

Den Verschleiß reduzieren

Polyimid sorgt bei Gleitlagern auch ohne Schmierung für einen geringeren Verschleiß

Polyimide (PI) gehören zur Gruppe der Hochtemperaturkunststoffe und werden daher bevorzugt in Einsatzgebieten verwendet, in denen technische Kunststoffe die Anforderungen temperaturbedingt nicht mehr erfüllen können. Besonders bei Anwendungen mit tribologischem Kontakt wie etwa Gleitlagerbuchsen können sie ihre Stärken ausspielen. Das Potenzial in diesem Bereich hat nun ein Forschungsprojekt der TU Kaiserslautern realitätsnah untersucht.

Kunststoffe werden für immer mehr tribologische Systeme verwendet. Korrosionsbeständigkeit, gute Notlaufeigenschaften und geringe Geräuschemissionen sind nur einige der Gründe für den anhaltenden Trend. Gerade im Trockenlauf haben sie sich aufgrund ihrer Wartungsarmut als sehr gute Gleitpartner für Stahl herausgestellt. Auch bei hochbelasteten Gleitlagern steigt der Marktanteil von Kunststoffen, insbesondere von Hoch-

leistungspolymeren, und sie verdrängen in diesem Bereich zunehmend metallische Werkstoffe [1]. Entscheidend ist dabei, das Material durch geeignete Modifizierung auf den jeweiligen Lastfall anzupassen. Meist werden neben verstärkenden Fasern interne Schmierstoffe wie z. B. Graphit oder teilweise submikroskalige Füllstoffe integriert [2–8]. Mit neuartigen Funktionsstoffen kann selbst bei technischen Kunststoffen die für diesen Hochlastbereich notwendige Leistung erreicht werden [9]. Von besonderer Bedeutung ist das Zusammenspiel der Additive mit der Polymermatrix und untereinander.

Bei tribologischen Systemen stand Polyimid (PI) bisher im Schatten von Polyetheretherketon (PEEK) und galt eher als Nischenprodukt. Mittlerweile gewinnt das Polymer allerdings zunehmend an Bedeutung. PI werden immer häufiger aufgrund ihrer hohen mechanischen Stabilität selbst bei hohen Temperaturen bis 300 °C bei solchen Anwendungen eingesetzt. Sehr gute tribologische Eigenschaften lassen sich bei PI vor allem durch den Einsatz von Festschmierstoffen wie Polytetrafluorethylen (PTFE), Graphit oder Molybdändisulfid erzielen. Zahlreiche Hersteller wie etwa DuPont, Evonik, Ensinger, MCAM und Saint-Gobain bieten Pulver, Halbzeuge oder Teile tribologisch ausgestatteter Compounds aus PI an. Typischerweise werden diese Materialien für Gleitlagerbuchsen oder Anlaufscheiben eingesetzt.

Geringere Reibung durch passende Additive

Kommerziell erhältliche Compounds enthalten 15–40 Gew.-% Füllstoffanteil. Auf den Einsatz von Verstärkungsfasern wird in der Regel wegen des Sinterprozesses und der bereits intrinsisch hohen Steifigkeit und der geringen Duktilität der gesinterten PI verzichtet. Compounds mit Glasfasern führen beispielsweise zu hohem Verschleiß und erhöhter Reibung [12]. Das Beimischen von PTFE senkt hingegen den Reibkoeffizient deutlich. Graphit führt zu einer Stabilisierung des Wärmehaushalts im Reibkontakt bei einer im Vergleich zu ungefüllten PI niedrigeren

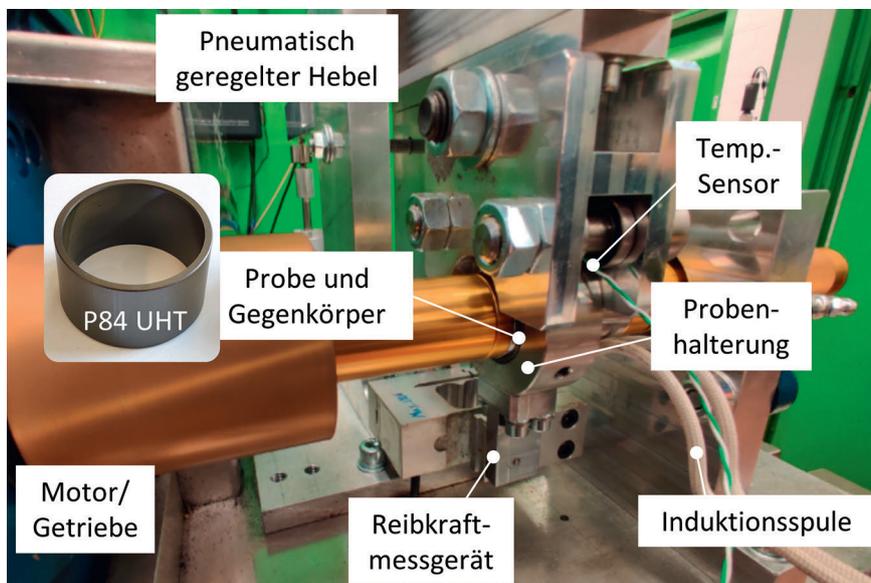


Bild 1. An dem Gleitlagerprüfstand der TU Kaiserslautern wurden Gleitlager aus Polyimid und aus anderen Hochleistungskunststoffen verglichen © Lehrstuhl für Verbundwerkstoffe, TU Kaiserslautern

leistungspolymeren, und sie verdrängen in diesem Bereich zunehmend metallische Werkstoffe [1]. Entscheidend ist dabei, das Material durch geeignete Modifi-

Nicht alle Kombinationen sind vorteilhaft, bei anderen wiederum ergeben sich Synergieeffekte, die zu sehr großen Leistungsschüben führen [8, 10, 11].

Kontakttemperatur aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit. Dadurch können in einem weiten Temperaturbereich gute Reibungs- und Verschleißwerte erreicht und eine thermomechanische Überlastung sowie thermische Degradation vermieden werden. Ungefüllte PI zeigen hingegen erst bei höheren Kontakttemperaturen eine deutliche Senkung der Reibung [13].

Compounds mit PTFE und Graphit kombinieren die positiven Eigenschaften der beiden Additive und verfügen über eine hohe Verschleißfestigkeit, die unabhängig von den gewählten Lasten und Geschwindigkeiten ist [14]. Diese PI-Compounds ermöglichen gegenüber ungefüllten PI den Einsatz bei deutlich höheren pv-Werten (Produkt aus Flächenpressung (p) und Gleitgeschwindigkeit (v)) und übertreffen hinsichtlich ihrer Temperaturstabilität andere Hochleistungskunststoffe wie beispielsweise PEEK oder Flüssigkristalline Polymere (Liquid Crystal Polymers, LCP).

Thermoplastische PI (TPI) zeigen bei sehr kleinen Lasten und Gleitgeschwindigkeiten vergleichsweise niedrigen Verschleiß und geringe Reibung. Bei steigenden pv-Werten sinkt der Reibungskoeffizient zunächst weiter. Sobald das Lastlimit des Werkstoffes aufgrund Erwärmung und mechanischer Beanspruchung erreicht wird, steigen Verschleiß und Reibung rapide an [15]. Dieses Lastlimit wird bestimmt durch alle am tribologischen System beteiligten Komponenten. Die hohe Wärmeformbeständigkeit von PI gewährleistet dabei ein sehr vorteilhaftes Verhalten.

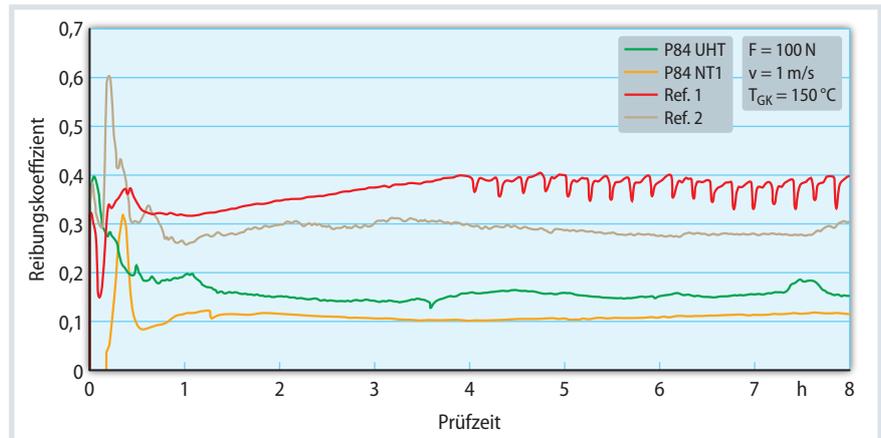


Bild 2. Repräsentative Verläufe des Reibungskoeffizienten der Kunststofflager gegen Stahl: Die Gleitlager aus Polyimid weisen einen fast durchgehend geringeren Koeffizienten auf als die Referenzen Quelle: Evonik Fibres; Grafik: © Hanser

Der Trend bei Hochleistungskunststoffen geht aufgrund der zunehmenden Miniaturisierung in vielen Bereichen und ihrem häufigen Einsatz als Ersatz für Metalle bei Bauteilen in Richtung einer höheren Temperaturbeständigkeit. Evonik hat aus diesem Grund die PI-Type P84 UHT entwickelt. Wegen ihrer deutlich verbesserten thermo-oxidativen Stabilität kann sie in Anwendungen verwendet werden, die Kunststoffen bisher verschlossen waren.

Gängige Verarbeitungsverfahren nicht anwendbar

Da PI meist keinen Schmelzbereich bzw. auch bei hohen Temperaturen bis zu 450 °C nur geringe Erweichung aufweisen, können in der Kunststoffindustrie gängige Verarbeitungsmethoden wie

Spritzgießen, Extrusion oder Pulverbeschichtung nicht angewendet werden. Verarbeitet werden PI deshalb häufig mithilfe etablierter Sintertechnologien. Großvolumige Platten und Zylinder können beispielsweise durch Heißpressen hergestellt werden. Diese PI-Halbzeuge weisen hohe mechanische Festigkeiten auf. Bauteile werden daraus mittels mechanischer Bearbeitung gefertigt, wobei sich enge Toleranzen und hohe Oberflächengüte prozesssicher einhalten lassen. Sollen hohe Stückzahlen endmaßnaher Teile gefertigt werden, bietet sich das Direct-Forming-Verfahren an. Dabei werden – ähnlich wie bei der Verarbeitung von Sintermetallen – bei Raumtemperatur und unter hohem Druck sogenannte „Grünteile“ hergestellt und entformt, die erst anschließend in einem Sinterofen die endgültige Festigkeit erreichen. »

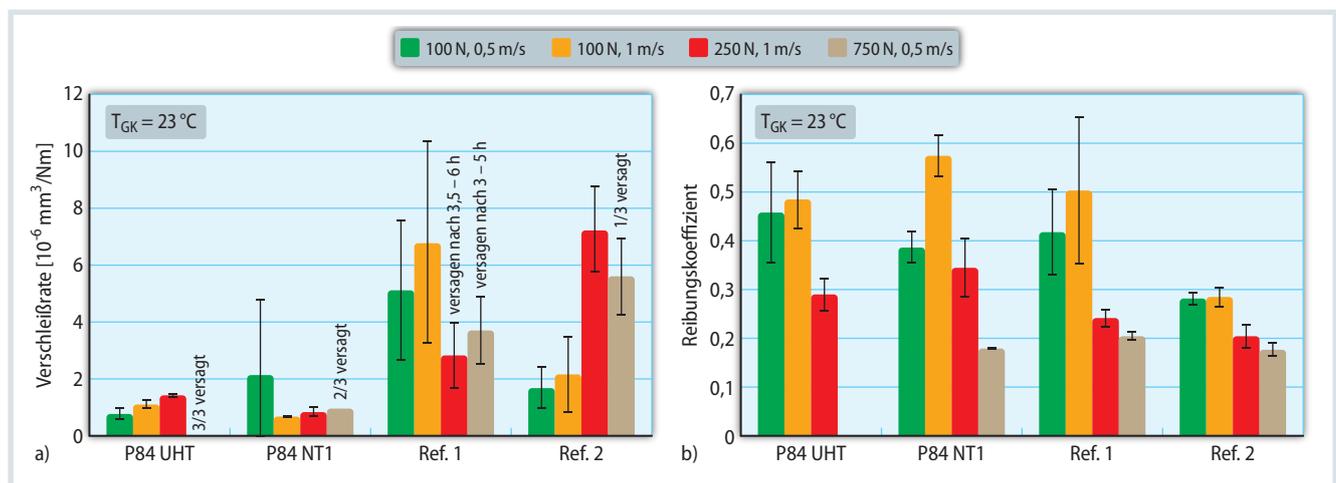


Bild 3. Spezifische Verschleißrate und Reibungskoeffizient der Kunststoff-100Cr6-Systeme bei einer Gegenkörpertemperatur (T_{GK}) von 23 °C (Raumtemperatur) und verschiedenen Gleitgeschwindigkeiten und Normalkräften: Bei 750 N versagt ein Großteil der Gleitlager Quelle: Evonik Fibres; Grafik: © Hanser

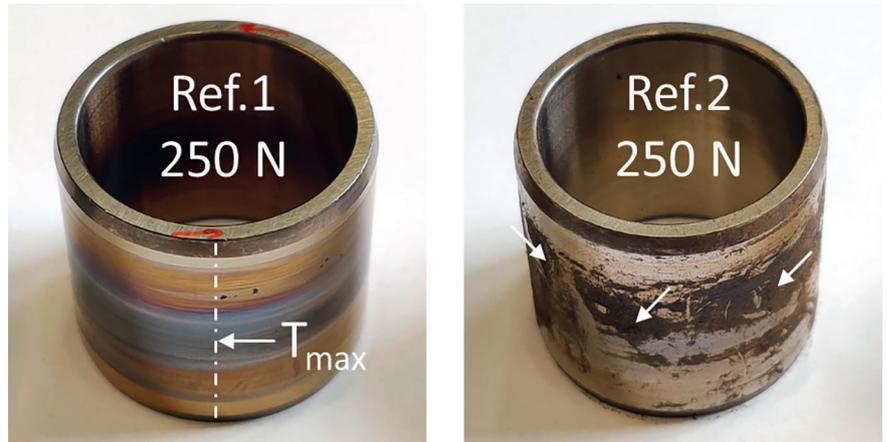


Bild 4. Korrosion und Ablagerungen auf den Gegenkörpern können die Verschleißmechanismen deutlich verändern, bis hin zu einem abrupten Ausfall der Gleitlager © Evonik Fibres

Um zu untersuchen, ab welchen Bedingungen hinsichtlich Last, Geschwindigkeit und Temperatur ein Einsatz von PI sinnvoll ist und wann die Polymere an ihre Grenzen gelangen, wurde eine tribologische Charakterisierung von Gleitlagerbuchsen aus P84 UHT und ein Vergleich mit solchen aus konventionellen Hochleistungskunststoffen wie PEEK durchgeführt. Die tribologischen Versuche wurden an einem am Lehrstuhl für Verbundwerkstoffe der Technischen Universität Kaiserslautern (TUK) entworfenen und konstruierten Gleitlagerprüfstand (**Bild 1**) im Trockenlauf bei Raumtemperatur sowie einer Gegenkörpertemperatur (T_{GK}) von 150 °C durchgeführt.

Vergleich von PI und PEEK

Neben den Gleitlagern aus P84 UHT und P84 NT1, jeweils mit Graphit compounding, wurden zwei am Markt verfügbare tribologisch optimierte Hochleistungsgleitlager (Referenz 1 (Ref. 1): Iglidur X und Referenz 2 (Ref. 2): Iglidur Z) der Igus GmbH, Köln, als Referenzmaterialien untersucht. Die Kunststoffbuchsen ($D_i = 30$ mm, $D_a = 34$ mm) wurden in eine Stahlhülse gepresst und anschließend mit einem Gegenkörper aus 100Cr6-Stahl (Hersteller: Schaeffler, Herzogenaurach) bei 23 °C bzw. aus Cronidur-Stahl (Hersteller: Energietechnik Essen, Essen) bei 150 °C in Kontakt gebracht. Es kamen polierte und gehärtete Kugellagerinnenringe mit einer Rauheit (R_a) von 0,2 µm zum Einsatz. Die Normalkraft wurde über einen pneumatisch geregelten Hebel aufgebracht, die auf die Hülse übertragene Reibkraft wurde mit 0,5 Hz kontinuierlich

erfasst. Zur Abbildung unterschiedlicher Lastfälle wurden die beiden Kombinationen aus Gleitgeschwindigkeit (v) und Normalkraft (F_N) definiert:

- $v = 0,5$ m/s, $F_N = 100$ und 750 N
- $v = 1,0$ m/s, $F_N = 100$ und 250 N

Sie wurden über die Prüfzeit (Δt ; 20 h bei 23 °C, 8 h bei 150 °C) konstant gehalten. Pro Lastkollektiv wurden drei Messungen durchgeführt. Der Reibungskoeffizient (Coefficient of Friction, COF) wurde durch Mittelung aller Datenpunkte der stationären Phase (= konstante Reibkraft) berechnet:

$$COF = \frac{F_R}{F_N}$$

Der Systemverschleiß wurde als spezifische Verschleißrate ermittelt [16]:

$$w_s = \frac{\Delta m}{\Delta t} \frac{1}{\rho \cdot F_N \cdot v}$$

Die Dichtewerte wurden aus den jeweiligen Datenblättern entnommen bzw. nach Archimedischem Prinzip gemessen. Der Masseverlust (Δm) ergab sich durch Wiegen der Lager vor und nach dem Versuch mithilfe einer Präzisionsanalysewaage des Typs ABT 120-5DM der Kern & Sohn GmbH, Balingen-Frommern.

Eine konstante Reibkraft wurde über alle Werkstoffe hinweg nach 5–10 Stunden Prüfzeit bei Raumtemperatur erreicht, nach 2–4 Stunden bei 150 °C. Bei temperiertem Gegenkörper war zu Beginn stets ein starker Anstieg der COF-Werte zu erkennen (**Bild 2**), welcher sich nach wenigen Minuten normalisierte. Trotz der geringen Wanddicke von 2 mm führt die eingetragene Reibenergie auf-

Die Autoren

Prof. Dr. Alois K. Schlarb ist Inhaber des Lehrstuhls für Verbundwerkstoffe an der TU Kaiserslautern;
alois.schlarb@mv.uni-kl.de

M.Sc. Sebastian Kamerling ist seit 2016 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Verbundwerkstoffe der TU Kaiserslautern tätig;
sebastian.kamerling@mv.uni-kl.de

Dr. Christian Maurer leitet den Bereich Future Market and Technology Concepts für den Bereich High Performance Polymers bei Evonik in Marl;
christian.maurer@evonik.com

Dr. Silke Witzel verantwortet den Bereich Polymer Backbone & Polyimid Design bei der Evonik Fibres GmbH in Lenzing/Österreich; silke.witzel@evonik.com

Dieter Danzer betreut den Bereich Anwendungstechnik PI Specialties bei der Evonik Fibres GmbH in Lenzing/Österreich; dieter.danzer@evonik.com

Service

Literatur & Digitalversion

- Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/2020-11

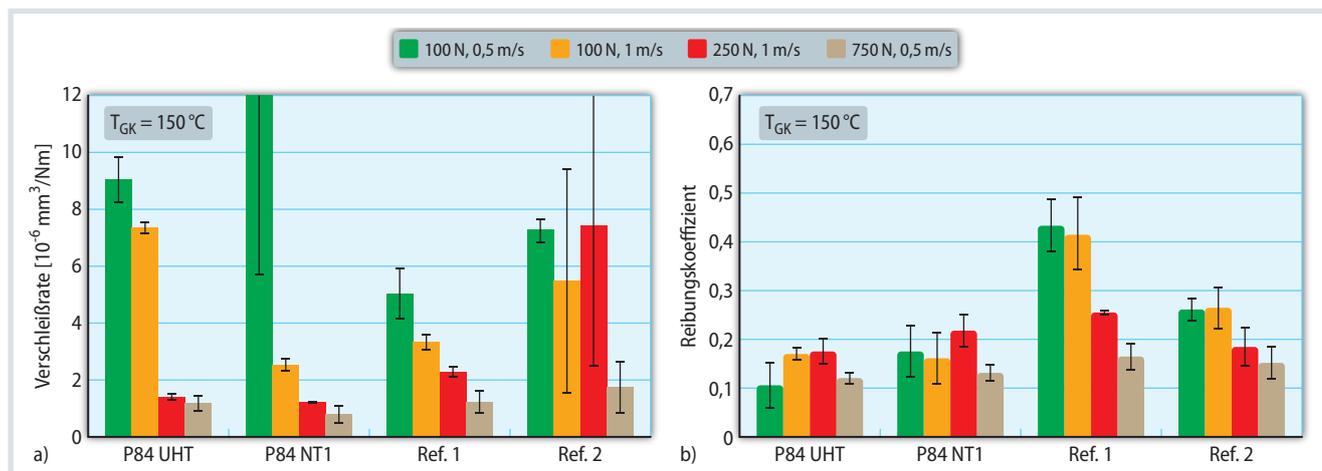


Bild 5. Verschleißrate und Reibungskoeffizient der Kunststoff-Cronidur-Systeme bei 150 °C Gegenkörpertemperatur und verschiedenen Gleitgeschwindigkeiten und Normalkräften: Der Reibungskoeffizient bleibt bei den PI über die Lastbedingungen weitgehend konstant Quelle: Evonik Fibres; Grafik: © Hanser

grund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe zu hohen Temperaturen im Kontaktbereich, was durch die Temperierung noch verstärkt wird. Der COF-Anstieg ist demnach auf die thermische Expansion der Lager und die damit einhergehende Verringerung des Lagerspiels zurückzuführen [17], die durch den fortschreitenden Verschleiß ausgeglichen wird.

Verschleißrate um mindestens 50 % gesenkt

Die tribologische Leistungsfähigkeit der untersuchten Systeme wird durch den stationären COF und die Verschleißrate abgebildet. Bei einer Temperatur von 23 °C gegen den 100Cr6-Gegenkörper (**Bild 3**) treten bei Ref. 1 bei 100 N vergleichsweise hohe Verschleißraten auf. Sie sinken bei $F = > 100$ N um rund die Hälfte. Ref. 2 zeigt hingegen ein umgekehrtes Verhalten und weist bei 250 N die höchsten aller gemessenen Verschleißraten auf. Unter jeglichen Bedingungen erreichen die PI P84 UHT und NT1 eine Verbesserung der Verschleißrate um mindestens 50 %, teilweise sogar um bis zu 80 %. Die gemessenen Verschleißraten betragen lastunabhängig rund 10^{-6} mm³/Nm. Bei 750 N versagen jedoch die meisten der geprüften Lager bereits nach wenigen Minuten. Eine Steigerung der Normalkraft führt bei allen Werkstoffen tendenziell zu niedrigeren COF-Werten. Ref. 2 zeigt in diesem Punkt die beste Leistung mit Werten um 0,25, während die PI-Compounds und ebenfalls Ref. 1 erst bei $F = > 100$ N Werte unter 0,4 erreichen.

Teilweise waren Korrosionserscheinungen oder Materialablagerungen auf den Gegenkörpern vorhanden (**Bild 4**). Diese Variation der lokalen Kontaktgeometrie kann eine plötzliche Änderung der auftretenden Verschleißmechanismen zur Folge haben und überlagerte Schwingungen und Temperaturänderungen verursachen [18]. Deshalb kann es auch bei zuvor niedrigem Reibungskoeffizienten schlagartig zum Totalausfall kommen [19], was unabhängig vom Material besonders häufig bei 750 N auftrat.

Konstante Reibung bei verschiedenen Lasten

Wärme und Verschleißpartikel können aufgrund der geometrischen Situation kaum nach außen entweichen und verursachen im Kontakt schwere thermische und abrasive mechanische Schäden [19]. Das Versagen der Lager ging stets mit einer deutlichen Erhöhung von COF und Temperatur einher. Erste Rückschlüsse auf die während der Experimente erreichten Kontakttemperaturen ermöglichen die metallischen Gegenkörper. Stähle bilden unter Erhitzung eine Oxidschicht, die je nach Höhe der Temperatur bestimmte optische Eigenschaften besitzt [19]. Vor allem der Gegenkörper von Ref. 1 zeigte nach Belastung mit 1 m/s und 250 N eine deutliche Verfärbung, die hindeutet auf eine Maximaltemperatur von rund 350 °C in der Mitte der Laufspur und einen abfallenden Temperaturgradienten bis ca. 200 °C zu den Seiten. Dieser Verlauf stimmt mit bisherigen Beobachtungen und thermischen Simulationen überein [20].

Eine Gegenkörpertemperatur von 150 °C führt bei 100 N materialunabhängig zu hohen Verschleißraten, die sich mit steigender Normalkraft stark verringern und schließlich die bei Raumtemperatur beobachteten Höhen erreichen (**Bild 5**). Die niedrigsten Werte sind dabei bei den PI-basierten Materialien zu verzeichnen. Der Reibungskoeffizient ist für diese Werkstoffe nahezu identisch über alle Lastbedingungen hinweg. Die Werte schwanken zwischen 0,1 und 0,22. Die Referenzmaterialien zeigen hingegen analog zur Verschleißrate eine deutliche Lastabhängigkeit. Ref. 1 erreicht mit 0,43 den höchsten gemessenen Wert. Die Reibungswerte liegen bei 150 °C insgesamt auf einem deutlich niedrigeren Niveau im Vergleich zur Prüfung bei Raumtemperatur. Womöglich ist das eine Folge der veränderten rheologischen Eigenschaften im Kontaktbereich [19].

Die Nutzung tribologisch optimierter Kunststoffe für trocken laufende Gleitlager besitzt großes leistungssteigerndes Potenzial. Besonders PI-basierte Werkstoffe bieten sich aufgrund ihrer sehr guten Temperaturbeständigkeit und Dimensionsstabilität für dieses Einsatzgebiet an. Die auf dem Gleitlagerprüfstand durchgeführten Messungen verdeutlichen die Leistungsfähigkeit unter verschiedenen Lastbedingungen: Insbesondere bei erhöhter Temperatur und unter hohen Normalkräften zeigen die PI-basierten Materialien niedrige Reibungskoeffizienten. Die Verschleißrate ist bei Raumtemperatur stets mehr als 50 % geringer, als das bei den untersuchten Vergleichsmaterialien der Fall ist. ■