

Effiziente Technologien zur Herstellung von endlosfaserverstärkten, schmierungsfreien Antriebs- und Förderketten

Hagen Bankwitz

Institut für Fördertechnik und Kunststoffe, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Straße 70,
09126 Chemnitz, Germany

Erstveröffentlichung: Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren (Technomer):
Tagungsband: Nichtöffentliches Onlinearchiv, Vol. 25, November 2017, Chemnitz, ISBN 978-3-939382-13-3
Onlineveröffentlichung: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-231798>

KURZFASSUNG Im Beitrag sind Überlegungen hinsichtlich der optimalen Geometrie des Kettengliedes dargestellt. Daraus wurde ein Innenglied mit zwei gewickelten Einlegern entwickelt. Das äußere Kettenglied entspricht dem einer Rollenkette. Die Geometrie der Einleger wurde mithilfe der FEM optimiert, sodass durch zwei Einleger aus Glasfaser die Dehnung auf ca. 57% bzw. für Kohle-faser auf ca. 39% reduziert werden konnte.

SCHLAGWÖRTER Faserverstärkung, Hybridkette, Antriebskette, Förderkette

ABSTRACT *Efficient technologies for the production of endless fiber-reinforced and lubrication-free chains for drive or conveying systems:* The article presents considerations regarding the optimal geometry of chain links. From this, an inner link with two wound inserts was developed. The outer chain link corresponds to that of a roller chain. The geometry of the inserts was optimized by a FEM analysis. With two inserts it is possible to reduce the elongation to approx. 57% (glass fiber) and approx. 39% (carbon fiber).

KEYWORDS fiber reinforcement, hybrid chain, drive chain, conveyor chain

1. Motivation und Zielstellung

Rollen- und Buchsenketten aus Stahl sind in vielen Bereichen der Antriebs- und Fördertechnik weit verbreitet. Als Antriebselement sind sie eine kostengünstige Variante, um Drehmomente und Drehbewegungen formschlüssig zu übertragen. Im Bereich der Fördertechnik werden Rollenketten durch Modifikation als Zug- und Tragorgan für den Stückguttransport eingesetzt. Um einen ruhigen und gleichmäßigen Lauf sowie eine hohe Lebensdauer von Stahlketten zu gewährleisten, ist die Schmierung der Glieder und Bolzen notwendig. In Anwendungsgebieten wie der Lebensmittelbranche oder der Pharmaindustrie herrschen jedoch sehr hohe Anforderungen an den Reinheitsgrad. Für dieses Einsatzgebiet sind die geschmierten Ketten nicht geeignet bzw. müssen dann aufwendig gekapselt werden. Die Folge sind höhere Kosten bei der Anschaffung und Wartung der Förderanlage.

Im Hochtemperaturbereich ist die Realisierung einer ausreichenden Schmierung der Stahlketten besonders anspruchsvoll. Der Schmierstoff verdampft rückstandlos und muss

immer neu aufgetragen werden. Außerdem stellen die regelmäßige, oft mit dem Stillstand der Anlagen verbundene Wartung sowie der Schmierstoff selbst, mit seinen speziellen Eigenschaften wie Lebensmittelverträglichkeit, Abtropffestigkeit oder Hochtemperaturbeständigkeit, teilweise erhebliche Kostenfaktoren dar.

Im Gegensatz dazu ermöglichen Ketten aus Kunststoff einen schmierungs- und wartungsfreien Betrieb. Als Multiflex-, Scharnierband- und Mattenketten sind diese bereits in vielen förder-technischen Anwendungen weit verbreitet und akzeptiert. Die Verwendung von Kunststoff für alle Bauteile der Rollen- oder Buchsenketten ist zwar grundsätzlich bekannt, diese Varianten sind jedoch nicht auf dem Markt erhältlich. Grund dafür dürfte die, auch für untergeordnete Anwendungen, wesentlich zu geringe Festigkeit und Steifigkeit dieser Ketten sein.

Die Motivation zur Entwicklung einer Vollkunststoff-/Hybridkette mit deutlich gesteigerter Belastbarkeit begründet sich in dem Wunsch der vollständigen Schmierstofffreiheit. Dies setzt voraus, dass auch die Kontaktpartner wie Kettenräder oder Führungsschienen ohne Schmierung eine hohe Lebensdauer erreichen. Die bisherigen, schmierstofffreien Lösungen haben den Nachteil, dass es sich äußerlich um trocken laufende Stahlketten handelt. Das Gelenk selber ist zwar wartungsfrei, jedoch kommt es bei Kontakt mit der Kette zu Verschleiß an den Gegenpartnern. Weiterhin ist das Geräuschniveau einer äußerlich ungeschmierten Stahlkette deutlich höher als das einer geschmierten Kette. Der Schmierstoff wirkt hier als Geräuschdämpfer. Abhängig von der Geschwindigkeit der Anlage kann daher eine Kapselung zur Reduzierung der Geräuschemission erforderlich sein, was mit entsprechend hohen Kosten verbunden ist.

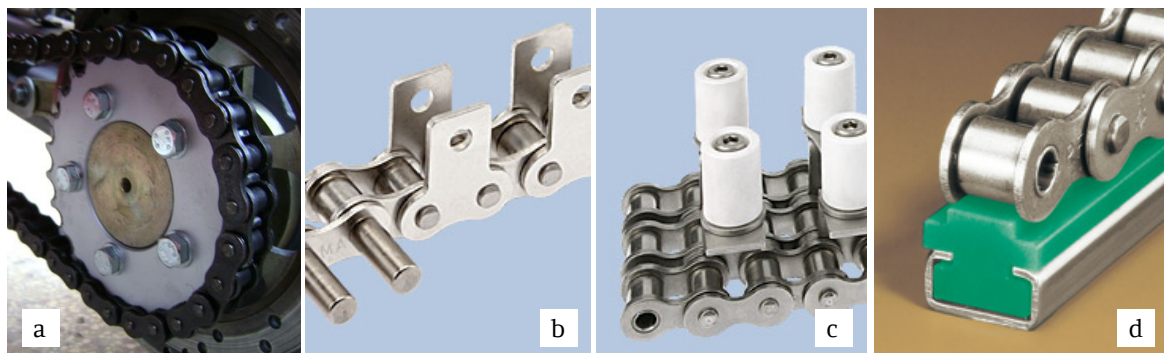


Abbildung 1: Einsatz von Rollenketten: a) Antriebskette, b/c) Förderkette mit Sonderlaschen / bolzen oder Zusatzelementen [Wippermann], d) Stütz- und Führungsschiene für Förderaufgaben [Murtfeldt]

2. Entwicklung der Kette

Prinzipiell können Kunststoffe mit Fasern unterschiedlicher Länge und Orientierung verstärkt werden. Für eine tribologisch beanspruchte Oberfläche ist es wichtig, dass keine Faser an der Oberfläche liegt, da sonst die Fasern zu einem sehr hohen Verschleiß führen. Um diesen Effekt zu verhindern, müssen die Fasern orientiert in den Kunststoff gebracht werden. Das heißt, dass sie von der Oberfläche einen Mindestabstand haben müssen. Dafür bieten sich besonders thermofixierte Endlosfasern an, da diese außerdem eine hohe Zugfestigkeit besitzen. Diese Verstärkungsstrukturen, auch Einleger genannt, werden in die Kettenlasche möglichst nahe am Krafteinleitungspunkt, also in Bolzen- bzw. Buchsennähe, eingebracht, wie in Abbildung 2 dargestellt.

Die Geometrie des Einlegers muss so gewählt werden, dass eine möglichst hohe Steifigkeit bei gleichzeitig geringer Belastung des Einlegers gewährleistet wird. Aus diesen Überlegungen wurden die folgenden drei Einlegegeometrien, siehe Abbildung 3, abgeleitet.

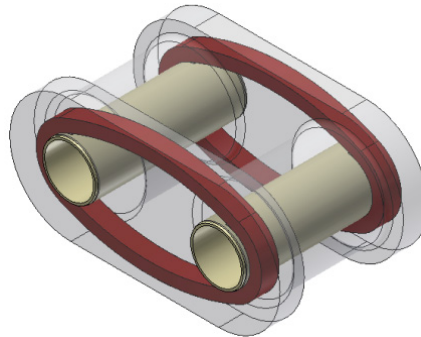


Abbildung 2: Kettenglied mit Einleger (rot) und Kunststoffbuchsen (beige)

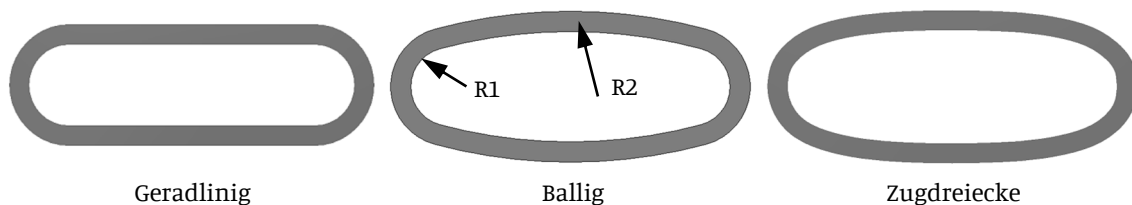


Abbildung 3: Untersuchte Einlegegeometrien

Die einfachste Form, in Abbildung 3 als geradlinig bezeichnet, setzt sich aus zwei Kreisbögen die mit zwei geraden Abschnitten verbunden sind zusammen. Der Innenradius der Kreisbögen entspricht dem Außenradius der Buchse. Vorteilhaft ist die hohe Überdeckung im Kontaktbereich zwischen Bolzen und Einleger. Nachteilig ist der unstetige Übergang der Krümmung zwischen Kreisbogen und Gerade. Daraus resultieren erhöhte Spannungen im Bauteil.

Als Zweites wurde eine ballige Form betrachtet. Diese setzt sich aus zwei Mal zwei Kreisbögen mit unterschiedlichen Radien zusammen, siehe Abbildung 3. Diese Form weist eine hohe Überdeckung im Kontaktbereich zwischen Bolzen und Einleger auf. Ein weiterer Vorteil ist der günstigere Übergang zwischen den beiden Bögen, sodass nur eine geringe Spannungserhöhung im Bauteil resultiert.

Die dritte untersuchte Form wurde nach dem Prinzip der Zugdreiecke konstruiert. Die Vorgehensweise veranschaulicht Abbildung 4. Vorteil dieser Form ist das günstigste Übergangsverhalten zwischen den Bögen und die damit verbundene reduzierte Bauteilspannung. Nachteilig ist die geringe Kontaktfläche zwischen Einleger und Bolzen.

Neben der Modifikation der Form des Einlegers kann auch der Querschnitt variiert werden. Die günstigste Querschnittsform ist ein Rechteck, das möglichst breit und flach ist, vgl. Tabelle 1. Die Breite wird durch die zulässige Kettenlaschenbreite definiert. Die Höhe ergibt sich aus der ertragbaren Spannung und der Herstellbarkeit, also einer minimalen Anzahl von Wicklungen. Es wurde sich für einen Rechteckquerschnitt mit 3 mm Breite und einer Höhe von 2 mm entschieden. Damit ist die Kettenlaschenbreite noch so groß, dass Standardkettenräder im Getriebe verwendet werden können.

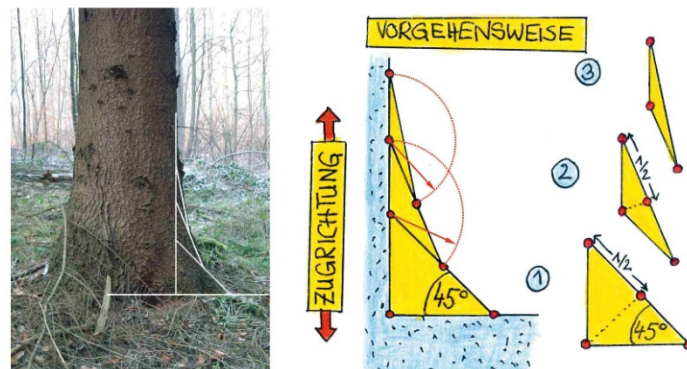


Abbildung 4: Methode der Zugdreiecke [1]

Tabelle 1: Querschnittsformen

	Normalspannung (maximal) [MPa]	Radialspannung (maximal) [MPa]	Verformung (Halbmodell, maximal) [mm]
	224,07	9,19	0,32
	190,70	6,58	0,28
	159,04	3,48	0,24
	145,82	3,37	0,23

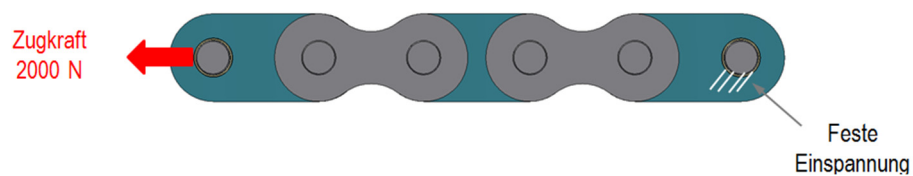


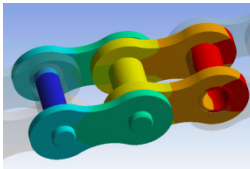
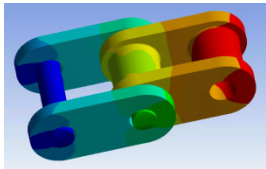
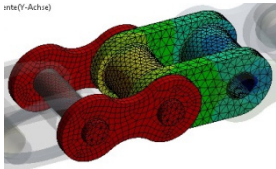
Abbildung 5: Simulationsmodell

Neben der Einlegergeometrie ist für die Steifigkeit bzw. Festigkeit das verwendete Material von großer Bedeutung. Für die Anwendung in Kunststoffketten sind Glas- und Kohlefasern von Relevanz, welche im Weiteren untersucht wurden.

Um den Einfluss der einzelnen Parameter zu ermitteln, wurde ein nichtlineares FEM-Modell der Hybridkette erstellt. Mit diesem Modell können Spannungen und Verformungen der Kette unter Last simuliert werden. Die äußeren Belastungen der Simulationen wurden, wie in der Abbildung 5 dargestellt, definiert. Die linke Seite der Kette wurde dabei mit einer Last schrittweise beaufschlagt, während die rechte Seite fest eingespannt wurde.

Zuerst wurden Untersuchungen hinsichtlich der Verformung der Kette unter Last durchgeführt. Dabei wurden Kettenlaschen mit und ohne Faserverstärkung sowie als Referenz ein Kettenglied aus Stahl untersucht. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Dehnung der Kette für verschiedene Ausführungen und Materialien (F=2000N)

							
	Referenzkette	Kunststoff komplett			Hybridkette		
Material	Stahl	PBT	POM	PEEK +GF	PBT	PBT +Einleger GF	PBT +Einleger CF
Dehnung	0,076 %	1,2 %	0,94 %	0,385 %	0,65 %	0,37 %	0,25 %

Die unverstärkten Kunststoffe wiesen eine sehr hohe Dehnung auf, sodass sie für den Anwendungsfall nicht bzw. nur mit sehr reduzierter Kraft eingesetzt werden können. Die Dehnung der faserverstärkten Kunststoffe hingegen war deutlich geringer. Gegenüber der Stahlvariante ist diese jedoch selbst bei einem glasfaserverstärkten Hochleistungskunststoff (PEEK+GF) immer noch ca. 5-mal größer. Aus diesem Grund wurde die Umsetzung einer Hybridkette aus Stahl-Außenlaschen und einem faserverstärkten Kunststoff-Innenglied beschlossen. Diese würde bei Verstärkung mit einem Einleger nur noch eine Dehnung unter Last von ca. 3-mal der Stahlvariante aufweisen. Im Weiteren wurde deshalb nur eine Hybridkette untersucht.

Um den Einfluss der Einlegerbreite zu verdeutlichen, ist in Abbildung 6 die Vergleichsspannung zweier Ketten mit unterschiedlichen Einlegern dargestellt. Das linke Bild zeigt einen Einleger mit einer Breite von 3 mm, während das rechte Bild einen Einleger mit 4 mm Breite zeigt. Es ist ersichtlich, dass die maximale Vergleichsspannung für den Einleger mit 3 mm größer ist als die für den Einleger mit 4 mm. Jedoch ist eine Vergleichsspannung von 104 MPa sowohl für Glas als auch für Kohle problemlos zu ertragen. Der Einleger mit 4 mm Breite hätte gegenüber einer Kette nach ISO 606 eine Erhöhung der Kettenlaschenbreite zur Folge. Daraus folgt entweder eine Erhöhung der Kettenbreite oder eine Reduzierung des Innenabstands der Kettenlaschen. Folge der letzten Variante ist, dass keine Standardkettenräder eingesetzt werden können und somit nur unwirtschaftliche Sonderlösungen zum Einsatz kommen. Eine Verbreiterung des Kettengliedes kann in der Praxis auch zu Problemen führen (Thema Bauraum). Als Ergebnis dieser Betrachtungen wurde die Einlegerbreite auf 3 mm festgelegt.

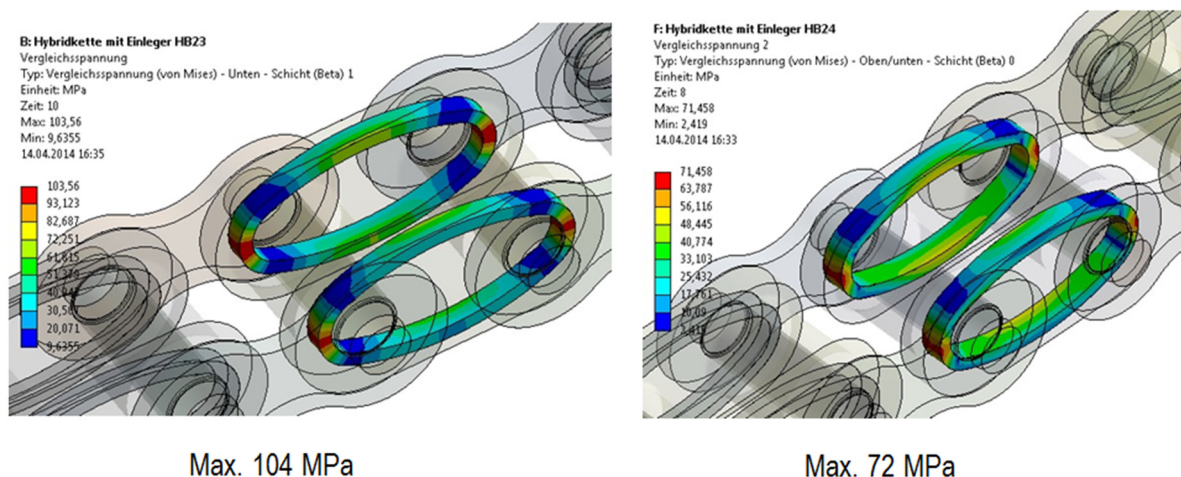


Abbildung 6: Vergleichsspannungen im Einleger

3. Experimentelle Untersuchungen

Zur Verifikation der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit der verschiedenen Material- und Einlegervarianten wurden Zugversuche durchgeführt (vgl. Abbildung 7). In Bezug auf die Maximalkraft konnten dabei mit der ovalen Einlegergeometrie (Material PA-CF) Kennwerte im Bereich von 4800 N erzielt werden. Eine Verdopplung der Einlegerdicke von 3 auf 6 Wickellagen führte darüber hinaus nur teilweise zu einer geringfügigen Steigerung der übertragbaren Maximalkraft. Bei der rechnerischen Auslegung des Kettengliedes sowie bei der weiteren Bauteil- und Werkzeugentwicklung sind diese Erkenntnisse mit einzubeziehen.

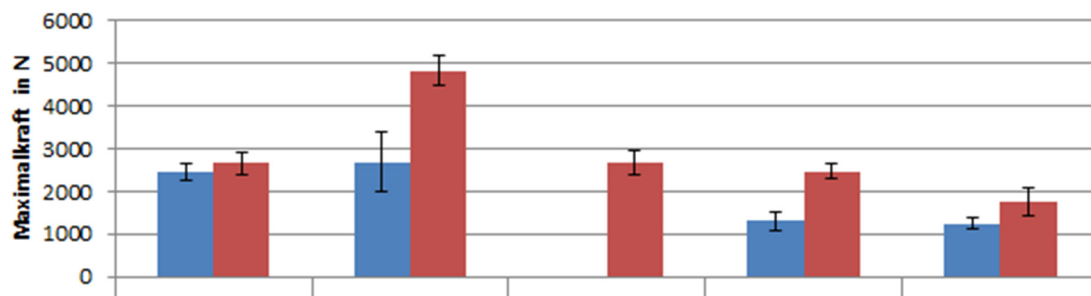


Abbildung 7: Bruchkraft einer Kettenlasche

Für die weiteren Untersuchungen wurde sich aufgrund der Ergebnisse der Voruntersuchungen der Kettenlaschen und der FEM-Rechnungen für folgende Matrixmaterialien entschieden: PBT, PA, PA+30% GF (30% Glasfaseranteil) und POM (Vergleichsbasis). Als Einlegermaterial wurde sich aufgrund der Anbindung bei PBT für Glasfaser PBT+6L GF (6 Lagen) und bei PA für Kohlefaser PA+3L CF (3 Lagen) und PA+6L CF (6 Lagen) entschieden.

Zunächst wurden tribologische Untersuchungen an Probekörpern mithilfe der an der Professur Fördertechnik befindlichen Prüfmaschinen durchgeführt. Die Prüfmaschinen bilden einen oszillierten Platte-Platte-Versuch ab, welcher für die Abbildung von fördertechnischen Anwendungen bestens geeignet ist. Beim Test wird eine Oberprobe durch eine Feder mit einer Normalkraft beaufschlagt und über eine ruhende Unterprobe bewegt (siehe Abbildung 8). Diese

befindet sich auf einem reibungsfrei gelagerten Messtisch, welcher durch zwei senkrecht angeordnete Federbleche mit dem Gestell verbunden ist. Die durch die Bewegung resultierende Reibkraft führt zur Auslenkung des Messtisches, wobei sich die über einen in Bewegungsrichtung orientierten Wegsensor erfasste Tischbewegung proportional zur Reibkraft verhält.

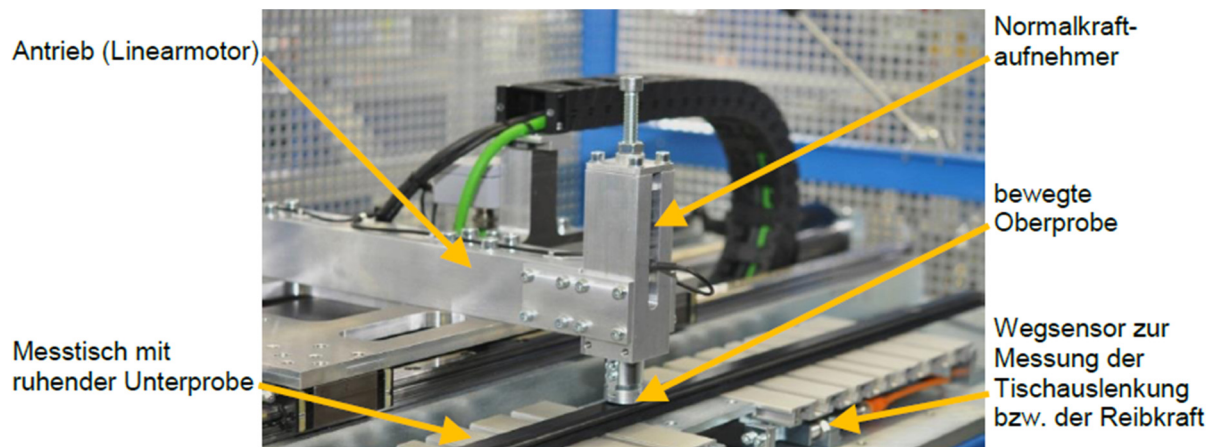


Abbildung 8: Detailaufnahme eines Messplatzes am Reibungs- und Verschleißprüfstand [2]

Als Versuchsdauer wurde 24 h gewählt, welche einen Mindestwert für tribologische Untersuchungen an Kunststoff-Kunststoffpaarungen darstellt. Zum einen besitzen diese ein ausgeprägtes Einlaufverhalten und zeigen zu Beginn der Ermittlung meist sehr niedrige Reibwerte ($\mu \approx 0,1$). Üblicherweise folgt danach ein Anstieg über mehrere Stunden, bis hin zur Sättigung auf ein repräsentatives (Langzeit-) Reibwertniveau. Andererseits zeichnen sich diese Paarungen durch einen nur minimalen Verschleiß aus, was eine lange Prüfdauer nochmals unterstreicht. Selbst nach 24 h Versuchsdauer können bekannte Methoden zur Quantifizierung des Verschleißes, wie Masseverlust oder Messverfahren zur Bestimmung des Verschleißvolumens, nicht bzw. nur mit unzureichender Genauigkeit angewendet werden. Kriechvorgänge, Messfehler durch Feuchtigkeitsaufnahme oder Aufschmelzen durch Überlastung sind polymerspezifische Erscheinungen, welche den geringen Verschleiß quantitativ überlagern.

Aufgrund dieser komplexen Zusammenhänge wurde für die Verschleißbeurteilung vor Jahren ein subjektives Bewertungsverfahren an der Professur Fördertechnik entwickelt, siehe [2], wonach sichtbare Verschleißspuren und Abrieb beurteilt werden können. Der Verschleiß wird dabei nach folgender Skala unterteilt:

- 0 kein sichtbarer Verschleiß
- 0,5 leichte Glanzunterschiede, Nuancen einer Laufspur erkennbar
- 1 leichte oberflächliche Kratzer, geringe Einlaufspur, minimaler Abrieb
- 2 leichte Furchenbildung, sichtbarer Abrieb oder leichtes Aufschmelzen einzelner Bereiche
- 3 starke Oberflächenveränderung, deutliche Laufspur, viel Abrieb oder starke Aufschmelzungen
- 4 verschleißbedingter Abbruch des Versuchs vor geplantem Versuchsende

Die Ergebnisse der Untersuchungen (Reib- und Verschleißwert) wurden aus vier Messungen gemittelt und sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Dabei wurden die ausgewählten Materialien gegen ein Polyethylen (typisches Führungsschienenmaterial) und gegen Edelstahl (simuliert den Kontakt zwischen Innen- und Außenkettenglied) getestet.

Die Reib- und Verschleißwerte zwischen den unterschiedlichen Matrixmaterialien und dem PE waren relativ ähnlich und in einem für die Praxisanwendung guten Bereich. Der Verschleiß bei dem Versuch mit glasfaserverstärktem Polyamid gegen Stahl war jedoch erhöht, was eine geringere Lebensdauer nach sich zieht. Die anderen Materialien wiesen einen geringeren Verschleißwert auf, sodass diese in der realen Anwendung zu bevorzugen sind.

Tabelle 3: Ergebnisse der tribologischen Untersuchungen

		POM	PBT	PA	PA+GF30
PE	Reibwert	0,29	0,31	0,31	0,28
	Verschleiß	0,9	0,7	1	0,9
	Verschleiß PE	0,9	0,9	1	0,6
Stahl	Reibwert	0,25	0,39	0,63	0,39
	Verschleiß	1	1,3	1,5	2
	Verschleiß Stahl	0,5	0	0	1

Tabelle 4: Ergebnisse der Zugprüfung

	POM	PBT	PBT +6L GF	PA	PA GF30	PA +3L CF	PA +6L CF	PA GF30 +6L CF
Mittlere Zugfestigkeit [N]	6105	6186	3829	9067	8267	4764	4989	19012
Zugfestigkeit über 6000N	5/10	9/10	1/10	10/10	10/10	3/10	1/10	10/10
Zugsteifigkeit [N/mm] bei 6000 N	2218	2348	3601	3000	4143	3720	4466	4212
Dehnung [%] bei 2000N	3,6	3,4	2,2	2,6	1,9	2,1	1,8	3,2
Dehnung [%] bei 6000N	10,7	10,1	6,6	7,9	5,7	6,4	5,3	5,6

Weiterhin wurden Tests zur Bestimmung der statischen Bruchkraft und der dynamischen Langzeitfestigkeit durchgeführt. Zuerst wurden für einzelne Innenglieder die Zugfestigkeit und -steifigkeit experimentell ermittelt. Hierfür wurden jeweils 10 Proben in einer Universalzugprüfmaschine bis zum Bruch belastet. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse dargestellt. Die geforderte Zugfestigkeit von mindestens 6000 N wiesen zu 100% der Proben nur die Kettenglieder aus PA und PA GF30 ohne Einleger und die Variante PA GF30 + 6LCF (mit Einleger) auf. Bei allen anderen Varianten gab es mindestens eine Probe, die vor 6000 N Zugkraft gebrochen war. Besonders kritisch waren die Kettenglieder mit Einleger, bei denen keine reproduzierbaren Eigenschaften gemessen werden konnten. Bei den Steifigkeitswerten konnte dagegen eine signifikante Erhöhung bei den Kettengliedern mit Verstärkung (Einleger und Glasfasern) gegenüber den unverstärkten Gliedern festgestellt werden.

Als Hauptursache für das frühe Versagen der mit den Einlegern verstärkten Kettenglieder wurden thermische Eigenspannungen ausgemacht. Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und den E-Modulen von Matrix- und Einlegermaterial entstehen Eigenspannungen während der Abkühlung nach dem Spritzgießprozess, die das Matrixmaterial so sehr vorspannen, dass eine geringe äußere Last dazu führt, dass der Kunststoff reißt, vgl. Abbildung 9a.

Weiterhin wurden einige Einleger, besonders die 3-lagigen Einleger, während des Fertigungsprozesses verformt bzw. zusammengedrückt, vgl. Abbildung 9b und c. Das Zusammendrücken des Einlegers wurde durch weitere Modifikation am Werkzeug eliminiert. Die Verformung wurde durch Verwendung von 6-lagigen Einlegern behoben.

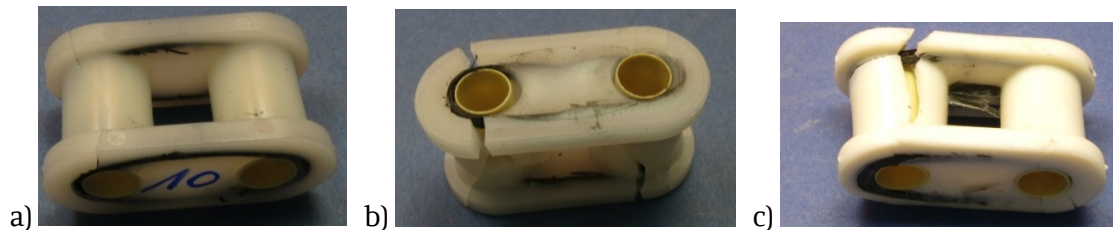


Abbildung 9: Zerstörungsbilder der Kettenglieder



Abbildung 10: Prüfaufbau Langzeituntersuchung der Kettenstücke

Als nächster Schritt wurden dynamische Festigkeitsprüfungen durchgeführt. Aufgrund der hohen Versuchsdauer wurde das Versuchsprogramm gekürzt, sodass keine Probe von den Varianten PA und PA+3L CF untersucht wurden. Die Kettenglieder aus POM bzw. PBT wurden lediglich in einem Langzeitversuch ohne Wiederholung getestet, da davon ausgegangen wurde, dass diese Belastungen ertragen werden können. Für die anderen Varianten wurden die Tests viermal wiederholt. Dabei wurde immer ein Kettenstrang aus 5 Gliedern (3 Außen und 2 Innenglieder) auf der Prüfmaschine getestet, siehe auch Abbildung 10. Die Versuche wurden bei 10 Hz Prüf-frequenz mit einer Oberkraft von 2000 N und einer Unterkraft von 100 N durchgeführt. Die maximale Zyklenzahl, bei denen der Test beendet worden ist, betrug 2×10^6 . Bei den Varianten POM, PBT, PA GF30, PA+6L CF und PA GF30+6L CF liefen alle Versuche bis zur Grenzzyklenzahl durch. Lediglich die Variante PBT+6L GF hatte zwei vorzeitige Ausfälle.

Im weiteren Projektverlauf wurde ein Funktionsdemonstrator in Form eines Tragkettenförderers entwickelt und gebaut. Mit dieser Anlage können realitätsnahe Bedingungen für den Einsatz der Kette in einem Tragkettenförderer simuliert werden. In den Gleitschienen wurden Thermoelemente eingebaut, um den Temperaturverlauf kontinuierlich zu messen. Eine Verschleißbewertung wurde in definierten Intervallen optisch durchgeführt.

Unter der bewegten Masse von 100 kg wurden je ein Kettenstrang mit der PA-Variante und ein Strang mit der PA+30GF-Variante eingebaut. Insgesamt konnte nach einer Laufzeit von ca. 2 Monaten (entspricht mehr als 1000 km) kein signifikanter Verschleiß festgestellt werden.

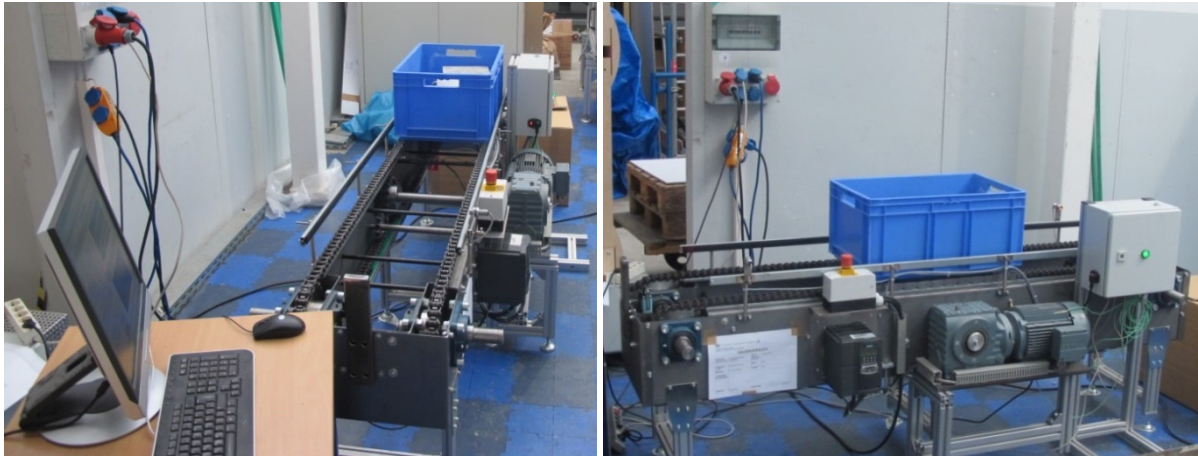


Abbildung 11: Tragkettenförderer

4. Zusammenfassung

In dem vom BMWi geförderten Verbundprojekt „Effiziente Technologien zur Herstellung von endlosfaserverstärkten, schmierungsfreien Antriebs- und Förderketten“ wurde eine Hybridkette aus einem verstärkten Kunststoffinnenglied mit zwei Außenlaschen aus Edelstahl entwickelt. Dabei wurde das Innenglied zunächst mittels FEM optimiert. Mit den gewonnenen Erkenntnissen wurden erste Versuchskörper hergestellt und getestet. Als beste Einlegervariante stellte sich sowohl bei den FEM-Untersuchungen als auch bei den Zugversuchen ein ovaler Einleger heraus. Im Anschluss wurden Ketteninnenglieder aus verschiedenen Matrixmaterialien mit unterschiedlichen Einlegervarianten untersucht. Bei den dynamischen Zugversuchen wurde festgestellt, dass lediglich die Variante mit glasfaserverstärktem Polyamid und Kohlefasereinleger die Anforderungen an die Dauerfestigkeit erfüllt. Die tribologischen Eigenschaften der möglichen Matrixmaterialien wurden zunächst an einem Modellprüfstand untersucht. Abschließend wurden Langzeituntersuchungen am Beispiel eines Tragkettenförderers für die besten Varianten durchgeführt. Dabei wurde über die Laufzeit von über einem Monat optisch kein Verschleiß festgestellt.

Literatur

- [1] Matteck, C.: Design in der Natur. Rombach Druck- und Verlagshaus, 1996.
- [2] Bergmann, A.; Sumpf, J.; Bartsch, R.; Weise, S.; Faust, K.; Illek, R.: Tribologische Untersuchung und Beurteilung fördertechnisch relevanter polymerer Werkstoff. Tagungsband Technomer 2013.