

André Bergmann, Jens Sumpf, Colin Kern, Ralf Bartsch

Einfluss des Kontaktdrucks auf die Reibungskoeffizienten von Stahl, Glas und Polyamid gegen PE-UHMW

Zusammenfassung

Diese Arbeit verfolgt die Zielstellung, die Abhängigkeit des Reibwertes von der Normalkraft anhand von vier Werkstoffen (Stahl C85, Stahl 100Cr6, Borosilikatglas, Kunststoff PA 66) gegen den Kontaktpartner PE-UHMW aufzudecken. Die Höhe der sich ausbildenden Kontaktdrücke liegt, aufgrund der Kugelform der Probekörper, dabei immer über der Fließgrenze des PE-Materials und führt zu dessen plastischer Deformation.

Bei den Versuchen konnte durchweg eine Senkung des Reibwertes bei Normalkrafterhöhung nachgewiesen werden. Dabei zeigte sich, dass die verwendeten Werkstoffe maßgeblichen Einfluss auf den Reibwert haben. PA 66 z. B. hat bei hohen Normalkräften gegen PE-UHMW einen niedrigeren Reibwert als Stahl 100Cr6.

Die Vermutung, dass minimaler Verschleiß in Form von Materialübertrag oder leichter Kratzer auf den kugelförmigen Probekörpern Einfluss auf die Höhe des Reibwertes haben, konnte experimentell widerlegt werden. Als maßgeblicher Einflussfaktor auf die Ausprägung des Reibwertes wurde die Größe der Kontaktzone (Laufspur) detektiert.

Erste Versuche bezüglich des Geschwindigkeitseinflusses wurden ebenfalls durchgeführt, zeigten jedoch keine deutlichen Unterschiede in der Höhe der sich einstellenden Reibwerte.

Abstract

This work pursues the aim to detect the dependence coefficient of friction (CoF) on the normal force on the basis of four materials (steel C85 steel 100Cr6, borosilicate glass, plastic PA 66) against the counterpart PE-UHMW. Due to the spherical shape of the specimen, the contact pressures is always above the yield strength of the polyethylene and results in plastic deformation.

In the experiments lowering of CoF could consistently be proven as a result of increasing normal force. It was found that the materials have a significant influence on CoF. PA 66 for example, shows a lower CoF than steel 100Cr6 at high normal forces. The assumption that minimal wear in form of material transfer or slight scratches on the spherical specimens have impact on CoF could be disproved by experiments. As a significant influencing factor on the expression of CoF, the size of the contact area (track) was detected.

First experiments concerning the influence of speed were also performed, but showed no significant differences in the levels of CoF.

1. Einleitung

Dass Reibung eine Systemkenngroße ist, ist allseits bekannt. So wurden viele Untersuchungen im Gebiet der Reibung mit Kunststoffbeteiligung zur grundlegenden Erörterung der Abhängigkeiten von Reibgeschwindigkeit [1], Rauigkeit der Kontaktpartner [2] und sich ausprägender Kontaktpressung [3] durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen aber keine eindeutigen Tendenzen, was auf die Systemeigenschaft der Triboparameter hinweist und als Grundlage für diese Untersuchung diene.

In vorangegangenen eigenen Untersuchungen ([4], [5]) zu Kunststoff-Kunststoff Reibung konnte bereits eine Reibwertsenkung durch Reduktion der Kontaktfläche und damit erhöhter Pressung aufgezeigt werden. Die dafür verwendeten Probekörper (spritzgegossene Plättchen 10x15 mm) mit aperiodischen (Erodierstrukturen nach VDI 3400) oder periodischen Profilen (Stege, Halbkugeln) ließen jedoch nur bedingt eine Abschätzung zur vorherrschenden Pressung zu, weshalb für diese Untersuchung die Verwendung von kugelförmigen Probekörpern bevorzugt wurde. Diese ermöglichen das definierte Erzeugen einzelner Reibspuren (keine Überlappungen) und das Aufbringen hoher Pressungen. Weiterhin kann bei Überschreiten der Fließgrenze eine sich ausbildende plastisch deformierte Zone einfach visuell und messtechnisch erfasst werden.

Dieses Vorgehen zielt auf ein besseres Verständnis der Pressungsabhängigkeit des Reibwertes, seiner Ursachen sowie den damit verbundenen Zusammenhängen.

Laut [7] setzt sich der durch Reibung zu überwindende Widerstand (Reibungskraft F_R) aus einer adhäsiven F_{Radh} und deformativen Komponente F_{Rdef} zusammen. Über die

Ausprägung der beiden Anteile bei einem durch Oberflächenrauheit oder Normalkraft gekennzeichneten Reibsystem liegen jedoch keine konkreten Kenngrößen vor. Es existieren lediglich Orientierungsgraphen (siehe Abbildung 1), bei denen Härtegradienten oder weitere mechanische Materialkennwerte nicht benannt werden.

Die Adhäsionsarbeit W_{ab} , welche überwunden werden muss, um zwei in Kontakt befindliche Körper zu trennen, wird durch die polaren und dispersen Oberflächenenergieanteile beider Körper nach folgender Gleichung bestimmt [6]:

$$W_{ab} = 2\sqrt{\gamma_a^d * \gamma_b^d} + 2\sqrt{\gamma_a^p * \gamma_b^p} \quad \text{Gl. 1}$$

Bei der Betrachtung der Polymerwerkstoffe bezüglich ihrer Oberflächenenergien ist festzustellen, dass deren disperser Anteil meist in ähnlicher Größenordnung liegt. Der polare Anteil unterscheidet sich jedoch deutlich, sodass nach polaren und unpolaren Materialien unterschieden werden kann. Bei unpolaren Reibpartnern, z. B. PE oder PTFE, ist demnach die pro Flächeneinheit wirkende Adhäsionsarbeit W_{ab} nur von den dispersen Oberflächenenergieanteilen der Partner abhängig. Allgemein kann bei der Beteiligung von mindestens einem unpolaren Reibpartner von geringer Adhäsion und demzufolge von einem niedrigen Reibwert ausgegangen werden [7].

In [7] und [8] wird weiterhin beschrieben, dass sich der adhäsive Reibungsanteil proportional zur realen Kontaktfläche verhält und demzufolge, ebenso wie der deformative Anteil, sowohl von der Oberflächenrauheit als auch von der Flächenpressung abhängig ist (Abbildung 1). Bei unpolaren Werkstoffen ist der adhäsive Reibungsanteil gegenüber der deformativen Komponente von untergeordneter Bedeutung. Wird in einem derartigen Tribosystem die Rauheit verringert oder die Normalkraft gesteigert (also die reale Kontaktfläche vergrößert), steigt der Reibwert insgesamt an. Für Reibpartner mit ausgeprägter Adhäsionsneigung kann der Reibwert hingegen bei Normkraftanstieg fallen, weil der Adhäsionsterm μ_{adh} einen im Verhältnis größeren Anteil an der Gesamtreibung hat [7].

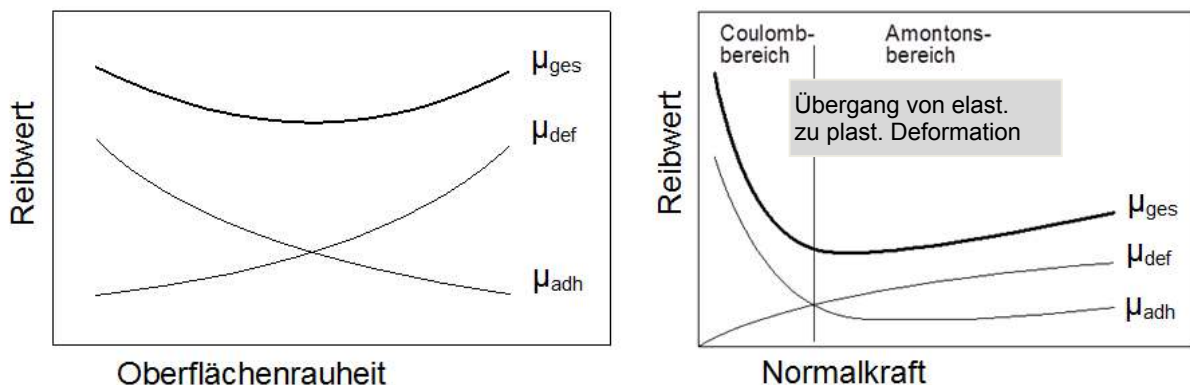


Abbildung 1: Anteile der Gleitreibung für wenig elastische Werkstoffe in Abhängigkeit von links: der Oberflächenrauheit [8] und rechts: der Normalkraft

Aufgrund dieser komplexen und zudem nicht genau definierten Zusammenhänge beschäftigt sich der vorliegende Beitrag mit der Untersuchung der Normalkraftabhängigkeit von vier verschiedenen Werkstoffen im tribologischen Kontakt mit unpolarem, ultrahochmolekularem Polyethylen (PE-UHMW).

2. Versuchsparameter

Für die Reibwertuntersuchungen wurde ein am Institut für Fördertechnik und Kunststoffe der TU Chemnitz eigens entwickeltes, oszillierendes Tribometer verwendet [9]. Dieses gestattet die Bestückung mit verschiedenen bewegten Probekörpern (Block, Kugel), die auf einer an einem Messtisch fest eingespannten Unterprobe gleiten (Abbildung 2). Dabei sind der Hub, die mittlere Geschwindigkeit und die Normalkraft variabel einstellbar.

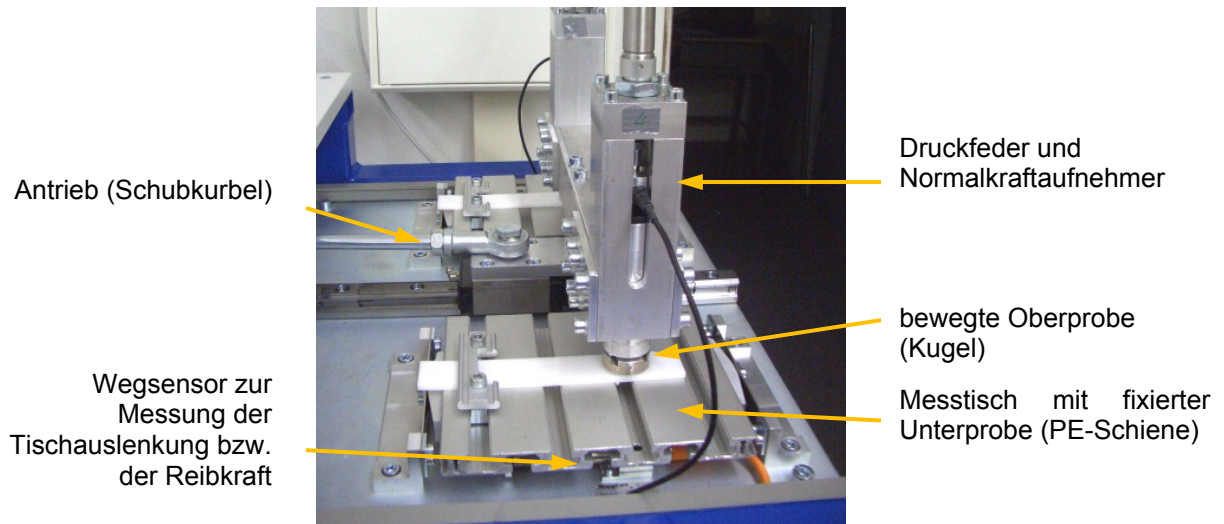


Abbildung 2: Kugel-Platte Tribometer *Tribo-Boxer* mit eingespannten Proben

Die Standardtestparameter für die im Folgenden vorgestellten Untersuchungen waren:

- Hub: 100 mm
- mittlere Gleitgeschwindigkeit: 0,1 m/s; 0,25 m/s
- Versuchsdauer: 24 h
- Gleitweg nach 24 h: 8640 m
- Reibwert: gemittelt zwischen 20 und 22 Versuchsstunden

In den Versuchen wurde das tribologische Prüfsystem Kugel-Platte, wie in Abbildung 3 dargestellt, verwendet. Für die als Grundkörper auf dem Messtisch fixierte Unterprobe wurde für alle Experimente PE-UHMW gewählt:

- Original Werkstoff "S"® Schwarz Antistatisch (Fa. Murfeldt)

Als Kugelwerkstoffe (Oberproben) wurden folgende verwendet:

- Stahl 100Cr6 gehärtet; Ø 8 mm und Ø 16 mm
- Stahl C85; Ø 8 mm
- Polyamid 66; Ø 8 mm
- Borosilikatglas; Ø 8 mm

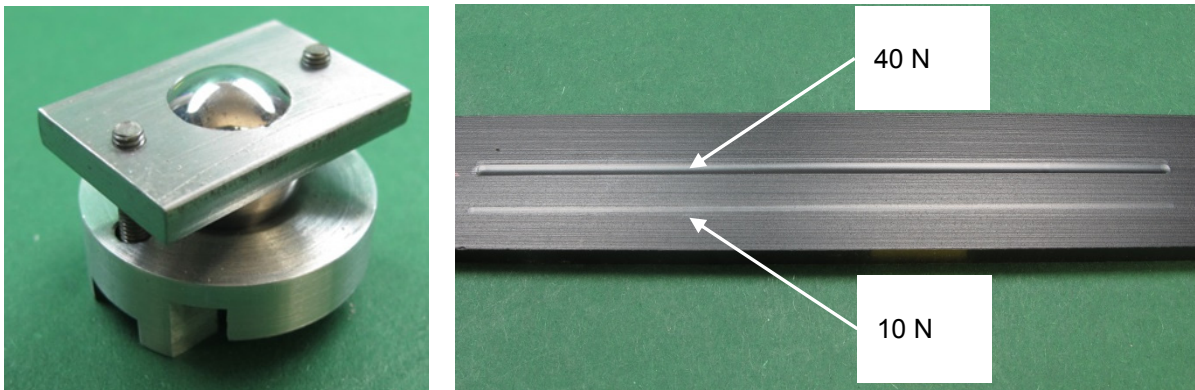


Abbildung 3: links: Kugelhalter mit 16 mm Stahl Kugel (Oberprobe)
rechts: PE-Schiene nach einem Reibungstest mit sichtbarer Laufspur

3. Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

3.1. Einlaufverhalten

Es ist bekannt, dass polymere Gleitpaarungen im Trockenlauf ein ausgeprägtes Einlaufverhalten zeigen, das im Allgemeinen mit deutlich ansteigenden Reibwerten verbunden ist [5]. Auch in den durchgeführten Versuchen zeigte sich ein charakteristischer Anstieg des Reibwertes während der Versuchsdauer. Bis zur späteren Stabilisierung des Reibwertes können prinzipiell vier charakteristische Phasen unterschieden werden (siehe Abbildung 4). Diese konnten bei allen untersuchten Werkstoffen beobachtet werden, jedoch sind Dauer und Reibwertunterschied in den einzelnen Phasen verschieden ausgeprägt.

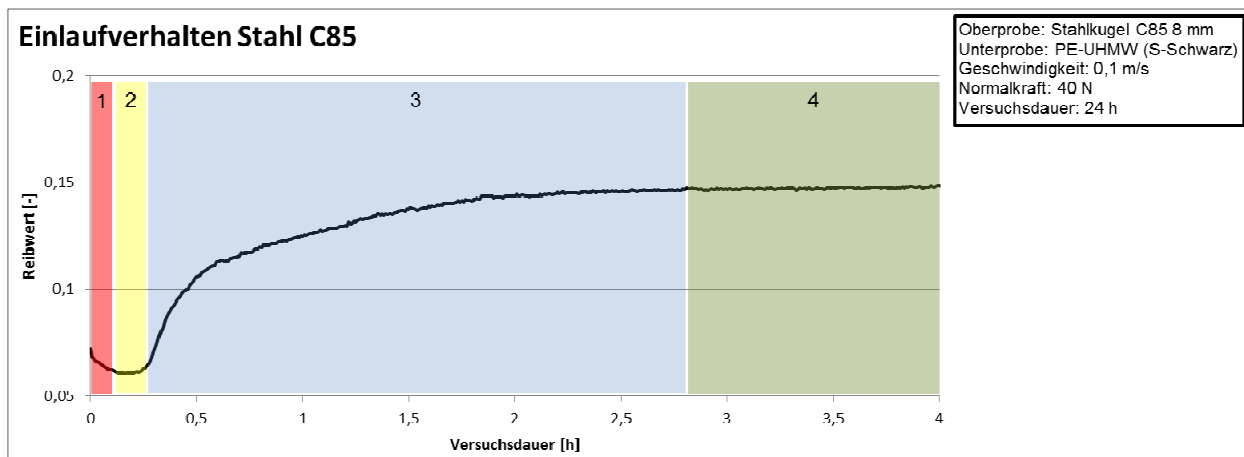


Abbildung 4: Charakteristische Phasen während der ersten Stunden eines Reibversuchs am Beispiel C85

Im Folgenden werden die Phasen und die darin ablaufenden Vorgänge erörtert und mögliche Erklärungsansätze aufgezeigt. Eine Gegenüberstellung der verschiedenen werkstoffspezifischen Einlaufverhalten zeigt Abbildung 5.

Phase 1: Abfall des Reibwertes nach Versuchsbeginn

Bei Einleiten der Bewegung liegen in der anfänglich minimalen Kontaktfläche zwischen Kugel und Schiene lokal sehr hohe Pressungen vor, die in den betrachteten Fällen deutlich über der Fließgrenze des PE-UHMW (ca. 17 MPa) liegende Materialspannungen verursachen. Das PE-Material wird gewalzt und deformiert, wodurch der Kugeltranslation ein hoher deformativ bedingter Widerstand entgegen wirkt. Nach kurzer Zeit bildet sich so eine plastisch deformierte Reibzone

aus, was mit Senkung der Pressung und des Bewegungswiderstandes einhergeht. Insgesamt dauert Phase 1 maximal 10 Minuten und wird durch eine hohe Normalkraft beschleunigt.

Phase 2: Minimaler Reibwert

Nach Ausbildung der plastisch verformten Laufspur wird ein niedriges Niveau mit minimalen Reibwerten erreicht. Auch diese Phase wird in ihrer zeitlichen Ausprägung durch hohe Normalkräfte verkürzt: bei Borosilikatglas und 10 N Normalkraft dauert sie über Stunden an, während sie bei einer Last von 150 N schon nach wenigen Minuten endet. Ebenso ist die Reibwertsenkung vom Kugelwerkstoff abhängig.

Phase 3: Anstieg des Reibwertes

In der dritten Phase kommt es zu einem signifikanten Anstieg des Reibwertes, der in dieser Höhe nicht allein durch die weitere Ausbildung der Laufspur durch andauernde viskoelastische bzw. viskoplastische Deformation sowie Verschleiß erklärt werden kann. Es ist deshalb davon auszugehen, dass dieses Verhalten durch die überlagerte Wirkung verschiedener Einflüsse, wie z. B. Temperatur, Oberflächenveränderungen, Verschleißpartikel oder zeitabhängige Deformationen verursacht wird. Die Dauer dieser Phase konnte bei nahezu allen Versuchen durch eine Erhöhung der Normalkraft verkürzt werden.

Phase 4: Stationärer, hoher Reibwert

In dieser Phase ist die Ausbildung der Laufspur weitgehend abgeschlossen, es findet keine grundlegende Veränderung der Kontaktfläche mehr statt und es herrscht ein thermisches Gleichgewicht im tribologischen System. Dieser Zustand konnte für alle untersuchten Werkstoffe nachgewiesen werden. Vereinzelt Langzeitversuche mit PA 66-Kugeln ($F_N = 70 \text{ N}$) über 90 h bestätigten diese „Sättigung“ des Reibwertes.

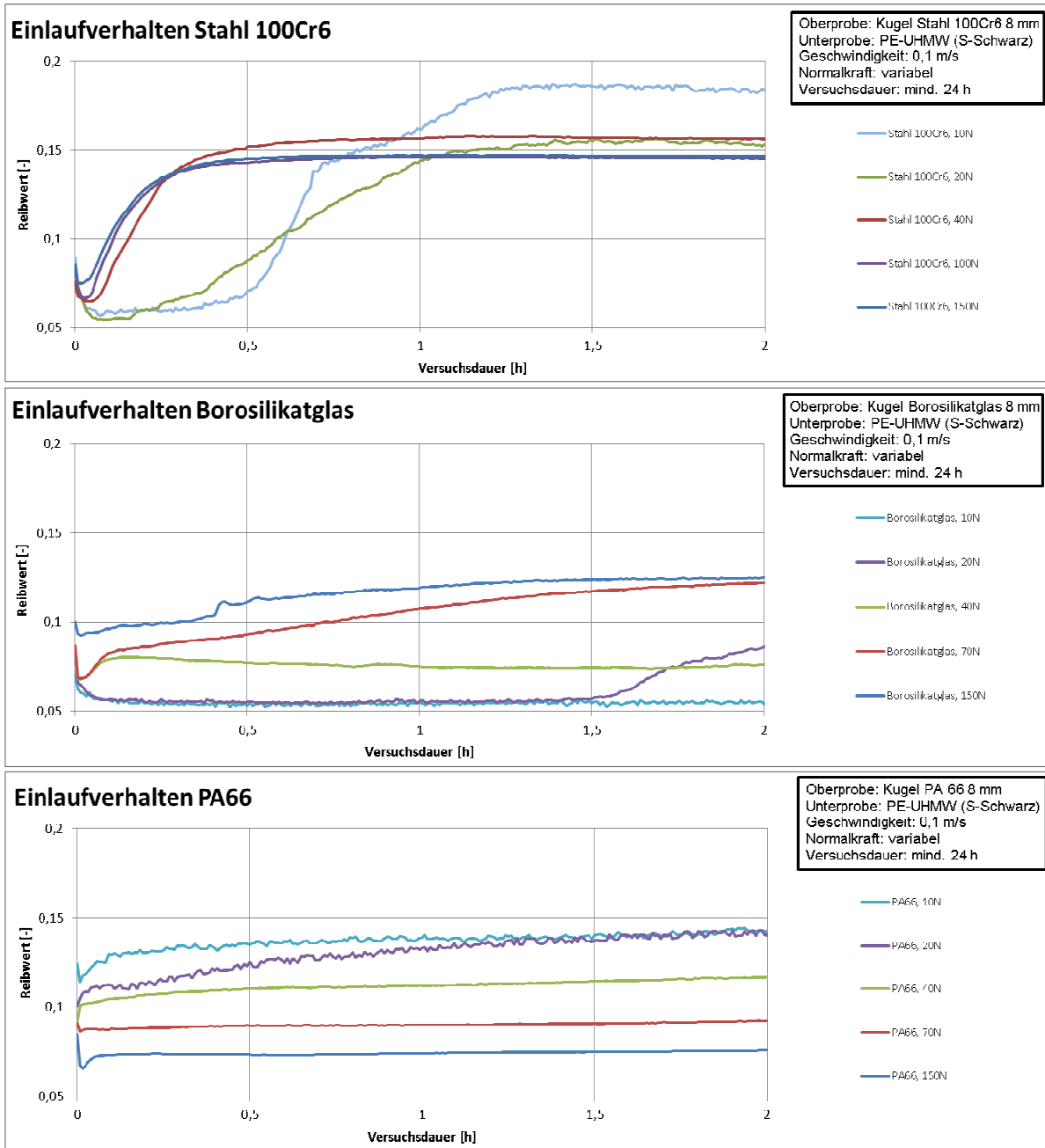


Abbildung 5: Reibwertverlauf der ersten 2 h von Kugeln \varnothing 8 mm
 Oben) Stahl 100Cr6
 Mitte) Borosilikatglas
 Unten) PA66

3.2. Verschleißverhalten

Die mikroskopische Vermessung (mit Laserscanningmikroskop Keyence VK 9710) der Kugeln zeigte bei allen Proben einen sehr geringen Verschleiß. Dabei blieb die Kugelgeometrie in der Kontaktzone selbst bei den höchsten Normalkräften erhalten. Profilschnitte durch die elliptisch deformierte Kontaktzone führten nicht zu quantifizierbaren Ergebnissen. Die nachweisbaren Kratzer auf den Kugeln lagen im Bereich weniger μm .

Abbildung 6 zeigt eine repräsentative Auswahl der Kontaktbereiche der Kugeln direkt nach den Reibtests. Dabei fällt auf, dass an den PA 66 Kugeln lediglich minimale Kratzer und polierte Bereiche, jedoch keinerlei Anlagerungen des Gegenmaterials PE-

UHMW, sichtbar sind. Bei Borosilikatglas erwies sich die Aufnahme aufgrund der Transparenz des Werkstoffs als schwierig und die Detektion von oberflächigen Kratzern war nicht eindeutig möglich. Minimale Anlagerungen des PE-UHMW waren jedoch vorhanden. Im Gegensatz dazu fand eindeutig ein Stoffübertrag des PE-UHMW auf die Stahlkugeln statt, der wahrscheinlich durch die hohe Oberflächenenergie von Stahl begünstigt wurde.

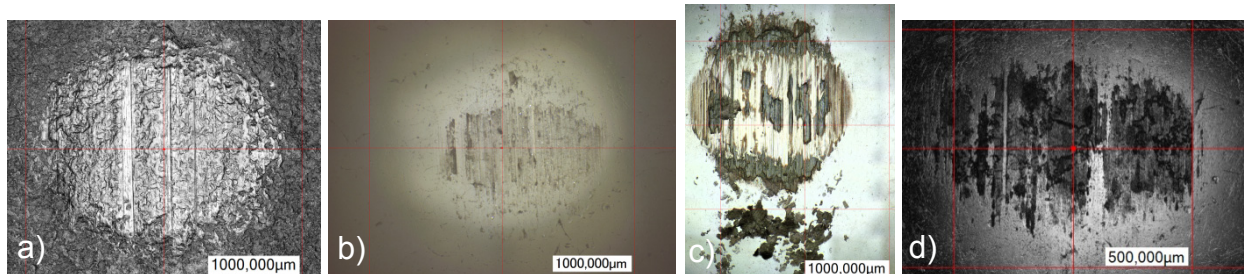


Abbildung 6: Typische Verschleißbilder von Kugeln aus

- a) PA 66, Ø 8 mm 40 N
- b) Borosilikat, Ø 8 mm 20 N
- c) 100Cr6, Ø 16 mm 40 N
- d) C85, Ø 8 mm 20 N

Die Profilschnitte durch die Laufspuren im PE-Material zeigten durchweg homogen deformierte Bereiche (Abbildung 7), wobei die Ausprägung der Spur mit entsprechender Normalkraftsteigerung zunahm. Abriebpartikel oder deutliche Unebenheiten waren in der Kontaktzone nicht vorhanden.

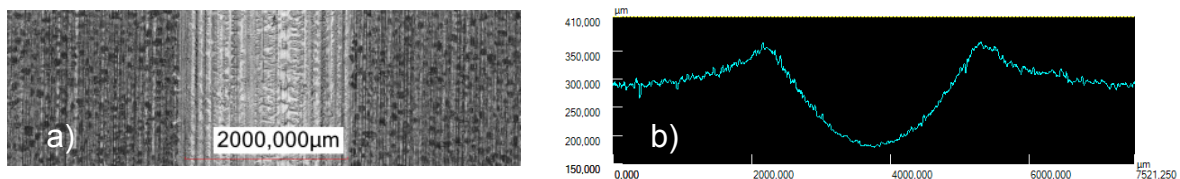


Abbildung 7: Laufspur in PE-UHMW Schiene nach Reibtest mit

- a) Kugel PA 66, Ø 8 mm, FN = 70 N (Profilbild)
- b) Kugel C85, Ø 8 mm, FN = 150 N (2d - Profilschnitt)

3.3. Normkrafteinfluss

In Abbildung 8 sind die gemittelten Reibwerte aus je vier Einzelversuchen dargestellt. Allen untersuchten Werkstoffen war die tendenzielle Reduktion des Reibwertes bei Erhöhung der Normalkraft gemein.

Wie dargestellt, werden bei Kontakt zwischen Kugel und Ebene aufgrund der zunächst geringen Kontaktfläche sehr hohe Pressungen erzeugt, die in allen untersuchten Lastbereichen plastische Verformungen hervorrufen. Im Anschluss unterliegt die Laufspur einem Materialspannungsabbau, weil sich infolge der zunehmenden Verformung auch die nominelle Kontaktfläche vergrößert. Mit anhaltender Verformung schwindet der Widerstand des Materials, so dass letztendlich (bei stabilisierten Reibwert) nur noch eine minimale elastische / plastische Deformation vorliegt. Diese wird, aufgrund des degressiven Anstiegs der Kontaktfläche bei Normkrafteerhöhung, immer kleiner.

Ebenso verringerte sich bei steigender Kraft meist die Standardabweichung (aus je vier Versuchen), was auf eine Verringerung des Rauigkeitseinflusses der Oberflächenstruktur zurückzuführen ist. Bei geringer Pressung sind strukturelle Einflüsse, wie z. B. Schleifspuren und Furchungen sehr bedeutend, da die Kontaktfläche sehr klein ist und

selbst bei Proben gleicher Charge keine mikroskopisch vergleichbaren Kontaktbereiche vorliegen. Wird die Kontaktfläche durch Normkraftzunahme vergrößert, minimiert sich der Einfluss der Oberflächenstruktur.

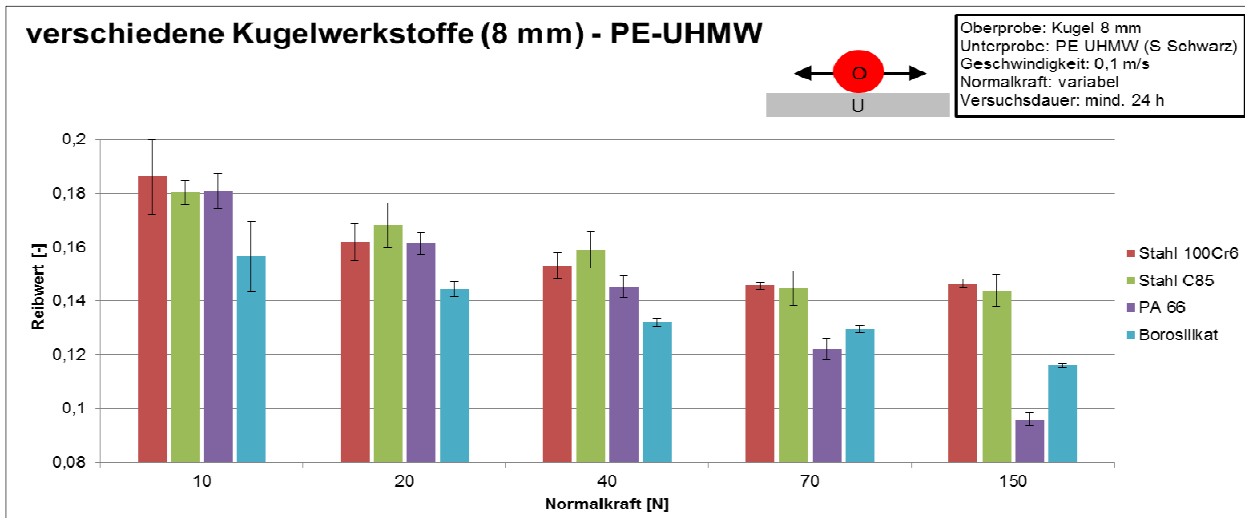


Abbildung 8: Gemittelter Reibwert (jeweils 4 Versuche) verschiedener Kugelwerkstoffe bei steigender Normalkraft

Die tendenziellen Reibwertunterschiede zwischen den Werkstoffen lassen sich auf den veränderten adhäsiven Reibungsanteil zurückführen. So wird die Oberflächenenergie von Stahl in der Literatur im Vergleich zu den Polymeren mit „sehr hoch“ [7] beschrieben, genaue Werte sind aber nicht verfügbar. Als grobe Schätzung kann Eisen ohne Oxidschicht mit ca. 2550 mN/mm [10] dienen. Für Borosilikatglas werden ca. 170 mN/mm [11] und für PA 66 ca. 47,5 mN/mm [7] angegeben. In den Untersuchungen besaßen die niedrig energetischen Werkstoffe immer die geringsten Reibwerte, was insbesondere bei hohen Normalkräften zu deutlichen Unterschieden im Reibwert führte.

3.4. Kontaktzoneneinfluss

Anhand des im Folgenden dargestellten Experimentes (Abbildung 9) soll der Einfluss der plastisch deformierten Zone auf die Entwicklung des Reibwertes demonstriert werden. Dazu erfolgte zunächst eine Steigerung der Normalkraft (jeweils nach Sättigung des Reibwertes) von 10 N bis 150 N. Die zuvor erläuterte Senkung des Reibwertes bei Erhöhung der Normalkraft wurde dabei bestätigt. Im Anschluss wurde, in derselben Laufspur, die Normalkraft in gleichen Schritten von 150 N auf 10 N gesenkt. Der Reibwert stieg entsprechend wieder an, jedoch in einem stärkeren Maße als der Abfall zuvor.

Diese tendenzielle Reibwerterhöhung lässt sich durch die plastische Deformation infolge der Normkraftsteigerung zu Beginn erklären. In Abhängigkeit von der wirkenden Kraft findet bei Überschreiten der Fließgrenze des PE-UHMW eine plastische Deformation der Belastungszone statt und es bildet sich eine kalottenartige Vertiefung mit der Breite b_1 bzw. b_2 aus (Abbildung 10 a) und b). Bei anschließender Entlastung bildet sich diese Verformung nicht gänzlich zurück, sondern es bleibt eine Vertiefung mit Durchmesser b_3 bestehen (Abbildung 10 c). Wird nun die Kugel in dieser verbleibenden, plastisch deformierten Zone unter geringerer Normalkraft beaufschlagt, bildet sich eine größere Kontaktzone als bei ursprünglicher Belastung. Dadurch liegt nominell eine geringere Pressung vor und der Reibwert ist höher.

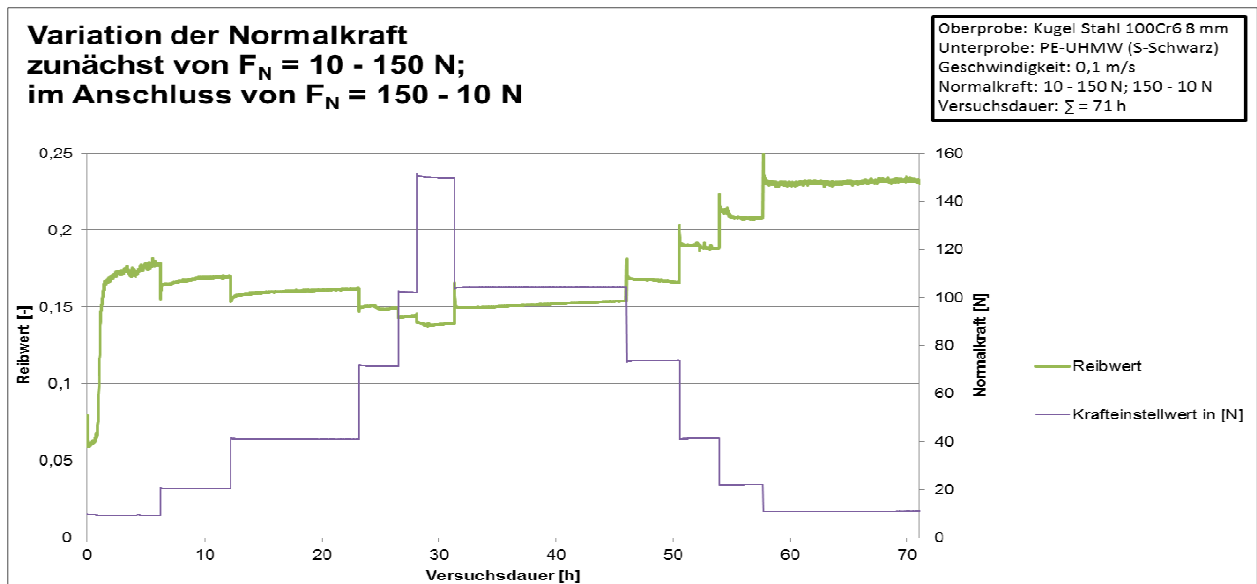


Abbildung 9: Reibwertverlauf bei Normalkrafterhöhung und abschließender –senkung

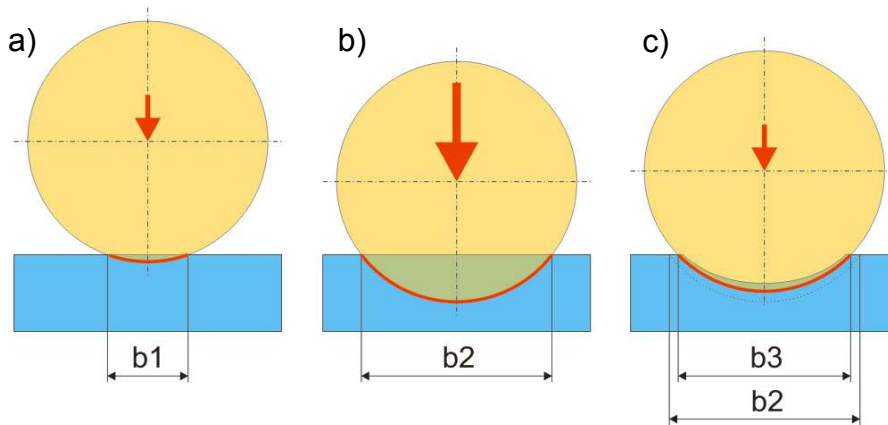


Abbildung 10: Kontaktbedingungen (schematisch) zwischen Kugel und PE-UHMW Schiene bei
a) Initialkontakt auf glatter Schiene mit geringer Normalkraft
b) Initialkontakt auf glatter Schiene mit hoher Normalkraft
c) erneutem Kontakt in plastischer deformierter Laufspur mit geringer Normalkraft

3.5. Verschleißeinfluss

Aufgrund leichter Kratzer und Ablagerungen auf der Oberfläche der Stahlkugeln (Abbildung 6) und deren möglichen Einflusses auf den Reibwert wurde nach ausreichender Stabilisierung des Reibwertes (32 h) die verschleißgeschädigte Kugel durch eine neue ersetzt und der Reibtest in gleicher Laufspur und bei unveränderten Lastparametern fortgeführt (Abbildung 11). Der Austausch dauerte etwa 10 Minuten. Der nun folgende Reibwertverlauf setzt auf einem höheren Niveau ein als bei Initialkontakt. Dabei führt die bereits geformte Laufspur zur Reduktion der Pressung und somit zu einem erhöhten Reibwert (vgl. Abschnitt 3.4).

Durch die 10-minütige Entlastungsphase und die damit verbundene Rückverformung der PE-Schiene wird die Oberfläche jedoch erneut deformiert und gewalzt. Die kontinuierliche Bildung der Laufspur führt zur Abnahme des Deformationswiderstandes und der Reibwert sinkt.

Es kann daraus abgeleitet werden, dass die minimalen Kratzer auf der Stahloberfläche (vgl. Abbildung 6) keinen signifikanten Einfluss auf den sich ausprägenden stationären

Reibwert haben. Das Verhalten verdeutlicht zudem, dass die Bildung einer Zwischenschicht durch Materialübertrag nicht ausschlaggebend für die Höhe des Reibwertes ist. Vielmehr hat die durch Kriechvorgänge entstehende Querschnittsgröße der Laufspur und die damit verbundene Senkung der Pressung in der Kontaktfläche die größte Bedeutung.

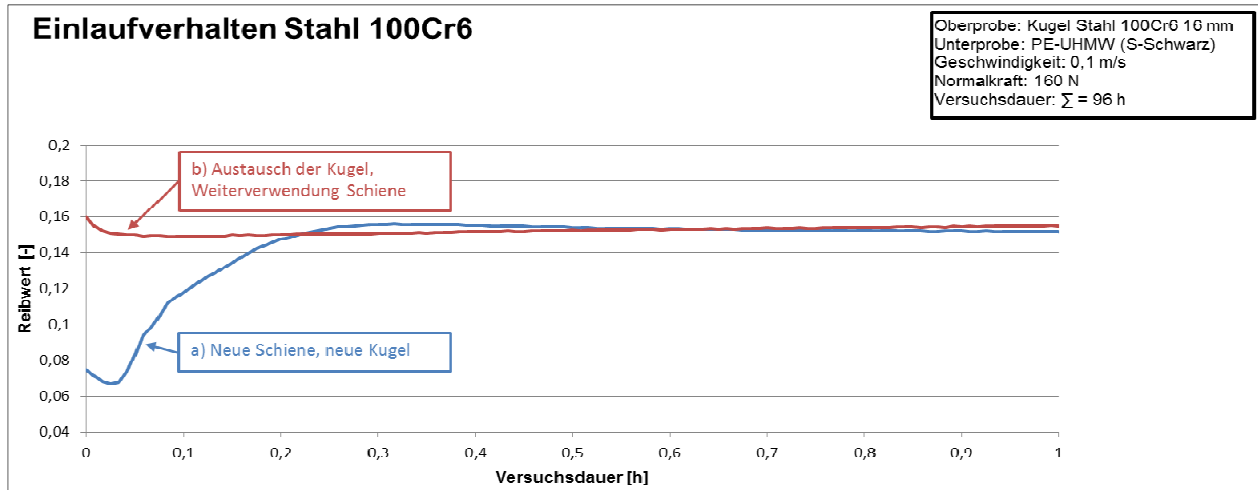


Abbildung 11: Einlaufverhalten von Kugel Stahl 100 Cr6 \varnothing 16 mm

- einer neuen Kugel und neuen Schiene mit charakteristischen Phasen und
- nach 32 h Versuchsdauer, Tausch der verschleißbehafteten Kugel und Ersatz durch neue Kugel bei Verwendung der gleichen Laufspur

3.6. Gleitgeschwindigkeitseinfluss

Eine deutliche Abhängigkeit bezüglich der Reibgeschwindigkeit konnte anhand erster Versuche nicht nachgewiesen werden. Der Vergleich zwischen 0,1 m/s und 0,25 m/s der Werkstoffpaarung PA 66 – PE-UHMW zeigt aber tendenziell niedrigere Reibwerte bei erhöhter Geschwindigkeit (Abbildung 12). Die Laufspur und der Verschleiß auf den Kugeln waren bei beiden Geschwindigkeiten ähnlich ausgeprägt.

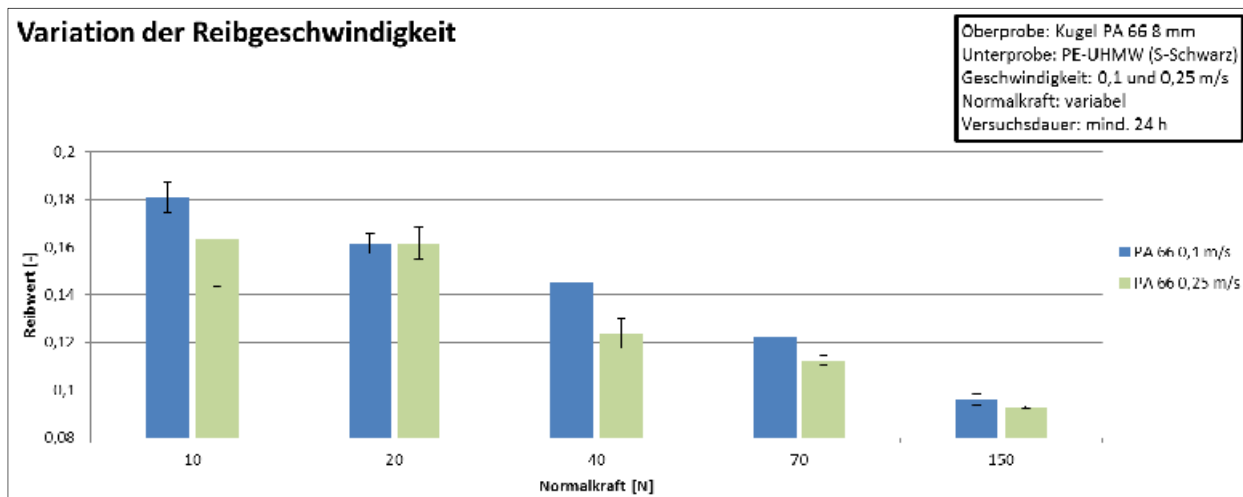


Abbildung 12: Gemittelter Reibwert (jeweils 4 Versuche) von PA 66 Kugel bei variabler Normalkraft und Geschwindigkeit

4. Zusammenfassung

Die Ergebnisse der durchgeführten Reibwertuntersuchungen bewiesen eine klare Senkung des Reibwertes durch Erhöhung der Normalkraft für alle betrachteten Werkstoffe. Bei PA 66 konnte eine Halbierung des Reibwertes demonstriert werden, wobei sich der erzielte Wert von $\mu = 0,09$ ($F_N = 150$ N) deutlich unter dem Reibwert von, flächigen aufliegenden, plattenförmigen PA 66 Probekörpern ($\mu \approx 0,3 \dots 0,5$) einordnet.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Ausformung der Laufspur die größte Bedeutung für die Ausprägung des Reibwertes hat. Anhand von 100Cr6-Kugeln wurde festgestellt, dass weder Materialübertrag von der Kunststoffschiene, noch leichte Kratzer an den Kugeln zu bedeutenden Veränderungen des Reibwertes führen. Vielmehr bildet sich, nach Initialkontakt der Kugel und anschließender plastischer Deformation, ein Gleichgewicht zwischen äußerer Beanspruchung und dem viskoplastischen Kriechvorgang in der gesamten Kontaktzone.

Bemerkenswert ist, dass für alle untersuchten Werkstoffe vier charakteristische Phasen bis zur Stabilisierung des Reibwertes durchlaufen wurden. Diese unterschieden sich, in Abhängigkeit vom Werkstoff und der Normalkraft, nur in ihrer zeitlichen Ausprägung und der Höhe des Reibwertes. Bei PA 66 fielen diese Differenzen, entgegen bisherigen Erfahrungen zu Kunststoff-Kunststoff Paarungen, besonders gering aus, wodurch sich die weitere Untersuchung dieses Werkstoffs empfiehlt.

Literatur

- [1] Unal, H.: Dry sliding wear characteristics of some industrial polymers against steel counterface. *Tribology International* 37 (2004) S. 727–732
- [2] Eiss, N.S.: Frictional instabilities in polymer–polymer sliding. *Tribology Transactions* Vol.36 (1993), S. 686 – 692
- [3] Van de Velde, F.: The friction and wear behaviour of polyamide 6 sliding against steel at low velocity under very high contact pressures. *Wear* 209 (1997), S. 106-114
- [4] Schumann, A; Weise, S.; Sumpf, J.; Nendel, K.: Oberflächenstrukturen zur Reibungs- und Verschleißreduzierung von Kunststoff-Reibpaarungen in Förderanlagen. *Tribologie und Schmierungstechnik* 59 (2012), Heft 5, S. 19-23
- [5] Bergmann, A.; Sumpf, J.; Bartsch, R.; Weise, S.; Faust, K.; Illek, R.: Tribologische Untersuchung und Beurteilung fördertechisch relevanter polymerer Werkstoffe. *Technomer 2013*, 23. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren. Chemnitz, 2013
- [6] Owens, D.; Wendt, R.: Estimation of the Surface Free Energy of Polymers. In: *J. Appl. Polym. Sci* 13 (1969), S. 1741-1747.
- [7] Erhard, G.: *Konstruieren mit Kunststoffen*, Carl Hanser Verlag München, 2008
- [8] Polzer, G., Meißner, F.: *Grundlagen zu Reibung und Verschleiß*, VEB Deutscher Verlag, Leipzig, 1982
- [9] 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.
- [10] Habenicht, G.: *Kleben – Grundlagen, Technologien, Anwendungen*, Springer Verlag, 2008
- [11] https://www.tu-chemnitz.de/physik/OSMP/Soft/V_07.pdf, abgerufen 18.07.2014

Autorenanschrift:

Dipl.-Ing. André Bergmann, Mitarbeiter der Gruppe Zugmittel und Tribologie
Technische Universität Chemnitz
Institut für Fördertechnik und Kunststoffe
Reichenhainer Str. 70
09126 Chemnitz
Tel.: +49 (371) 531-39668
E-Mail: andre.bergmann@mb.tu-chemnitz.de