

Energieeffiziente Kunststoff-Gleitlager durch mikrostrukturierte Reibflächen

Erschienen im Tagungsband zur 22. Fachtagung Technomer, ISBN 978-3-939382-10-2, Chemnitz 2011

Autoren: Dipl.-Ing. Arndt Schumann, TriboPlast
Dr.-Ing. Jens Sumpf, TU Chemnitz, Professur Fördertechnik
Dipl.-Ing. Sebastian Weise, TriboPlast
Dipl.-Ing. Christoph Bleesen, HS Heilbronn, Institut für Kunststofftechnik

1 Einleitung

Der Einsatz von Fördersystemen mit Gleitketten aus Kunststoff ist in Produktionsbetrieben aufgrund des vielseitigen Anlagenlayouts, der kostengünstigen Herstellung und des schmierungsfreien Betriebes weit verbreitet. Entwicklungsziele hin zu energieeffizienten Förderanlagen gewinnen aufgrund der Verknappung fossiler Energieträger und der damit einhergehenden Teuerung der Energiekosten zunehmend an Bedeutung.

In derartigen Förderanlagen wird die endlosverbundene Gleitkette in einem feststehenden Führungssystem mit aufgeschobenen Gleitschienen geführt. Die Gleitkette bildet mit den Gleitschienen ein Lineargleitlager, welches wesentlich die Antriebsenergie und die Emission von Verschleißpartikeln des Fördersystems bestimmt.

Zielstellung umfangreicher Forschungsaktivitäten ist die Minimierung der Reibungs- und Verschleißkennwerte dieses Tribosystems. Eine gängige Methode dabei ist die Modifizierung der Kunststoffreibpartner durch Gleitadditive, die sich jedoch negativ auf die mechanischen Eigenschaften auswirken.

Mit diesem Beitrag werden erste vielversprechende Ergebnisse eines völlig neuen Ansatzes präsentiert: Die tribologische Optimierung durch Strukturen in den Reibflächen.

2 Energieverluste durch Reibung in Fördersystemen mit Gleitketten aus Kunststoff

2.1 Systemkomponenten

Die folgende Abbildung zeigt eine Förderanlage mit Gleitketten aus Kunststoff, wie sie in vielen Produktionsbereichen eingesetzt wird. Die endlosverbundene Kette wird gleitend durch gerade und bogenförmige Streckenprofile sowie Kurvenräder geführt. Der Antrieb erfolgt überwiegend durch ein oder mehrere Zahnräder am Kopf des Systems. Die Antriebszahnräder und die Umlenkung am Ende des Förderers ermöglichen den kontinuierlichen Umlauf der Kette. Zur Verminderung der Reibung zwischen der Gleitkette aus Kunststoff und den feststehenden Systemkomponenten aus Stahl oder Aluminium werden Gleitschienen (Abb. 2) aus Kunststoff eingesetzt. Auf Schmiermittel wird verzichtet.

Das zu fördernde Stückgut (Abb. 3) steht oder liegt auf der Kette und wird durch Seitenführungen (Abb. 1) geführt. Wobei das Gewicht von Kette und Stückgut gleitend über die Schienen in das Führungs- und Gestellsystem übertragen wird. Daraus resultieren hohe Energieverluste in Folge des Reibungswiderstandes.

Das Gros der derzeit eingesetzten Kettenglieder besteht aus Polyacetal. Gleitschienen werden überwiegend aus Polyethylen hoher Dichte extrudiert. Bei hohen Belastungen des Gleitkontaktes kommen Schienen aus Polyamid sechspunktsechs zur Anwendung.

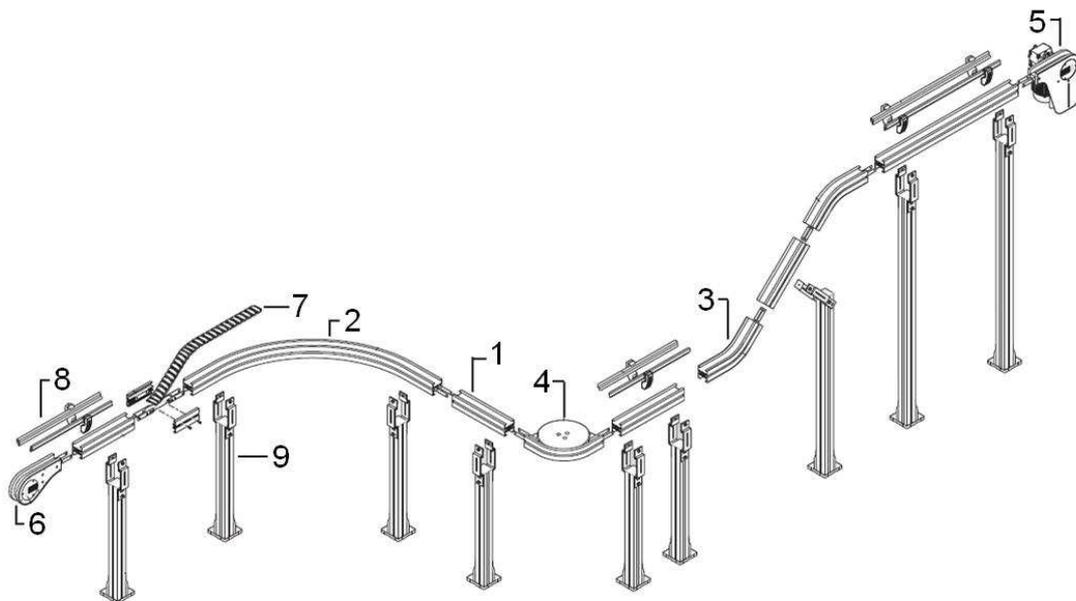


Abb. 1: Explosionsansicht einer Förderanlage mit Gleitkette aus Kunststoff;
 Notation: 1 Streckenprofil gerade, 2 Streckenprofil Gleitbogen horizontal, 3 Streckenprofil Gleitbogen vertikal, 4 Kurvenrad, 5 Kopfantrieb, 6 Umlenkung, 7 Gleitkette, 8 Seitenführung, 9 Stütze [1,2]

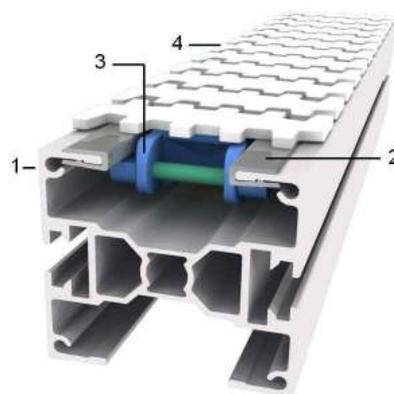


Abb. 2: Streckenprofil mit Multiflex-Gleitkette; Notation: 1 Streckenprofil gerade, 2 Gleitschiene, 3 Gleitkette, 4 Tragplatte



Abb. 3: Stückgüter auf einem Fördersystem mit Gleitkette aus Kunststoff

2.2 Ermittlung des reibungsbedingten Energiebedarfs

Die Zugbelastung der Kette nimmt über die einzelnen aneinandergereihten Systembaugruppen vom Gutaufgabebereich am Ende des Förderers bis zum Gutabgabebereich zu (Abb. 4; Ziffern 3-6). Ursache dafür sind die baugruppen-spezifischen Tribokontakte, welche in Folge der Belastung durch das Fördergut die Bewegung der Kette hemmen. Die Höhe des Bewegungswiderstandes ist dabei in geraden Abschnitten direkt in einem nahezu proportionalen Verhältnis vom Reibwert des Tribosystems Kette - Gleitschiene abhängig. Des Weiteren bewirken Gleitkurven, Steigungen und Staustrecken im Anlagenlayout die Erhöhung der Zugkraft am Antrieb. [3, S. 40-43]

Zur Berechnung des reibungsbedingten Energiebedarfs eines Gleitkettenförderers ist die Kettenzugkraft am Antrieb mit dem von der Kette zurückgelegten Weg zu multiplizieren und davon der Energiebedarf zur Überwindung von Höhenunterschieden abzuziehen.

Die folgende Abbildung zeigt ein typisches Layout eines Gleitkettenfördersystems.

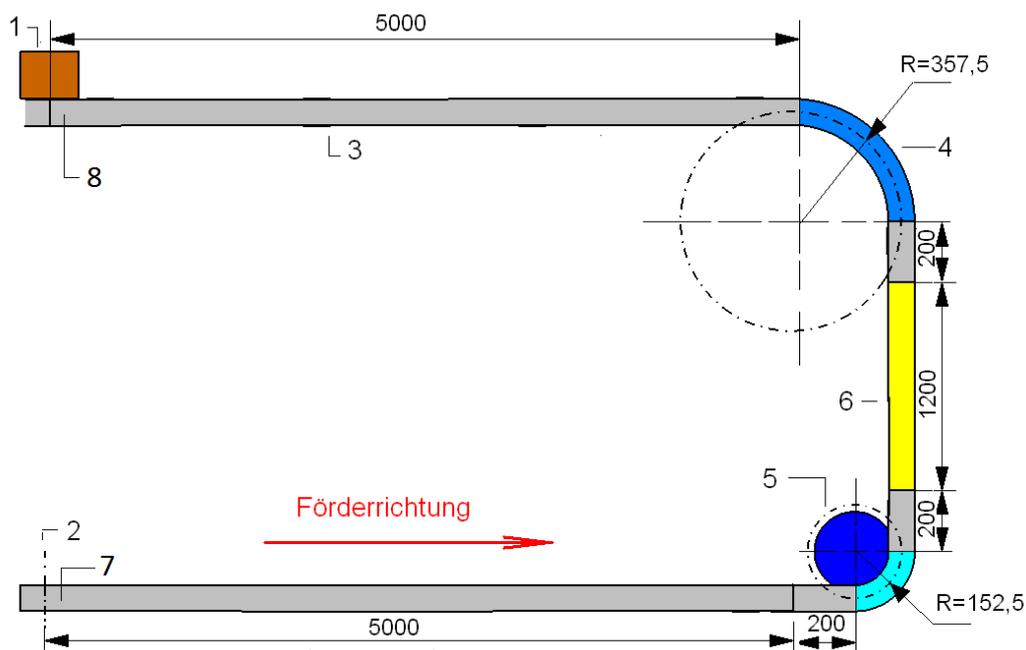


Abb. 4: Anlagenlayout von oben; Notation: 1 Antrieb, 2 Umlenkung, 3 gerades Streckprofil, 4 Gleitbogen, 5 Kurvenrad, 6 gerades Streckprofil um 20° geneigt, 7 Gutaufgabebereich, 8 Gutabgabebereich

Für den Förderer (Abb. 4) wurde der Energiebedarf der einzelnen Baugruppen unter Last ermittelt. In die Beispielrechnung fließen die Parameter: Geschwindigkeit $v=0,25\text{m/s}$, Betriebsdauer $t=1\text{h}$, Fördergutmasse je Meter $m=10\text{kg/m}$, Kettenmasse je Meter $m=1,5\text{kg/m}$ sowie verschiedene systemtypische Reibwerte (Tabelle 1) ein. Im Diagramm 1 sind die Ergebnisse der Berechnung grafisch dargestellt. Die Kurven zeigen in Abhängigkeit vom Reibwert den, vom Gutaufgabebereich bis zum Gutabgabebereich über die Streckenabschnitte, ansteigenden Energiebedarf.

Bei einem Reibwert von $\mu=0,14$ beträgt der Gesamtenergiebedarf rund 210kJ (vgl. Diagramm 1; Kurve $\mu=0,14$; Energiebedarf bei 12,4m Fördererlänge). Wogegen der Reibwert $\mu=0,5$ eine Steigerung des Energieverbrauches um das 7-fache, auf 1410kJ bewirkt (vgl. Diagramm 1; Kurve $\mu=0,5$; Energiebedarf bei 12,4m Fördererlänge).

Tabelle 1: Reibwerte verschiedener Kunststoffpaarungen

Reibpaarung (Kunststoff Gleitkette vs. Kunststoff Gleitschiene)	Gleitreibungswerte μ mittels oszillierendem Reibwertprüfstand ermittelt (Hub 100mm; Versuchsdauer 24h; Geschwindigkeit 0,25m/s; theoretische Flächenpressung 0,22MPa)
POM-H vs. PE-HD	0,3
POM-H vs. PE-HD (gleitmodifiziert)	0,15
POM-H vs. PA6.6	0,5
POM-H (gleitmodifiziert) vs. PA6.6 (gleitmodifiziert)	0,14

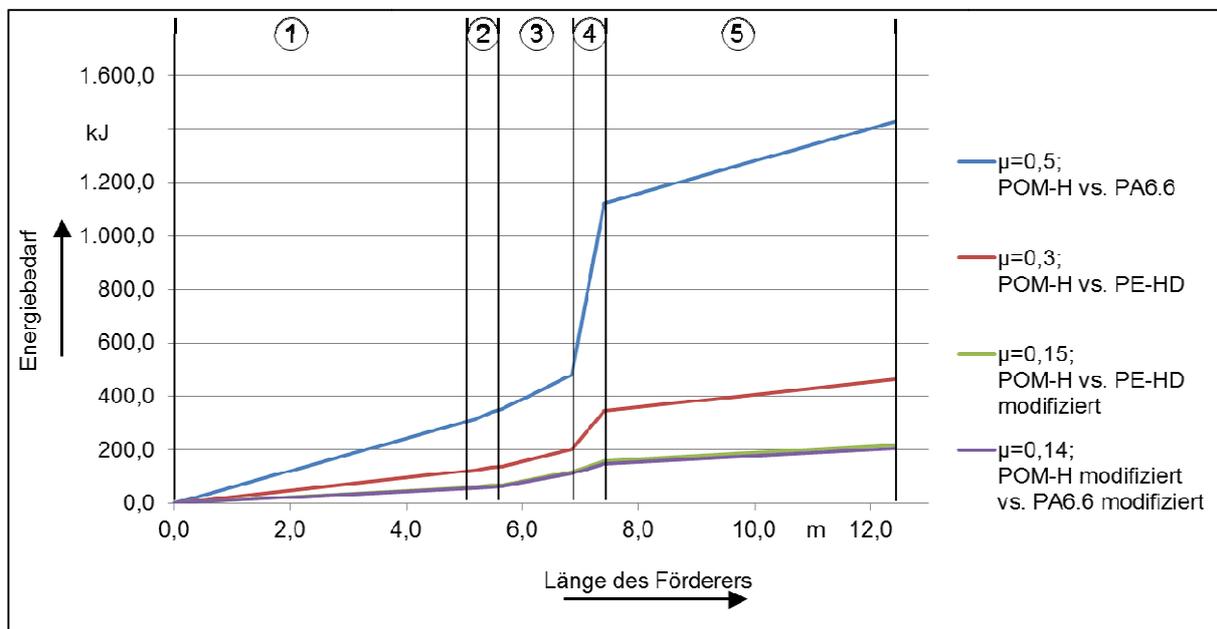


Diagramm 1: Reibungsbedingter Energiebedarf über die Streckenabschnitte des Förderers vom Gutaufgabebereich (entspricht 0 Punkt) zum Gutabgabebereich (bei 12,4 m) nach einer Stunde Betriebsdauer und in Abhängigkeit des Reibwertes μ zwischen Kette und Gleitschiene; Notation: 1 gerades Streckenprofil, 2 Kurvenrad, 3 gerades Streckenprofil um 20° geneigt, 4 Gleitbogen, 5 gerade Streckenprofil

Die Ergebnisse des Rechenexempels machen deutlich, wie stark sich der Reibwert der Gleitkontakte auf den Energieverbrauch auswirkt. Damit stellt die Optimierung der Gleitkontakte hin zu geringeren Reibwerten einen wesentlichen Ansatz zur Steigerung der Energieeffizienz von Fördersystemen dar.

3 Optimierung des Gleitkontaktes Kette – Gleitschiene durch Oberflächenstrukturen

3.1 Motivation

Forschungsaktivitäten zur tribologischen Optimierung des Gleitkontaktes Kette - Gleitschiene konzentrieren sich bis dato auf die Einarbeitung von flüssigen und festen Schmierstoffen in die Polymerwerkstoffe bzw. auf die chemische Anbindung von Gleitadditiven. Beispiele für derartige Zusatzstoffe sind Silikonöle [4], Polytetrafluorethylen [4], Graphit oder Molybdändisulfid [5], die jedoch die Festigkeit und Steifigkeit des Kunststoffs reduzieren [6].

Das folgende Diagramm zeigt die Auswirkungen der Gleitmodifikation auf das Reibungs- und Verschleißverhalten von systemtypischen Reibpaarungen (vgl. Balken 1 und 2 sowie Balken 6 und 7).

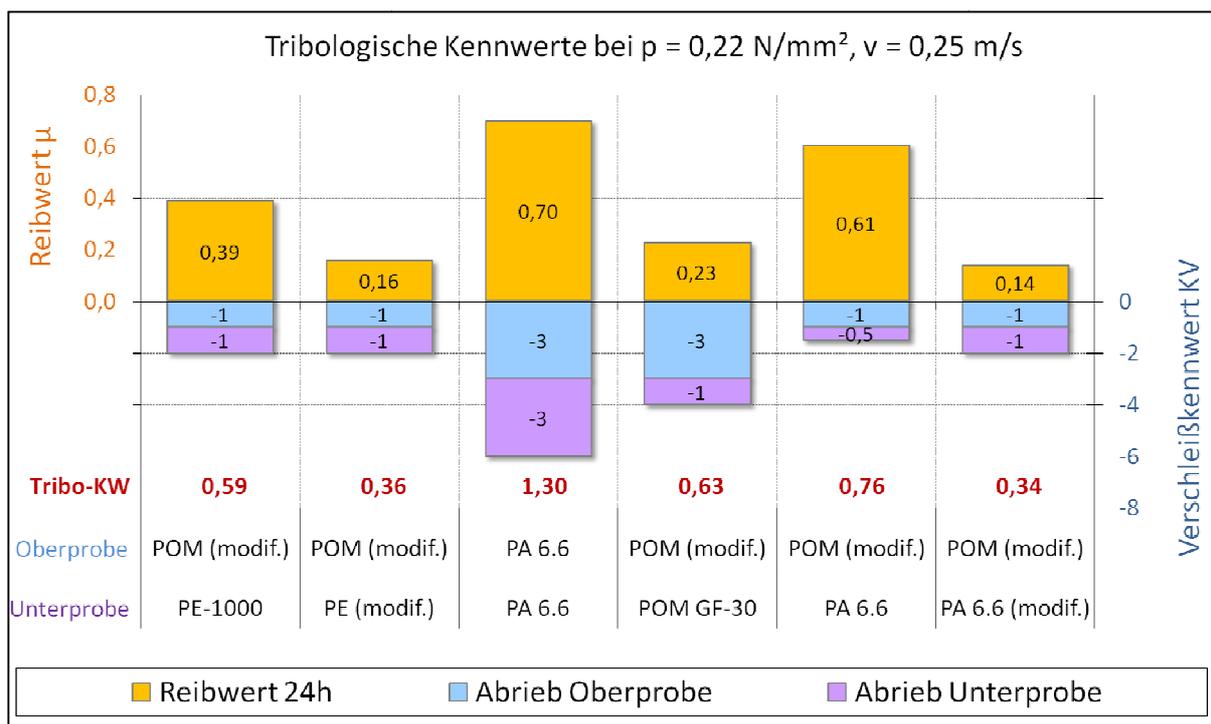


Diagramm 2: Reibungs- und Verschleißkennwerte verschiedener Reibpaarungen

Ein neuer Ansatz zur Verbesserung der tribologischen Eigenschaften liegt in der Strukturierung der Gleitflächen. Die Formgebung der Oberfläche erfolgt dabei kostengünstig durch Spritzgießen. Auf reibungsreduzierende Zusatzstoffe wird verzichtet.

Die Vorteile gegenüber dem Einsatz von Gleitzusätzen liegen auf der Hand: Eine Reduzierung der mechanischen Eigenschaften wird vermieden. Die Kosten für

Zusatzstoffe und die physikalische oder chemische Einbindung in die Polymermatrix entfallen.

3.2 Tribologiekennwerte und deren Abhängigkeit von der Oberflächenrauheit und der Flächenbelastung

Der neuartige Forschungsansatz wurde angeregt durch die Tatsache, dass die Reibungs- und Verschleißeigenschaften auf adhäsive und deformative Reibungsbedingungen zurückzuführen sind [6]. Diese Reibungsbedingungen treten in Kombination auf, variieren jedoch in der Größe des jeweiligen Anteils [6].

Adhäsive Reibung resultiert aus der Anziehung der aufeinander gleitenden Körper in den Bereichen der realen Kontaktfläche bzw. bei ausreichender Annäherung der Reibflächen [6]. Die Höhe der daraus resultierenden atomaren und molekularen Wechselwirkungen ist auf die Oberflächenenergie der Reibpartner zurückzuführen. Kunststoffe mit hoher Oberflächenenergie werden als polar, solche mit geringer Oberflächenenergie als unpolar klassifiziert [6]. Zur Verringerung der adhäsiv bedingten Reibung muss die Kontaktfläche reduziert werden.

Deformative Reibungsbedingungen treten vor allem zwischen rauen harten und weniger harten Reibflächen auf. Dann dringen die harten Rauheitsspitzen in den Gegenkörper ein, was zu Verformungen führt. Beim Aufeinandergleiten der Körper wirken die zur Verformung notwendigen Kräfte bewegungshemmend. [6]

Zur Reduzierung der deformativen Reibungsanteile sind glatte und harte Körper zu bevorzugen, was im Falle polarer Kunststoffe den adhäsiven Reibanteil jedoch erhöht. [7]

Aus einer Reihe von Literaturquellen geht hervor, dass bei der Reibpaarung Kunststoff-Stahl die Reibungseigenschaften von der Rauheit der Stahloberfläche abhängt. Die raue Stahloberfläche bewirkt zum einen die Reduzierung der realen Kontaktfläche und damit bei polaren Kunststoffen die Verminderung des adhäsiven Reibanteils, zum anderen kann es zur Ansammlung von Verschleißpartikeln in den Rauheitstälern und damit zu einer reibungsmindernden Transferschicht oder reibungsmindernden Verschleißpartikeln kommen. [6, 7]

Die Wirkung der adhäsiven Reibung kann auch mit Versuchen bei verschiedenen Normkraftbelastungen nachgewiesen werden. So zeigen polare Gleitpartner bei ansteigender Normkraftbelastung sinkende Reibungszahlen. Gleitpartner mit wenigstens einem unpolaren Körper weisen dagegen steigende Reibungszahlen auf. [6]

Der Grund für die Abhängigkeit des Reibwertes polarer Kunststoffgleitpaarungen von der Normkraftbelastung ist auf die Größe der realen Kontaktfläche zurückzuführen. Die reale Kontaktfläche der Reibpartner steigt mit zunehmender Last an. Damit nähern sich immer mehr Flächenabschnitte bis zum Kontakt an, was die adhäsive Reibung erhöht. Die Erhöhung der realen Kontaktfläche wird durch ein Maximum begrenzt. Der adhäsive Reibungsanteil stagniert an diesem Punkt. Wird die Normkraft weiter erhöht, sind der Reibwert und das Verschleißverhalten zunehmend von deformativen Mechanismen dominiert.

Das Diagramm 3 zeigt das Reibungsverhalten zwischen den polaren Kunststoffen PA 6.6 gegen POM-H in Abhängigkeit von der theoretischen Flächenpressung. Im

Diagramm 4 ist dagegen das tribologische Verhalten zwischen dem unpolaren PE-UHMW-antistatisch und dem polaren POM-H dargestellt.

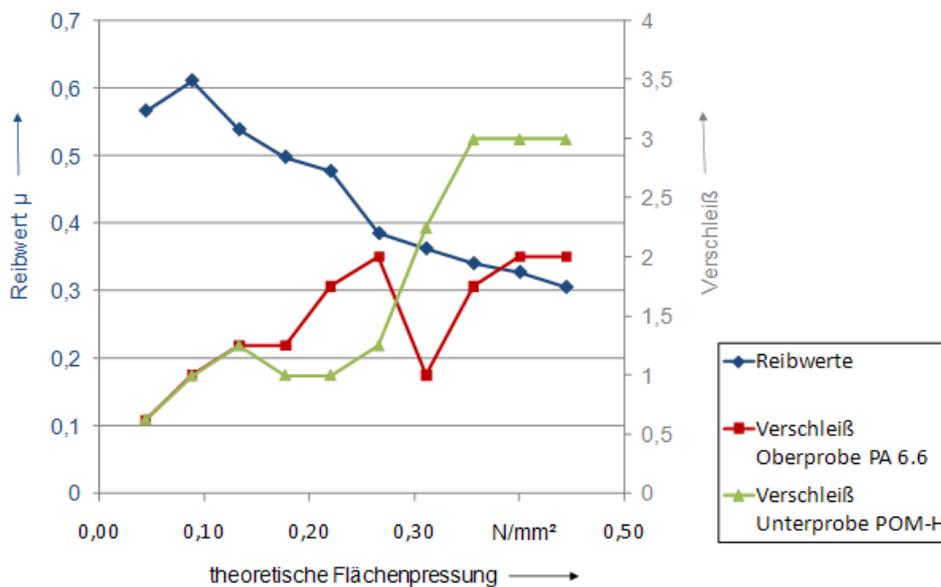


Diagramm 3: Reibungs- und Verschleißkennwerte der Reibpaarung PA 6.6 (Oberprobe) gegen POM-H (Unterprobe), in Abhängigkeit von der theoretischen Flächenpressung; per „Platte auf Platte“ - Prinzip getestet: theoretische Kontaktfläche=225mm², Hub=100mm, v=0,25m/s, t=24h; Kennwerte jeweils aus 4 Versuchen gemittelt

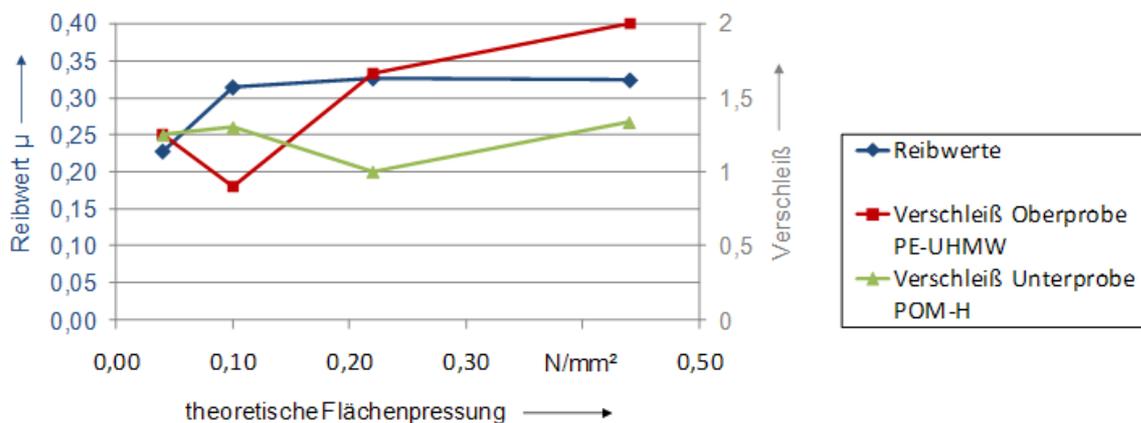


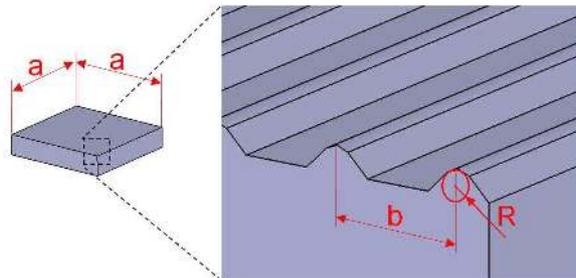
Diagramm 4: Reibungs- und Verschleißkennwerte der Reibpaarung PE-UHMW-antistatisch (Oberprobe) gegen POM-H (Unterprobe), in Abhängigkeit von der theoretischen Flächenpressung; per „Platte auf Platte“ - Prinzip getestet: theoretische Kontaktfläche=225mm², Hub=100mm, v=0,25m/s, t=24h; Kennwerte jeweils aus 4 Versuchen gemittelt

3.3 Strukturierung der Gleitflächen und die Wirkung auf das Reibungs- und Verschleißverhalten

Aus dem unter 3.2 beschriebenen Kenntnisstand lassen sich für die Gestaltung reibungsreduzierender Strukturen folgende Anregungen ableiten: Raue Oberflächen bewirken gegenüber glatten Oberflächen bei polaren Reibpartnern die Reduzierung der Adhäsion. Um zu verhindern, dass dabei starker Verschleiß auftritt, sollte die

Reduzierung der Kontaktfläche durch verrundete Strukturen erzeugt werden. Bei polaren Kunststoffreibpaarungen sind höhere Flächenpressungen und damit geringere Reibwerte bei gleicher Normalkraftbelastung durch die Reduzierung der Kontaktfläche bzw. durch Oberflächenstrukturen möglich.

Die Abbildung 5 zeigt die Struktur 1, bestehend aus parallel angeordneten, verrundeten, mikroskopischen Dreieckprofilen. Die Profile sind in einem bestimmten Abstand zueinander angeordnet, wodurch sich die theoretische Kontaktfläche gegenüber der projizierten Fläche auf 13% reduziert. Die Struktur 2, dargestellt in Abbildung 6, weist die gleiche Profilgeometrie auf. Hier sind jedoch die Profile ohne Abstand nebeneinander angeordnet. Mit Struktur 2 wird eine Verminderung der theoretischen Kontaktfläche auf 24% erreicht.



1:

Abb.5: Oberprobe mit Struktur 1; Notation: $a=15\text{ mm}$; $b=0,2\text{ mm}$; $R=0,05\text{ mm}$

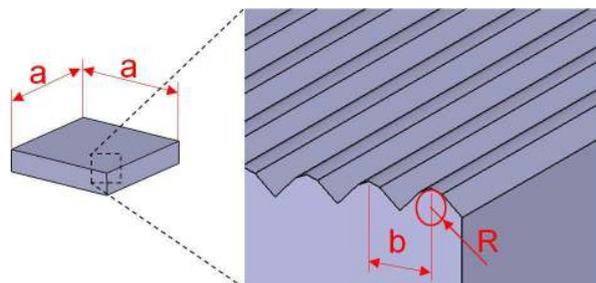


Abb.6: Oberprobe mit Struktur 2; Notation: $a=15\text{ mm}$; $b=0,1\text{ mm}$; $R=0,05\text{ mm}$

Das Tribosystem Gleitkette - Gleitschiene wird in der Mehrzahl der Förderanlagen aus der Reibpaarung POM-H gegen PA 6.6 sowie der Reibpaarung POM-H gegen PE-UHMW-antistatisch gebildet. Daraus resultiert die Materialauswahl für die tribologische Analyse: Die Proben mit strukturierter Oberfläche wurden aus POM-H spritzgegossen und gegenüber PE-UHMW-antistatisch und PA6.6 getestet. Abbildung 7 zeigt einen Spritzgießling aus POM-H, welcher anschließend in $15 \times 15\text{ mm}^2$ große Oberprobenplättchen zugeschnitten wurde.



Abb.7: Oberflächenstrukturierter Spritzgießling aus POM-H

Die tribologischen Untersuchungen wurden mit einem am ifk der TU Chemnitz entwickelten Prüfprinzip durchgeführt [8]. In der folgenden Abbildung ist die Versuchsanordnung dargestellt. Bei den Tests wird die 15x15mm² große Oberprobe (POM-H) auf der 20x150mm² großen, fest-stehenden Unterprobe (PA6.6 bzw. PE-UHMW-antistatisch) oszillierend hin und her bewegt. Der Hub ist mit 100mm festgelegt. Die Standardversuchsparameter sind: theoretische Flächenpressung 0,22MPa, Versuchsdauer 24h und Geschwindigkeit 0,25m/s.

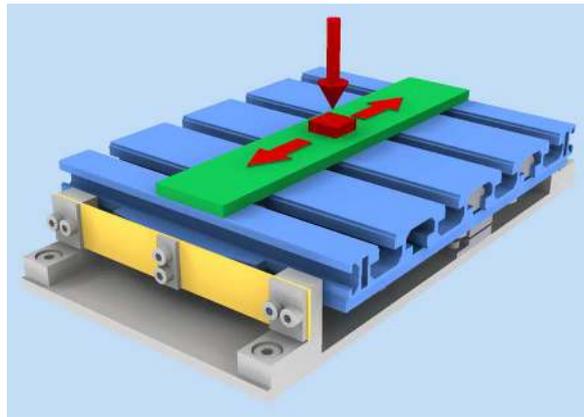


Abb.8: Messtisch mit Unterprobe grün (PE-UHMW-antistatisch; PA6.6) und Oberprobe rot (POM-H)

Die Oberproben wurden mit der Profilorientierung 0° und 90° zur Bewegungsrichtung geprüft. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den folgenden Diagrammen dargestellt. Bei der Kombination der polaren Kunststoffe POM-H gegen PA 6.6 wird deutlich, dass beide Strukturen in der Orientierung 0° zur Bewegungsrichtung immense Verringerungen der Reibungs- und Verschleißkennwerte gegenüber der unprofilierten Referenzpaarung bewirken (Diagramm 5). Mit Struktur 1 ist sogar eine Reduzierung aller drei Kennwerte um 50% erreicht worden. Die Ergebnisse in Diagramm 5 zeigen, dass die Orientierung der Profile rechtwinklig zur Bewegungsrichtung eine drastische Verschlechterung des Reibverhaltens nach sich zieht. Dass die Struktur 1 mit der geringsten theoretischen Kontaktfläche, 0° zur Bewegungsrichtung orientiert, bei den polaren Reibpartner POM-H gegen PA 6.6 eine Verbesserung des Reibverhaltens bewirkt, scheint Aufgrund der Reduzierung der Adhäsion plausibel.

Im Diagramm 6 sind die Reibungs- und Verschleißkennwerte der strukturierten POM-H-Probekörper gegen glatte PE-UHMW-antistatisch-Proben dargestellt. Es wird deutlich, dass auch hier die Strukturen in der 0°-Orientierung enorme Verringerungen der tribologischen Eigenschaften gegenüber der glatten Referenzpaarung bewirken. Wie bei den Tests POM-H gegen PA 6.6 wird deutlich, dass mit der Struktur 1 in der 0°-Orientierung das beste Reibverhalten erzielbar ist. Eine Erklärung für dieses Verhalten ist jedoch schwierig. PE-UHMW-antistatisch ist ein unpolarer Kunststoff, demzufolge kann die Reibwertreduzierung bei einer Verminderung der Kontaktfläche nicht auf die Reduzierung des adhäsiven Reibanteils geschlossen werden. Theoretisch dürften bei dieser Gleitpaarung die deformativen Reibungsbedingungen gegenüber den adhäsiven stark dominieren. Das heißt, dass bei geringer Kontaktfläche bzw. höherer Flächenbelastung höhere deformative Bewegungswiderstände zu erwarten sind. Der Reibwert und der Verschleiß sollten demzufolge bei höheren Belastungen ansteigen. Die hier dargestellten Ergebnisse

sowie Untersuchungen bei höheren Belastungen ($F_N=70N$) zeigen jedoch das Gegenteil.

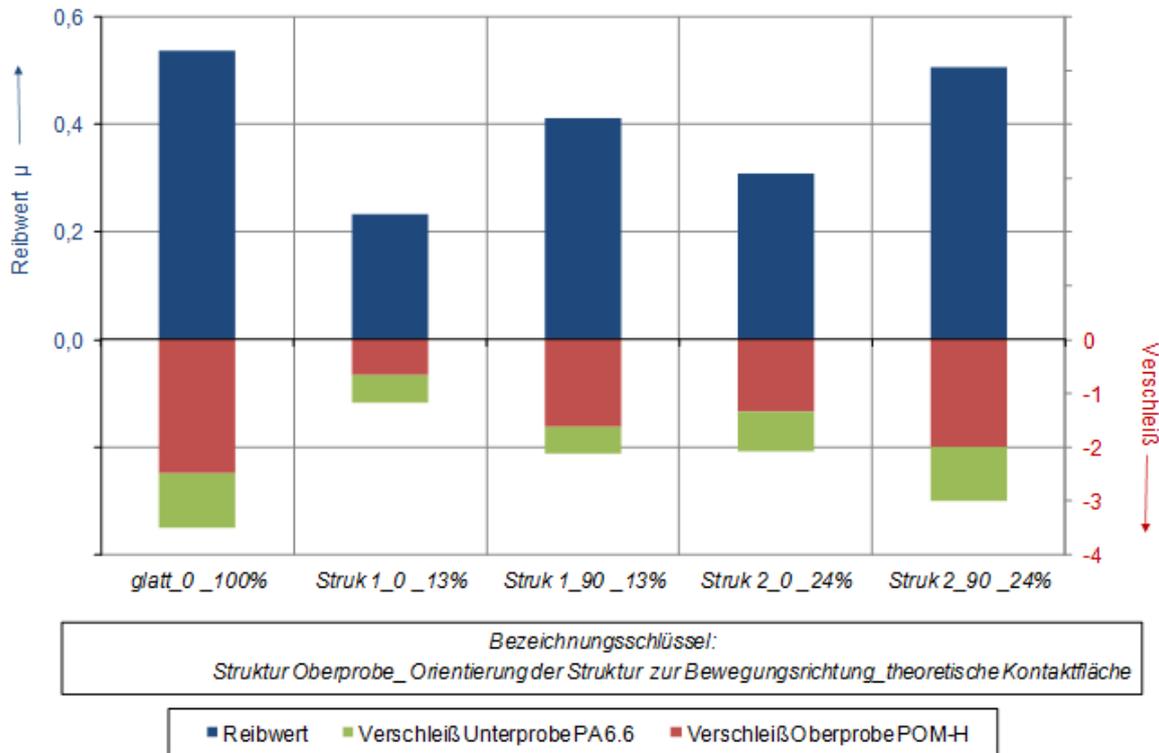


Diagramm 5: Reibungs- und Verschleißkennwerte der Reibpaarung POM-H (Oberprobe) gegen PA 6.6 (Unterprobe) in Abhängigkeit von der Oberflächenstruktur des POM-H; per „Platte auf Platte“ - Prinzip getestet: theoretische Kontaktfläche=225mm², $F_N=50N$, Hub=100mm, $v=0,25m/s$, $t=24h$; Kennwerte jeweils aus 4 Versuchen gemittelt

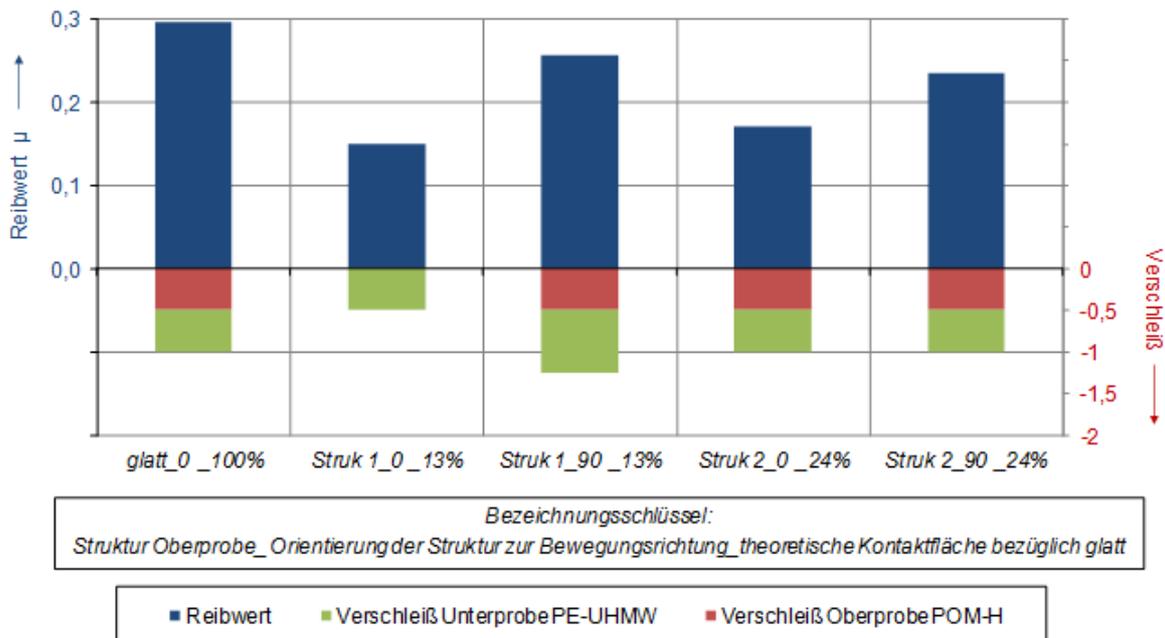


Diagramm 6: Reibungs- und Verschleißkennwerte der Reibpaarung POM-H (Oberprobe) gegen PE-UHMW (Unterprobe) in Abhängigkeit von der Oberflächenstruktur des POM-H; per „Platte auf Platte“ - Prinzip getestet: theoretische Kontaktfläche=225mm², $F_N=50N$, Hub=100mm, $v=0,25m/s$, $t=24h$; Kennwerte jeweils aus 4 Versuchen gemittelt

4 Zusammenfassung

Wie im Beitrag gezeigt wird, ist bei trockener Reibung mit Kunststoffbeteiligung durch die geeignete Strukturierung der Oberflächen eine signifikante Reduktion der Reibungs- und Verschleißkennwerte möglich. Im Gegensatz zur Modifikation der Kunststoffe mit Gleitzusätzen werden dadurch keine zusätzlichen Materialkosten sowie keine mechanische Schwächung der Werkstoffe verursacht.

Die hier dargestellten Ergebnisse bilden die Basis für weitere tiefgründigere Untersuchungen. Dabei sind vor allem die Ursachen für die Verbesserung der tribologischen Eigenschaften in Folge der Strukturierung bei der Reibpaarung POM-H gegen PE-UHMW-antistatisch zu erforschen. Ein Ansatzpunkt bildet die positive Wirkung der Strukturierung auf die Wärmeableitung in den Reibungsstellen.

Es schließen sich dann Praxistests an, wobei die Struktur auf den Reibflächen der Gleitketten appliziert werden soll.

Die im Kapitel 3 präsentierten Ergebnisse resultieren aus der Zusammenarbeit mit den Projektpartnern: Polymer-Institut für Kunststofftechnik der Hochschule Heilbronn, Kugler GmbH, Polar-Form GmbH, Oerlikon Balzers Hartec GmbH, Altratec Montagesysteme GmbH sowie Iwis Antriebssysteme GmbH & Co. KG. Das Projekt wurde im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) durch die AiF Projekt GmbH gefördert. Herzlichen Dank an die Projektpartner und den Fördermittelgeber.

Literatur

- [1] Bosch Rexroth AG: Katalog „Kettenfördersysteme – VarioFlow“. 2009.
- [2] Mitzschke, F.: Eigenschaftsprofile neuartiger faserverstärkter Kunststoffgleitketten für den Stückguttransport. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2008.
- [3] Auerbach, P.: Zur Beanspruchung und Lebensdauer raumgängiger Gleitketten aus Kunststoffen. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2005.
- [4] Czichos, H.; Habig, K.-H.: Tribologiehandbuch. Auflage 3. Wiesbaden: Vieweg und Teubner Verlag, 2010.
- [5] Campus Kunststoffdatenbank: <http://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/Delrin%C2%AE+500SC+NC010/DuPont+Engineering+Polymers/52/f9756610>, August 2011
- [6] Ehrenstein, G. W.: Mit Kunststoffen konstruieren. Auflage 3. München: Carl Hanser Verlag, 2007.
- [7] Erhard, G.: Konstruieren mit Kunststoffen. Auflage 4. München: Carl Hanser Verlag, 2008.
- [8] Sumpf, J.; Schumann, A.; Weise, S.; Nendel, K.; Eichhorn, S.: Neues Prüfverfahren zur Reibungs- und Verschleißbewertung von Kunststoff-Gleitpaarungen. Tribologie und Schmierungstechnik 58 (2011), Heft 4, S. 47-50, ISSN 0724-3472.