

Praxisnahe, tribologische Untersuchungen an Förderketten mittels Universal-Tribometer

Arndt Schumann^{1*}, Sebastian Weise², Steffen Leisnig³

¹ TriboPlast GmbH, Chemnitz, Germany

² Professur Förder- und Materialflusstechnik, Technische Universität Chemnitz, Germany

³ LSA GmbH, Wolkenstein, Germany

* Korrespondenz: arndt.schumann@triboplast.de

Erhalten am 2. November 2020; Angenommen am 3. November 2020; Online zugänglich seit 7. Dezember 2020

© 2020 by A. Schumann u.a. Dies ist ein Open-Access-Artikel, der unter der Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0) verbreitet wird, die die uneingeschränkte Nutzung, Verbreitung und Vervielfältigung in jedem Medium erlaubt, vorausgesetzt, das Originalwerk wird ordnungsgemäß zitiert.

ABSTRACT Bei der Entwicklung tribologisch beanspruchter Baugruppen werden zu Beginn Modellversuche mit vereinfachten Probekörpern durchgeführt. Bei geringen Kosten lässt sich damit die Eignung ausgewählter Werkstoffkombinationen (Reibpaarungen) abschätzen. Die ermittelten Reibungs- und Verschleißkennwerte der Modellversuche weichen jedoch oft stark vom tribologischen Verhalten der realen Baugruppe ab. Die Abweichung der Kennwerte ist von den Unterschieden zwischen dem tribologischen System der Modellversuche und dem tribologischen System der realen Baugruppe abhängig. Das heißt, je größer die Unterschiede, desto größer ist auch die Abweichung der Kennwerte. In diesem Zusammenhang sollten tribologische Tests mit den realen Baugruppen durchgeführt werden. Die tribologischen Systeme von Test und Praxis sind dann stimmig. Folglich ist dann auch das Reibungs- und Verschleißverhalten der getesteten Proben auf die reale Anwendung übertragbar. Im Beitrag werden die Unterschiede und Zusammenhänge zwischen Modellversuchen und Bauteilversuchen am Beispiel einer Multiflex-Gleitkette aus Kunststoff dargestellt und erläutert. Zur Durchführung der Tests diente ein Universal-Tribometer, dessen Funktionalität ebenfalls kurz vorgestellt wird.

KEYWORDS Multifunktions-Tribometer, Tribologie der Kunststoffe, POM gegen PA, Modellversuch, Bauteiltest, Stift-Scheibe, Klötzchen-Platte, multifunctional, tribology, plastic, pin on disk, plate on plate

1. Einführung

Gleitkettenförderer sind als Steigförderer zum Bewegen leichten Stückgutes sehr weit verbreitet. In der Lebensmittel-, Verpackungsmittel- oder Pharmaindustrie werden sie häufig mit Kunststoffgleitketten ausgerüstet. Diese müssen ein breites und z. T. widersprüchliches Anforderungsprofil erfüllen ([1]; S. 29ff). Betrachtet man die gesamte Förderanlage, bestehen im Betrieb sehr viele Reibkontakte mit zum Teil unterschiedlichen tribologischen Systemen. Praktisch alle mechanischen und energetischen Potentiale dieser Förderanlagen – von der maximalen Kettenzugkraft über die Lebensdauer bis hin zur

Antriebsenergie – lassen sich über die gezielte Gestaltung dieser Reibpaarungen beeinflussen. Hier spielen insbesondere Gleitreibwerte, Haftreibwerte und Verschleißeffekte eine Rolle.

Die Vielfalt möglicher Werkstoffkombinationen ist enorm: da es sich im Wesentlichen stets um trockenlaufende Kunststoff-Kunststoff-Kontakte handelt, kann das gesamte kunststoff-technische Repertoire bzgl. Grundwerkstoff, Additivierung oder Oberflächenbeschaffenheit genutzt werden.

Die Auswahl geeigneter Werkstoffkombinationen sollte idealerweise am konkreten Bauteil und in der konkreten Anwendung erfolgen. Da dies allerdings nicht wirtschaftlich ist, werden Modellversuche genutzt. Diese müssen in ihren wesentlichen Parametern auf die reale Anwendung abgestimmt sein. Die wichtigsten dieser Parameter wurden bereits in [2] betrachtet. Es handelt sich beispielsweise um

- Prüfgeschwindigkeit,
- Normalkraftbelastung,
- (p-v-Wert (kombinierte Geschwindigkeits- und Normalkraftbelastung)),
- Temperatur,
- Oberflächengestaltung,
- Bewegungsform,

und weitere.

Modellversuche können nur dann praxisnahe Versuchsergebnisse liefern, wenn das tribologische System der späteren Baugruppe möglichst genau im Modellversuch abgebildet wird. Neben den o. g. Punkten spielt auch die Geometrie der Probekörper eine Rolle.

Im Folgenden wird deshalb ein neues Tribometer für Modell- und Bauteilversuche vorgestellt. In Ergänzung zu [2] werden dann beispielhaft Versuche unterschiedlichen Abstraktionsgrades gegenübergestellt

2. Untersuchungsmethodik

2.1. Multifunktions-Tribometer

Zur Durchführung der Modellversuche konnte ein neues Multifunktions-Tribometer der LSA GmbH genutzt werden (siehe Abbildung 1). Wie in [3] ausführlich dargestellt, eignet es sich sowohl für Normprüfungen als auch für anwendungsnahe Tests. Es ist sehr vielseitig und ermöglicht die Umsetzung von bis zu zwölf unterschiedlichen Prüfprinzipien, von „Stift-Scheibe“ über „Thrust-Washer“ bis „Klötzchen-Platte“.

Auch eine Klimakammer ist vorhanden, die es ermöglicht, Untersuchungen bei unterschiedlicher Luftfeuchte und im Temperaturbereich von -20°C bis +300°C durchzuführen.

Den Kern des Multifunktions-Tribometers bildet ein Messarm, der die Reibpaarung per Kipphebelprinzip mit einer Normalkraft belastet und diese permanent misst. Er erfasst zudem die Reibkraft und den längenbezogenen Verschleiß der Proben.

Dies wird durch die Positioniereinheit (Abbildung 2, Punkt 2) erreicht, durch die der Arm in vertikaler und horizontaler Richtung verschoben und um seine Längsachse gekippt werden kann.

Durch verschiedene Getriebemodule kann der Prüfstand sowohl für Versuche mit rotierendem Reibgrundkörper (Stift-Scheibe-Prinzip, Stift-Ring-Prinzip) als auch für Versuche mit linear-oszillierendem Reibgrundkörper (Klötzchen-Platte-Prinzip) genutzt werden.



Abbildung 1: Multifunktions-Tribometer MFT-5p mit Klimakammer für die Durchführung von Modellversuchen und Baugruppentests

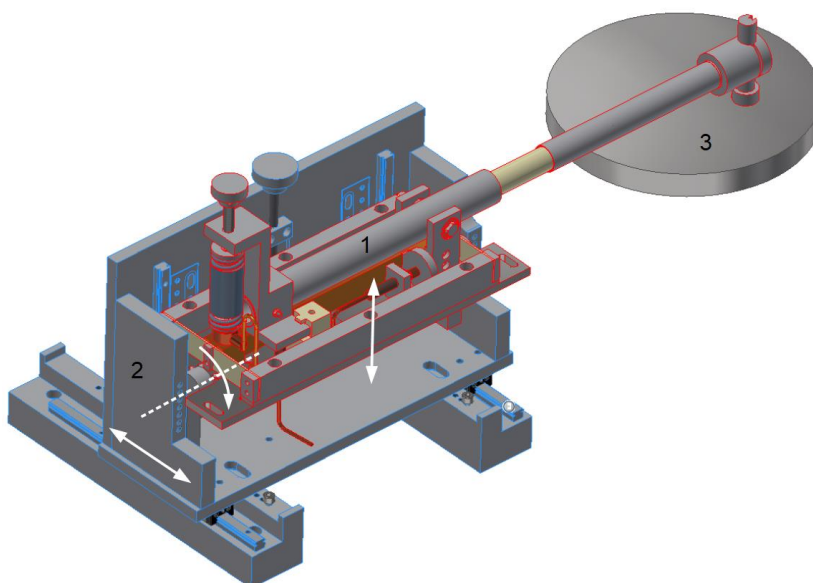


Abbildung 2: Messarm (1) mit Positioniersystem (2) und Antriebseinheit mit Scheibe (3); Stift-Scheibe-Konfiguration

Die eigentliche Messeinheit mit allen Sensoren ist temperatur- und feuchtigkeits-geschützt außerhalb der Klimakammer angeordnet. Nur der Arm ragt ins Innere der Kammer und führt einen der Reibkörper (z. B. die Stiftprobe bei der Stift-Scheibe-Prüfmethode).

2.2. Test-Prinzipien

Von den bereits erwähnten tribologischen Systemen in einem Gleitkettenförderer wurde beispielhaft das System an der Wirkstelle zwischen Pin und Kettenglied (vgl. Abbildung 3) zur Betrachtung ausgewählt. Dieser Teil des kardanischen Kettengelenks ermöglicht das horizontale Schwenken der Glieder untereinander. Im Einsatzfall wird der Reibkontakt mit einer Normalkraft von bis zu 1400 N belastet. Die Normalkraft resultiert auch der Kettenzugkraft.

Um den gezeigten Realfall nachzustellen wurden drei Modellversuche betrachtet. Sie alle bilden die tatsächlichen Bedingungen in unterschiedlichem Maße ab und werden im Folgenden vorgestellt.

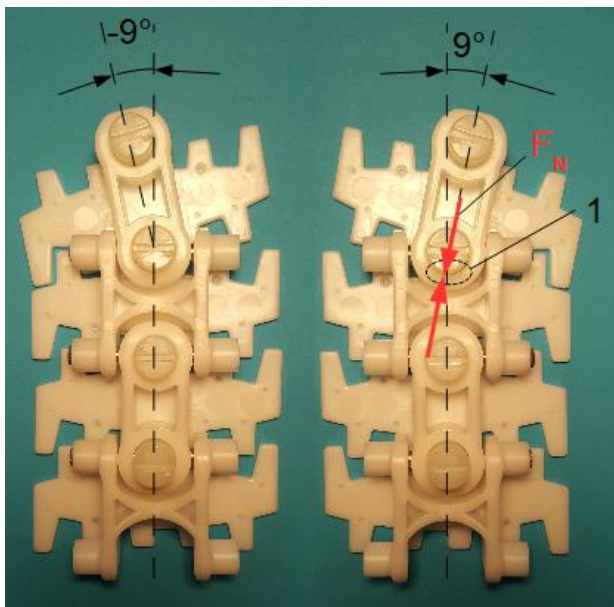


Abbildung 3: Kettensegment mit der Reibpaarung Pin-Kettenglied

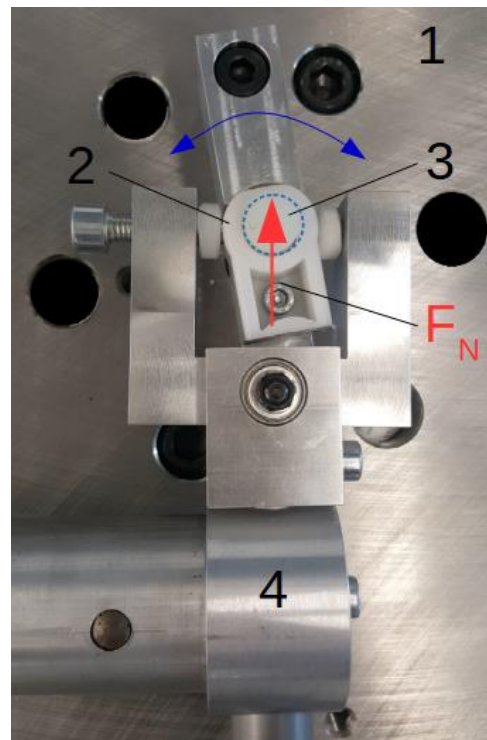


Abbildung 4: Prüfaufbau Baugruppentest: Antriebsscheibe (1) mit darauf fixiertem Kettenglied (2); Kettenpin (3); Messarm (4)

Baugruppentest

Dieser Test verwendet die originalen Komponenten der Kette allerdings ohne sie in einem realen Fördersystem zu testen (vgl. Abbildung 4). Die Zugkraft wird mittels eines Adapters über den Kettenpin und den bereits beschriebenen Messarm eingeleitet. Die Schwenkbewegung entsteht durch definiertes, oszillierendes Drehen der Antriebsscheibe mit darauf montiertem Kettenglied.

Diese Anordnung bildet insbesondere die Kontaktflächen und die Bewegungsform ideal ab. Sie ist allerdings auch aufwändig, da die Komponenten bereits in ihrer endgültigen Geometrie vorliegen müssen.

Stift-Scheibe-Prinzip

Das Stift-Scheibe-Prinzip ist ein genormtes und sehr weit verbreitetes Prüfprinzip. Dabei wird ein stiftförmiger Probekörper aus dem Werkstoff des Kettenpins exzentrisch auf eine rotierende Platte aus dem Gegenwerkstoff gedrückt. Dieser Modellversuch benötigt keine konkreten Bauteile, sondern einfach herzustellende Materialproben in Stift- bzw. Plattenform.

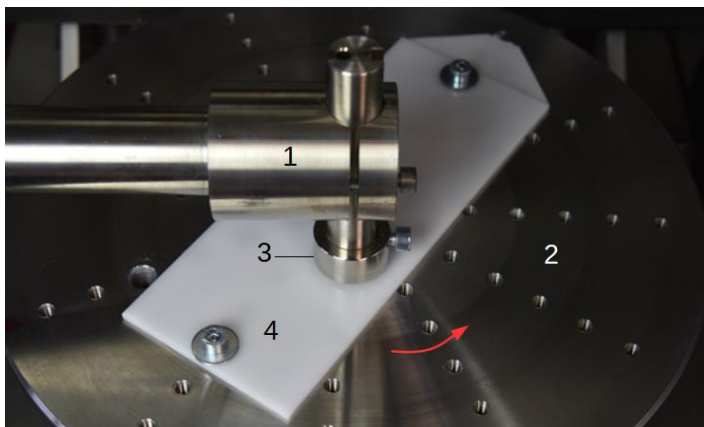


Abbildung 5: Prüfaufbau Stift-Scheibe-Versuch: Messarm (1); Aufspanscheibe (2), rotierend mit Reibgrundkörper (4); Stifthalter (3)

Linear-oszillierendes Prinzip

Für das Stift-Scheibe-Prinzip werden, in Abhängigkeit des gewünschten Reibdurchmessers, recht große Platten benötigt, die nicht immer in geeigneter Form verfügbar sind. Um eher schmale Platten verwenden zu können, kann ein Modellversuch nach dem linearschillierenden Prinzip genutzt werden. Hierbei wird eine kleine plattenförmige Probe des Pin-Werkstoffes gegen eine ebenfalls plattenförmige Probe des Kettengliedwerkstoffes gerieben.

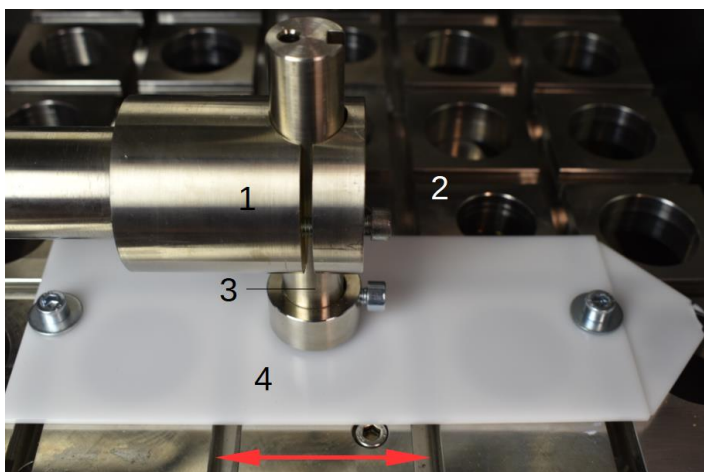


Abbildung 6: Prüfaufbau linear-oszillierendes Prinzip: Messarm (1); Schlitten (2), linearschillierend bewegt; Probenhalter mit Klötzchenprobe (3); Reibgrundkörper (4)

2.3. Versuchsprogramm

Nicht nur der Versuchsaufbau und die Testprinzipien sollen den Realfall bestmöglich abbilden, auch die Untersuchungsparameter sind realistisch zu wählen.

- Prüflingsgeometrie
Baugruppentest: Pin vs. Kettenglied
Stift-Scheibe-Prinzip: Oberprobe (10x5x2 mm³) vs. Unterprobe (200x80 mm²)
Lin.-oszillierendes Prinzip: Oberprobe (10x5x2 mm³) vs. Unterprobe (200x80x2 mm³)
- Materialien
Pin/Oberprobe: Zytel 101NC10 (Polyamid)
Kettenglied/Unterprobe: Hostaform C9021 (Polyoxymethylen)
- Zugkraft
Für den Baugruppentest wird eine Zugkraft von 600 N aufgebracht. Dies ist eine mittlere Zugkraft, wie sie auch in der praktischen Anwendung häufig vorkommt. Aus dieser Zugkraft lässt sich die Flächenpressung zwischen Pin und Kettenglied berechnen. Nach [4], Seite 64ff ergibt sie sich zu 5,5 MPa. Normalkraft und Probenflächen wurden für die Stift-Scheibe-Versuche und die oszillierenden Versuche so angepasst, dass diese Flächenpressung erreicht wurde.
- Schwenkwinkel bzw. Hub
Der Schwenkwinkel für die Modellversuche ergibt sich aus den zugrundeliegenden Kurvenradien der Förderanlage. Für die untersuchte Kettenvariante beträgt dieser 150 mm, was zu einem Schwenkwinkel von $\pm 12,8^\circ$ führt. Dieser ist mit dem Multifunktionstribometer auch problemlos anwendbar. Laut [5] kommt es allerdings bei maximalem Schwenkwinkel und starkem Verschleiß zu einer Verschiebung des Drehpunktes und damit zu undefinierten Reibbedingungen. Um dies von vornherein auszuschließen, wird der Schwenkwinkel für die Baugruppenversuche auf $\pm 9^\circ$, also insgesamt 18° festgelegt.
Der Hub für die linear-oszillierenden Versuche wird auf 125 mm festgelegt, um möglichst viel der zur Verfügung stehenden Probenlänge nutzen zu können.
Der Reibumfang beim Stift-Scheibe-Prinzip wird dementsprechend auf 125 mm festgelegt, was einen Reibdurchmesser von ca. 80 mm entspricht.
- Geschwindigkeit
Für die Schwenkversuche wurde die Schwenkrate auf 50 Schwenks pro Sekunde festgelegt. Beim o. g. Schwenkwinkel von 18° ergibt sich eine Bahnlänge bzw. ein Reibweg von $2 \times 2,04 \text{ mm} = 4,08 \text{ mm}$. Bei 50 Schwenks pro Minute entspricht das einer Geschwindigkeit von 3,4 mm/s. Um den Einfluss der Geschwindigkeit ermitteln zu können, wurde auch mit Geschwindigkeiten von 34 mm/s und 100 mm/s getestet.
- Versuchsdauer / Versuchsende
Um den zeitlichen Umfang der Versuche überschaubar zu halten, wurde die maximale Versuchsdauer auf 48 Stunden festgelegt. Bei der kleinsten der o. g. Geschwindigkeiten ist damit ein Reibweg von 588 Metern erreichbar. Dieser Wert wird als Kriterium für die Versuchsdauer für alle Versuche herangezogen.

Damit ergibt sich das folgende Prüfprogramm:

Prüfprinzip	Prüflinge	Prüfgeschwindigkeit	Versuchsdauer bzw. Reibweg	Hub bzw. Winkel	Normalkraft/ Pressung
Baugruppentest	reales Glied	50 Schwenks/Minute (= 3,4 mm/s)	48 h = 588 m	von -9° bis +9° = 18°	600 N (= 5,5 MPa)
Prinzip "Stift-Scheibe"	Materialproben	3,4 mm/s	48 h = 588 m	Umfang 125 mm; Durchmesser 80 mm	5,5 MPa
		34 mm/s	4,8 h = 588 m	Umfang 125 mm; Durchmesser 80 mm	5,5 MPa
Prinzip "Linear-Oszillierend"	Materialproben	3,4 mm/s	48 h = 588 m	Hub 125 mm	5,5 MPa
		34 mm/s	4,8 h = 588 m	Hub 125 mm	5,5 MPa
		100 mm/s	1,63 h = 588 m	Hub 125 mm	0,19 MPa

Nach Abwägung zwischen statistischer Sicherheit und Versuchsökonomie werden alle Versuche zweimal unter exakt gleichen Bedingungen wiederholt.

3. Ergebnisse

3.1. Übersicht

Das Diagramm in Abbildung 7 zeigt die gemittelten Gleitreibungswerte jeweils zum Ende der Versuchsdauer. Der Verschleiß aller Proben war sehr minimal: alle Tests zeigten nach ihrem Ende einen Verschleißkennwert von 0,5 nach der TUC-Methode (siehe [6]) und gar keinen Verschleiß laut gravimetrischer Bestimmung. Er wird deshalb zur Auswertung nicht genutzt.

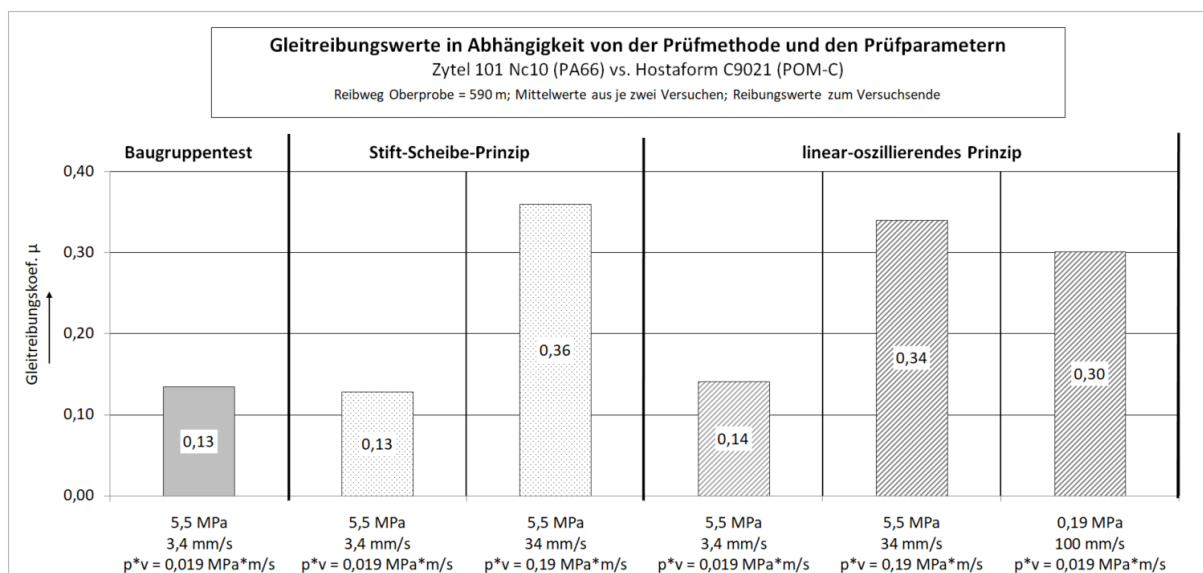


Abbildung 7: Gleitreibungswerte in Abhängigkeit von der Prüfmethode und den Prüfparametern

3.2. Einfluss des Prüfprinzips

Die Diagramme in Abbildung 8 zeigen den Verlauf der Gleitreibungswerte über die Versuchsdauer bzw. über den Versuchsreibweg für unterschiedliche Versuchsarten. Alle drei Test-Prinzipien zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf und annähernd den gleichen, resultierenden Reibwert zum Versuchsende. Hier kann also problemlos auf einen einfach umzusetzenden Modellversuch gesetzt werden, um die tribologischen Eigenschaften der Werkstoffpaarung zu charakterisieren.

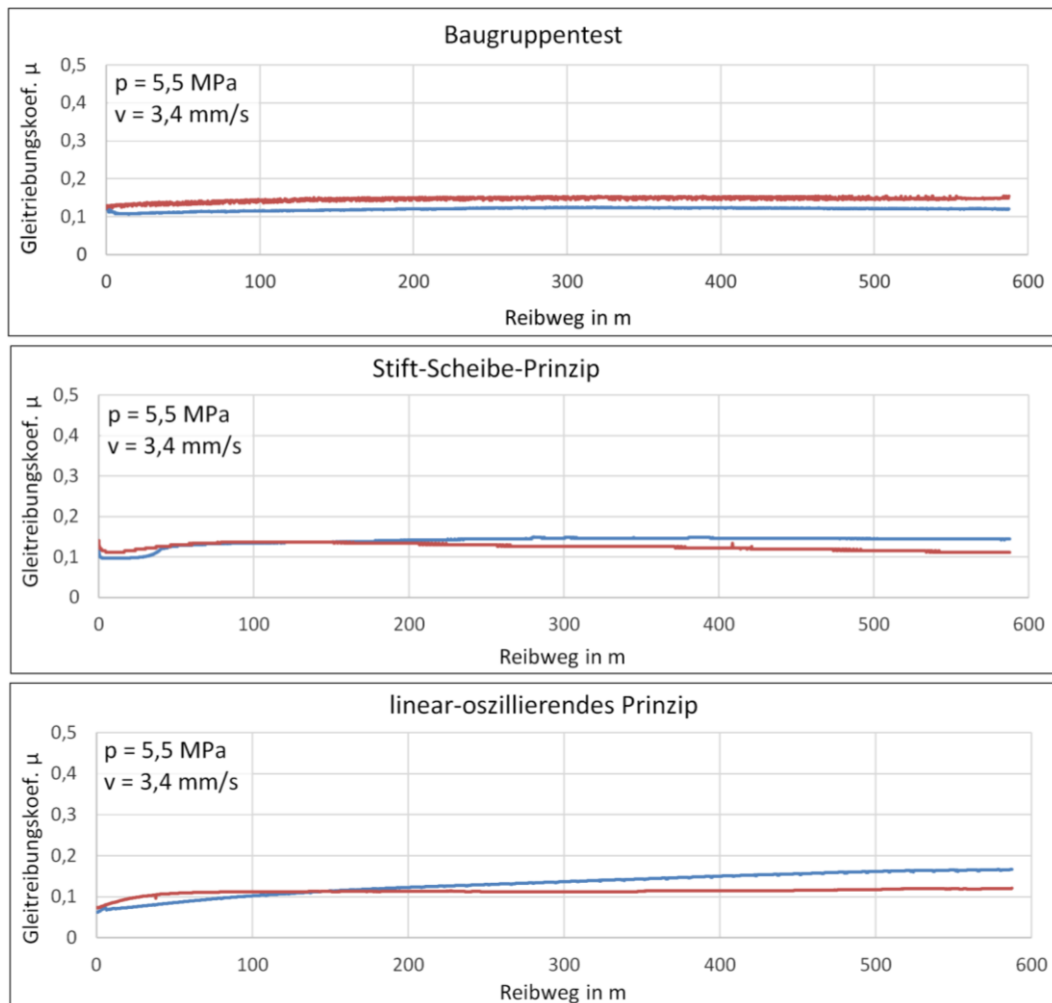


Abbildung 8: Gleitreibungskurven für alle drei Test-Prinzipien (je zwei identische Versuche)

3.3. Einfluss der Prüfgeschwindigkeit

Die Diagramme in Abbildung 9 zeigen den Verlauf der Gleitreibungswerte über die Versuchsdauer bzw. über den Versuchsreibweg. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Verläufe der Reibwertkurven sehr stark von der Prüfgeschwindigkeit abhängig sind und sich insbesondere das Einlaufverhalten und der qualitative Verlauf deutlich unterscheiden.

Ebenso deutlich unterscheiden sich die resultierenden Reibwerte zum Versuchsende: bei den Versuchen mit hoher Geschwindigkeit ergibt sich ein ca. 2,4-facher Reibwert. Es wird klar, dass die Prüfgeschwindigkeit einen sehr großen Einfluss hat und keinesfalls, etwa um Modellversuche schneller abzuschließen, einfach erhöht werden darf.

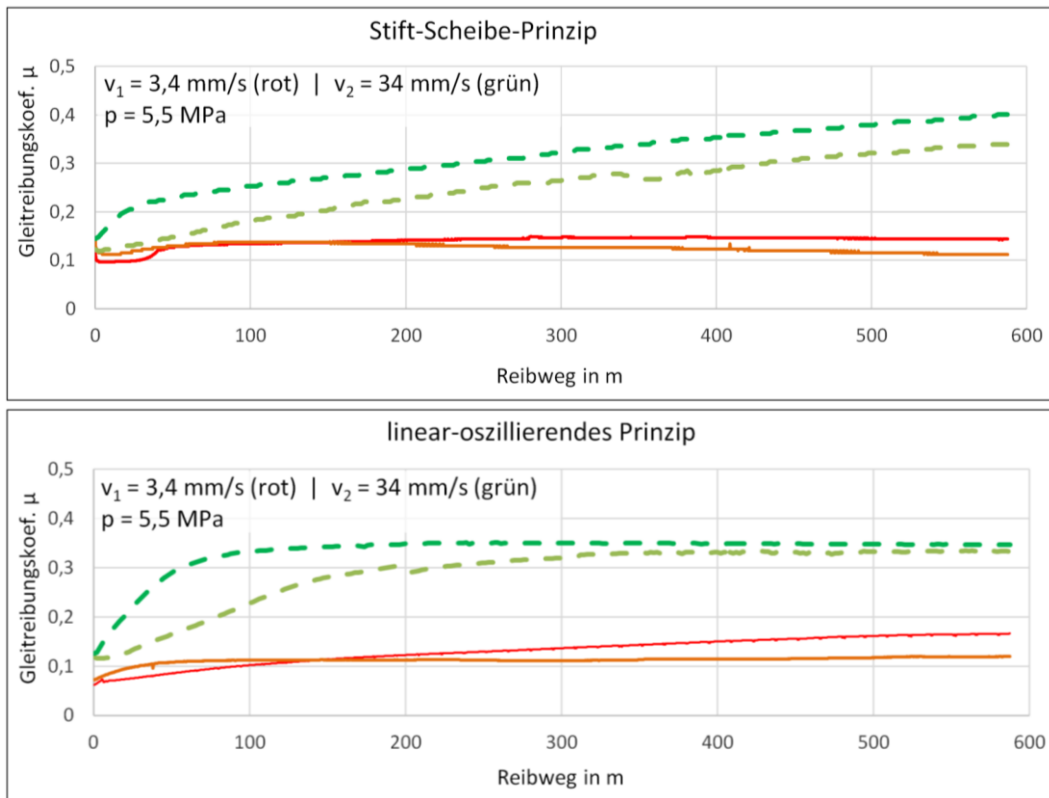


Abbildung 9: Gleitreibungskurven in Abhängigkeit der Prüfgeschwindigkeit (je zwei identische Versuche)

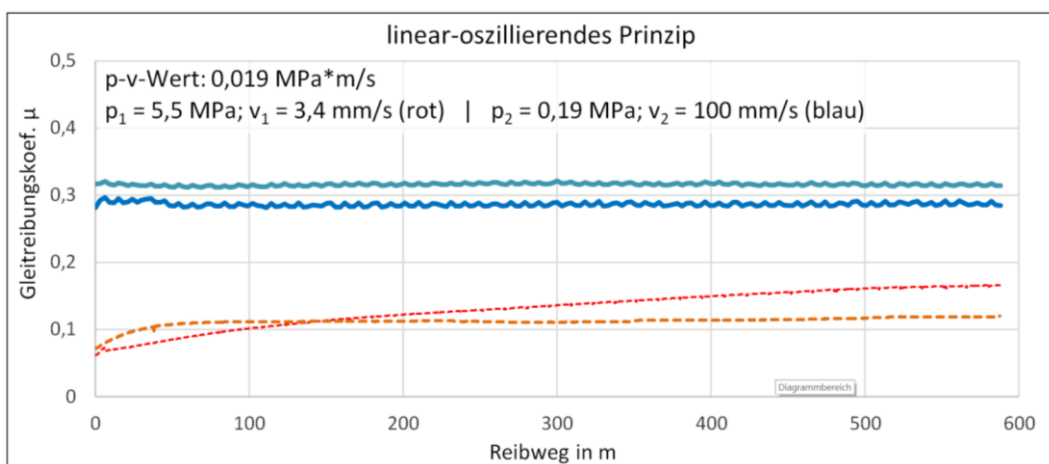


Abbildung 10: Gleitreibungskurven mit gleichen $p \cdot v$ -Werten, aber unterschiedlichen Parametern (je zwei identische Versuche)

3.4. Eignung des p-v-Wertes

Häufig wird das Produkt aus Flächenpressung und Bewegungsgeschwindigkeit, der sogenannte p-v-Wert als Normierungs- und Skalierungsgröße verwendet. Wie in Abbildung 10 zu sehen, ist dies aber nicht ohne weiteres der Fall. Trotz gleichen Prüfprinzips und gleichem p-v-Wert bei der Prüfung sind die Reibwertverläufe deutlich unterschiedlich und die resultierenden Reibwerte zum Versuchsende unterscheiden sich im Mittel um den Faktor 2.

3.5. Fazit

Bei der Entwicklung und Optimierung tribologisch beanspruchter Bauteile von Kunststoffgleitketten liefern Modellversuche mit einfachen Probekörpern hilfreiche Erkenntnisse für die Materialauswahl.

Im Rahmen der hier durchgeführten Versuchsreihen hat sich gezeigt, dass das Prüfprinzip, gekennzeichnet durch eine bestimmte Relativbewegung und Probengeometrie, keinen wesentlichen Einfluss auf das Reibungs- und Verschleißverhalten der Kunststoffreibpaarungen hat.

Den entscheidenden Einfluss haben jedoch die Prüfparameter bzw. Belastungsparameter. Eine Erhöhung der Reibgeschwindigkeit führte sowohl bei den Stift-Scheibe-Versuchen, als auch bei den linear-oszillierenden Versuchen zu einer deutlichen Erhöhung der Gleitreibungswerte. Es wurden Versuche mit unterschiedlicher Geschwindigkeit und Flächenpressung, aber gleichem p-v-Wert durchgeführt. Dabei wichen die Reibungswerte ebenfalls deutlich voneinander ab.

Reibungs- und Verschleißgrößen sind systemabhängige Größen, wie auch die Ergebnisse deutlich machen. Die Versuchsreihe zeigt Hinweise darauf, dass die Modellversuche „Stift-Scheibe“ und „Klötzchen-Platte“ praxisnahe Erkenntnisse über das Reibungs- und Verschleißverhalten der Pin-Kettenglied-Reibpaarung liefern. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die tribologischen Belastungen im Modellversuch auch praxisnah abgebildet werden. Darüber hinaus müssen die Proben hinsichtlich der Werkstoffzusammensetzung, der Oberflächengestalt und der Herstellungsparameter mit den realen Bauteilen identisch sein.

Danksagung

Die tribologischen Untersuchungen wurden auf dem durch die LSA GmbH hergestellten Multifunktions-Tribometer MFT-5p durchgeführt. Für die Nutzung des Tribometers im Rahmen dieser Versuchsreihen möchten wir uns herzlich bedanken.

Quellen

- [1] Weise, S.: Entwicklung und Evaluation von Hochleistungsgleitketten aus Kunststoff“; Chemnitz; 2014; ISBN 978-3-84391897-8
- [2] Schumann, A.: Methodik zur praxisnahen Ermittlung des tribologischen Verhaltens von Thermoplasten mit Modellprüfständen. In: Technomer 2019 - 26. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren; Chemnitz; 2019; ISBN 978-3-939382-14-0
- [3] <https://www.tribometer.net/multi-prinzip-tribometer.html>; abgerufen am 31.10.2020
- [4] Popov, V. L.: Kontaktmechanik und Reibung; 2. überarbeitete Auflage; Springer-Verlag; Heidelberg, Berlin 2010
- [5] Weisebach, T.: Versagensanalyse und Lebensdauerevaluation von kurvengängigen Kunststoffgleitketten; Chemnitz; 2019; Dissertation an der TU Chemnitz. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-345129>
- [6] <https://www.triboplast.de/glossar-tribologie-der-kunststoffe/#tuc-methode-zur-Verschleissbeurteilung>; abgerufen am 31.10.2020