

Dewald, A.; Joerger, A.; Lagier, F.-W.; Bischofberger, A.; Bause, K.; Albers, A.

Optische in-situ Analyse der Schmiermittelverteilung graphitgeschmierter Wälzlager

Zusammenfassung:

Aufgrund seiner hohen Temperaturstabilität und Schmierfähigkeit besitzt Graphit exzellente Schmiereigenschaften für Trockenschmierkonzepte. Seine elektrische Leitfähigkeit macht ihn besonders für Anwendungen wie Bürsten in Gleichstrommotoren geeignet. In der Schwereindustrie, wie z.B. bei Öfenwägen, wird Graphit aufgrund seiner Unempfindlichkeit gegenüber extremen Temperaturen über 3.000°C ebenfalls geschätzt. Hier werden Wälzlager oft noch mit Fett geschmiert, was zu einem hohen Schmiermittelverbrauch führt. Die Entwicklung einer Schmierung mittels Graphitdispersionen aus einem Ethanol-Graphit-Gemisch war vielversprechend, aber die Handhabung gestaltete sich aufgrund von Brandgefahr und einem komplexen Förderungssystem als schwierig. Das Hauptziel dieser Untersuchung ist daher die Entwicklung eines lebenslang schmierenden Schmierkonzepts auf Basis von Graphit. Die Verteilung von Graphit wird mittels optischer Methoden untersucht und bewertet, um die Entwicklung eines Demonstrators für dieses Konzept zu unterstützen. Die optischen Untersuchungen finden an Axialrillenkugellagern und Axialzylinderrollenlagern statt, bei denen der obere Wälzring durch eine Saphirglasscheibe ersetzt wird. Ein Teil des Graphits wird im Wälzkontakt verdichtet, der Rest entweicht jedoch ohne Nachschmierung. Dies erfordert den Einsatz einer Graphitnachschiereinheit.

Abstract:

Due to its high temperature stability and lubricity, graphite has excellent lubricating properties for dry lubrication concepts. Its electrical conductivity makes it particularly suitable for applications such as brushes in DC motors. In heavy industry, such as in furnace trolleys, graphite is also valued because of its insensitivity to extreme temperatures above 3,000°C. In these applications, rolling bearings are often still used in combination with graphite. Here, rolling bearings are often still lubricated with grease, which leads to high lubricant consumption. The development of lubrication using graphite dispersions from an ethanol-graphite mixture has been promising, but handling has proven difficult due to fire hazards and a complex delivery system. Therefore, the main objective of this study is to develop a lifetime lubrication concept based on graphite. The distribution of graphite is investigated and evaluated by optical methods to support the development of a demonstrator for this concept. The optical investigations are carried out on axial deep groove ball bearings and axial cylindrical roller bearings in which the upper rolling ring is replaced by a sapphire glass disc. Part of the graphite is compressed in the rolling contact, but the rest escapes without relubrication. This requires the use of a graphite relubrication unit.

Einleitung

Wägen und Tragrollenlager in Brennöfen setzen für die Anwendung von Wälzlager hohe Belastungsanforderungen. Die geringen Verfahrensgeschwindigkeiten in solchen Anlagen sorgen dafür, dass Drehzahlen selten 30 min^{-1} übersteigen. Durch die Kombination der hohen mechanischen Belastungen, sowie der geringen Drehzahlen wird vor Allem die Anwendung der Axiallager legitimiert, welche dadurch Verfahrenstemperaturen bis zu 400 °C standhalten müssen. Durch diese hohen Temperaturanforderungen gestaltet sich vor Allem die Schmierung problematisch. [1]

Hauptsächlich werden für Wälzlager fluide Schmiermittel verwendet, da sie unter Anderem den Verschleiß an den Kontaktstellen der Wälzlagerbauteile mindern. Zu diesen fluiden Schmiermitteln zählen Öle und Fette, die abhängig von der Betriebsdrehzahl, ihre Vor- und Nachteile besitzen. So ist bei geringen Drehzahlen die Verwendung von Schmierfett üblich, während bei hohen Drehzahlen auf Öl zurückgegriffen wird. Problematisch ist bei den obigen Anforderungen, dass Schmierfette auf Mineralölbasis eine geringe Temperaturtoleranz von durchschnittlich 100 – 150 °C besitzen. Beim Überschreiten der kritischen Temperatur muss im Schmierfett die Wärmeabfuhr gewährleistet werden, indem das Wälzlager mit neuem Schmiermittel kontinuierlich durchspült wird [2]. Aus der hohen Wärmeabfuhr resultiert damit ein hoher Schmiermittelverbrauch, den es aus nachhaltiger Sicht zu reduzieren gilt. Hierbei spielen feste Schmierstoffe eine entscheidende Rolle, die den Einsatz von Wälzlager unter hohen Temperaturen ermöglichen.

Ein vielversprechender Vertreter der Festschmierstoffe ist Graphit, dessen schmierende Wirkung bereits seit Jahrhunderten bekannt ist. Hinzu kommt, dass er nicht umweltschädlich ist, sehr gute Heißlaufeigenschaften besitzt und sich damit optimal für die industrielle Verwendung in Wälzlagern eignet. Die Temperaturstabilität von Graphit lässt sich auf seine kovalenten zwischenatomaren Bindungen zurückführen, gleichzeitig besitzt Graphit schwache van-der-Waals-Bindungen zwischen den Molekülebenen, wodurch Graphit stark abrasive Eigenschaften aufweist. [3]

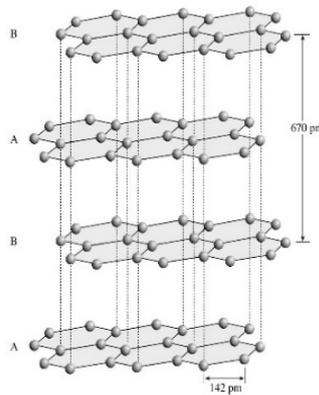


Abbildung 1: Molekulare Zusammensetzung von Graphit. Zu erkennen sind die jeweiligen Graphitschichten mit ihren kovalenten Bindungen, sowie der Versatz zwischen den Ebenen in denen schwache Van-der-Waals-Kräfte wirken. [3]

Trotz seiner guten Schmiereigenschaften wird Graphit in Schmiermitteln bisher nur als Additiv für Öle und Fette verwendet. Die Additivierung sorgt einerseits für eine Erhöhung der Temperaturstabilität, hauptsächlich wird durch die Additivierung die Schmierwirkung von fluiden Schmiermitteln verstärkt. Gemieden wird Graphit vor Allem in Anwendungen, die sensibel auf elektrische Leitfähigkeit reagieren. Zusätzlich sorgt die Anwendung bei Edelstählen vereinzelt für Kontaktkorrosion. [4]

Die Abrasion des Graphits allein erklärt aber nicht seine Schmierwirkung. So untersuchte Savage 1948 experimentell die Schmierung von reinem Graphit im Vakuum. Im Experiment in [5] stellte er fest, dass Graphit nur durch die Verunreinigung und Passivierung fremder Atome seine bekannte Schmierwirkung entfacht. Welche Reibmechanismen stattfinden, beziehungsweise wie die Passivierung abläuft wurden mitunter von Klemenz et al. in [6] untersucht und sind noch nicht vollständig geklärt.

Durch die exzellenten Reib- und Temperatureigenschaften besitzt Graphit großes Potential für den Einsatz in obig genannten Anwendungen in der Schwereindustrie. Um diesem Potential nachzugehen, wurde unter anderem von Joerger et al. bereits nachgewiesen, dass die Reibungszahl innerhalb der Axiallager mithilfe einer Graphitdispersion erfolgreich reduziert werden kann. Durchgeführt wurden die Versuche bei einer Belastung zwischen 1 und 2 GPa. Dabei wurde festgestellt, dass sich Teile des Graphits auf den Komponenten festgewalzt haben, während sich das Graphit auf den Laufringen stärker festwalzt als auf den polierten Kugeln. Als Begründung werden die unterschiedlichen Oberflächenrauheiten der Bauteile angeführt. Ebenfalls wurde festgestellt, dass das Ethanol keinerlei Schmierwirkung besitzt und nahezu instantan verdunstet. [7]

Dazu wurde in [8] in einem Systemtribometer gemessen, dass die Graphitdispersion die Reibungszahl im Axialrillenkugellager stark reduziert und somit das Verlustmoment durch die verringerte Reibung unterdrückt werden kann. Während dieser Versuche wurde die Graphitdispersion in regelmäßigen Intervallen in das Axialrillenkugellager hineingesprüht. Die Versuche wurden mit 0,5; 0,75 und 1 GPa durchgeführt.

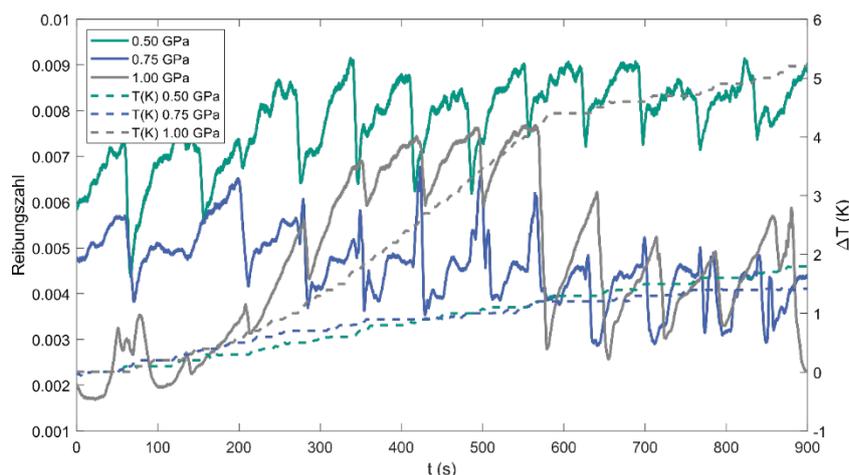


Abbildung 2: Der Reibungsverlauf des Axialrillenkugellagers über der Zeit aus [8]. Die durchgezogenen Kurven stellen die Verläufe für 0,5 GPa (petrol), 0,75 GPa (blau) und 1 GPa (grau) über der Zeit dar. Die Einsprühzeiten sind durch den ruckartigen Abfall im Kurvenverlauf erkennbar. Durch die Verdrängung des Graphits aus dem Wälzkontakt steigt die Reibungszahl wieder an.

Da bisher die Wälzlager optisch nur ex-situ untersucht wurden, ist der Ablauf der Graphitverteilung beim Anlauf sowie im stationären Betrieb des Systemtribometers noch nicht möglich.

Daher streben die Autoren an, die Graphitverteilung während des Betriebs zu analysieren. Die Analyse soll optisch mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera erfolgen, welche auf das Axiallager gerichtet ist. Die Ergebnisse ermöglichen die Unterstützung der Abschätzung des nachzuführenden Graphits.

Methode zur Versuchsdurchführung

Die Axialwälzlager, die für die Untersuchung verwendet wurden, gehören zu den Baureihen 51208 und 81208. Diese wurden bereits bei den Untersuchungen von Joerger et al. eingesetzt (siehe [7] und [8]). Um die Kontaktflächen optisch zugänglich zu gestalten, wurde der obere Lagerring mit einer Saphirglasscheibe, die einen Durchmesser von 85 mm und 5 mm Stärke besitzt, ersetzt. Diese Glasscheibe besitzt im Gegensatz zu den Wälzlageringern keinen Lauf und ist somit vollständig plan, da sonst Rillen bei Saphirglas das Licht stärker brechen lassen und dadurch die optische Untersuchung erschweren. Den Axialrillenkugellagern wurden zusätzlich drei Kugeln aus dem Käfig vorsichtig entfernt, sodass dieser Käfig nicht beschädigt wurde. Für die Axialzylinderrollenlager war dieser Eingriff nicht möglich, da die Rollen nicht zerstörungsfrei aus dem Käfig herausgepresst werden konnten. Durch das Entfernen der Kugeln wurden Fenster für die optische in-situ Beobachtung des unteren Lagerrings erzeugt. Untersucht wurden die Axialwälzlager mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera, die senkrecht über der Prüfkammer durch Profilschienen positioniert wurde. Die Hochgeschwindigkeitskamera besitzt dabei eine maximale Aufnahmefrequenz von 16.000 Hz. Die Aufnahmen wurden im infraroten Spektrum aufgezeichnet und anschließend in schwarz-weiß visualisiert. Um die optische Untersuchung zu ermöglichen, musste der Drehmomentsensor aus dem Prüfzylinder entfernt werden, somit war die kombinierte Untersuchung von Graphitverteilung und Systemreibungszahl in-situ nicht möglich.

Da Axialwälzlager in schweren Industrieanwendungen Drehzahlen von 50 min^{-1} selten erreichen, wurden die Versuche mit einer Drehzahl von maximal 50 min^{-1} durchgeführt. Um die mechanische Festigkeit der Saphirglasscheibe zu gewährleisten, wurden die Untersuchungen mit reduzierter Axialpressung von 0,25 GPa durchgeführt.

In einem Versuchsablauf wurden die Axialwälzlager in der Prüfkammer angefahren, bis sie die Betriebsdrehzahl von 50 min^{-1} erreichten. Die Versuche dauerten jeweils 30 Sekunden an. Eine Nachschmierung wurde während der Untersuchungen nicht durchgeführt, da sich das Graphit sonst an der Glasscheibe abgesetzt hätte und dadurch die optische Transparenz verloren gegangen wäre. Aus diesem Grund wurden die Aufnahmen während und kurz nach der Anlaufphase getätigt, bevor die Schmierwirkung des Graphits einbrach (vgl. Abbildung 2). Um stabiles Reibungsverhalten zu gewährleisten, wurden die Wälzlagerbauteile vorkonditioniert, indem der untere Wälzlagering und die Käfigbaugruppe initial vor dem Einsetzen in die Prüfkammer mit der Graphitdispersion besprüht wurden.

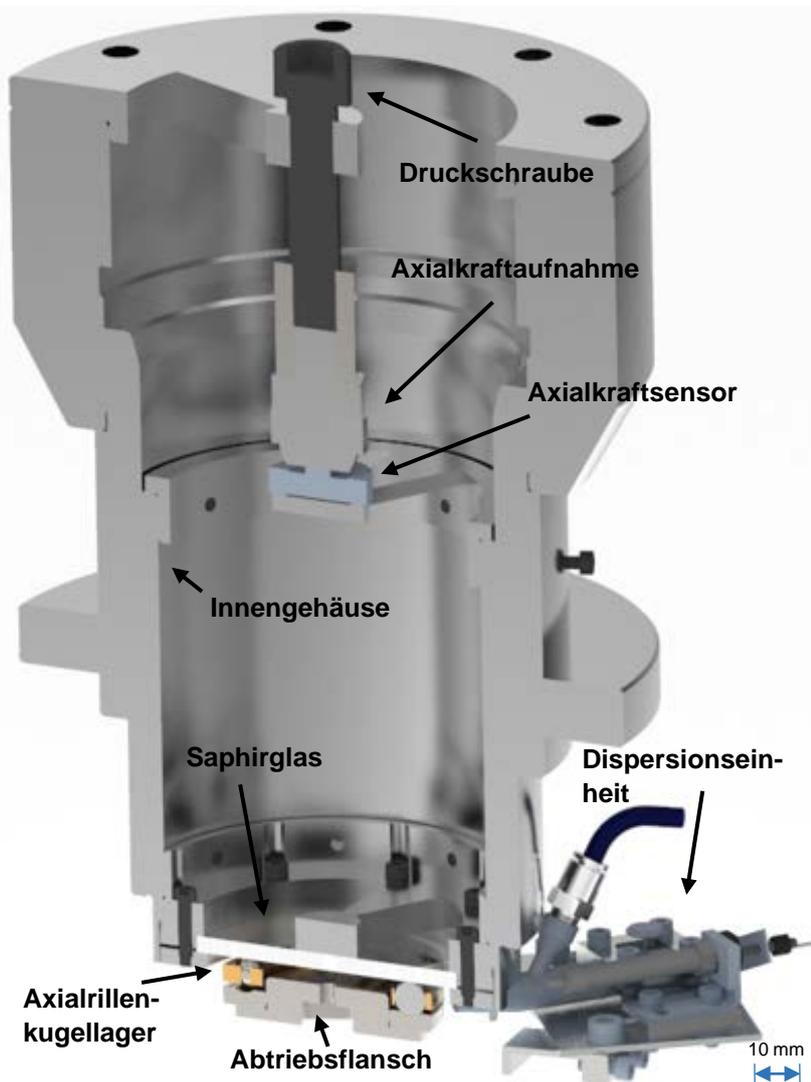


Abbildung 3: Modellschnitt der Prüfkammer links. Die Kräfteinteilung erfolgt über die Druckschraube (Schwarz) auf den Axialkraftsensor (blau), weiter über das Innengehäuse bis zur Saphirglasplatte (transparent). Von dort erfolgt die Kraftübertragung auf das Axialrillenkugellager bis zum Abtriebsflansch. Die Baugruppe im Hintergrund bildet die Dispersionseinheit, die nicht verwendet wurde. Die Rotation wird über den Abtriebsflansch auf das Lager übertragen. Rechts ist die Hochgeschwindigkeitskamera mit passendem Objektiv über der Prüfkammer mit Profilschienen positioniert. Die Infrarotkamera wird mit einer infrarotlampe belichtet.

Zu den in-situ Aufnahmen wurden optische ex-situ Aufnahmen der Saphirglasscheibe durchgeführt. Mit einem Lichtmikroskop wurden die Oberflächen detailliert fotografiert

und auf Graphitablagerungen untersucht. Mit Weißlichtinterferometeraufnahmen (WLI) wurde die Rauheit auf den Saphirglasscheiben untersucht. Die Saphirglasscheibe wurde zur Rauheitsuntersuchung gewählt, da durch die glatte Oberfläche des Glases Graphitablagerungen besser hervorstechen. Zusätzlich führt die Transparenz des Glases für bessere Belichtung, wodurch die Oberflächen besser belichtet werden.

Ergebnisse

Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Modells 51208 zeigen die Anlaufphase und den stationären Betrieb kurz nach dem Anlauf in Abbildung 4. Zunächst sind die Kugeln matt grau, werden aber mit zunehmender Betriebsdauer glänzender. Während des Anlaufs ist die Bildung der Graphitspur deutlich erkennbar. Im tribologischen Kontakt zwischen den mit Graphit benetzten Wälzkugeln und des Saphirglases wälzt sich das Graphit auf der Glasscheibe fest und bildet einen bleibenden Graphitlauf. Der Kontakt erfolgt hierbei nicht punktuell, sondern deckt eine nahezu kreisrunde Fläche ab, die deutlich zu erkennen ist (vgl. Abbildung 4). Die Spur besitzt dabei eine Breite von 1,73 mm. Am Käfig des Wälzlagers sammelt sich der Abrieb des Graphits zwischen Kugel und Käfig ab.

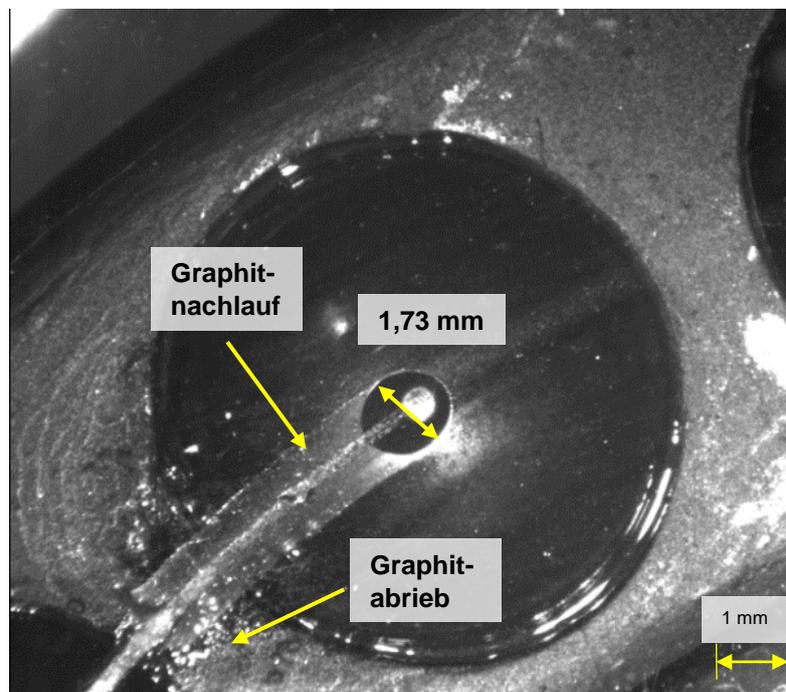


Abbildung 4: Hochgeschwindigkeitsaufnahme der Anlaufphase eines 51208 Axialkugellagers. In der Momentaufnahme ist vor der Kugel der fehlende Nachlauf und hinter der Kugel der Graphitlauf zu erkennen. Die Rotationsrichtung ist im Uhrzeigersinn.

Nach der Einlaufphase bilden sich größere Graphitflocken, die sich im Graphitlauf in unregelmäßigen Abständen verfestigen. Dabei verbreitert sich die Spur des Graphitlaufs auf dem Saphirglas. Ebenfalls wird eine Reibschwingung induziert, die den Rollverlauf der Kugeln beeinflusst. Durch das mehrfache Walzen des Graphits im Glas-Kugel-Kontakt wird er nicht nur axial auf die Scheibe gepresst, sondern gleichzeitig nach außen gedrückt, wo er in Form von Flocken den tribologischen Kontakt verlässt und teilweise zurück auf Kugel und Käfig fällt. Zusätzlich bildet sich verstärkt Abrieb der Graphitflocken im Kugel-Käfig-Kontakt. Die Kugeln weisen eine unregelmäßig matt-glänzende Struktur auf. Matt bedeutet hierbei, dass sie weiterhin noch mit Graphit benetzt sind, glatt ist die

freie Oberfläche des Wälzkörpers und glänzend und mit Profil weisen auf verdichteten Graphit hin. Die Flocken erreichen hierbei eine Größe bis zu 4x1 mm.

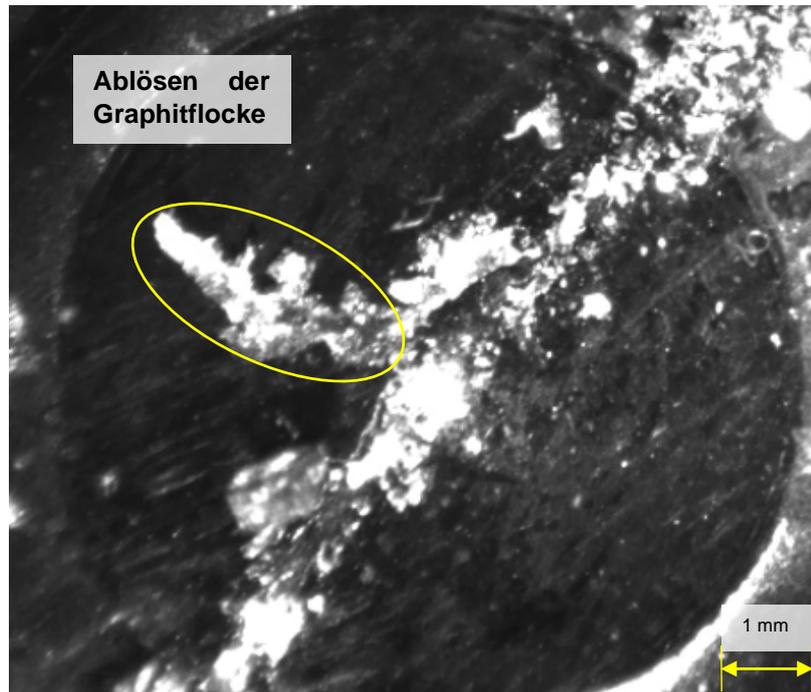


Abbildung 5: Hochgeschwindigkeitsmomentaufnahme der stationären Betriebsphase nach dem Anlauf eines 51208 Axialrillenkugellagers. In der Abbildung ist eine große Graphitflocke zu erkennen, die sich gerade aus der Graphitspur löst.

Bei den Axialzylinderrollenlagern der Baureihe 81208 waren die Effekte deutlicher sichtbar. Somit lässt sich im Anlauf des Versuchs die Verdichtung im Linienkontakt der Rollen mit dem Glas erkennen. Nachdem Verdichten des Graphits lösen sich einzelne Flocken, die sich zu einer Graphitspur, ähnlich zu 51208, verfestigen.

Die Aufzeichnung des Lagers des Typs 81208 im stationären Betrieb zeigen, dass sich die Graphitflocken auf dem Saphirglas durch den wiederkehrenden Rollkontakt verschieben. Gleichzeitig wurden Teile der Graphitflocken durch Kohäsion mit den Rollen wieder aus dem Graphitlauf getragen. Zurück bleiben mehrfach festgewalzte Graphitflocken, die unregelmäßig angeordnet sind. Zusätzlich befinden sich vereinzelt kleine Graphitflocken auf dem Käfig im Rollen-Käfig-Kontakt. Der Graphitlauf bildete sich hauptsächlich mittig vom Wälzkörper. Nach innen, sowie nach außen verdünnte sich die Konzentration des Graphits. Zusätzlich ist der Linienkontakt beim Abrollen auf der Glasscheibe deutlich erkennbar (siehe Abbildung 6).

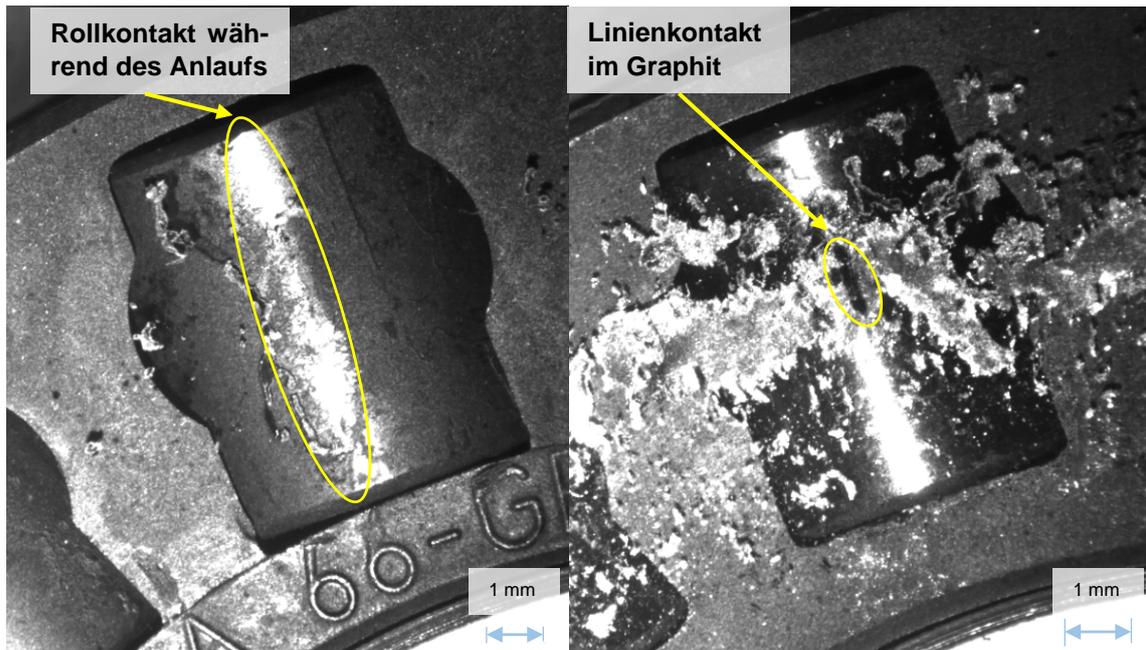


Abbildung 6: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eines 81208 Axialrollenlagers. Das linke Bild zeigt die Graphitablösung im Anlauf, das rechte Bild zeigt die unregelmäßige Verteilung im Betriebspunkt.

Die Mikroskopaufnahme des Saphirglases aus dem Versuch mit dem Lager des Typs 51208 zeigt deutlich den Kontakt zwischen Kugel und Scheibe. Die Analyse der Abbildung 7 erlaubt die Unterteilung in drei distinktive Zonen. In der inneren Zone lagert sich vor allem komprimierter Graphit ab. Es bildet sich ein wechselhaftes und grob poröses Muster zwischen komprimiertem Graphit und Glasscheibe. Die Übergangszone ist durchgängig mit Graphit bedeckt. Zusätzlich findet eine Anhäufung des Graphits in dieser Zone statt. Die Färbung ist weißlich-silbern. In der äußeren Zone lässt sich eine regelmäßig fein poröse Ablagerung des Graphits feststellen.

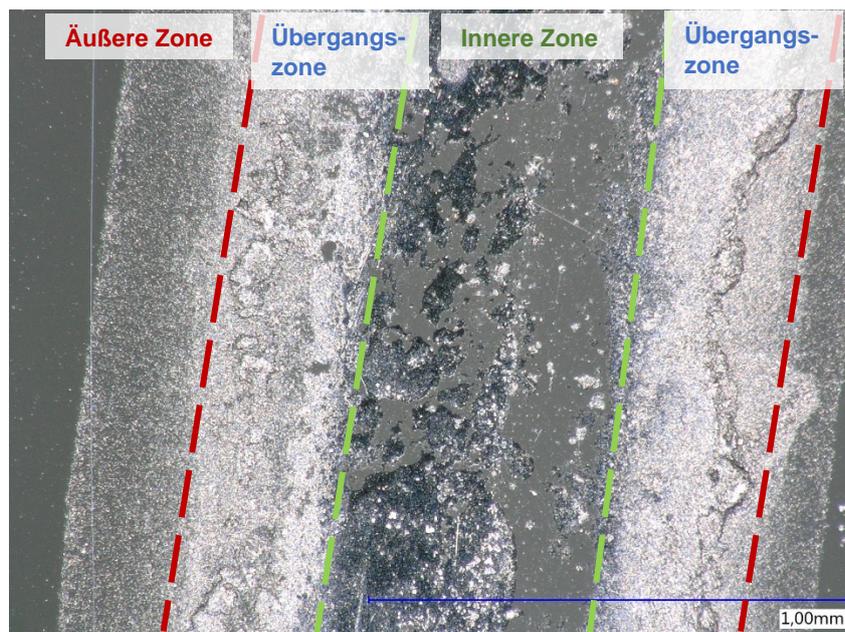


Abbildung 7: Mikroskopaufnahme der Saphirglasscheibe der Versuchsreihe des Lagers Typ 51208. Die Scheibe ist durchsichtig, während das Graphit je nach Dichte silber oder grau reflektiert. Markiert sind die jeweils wahrgenommenen Zonen.

Die WLI-Aufnahme in Abbildung 8 zeigt deutlich den Kontaktbereich von Graphit zu Saphirglas. Die Zonen lassen sich äquivalent zu Abbildung 7 unterteilen. Die regelmäßig gepunktete Zone bildet dabei die äußere Zone ab, in der das Graphit der Kugeln sich an der Scheibe abgesetzt hat. Hierbei ist die durchschnittliche Höhe der Graphitpartikel zwischen 1 und 4 μm . In der inneren Zone ist die unregelmäßige Struktur von Glas (dunkelblau) und verdichtetem Graphit (hellblau und cyanfarben) erkennbar. In der Übergangszone befinden sich die Anhäufungen des Graphits, die eine Rauheitshöhe von bis zu 8 μm erreichen.

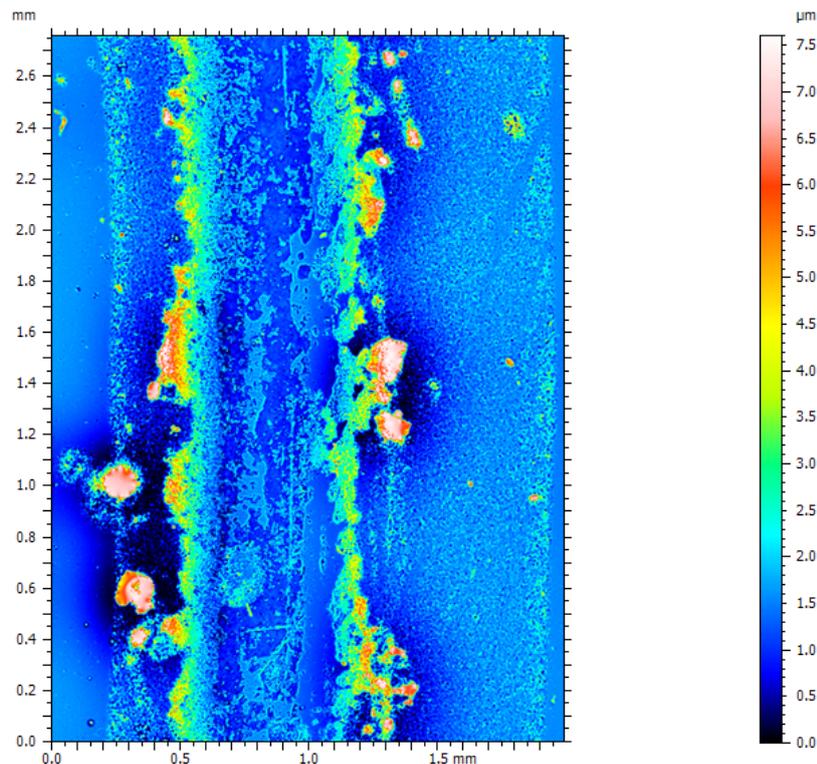


Abbildung 8: Gefilterte und von Welligkeit befreite Weißlichtinterferometeraufnahme der Saphirglasscheibe aus der Versuchsreihe des Lagers Typ 51208

Diskussion der Ergebnisse

Die Untersuchung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigt deutlich, dass beim Modell 51208, durch die benetzten Kugeln Graphitrückstände auf der Glasoberfläche im Kugelnachlauf verdichtet wurden. Die Mikroskop- und WLI-Untersuchungen zeigen, dass sich drei distinktive Zonen bilden. Die innere Zone ist mittig des Rollkontakts, hierbei befanden sich Kugel und Glas stetig im tribologischen Kontakt. Laut [2, 7] bilden feste Schmierstoffe keinen einheitlichen Schmierfilm in der Kontaktzone, sodass ein Wechsellmuster aus komprimierten Graphit und freiem Glas erscheint. Durch die einsetzende Mischreibung ist eine Beurteilung durch Hertz'sche Pressung, sowie Hertz'scher Pressung in hydroelastischen Quetschströmungen nicht ohne weiteres möglich.

Die Übergangszone schließt auf die Verdrängung des Graphits aus dem Rollkontakt. Hierbei wird das verdrängte Material in größeren Anhäufungen abgelagert. Graphit, sowie andere Festschmierstoffe, besitzen gemäß [2] ausgezeichnete Schmierwirkungen bei Axialkräften im Rollkontakt, bei Scherkräften werden sie vorwiegend verdrängt. Die äußere Zone deutet darauf hin, dass das perforierte Muster nur durch Kontakt von Graphit und Glas entstanden ist.

Da in der äußeren Zone kein Rollkontakt zwischen Glas und Kugeln stattfindet, kann der hier abgelagerte Graphit als Verlust gesehen werden, welcher nachgeführt werden muss.

Dieser Graphit beteiligt sich nicht an der Schmierung des tribologischen Rollkontakts. Hierbei handelt es sich um geringe Mengen, da das Graphitprofil in der äußeren Zone sehr porös ist und nur eine geringe Rauheitshöhe von maximal $0,5\ \mu\text{m}$ zur Glasoberfläche erreicht.

Ziel ist es, so viel Graphit wie möglich in der inneren Zone zu verdichten, da hier die Pressung und somit die Reibung am höchsten ist. Dies ist vor Allem bei einem Kugelkontakt schwierig zu realisieren, da die konvexe Flankenform die Verdrängung nach außen begünstigt. Somit bleibt nur eine partielle Bedeckung der Lauffläche mit Graphitflocken. Es bildet sich also eine Tal-Berg-Struktur von innerer Zone zur Übergangszone. In der Übergangszone wird schließlich der verdrängte Graphit abgelagert und bildet klumpige Profilhöhen, die bis zu acht Mal höher sind als in der inneren Zone.

Der größte Graphitverlust findet statt, bevor der Graphit die Glasscheibe erreicht. Durch den Käfig-Kugel-Kontakt wird bereits vorher ein signifikanter Anteil an Graphit am Käfig abgetragen. Dieser Graphit wird dann durch den Impuls des nachfolgenden Graphits aus dem tribologischen Kontakt geschleudert.

Bei dem Modell 81208 ist die Graphitverteilung breiter verteilt als beim 51208, da einerseits der Rollkontakt größer ist und andererseits durch die Zylinderform der Wälzkörper der Graphit weniger radial, sondern eher tangential verdrängt wird. Das sorgt für eine Verdrängung in Rollrichtung, wodurch die Graphitflocken länger im Rollkontakt verweilen. Zusätzlich befinden sich mittig des Käfigs Ausbrüche für die Rollen, welche den Abrieb der Graphitflocken verringern, sodass weniger Graphit auf dem Käfig verbleibt.

Die Untersuchung zeigt, dass sich eine bleibende unregelmäßige Graphitspur auf dem Glas bildet. Mit wachsender Betriebsdauer werden Graphitpartikel im Wälzlagerlauf permanent festgepresst, die Kugelform begünstigt jedoch die Verdrängung aus dem Rollkontakt. Dazu verstärkt die Form des Käfigs die Erosion des Graphits von den Kugeloberflächen, wodurch die Nachführung von zusätzlichem Graphit notwendig wird.

Ausblick

Die Untersuchung erfolgte mit initial benetzten Wälzlagerbauteilen. Durch die Brandgefahr der Graphitdispersion in vorangegangenen Untersuchungen (siehe [7, 8]) und der Erklärung der Graphitverteilung aus gezeigter Untersuchung wird ein Schmierkonzept angestrebt, mit dem es möglich ist eine dispersionsfreie Nachschmierung im tribologischen Kontakt zwischen Wälzkörpern und Lagerringen zu entwickeln. Damit soll die unregelmäßige Verteilung von gewalztem Graphit auf dem Wälzlagerbauteil kompensiert werden, sodass der Reibungszahlverlauf konstant geringgehalten werden kann.

In dieser Untersuchung wurde für die Analyse des Graphitlaufs Saphirglas verwendet, das nicht die Rauigkeit des Wälzlagerstahls besitzt. Daher wird an einer geeigneten Methode gearbeitet, die Phänomenologie anhand der Axialwälzlagerlinge zu erklären.

Ebenfalls ist die Untersuchung der Kohäsion des Schmierstoffs notwendig. So bedarf es bei einer Nachschmierung mit Graphit, einer kontrollierten Abrasion, sowie Kohäsion in den Wälzlagerkontakten.

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“.

Literatur

- 1 *Birkhofer H, Kümmerle T.* Feststoffgeschmierte Wälzlager. Einsatz, Grundlagen und Auslegung. 1. Aufl. Berlin: Springer Vieweg; 2012
- 2 *Sauer B, Hrsg.* Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2. Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben. 8. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg; 2018
- 3 *Binnewies M.* Allgemeine und Anorganische Chemie. 3. Aufl. Berlin: Springer Spektrum; 2016
- 4 *Zhang Z, Simionesie D, Schaschke C.* Graphite and Hybrid Nanomaterials as Lubricant Additives. *Lubricants* 2014; 2: 44 – 65
- 5 *Savage RH.* Graphite Lubrication. *Journal of Applied Physics* 1948; 19: 1 – 10
- 6 *Morstein CE, Klemenz A, Dienwiebel M et al.* Humidity-dependent lubrication of highly loaded contacts by graphite and a structural transition to turbostratic carbon. *Nature communications* 2022; 13: 5958
- 7 *Joerger A, Bause K, Ott S, Albers A.* Graphite Lubrication in Axial Ball Bearings and a Description Approach for Lubrication Mechanisms: Karlsruher Institut für Technologie (KIT); 2022
- 8 *Joerger A, Lagier F., Bischofberger A, Bause K, Albers A.* Experimentelle Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Gleitgeschwindigkeiten in graphitgeschmierten Axialrollenlagern auf deren Reibungsverhalten. Fachtagung für Tribologie 2022 - Göttingen; 2022

Autorenangaben

Anton Dewald M. Sc.

Arn Joerger M. Sc.

Friedrich-Wilhelm Lagier M. Sc.

Arne Bischofberger M. Sc.

Dipl.-Ing. Katharina Bause

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

anton.dewald@kit.edu

arn.joerger@kit.edu

friedrich.lagier@kit.edu

arne.bischofberger@kit.edu

katharina.bause@kit.edu

albert.albers@kit.edu

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

IPEK – Institut für Produktentwicklung

Campus Süd

Kaiserstr. 10

76131, Karlsruhe