Zugelemente aus POM wurden anschließend mit einer Schneidmühle vermahlen und gesiebt (Siebgröße 8 mm), entstaubt und entmetallisiert, wobei staubförmige Verunreinigungsreste weiter abgetrennt wurden. Das so gewonnene Mahlgut wurde für die Herstellung der Versuchsproben mit 2 % grünem Masterbatch eingefärbt und regranuliert, wodurch kleinere Verschmutzungspartikel oder eine leichte Graufärbung effektiv kaschiert werden können (Abbildung 8). Erste, im Spritzgussverfahren hergestellte Musterbauteile erbrachten eine gute Oberflächenqualität und keine erkennbaren Verunreinigungen. Zudem waren gegenüber den üblicherweise verarbeiteten, sortenreinen Industrieabfällen (Post-industrial-Abfälle) keine Veränderungen der Verarbeitungseigenschaften festzustellen.

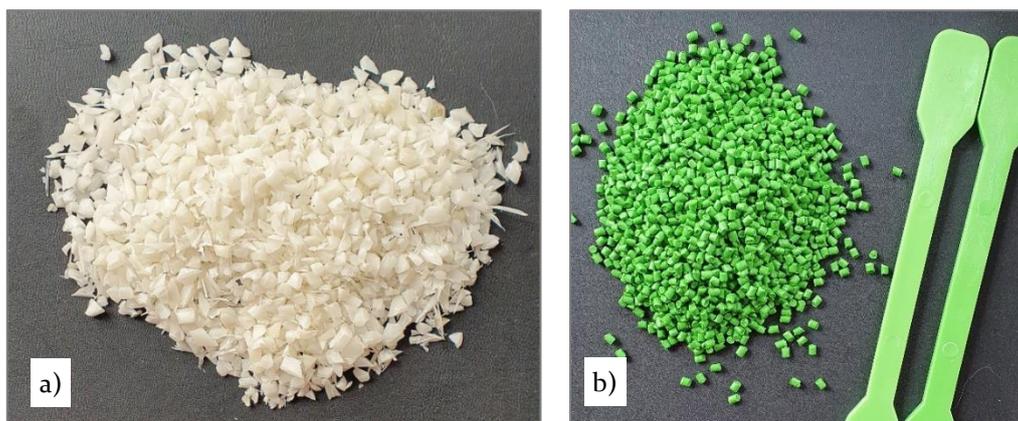


Abbildung 8: a) Mahlgut sowie b) eingefärbtes Granulat und daraus gespritzte Musterbauteile

4. Probekörper und Versuchsdurchführung

4.1. Relevante Anwendungseigenschaften

Für die Auswahl eines Werkstoffs zur Herstellung von Förderketten sind vor allem die mechanischen und tribologischen Eigenschaften von hoher Bedeutung. Der *Reibwert* zum Stütz- und Führungssystem sowie die *Zugfestigkeit* und *Schlagzähigkeit* der Kette bestimmen maßgeblich die Tragfähigkeit der Förderer sowie die Funktionssicherheit gegenüber einem Kettenriss, der zu einem plötzlichen Totalausfall des Fördersystems mit oft erheblichen Folgekosten führen kann. Weiterhin sind eine geringe elastische

Dehnung der Kette sowie eine hohe *Verschleißfestigkeit* vor allem in den Gelenkbereichen erwünscht, um Kettenschwingungen und Funktionsstörungen durch Vergrößerung der Länge bzw. des Teilungsabstandes der Kette zu vermeiden.

Bei Abfällen aus technischen Anwendungen führen die oben genannten Aspekte der Verunreinigungen und Degradation gegenüber Neumaterialien zwangsläufig zu Rezyklaten mit verminderten mechanischen Eigenschaften. Im Fokus der Untersuchungen standen deshalb insbesondere

- die beim werkstofflichen Recycling erforderliche *Mehrfachverarbeitung* mit einer mechanischen und thermischen Beanspruchung der Molekülstruktur sowie
- die *Vermischung* von homo- und copolymerem POM aufgrund der im industriellen Umfeld schwierigen Unterscheidung beider Werkstofftypen.

Weitere relevante Einflussgrößen, wie die Wirkung von UV-Strahlung sowie der Langzeitkontakt mit Öl während der Nutzungsphase, wurden in [24] beschrieben.

4.2. Prüfung der mechanischen Materialeigenschaften

Für die mechanischen Untersuchungen erfolgte die Herstellung der Materialproben im Spritzgießverfahren in einem Einfachformwerkzeug mit Kaltkanalanguss und den in den Materialdatenblättern der Hersteller genannten Verarbeitungsparametern. Die Proben wurden nach der Fertigung im Normklima bei 23°C und 50% rel. Luftfeuchte konditioniert und die mechanischen Eigenschaften wie folgt ermittelt:

- Zugversuch nach DIN EN ISO 527 mit Schulterstab 1A, Prüfgeschwindigkeit 20 mm/min (für E-Modul Ermittlung 1 mm/min) sowie
- Charpy-Schlagzähigkeitsversuch nach DIN EN ISO 179-2 an ungekerbten Proben, Querschnitt 4 x 10 mm, Arbeitsvermögen des Hammers 25 J.

Mehrfachverarbeitung

Zur Untersuchung der Materialeigenschaften bei mehrfacher Spritzgießverarbeitung wurden die Angüsse sowie ein Teil der gefertigten Schulterstäbe nach dem Abkühlen in einer Schneidmühle zerkleinert und wiederum verarbeitet. Dieser Prozess wurde mehrmals wiederholt, sodass letztlich Zugstäbe aus insgesamt bis zu 11 Verarbeitungszyklen zur Verfügung standen.

4.3. Prüfung der tribologischen Eigenschaften

Bei der Untersuchung der tribologischen Eigenschaften wurde eine POM-Oberprobe (Grundfläche 10 x 15 mm) mit einer Normalkraft beaufschlagt und auf einer Länge von 100 mm oszillierend über eine ruhende Unterprobe aus PE-UHMW (Röchling, Polystone M natur), einem gängigen Gleitschienenmaterial in der Fördertechnik, 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.

Es wurden mehrere Testläufe über eine Versuchsdauer von 24 h sowie 168 h mit einer mittleren Geschwindigkeit von $v = 0,25$ m/s sowie nominellen Flächenpressungen von $p = 0,22$ und $0,44$ N/mm² durchgeführt. Während der Versuche wurden die Reibwerte regelmäßig aufgezeichnet und für die vergleichende Auswertung jeweils die Mittelwerte der letzten beiden Versuchsstunden herangezogen. Die Verschleißwerte wurden im Anschluss an die Versuche für Ober- und Unterprobe getrennt nach einem Bewertungsschema von 0 (keinerlei sichtbare Schäden) bis 4 (sehr starker Verschleiß und/oder Aufschmelzungen der Oberflächen) beurteilt.

4.4. Herstellung und Prüfung der Kunststoffketten

Versuchsketten

Für vergleichende Bauteiluntersuchungen stand ein Spritzgießwerkzeug zur Verfügung, mit dem mehrteilige Multiflexketten entsprechend Abbildung 9 und Abbildung 10 mit einem Teilungsabstand von 33,5 mm und einer Tragplattenbreite von 83 mm gefertigt werden konnten. Das für die mechanischen Eigenschaften hauptrelevante Zugelement wurde aus den Referenzwerkstoffen Delrin FG 100 TL (POM-H) und Hostaform C9021 (POM-C) sowie dem Rezyklat Recl gefertigt.

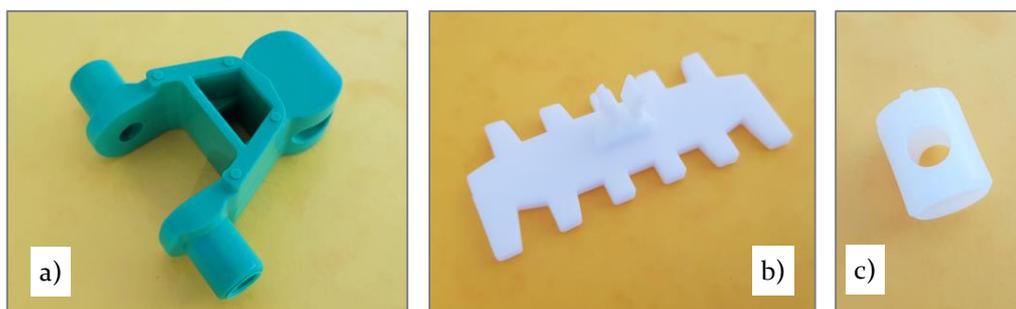


Abbildung 9: Mehrteilige Multiflexkette; a)Zugelement, b) Tragplatte, c) Gelenkpin

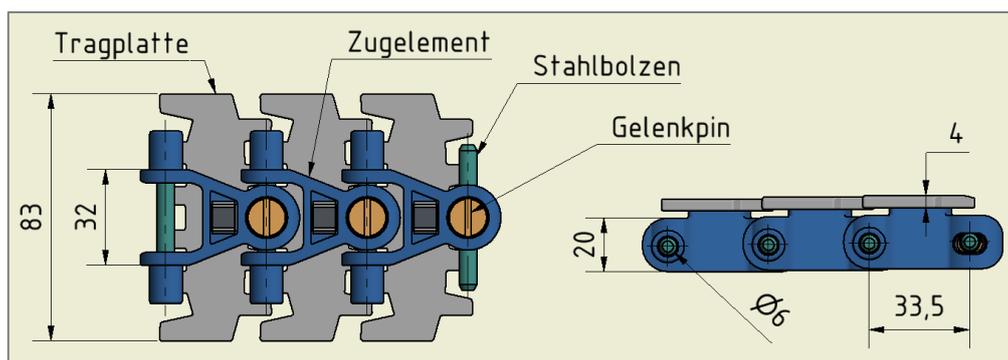


Abbildung 10: Hauptabmessungen der verwendeten Multiflexkette

Abbildung 11 zeigt mit Gelenkpin und Stahlbolzen montierte Zugelemente sowie eine vollständige Förderkette mit Zugelementen aus Recyclingmaterial (grün). Die mittels Schnappverbindung aufgebrachte Tragplatte wurde aufgrund der geringen verfügbaren Rezyklatmenge zunächst aus Standard-POM gefertigt, könnte jedoch ebenfalls aus Rezyklat hergestellt werden. Für den Gelenkpin wurde ein mit Gleitadditiv versehenes

PA verwendet, da tribologische „Eigenpaarungen“ oft zu Geräuschentwicklung (Quietschen) und starkem Verschleiß führen und möglichst vermieden werden sollten. Der Gelenkbereich wurde jedoch hinsichtlich der tribologischen Eigenschaften vorerst nicht untersucht.

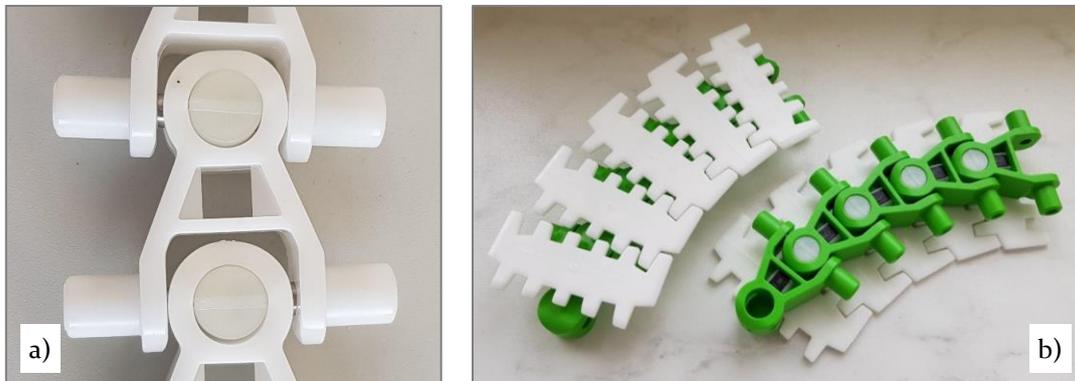


Abbildung II: a) Montierte Grundkörper (Zugelemente) aus POM-H für Zugversuche sowie b) vollständige Kette mit Grundkörper aus POM-Rezyklat Recl (rechts)

Zusätzlich wurden in einige Untersuchungen zu Vergleichszwecken marktübliche POM-Multiflexketten verschiedener Hersteller einbezogen. Hier ist anzumerken, dass die genaue Materialzusammensetzung unbekannt ist und dass trotz gleicher Baugröße zwischen den Varianten leichte Unterschiede in der Gestaltung der Zugelemente vorliegen, sodass die Ergebnisse nicht vollständig miteinander vergleichbar sind.

Statische Zugversuche

Die statischen Zugversuche wurden mit kurzen, aus jeweils 5 Gliedern bestehenden Kettenabschnitten ohne Tragplatte durchgeführt. Die Abschnitte wurden in einer Festigkeitsprüfmaschine beidseitig kardanischn befestigt, auf 50 N⁵ Vorkraft vorgespannt und mit 10 mm/min bis zum Bruch gezogen.

Die maximal zulässige Zugkraft der betrachteten Kettengröße wird herstellerunabhängig mit 1.250 N angegeben. Um diesen späteren Arbeitsbereich voll abzudecken, wurde die Steifigkeit der Ketten (in N/mm) aus den aufgezeichneten Kraft-Verformungs-Kurven als Sekante zwischen 500 und 1.500 N Zugkraft ermittelt. In diesem Kraftbereich verlaufen die Kurven weitestgehend linear.

Test bei Zug-Schwell-Beanspruchung

Im praktischen Förderbetrieb werden die Kettenglieder innerhalb eines vollständigen Umlaufs mit einer ansteigenden Zugkraft vom Auslauf aus dem Antriebsritzel (F gegen Null) bis zu der am Einlauf in den Antrieb auftretenden Umfangskraft (F maximal) beansprucht. Die im statischen Zugversuch ermittelte Bruchkraft stellt deshalb zwar einen guten Anhaltspunkt dar, bildet die realen Verhältnisse aber nur unzureichend ab.

Bei der Prüfung der dynamischen Festigkeit wurden deshalb jeweils 5 Kettenglieder unter sinusförmiger Zug-Schwell-Belastung mit geringer Frequenz von 0,5 Hz getestet, um

⁵ Beim Test marktüblicher Vergleichsketten teilweise 25 N.

eine reibungsbedingte Erwärmung insbesondere in den Gelenken zu vermeiden. Zur Beschränkung der Versuchsdauer wurden die Oberkräfte mit 2.500 und 2.000 N zunächst deutlich oberhalb der üblichen zulässigen Zugkraft von 1.250 N festgelegt. Die Unterkraft betrug jeweils 10% der Oberkraft. Während der Tests wurde jeweils die Dehnung der Ketten bei Erreichen der Oberkraft sowie die Anzahl der Lastwechsel bis zum Bruch der Ketten aufgezeichnet.

Test unter praxisnahen Bedingungen

Für Versuche unter realitätsnahen Belastungsbedingungen stand ein Versuchsförderer nach Abbildung 12 zur Verfügung, der aus zwei 90 cm langen Geradabschnitten und einem horizontalen Bogenrad mit einem Umlenkradius von 150 mm besteht. Als Antrieb dient ein frequenz geregelter Asynchrontriebmotor mit einer Nennleistung von 1,4 kW. Die Einleitung einer definierten Zugkraft in die Gleitkette erfolgt durch eine geregelte Magnetpulverbremse an der Umlenkeinheit. Die ertragbaren Lastwechsel fallen in der Regel deutlich geringer aus als bei der eindimensionalen Zug-Schwell-Beanspruchung, weil die Kette durch die horizontale sowie vertikale Umlenkung unter Last zusätzliche Biegebelastungen erfährt.

Für erste Funktionstests wurde eine insgesamt 3,4 m lange Kette (102 Glieder) aus Abschnitten mit POM-H-, POM-C- und Recl-Gliedern sowie einer marktüblichen Multiflexkette zusammengesetzt und mit Zugkräften bis 1000 N und Geschwindigkeiten bis 1 m/s getestet.

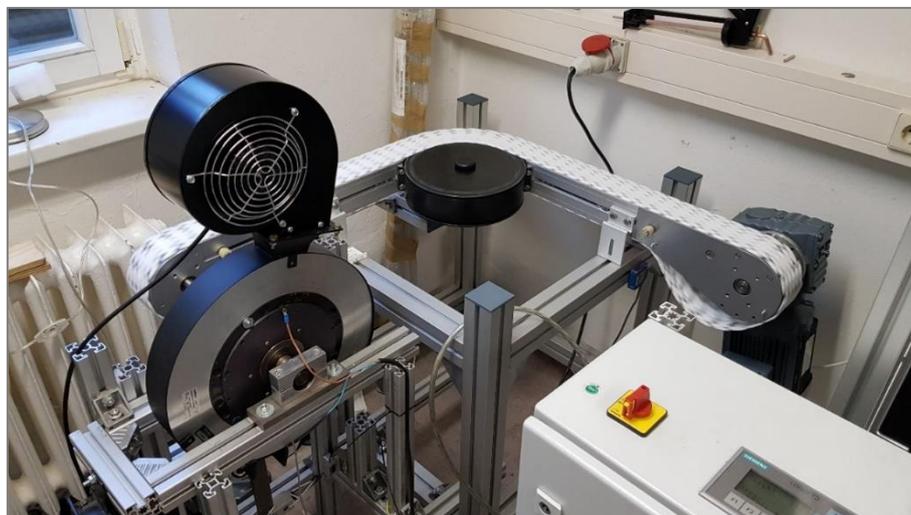


Abbildung 12: Versuchsförderer für realitätsnahe Belastungstests

5. Ergebnisse

5.1. Mechanische Eigenschaften

Referenzwerkstoffe und deren Blends

In Abbildung 13, Abbildung 14 und Tabelle 1 sind die mechanischen Eigenschaften der beiden Referenzwerkstoffe im Vergleich zu den entsprechenden Mischungen und dem Rezyklat dargestellt. Auffällig in den Spannungs-Dehnungs-Kurven sind eine ausgeprägte Streckgrenze sowie die wesentlich höhere Duktilität des POM-C, während das POM-H keine Streckgrenze aufweist und eher spröde bricht. Dieses Verhalten wird auch bei der Schlagzähigkeit deutlich, wo der Hostaform-Werkstoff erwartungsgemäß wesentlich höhere Werte aufweist als das Delrin. Die Kennwerte für E-Modul und Streck- bzw. Bruchspannung liegen bei POM-H etwas höher, wobei allerdings nur geringe Unterschiede erkennbar sind.

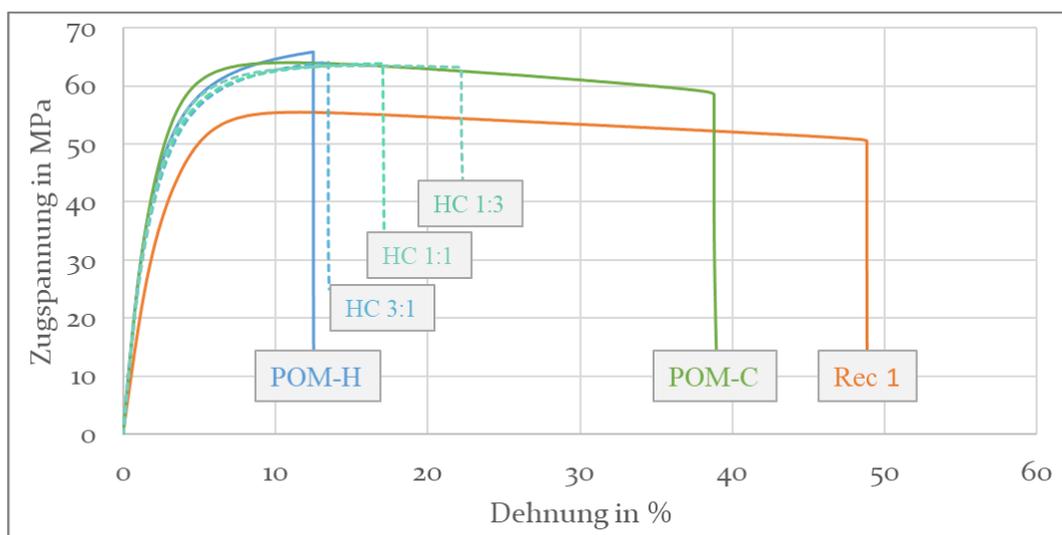


Abbildung 13: Spannungs-Dehnungs-Kurven des POM-Rezyklats (Rec1) im Vergleich zu den Referenzwerkstoffen (POM-H, POM-C) und deren Blends (Homo- zu Copolymer HC 3:1, HC 1:1, HC 1:3)

Bei den Blends ist keine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften feststellbar, sodass grundsätzlich eine gute Kompatibilität vorausgesetzt werden kann. Bei E-Modul und Streckspannung sind die Werte vergleichbar mit POM-C. Die Schlagzähigkeit liegt dagegen zwischen den Referenzwerkstoffen und nähert sich tendenziell dem im Mischungsverhältnis dominierenden POM-Typ.

Das Rezyklat Rec1 liegt bezüglich E-Modul und Schlagzähigkeit auf ähnlichem Niveau wie die Vergleichswerkstoffe. Die Streckdehnung ist jedoch deutlich geringer und die für die Dimensionierung wichtige Streckspannung liegt etwa 15-20% unterhalb der anderen betrachteten Werkstoffe.

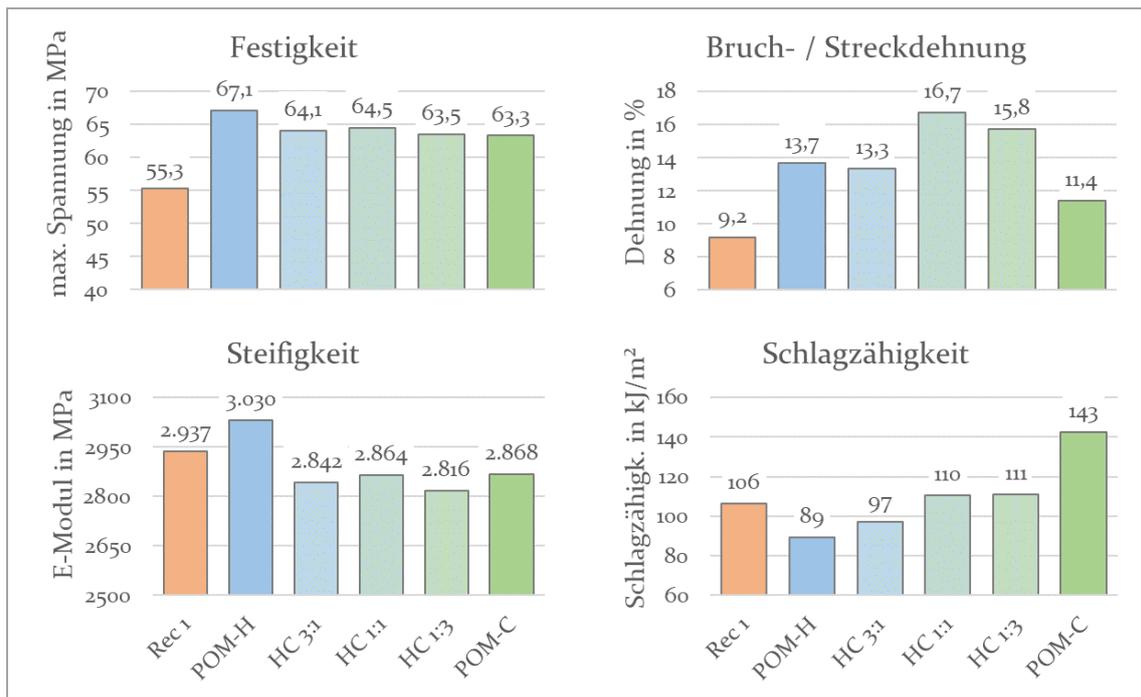


Abbildung 14: Mechanische Eigenschaften des POM-Rezyklats (Rec1) im Vergleich zu den Referenzwerkstoffen (POM-H, POM-C) und den entsprechenden Blends (Homo- zu Copolymer HC 3:1, HC 1:1, HC 1:3)

Tabelle 3: Mechanische Kennwerte des POM-Rezyklats (Rec1) im Vergleich zu den Referenzwerkstoffen (POM-H, POM-C) und den entsprechenden Blends (Homo- zu Copolymer HC 3:1, HC 1:1, HC 1:3)

| | | Rec 1 | POM-H | HC 3:1 | HC 1:1 | HC 1:3 | POM-C |
|---------------------------|-------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| E-Modul | MPa | 2937 | 3030 | 2842 | 2864 | 2816 | 2868 |
| | | 100,0% | 96,9% | 103,3% | 102,6% | 104,3% | 102,4% |
| Maximale Spannung | MPa | 55,2 | 67,1 | 64,1 | 64,5 | 63,4 | 63,3 |
| | | 100,0% | 82,3% | 86,2% | 85,7% | 87,1% | 87,3% |
| Dehnung bei max. Spannung | % | 9,2 | 13,7 | 13,3 | 16,7 | 15,7 | 11,4 |
| | | 100,0% | 67,0% | 68,8% | 54,9% | 58,3% | 80,5% |
| Schlagzähigkeit | kJ/m² | 106,35 | 89,18 | 97,32 | 110,49 | 111,22 | 142,6 |
| | | 100,0% | 119,3% | 109,3% | 96,3% | 95,6% | 74,6% |

Mehrfachverarbeitung

Bei der Mehrfachverarbeitung ergibt die visuelle Beurteilung der Proben eine mit den Verarbeitungsschritten zunehmende Vergilbung, die bei POM-H deutlich intensiver ausfällt als bei POM-C (Abbildung 15). Wie Abbildung 16 zeigt, beeinflusst dies jedoch nicht die wichtigen mechanischen Eigenschaften Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit, wo kein merklicher Zusammenhang mit den Verarbeitungszyklen erkennbar ist. Bei der Reißdehnung wird bei POM-H ebenfalls kein signifikanter Unterschied deutlich. Der Wert bei POM-C fällt leicht ab, wobei innerhalb der Versuchsreihen erhebliche Schwankungen (=hohe Standardabweichung) festzustellen waren.



Abbildung 15: Zugstäbe nach 1 bis 11 Verarbeitungszyklen; a) POM-H und b) POM-C

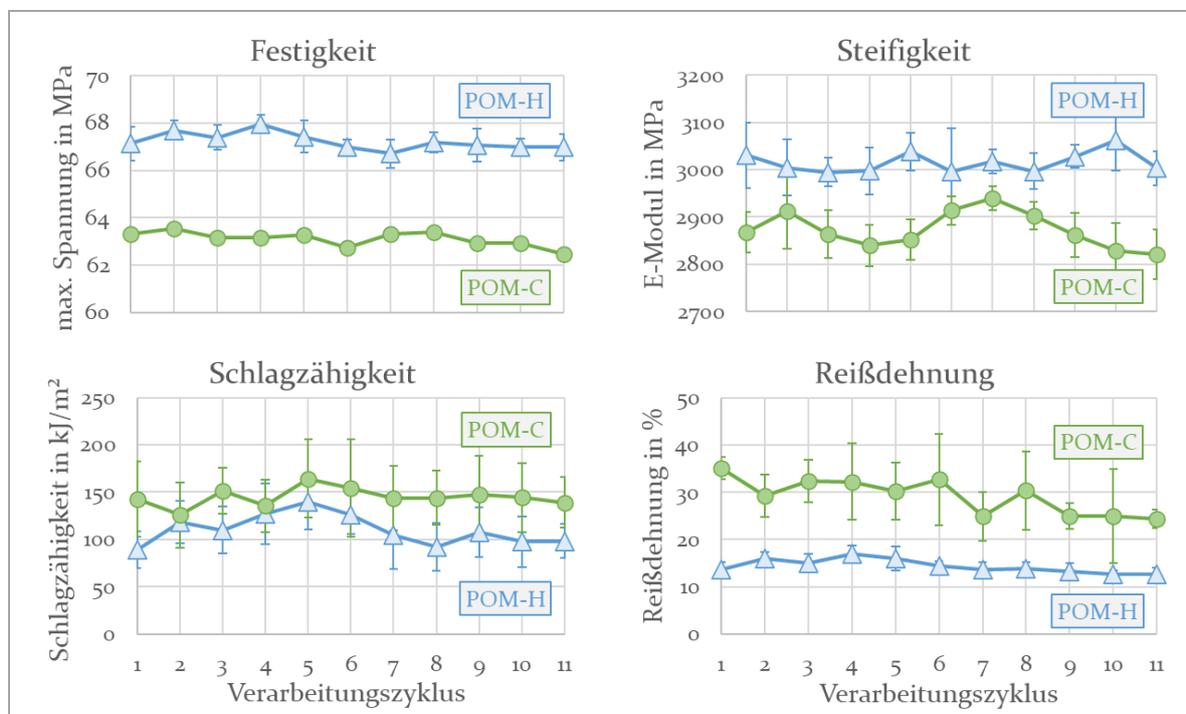


Abbildung 16: Mechanische Eigenschaften bei Mehrfachverarbeitung

5.2. Tribologische Eigenschaften

Typisch für thermoplastische Kunststoffgleitpaarungen im Trockenlauf sind zu Belastungsbeginn relativ geringe Reibwerte, die sich im Laufe der Versuchsdauer deutlich steigern und in der Regel erst nach einigen Stunden bis zu mehreren Tagen einen stationären Verlauf, ggf. mit leichten Schwankungen und Sprüngen, nehmen.

Dieses charakteristische Einlaufverhalten war auch bei allen mit relativ geringer Belastung (0,22 MPa) untersuchten Werkstoffpaarungen zu beobachten. Ausgewählte Verläufe gegen PE-UHMW sind in Abbildung 17a dargestellt, wobei hier keine wesentlichen Unterschiede zu verzeichnen sind. Höhere Belastungen verursachen generell schon nach sehr kurzer Zeit eine starke reibungsbedingte Erwärmung, die zur

Erweichung bis hin zum Aufschmelzen der thermoplastischen Oberflächen führt. Neben dem deutlich sichtbaren Verschleiß schwanken dann auch die Reibwerte und die Kontaktflächentemperaturen erheblich, da sich durch ab- oder aufgetragene Materialschichten ständig neue Kontaktbedingungen einstellen. Die Verläufe der bei $p = 0,44 \text{ MPa}$ durchgeführten Versuche in Abbildung 17b zeigen dieses Verhalten, jedoch sind auch hier keine Reibwertunterschiede zwischen den Referenzproben und Recl ersichtlich.

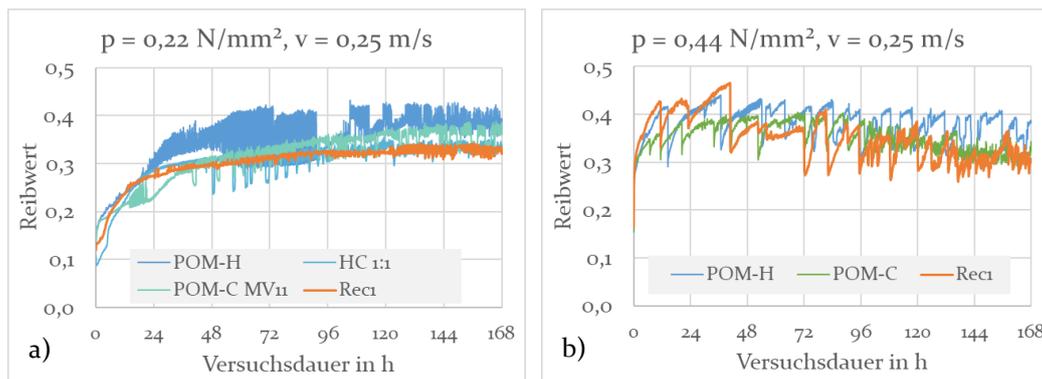


Abbildung 17: Ausgewählte Reibwertverläufe gegen PE-UHMW, Platte-Platte oszillierend, $v=0,25 \text{ m/s}$, Laufzeit 168 h, nominelle Kontaktspannung a) $0,22 \text{ MPa}$ und b) $0,44 \text{ MPa}$

Bezüglich des Verschleißes verursacht eine moderate Belastung ($0,22 \text{ MPa}$) auf den Oberflächen der Proben nach 168 h Versuchsdauer lediglich eine Glättung, leichte Kratzspuren sowie pulverförmige Abriebpartikel in äußerst geringer Menge.

Bei doppelter mechanischer Beanspruchung mit $0,44 \text{ MPa}$ wird die Kontaktflächentemperatur von teilweise bis zu 120°C entscheidend für den Verschleiß. Die PE-Oberflächen werden dadurch aufgeschmolzen und das Material durch die sich darüber bewegendenden POM-Proben verschmiert oder in sehr dünnen Schichten von der Oberfläche gelöst. Diese relativ großflächigen, aber sehr dünnen Partikel lagern sich an anderer Stelle an (Abbildung 18c) oder werden aus dem Kontaktbereich herausgetragen. Derartige thermische Schäden wurden in den Tests nur an den Proben aus PE-UHMW festgestellt, die POM-Proben zeigten lediglich Kratzspuren (Abbildung 18a und b). Abrasivverschleiß in Form von pulverförmigem Abrieb trat nur in sehr geringem Maße auf, wobei die Partikel offenbar nur vom PE stammten, da kein grüner POM-Abrieb von Recl beobachtet werden konnte.

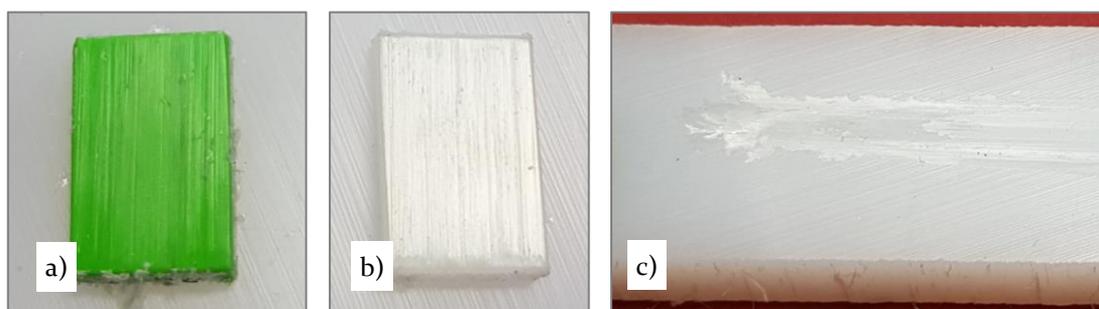


Abbildung 18: Oberproben aus a) Recl und b) POM-C sowie c) Verschleißspur und Materialanhaftung einer PE-UHMW-Untersprobe nach 168 h Versuchsdauer mit $p = 0,44 \text{ MPa}$ und $v = 0,25 \text{ m/s}$

Zusammenfassend kann entsprechend Abbildung 19 festgestellt werden, dass bei gleicher tribologischer Beanspruchung mit $p = 0,22$ bzw. $0,44$ MPa nach 168 h Versuchsdauer sowohl bei den Reib- als auch den Verschleißwerten keine signifikanten Unterschiede der untersuchten Referenzwerkstoffe, deren Mischungen, einer 11-fachen Mehrfachverarbeitung sowie auch dem Rezyklat Recl erkennbar sind.

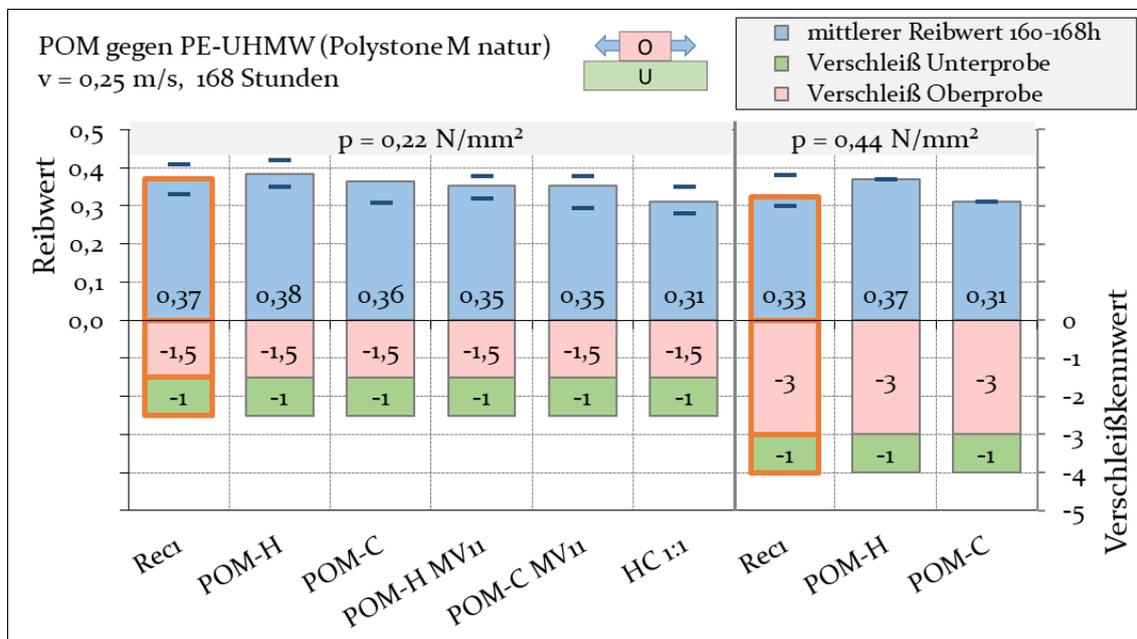


Abbildung 19: Reibwerte (blau, incl. Min- und Maxwert aus bis zu 4 Versuchen) sowie Verschleißwerte der POM-Oberprobe (rot) und PE-UHMW-Unterprobe (grün) der untersuchten Werkstoffe nach 168 h Versuchsdauer

5.3. Eigenschaften der Recyclingkette

Verhalten bei statischer Zugbeanspruchung

Beim statischen Zugversuch mit jeweils 5 Gliedern war das unterschiedliche Bruchverhalten der Ketten auffällig (Abbildung 20). Während die Ketten aus POM-H und POM-C im Bereich des Horizontalgelenks in zwei bis drei Teile brachen, zeigten die Recyclingketten einen spröden und mehrteilig splitternden Bruch außerhalb des Gelenkbereichs.

Unterschiede werden auch im Kraft-Dehnungsdiagramm (Abbildung 21) bzw. den daraus ermittelten Kennwerten (Abbildung 22, Tabelle 4) deutlich. So erreichten die Referenzketten aus POM-H und POM-C Bruchkräfte um 6.000 N und die Recyclingkette mit 4.500 N nur ca. 75 % dieser Werte. Erklärbar wird dies durch den spröden Bruch, da die Kurvenverläufe bis dahin kaum voneinander abweichen und die Vergleichswerkstoffe eine wesentlich höhere Bruchdehnung aufweisen. Bei der Steifigkeit der Ketten sind demnach kaum Unterschiede festzustellen.

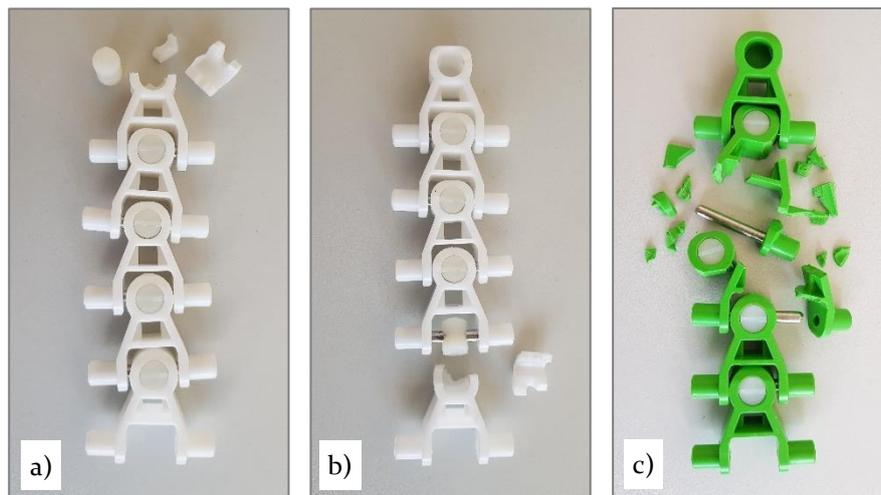


Abbildung 20: Bruchbilder nach statischem Zugversuch; a) POM-H, b) POM-C, c) Rezyklat Rec1

Zum weiteren Vergleich wurden zusätzlich 5 handelsübliche POM-Multiflexketten gleicher Baugröße (POM-01 bis POM-05) im Zugversuch geprüft. Der genaue Materialtyp sowie enthaltene Additive wurden nicht analysiert, zudem waren geringfügige Gestaltungsunterschiede festzustellen. Wie in Abbildung 21 und Tabelle 4 dargestellt, ähneln sich alle Kraft-Dehnungs-Verläufe und damit auch die Steifigkeit sehr stark, die Bruchkräfte streuen dagegen mit 4.100 bis 5.400 N relativ deutlich. Die Bruchkraft der Recyclingkette liegt mit 4.560 N ca. 10 % unterhalb des mittleren Wertes aller untersuchten Ketten aus neuem POM (5.150 N).

Bei der Diskussion der Versuchsergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die maximal zulässige Zugkraft der betrachteten Kettengröße durchgängig mit 1.250 N angegeben wird und die in den Anwendungen auftretenden Kräfte im Allgemeinen deutlich darunter liegen. Innerhalb des in Abbildung 21 hervorgehobenen Arbeitsbereichs zeigen die Ketten infolge der Strukturverformung in den Gelenken bei sehr geringer Zugkraft ein etwas nachgiebigeres Verhalten, dehnen sich jedoch ab ca. 500 N weitestgehend proportional zur Zugkraft.

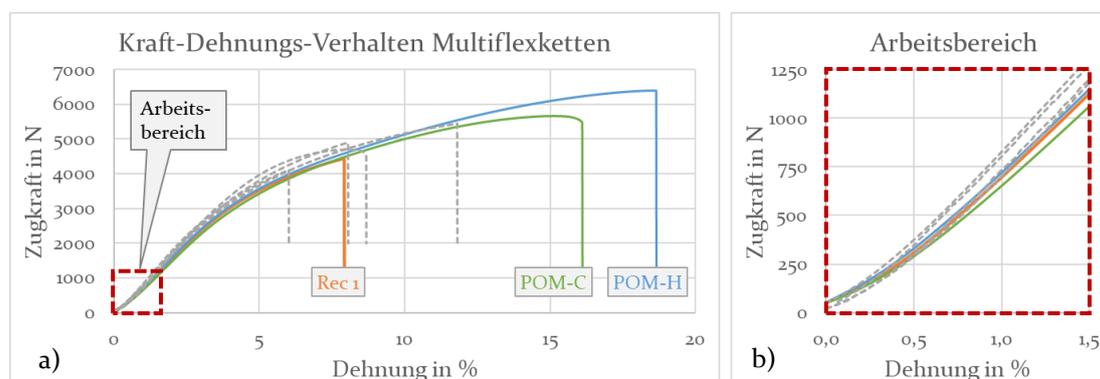


Abbildung 21: a) Kraft-Dehnungs-Diagramme der Rezyklatkette (Rec1) im Vergleich zu den Referenzwerkstoffen sowie zu marktüblichen POM-Multiflexketten gleicher Bauart und Baugröße (gestrichelt, teilweise überlagert); b) herausgezoomter Arbeitsbereich dieser Ketten

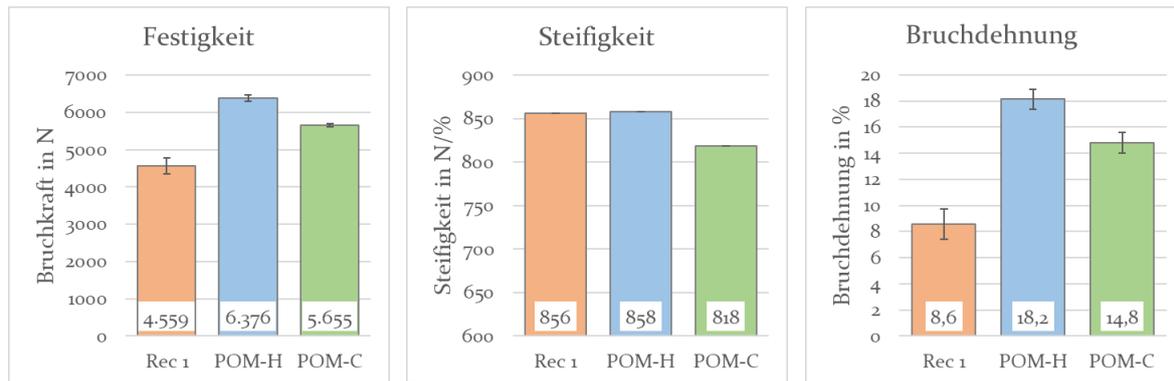


Abbildung 22: Mechanische Eigenschaften der Ketten aus Rezyklat und Referenzwerkstoffen

Tabelle 4: Eigenschaften der Multiflex-Ketten aus POM-Rezyklat (Rec1) im Verhältnis zum Mittelwert aus den Referenzketten (POM-H, POM-C) und marktüblichen POM-Vergleichsketten (POM-01 bis POM-05)

| | | Rec 1 | POM-H | POM-C | POM-01 | POM-02 | POM-03 | POM-04 | POM-05 | MW-POM |
|--------------|-----|-------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|
| Steifigkeit | MPa | 856 | 858 | 818 | 938 | 880 | 940 | 633 | 983 | 864 |
| | | 99% | 99% | 95% | 108% | 102% | 109% | 73% | 114% | 100% |
| Bruchkraft | N | 4559 | 6376 | 5655 | 4107 | 5440 | 4900 | 4877 | 4680 | 5148 |
| | | 89% | 124% | 110% | 80% | 106% | 95% | 95% | 91% | 100% |
| Bruchdehnung | % | 8,6 | 18,2 | 14,8 | 6,1 | 8,6 | 3,7 | 21,0 | 9,0 | 11,6 |
| | | 74% | 156% | 127% | 52% | 74% | 32% | 181% | 77% | 100% |

Verhalten bei dynamischer Beanspruchung

Da die Versuchsdauer selbst bei hohen Prüfkräften mehrere Wochen beträgt, konnten zum Berichtszeitpunkt nur sehr wenige Tests bis zum Bruch und zudem nur mit deutlich über dem Arbeitsbereich liegenden Oberkräften (2000 und 2500 N) durchgeführt werden. Die Ergebnisse sind deshalb als erster Anhaltspunkt zu betrachten und müssen weiter vervollständigt werden.

Der Vergleich der ertragbaren Lastwechsel in Abbildung 23 zeigt, dass das Material POM-H, wie auch beim statischen Zugversuch, die deutlich höchste Langzeitfestigkeit aufweist. Die ertragbaren Lastwechsel der Recyclingkette lagen in den ersten Tests in einer vergleichbaren Größenordnung zu POM-C, sodass dem Rezyklat Rec1 auch hier grundsätzlich brauchbare Eigenschaften bescheinigt werden können.

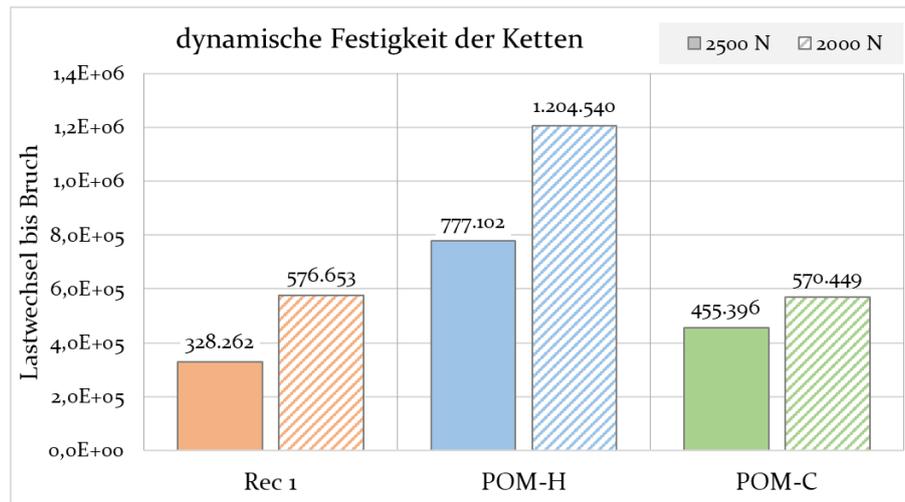


Abbildung 23: Ertragbare Lastwechsel bei Zug-Schwell-Beanspruchung der Ketten mit 2.500 N und 2.000 N Oberlast

Lebensdaueruntersuchungen auf dem Prüfstand nach Abbildung 12 bei praxisnaher dynamischer Beanspruchung über 1.000 N Kettenzugkraft, die im Bereich der zulässigen Zugkraft der Referenzketten (1.250 N) liegen, konnten aufgrund technischer Probleme bisher nicht durchgeführt werden. Längere Laufversuche um 500 N zeigten jedoch keine Auffälligkeiten. In Verbindung mit den beschriebenen Ergebnissen der anderen Tests kann deshalb von einer Funktionsfähigkeit der Recyclingkette auch im Fördersystem ausgegangen werden.

6. Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde die Eignung von Polyoxymethylen (POM) aus industriellen Anwendungen (Post-Consumer-Abfälle) für ein werkstoffliches Recycling dargestellt. Dabei wurde zunächst ein POM-Homo- und ein POM-Copolymer systematisch untersucht. Bei mehrfacher Verarbeitung zeigten sich keine signifikanten Verluste bei den relevanten mechanischen und tribologischen Eigenschaften. Eine Mischung beider Werkstofftypen, die im industriellen Recyclingprozess kaum zu unterscheiden sind, gelang hinsichtlich der Verarbeitung sowie der Eigenschaften ebenfalls sehr gut. Insbesondere bei Festigkeit und Schlagzähigkeit ordnen sich die Kennwerte der Blends entsprechend dem Mischungsverhältnis zwischen den Grundwerkstoffen an.

Aus gebrauchten, mehrere Jahre im Einsatz befindlichen Förderketten wurde anschließend ein Rezyklat aus jeweils 50 % POM-H und POM-C hergestellt. Bei den mechanischen Eigenschaften waren dabei ein spröderes Bruchverhalten sowie ca. 15-20% Festigkeitsverlust gegenüber den Referenzwerkstoffen zu verzeichnen, bezüglich Steifigkeit und Schlagzähigkeit ergaben sich keine wesentlichen Änderungen. Auch beim Reibungs- und Verschleißverhalten waren keine Unterschiede zu den POM-Vergleichsmaterialien erkennbar.

Die aus dem Rezyklat gefertigten Förderketten zeigten ein ähnliches mechanisches Verhalten wie die Zugstäbe. Während bei der Steifigkeit keine Unterschiede festgestellt

wurden, fiel die Bruchkraft gegenüber den gleichartigen Ketten aus den Referenzwerkstoffen um ca. 20-30 % ab, was u. a. auf das sprödere Bruchverhalten zurückzuführen ist. Hierbei ist anzumerken, dass ein Vergleich mit marktüblichen Förderketten gleicher Baugröße im Durchschnitt nur etwa 10 % Festigkeitsverlust erbrachte und dass die Ketten in der Regel weit unterhalb der zulässigen Zugkräfte betrieben werden.

Die Verarbeitung des Rezyklats erfolgte problemlos, die gefertigten Teile wiesen eine gute Oberflächenqualität auf. Eine leichte Vergilbung durch Mehrfachverarbeitung und ggf. geringfügige Verschmutzungsreste konnten durch die Einfärbung problemlos kaschiert werden. In Verbindung mit den brauchbaren mechanischen und tribologischen Eigenschaften kann resümiert werden, dass sich neben Verarbeitungsresten (Post-Industrial-Abfälle) auch leicht verunreinigte und viele Jahre genutzte Post-Consumer-Abfälle für ein stoffliches Recycling eignen. Unter Berücksichtigung der relativ geringen Festigkeitsverluste ist dabei auch ein Closed-Loop-Recycling, d. h. ein geschlossener Materialkreislauf ohne Zusatz von Neumaterial, denkbar.

Danksagung

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

Ein Dank gilt weiterhin den Unternehmen

- Kunststoffrecycling CKT GmbH & Co. KG, Bad Langensalza und
- Modular Automation GmbH, Darmstadt

für die Zusammenarbeit im Rahmen des zugrundeliegenden ZIM-Kooperationsprojektes.

Quellen

- [1] Conversio: Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019, Kurzfassung. Conversio Market & Strategy GmbH, 2020.
- [2] PlasticsEurope: Plastic the Facts 2020. URL: https://www.plasticseurope.org/application/files/8016/1125/2189/AF_Plastics_the_facts-WEB-2020-ING_FINAL.pdf, Abruf 22.10.2021.
- [3] PlasticsEurope: The Circular Economy for Plastics – A European Overview. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/the-circular-economy-for-plastics-a-european-overview-2/>, Abruf 22.10.2021.
- [4] Röchling-Stiftung: Wertsachen. PolyProblem-Report 2020. <http://www.polyproblem.org>, Abruf 09.02.2021.
- [5] Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister: Recyclingquoten 2020. <https://www.verpackungsregister.org/information-orientierung/themen-verpackg/zahlen-daten-fakten>, Abruf 07.07.2022.
- [6] Prognos AG: Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2020. <https://statusbericht-kreislaufwirtschaft.de>, Abruf 07.08.2022.
- [7] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG). Gesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl.

- I S. 212), das zuletzt durch Artikel 20 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist.
- [8] Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen (Verpackungsgesetz - VerpackG). Gesetz vom 5. Juli 2017 (BGBl. I S. 2234), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 22. September 2021 (BGBl. I S. 4363) geändert worden ist.
- [9] RICHTLINIE (EU) 2019/904 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 5. Juni 2019 über die Verringerung der Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt.
- [10] Verordnung über die Beschaffenheit und Kennzeichnung von bestimmten Einwegkunststoffprodukten (Einwegkunststoffkennzeichnungsverordnung - EWKKennzV). Einwegkunststoffkennzeichnungsverordnung vom 24. Juni 2021 (BGBl. I S. 2024).
- [11] RICHTLINIE 2003/96/EG DES RATES vom 27. Oktober 2003 zur Restrukturierung der gemeinschaftlichen Rahmenvorschriften zur Besteuerung von Energieerzeugnissen und elektrischem Strom.
- [12] Lidl Dienstleistung GmbH & Co. KG: Kreislaufwirtschaft bei Lidl - Einsatz für mehr Recycling. <https://unternehmen.lidl.de/verantwortung/fokusthema-plastik/recycling>, Abruf 07.08.2022.
- [13] Coca-Cola Deutschland: 10 Fakten über Recycling bei Coca-Cola. <https://www.coca-cola-deutschland.de/verantwortung/verpackungen/10-fakten-recycling>, Abruf 07.08.2022.
- [14] Romina Mineralbrunnen GmbH: <https://www.eiszeitquell.de/mineralwasser/aktionen/100-prozent-recycle-pet-flaschen/>, Abruf 07.08.2022.
- [15] Elisabethen Quelle 0,75 l PET EW aus Recycling-PET: <https://www.hassia.com/news/elisabethen-quelle-0-75-l-pet-ew-recyclat>, Abruf 07.08.2022.
- [16] rose plastic AG: Kunststoffverpackungen aus Rezyklat (PCR) <https://www.rose-plastic.de/de/unternehmen/nachhaltigkeit/kunststoffverpackungen-aus-rezyklat>, Abruf 07.08.2022.
- [17] Aurora Kunststoffe GmbH: Recyclingkonzept | Aurora Lean-Logistik: <https://www.aurora-kunststoffe.de/index.php/de/kunststoffrecycling/recyclingkonzept-aurora-lean-logistik>, Abruf 07.08.2022.
- [18] Baur, E.; Harsch, G.; Moneke, M.: Werkstoff-Führer Kunststoffe: Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte. II. aktualisierte Aufl.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2019.
- [19] Zöllner, A., Greulich, S.: „Entwicklung mit hohen Anforderungen“, Kunststoffe, Bd. 10/2019, S. 110–117, 2019.
- [20] Celanese; CAMPUSplastics: Datenblatt HOSTAFORM® C 9021. URL <https://www.campusplastics.com/campus/de/datasheet/HOSTAFORM%C2%AE+C+9021/Celanese/163/651a61bb>. Abruf: 12.10.2021
- [21] DuPont: CAMPUSplastics: Datenblatt Delrin® 100TL NC010. URL <https://www.campusplastics.com/campus/de/datasheet/Delrin%C2%AE+FGI00TL+NC010/DuPont+Engineering+Polymers/52/58b72752>. Abruf: 12.10.2021.
- [22] DRY-ICE-TEC GmbH: Trockeneisreinigung - Das Verfahren. http://www.trockeneisreinigung.pro/reinigung_mit_trockeneis_das_reinigungsverfahren_von_dry_ice_tec.html, Abruf 07.07.2022.
- [23] Cold Jet: Trockeneisreinigungslösungen. <https://www.coldjet.com/de/trockeneisstrahlen/>, Abruf 07.07.2022.
- [24] Sumpf, Jens; Bona, Marcus; Lüdemann, Lynn; Golder, Markus: Ökologische Nachhaltigkeit mit Kunststoffförderketten – Chancen und Herausforderungen. Technomer 2021: 27. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren, Chemnitz, November 2021, ISBN 978-3-939382-15-7, URN urn:nbn:de:bsz:chl-qucosa2-768515