

# Maßnahmen zur Begrenzung der latenten Betriebsgefahr von großen Dieselmotoren (über 2,25 MW) auf Schiffen Teil 2

In Teil 1 [7] der Abhandlung der Schaller Automation wurde herausgestellt, dass es zu diesem Thema international geregelte Sicherheitsvorschriften gibt, die aber nicht eindeutig sind und deren Durchsetzung problematisch ist, weil genaue technische, verifizierbare Vorschriften nicht verfügbar sind. Teil II erläutert das Bestreben der Schaller Automation, einen Beitrag dahingehend zu leisten, die zur Sicherheit getroffenen, grundsätzlichen Maßnahmen praktisch realisierbar und auf ihre Effizienz hin überprüfbar zu machen, ohne dass sicherheitsmindernde Zugeständnisse wie: „... where practicable ...“ [8] erforderlich werden. Um eine Grundlage für dieses Bestreben zu schaffen, wurden Versuche und umfangreiche Messungen insbesondere am Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau der Universität Karlsruhe (TH) unter Leitung von Prof. Dr. A. Albers durchgeführt. Ein Resümee daraus zeigt, dass eine Verbesserung der Motorschutzmaßnahmen durchaus möglich ist, so dass auch im Hinblick auf deren kontrollierte Anwendung Fortschritte erzielbar sind.

## 9 Einleitung

In Teil 1 wird auf Bemühungen der Schaller Automation hingewiesen, mehr konkrete, weltweit ausgedehnte Informationen über den Umfang der eingetretenen Schäden an großen Dieselmotoren zu erhalten.

Leider sind die diesbezüglichen Bemühungen noch nicht – auch bei Unterstützung durch die Klassifikationsgesellschaften – sehr erfolgreich, so dass man bei der Betrachtung dieses Themas mehr oder weniger auf Abschätzungen, die sich auf persönliche Erfahrungen von Praktikern und empirische Auswertungen abstützt, angewiesen ist.

Aus den zur Zeit vorliegenden Informationen und auch einigen gesicherten Daten kann man aber ableiten, dass das Auftreten von Triebraumexplosionen, bezogen auf die Lebensdauer aller Motoren, im unteren, einstelligen Prozentbereich liegt.

Ohne die grundsätzliche Überwachungsvorschrift für große Dieselmotoren auf Schiffen müsste der Prozentsatz für Triebraumexplosionen sicher höher angesetzt werden, wenn auch deren sicherheitssteigernde Effizienz bei einem beachtlichen Anteil solcher Installationen angezweifelt werden muss, **Bild 7** [9].

Diese beispielhaft dargestellte Installation, für die der Kunde die dringend angebotene Design-Unterstützung nicht in Anspruch genommen hat, zeigt Mängel auf, die die korrekte Funktion des OMD (Oil Mist Detection)-Systems unmöglich macht. Die Sampling-Leitungen sind parallel horizontal am Motor verlegt und werden sich mit aus dem Ölnebel ausgefallenem Öl füllen. Noch störender wirkt sich die U-Bildung, Bild 7, durch die Schlauchverbindung aus, die sich mit Sicherheit mit Öl füllen wird und ein Absaugen an dieser Stelle unmöglich macht. Es besteht die Gefahr des Ausfalls von Kondenswasser, das dann die sicherheitsrelevante Funktion des Systems unmöglich macht und längerfristig das System schädigen wird (Rostansatz).

Das Beispiel zeigt, dass OMDs nur als komplette Systeme, auf die jeweilige Motortype angepasst, aus einer Hand vom Hersteller konstruiert, geliefert und geprüft in Betrieb gesetzt werden sollten.

Zur Verbesserung der OMD-Schutzmaßnahmen für große Dieselmotoren hat Schaller Automation das OMDEA (Oil Mist Detection Efficiency Approval)-Projekt gestartet. In Teil 1, Kapitel 6 wird herausgestellt, dass zur Zeit Grundlagen erarbeitet werden, um entsprechende Zertifizierungsanträge bei den Klassifikationsgesellschaften stellen zu können.

## 10 Strukturierungsvorschlag für die OMDEA-Zertifizierung und die sich daraus ergebenden Anforderungen an die durchzuführenden Versuche

### 10.1 Effizienz eines OMD-Systems

Um den praktischen Anforderungen Rechnung zu tragen, werden drei Effizienzkategorien vorgeschlagen:

#### ■ Schutzkategorie 1 (10.1.1)

Die mindesterforderliche Effizienz der Schutzeinrichtung dient nur zur Verhinderung von Explosionen. Dies erfüllt die Forderungen der SOLAS Regulations für „fire precaution“ [7]

#### ■ Schutzkategorie 2 (10.1.2)

Auswertung der Ölnebelentwicklung im Triebraum durch das OMD-System zur Verhinderung von schweren Reibschäden mit differenzierter automatischer Einwirkung auf den Motorbetrieb und damit über die SOLAS(Mindest-)Forderung weit hinausgehend

#### ■ Schutzkategorie 3 (10.1.3)

Schadortlokalisierung auf der Basis der Schutzkategorie 2. Diese ermöglicht das schnelle Auffinden des betroffenen Compartments und das Erkennen der Schadstelle. Eine nicht erfolgreiche Schadortlokalisierung führt zum Wiederstart des vorgeschädigten Motors mit dann beschleunigter Schadensentwicklung.

### 10.2 Beurteilungskriterien für die Wirksamkeit eines jeden OMD-Systems

Es werden drei Kriterien für die Beurteilung der Wirksamkeit eines OMD-Systems als unbedingt erforderlich angesehen:

#### ■ Kriterium 1: Sensorik und Auswertung (10.2.1)

Ausreichende, sensorische Empfindlichkeit auf die jeweilige, durch den Schadensverlauf erzeugte Ölnebelkonzentration (Opazität, % OP) muss vorhanden sein und eine sichere Software-Auswertung der Indikator-Funktion des Ölnebels im Schadensfall muss gewährleistet werden

#### ■ Kriterium 2: Fehlalarm-Immunität (10.2.2)

Es darf mit Sicherheit kein Ölnebel-Warnsignal erzeugt werden, wenn kein Reibschaden erkennbar ist; dieses Kriterium ist für die Akzeptanz eines OMD-Systems fast noch wichtiger als Kriterium 1

#### ■ Kriterium 3: Verfügbarkeit des Schutzsystems (10.2.3)

Die Zuverlässigkeit des OMD-Systems unter schiffsbetrieb-adäquaten Bedingungen und bei Montage direkt auf dem Motor muss durch die üblichen Prüfungen (Vibration, Temperatur- und Feuchteresistenz, hohe EMV) nachgewiesen werden.

## Die Autoren



Dipl.-Ing. Werner Schaller ist Seniorchef, Geschäftsführer und voll haftender Gesellschafter der SCHALLER AUTOMATION Industrielle Automationstechnik KG, Blieskastel/Saar.



Dipl.-Ing. Manfred Dürr ist Hauptverantwortlicher für das OMDEA-Projekt bei SCHALLER AUTOMATION.



Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers ist Ordinarius des Instituts für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau der Universität Karlsruhe (TH).



Dr.-Ing. Wolfgang Burger ist Leiter der Gruppe Mechatronik und Messtechnik des Instituts für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau der Universität Karlsruhe (TH).



Dipl.-Ing. Martin Fritz ist Mitarbeiter der Gruppe Mechatronik und Messtechnik des Instituts für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau der Universität Karlsruhe (TH).



Wertvolle Hinweise wurden gegeben von Univ.-Prof. em. Prof. h.c.mult. Dr.-Ing. habil. Klaus Groth, dem ehemaligen Leiter des Instituts für Kolbenmaschinen an der Technischen Universität Hannover.

9 Einleitung



**Bild 7:** Fehlerhafte Montage eines Ölnebeldetektors VISATRON® VN215 mit Einzelrohrabsaugung zu jedem Compartment zur Selektion des Schadortes

1. VISATRON VN 215
2. Zungenventilbox zur Ansteuerung der Absaugrohre nach einem bestimmten Suchalgorithmus mit Anzeige der Schadstelle (rote Punkte im Anzeigefenster)
3. Einzelabsaugrohre
4. Schlauchverbindungen zwischen den Absaugrohren und den Rohren zur Einführung in die Ventilbox 2
5. U-Bogen im Sampling-System
6. Einführung in das entsprechende Compartment

**Figure 7:** Incorrect installation of an oil mist detector VISATRON® VN215 with individual suction pipe connected to each compartment for localization of damage

1. VISATRON VN 215
2. Valve box with reed valves for selection of suction pipes according to a search-run algorithm. Indication of damage compartment (red dots in display window)
3. Individual suction pipes
4. Hose connection between the suction pipes and pipe elbows inserted in valve box 2
5. Sagging hose in the sampling system
6. Connection to the matching compartment

- **Betriebssicherheitsstufen (10.2.4)**
  - System-Sicherheitsstufe 1: Das System kontrolliert sich selbst, und ein besonderes Alarmsignal meldet, wenn seine Schutzfunktion bezüglich der Feststellung von Ölnebel im Schadensfall gestört ist (low cost version) oder
  - System-Sicherheitsstufe 2: zusätzlich zur Sicherheitsstufe 2 sorgt ein zweites System für Redundanz.
- Für beide System-Sicherheitsstufen muss ein weltweiter Wartungsservice die Verfügbarkeit dediziert garantieren.

- **Einwirkung eines OMD-Systems auf den Motorbetrieb (10.2.5)**

Nicht abschließend geklärt ist die Maßnahme, welche bei Schmiermangel durch das OMD auf den Motor wirken soll, Stop oder Slow-down.

Hier muss ein Weg gefunden werden, der auch bei nautischen Ausnahmesituationen der Schiffsführung, zum Beispiel durch Software erzeugte Entscheidungshilfen, eine vernünftige Entscheidung ermöglicht.

11 Experimentelle Untersuchungen

11.1 Tribologische Versuche an geschmierten Gleitflächen und Ölnebel-Simulationsversuche an großen Motoren

Umfangreiche Versuche wurden durchgeführt, um mehr über die Entstehung von Ölnebel im Reibschadenfall durch Schmiermangel zu erfahren.

Ziel ist, für das Projekt OMDEA abschätzen zu können, welche Maßnahmen bezüglich der Ölnebelgeneration zur Simulation der Ölnebelausbreitung und des Ölnebelverhaltens im Triebräum erforderlich sind. Zur Erlangung von fundierten Erkenntnissen über die Ölnebelentstehung wurden zwei unterschiedliche Versuchsarrangements für Gleitlager benutzt:

- Radialgleitlager unter Benutzung speziell hierfür konzipierter „Lagerprüfstände“ und
- Lineargleitführung zur Simulation der Kolben-Zylinder-Funktion, dargestellt durch eine Drehscheibe mit geschmiertem Gleitschuh.

11.2 Untersuchungen an Radiallagern

11.2.1 Prüfstand und Messtechnik

Die Versuche wurden am kleinen, **Bild 8**, und großen, **Bild 9**, Gleitlagerprüfstand des Instituts für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau der Universität Karlsruhe (TH) unter Leitung von Prof. Dr. A. Albers durchgeführt.

Der Aufbau des kleinen Lagerprüfstands ist in **Bild 10** dargestellt. Zwischen den beiden Stützlager, die die Welle radial führen, befindet sich das Prüflager, das mittels eines Hydraulikzylinders mit der Belastungskraft beaufschlagt wird. Der kleine Lagerprüfstand ermöglicht sowohl Untersuchungen mit 180°-Gleitlagerhalbschalen als auch mit Gleitlagervollschalen. Es wurden Blei-Kupfer-Zinn-Dreischichtgleitlager (Glyco 40) und Bronze-Gleitlager mit einem Durchmesser von 61,5 mm und einer Breite von 9,5 mm eingesetzt.

Am großen Lagerprüfstand, prinzipiell mit gleichem Aufbau, kamen ausschließlich Gleitlagervollschalen aus Bronze mit einem Durchmesser von 118 mm und einer Breite von 18 mm zum Einsatz.

Neben den zur Charakterisierung des Betriebszustands erforderlichen Messgrößen Drehzahl, Antriebsmoment, Belastungskraft, Lagerrückentemperaturen und Öleinlauftemperatur wurde die Opazität (Trübung) als Maß für den entstandenen Ölnebel erfasst.

Die Opazität gemessen in % OP [10], lässt unter Berücksichtigung des den Ölnebel aufnehmenden Prüfstandsvolumens eine Rückrechnung auf die verdampfte Ölmenge zu.

Darüber hinaus wurde am Prüfstand das BEAROMOS-Signal gemessen. BEAROMOS ist ein von Schaller Automation entwickeltes Überwachungssystem [7] für Gleitlager und Gleitflächen, das auf dem Thermoelement-Effekt beruht. Welle und Lager werden hierbei als Thermoelementpaarung genutzt. Kommt es in einem Lager zu Festkörperreibung, treibt die entstehende Thermospannung einen Signalstrom über den mittels Kollektor geschlossenen Stromkreis [11].

Die Position der Temperatursensoren auf dem Lagerrücken kann Bild 10 entnommen werden.

Während der Versuche wurden Thermographieaufnahmen, **Aufmacher**, und Videoaufzeichnungen zur Dokumentation der Ölnebelentstehung angefertigt. Die Infrarotaufnahme auf die Stirnseite des Zapfens in dem Versuchsgleitlager (Bild 9 und 10) zeigt in der Thermographieaufnahme die Temperaturverteilung bei

einem sich anbahnenden Schaden. Deutlich ist der Schmierspalt mit dem austretenden heißen Öl (gelb) zu erkennen. Auch die Abkühlung der herunterfallenden Öltröpfen zeigt die Infrarotaufnahme.

### 11.2.2 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 mit einer Drehzahl von 3000/min betrieben. Dann liegen die Gleitgeschwindigkeiten in der gleichen Größenordnung wie bei realen Großmotoren. Das Diagramm in **Bild 11** zeigt die Messergebnisse eines Versuchs mit einer Bronze-Halbschale unter statischer Belastung. An dem sprunghaft ansteigenden Drehmoment bei 65 s Versuchszeit kann man deutlich den Beginn des Fressens erkennen. Die Lagerrückentemperatur stieg innerhalb kurzer Zeit von 63 °C auf fast 300 °C. Ölnebelbildung war ab einer Lagerrückentemperatur von zirka 200 °C zu beobachten. Die Opazität stieg



dabei von zirka 2 % auf 75 % an. Die Ölnebelbildung setzte knapp 7 s nach Beginn des Lagerfressers ein. Das BEAROMOS dagegen zeigte bereits vor dem Drehmomentanstieg einen Signalanstieg, der auf den entstehenden Lagerschaden schließen ließ. Mit dem Einsetzen des Fressers stieg das BEAROMOS-Signal dann nochmals signifikant an. Bei der Begutachtung nach dem Versuch zeigte das Lager deutliche Fressspuren und konnte als defekt betrachtet werden.

Insgesamt wurden am kleinen Lagerprüfstand über 60 Fressversuche gefahren. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass die Entstehung von Ölnebel durch eine Erhöhung der Öleinlaufemperatur stark begünstigt wird. Dies verdeutlicht bereits,

VOSS

### Maßgeschneiderte Systemlösungen



Leitungssatz mit Stecksystem für Leak-off Rail

### Leitungs- und Verbindungstechnik für Kraftstoffsysteme

VOSS bietet Komponenten für alle Anschlussstellen und gängigen Kraftstoffarten. Heute und morgen als Zulieferer erster Wahl.

Ein Programm mit vielen Vorzügen:

- Fahrzeugspezifische Entwicklung/Konstruktion
- Rapid Prototyping
- Sequentielle Anlieferung
- Tankentlüftungs-/ Kraftstoffleitungen
- Steckverbindungen
- Ventile
- Verteiler
- Emissionsreduzierte Komponenten

Erfahrung plus Ideen

VOSS Automotive GmbH · Postfach 15 40 · D-51679 Wipperfurth · Tel.: ++49 22 67 63 0 · Fax: ++49 22 67 63-54 89 · E-mail: automotive@voss.de · Web: www.voss.de

11.2.1 Prüfstand und Messtechnik



Bild 8: Kleiner Lagerprüfstand  
 1: Elektromotor; 2: Prüfstandsgehäuse; 3: Hydraulikzylinder; 4: Endoskopkamera  
 Figure 8: Small bearing test bench  
 1: Motor; 2: Test bench housing; 3: Hydraulic cylinder; 4: Endoscope-camera



Bild 9: Großer Lagerprüfstand  
 1: Elektromotor; 2: Drehmomentmeßwelle; 3: Prüfstandsgehäuse; 4: Stützlager;  
 5: Fenster zur Opazitätsbeobachtung  
 Figure 9: Large bearing test bench  
 1: Motor; 2: torque measuring shaft; 3: Test bench housing; 4: Support bearing;  
 5: Window for opacity observation

dass das Entstehen von Ölnebel sehr stark von den thermischen Randbedingungen abhängt. Der Mittelwert der Lagerrückentemperatur, ab der Ölnebelbildung zu beobachten war, liegt bei 170 °C mit einer großen Standardabweichung von 40 %.

Bezieht man die Werte für den ermittelten Opazitätsgradienten auf die im Prüflager umgesetzte Reibleistung, ergibt sich das in **Bild 12** dargestellte Diagramm. Deutlich ist der näherungsweise lineare Zusammenhang zwischen den beiden

Größen, der durch die Interpolationsgerade angedeutet ist, zu erkennen. Dies bedeutet, dass bei einem höheren Reibleistungseintrag in das Gleitlager auch eine stärkere Ölnebelentwicklung zu erwarten ist.

Bildet man den Quotienten aus Opazitätsgradient und Reibleistung, der ein Maß für die Steigung der Geraden in Bild 12 ist, so 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 Lager Schadens zu schließen.

Aus Bild 12 wird weiterhin deutlich, dass zur Ölnebelbildung eine Mindestreibleistung in das System eingebracht werden muss. 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 so stark, dass es zur Verdampfung und der anschließenden Ölnebelbildung durch Tröpfchenrekondensation kommt.

Ein analoger Zusammenhang ergibt sich übrigens zwischen eingebrachter Reibleistung und Temperaturgradient. Dies ist verständlich, da bei höherer Reibleistung auch mehr Wärmeenergie pro Zeit in das System eingebracht wird (Wärmestrom) und somit auch der Temperaturanstieg größer ist.

Bei den Versuchen mit Gleitlagervollschalen lagen die durchschnittlichen Opazitätsgradienten deutlich niedriger. 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 eine Größenordnung langsamer als bei den Versuchen mit Halbschalen.

Erklärbar ist dieses abweichende Verhalten durch die bessere Kühlung der Welle bei Verwendung einer Vollschale. Da das Schmieröl bei der Vollschale 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.

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 zeigt, haben Änderungen der thermischen Randbedingungen, hier der Wärmeabfuhr, entscheidenden Einfluss auf die Versuchsergebnisse.

### 11.2.3 Versuche am großen Lagerprüfstand

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

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

Eine beispielhafte Messung ist in **Bild 13** dargestellt. Als Prüflager kam eine Bronze-Gleitlagervollschale zum Einsatz, die mit 3,8 kN belastet wurde. Der Lagerfresser ist wieder deutlich am Drehmomententsprung sowie am kurz zuvor einsetzenden Sprung des BEAROMOS-Signals zu erkennen. Die Lagerrückentemperatur im hochbelasteten Bereich (T2) steigt mit geringer Verzögerung schnell bis weit über 400 °C an. Eine Erhöhung der Splash-Oil-Temperatur konnte zirka 6 s nach Beginn des Fressers beobachtet werden. Der Wert stieg langsam bis zum Ende der Messzeit von 115 °C auf zirka 215 °C an.

Ölnebelbildung setzte ungefähr 26 s nach dem Eintreten des Fressers ein. Der mittlere Opazitätsgradient lag anfangs bei 0,25 %/s, nach dem zweiten Drehmomententsprung dann bei 1,6 %/s. Die Opazität stieg während der Messung von 7 % auf maxi-

mal 45 % an. Dies entspricht einer umgerechneten verdampften Ölmenge von zirka 1 g.

In **Bild 14** ist der bereits aus Bild 12 für den kleinen Prüfstand bekannte Zusammenhang zwischen Reibleistung und Opazitätsgradient dargestellt. Mit den bisher verfügbaren Messungen ergibt sich auch hier ein deutlicher linearer Zusammen-

hang zwischen den beiden Größen. Es wird auch bestätigt, dass es erst ab einem minimalen Reibleistungseintrag zur Bildung von Ölnebel kommt. Der Wert von zirka 6 kW, ab dem Ölnebelbildung einsetzt, liegt um ungefähr eine Größenordnung über dem entsprechenden Wert für den kleinen Prüfstand. Man darf vermuten, dass dies an den unterschiedlichen

## 11.2.1 Prüfstand und Messtechnik

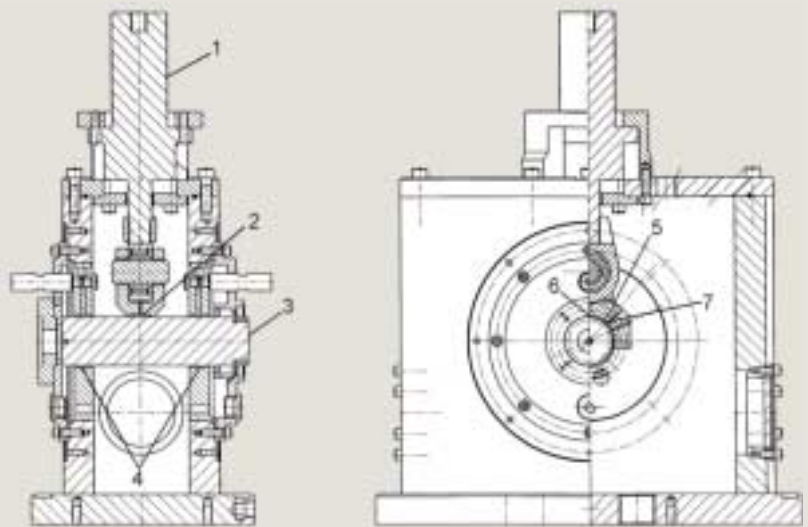


Bild 10: Schnittzeichnungen des kleinen Lagerprüfstands

- 1: Hydraulikzylinder;
- 2: Prüflager; 3: Welle;
- 4: Stützlager; 5: Prüflagerträger;
- 6: Temperaturmeßstelle T1 auf dem Lagerrücken in Kraftwirkrichtung;
- 7: Temperaturmeßstelle T2 im hoch belasteten Bereich

Figure 10: Section drawing of the small bearing test bench

- 1: Hydraulic cylinder; 2: Test bearing;
- 3: Shaft; 4: Support bearing;
- 5: Test bearing carrier;
- 6: Temperature test point T1 on the bearing rear in direction of force application;
- 7: Temperature test point T2 in highly loaded area

**Das gesamte Spektrum  
der Motoren- und  
Fahrzeugtechnik**

M P S

**Motorprüfstandsteuerung mit PC**

gmf  
Münchener Straße 12  
D-85123 Karlskron/Ingolstadt  
Telefon (08450) 91161  
Telefax (08450) 91279

- Meßdatenerfassung und Prozeßvisualisierung
- programmierbarer Prüfablauf
- automatische Prüfstandüberwachung
- integrierte Drehzahl- u. Drehmomentregelung
- umfangreiche Dokumentationsfunktionen

11.2.2 Versuche am kleinen Lagerprüfstand

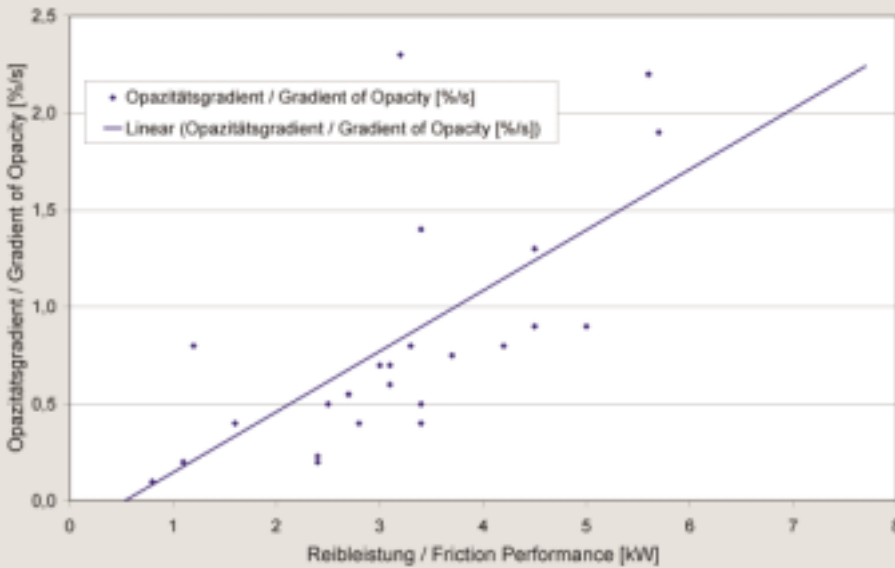


Bild 12: Opazitätsgradient über Reibleistung für die Messungen am kleinen Prüfstand  
 Figure 12: Gradient of opacity vs. friction performance for measurements on the small test bench

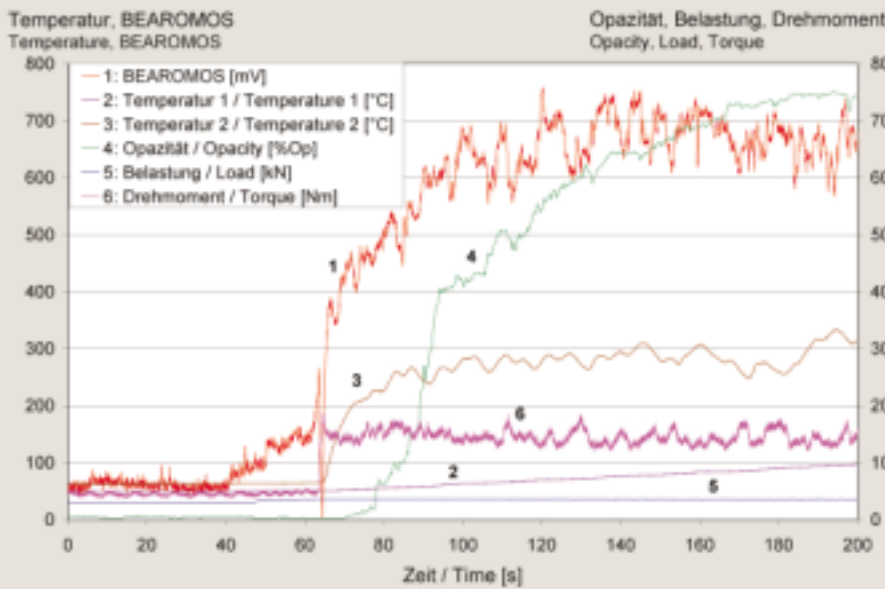


Bild 11: Messung am kleinen Prüfstand bei statischer Belastung mit einer Bronze-Lagerhalbschale, Belastungskraft 3,7 kN, mittlerer Lagerdruck 6,3 N/mm<sup>2</sup>, Öleintrittstemperatur 40 °C  
 Figure 11: Measurement on the small test bench under static loading with a bronze-half plain bearing shell Loading force 3,7 kN, average bearing pressure 6,3 N/mm<sup>2</sup>, Oil inlet temperature 40 °C

thermischen Randbedingungen liegt. Der Prüflagerträger des großen Prüfstands weist eine deutlich größere thermische Masse als der Prüflagerträger des kleinen Prüfstands auf.

11.2.4 Schlussfolgerungen zu Radiallager-Versuchen

Ölnebelentstehung bei Gleitlagern konnte an zwei Prüfständen mit unterschiedlichen Wellendurchmessern nachgewiesen werden.

Zwischen der eingebrachten Reibleistung und dem Opazitätsgradienten

wurde ein näherungsweise linearer Zusammenhang festgestellt. Es 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 der Verdampfungstemperaturbereich des Öls erreicht wurde.

Von den installierten Messeinrichtungen zur Gleitlagerüberwachung reagierte das BEAROMOS-Signal stets vor der Lagerrücktemperatur oder einem Opazitätsanstieg. Der Anstieg der Splash-Oil-Temperatur folgte der Lagerrücktemperatur mit geringer Verzögerung bei allerdings deutlich geringerer Anstiegs-geschwindigkeit.

Im Rahmen dieses Beitrages konnte nur ein Auszug aus den Versuchsergebnissen im Hinblick auf das OMDEA-Projekt dargestellt werden. Weitere Ergebnisse finden sich in [12].

### 11.3 Gleitschuhversuche

Ergänzend zu den Untersuchungen an Radialgleitlagern wurden bei Fiedler Motoren Consulting (FMC) Gleitschuhversuche durchgeführt. Hierbei wurde die Gleitgeschwindigkeit zwischen Schuh und Scheibe variiert und so den mittleren Kolbengeschwindigkeiten der für die OMD-Überwachung in Frage kommenden Motortypen und Leistungen angepasst.

#### 11.3.1 Prüfstand und Messtechnik für Gleitschuhversuche

Die eingesetzte Sensorik war prinzipiell identisch mit der aus den Radialgleitlager-Versuchen (11.2). Die im abgeschlossenen Messkammervolumen entstehende Ölnebelopazität kann auch hier auf verdampfte Ölmenge umgerechnet werden.

#### 11.3.2 Schlussfolgerungen aus den Gleitschuhversuchen

Die Diagramme für den Verlauf der Meßwerte, Temperaturen, Opazität und BEAROMOS-Signal sind vergleichbar mit denen für die Radialgleitlager-Versuche. Auf eine detaillierte Beschreibung kann deshalb verzichtet werden. Bemerkenswert ist, dass die Paarung Stahlscheibe/Gußgleitschuh unter gleichen Versuchsbedingungen erheblich schneller zu Ölnebelbildung führt als Paarungen mit Buntmetall-Gleitschuhen.

### 11.4 Ölnebelausbreitung und Ölnebelverhalten in Triebräumen großer Motoren

Hierzu wurden Versuche von Schaller Automation schon vor mehr als 35 Jahren durchgeführt [13]. Für die im Rahmen von OMDEA durchzuführenden Versuche wird im Gegensatz zu den früheren Untersuchungen ein Ölnebelgenerator benötigt, der erlaubt, die im Schadensfall verdampfende und zu Ölnebel rekondensierende Ölmenge (11.2.3) für Simulationsversuche an den mittels OMD zu überwachenden Motortypen adäquat zu ihrem für die Realität angenommenen Entstehungsverlauf

zu erzeugen. Ziel weiterer Untersuchungen ist es, die aus den tribologischen Versuchen (11.2 und 11.3) hervorgegangenen Erkenntnisse für OMDEA auf die Dimensionen der zu überwachenden Motortypen zu transformieren, um einen „Standardschaden“ in Bezug auf die Öldampferzeugung zu definieren.

Hierfür können die von Prof. Groth benutzten Similarity Betrachtungen [14] hilfreich herangezogen werden, wobei die

in den Bildern 12 und 14 dargestellten Relationen zugrunde gelegt werden.

#### 11.4.1 Der Ölnebelgenerator

Zur Erzeugung von schadens-adäquatem Öldampf, der je nach Triebraumgröße, Ausbreitungsverhalten und Auswaschefeckt durch Schmierölspray eine bestimmte Opazität ergibt, wird ein gesteuerter Ölnebelgenerator benötigt. Hierfür wird ein physikalischer Effekt benutzt, wobei

## 11.2.3 Versuche am großen Lagerprüfstand

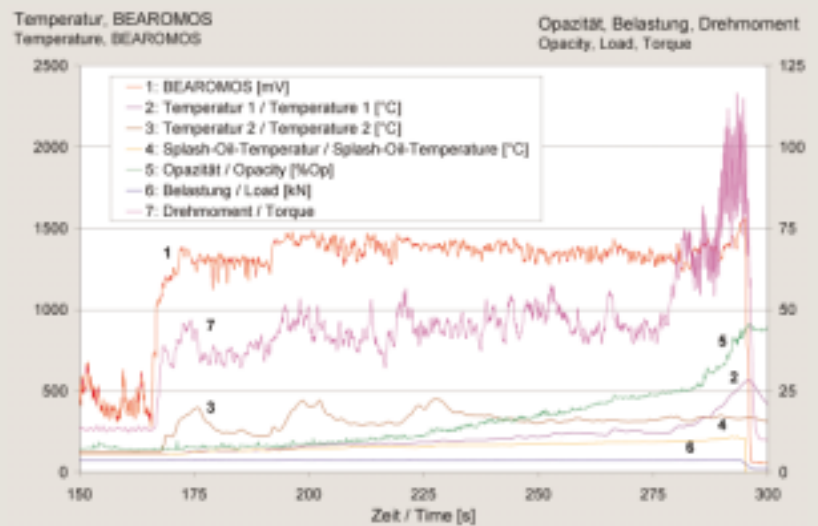


Bild 13: Messung am großen Lagerprüfstand bei statischer Belastung.

Figure 13: Measurement on the large test bench under static loading

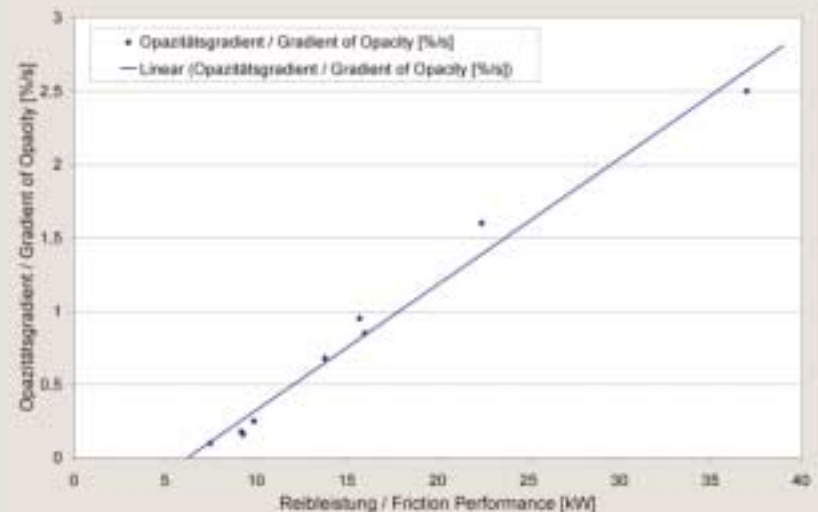


Bild 14: Opazitätsgradient über Reibleistung für die Messungen am großen Prüfstand

Figure 14: Gradient of opacity vs. friction performance for the measurements on the large test bench



11.4.2 Ölnebel-simulationsversuche im Triebraum



Bild 15: Prüfstand für Gleitschuhversuche

- 1: Drehscheibe 300mm
- 2: Gleitschuh
- 3: Antrieb Drehscheibe
- 4: Schmierölaufuhr
- 5: Hydraulikzylinder für Anpressdruck
- 6: Opazitätssensor

Die Plexiglasabdeckung für das Messkammervolumen ist auf dem Foto nicht zu sehen

Figure 15: Test bench for sliding block experiments

- 1: Disc 300 mm
- 2: Sliding block
- 3: Drive wheel
- 4: Lubricating oil supply
- 5: Hydraulic cylinder for axial force
- 6: Opacity sensor

The plexiglass cover for the measuring chamber has been removed

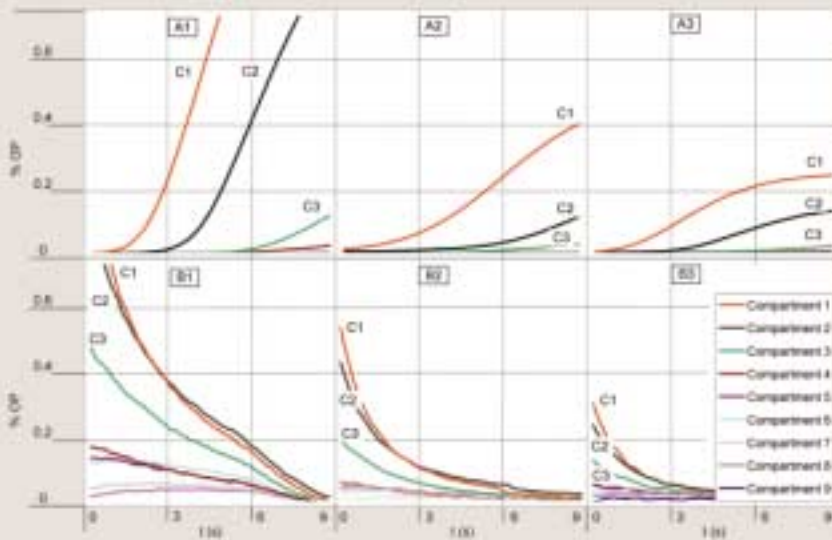


Bild 16: Ölnebel-Eintragskurven A, Ölnebel-Austragskurven B für die aufeinanderfolgenden Compartments 1 bis 9 des mittelschnelllaufenden Motors (Opazität: % OP)

A1/B1 für Leerlauf

A2/B2 für 500 1/min ohne Last

A3/B3 für 500 1/min mit Vollast

Figure 16: Oil mist induction A, Oil mist dissipation B for the consecutive compartments 1 to 9 of the medium speed engine (Opacity: % OP)

A1/B1 for idling speed

A2/B2 for 500 1/min without load

A3/B3 for 500 1/min with load

Schmieröl unter Druck erhitzt wird und dann, aufgrund der vorhandenen Enthalpie beim Herausschleudern in den atmosphärischen Druckbereich, verdampft, Aufmacher. Somit kann die dem zu simulierenden Standardschaden für einen bestimmten Motortyp entsprechende Öldampfmenge auch in ihrem zeitlichen Verlauf erzeugt werden.

11.4.2 Ölnebel-simulationsversuche im Triebraum

An einem Viertakt-Tauchkolben-Motor mit Nenndrehzahl 500/min und zirka

7000 kW Nennleistung sowie an einem weiteren Viertaktmotor mit Nenndrehzahl 1200/min und zirka 8000 kW Nennleistung wurden im Rahmen der Vorbereitung für das OMDEA-Zertifikat Simulationsversuche unter Benutzung eines neuen Ölnebelgenerators durchgeführt.

Bild 16 zeigt für die Eintragskurven des Ölnebels analoge Verteilungsergebnisse auf die Compartments an einem neu entwickelten Viertaktmotor hoher Leistung, wie sie bereits vor 25 Jahren von Schaller Automation ermittelt und beschrieben wurden [13].

Allerdings macht sich durch die erhöhte thermische Belastung ein erhöhter Auswascheffekt bei Viertaktmotoren bemerkbar (Kurven B1 bis B3), weil größere Splash-Öl-Mengen durch die Ölkühlung der Kolben erzeugt werden. Durch den damit verbundenen Auswascheffekt der größeren Spray-Ölmenge dauert es länger, bis auch in Compartments, die vom Schadens-Simulations-Compartment weiter entfernt sind, messbare Opazitätswerte erreicht werden. Die Kurven A1 bis A3 zeigen die Anfangsphase des Einleitens von relativ geringen Öldampfmengen pro Zeit-

einheit. Man erkennt, dass sowohl die Drehzahl als auch die Leistungsbelastung des Motors einen starken Einfluss auf das Ausbreitungsverhalten von Ölnebel über die verschiedenen Compartments haben.

Deutlich ist dies auch an den Kurven B1 bis B3 zu erkennen, die den Auswaschefeﬀekt durch Ölspray und den Austrag von Ölnebel über die Triebraumentlüftung zeigen. Die an dem schnelllaufenden Motor durchgeführten Simulationsversuche zeigen analoge Ergebnisse, allerdings weisen hier die aus den Kurven B zu ermittelnden Kennzahlen auf einen etwas größeren Austragfaktor hin.

Bei beiden Motorkategorien ist jedoch deutlich zu sehen, dass ein eﬃzienter Motorschutz im Sinne von OMDEA sinnvoll und möglich ist.

## 12 Resümee

Die in Teil 1 und 2 dieser Abhandlung zum Thema dargestellten Umstände und die Ergebnisse aus den „Experimentellen Untersuchungen“ zeigen, dass bei zielgerichtetem Bemühen sehr wohl Maßnahmen zu einer weitgehenden Begrenzung

der latenten Betriebsgefahr von großen Dieselmotoren auf Schiffen und auch in Kraftwerken möglich sind. Allein die mit dem OMDEA-Projekt eingeleitete Maßnahme wird schon einen wesentlichen Fortschritt darstellen.

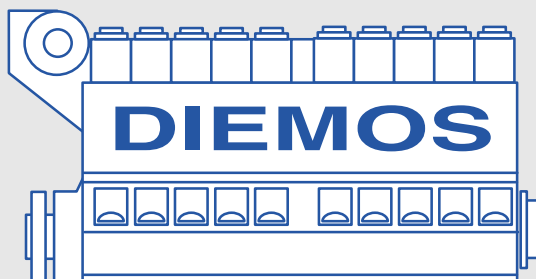
Die durch die in Bild 16, A1 bis A3 erkennbare symptomatische Ölnebelverteilung im Schadensfall wird eine fehlalarmfreie Schadenserkennerung durch eine intelligente Software ermöglichen.

Unter Einbeziehung der BEAROMOS-Sensorik bietet sich eine korrelative Sensorik an, deren intelligente Evaluierung auf der Basis einer schadensrelevanten Symptomatik bereits eine sehr wirkungsvolle Motorschutzmaßnahme zu relativ geringen Kosten ermöglicht. Durch Einbindung einer weiteren, bei Schaller Automation unter der Bezeichnung IGMOS (Ignition Monitoring System) entwickelten Sensorik zur dauerstandsfesten Erfassung der Druckverlaufskurve im Verbrennungsraum der Zylinder lässt sich nicht nur die Schutzeﬃzienz des unter dem Begriff DIEMOS (Diesel Engine Monitoring and Security) bei Schaller Automation in der End-Entwicklungsphase befindlichen

Schutzsystems auf einen für den heutigen Stand der Technik optimalen Schutzwert bringen, sondern auch die hierfür aufzuwendenden geringen Kosten stehen in einem krassen Verhältnis zu den Kosten im Schadensfall bei nicht durch geeignete Motorschutzmaßnahmen abgesicherten Risiken, ganz abgesehen davon, dass eine beachtliche Anzahl von heute verwendete-

## Danksagung

Die Autoren danken allen, die sie bei ihren Bemühungen unterstützt haben und würden sich besonders freuen, wenn dieser Beitrag auch im Internet Forum [www.dieselsecurity.org](http://www.dieselsecurity.org) kritisch diskutiert würde.



### **DIEMOS** **DIESEL ENGINE** **MONITORING and SECURITY**

Sicherheitsbewusstsein und Sensibilität im Umgang mit potentiell gefährlichen Technologien nehmen an Bedeutung zu.

SCHALLER AUTOMATION engagiert sich seit über 40 Jahren für den Schutz von großen Dieselmotoren vor Selbstzerstörung.

Die Kooperation mit renommierten deutschen Forschungsinstituten und die Erkenntnisse aus von SCHALLER initiierten wissenschaftlichen Projekten dienen der Entwicklung von Produkten die eine fehlalarmfreie Sicherheitsüberwachung garantieren.

Von Einzelgeräten über Samplingsysteme bis hin zu motorspezifisch angepassten Sicherheitssystemen bietet SCHALLER Hardware, Software und Dienstleistungen, die den sicheren Betrieb großer Dieselmotoren garantieren.

Unter der Webadresse [www.dieselsafety.org](http://www.dieselsafety.org) unterstützt SCHALLER eine non-profit-Website, die als hersteller-unabhängiges Forum dient.

Ausführliche Informationen finden Sie auf unserer Homepage:

[www.schaller.de](http://www.schaller.de)

### **SCHALLER AUTOMATION** **INDUSTRIELLE AUTOMATIONSTECHNIK KG**

D-66440 Blieskastel / Saar / Germany - Industriering 14  
Tel. +49 (0) 6842 / 508-0 / Fax +49 (0) 6842 / 508-260



ten Sensoren aus der klassischen Messtechnik überflüssig werden.

Schaller Automation würde sich in ihren Anstrengungen zur Eindämmung der latenten Betriebsgefahr von großen Dieselmotoren auf Schiffen belohnt sehen, wenn die in dieser Abhandlung dargestellten neuen Erkenntnisse und Möglichkeiten den Betroffenen soweit nahe gebracht werden konnten, dass die erforderliche Akzeptanz für eine wirkungsvolle Durchsetzung von Motorschutzmaßnahmen verbessert wurde.

Literaturhinweise

- [1] Motor Ship, July 1948, Seite 152ff
- [2] Burgoyne, J.H.; Newitt, D.M.: Crankcase Explosions in Marine Engines, Marine Engineers, 1955, S. 265-270
- [3] Freeton, H.G.; Roberts, J.D.; Thomas, A.: Crankcase Explosions, An Investigation into some factors governing the selection of protective devices, Institute of Mechanical Engineers, 1956
- [4] Mansfield, W.P.: Crankcase Explosions, Development of new protective devices, Institute of Mechanical Engineers, 1956
- [5] Langholz, Jens: Klassifikationsgesellschaften im Schiffsbau, S. 36. Europäische Hochschulschriften, Peter Lang, Frankfurt/Main, 1999
- [6] SAB-Ölnebel-Vademekum, S. 31, Abschn. 7.2.4. Selbstverlag der Schaller Automation Industrielle Automationstechnik KG, Blieskastel, 1996
- [7] Schaller, W.; Dürr, M.: Maßnahmen zur Begrenzung der latenten Betriebsgefahr von großen Dieselmotoren auf Schiffen – Teil 1. In: MTZ Motortechnische Zeitschrift 62 (2001), Nr. 7/8, S. 558 bis 563
- [8] Rules and Regulation for Classification of Ships, London: 2001, Control Engineering System, Part 6, Chapter 1, Section 3.1, Note 4
- [9] Uebel, H.: 23. CIMAC Word Congress 2001, Hamburg, Papers Vol. 4, S. 1457 oder Homepage der Schaller Automation <http://www.schaller.de>
- [10] SAB-Ölnebel-Vademekum, S. 31 bis 33, Abschn. 7.2.4. Selbstverlag der Schaller Automation Industrielle Automationstechnik KG, Blieskastel, 1996
- [11] Schaller Automation CD ROM DIEMOS (Diesel Engine Monitoring and Security) kann kostenlos angefordert werden unter: [web:http://www.schaller.de](http://www.schaller.de) / eMail: [info@schaller.de](mailto:info@schaller.de)
- [12] Burger, W.; Fritz, M.; Albers, A.: Ölnebelentstehung in Gleitlagern experimentelle Untersuchungen. Tribologie-Fachtagung 2001, GfT und DGMK, Göttingen 2001
- [13] SAB-Ölnebel-Vademekum, S.42 bis 66, Abschn. 7.5 und 7.6. Selbstverlag der Schaller Automation Industrielle Automationstechnik KG, Blieskastel, 1996
- [14] Groth, K.: Geometric Mechanic Similarity, Vorl. Umdruck WS 1985, Universität Hannover, Vortrag 1993 in Tokyo

For an English version of this article, see **MTZ Worldwide**. For information on subscriptions, just call us or send an email or fax.



Vieweg Verlag Postfach 1546 D-65173 Wiesbaden  
Hotline 06 11/78 78-151 Fax 06 11/78 78-423  
email: [vieweg.service@bertelsmann.de](mailto:vieweg.service@bertelsmann.de)

Querschau

ATZ 12/2001

Titelthema

Der neue VW Polo

Als der erste Polo in Wolfsburg 1975 vom Band lief, war er noch ein richtiger Kleinwagen. Der neue Polo der vierten Generation hat inzwischen die Dimensionen des Golf der zweiten Generation erreicht. Er zeigt, dass die moderne kleine Klasse bei Ausstattung und Komfort den Klassen darüber längst ebenbürtig ist. Für den neuen Polo gibt es Ausstattungen wie Navigationssystem, elektronisch geregelte Klimaanlage, Regensensor oder Lederausstattung.

Weitere Themen

**Entwicklung**

Die BMW F 650 CS Scarver  
– ein neues Motorradkonzept

Kohlendioxid-R744 als Kältemittel  
in Fahrzeug-Klimaanlagen

Neue Sattelzugmaschine  
Mercedes-Benz Axor

Potenzialbewertung einer Einzelradaufhängung  
für ein leichtes Nutzfahrzeug

**Forschung**

Einlaufverhalten technischer Reibbeläge

**Extra**

Der neue BMW 7er

■ Hotline 06 11/78 78-151 ■ Fax 06 11/78 78-423 ■ email: [vieweg.service@bertelsmann.de](mailto:vieweg.service@bertelsmann.de)



ATZ

Vieweg Verlag  
Postfach 1546  
D-65173 Wiesbaden

