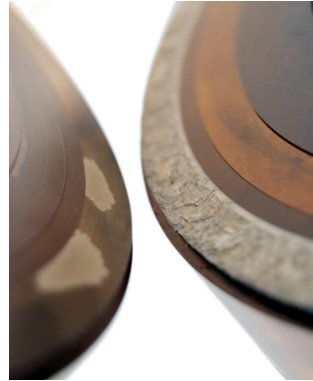


## Untersuchung an Laufflächen von Druckkammlagern im Mischreibungsgebiet

Heß, M.

*Um das Verhalten von Druckkammlagern unter Mischreibungsbedingungen beschreiben zu können, werden derzeit Verschleißuntersuchungen am IMW durchgeführt. Erste Ergebnisse deuten auf eine große Signifikanz der betrachteten Gestaltungsparameter hin.*

*Die bisher beobachteten Ausfälle lassen sich anhand des Ausfallverhaltens und der aufgetretenen Schadensbilder in zwei Klassen einteilen, die hier vorgestellt werden. Zur Erfassung der Verschleißwirkung auf Durchläufer wurde ein auf Profilmessschrieben basierendes Bewertungskonzept erarbeitet, welches zukünftig für einen quantitativen Vergleich der Verschleißresistenz ermöglichen soll.*



*In order to describe the behaviour of thrust cone bearings in the mixed friction regime, wear tests are currently carried out at the IMW. First results indicate a high significance of the design parameters considered. Based on their failure behaviour and appearance of the damaged surfaces, the failures observed so far can be separated into two major classes, which shall be presented here. To judge wear effects on specimen that passed the tests without failure, an evaluation concept based on profile measurements has been developed, which shall enable a quantitative comparison of their wear resistance.*

### Einleitung

Druckkammlager gestatten die direkte Übertragung axialer Lasten zwischen rotierenden Wellen, ohne diese durch stehende Stützstrukturen führen zu müssen. In Ihrer klassischen Anwendung in Turboverdichtergetrieben werden sie primär eingesetzt, um externe Axialkräfte von einer Ritzelwelle auf die langsamer rotierende Radwelle zu übertragen und erst dort über ein Axiallager in das Getriebegehäuse zu leiten. Da in Axialgleitlagern die Reibungsverluste etwa quadratisch mit der mittleren Bahngeschwindigkeit ansteigen, lassen sich erhebliche Effizienzsteigerungen erreichen. Eine zweite Anwendungsoption für Druckkammlager ist der direkte Ausgleich von Verzahnungsaxialkräften bei einfach schrägverzahnten Stirnradstufen. Schrägverzahnungen werden weit verbreitet eingesetzt, um die Laufruhe von Getrieben zu erhöhen. Das bei der Drehmomentübertragung an den Zahnflanken entstehende, axial ausgerichtete Kräftepaar wird bei klassischen Fest-Los-Lagerungskonzepten über Axiallager in

das Gehäuse geleitet. Eine Druckkammlagerung ermöglicht, das in der Verzahnung erzeugte Kräftepaar im Druckkammkontakt mit umgekehrten Vorzeichen erneut zusammenzuführen und auszugleichen – die Schrägverzahnung wird nach außen axialkraftfrei.

Um eine effiziente und dauerhaft sichere Übertragung von Axiallasten zu erreichen, müssen die Laufflächen des Druckkammlagers durch einen hydrodynamischen Schmierfilm getrennt werden, weshalb diese Technik bisher vornehmlich in sehr hochtourigen und eher stationär betriebenen Getrieben Anwendung findet. Untersuchungen im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1551 „Ressourceneffiziente Konstruktionselemente“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) am IMW zeigten jedoch, dass sich die für den Aufbau eines trennenden Schmierfilms erforderliche Geschwindigkeit durch ein geeignetes Laufflächendesign deutlich reduzieren lässt /1,2/, wodurch das Feld möglicher Anwendungen für Druckkammlager potenziell erweitert wird. In einem Stichversuch wurden beispielsweise an einem wälzgelagerten Getriebe, welches sowohl mit, als auch ohne Druckkammlagerung betrieben werden kann, Vergleichsmessungen durchgeführt. Es zeigte sich, dass sich durch die Druckkammlagerung mitunter beachtliche Wirkungsgradsteigerungen erreichen lassen, wenn durch die direkte Axialkraftkompensation die Verwendung einer leichter laufenden Gehäuselagerung ermöglicht wird.

Problematisch bleiben bisher Anfahr- und Bremsvorgänge unter Last, da in diesen Fällen keine sichere Trennung der Laufflächen durch den hydrodynamischen Schmierfilm gewährleistet werden kann, Kennwerte zu ertragbaren Belastungen im Mischreibungsbereich aber nicht allgemein verfügbar vorliegen.

### **Druckkammuntersuchungen im Mischreibungsgebiet**

Um erste Erkenntnisse über die Mischreibungsresistenz von Druckkammlagern und den Einfluss unterschiedlicher Gestaltungsparameter verfügbar zu machen, wird am IMW derzeit eine systematische Testserie auf dem Zweischeibendruckkammprüfstand /3/ durchgeführt. Die Druckkammprüflinge rotieren hierfür mit einer der Mischreibungsregion zugeordneten Geschwindigkeit und werden durch eine axiale Prüflast beansprucht. Die Prüflast wird für eine definierte Überrollungszahl konstant gehalten bevor sie sequentiell gesteigert wird, bis ein Laufflächenversagen eintritt oder die höchste Lastsequenz überstanden wurde.

Den prinzipiellen Versuchsablauf illustriert Abbildung 1. Zunächst wird für einen Referenzprüfling die ertragbare Grenzlast bestimmt, anschließend erfolgen Tests mit modifizierten Prüflingen. Erhöht eine Modifikation die ertragene Überrollungszahl ist von einer Standzeitverbesserung auszugehen, wird die Referenzlast hingegen nicht erreicht, liegt eine Standzeitreduktion vor.

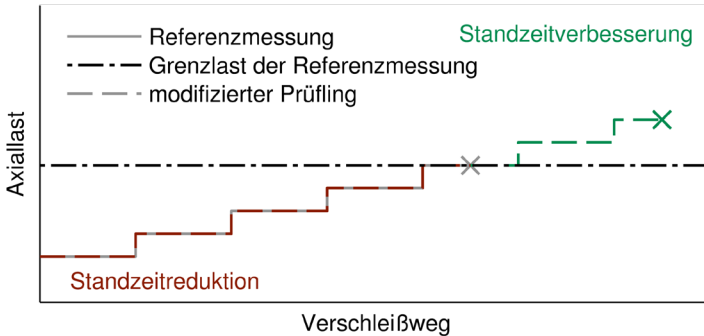


Abbildung 1: *Prinzipieller Ablauf der Mischreibungsexperimenten*

Für die Untersuchungen ist ein vollfaktorierter Versuchsplan mit folgenden Parametern vorgesehen:

- Kegelwinkel
- Schlupf
- Laufbahnbreite
- Grundwerkstoff
- Oberflächenbehandlung

Die Parameter werden zweistufig mit mindestens einfacher Wiederholung durchgeführt, für sechs Konfigurationen ist eine doppelte Wiederholung vorgesehen.

## Beobachtete Ausfälle

Obwohl das Versuchsprogramm noch nicht vollständig absolviert wurde, hat sich bereits eine breite Streuung im Bereich der ertragenen Lasten ergeben, sodass davon auszugehen ist, dass die gewählten Parameterstufen durchaus geeignet sind, um die Mischreibungsresistenz von Druckkammlagern zu beeinflussen.

Eine Beobachtung des Ausfallverhaltens und die Betrachtung der dabei eingetretenen Laufflächenveränderungen gestattet die grobe Einteilung in zwei Ausfallgruppen, für die vermutlich unterschiedliche Versagensursachen ursächlich sind.

### Ausfälle nach unzulässig hohen axialen Beschleunigungen

Bei den Ausfällen der ersten Gruppe ist zunächst ein ruhiger, konstanter Betrieb innerhalb einer Laststufe zu beobachten. Unvermittelt treten plötzlich starke axiale Stöße auf und nehmen im weiteren Verlauf massiv an Intensität und Häufigkeit

zu, sodass innerhalb weniger Sekunden eine Abschaltgrenze ( $5 \text{ m/s}^2$ ) erreicht wird. Daraufhin führt der Prüfstand eine Nothaltssequenz aus, stoppt die Rotationsbewegung und entfernt die axiale Vorspannung von der Kontaktfläche. Der Beschleunigungsanstieg wird von einem Anstieg des Reibmoments und einem leicht verzögerten Anstieg der Oberflächentemperatur um mehrere Grad Celsius innerhalb weniger Sekunden begleitet. Trotz nur weniger Überrollungen zwischen dem initialen Schadensereignis und dem Stillstand kommt es meist zu einer vollständig über den Umfang verteilten Laufbahnzerstörung. Es ist davon auszugehen, dass der rapide Anstieg der Stoßfrequenz durch die Ausbildung immer weiterer Folgeschäden hervorgerufen wird. Abbildung 2 zeigt die Aufnahme einer typischen Laufbahn dieser Schadensgruppe.

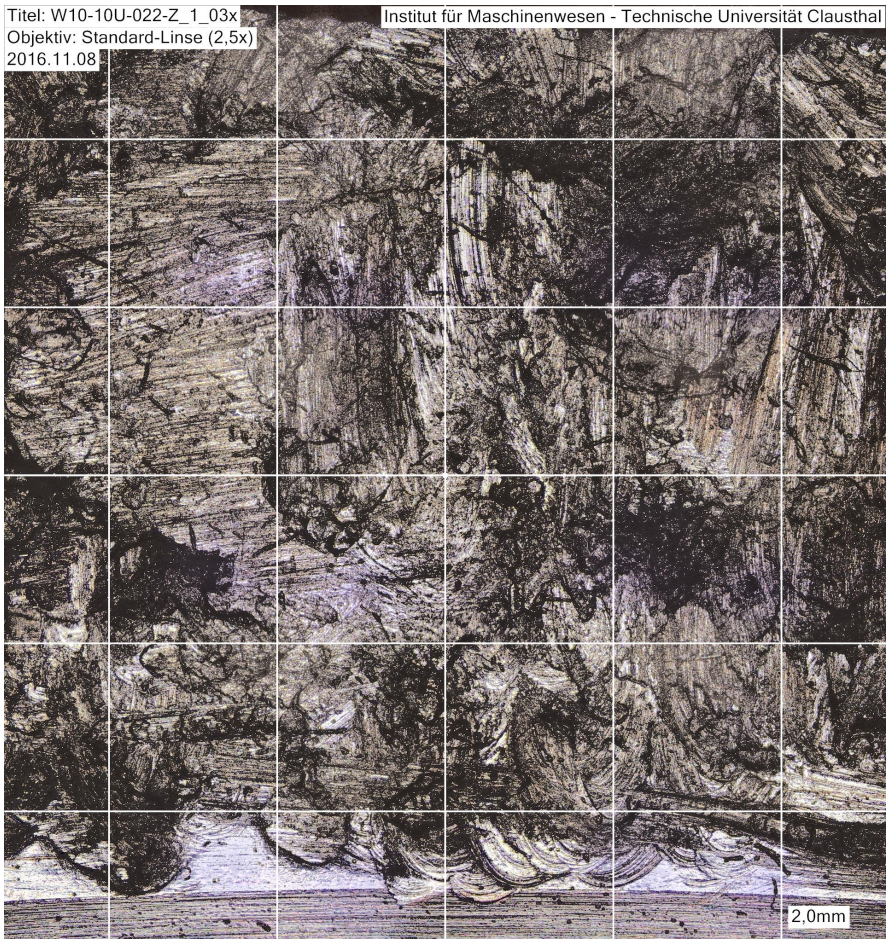
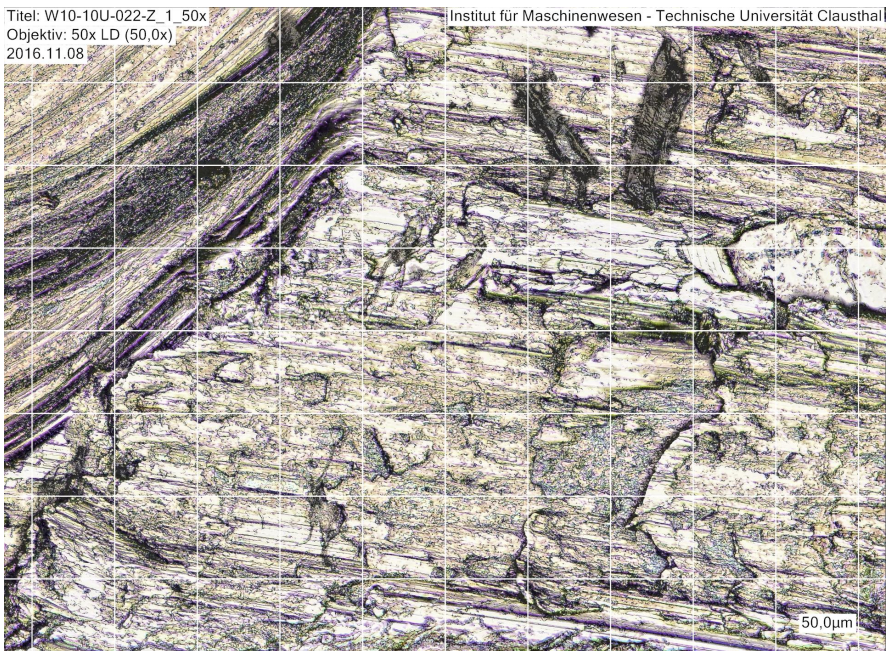


Abbildung 2: Laufbahn eines Prüflings aus 34CrMo4 nach einem Fressschaden

Das Schadensbild ist geprägt von bis zu mehreren Zehntelmillimetern tiefen Zerrfurchungen und einer deutlich gesteigerten Oberflächenrauheit. Teilweise sind „zerschmierte“ Bereiche erkennbar, in denen ein Materialübertrag zwischen den Kontaktpartnern stattgefunden haben könnte. Am unteren Bildrand ist ein Teil der Laufbahn zu sehen, der nicht in den Kontaktbereich ragte und daher von der Laufbahnzerstörung verschont blieb. Zudem sind insbesondere im Randbereich sichelförmige Spuren erkennbar, die sich aus der kinematischen Zwangsbewegung beim Ein- und Auslaufen von Partikeln in den Kontaktbereich ergeben. Abbildung 3 zeigt einen stärker vergrößerten Detailausschnitt der betrachteten Oberfläche.



*Abbildung 3: Vergrößerter Detailausschnitt der zerstörten Lauffläche aus Abbildung 2*

Im linken oberen Bereich ist ein ausgeprägter Teil einer der zuvor beschriebenen, sichelförmigen Riefe zu erkennen, der übrige Bildbereich zeigt die schuppige Struktur der zerstörten Lauffläche. Eine räumliche Darstellung des Bildausschnittes zeigt Abbildung 4.

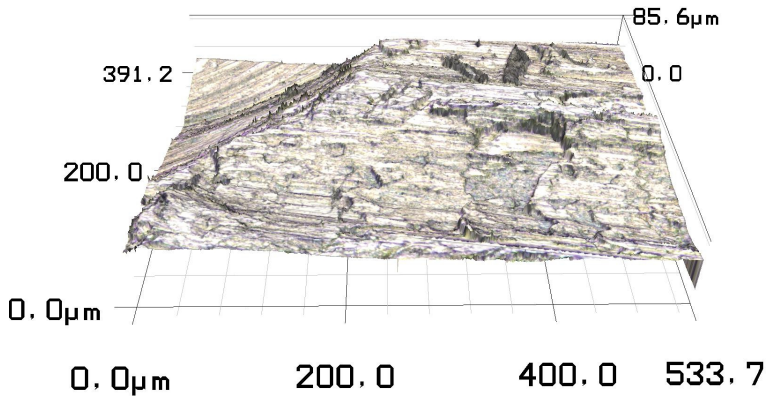


Abbildung 4: Räumliche Darstellung des Bildausschnittes aus Abbildung 3 auf Basis der aufgezeichneten Höhendaten

Diese Abbildung verdeutlicht die Relationen der Oberflächenveränderung. Beeindruckend erscheint die über  $70\ \mu\text{m}$  tiefe Riefe, die sich deutlich von der zerklüfteten Topographie in ihrer Umgebung abhebt.

Aufgrund des beobachteten Schadensbildes sowie des aufgezeichneten Schadensverlaufes wird für diese Schadensgruppe ein tribomechanisches Versagen mit adhäsiven Anteilen als wahrscheinlichster Schadensmechanismus angenommen. Bei Fressschäden kommt es an Festkörperkontakten zu Mikroverschweißungen zwischen den Kontaktpartnern, die infolge des kinematischen Zwanges sofort auseinander gerissen werden und Ausbrüche in den Oberflächen zurücklassen. Bei erneuten Überrollungen versagt der hydrodynamische Schmierfilmaufbau an diesen Ausbrüchen, was zu weiteren Schäden führt. Durch den versuchsbedingten Schlupf im Kontakt treffen die beiden Lauffläschenschäden bei der nächsten Überrollung leicht versetzt aufeinander, so dass eine rasche Ausbreitung des Schadensgebietes erfolgt. Kontaktpaare, die bisher mit dieser Schadensart versagten, absolvierten meist weniger als die Hälfte der für einen Durchlauf erforderlichen Überrollungszahl.

Ein erneutes Anfahren derartig ausgefallener Prüflinge ist nicht sinnvoll, da es sofort von starken Stößen begleitet wird, die bei weiterem Prüfbetrieb zu einer Prüfstandsbeschädigung, in der realen Anwendung zu Beschädigungen am Getriebe und dessen Umgebungsstruktur führen könnten. Derartige Ausfälle sind deswegen durch die Wahl geeigneter Gestaltungsparameter und Lastgrenzen unbedingt zu vermeiden.

### **Ausfälle nach unzulässig steilen Temperaturanstiegen**

Im Versuchsbetrieb sorgt die im Kontakt umgesetzte Reibleistung für eine Erwärmung von Laufflächen und Schmierstoff. Da mit der Temperatur auch der abgeführte Wärmestrom ansteigt, ist zunächst die Einstellung eines Gleichgewichtes zu beobachten. Eine Steigerung der axialen Last führt zu einer Erhöhung der vom Kontakt zu ertragenen Leistungsdichte, woraus sich für die ersten Laststufen jeweils eine moderate Erhöhung der „Gleichgewichtstemperatur“ ergibt, die ebenfalls zunächst abklingt. Im weiteren Versuchsverlauf kann jedoch häufig ein Wendepunkt im Temperaturschrieb beobachtet werden, ab dem die Temperaturerhöhungen je Laststufe wieder größer werden und in dessen Folge eine steilere Temperaturzunahme zu erkennen ist. Um einer Schädigung des Schmierstoffs durch zu hohe Temperaturen vorzubeugen, werden die Versuchsläufe beim Überschreiten einer festgelegten Obergrenztemperatur von 120 °C (gemessen eine halbe Umdrehung nach dem Kontaktdurchlauf) für eine Abkühlphase unterbrochen und erst nach dem Unterschreiten einer Referenztemperatur von 40 °C fortgesetzt.

Nach der geforderten Abkühlung ist meist eine problemlose Versuchsfortführung möglich – das erste Überschreiten der Grenztemperatur stellt für den Versuch somit noch keinen Ausfall dar. Wegen der mit den Laststufen weiterhin ansteigenden flächenspezifischen Leistungsdichte ist davon auszugehen, dass nach einer gewissen Laufzeit die Grenztemperatur erneut erreicht und der Versuch wieder unterbrochen wird. Die Versuchsunterbrechungen während der Abkühlphasen bieten die Möglichkeit zur optischen Inspektion einer Prüflingslauffläche, um etwaige Beschädigungen festzustellen und zu dokumentieren. Abbildung 5 zeigt beispielhaft vier Aufnahmen einer in der Prüfkammer montierten Druckkammlauffläche zu unterschiedlichen Zeitpunkten eines Mischreibungsversuches.

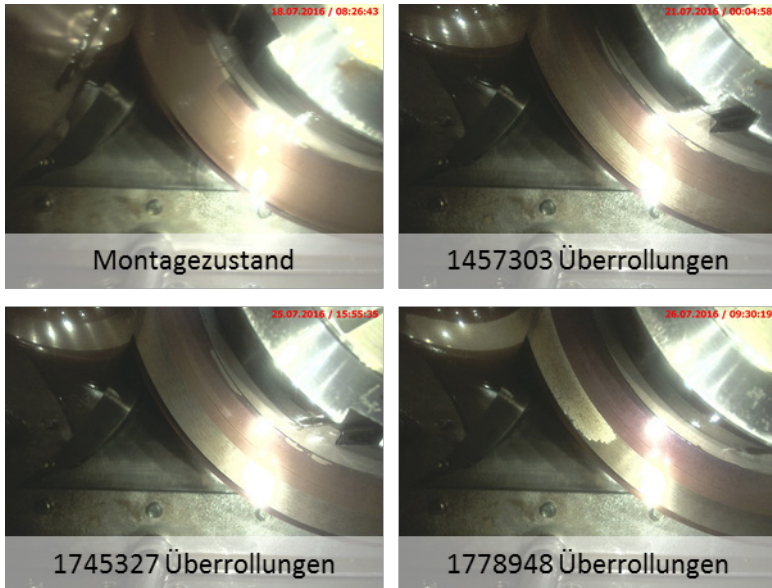


Abbildung 5: Einblick in die Prüfkammer zur Dokumentation des Oberflächenzustandes bei unterschiedlichem Versuchsfortschritt

Die erste Aufnahme (oben links) zeigt den Prüfling vor Versuchsbeginn um die Ausgangslage darzustellen. Die zweite Abbildung (oben rechts) zeigt die Laufbahn während einer Abkühlphase nach etwa 1,46 Mio. Überrollungen. Es sind Einlaufspuren auf der Laufbahn erkennbar, im weiteren Verlauf ergeben sich zunächst keine deutlichen Veränderungen am Erscheinungsbild der Laufbahn, wie exemplarisch durch die dritte Aufnahme (unten links) belegt werden soll. Insbesondere für Prüflinge mit nitrierten Laufbahnen kommt es im Bereich höherer Axiallasten zum Auftreten kleiner, matt-fleckiger Strukturen, die bei einer weiteren Versuchsfortführung zu größeren Bereichen anwachsen – wie in der vierten Abbildung (unten rechts) gezeigt.

Die Mikroskopaufnahme in Abbildung 6 zeigt ein Laufbahnsegment mit einer solchen, entstehenden Fleckstruktur. Es handelt sich um feinkörnige oberflächennahe Ausbrüche – typischerweise erscheint ihre Entstehung zunächst im Bereich der Laufbahnränder zu erfolgen, von denen aus dann bei weiterer Belastung ein Wachsen in den übrigen Laufbahnbereich erfolgt.



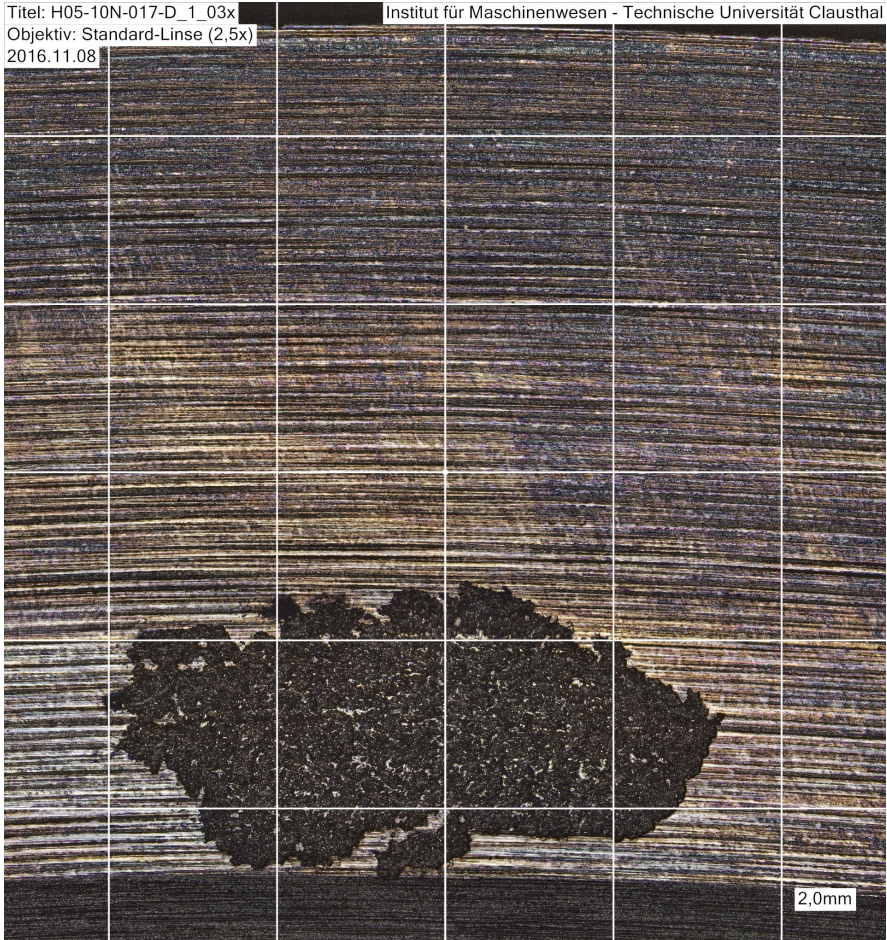


Abbildung 6: Nitrierte Lauffläche eines Prüflings aus 30CrNiMo8 mit einem beginnenden Verschleißschaden

Abbildung 7 zeigt eine vergrößerte Detailaufnahme des Schadensrandgebietes. Es ist ein scharf umgrenzter Übergang zwischen der ursprünglichen Laufflächen-topologie und dem Schadensbereich erkennbar. Die gezeigten Ausbrüche haben eine Tiefe von etwa 10 µm bis 20 µm. Im Gegensatz zu den Schäden der vorherigen Gruppe sind die Ausbrüche deutlich feiner strukturiert.

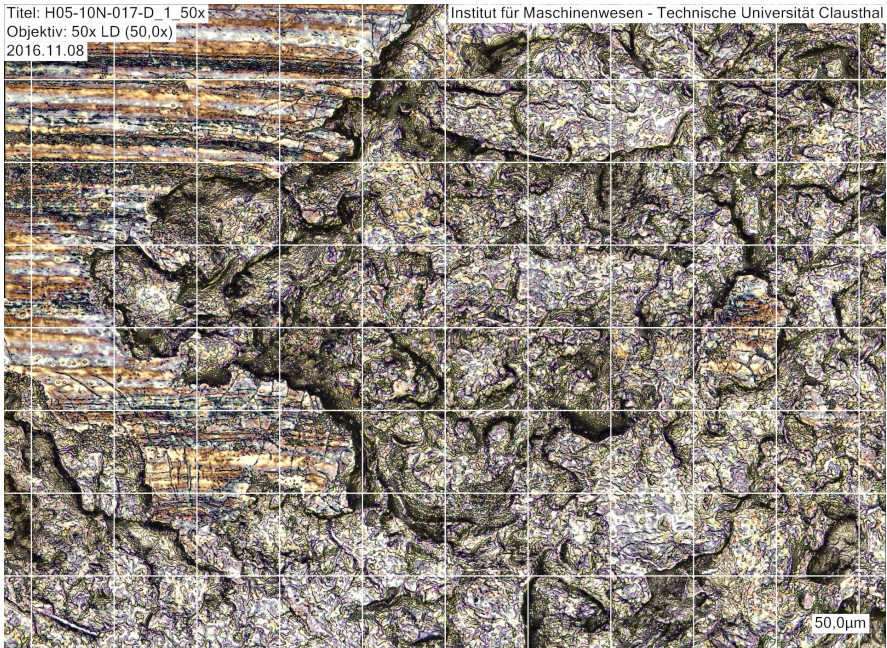


Abbildung 7: Vergrößerte Detailaufnahme des Schadensrandgebietes aus Abbildung 6

Wird der Versuchslauf nach dem ersten Auftreten dieser Strukturen fortgesetzt, ist in der Regel zunächst keine signifikante Verschlechterung des Laufverhaltens (Laufruhe) feststellbar. Das Auftreten eines solchen Oberflächenbildes ist also nicht mit einem sofortigen Ausfall des Lagerungssystems gleichzusetzen. Im weiteren Versuchsverlauf ist jedoch nicht nur ein Anwachsen der Ausbruchsbereiche, sondern auch eine deutliche Abnahme der Zeitintervalle bis zum erneuten Erreichen der Grenztemperatur zu erkennen – der mittlere Temperatur-Zeit-Gradient wird immer steiler.

Für die aktuelle Versuchsreihe wurde festgelegt, dass ein derartig vorgeschädigtes Prüflingspaar als „thermisch-ausgefallen“ gilt, wenn zwischen zwei Abkühlphasen eine Mindestanzahl von Überrollungen nicht mehr erreicht wird. Die für diese Fälle aufgezeichneten Temperatur-Zeit-Verläufe lassen erkennen, dass sich bei einem fortgesetzten Betrieb des Lagers unter diesen Bedingungen (ohne eine temperaturbedingte Unterbrechung) schnell kritische Temperaturen einstellen würden, die Schädigungen des Schmierstoffs und der Laufflächen zur Folge hätten, weshalb eine dauerhafte Anwendung eines Lagers unter diesen Betriebsbedingungen nicht praktikabel erscheint.

## Beurteilung der Verschleißresistenz von Durchläufern

Neben den zuvor beschriebenen Ausfällen während der Mischreibungsversuche wurde auch das Auftreten von Durchläufern erfasst. Diese Prüflinge absolvierten das vollständige Versuchsprogramm, ohne dass ein Ausfallereignis eintrat. Teilweise ist auch auf Durchläuferflächen die Ausbildung erster matt-fleckiger Strukturen erkennbar, sie scheinen im Rahmen der Versuchsbelastung allerdings noch nicht zu versagensrelevanten Bedingungen geführt zu haben. Um auch Durchläufer hinsichtlich einer während der Versuchsdauer eventuell erfolgten Oberflächenveränderung beurteilen zu können, wurde die Kontur aller Laufflächen entlang einer definierten Messtrecke erfasst. Über einen Vergleich mit einem nach erfolgreichem Versuchsdurchlauf entlang derselben Strecke erfassten Höhenschriebes können die Auswirkungen des Versuches auf die Oberfläche eines Durchläufers deutlich gemacht werden, wie exemplarisch in Abbildung 8 dargestellt.

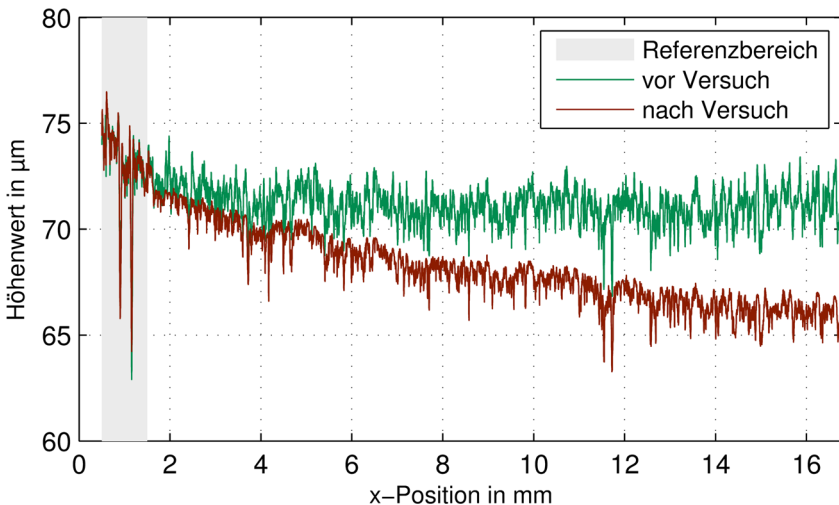


Abbildung 8: Gegenüberstellung der mittels eines Laser-Scanning-Mikroskops erfassten, (neigungskorrigierten) Höhenschriebe für eine Druckkammlauffläche vor und nach dem Versuch.

Für die Erstellung des in der Abbildung gezeigten Vergleichs wurde zunächst eine Neigungskorrektur der vor dem Versuch aufgezeichneten Höhendaten vorgenommen, um ein möglichst waagerechtes Profil zu erhalten. Im ursprünglich geneigten Profilschrieb (Kegelwinkel) ist die hier erkennbare charakteristische Oberflächenstruktur aufgrund von Skalierungseffekten gegenüber der geometriebedingten Höhenänderung (etwa 260 µm für eine 15 mm breite Laufbahn mit 1,0° Kegelwinkel) kaum erkennbar. Die Zuordnung des nach dem Versuch aufgenommenen Höhenschriebs gelingt mit Hilfe des in der Abbildung grau

hinterlegten Referenzbereich, der außerhalb der Überlappungszone der Prüflinge liegt und deswegen kaum Oberflächenveränderungen während des Versuchs erfährt – zur Angleichung der x-Positionsdaten der Messschriebe sind zwei hervorstechende Markierungen innerhalb dieses Referenzbereichs eingebracht. Für eine genauere Betrachtung sind in Abbildung 9 drei jeweils 1 mm lange Teilstrecken aus dem Referenzbereich, der Laufbahnmitte und dem äußeren Laufbahnrand dargestellt.

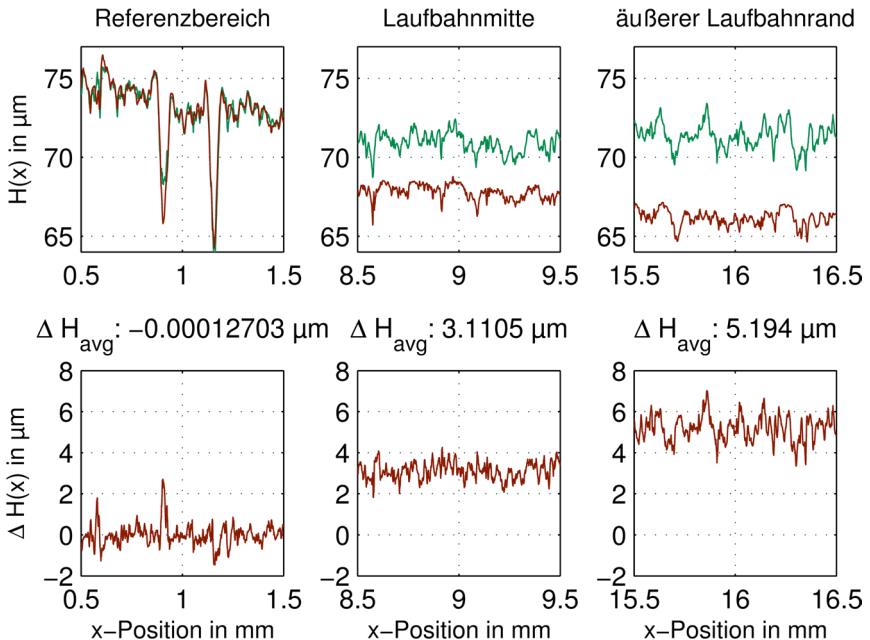


Abbildung 9: Detailausschnitte der zu vergleichenden Höhenschriebe aus Abbildung 8 (jeweils oben) und die sich daraus ergebenden Höhenunterschiede (jeweils unten).

Für den Referenzbereich ergibt sich erwartungsgemäß eine gute optische Übereinstimmung der Höhenschriebe, was für eine gelungene Ausrichtung der Profile spricht. Für die andern beiden Bereiche ergeben sich deutliche Änderungen in der erfassten Höhe – als Zusatzinformation ist der mittlere Höhenunterschied für die jeweilige Teilstrecke angegeben. Für die Verteilung der Profiltäler bestehen ausgeprägte Ähnlichkeiten, während der nach dem Versuch aufgenommene Höhenschrieb im Bereich der Profilspitzen geglättet erscheint. Diese Einglättung kann als Verschleißfolge angesehen werden. Wie bereits in Abbildung 8 zu erkennen, wächst der Höhenunterschied in Richtung der Laufbahnaußenkante an und übersteigt die „Schwingweite“ der Profile deutlich. Da die Profiltäler aber

scheinbar erhalten bleiben, lässt sich die gesamte Höhenänderung nicht durch einen verschleißbedingten Oberflächenabtrag erklären.

Ein möglicher Erklärungsansatz wäre eine nach außen zunehmende plastische Deformation der Lauffläche. Unterstellt man eine lineare Deformationszunahme und vernachlässigt eine verschleißbedingte Absenkung der Profilmittelinie, die aus der Einebnung von Rauheitsspitzen folgt, müsste sich die plastische Deformation durch eine lineare Regression über die Höhenunterschiede abbilden lassen. Die für das Beispiel ermittelte Ausgleichsgerade steigt über der Laufbahnbreite um etwa  $4,7 \mu\text{m}$  an, woraus sich eine Änderung des Kegelwinkels infolge der plastischen Deformation von ca.  $0,018^\circ$  ergäbe.

In Abbildung 10 sind die Höhendaten für die beiden in der Laufbahn angeordneten Teilstrecken dargestellt, wobei zu den nach dem Versuch ermittelten Höhendaten die angenommene elastische Deformation addiert wurde, sodass die verbleibenden Höhenunterschiede als Verschleißfolge angesehen werden können.

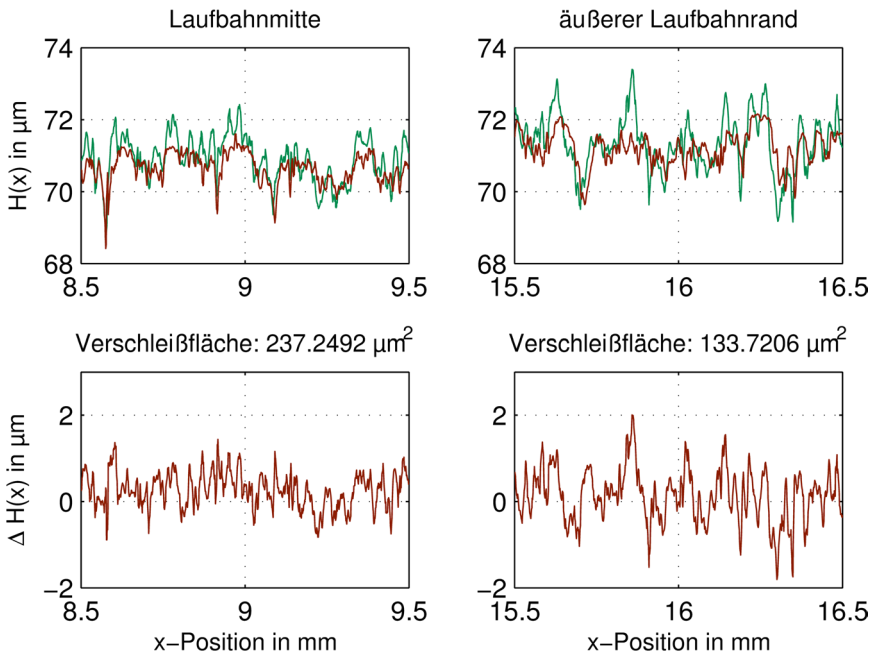


Abbildung 10: Höhendatenscribe mit durch lineare Regression korrigierter plastischer Deformation (jeweils oben) und die sich daraus ergebenden Höhenunterschiede (jeweils unten).

Die abgebildeten Höhenscribe zeigen eine ziemlich gute Übereinstimmung der Rauheitstäler und lassen deutlich Einebnungsbereiche von Rauheitsspitzen erkennen. Die Integration über die Höhendifferenz ergibt die auf der betrachteten

Teilstrecke eingeebnete Verschleißfläche und soll zukünftig als Vergleichswert für die während der Versuchsdauer erfolgte Verschleißwirkung zur Beurteilung von Durchläufern herangezogen werden.

## Zusammenfassung

Am Institut für Maschinenwesen werden zurzeit Untersuchungen zum Verhalten von Druckkammlaufflächen beim Betrieb unter Mischreibungsbedingungen durchgeführt. Ziel der Arbeiten ist die Bestimmung von Leistungsgrenzen sowie die Evaluation des Einflusses verschiedener Gestaltungsparameter auf die Mischreibungsresistenz. Anhand der bisherigen Ergebnisse gelingt die Identifikation zweier unterschiedlicher Ausfallmechanismen. Zudem wurde ein Konzept zur Beurteilung der Verschleißwirkung auf Durchläufer anhand des Vergleichs von Höhenprofilen vorgestellt.

## Literatur

- /1/ Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Heß, M.: Druckkamlagerungen: Gesteigerte Effizienz für schrägverzahnte Getriebe; In: Gleit- und Wälzlagerungen 2015: Gestaltung, Berechnung, Einsatz mit Fachausstellung; Schweinfurt, 06. und 07. Mai 2015. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2015 (VDI-Berichte, 2257). ISBN 978-3-18-092257-7, S. 221-233
- /2/ Heß, M.: DFG SPP 1551: Der Druckkamm als „Ressourceneffizientes Konstruktionselement“. In: Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal 40 (2015), 87-95
- /3/ Thoden, D.: Neuer Prüfstand für Verschleißuntersuchungen an Druckkammern. In: Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal 34 (2009), 115-118