

# Ölnebelbildung in Gleitlagern - Experimentelle Untersuchungen

M. Fritz, W. Burger, R. Scovino, A. Albers

Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

## 1 Einführung

Ölnebel - verdampftes und rekondensiertes Schmieröl - stellt vor allem für Großmotoren wie Schiffsdiesel oder Antriebe von Kleinkraftwerken eine erhebliche Gefahr dar. Die ersten wissenschaftlichen Untersuchungen, die sich mit dem Auftreten von Ölnebel in Großdieselmotoren befassen, stammen aus den Jahren 1955 [1] und 1957 [2]. Motivation für diese Untersuchungen war ein Schiffsunglück im Jahr 1947, bei dem 28 Seeleute durch eine Triebräumexplosion ihr Leben verloren. Ursache dieser Explosion war Ölnebel, der sich im Triebräum des Motor entzündet hatte.

Unter Ölnebel versteht man sehr kleine, in der Luft schwebende Ölteilchen mit Durchmessern in der Größenordnung von 1 - 10  $\mu\text{m}$ . Man kann unterscheiden zwischen Ölnebel, der durch mechanische Zerstäubung entstanden ist und stets in einer gewissen Grundkonzentration im Triebräum eines Motors vorhanden ist, und Ölnebel, der sich aus rekondensiertem Öldampf bildet. Insbesondere der aus Öldampf entstehende Ölnebel kann die gefürchteten Triebräumexplosionen nach sich ziehen.

In [1] und [2] wurden als Ursachen für die Entstehung von Öldampf überhitzte Maschinenteile wie Grund- oder Pleuellager sowie die Kolbenlaufflächen angenommen, weitergehende Untersuchungen hierzu finden sich nicht.

Sehr intensiv wurde hingegen an Maßnahmen zur Minderung der Folgen einer Triebräumexplosion mittels sogenannter Explosionsklappen sowie an Einrichtungen zur frühzeitigen Erkennung von Ölnebel gearbeitet [2, 3]. Die heute übliche Methode zur Detektion von Ölnebel basiert auf optischen Methoden, die die Opazität, d.h. die Trübung durch Ölnebel, in einer definierten Messstrecke bestimmen [4, 5]. Einen handelsüblichen Ölnebelsensor (Hersteller: Fa. Schaller Automation, Blieskastel) zeigt **Bild 1**.



Bild 1: Ölnebelsensor

Zielsetzung der im Folgenden beschriebenen, am Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau der Universität Karlsruhe (TH) unter Leitung von Prof. Dr. A. Albers in Zusammenarbeit mit der Firma Schaller Automation durchgeführten Arbeiten war der Nachweis der Ölnebelentstehung aus dem Schmierpalt von Gleitlagern. Von besonderem Interesse waren die Randbedingungen und der

zeitliche Verlauf der Ölnebelentstehung und der damit einhergehende Schaden an den beteiligten Gleitflächen.

Ölnebel scheint in nennenswertem, d.h. gefährlichem Umfang nur in großen Maschinen zu entstehen. Die Fragen, warum dies so ist, und welche Parameter hierbei ausschlaggebend sind, waren bisher weitgehend ungeklärt. Im Rahmen der Arbeiten wurden zahlreiche Versuche an Gleitlagerprüfständen durchgeführt, die erste Erkenntnisse über die Entstehungsmechanismen lieferten. Die Versuche sind noch nicht abgeschlossen, dieser Beitrag soll lediglich erste Ergebnisse und Interpretationsversuche präsentieren und zur Diskussion stellen.

## 2 Prüfstände und Messtechnik

Die Versuche wurden am kleinen und großen Gleitlagerprüfstand (**Bild 2** und **Bild 3**) des Instituts durchgeführt. Der Aufbau des kleinen Lagerprüfstands ist in **Bild 4** dargestellt. Der große Lagerprüfstand ist analog aufgebaut. Zwischen den beiden Stützlagern, welche die Welle radial führen, befindet sich das Prüflager, das mittels eines Hydraulikzylinders mit der Belastungskraft beaufschlagt wird. Für die Versuche wurden Blei-Kupfer-Zinn-Dreischichtgleitlager und Bronze-Gleitlager mit einem Durchmesser von 61,5 mm und einer Breite von 9,5 mm (kleiner Prüfstand) bzw. Bronze-Lager mit einem Durchmesser von 118 mm und einer Breite von 18 mm (großer Prüfstand) eingesetzt. Zur Vereinfachung des Versuchsablaufs wurden zunächst Halbschalen verwendet. Später wurden auch Messungen mit Vollschalen durchgeführt.

Neben den zur Charakterisierung des Betriebszustands erforderlichen Messgrößen Drehzahl, Antriebsmoment, Belastungskraft, Lagerrückentemperaturen und Öleinlaufemperatur wurde mit Hilfe eines optischen Ölnebelsensors die Opazität (Trübung der Atmosphäre) als Maß für die entstandene Ölnebelmenge im Prüfstandsvolumen erfasst. Darüber hinaus wurde zur Überwachung des Prüflagers die Thermospannung zwischen Welle und Lager aufgezeichnet (BEAROMOS-System, Patent Fa. Schaller Automation). Kommt es in einem Lager zu Festkörperreibung, entsteht eine Thermospannung, die den entstehenden Lagerschaden anzeigt.

Die Messung der Lagerrückentemperatur erfolgte an zwei Stellen: Einmal in der Wirkrichtung der Belastungskraft (Temperatur T1) sowie ca. 30° in Umfangsrichtung versetzt im Bereich des engsten Schmierpalts (Temperatur T2).

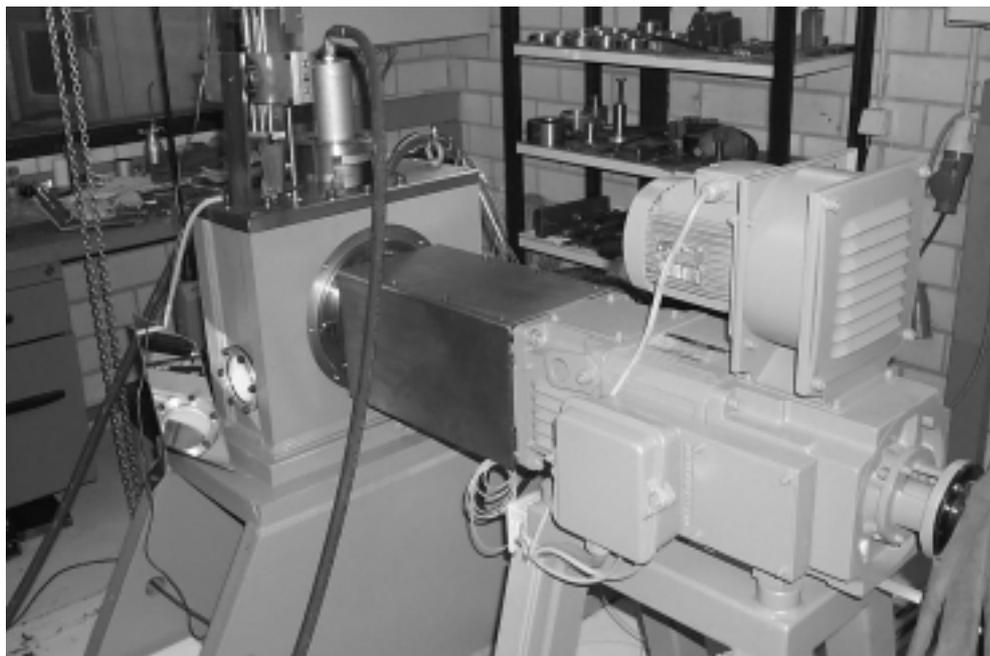


Bild 2: Kleiner Lagerprüfstand

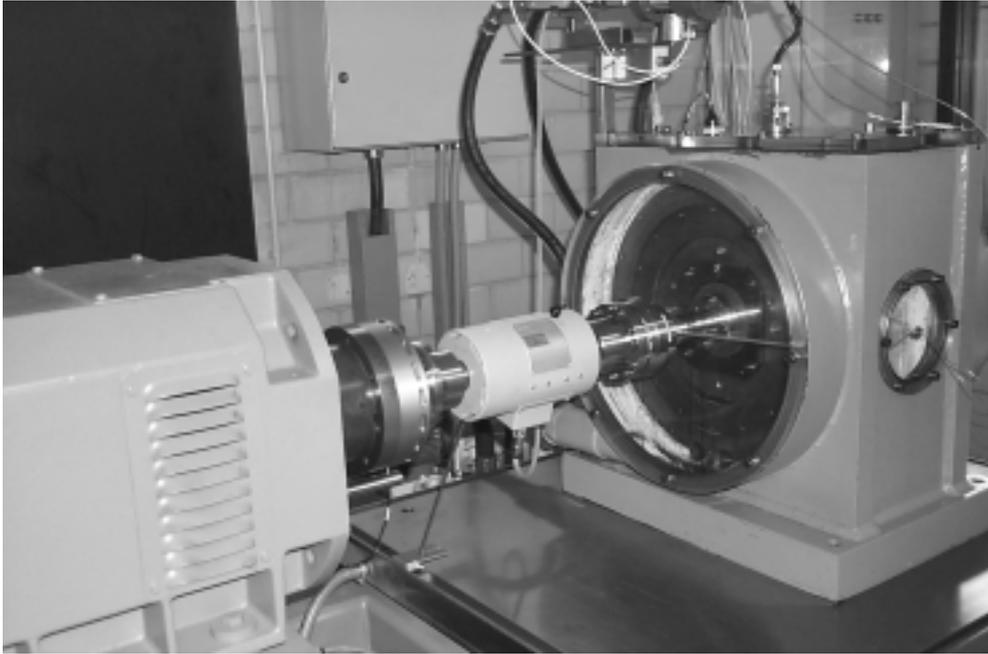


Bild 3: Großer Lagerprüfstand

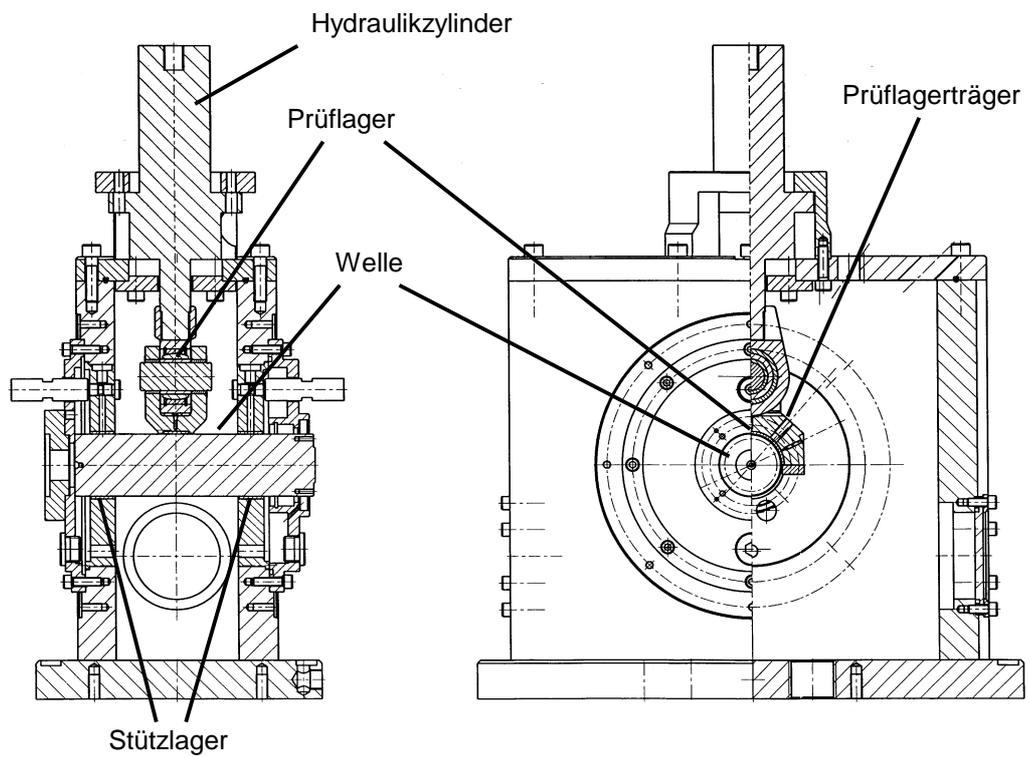
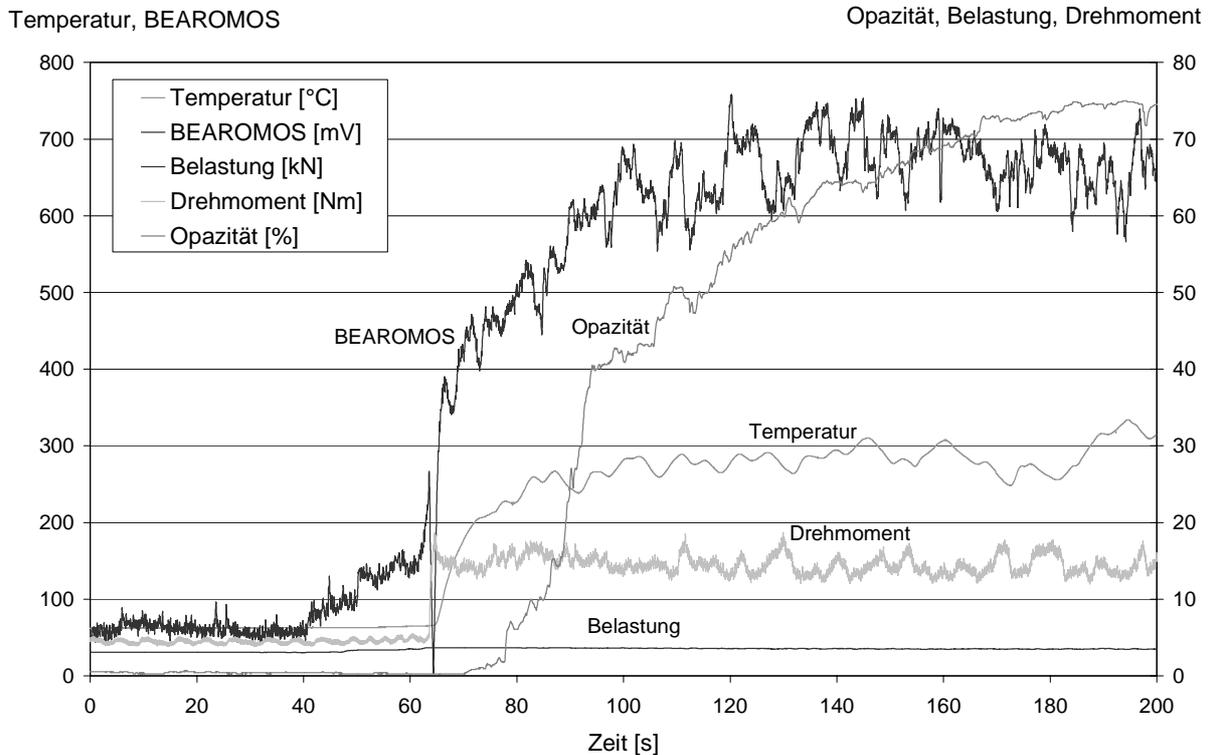


Bild 4: Schnittzeichnung des kleinen Lagerprüfstand

### 3 Versuche am kleinen Lagerprüfstand

Die Entstehung von Ölnebel konnte sowohl mit Gleitlagerhalbschalen als auch mit Gleitlagervollschalen nachgewiesen werden. Um den Verhältnissen in Großdieselmotoren möglichst nahe zu kommen, wurde der Prüfstand bei allen Versuchen mit einer Drehzahl von  $3000 \text{ min}^{-1}$  betrieben. Dann liegen die Gleitgeschwindigkeiten in der gleichen Größenordnung wie bei realen Großmotoren. Die Prüflager wurden nach dem Einlauf bis zur Fressgrenze belastet. Überschritt die Lagerrückentemperatur einen bestimmten Grenzwert, so wurden die Versuche abgebrochen.

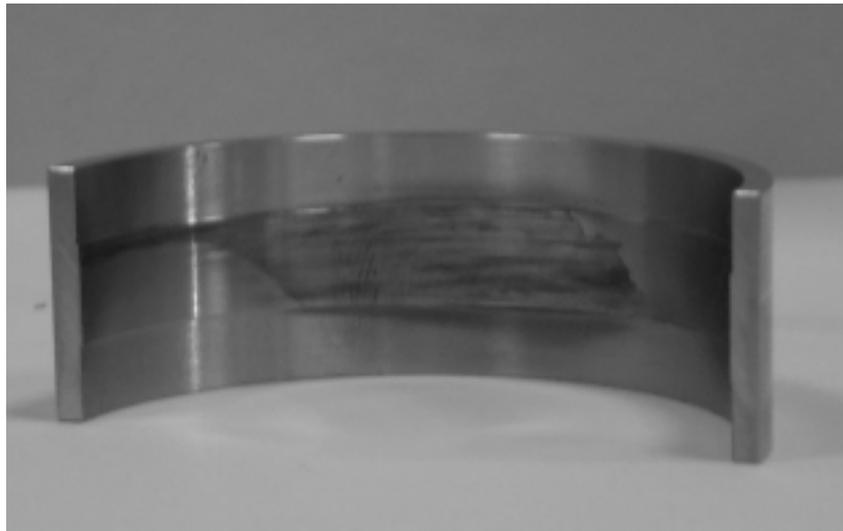


**Bild 5:** Beispiel einer Messung am kleinen Prüfstand bei statischer Belastung mit einer Bronze-Lagerhalbschale

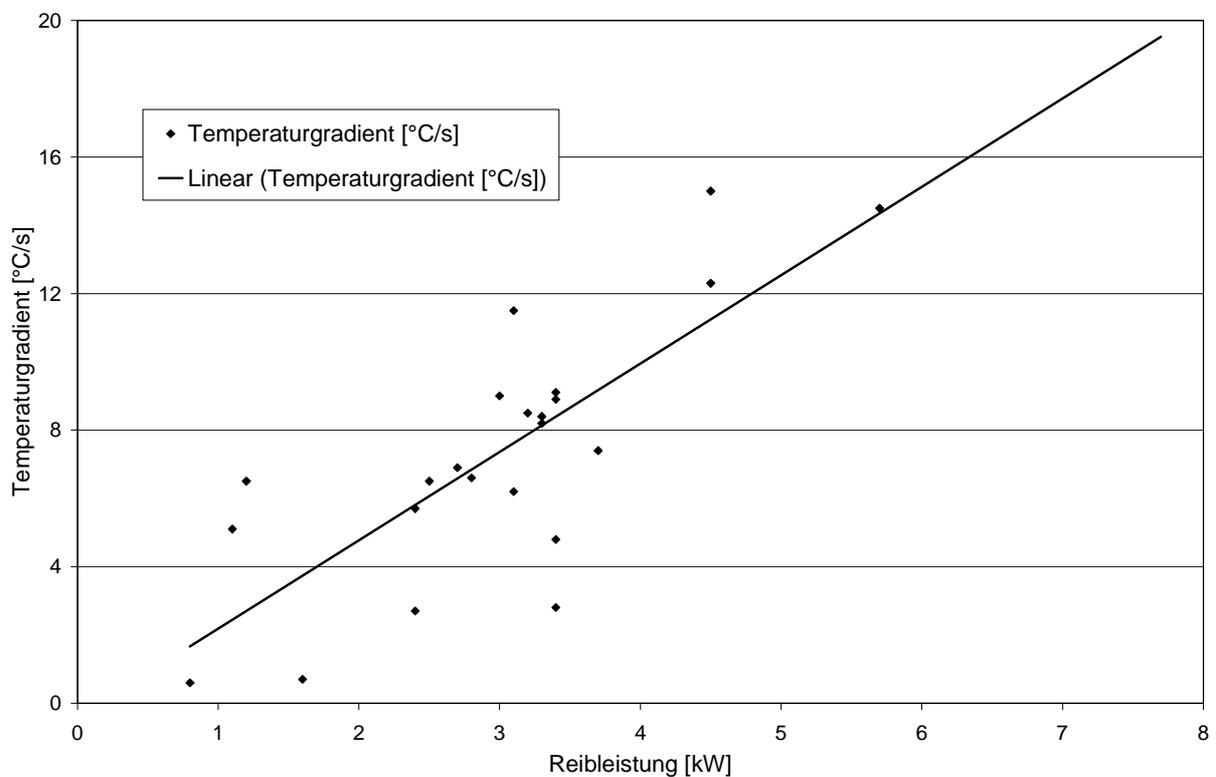
Am kleinen Lagerprüfstand wurde eine große Zahl von Versuchen mit Variation von Lagermaterial, Öltemperatur und Belastung durchgeführt. **Bild 5** zeigt beispielhafte Messergebnisse aus einem Versuch. Die Belastungskraft des Prüflagers betrug hier 3,7 kN, entsprechend einem mittleren Lagerdruck von  $6,3 \text{ Nmm}^{-2}$ . Die Öleinlauftemperatur betrug  $40^\circ\text{C}$ . An dem sprunghaft ansteigenden Drehmoment nach ca. 65 Sekunden kann man deutlich den Beginn des Fressens erkennen. Die Lagerrückentemperatur stieg innerhalb kurzer Zeit von  $63^\circ\text{C}$  auf fast  $300^\circ\text{C}$ .

Ölnebelbildung war ca. 7 Sekunden nach Beginn des Fressens ab einer Lagerrückentemperatur von ca.  $200^\circ\text{C}$  zu beobachten. Die Opazität stieg dabei von ca. 2 % auf 75 % an. Während des anfänglichen steileren Anstiegs lag der Opazitätsgradient bei  $2,3 \text{ %/s}$ . Dies markiert die obere Grenze der gemessenen Opazitätsgradienten mit Bronzelagern. Im weiteren flacheren Verlauf stieg die Opazität mit  $0,6 \text{ %/s}$  an. Bei der anschließenden Begutachtung wies das Lager deutliche Fressspuren auf und war defekt (**Bild 6**). Die Versuchsergebnisse zeigten schnell, dass die Entstehung von Ölnebel durch eine Erhöhung der Öleinlauftemperatur stark begünstigt wird. Dies verdeutlicht bereits, dass das Entstehen von Ölnebel sehr stark von den thermischen Randbedingungen abhängt. Der Mittelwert der Lagerrückentemperatur, ab der Ölnebelbildung zu beobachten war, liegt bei  $172^\circ\text{C}$  mit einer großen Standardabweichung von 40 %. Diese große Streuung macht auch klar, dass aus einer reinen Messung der Lagerrückentemperatur nicht zuverlässig auf den Zustand eines Gleitlagers geschlossen werden kann.

Zu Beginn der Untersuchungen stellte sich die Frage, ob die Ergebnisse überhaupt eine statistische Auswertung zulassen würden, oder ob die Steuerung der Messwerte eine Auswertung unmöglich machen würde, was bei einem so extremen Ereignis wie einem Lagerfresser durchaus denkbar erschien. Eine erste Auswertung bestand darin, die Anstiegsgeschwindigkeit der Lagerrückentemperatur auf die in das Lager eingebrachte Reibleistung zu beziehen. **Bild 7** zeigt die gefundenen Ergebnisse. Auch wenn die Messwerte stark streuen, erkennt man, dass durchaus ein nahezu linearer Zusammenhang besteht. Die vergleichsweise starke Streuung der Messpunkte ist möglicherweise durch bisher nicht ausreichend berücksichtigte Parameter zu erklären.

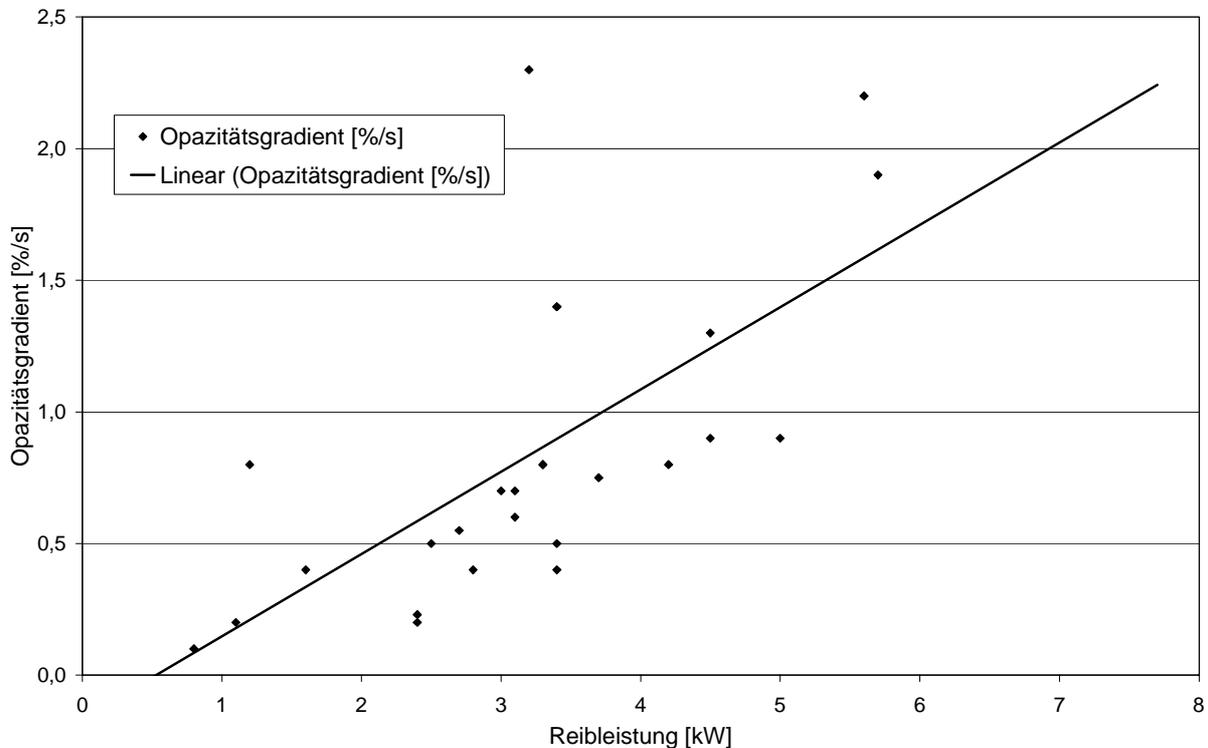


**Bild 6:** Gleitlagerschale nach Fressversuch



**Bild 7:** Gradient der Lagerrückentemperatur über Reibleistung (Halbschale)

Im nächsten Schritt wurde ein gleichartiges Diagramm für die Abhängigkeit zwischen Ölnebelbildung und Reibleistung erstellt. **Bild 8** zeigt die gefundenen Ergebnisse. Für den Quotienten aus Opazitätsgradient und Reibleistung ergibt sich ein Mittelwert für alle betrachteten Messungen von 0,24 %/(kW) mit einer Standardabweichung von 0,08 %/(kW). Es scheint somit möglich zu sein, aus dem Opazitätsgradienten auf die umgesetzte Reibleistung und somit auf das Vorhandensein eines Lagerschadens zu schließen.



**Bild 8:** Opazitätsgradient über Reibleistung für die Messungen am kleinen Prüfstand (Halbschale)

Aus Bild 8 wird weiterhin deutlich, dass zur Ölnebelbildung eine Mindestreibleistung in das System eingebracht werden muss (hier ca. 0,6 kW). Bis zu einem gewissen Maß kann die entstehende Reibungswärme vollständig durch Wärmeleitung in Lager, Gehäuse und Welle, sowie durch Strahlung und durch das Schmieröl abgeführt werden. Erst wenn diese Möglichkeiten zur Wärmeabfuhr nicht mehr ausreichen, erwärmt sich das Öl im Schmierpalt so stark, dass es zur Verdampfung und der anschließenden Ölnebelbildung durch Tröpfchenrekondensation kommt.

Alle bisher beschriebenen Ergebnisse wurden aus Gründen des schnellen Lagerein- und ausbaus ausschließlich mit Halbschalen ermittelt. Bei den anschließenden Versuchen mit Vollschalen lagen die durchschnittlichen Opazitätsgradienten deutlich niedriger, d.h. die Ölnebelbildung erforderte wesentlich mehr Energie. Betrug der durchschnittliche Opazitätsgradient bei Halbschalen 0,8 %/s, so wurden bei Vollschalen Gradienten von 0,01 bis 0,25 %/s gemessen. Der Mittelwert über alle Messungen lag bei 0,1 %/s. Die Ölnebelbildung erfolgte bei einer Vollschale also ungefähr um eine Größenordnung langsamer als bei den Versuchen mit Halbschalen.

Erklärbar ist dieser Unterschied durch die bessere Kühlung der Welle bei Verwendung einer Vollschale. Da das Schmieröl hier auf der Lagerunterseite zugeführt wird und nach dem Durchlauf durch den engsten Spalt nicht wie bei der Halbschale aus dem Lager herausgeschleudert wird, sondern zumindest ein Anteil im Schmierpalt verbleibt, kann mehr Wärmeenergie aus dem Lager und der Welle abgeführt werden. Außerdem verfügt der Lagerträger über eine größere thermische Masse und kann so mehr Wärme aufnehmen. In diesem Zusammenhang muss die Bedeutung der Energiebilanz im Gleitlager für das

Entstehen von Ölnebel sowie für den zeitlichen Verlauf im Falle der Ölnebelbildung herausgestellt werden. Wie sich zeigte, haben Änderungen der thermischen Randbedingungen, hier der Wärmeabfuhr, entscheidenden Einfluss auf die Ölnebelentstehung.

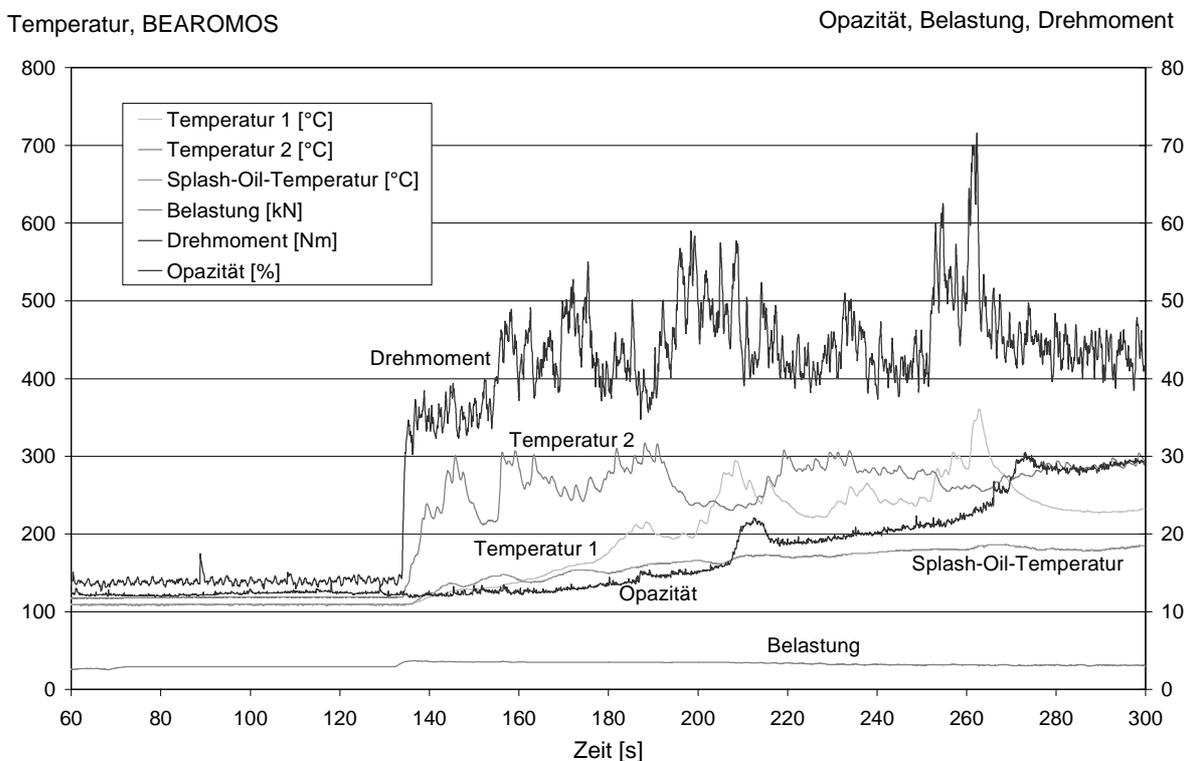
#### 4 Versuche am großen Lagerprüfstand

Zur Zeit werden am großen Lagerprüfstand Untersuchungen durchgeführt mit dem Ziel, die zuvor am kleinen Prüfstand ermittelten Ergebnisse für größere Wellendurchmesser abzusichern. Im Folgenden werden die bisher erzielten Ergebnisse dargestellt.

Neben den bereits beschriebenen Größen Belastung, Drehmoment, Lagerrückentemperatur und Opazität wurde bei diesen Versuchen zusätzlich die hier als Splash-Oil-Temperatur bezeichnete Temperatur des aus dem Prüflager herauspritzenden Schmieröls gemessen.

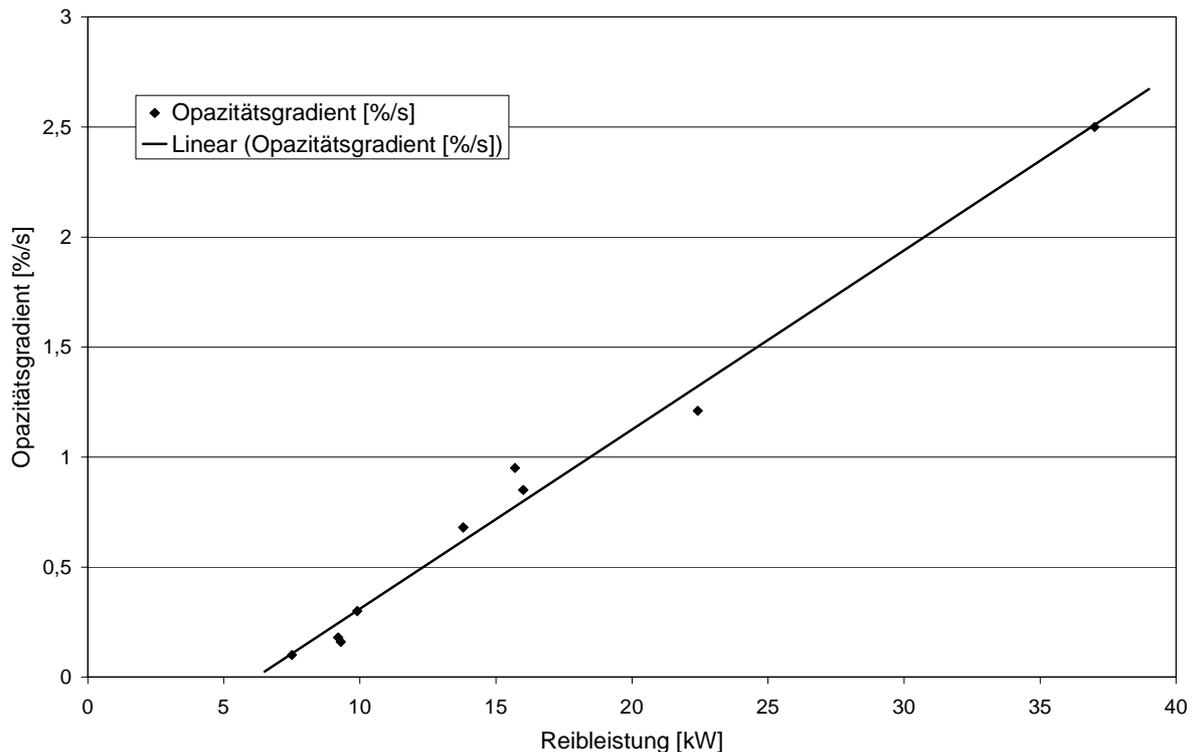
Eine beispielhafte Messung ist in **Bild 9** dargestellt. Als Prüflager kam hier eine Bronze-Gleitlagervollschale zum Einsatz, die mit 3 kN belastet wurde. Der Lagerfresser ist wieder deutlich am Drehmomentsprung zu erkennen. Die Lagerrückentemperatur im hochbelasteten Bereich (T2) stieg mit geringer Verzögerung schnell bis auf etwa 300°C an. Eine Erhöhung der Splash-Oil-Temperatur konnte ca. 2,5 s nach Beginn des Fressers beobachtet werden. Der Wert stieg dann relativ langsam bis zum Ende der Messzeit von 110°C auf 190°C an.

Die Ölnebelbildung setzte hier ca. 15 s nach dem Beginn des Fressens ein. Der mittlere Opazitätsgradient lag bei 0,15 %/s. Die Opazität stieg während dieser Messung von 11% auf maximal 30% an. Im weiteren Verlauf des Lagerfressers konnte beobachtet werden, dass die Lagerrückentemperatur T1, die zunächst unter T2 lag, kurzzeitig über die Temperatur T2 stieg, während T2 gleichzeitig abfiel. Wenige Sekunden später fiel T1 wieder ab, während T2 wieder anstieg. Dies kann mit einem Wandern der Kontaktfläche zwischen Welle und Lager erklärt werden, wie es bei Trockenreibungssystemen häufig beobachtet werden kann.



**Bild 9:** Beispiel einer Messung am großen Lagerprüfstand (Vollschale)

In **Bild 10** ist wie in Bild 6 der Opazitätsgradient über der Reibleistung aufgetragen. Mit den bisher verfügbaren Messungen ergibt sich auch hier ein deutlicher linearer Zusammenhang zwischen den beiden Größen mit geringer Streuung. Möglicherweise ist die Streuung der Messpunkte hier geringer als beim kleinen Prüfstand, da die Randbedingungen besser kontrolliert werden konnten und somit in einem engeren Toleranzbereich lagen. Auch hier bestätigt sich wieder, dass es erst ab einem minimalen Reibleistungseintrag zur Ölnebelbildung kommt. Der Wert von ca. 6 kW liegt um ungefähr eine Größenordnung über dem entsprechenden Wert für den kleinen Prüfstand. Man darf vermuten, dass dies an den wesentlich größeren thermischen Massen von Welle und Prüflagerträger liegt. Nähere Untersuchungen stehen noch aus.



**Bild 10:** Opazitätsgradient über Reibleistung für die Messungen am großen Prüfstand (Vollschale)

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Ölnebelentstehung aus dem Spalt eines Gleitlagers konnte an zwei Prüfständen mit unterschiedlichen Wellendurchmessern nachgewiesen werden. Zwischen der eingebrachten Reibleistung und dem Opazitätsgradienten wurde ein näherungsweise linearer Zusammenhang festgestellt.

Erwartungsgemäß zeigte sich, dass für die Entstehung von Ölnebel im Gleitlager die Energiebilanz von besonderer Bedeutung ist. Die Temperatur des zugeführten Schmieröls und andere thermische Randbedingungen haben hierauf entscheidenden Einfluss. Die durch einen Fresser in das System eingebrachte Wärmeenergie wird zunächst von Lagerträger, Welle und Öl vollständig abtransportiert. Erst wenn diese Möglichkeiten der Wärmeabfuhr nicht mehr ausreichen, erwärmt sich das Öl im Spalt so weit, dass die Verdampfung einsetzt. Durch die anschließende Rekondensation außerhalb des Lagers bildet sich schließlich Ölnebel.

Bei allen Versuchen, bei denen Ölnebel entstand, kam es zur Schädigung des Gleitlagers. Allerdings konnten auch Gleitlagerschäden beobachtet werden, bei denen es nicht zur Ölnebelbildung kam. Bei diesen Versuchen reichten demnach die entstehenden Energiemengen nicht aus, die Spalttemperatur so weit nach oben zu treiben, dass die Verdampfungstemperatur des Öls erreicht wurde.

In der nächsten Zeit sollen die Versuche am großen Prüfstand zum Abschluss gebracht werden. Es ist geplant, noch Versuche mit deutlich größerem Lagerspiel zu fahren, da die Vermutung besteht, dass auch dieses einen entscheidenden Einfluss auf die Ölnebelbildung hat. Außerdem ist vorgesehen, Versuche mit anderen Umfangsgeschwindigkeiten zu fahren. Von großem Interesse wird dabei die Frage sein, ob sich für die Auswertung nach Bild 10 signifikant andere Werte ergeben werden oder nicht. Parallel dazu sind Simulationsrechnungen geplant, um das Verständnis für die Physik des Gleitlagers weit jenseits des Mischreibungsbereichs zu vertiefen.

#### **Literatur:**

- [1] Burgoyne, J.H.; Newitt, D.M.: Crankcase Explosions in Marine Engines. Transaction Institution of Marine Engineers (1955), Nr. 8, S. 265-270
- [2] Freeton, H.G; Roberts, J.D; Thomas, A.: Crankcase Explosions: An Investigation into some Factors governing the selection of protective. I.S.P. (1957), Nr. 29, S.24-39
- [3] Mansfield, W.P.: Crankcase Explosions: Development of new protective Devices. I.S.P. (1957), Nr. 30, S. 82-106
- [4] SAB-Ölnebel-Vademekum, Schaller Automation, Blieskastel, 1996
- [5] Davies, D.H.J.: Crankcase protection an oil mist phenomena. The Motor Ship (1978), S. 69-74