

# Experimentelle Analyse des Reibungsverhaltens graphitgeschmierter Axialkugellager

## Zusammenfassung:

Öle und Fette sind die häufigsten Schmiermittel für mechanische Konstruktionselemente wie Wälz- oder Gleitlager im Maschinenbau. Forschungen unterschiedlicher Disziplinen hat ein umfangreiches Verständnis der Schmiermechanismen geliefert, das die Anwendung der beiden Schmiermittel unter verschiedenen Randbedingungen, wie etwa bei extremen Temperaturen oder hohen Drücken, ermöglicht. Neben diesen beiden klassischen Schmiermitteln stellen Festschmierstoffe eine Alternative dar, um tribologische Systeme zu schmieren. Da diese Systeme jedoch vergleichbar wenig erforscht sind, steht kaum Fachwissen zu deren Verwendung in üblicher Konstruktionsliteratur zur Verfügung. Im Rahmen dieses Beitrags werden experimentelle Ergebnisse zum Reibungsverhalten von graphitgeschmierten Axialkugellagern präsentiert. Es werden Axialkugellager 51208 mittels Airbrushpistolen mit Graphitdispersion geschmiert. Die Ergebnisse sind Reibungszahlen im Bereich von 0,008 ( $C/P = 6$ ) bis 0,019 ( $C/P = 47$ ). Die Reibungszahl sinkt somit mit steigender Last, wohingegen bei steigender Drehzahl keine signifikante Veränderung gemessen werden kann.

## Abstract:

Oil and grease are the most common lubricants for mechanical design elements such as rolling or journal bearings. Research in different areas has provided a comprehensive understanding of the lubrication mechanisms and allows the application of both lubricants under different conditions, such as extreme temperatures or high pressures. In addition to these two classic lubricants, solid lubricants represent an alternative method of lubricating tribological systems. However, since these systems are under-researched, little expertise on their use is available in common literature. In this paper, experimental results on the friction behavior of graphite-lubricated axial ball bearings are presented. Axial ball bearings 51208 are lubricated with graphite dispersion using air-brush. The results show coefficients of friction in the range of 0.008 ( $C/P = 6$ ) to 0.019 ( $C/P = 47$ ). The coefficient of friction decreases with an increasing load, whereas with increasing rotational speed no significant changes are measurable.

## 1. Einleitung

Getriebe und Wälzlager werden heutzutage überwiegend mit Ölen und Fetten geschmiert. Aufgrund der häufigen Verwendung der beiden Schmiermittel sind diese umfangreich erforscht. Festschmierstoffe dagegen sind eine Gruppe von Schmiermitteln, die kaum erforscht sind, weshalb auch kaum Erfahrungswissen vorhanden ist. Dies zeigt sich nicht zuletzt in den wenigen Informationen, die in gängiger Konstruktionsliteratur zu Festschmierstoffen zu finden sind. Die Erforschung der Festschmierstoffe hat daher zum Ziel, neue Erkenntnisse zu deren Schmiermechanismen zu generieren, um sie zielgerichtet in tribologischen Konstruktionselementen wie Getrieben oder Wälzlagern einsetzen zu können. Neben den hochbelasteten Wälzkontakten können die Ergebnisse auch Aufschluss geben, ob der Einsatz in geringer belasteten Anwendungen (z. B. Gleitlagern) Vorteile mit sich bringt.

In diesem Beitrag wird der Einfluss von Graphit auf das Reibungsverhalten von Axialkugellagern untersucht. Dazu wird eine Validierungskonfiguration genutzt und das übertragende Drehmoment der Axialkugellager (Verlustmoment) gemessen. Daraus kann anschließend die Reibungszahl bestimmt werden. Die handelsüblichen Axialkugellager werden dabei zu Beginn und im Betrieb mit Graphitdispersion geschmiert.

## 2. Stand der Forschung

Graphit besteht aus Schichten von hexagonal angeordneten Kohlenstoffatomen (siehe Abbildung 1). Es wird zum einen aus natürlichen Lagerstätten in u. a. China, Indien und Südkorea gewonnen. Zum anderen kann es auch synthetisch hergestellt werden (Acheson-Verfahren). Graphit wird bspw. in Bleistiften, Elektroden oder als Schmiermittel verwendet. [1]

Die Schmierwirkung von Graphit ist bereits seit vielen Jahrzehnten bekannt. 1928 postulierte Bragg dazu die sogenannte „deck-of-cards“ Theorie [2]. Er begründet die Schmierwirkung von Graphit im Abscheren der Ebenen. Einige Forschungsberichte widersprechen dieser Theorie, wonach die Schmierwirkung von Graphit auf Zusatzmoleküle im Kontakt (bspw. Wassermoleküle) zurückzuführen ist. [3–5] Demnach sind die Umgebungsbedingungen eines mit Graphit geschmierten Systems entscheidend für die Ausprägung der Reibungseigenschaften. In tribologischen Konstruktionselementen wie Gleit- oder Wälzlagern wird Graphit nur selten als Schmiermittel eingesetzt. Nicht zuletzt da auch nur wenig Informationen in üblicher Konstruktionsliteratur [6–8] zur Verfügung stehen, findet es bei Ingenieuren nur selten Anwendung.

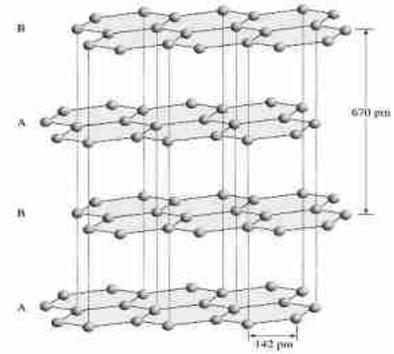


Figure 1: Graphitstruktur [1]

Kiran et al. [9] fertigten eine Legierung mit Graphitzusatz für Gleitlager. Der Verschleiß in den Versuchen mit dem Material entsprach dabei den Erwartungen der Forscher. Mit mehr Last, mehr Geschwindigkeit oder höherer Laufzeit entstand in den Versuchen mehr Verschleiß. Sharma et al. [10] nutzen eine ähnliche Legierung wie Kiran et al. und zeigten, dass im Bereich von Grenzreibung der Verschleiß eines Gleitlagers durch das zugesetzte Graphit reduziert werden konnte. Im Bereich der Wälzlager gibt es bereits einen Anbieter, der Wälzlager mit Graphitschmierung für Temperaturen bis zu 350°C bewirbt [11]. Ein weiterer Hersteller [12] bewirbt Festschmierstoffe, die in Compounds mit Ölen oder Fetten gebunden oder gelöst sind. Offen bleibt dabei jedoch die genaue Zusammensetzung der Schmierstoffe. Beide Angaben eint, dass die beworbenen Lager bzw. Schmiermittel nur für geringe Drehzahlen (< 500 1/Min) (vgl. [11,12]) freigegeben sind. Somit zeigt sich, dass Graphit als Schmiermittel erst wenig erforscht ist. Nur wenige Forschungsberichte existieren, die den Einfluss von reinem Graphit auf das tribologische Verhalten eines Kontakts analysieren. Morstein und Dienwiebel [Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.](#) [13] untersuchen mit einem Mikrotribometer den Einfluss unterschiedlich dicker Graphitbeschichtungen auf die Reibwerte. Sie finden heraus, dass bei zunehmender Schichtdicke die Reibwerte sinken, was jedoch durch Pflügeffekte mehr als ausgeglichen wird.

Die Literaturrecherche zeigt, dass bisher nur wenig Erfahrungswissen zum Einsatz von Graphit in mechanischen Konstruktionselementen vorhanden ist. Erste Erfahrungen zu Graphitschmierungen sind vorhanden, umfassen aber Graphit in einem Bindemittel, dessen Einfluss auf das Reibverhalten noch nicht ausreichend erklärt wird. Darüber hinaus fehlen Forschungsberichte zum Einfluss von Graphit auf hochbelastete Wälzkontakte.

## 2.1. Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Analyse des Reibungs- und Verschleißverhaltens graphitgeschmierter Axialkugellager. Der Einsatz von bindemittelfreiem Graphit erlaubt die Analyse des Einflusses von reinem Graphit auf das Reibungsverhalten der Wälzlager. Dabei werden hochbelastete Wälzkontakte bei unterschiedlichen Lagerdrehzahlen betrachtet und das Verhalten über die Reibungszahl beschrieben. Die Ergebnisse geben Aufschluss über die Randbedingungen, unter denen Graphitschmierungen in hochbelasteten Kontakten eingesetzt werden können.

### 3. Methode

#### 3.1. Prüfling

Die Versuche werden mit handelsüblichen Axialkugellagern (Baureihe 51208) durchgeführt. Die Lager werden gereinigt, bevor sie manuell mit Graphit beschichtet werden. Die Beschichtung erfolgt mittels handelsüblicher Airbrush-Pistolen (Harder-Steenbeck Ultra Solo). Aufgesprüht wird Graphitdispersion (DAG 386, [14]), die als Verdünnungsmittel überwiegend Ethanol enthält. Noch während des Beschichtungsvorgangs verdampft das Ethanol und eine dunkle Graphitschicht bleibt auf der Oberfläche haften. Für die Beschichtung werden die Lager zerlegt und Innen- und Außenringe sowie Käfige und Kugeln separat beschichtet. Die Käfige werden von beiden Seiten beschichtet. Anschließend sollten die Lager bei Raumklima mindestens 24 h trocknen. Die gereinigten Lager sind in Abbildung 1 abgebildet. Die anschließende Beschichtung mit der Airbrush-Technik und Graphitdispersion führt zu den dunkel eingefärbten Lagern (vgl. Abbildung 2).



Abbildung 1. Axiallager vor der Beschichtung.



Abbildung 2. Axiallager nach der Beschichtung und vor den Versuchen.

#### 3.2. Validierungskonfiguration

Die Untersuchungen werden auf einem Systemtribometer am IPEK – Institut für Produktentwicklung durchgeführt. Der Antrieb des Lagerinnenrings erfolgt über ein Planetengetriebe und einen Asynchronmotor. Die Lager sind in einer abgedichteten Prüfkammer, sodass kein Öl aus dem Getriebe das Lager beeinflussen kann. Die Normalkraft wird über Pneumatikzylinder aufgebracht und mit einem Axialkraftsensor gemessen. Die gemessene Axialkraft wird mit dem gemessenen Drehmoment zur Berechnung der Lagerreibungszahl verwendet.

In Abbildung 3 ist der Prüfstand in einer Schnittansicht durch den Prüfling dargestellt. Auf der linken Seite befindet sich die Messeinheit, die in Abbildung 4 isoliert dargestellt ist. Der Prüfling ist im mittleren Bereich, der Messkammer, eingebaut und vor äußeren Verschmutzungen wie etwa Öl geschützt. Die Prüfumgebung umfasst insgesamt 6 nutzbare Prüfkammern. Um eine gleichmäßige Schmiermittelverteilung zu gewährleisten, werden die Versuche aktuell mit nur einer Prüfkammer durchgeführt.

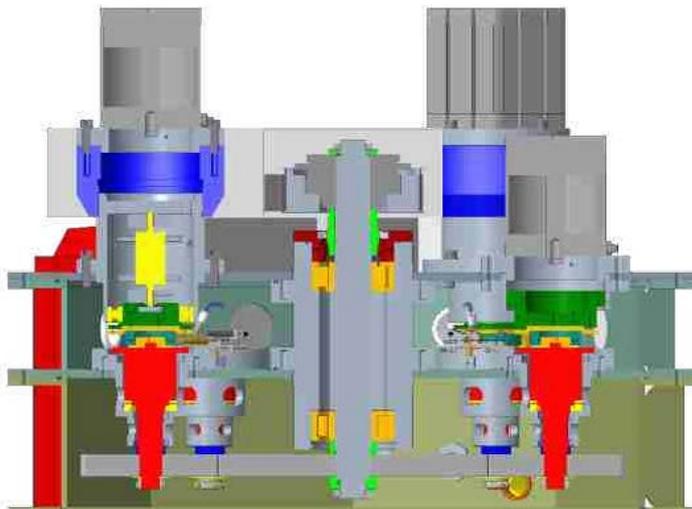


Abbildung 3. Prüfstand in Schnittdansicht

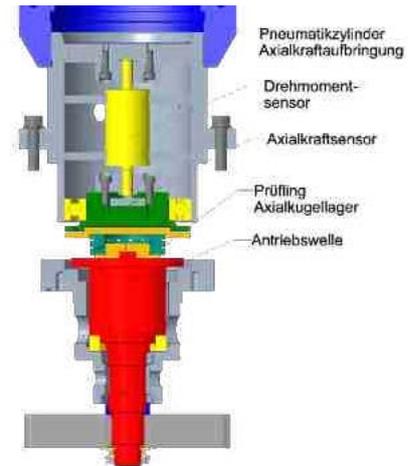


Abbildung 4. Messaufbau im Prüfstand

Diese Untersuchungen umfassen Betriebspunkte bei 250 und 500 1/min bei 1, 1,5 und 2 GPa Flächenpressung zwischen Kugel und Ring. Die Auswertung der Versuche erfolgt über die Reibungszahl, die sich mit  $\mu = M_{gemessen} / (r_{Lager} F_{Axial})$  berechnet. Der Begriff Reibungszahl beschreibt daher das Verhältnis von Reibmoment zum Produkt aus Axialkraft und Lagerradius über das gesamte Lager. Daher gehen in seine Berechnung Einflüsse vom System Wälzlager ein, weshalb die Reibungszahl als Funktional in Abhängigkeit von bspw. Last, Geschwindigkeit oder Ort zu verstehen ist. Davon abgegrenzt ist der Begriff Reibwert zu interpretieren, der üblicherweise für das Verhältnis von Tangential- und Axialkraft in Gleitsystemen mit einem Kontakt verwendet wird. Er beschreibt dabei systemunabhängig die Reibung und wird üblicherweise mit Modellversuchen ermittelt. Die Schmierung der Lager erfolgte in Intervallen. Je 60 s wurde 0,4 ml 5%-Graphitdispersion zwischen Lagerinnenring und Käfig stoßweise eingesprüht. Die Menge wurde experimentell in Vorversuchen festgelegt und sollte ein konstantes Reibungsverhalten im Einsprühintervall gewährleisten. Die Nachschmierung erfolgt über die in Abbildung 5 dargestellte Nachschmereinheit. Dabei wird die Graphitdispersion über den blau gefärbten Schlauch zugeführt. Die Luftversorgung für die Pistole verläuft unterhalb und ist nicht dargestellt. Die Aktivierung erfolgt über einen Pneumatikzylinder, der in der Abbildung nicht dargestellt ist. Der Spalt zwischen Lagerinnenring und Käfig beträgt nur wenige Millimeter, weshalb der Großteil der Graphitdispersion nicht in das Lager gelangt, sondern sich auf den Außenseiten der Lagerbauteile und in der Messkammer verteilt.

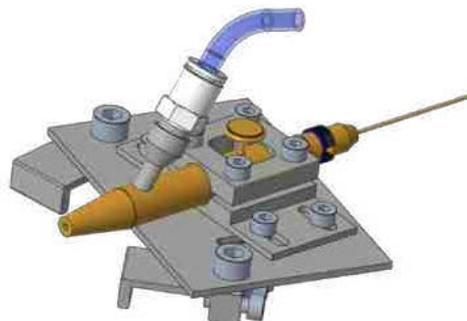


Abbildung 5. Die Nachschmereinheit, die über einen Pneumatikzylinder alle 60 s 0,4 ml Graphitdispersion in das Lager sprüht.

Das Ziel der Versuche war die Ermittlung eines Reibungszahlkennfelds für graphitgeschmierte Axiallager. Bei den Drehgeschwindigkeiten von 250 und 500 1/min wurden Kontaktdrücke zwischen Kugel und Ringen von 1, 1,5 und 2 GPa aufgebracht. Vor Beginn einer Messung wurden die Lager 5 min bei konstanter Drehzahl (250 1/min) und 1 GPa Kontaktdruck eingelaufen. Anschließend erfolgte die Messung im genannten Parameterraum. Die Dauer einer Messung beträgt 15 min. Für jeweils eine Geschwindigkeitsstufe wird ein Lager verwendet. Es wurden somit 6 Lager für die vorgestellten Versuche verwendet. Der Parameterraum ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Die Messung des Drehmoments erfolgte mit einer Abtastrate von 100 Hz. In den Abbildungen des Reibungszahlverlaufs wurde daher ein gleitender Mittelwert genutzt, um die Ergebnisse übersichtlich darzustellen.

**Tabelle 1 Versuchsplan**

	Versuchsreihe 1	Versuchsreihe 2	Versuchsreihe 3	Versuchsreihe 4	Versuchsreihe 5	Versuchsreihe 6
<b>Prüfling 1</b> 250 1/min	1 GPa	1,5 GPa	2 GPa	1 GPa	1,5 GPa	2 GPa
<b>Prüfling 2</b> 500 1/min	1 GPa	1,5 GPa	2 GPa	1 GPa	1,5 GPa	2 GPa
<b>Prüfling 3</b> 500 1/min	1 GPa	1,5 GPa	2 GPa	1 GPa	1,5 GPa	2 GPa
<b>Prüfling 4</b> 250 1/min	1 GPa	1,5 GPa	2 GPa	1 GPa	1,5 GPa	2 GPa
<b>Prüfling 5</b> 250 1/min	1 GPa	1,5 GPa	2 GPa	x	x	x
<b>Prüfling 6</b> 500 1/min	1 GPa	1,5 GPa	2 GPa	x	x	x

## 4. Ergebnisse

### 4.1. Initiale Beschichtung der Wälzlager

Bereits beim Zusammensetzen der Ringe und dem mit Kugeln befülltem Käfig löste sich die Beschichtung auf den Laufbahnen und auf den Kugeln ab. Auf den ringförmigen Flächen neben den Laufbahnen blieb das Graphit überwiegend haften, da hier beim Zusammenbau keine Berührungen stattfinden. In diesem Bereich (siehe Abbildung 6**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) kam es trotzdem beim Zusammensetzen der Lager lokal zu Abplatzungen, die die Messung der Graphitschichtdicke ermöglichen. Die Graphitschichtdicke wurde mit einem Digitalmikroskop gemessen und betrug ca. 70 µm (siehe Abbildung 7). Auf der Kugellaufbahn, dargestellt in Abbildung 6**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, ist kaum Graphit erkennbar. Oberflächenanalytische Untersuchungen zum verbliebenden Graphit an der Oberfläche folgen in weiteren Arbeiten.

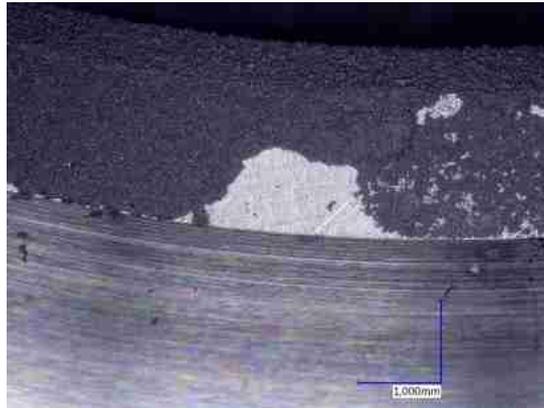


Abbildung 6. Randbereich eines Rings mit Laufbahn.

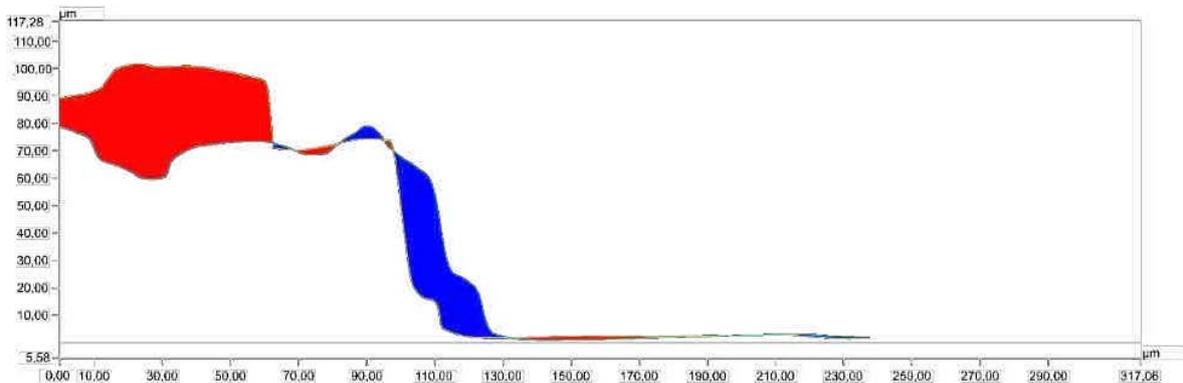
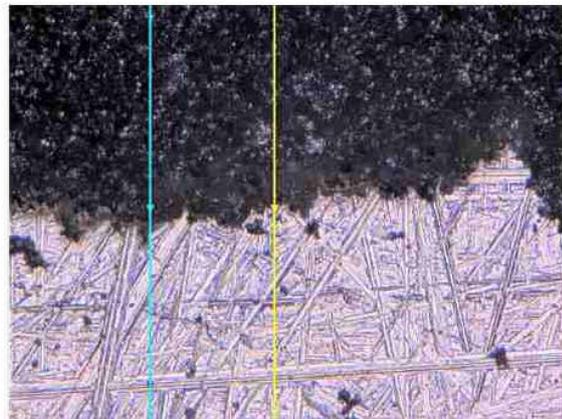
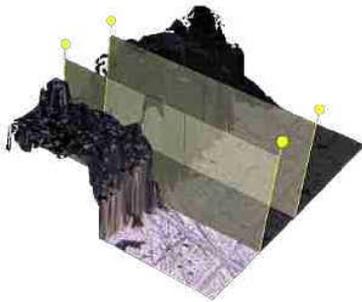


Abbildung 7. Bestimmung der Graphitschichtdicke mit einem Digitalmikroskop

#### 4.2. Ungeschmierte Lager

Zur besseren Vergleichbarkeit der gemessenen Reibungszahlen wurden auch Versuche mit ungeschmierten Lagern durchgeführt. Die Reibungszahl eines ungeschmierten Lagers bei 250 1/min und 1 GPa Flächenpressung ist in Abbildung 8 abgebildet. Neben dem Absolutwert nahm bei den Versuchen auch die Schwankung des gemessenen Drehmoments zu. Um Schäden vorzubeugen, wurde der Versuch bei Drehmomentspitzen von über 10 Nm beendet.

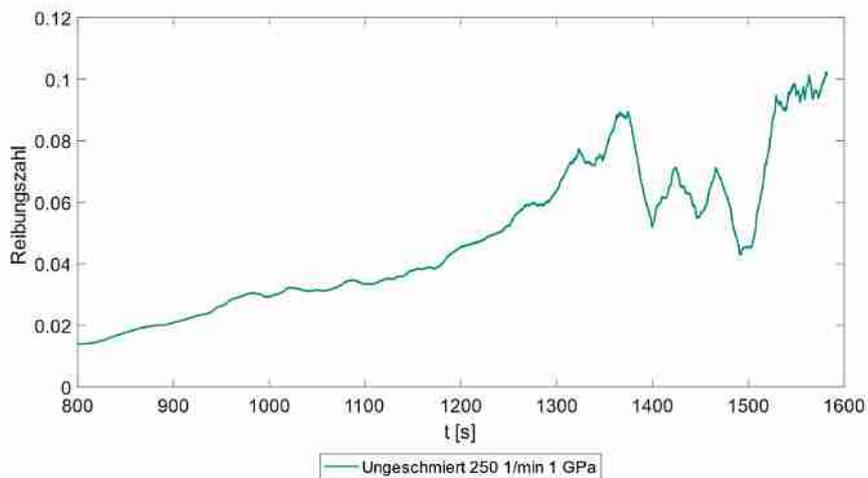


Abbildung 8. Reibungszahlverlauf eines ungeschmierten Lagers

#### 4.3. Schmierung mit Graphitdispersion

Das erste Prüflager wurde für 6 Versuchsläufe mit konstanter Drehzahl (250 1/min) verwendet. Die Last wurde in zwei Zyklen vorwärts entsprechend den Werten in Tabelle 1 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** variiert. Abbildung 9 zeigt die resultierenden Reibungszahlkurven. Alle 6 Kurven im Diagramm haben einen zahnförmigen Verlauf, der durch das Einsprühen von Graphitdispersion entsteht. Zum Zeitpunkt des Einsprühens sinkt die Reibungszahl ab und steigt bis zum nächsten Einsprühen wieder an. Auffällig im Diagramm ist, dass die Reibungszahl mit steigendem Druck abnimmt. Die Wiederholversuche im zweiten Zyklus liegen etwa in der Größenordnung des Erstdurchgangs.

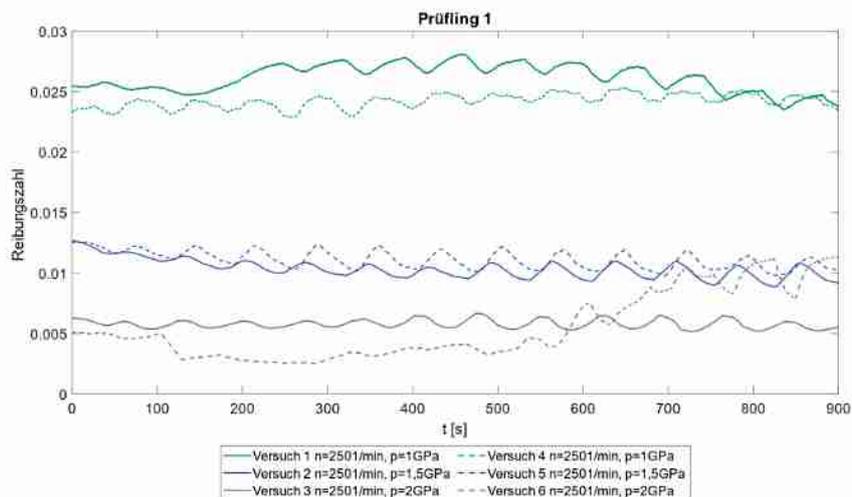
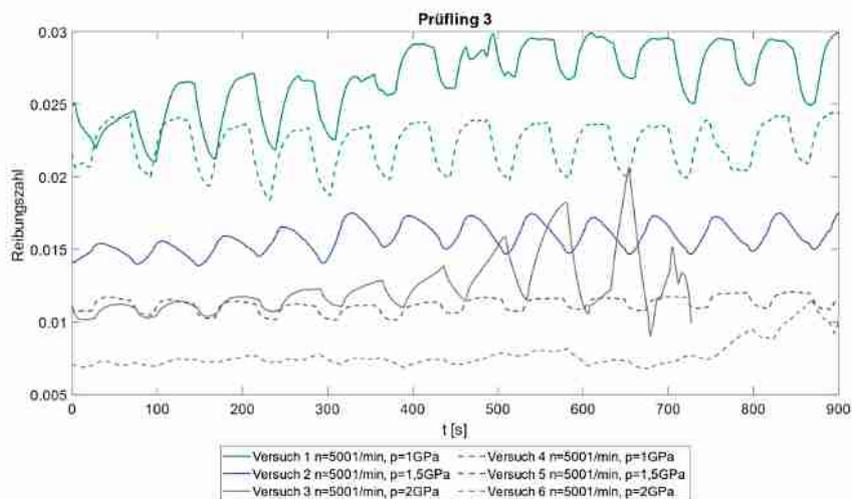


Abbildung 9. Reibungszahlverlauf von Prüflagers 1 bei 250 1/min

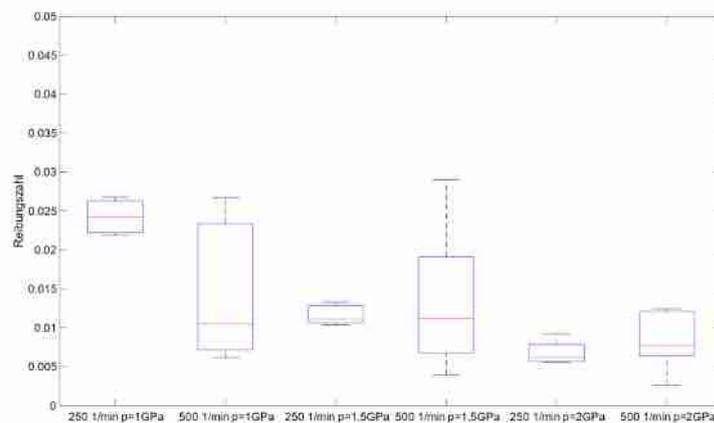
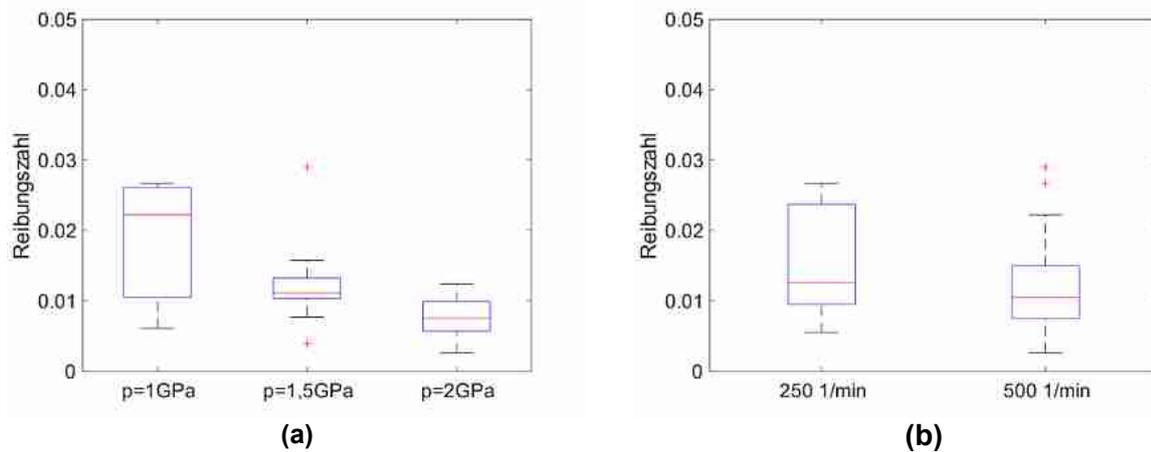
Das Prüflager 3 wurde mit einer Drehzahl von 500 1/min gefahren und die resultierenden Reibungszahlverläufe (Abbildung 10) haben die gleichen Sägezahnstruktur wie Prüflager 1. Auffallend ist, dass die Reibungszahl in den niedrigeren Laststufen stärker abfällt als im 2 GPa Lastfall. Die Gesamtstreuung über die Wiederholungen des Versuchslaufs ist größer als bei 250 1/min. Den dritten Versuchslauf (graue-durchgezogene Linie) kennzeichnen Reibungszahlschwankungen, die einen Versuchsabbruch vor der regulären Zeit

erforderten. Nach dem Abkühlen und dem versuchsvorbereitenden Einlauf des Lagers erreichte dies in den kommenden vier Versuchsläufen wieder ein stabiles Verhalten.



**Abbildung 10. Reibungszahl graphitgeschmierte Axialkugellager Prüfling 3 bei 500 1/min**

Insgesamt wurden 30 Versuche durchgeführt – 100 Wiederholungen pro Laststufe. Die Aufteilung in 2 Geschwindigkeitsstufen ergibt 15 Versuche je Geschwindigkeit. Die beiden Box-Plots in Abbildung 11 zeigen die gemittelten Reibungszahlen in Abhängigkeit des Drucks bzw. der Geschwindigkeit. Die roten Mittellinien der Box-Plots geben den Median an. In Abbildung 11 (a) ist zu erkennen, dass die Reibungszahl mit steigender Pressung sinkt. In der Streuung der Reibungszahlen ist kein Muster erkennbar. In der rechten Grafik liegen die Reibungszahlen bei beiden Drehzahlstufen in etwa gleich. Die Streuung bei 500 1/min ist geringer als bei 250 1/min. Die mittlere Reibungszahl bei 250 1/min und 1 GPa ( $C/P = 47$ ) beträgt ca. 0,019, sinkt bei 1,5 GPa ( $C/P = 14$ ) auf 0,013 und bei 2 GPa ( $C/P = 6$ ) auf 0,008. Bei konstanten Drehzahlen ergibt sich 0,015 für 250 1/min und 0,012 für 500 1/min.



(c)  
Abbildung 11. Box-Plots für Druck (a) und Drehzahl (b)

## 5. Diskussion und Ausblick

Die Versuche zeigen, dass gegenüber einem ungeschmierten Lager eine Schmierwirkung zu erkennen ist. Im Vergleich zu Ölschmierungen ( $\mu \sim 0,0015$  für  $C/P = 10$ ) [15] liegen die Reibungszahlen der graphitgeschmierten Lager höher. Weitere Versuche sollen jetzt zeigen, wie sich die Graphitdispersion im Lager verteilt und wie dadurch die sägezahnförmige Reibungszahlkurve entsteht. Durch das Ansteigen der Reibungszahl zeigt sich, dass die Schmierwirkung mit der Zeit vermindert wird. Ob dies am Verschleiß des Graphits oder aber dem Heraustragen des Graphits aus der Kontaktzone liegt, wird in zukünftigen Untersuchungen betrachtet. Beide Fälle erfordern jedoch für die Anwendung in technischen Systemen eine kontinuierliche Nachschmierung. Die Nachschmierung kann dabei etwa durch Festkörpergraphit oder durch flüssig gebundenes Graphit erfolgen. Bei Öl- und Fettschmierungen ermöglichen deren viskoses Verhalten die Nachschmierung eines Kontakts durch Nachfließen. Diese Eigenschaft besitzt das Graphit nicht und erfordert daher eine aktive Nachschmiervorrichtung.

In den nächsten Analysen werden die Temperaturverläufe der Lager ausgewertet. Die Bindungsenergie zwischen den Kohlenstoffatomen des Graphits führt zu dessen hoher Temperaturstabilität. Ob das Graphit diese Eigenschaft auf Wälzlager übertragen kann, ist Teil weiterer Untersuchungen.

Die gegenüber Öl und Fett unterschiedliche Konsistenz des Schmiermittels kann für technische Anwendungen genutzt werden. Beispielsweise können die Systeme dadurch anwendungsfallabhängige Dichtungskonzepte umfassen. So sind etwa auch Anwendungen

im Bereich des Bauingenieurwesens denkbar, bei denen Bauteile bewegt werden müssen.

## 6. Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Unterstützung im Rahmen des Schwerpunktprogramms „SPP2074 – Fluidfreie Schmier-systeme mit hoher mechanischer Belastung“ im Projekt „Mechanismen der Graphitschmierung in Wälzkontakten“ (AL 533/37-1).

## 7. Referenzen

1. Binnewies, M.; Finze, M.; Jäckel, M.; Schmidt, P.; Willner, H.; Rayner-Canham, G. *Allgemeine und Anorganische Chemie*; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2016, ISBN 978-3-662-45066-6.
2. Bragg, W. An Introduction to Crystal Analysis. *Nature* **1928**, 122, 915–916, doi:10.1038/122915a0.
3. Savage, R.H. Graphite Lubrication. *Journal of Applied Physics* **1948**, 19, 1–10, doi:10.1063/1.1697867.
4. Spreadborough, J. The frictional behaviour of graphite. *Wear* **1962**, 5, 18–30, doi:10.1016/0043-1648(62)90177-1.
5. Wang, Q.J.; Chung, Y.-W. *Encyclopedia of Tribology*; Springer US: Boston, MA, 2013, ISBN 978-0-387-92896-8.
6. Wittel, H.; Jannasch, D.; Voßiek, J.; Spura, C. *Roloff/Matek Maschinenelemente*; Springer Fachmedien Wiesbaden: Wiesbaden, 2019, ISBN 978-3-658-26279-2.
7. Steinhilper, W.; Sauer, B. *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2*; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2012, ISBN 978-3-642-24302-8.
8. Bender, B.; Göhlich, D. *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 2: Anwendungen*; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2020, ISBN 978-3-662-59712-5.
9. Kiran, T.S.; Prasannakumar, M.; Basavarajappa, S.; Viswanatha, B.M. Effect of heat treatment on tribological behavior of zinc aluminum alloy reinforced with graphite and SiC particles for journal bearing. *Industrial Lubrication and Tribology* **2015**, 67, 292–300, doi:10.1108/ILT-08-2013-0090.
10. Sharma, S.C.; Girish, B.M.; Kamath, R.; Satish, B.M. Graphite particles reinforced ZA-27 alloy composite materials for journal bearing applications. *Wear* **1998**, 219, 162–168, doi:10.1016/S0043-1648(98)00188-4.
11. SKF GmbH. Lager und Lagereinheiten für hohe Temperaturen. Available online: <https://www.skf.com/de/products/rolling-bearings/engineered-products/high-temperature-bearings-and-bearing-units#cid-493780> (accessed on 11 June 2021).
12. Schaeffler Technologies AG & Co. KG. *Schmierung von Wälzlagern*, Herzogenaurach, 2013. Available online: [https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/\\_shared\\_media/08\\_media\\_library/01\\_publications/schaeffler\\_2/tpi/downloads\\_8/tpi\\_176\\_de\\_de.pdf](https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/tpi/downloads_8/tpi_176_de_de.pdf).
13. Morstein, C.E.; Dienwiebel, M. Graphite Lubrication Mechanisms Under High Mechanical Load. *Wear* **2021**, 47, 203794, doi:10.1016/j.wear.2021.203794.
14. Henkel. *Technisches Datenblatt BONDERITE L-GP OD EU ACHESON*, Düsseldorf, 2015. Available online: <http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF/243%20NEW-EN?pid=BONDERITE%20L-GP%20OD%20EU%20ACHESON&format=MTR&subformat=BOND&language=EN&plant=WERCS>.

15. Brändlin; Eschmann, H.; Weigand. *Die Wälzlagerpraxis: Handbuch für die Berechnung und Gestaltung von Lagerungen*, korrig. Nachdr. der 3. Aufl.; Vereinigte Fachverl.: Mainz, 1998, ISBN 3783002907.

**Autorenangaben**

Arn Joerger, M. Sc.

Tzu-Hsiang Lin, M. Sc.

Dipl.-Ing. Markus Spadinger

Dipl.-Ing. Katharina Bause

Dipl.-Ing. Sascha Ott

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

IPEK Institut für Produktentwicklung

Campus Süd

Kaiserstr. 10

76131 Karlsruhe

[arn.joerger@kit.edu](mailto:arn.joerger@kit.edu)

[sekretariat@ipek.kit.edu](mailto:sekretariat@ipek.kit.edu)

[markus.spadinger@kit.edu](mailto:markus.spadinger@kit.edu)

[katharina.bause@kit.edu](mailto:katharina.bause@kit.edu)

[sascha.ott@kit.edu](mailto:sascha.ott@kit.edu)

[albert.albers@kit.edu](mailto:albert.albers@kit.edu)

## Repository KITopen

Dies ist ein Postprint/begutachtetes Manuskript.

Empfohlene Zitierung:

Joerger, A.; Lin, T.-H.; Spadinger, M.; Bause, K.; Ott, S.; Albers, A.  
[Experimentelle Analyse des Reibungsverhaltens graphitgeschmierter Axialkugellager.](#)  
2021. 62. Tribologie-Fachtagung Reibung, Schmierung und Verschleiß. Hrsg.: GfT  
Gesellschaft für Tribologie e.V., Gesellschaft für Tribologie e.V. (GfT)  
doi: [10.5445/IR/1000138836](https://doi.org/10.5445/IR/1000138836)

Zitierung der Originalveröffentlichung:

Joerger, A.; Lin, T.-H.; Spadinger, M.; Bause, K.; Ott, S.; Albers, A.  
[Experimentelle Analyse des Reibungsverhaltens graphitgeschmierter Axialkugellager.](#)  
2021. 62. Tribologie-Fachtagung Reibung, Schmierung und Verschleiß. Hrsg.: GfT  
Gesellschaft für Tribologie e.V., Gesellschaft für Tribologie e.V. (GfT)

**Lizenzinformationen: KITopen-Lizenz**