

ISSN 0073-8433

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN

SEKTION
TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN
NATURWISSENSCHAFTEN

SERIE 9 · NUMMER 6 · 1986

FILM C 1619

Tribologie
Reibung, Verschleiß, Schmierung



INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM · GÖTTINGEN

Angaben zum Film:

Tonfilm (Komm., deutsch und Originalton), 16 mm, farbig, 445 m, 41 min (24 B/s). Hergestellt 1985, veröffentlicht 1986.

Der Film ist für die Verwendung im Hochschulunterricht bestimmt. Veröffentlichung der Gesellschaft für Tribologie e.V. Moers, Prof. Dr.-Ing. E. GÜLKER, Dortmund, Dr. J. HANSEN, Bonn, und des Instituts für den Wissenschaftlichen Film, Göttingen, Dipl.-Ing. H. ADOLF; Kamera und Schnitt: G. MATZDORF; Ton: K. BERTRAM, K. KEMNER; Zeichentrickherstellung: ATLANTIK, Hamburg.

Der Film entstand im Auftrag des Bundesministers für Forschung und Technologie.

Zitierform:

GÜLKER, E., J. HANSEN und INST. WISS. FILM: Tribologie – Reibung, Verschleiß, Schmierung. Film C 1619 des IWF, Göttingen 1986. Publikation von E. GÜLKER und J. HANSEN, Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw., Ser. 9, Nr. 6/C 1619 (1986), 13 S.

Anschrift der Verfasser der Publikation:

Prof. Dr.-Ing. E. GÜLKER, Gesellschaft für Tribologie, c/o Hoesch Stahl AG, Maschinenbetriebe/MZD-Ingenieurabteilung, Eberhardstr. 12, D-4600 Dortmund 1.

Dr. J. HANSEN, Gesellschaft für Tribologie, c/o DFVLR, Projektträgerschaft „Umweltschutztechnik“, Südstr. 125, D-5300 Bonn 2.

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN

Sektion BIOLOGIE

Sektion PSYCHOLOGIE · PÄDAGOGIK

Sektion ETHNOLOGIE

Sektion TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN

Sektion MEDIZIN

NATURWISSENSCHAFTEN

Sektion GESCHICHTE · PUBLIZISTIK

Herausgeber: H.-K. GALLE · Redaktion: E. BETZ, I. SIMON

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN sind die schriftliche Ergänzung zu den Filmen des Instituts für den Wissenschaftlichen Film und der Encyclopaedia Cinematographica. Sie enthalten jeweils eine Einführung in das im Film behandelte Thema und die Begleitumstände des Films sowie eine genaue Beschreibung des Filminhalts. Film und Publikation zusammen stellen die wissenschaftliche Veröffentlichung dar.

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN werden in deutscher, englischer oder französischer Sprache herausgegeben. Sie erscheinen als Einzelhefte, die in den fachlichen Sektionen zu Serien zusammengefaßt und im Abonnement bezogen werden können. Jede Serie besteht aus mehreren Lieferungen.

Bestellungen und Anfragen an: Institut für den Wissenschaftlichen Film
Nonnenstieg 72 · D-3400 Göttingen
Tel. (05 51) 20 22 02

FILME FÜR FORSCHUNG UND HOCHSCHULUNTERRICHT

EUGEN GÜLKER, Dortmund, JÖRN HANSEN, Bonn, und INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM, Göttingen:

Tribologie – Reibung, Verschleiß, Schmierung

Verfasser der Publikation: EUGEN GÜLKER und JÖRN HANSEN

Inhalt des Films:

Tribologie – Reibung, Verschleiß, Schmierung. Beispiele aus dem Verkehrssektor, dem Haushaltsbereich und der Industrie, insbesondere der Schwerindustrie, zeigen, daß die in der Technik auftretenden Bewegungen in der Regel mit Reibung verbunden sind. Reibung verursacht stets Energieverlust und häufig auch Verschleiß. Die hierdurch hervorgerufenen Verluste belaufen sich in der Bundesrepublik Deutschland auf ca. 40 Milliarden DM pro Jahr. Diese Verluste zu senken, hat sich die wissenschaftliche Disziplin „Tribologie“ zum Ziel gesetzt. Tribologie ist die Wissenschaft und Technik von gegeneinander bewegten, in Kontakt und Wechselwirkung befindlichen Oberflächen und zugehörigen Verfahren (DIN 50 323).

Am konkreten Fall eines ausgefallenen Kammwalzengetriebes einer Walzenstraße wird die Arbeit einer Tribologie-Stabsstelle gezeigt. Damit wird übergeleitet zur Erklärung des „Tribologischen Systems“ (Grund-, Gegenkörper, mit und ohne Zwischenstoff, Umgebungsmedium, Beanspruchungskollektiv, Reibung, Energieverlust, Verschleiß, Beeinflußbarkeit).

Es wird gezeigt, wie das Tribosystem durch

- Geometrische Gestaltung
(Berechnung von Gleitlagern, Test Gleitringdichtungen)
- Werkstoffauswahl für Grund- und Gegenkörper
(Baggerschaufeln mit Auftragsschweißung, CVD-Beschichtung von Schneidplatten, Laser-Härten von Zylinderbuchsen)
- Zwischenstoffauswahl
(Spektralanalyse von Schmierstoffen, Verträglichkeit von Kunststoffen und Schmierölen, Schmierfettprüfung, schwerentflammbare Hydraulikflüssigkeiten)

gezielt zu besserer und längerer Funktionsfähigkeit entwickelt werden kann. Durch

- Instandhaltung
(Schmierstoffüberwachung, Schwingungsfrequenz-Analyse)

muß die Funktionstüchtigkeit eines Tribosystems im längeren Betriebseinsatz erhalten bleiben.

Forschung und Entwicklung werden auf allen Gebieten der Tribologie fortgesetzt. Das Bundesministerium für Forschung und Technologie hilft hierbei durch die Förderung einer Reihe von Forschungsvorhaben, von denen einige kurz angedeutet werden.

Zur Senkung der großen reibungsbedingten Verluste muß das erarbeitete Tribologie-Wissen durch Technologie-Transfer und Innovation insbesondere in die Klein- und mittelständische Industrie übertragen werden.

Hierbei zu helfen, ist die Aufgabe der Tribologie-Beratungsgesellschaft, die am Ende des Films mit ihrer Arbeit vorgestellt wird.

Summary of the Film:

Tribology – Friction, Wear, Lubrication. Examples taken from the traffic sector, from the household and from industry, especially heavy industry, show that movements occurring in technological processes are generally connected with friction. Friction always causes losses of energy and often also results in wear. Losses of this kind amount to about 40 billion West German Marks per annum in the Federal Republic of Germany. The objective of the scientific discipline of tribology is to reduce such losses. Tribology is the science and technology of surfaces moving against one another which are in contact with and interacting with one another and the processes involved in these movements (DIN 50 323).

The work of a tribology staff division is shown working on the practical case of a broken down pinion mechanism on a rolling mill. That serves as an introduction to an explanation of the "Tribological System" (basic and counter body, with and without precursor, environmental medium, strain collective, loss of energy, abrasion, capability of being influenced).

The film shows how the tribosystem can be carefully developed towards better and longer operability by

- geometric design
(calculating friction bearings, testing rotating mechanical seal)
- selection of tools for basic and counter body
(dredging shovel with layer of welding, CVD coating on slipping beds, laser hardening on cylinder liners)
- choice of lubricant
(spectral analysis of lubricating substances, compatibility of plastics with lubricating oils, examination of lubricating grease, poorly combustible hydraulic fluids).

The operability of a tribosystem applied over a longer period of time must be maintained by

- maintenance
(checking lubricating substances, analysis of oscillation frequency).

Research and development is done in all areas of tribology. The Federal Department for Research and Technology assists by encouraging a number of research projects of which a few are mentioned.

In order to reduce the large losses caused by friction, the knowledge already available on tribology must be passed on, particularly to small and middle-scale industrial enterprises, by means of technology transfer and innovation.

The task of the Society for Tribology-Consulting is to be of help here. The Society and its work are introduced at the end of the film.

Résumé du Film:

Tribologie – Frottement, usure, graissage. Exemples dans le secteur des transports, dans le domaine ménager et de l'industrie, en particulier de l'industrie lourde montrent que les mouvements produits en technique sont liés, en règle générale, au frottement. Un frottement occasionne constamment une perte d'énergie et souvent aussi de l'usure. Les pertes causées de ce fait se chiffrent en Allemagne fédérale à environ 40 milliards de DM par an. La discipline scientifique »Tribologie« s'est mis comme but de baisser ces déficits. La tribologie est la science et la technique de deux surfaces en mouvement l'une contre l'autre, en contact et qui se trouvent en action réciproque ainsi que les procédés qui s'y rattachent (DIN 50 323).

D'après un cas concret d'une panne de mécanisme de rouleau compresseur d'un train laminoir, le travail d'une équipe de service en tribologie est montré. De là on passe à l'explication du »système de tribologie« (substance de base, corps opposé, avec ou sans matière intermédiaire, médium ambiant, collectif d'emploi admissible, frottement, perte d'énergie, usure, influx).

Il est montré comment le système de tribologie peut être développé particulièrement pour une capacité de fonction meilleure et durable par:

- configuration géométrique
(calcul de paliers lisses, test bague d'étoupage)
- choix de matériau pour corps de base et opposés
(excavateur avec soudage à mission, revêtement CVD de matrices coupantes, dureté laser de boîtes à cylindre)
- choix de matériau intermédiaire
(analyse spectrale d'agents de liaison, compatibilité de matières plastiques, huiles de graissage, graisses de lubrification, liquides hydrauliques peu combustible)

L'aptitude du système de tribologie dans de longs emplois doit être maintenue par:

- l'entretien
(contrôle des agents de liaison, analyse de la fréquence d'oscillations).

La recherche et le développement seront poursuivis dans tous les domaines de la tribologie. Le Ministère fédéral pour la recherche et la technologie aide dans ce cas, grâce à la promotion d'une série de projets de recherche, dont certains seront mentionnés.

Pour obtenir la baisse des pertes dues au frottement, les connaissances en tribologie acquises doivent être transmises à l'industrie de petite et moyenne taille par le transfert de la technologie et de l'innovation. La fonction de la Société de consultation en tribologie qui est présentée à la fin de ce film ainsi que son travail, a été prévue à cette fin.

Allgemeine Vorbemerkungen

Daß durch Reibung und Verschleiß erhebliche Verluste auftreten, ist nicht neu. Daß diese sich aber in vielen Volkswirtschaften zu mehrstelligen Milliardenbeträgen aufaddieren, wurde erstmals durch den 1966 in Großbritannien erschienenen sog. Jost-Report (JOST [5]) belegt. Für die Bundesrepublik Deutschland nennen jüngste Untersuchungen von RICHTER u.a. (HANSEN [4]) direkte Verluste von ca. 40 Mrd. DM pro Jahr. Die Folgekosten durch reibungsbedingten Produktionsausfall u.ä. werden auf etwa den gleichen Betrag geschätzt.

Diese Zahlen unterstreichen die volkswirtschaftliche Bedeutung der Tribologie, die sich als interdisziplinäre Wissenschaft und Technik um die Lösung der Probleme mit Reibung und Verschleiß bemüht. Nicht zuletzt durch die 1978 begonnene und noch heute andauernde Schwerpunkt-Förderung des Bundesministeriums für Forschung und Technologie hat die Tribologie erhebliche Erfolge aufzuweisen. Dennoch: Eine Studie der DGMK von 1977 (DGMK [1]) gibt an, daß die Hälfte aller reibungsbedingten Kosten einzusparen seien, würde man nur das bereits bekannte tribologische Wissen überall konsequent einsetzen. Auch wenn diese Angabe schon älter ist, verdeutlicht sie doch noch die Arbeit, die auf den Gebieten der Motivation, Information sowie Aus- und Weiterbildung zu leisten ist, um durch Technologie-Transfer und Innovation die großen Verluste zu senken. Besonders muß die große Zahl an Konstrukteuren, Herstellern und Betreibern von Maschinen und technischen Anlagen angesprochen werden, die eben nicht tribologisch geschult sind und die immer wieder vor tribologischen Problemen stehen. Vor diesem Hintergrund entschloß sich die Gesellschaft für Tribologie, mit finanzieller Unterstützung

des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, den vorliegenden Film zu erstellen. Der Film soll Studenten des Ingenieurwesens, Technikern und Ingenieuren bewußt machen, daß Verluste durch Reibung nicht als naturgegeben hingenommen werden sollten, sondern durch tribologische Maßnahmen bekämpfbar sind.

Zur Entstehung des Films und Danksagung

Der Film wurde bei folgenden Firmen und Instituten realisiert:

- Fa. Bechem GmbH, Hagen
- Betriebsforschungsinstitut, Düsseldorf
- Daimler-Benz AG, Stuttgart-Untertürkheim
- Deutsche Bundesbahn, Göttingen
- Deutsche Lufthansa AG, Lufthansawerft, Hamburg
- Hoesch Stahl AG, Dortmund
- Fa. Krupp GmbH, Forschungsinstitut, Essen
- M.A.N. Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg AG,
 Neue Technologie, München-Karlsfeld
- Pacifik Wietz GmbH u. Co KG, Dortmund
- Rohstoffgroßhandel Reseck, Göttingen
- Rheinische Braunkohlenwerke AG, Köln
- RWTH Aachen,
 Institut für Werkstoffkunde B (Prof. Knotek)
 Maschinenwesen, Abnutzung der Werkstoffe (Prof. Krause)
 Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung (Prof. Peeken)
- Rheinisch-Westfälischer Technischer Überwachungs-Verein e.V., Essen
- Dr. Tillwich GmbH, Horb
- Tribologie Beratungsgesellschaft e.V., Dortmund
- VAG Autohaus, Südhannover GmbH, Göttingen

Die Gesellschaft für Tribologie dankt den beteiligten Firmen und Institutionen für ihre freundliche Unterstützung.

Darüberhinaus hat dankenswerterweise die Deutsche Lufthansa ihre Filmaufnahme von der Landung eines Flugzeuges und das RWTH-Institut für Maschinenelemente (Prof. Peeken) seine Filmaufnahme von der Computerzeichnung der Wellenlagerungen dem IWF zur Verwendung im „Tribologie“-Film überlassen.

Erläuterungen zum Film

Wortlaut des gesprochenen Kommentars¹

1. Verluste durch Reibung und Verschleiß

Verkehrssektor

Wenn bei der Landung eines Flugzeuges die Räder den Boden berühren, gibt es beachtlichen Verschleiß und Qualmwolken abgeriebenen, verbrannten Gummis. Überall wo Bewegung ist, tritt Reibung auf: bei Schiffen, Flugzeugen, Kraftfahrzeugen und ebenso

¹ Die eingerückten Zeilen in Kleindruck geben zusätzliche Informationen.

bei der Bahn. Reibung verursacht teuren Energieverlust und insbesondere teuren Verschleiß. Wie kostspielig Verschleiß ist, weiß jeder Autofahrer, der abgefahrene Reifen ersetzt oder abgenutzte Bremsbeläge, Kupplungsscheiben oder gar einen verschlissenen Motor austauschen muß. Verschleiß belastet auch unsere Umwelt: Was passiert denn mit den alten Reifen? Wieviel Energie kostet uns die Reibung? Wenn die Fahrerin dieses Wagens fährt, verbraucht sie ihr Benzin zum großen Teil für die Reibarbeit im Motor, Getriebe und am Fahrwerk. Diese nutzlose Reibarbeit wird in Form nutzloser Wärme freigesetzt. Sie muß es bezahlen.

Auch bei der Bahn gibt es Probleme mit Reibung und Verschleiß. Eins davon: Die Berührfläche zwischen Rad und Schiene. Sie ist äußerst klein. Der mehrere hundert Tonnen schwere Zug beschleunigt, fährt und bremst auf einer insgesamt handtellergrößen Fläche. Rad und Schiene werden durch die beim Abrollen sich wiederholenden kurzzeitig hohen Belastungen im Oberflächenbereich durchgewalzt und verschlissen. So müssen die Radsätze von den Schienenfahrzeugen – die Bundesbahn besitzt über eine Million Radsätze – regelmäßig gewartet werden. Die verschlissenen Spurkränze werden wieder glattedreht oder abgezogen und durch neue ersetzt.

Haushaltsgeräte

Auch bei Haushaltsgeräten kommen uns Reibung und Verschleiß teuer zu stehen. Kühlschränke und Waschmaschinen kommen häufig auf den Schrott, nur weil ein Lager ausgeschlagen ist, Zahnräder oder Schaltstifte verschlissen sind oder ein Gelenk wackelt. Der Verschleißverlust von nur wenigen Milligramm Material bewirkt nicht selten den Totalverlust des ganzen Gerätes.

Industrie

In der Industrie werden hohe Reibungs- und Verschleißverluste häufig verursacht durch fehlerhafte Werkstoffe, Montage und Wartung oder durch fehlerhaften Betrieb. Im rauen Einsatz kommt es z.B. bei Zahnradgetrieben oft zu Ausbrüchen an den Zahnflanken. Das mehrere Tausend DM teure Zahnrad hat dann nur noch Schrottwert.

Reibung und Verschleiß sind auch in industriellen Fertigungsprozessen reichlich vorhanden. Bei der spanenden Bearbeitung eines Motorblocks, zum Beispiel, wird vom Werkstück durch Bohren, Fräsen oder Schleifen Material abgetragen. Dabei verlieren aber auch die Bohrer, Fräswerkzeuge und Schleifscheiben Material. Sie verschleifen trotz Schmierung und Kühlung viel zu schnell. Nach relativ kurzer Zeit sind die Bohrer stumpf und müssen ausgewechselt werden. Die stumpfen Bohrer, die noch genügend lang sind, werden nachgeschliffen. Sind die Bohrer nach mehrfachem Nachschleifen zu kurz, kommen sie auf den Schrott.

Stahlindustrie

In der Stahlindustrie gibt es besonders große Probleme mit Reibung und Verschleiß. Dafür sorgt schon die Kombination von großen Gewichten und Kräften, hohen Temperaturen und Geschwindigkeiten und eine starke Schmutzbelastung. Das Antriebsgelenk eine Walze vermittelt eine Vorstellung von der gewaltigen Energie, die in Walzwerken gebraucht wird. In einem Warmbreitbandwalzwerk betragen die Energieverluste durch

Reibung 2 Millionen KWh pro Jahr. Auch der Verschleiß an der Walzstraße verursacht gewaltige Kosten. Die Walzstraße muß mehrmals am Tag stillgesetzt werden, um die Walzen, deren Oberflächen manchmal schon in 6 Stunden verschlissen sind, auszubauen und herauszuziehen. Die neuen Arbeitswalzen stehen zum Austausch bereits daneben. Sie werden ein Stück vorgefahren und mit den hydraulischen Vorrichtungen in das Walzgerüst hineingeschoben. Die verschlissenen Walzen werden in die Halle der Walzenschleiferei transportiert. Die Walzenoberflächen können im Extremfall sehr stark verschlissen sein, wie dieser 20 cm breite Ausschnitt zeigt. Die Verschleißspuren auf den Walzenoberflächen werden durch Abschleifen entfernt. Eine präzise Steuerung muß dafür sorgen, daß die Walze über die ganze Länge abgeschliffen wird, um später eine exakt ebene Oberfläche des gewalzten Bleches zu garantieren. Jeder Stillstand der Walzstraße wird intensiv für die Instandhaltung genutzt. Denn Stillstand verursacht Produktionsausfallkosten bis zu 25.000 DM pro Stunde. Der Schaden hier ist ein defektes Lager an einem Kammwalzgetriebe.

Hier ist es bereits demontiert. Die Ursache des Lagerschadens ist zu klären.

Ein Tribofachmann soll hinzugezogen werden.

Der Tribologiefachmann ist Spezialist für Reibungs-, Schmierungs- und Verschleißprobleme.

Gesamtverluste in der Bundesrepublik

In der Stahlindustrie führen Reibungsprobleme durch große Kräfte, hohe Temperaturen und Schmutzbelastung zu erheblichen Verlusten. Auf dem Verkehrssektor verursachen die Komponenten zum Antrieb und zum Abbremsen von Fahrzeugen die größten reibungsbedingten Kosten. Sie erzeugen mehr als ein Viertel aller Verschleißverluste in unserem Lande. Auf dem Haushaltssektor sind es unsachgemäße Bedienung, mangelhafte Wartung und fehlende Instandsetzung, die jeder Familie empfindliche Verluste bescheren. In der Industrie sind die Reibungsprobleme noch vielseitiger als die Produktionsverfahren. Der Trend zu größeren und komplexeren Produktionseinheiten, zu höheren Geschwindigkeiten, zu stärkerer Automatisierung und größerer Präzision stellt auch immer höhere Anforderungen an die vielen verschiedenartigen Reibstellen. Alle Verluste durch Reibung und Verschleiß in der Bundesrepublik Deutschland entsprechen einem Betrag von etwa 40 Milliarden DM, der jährlich verloren geht.

2. Tribologie

2.1. Definition der Tribologie

Um diesen immensen Verlust zu senken, beschäftigen sich viele Wissenschaftler und Ingenieure mit den Problemen der Reibung und des Verschleißes in dem Fachgebiet Tribologie. Nach DIN 50323 ist Tribologie die Wissenschaft und Technik von gegeneinander bewegten, in Kontakt und Wechselwirkung befindlichen Oberflächen und zugehörigen Verfahren.

Der herbeigerufene Tribologiefachmann kommt jetzt hinzu.

Diskussion über Schadensfall.

In der Industrie sind die Reibungsprobleme so komplex und vielseitig, daß größere Unternehmen eigene Tribologie-Stabsstellen eingerichtet haben. In einem derartigen Büro wird die Diskussion fortgeführt.

In der Diskussion fällt das Stichwort „Tribosystem“.

2.2. Das Tribosystem

Das Tribosystem dient zur Beschreibung der Reibungsverhältnisse und Einflußgrößen. Reibung tritt meist in eng begrenzten Bereichen auf und zwar dort, wo Oberflächen durch Krafteinwirkungen miteinander in Kontakt kommen. Gedanklich grenzt man solche Bereiche ab und nennt sie „tribologische Systeme“ oder kurz „Tribosysteme“.

Die Elemente eines Tribosystems sind der Grundkörper und der Gegenkörper. Diejenigen Oberflächen, die miteinander in Kontakt kommen können, sind besonders interessant. Ein weiteres Element kann ein Zwischenstoff sein. Beispiele hierfür sind Schmieröle und Schmierfette oder auch andere flüssige, plastische, feste oder gasförmige Stoffe. Schließlich ist da noch das meist gasförmige Umgebungsmedium, z.B. die Luft. Sind Grund- und Gegenkörper durch einen flüssigen Zwischenstoff getrennt, stellt sich beim gegenseitigen Verschieben der Oberflächen die Flüssigkeitsreibung ein. Der Zwischenstoff bildet dabei einen Tragfilm. Ohne Zwischenstoff berühren sich Grund- und Gegenkörper. Man spricht dann von Festkörperreibung. Sind sowohl Festkörper als auch Zwischenstoff-Elemente beteiligt, liegt Mischreibung vor. Bei Festkörperreibung und Mischreibung besteht Verschleißgefahr.

Auf das Tribosystem wirken nun je nach Anwendungsfall verschiedene Beanspruchungen, das sog. Beanspruchungskollektiv. Dieses Kollektiv besteht aus den Bewegungsarten wie Gleiten, Rollen, Bohren oder Stoßen. Ferner gehören dazu auch die Bewegungsgeschwindigkeit sowie die angreifenden Kräfte, die herrschenden Temperaturen und eine Reihe anderer Einflußfaktoren, wie z.B. Schwingungen.

Im Tribosystem tritt unter der Einwirkung dieses Beanspruchungskollektivs Reibung auf. Die Reibung ist immer mit Energieverlusten und häufig mit dem stets unerwünschten Verschleiß verbunden. Aufgabe der Tribologie ist es nun, Ursachen und Einflußgrößen des in den Tribosystemen auftretenden Energie- und Verschleißverlustes zu ermitteln und Lösungswege zur Beeinflussung dieser Verlustgrößen aufzuzeigen. Das Tribosystem kann bei vorgegebenem Beanspruchungskollektiv auf Grund dieser Beeinflussungsmöglichkeiten verbessert werden und zwar durch die Veränderung der geometrischen Gestaltung, durch Änderung der Werkstoffpaarung sowie durch die Wahl eines geeigneten reibungs- und verschleißmindernden Zwischenstoffs. Zwischen diesen die Reibungsverhältnisse beeinflussenden Größen bestehen komplexe Zusammenhänge, die bei der Konstruktion von Maschinen und Anlagen unbedingt berücksichtigt werden müssen. Außerdem sollte durch Methoden moderner Instandhaltung dafür gesorgt werden, daß auch bei länger andauerndem Betriebseinsatz einer Maschine die Funktionstüchtigkeit der Tribosysteme gewährleistet ist. Anhand von Beispielen werden nun einige Möglichkeiten zur Verbesserung der Geometrie, der Werkstoffpaarung, des Zwischenstoffs und der Instandhaltung aufgezeigt.

2.3. Beispiele zur Beeinflussung des Tribosystems durch Geometrische Gestaltung

Zunächst ein Beispiel zum Thema „Geometrie“. Eines der wichtigsten Maschinenelemente ist das Gleitlager. Die Lagerschale bildet den Grundkörper. In ihr dreht sich als Gegenkörper eine Welle. In unserem Beispiel ist es die Welle einer Turbine. Im eingebauten Zustand sitzt die Lagerschale etwa an der Stelle, wo rechts die Turbinenwelle aufgebockt ist. Während des Turbinenlaufs sind Lagerschale und Welle durch einen dünnen Öltragfilm getrennt. Die Turbinenlagerschale muß so konstruiert sein, daß eine möglichst gleichmäßige Druckverteilung gegeben ist. Umfangreiche Rechenprogramme dienen dazu, das Verhalten von Gleitlagern mit unterschiedlicher Geometrie zu simulieren. Diese Welle ist in starren Lagerschalen gelagert. Wird die Welle durch die Last in der Mitte durchgebogen, bilden sich an den Kanten der äußeren Stützlager Druckspitzen. Dagegen werden bei elastisch gestalteten Lagerschalen die Druckspitzen vermieden und infolgedessen eine Unterbrechung des Öltragfilms verhindert.

Ein weiteres Beispiel zur „Geometrie“:

Äußerst genau gestaltet werden Gleitringdichtungen. Sie dienen zum Abdichten von Wellendurchführungen, z.B. an Hochdruckpumpen. Die Wirksamkeit der seitlichen Dichtflächen hängt von exakter Berechnung und dem Welligkeitsverlauf der Fläche ab. Es handelt sich dabei um wenige Mikrometer tiefe Mulden, die den Druckaufbau im Flüssigkeitsfilm gewährleisten. Um die Dichtwirkung zu überprüfen, werden die Gleitringdichtungen in einem speziellen Prüfstand eingebaut. – Der Testlauf kann beginnen. – Die gemessenen Größen werden zur Optimierung der Gleitringdichtung wieder im Rechner gespeichert.

Werkstoff

Nun einige Beispiele zum Thema Werkstoff, die verdeutlichen, wie durch Verändern des Werkstoffs die tribologischen Verhältnisse verbessert werden. Bei der Förderung von Braunkohle im Tagebau tragen riesige Schaufelradbagger Deckschichten, Braunkohlenflöze und Zwischenschichten ab. Sehr hoch ist der Verschleiß an den Baggerschaufeln, insbesondere an den Schaufelecken, die deshalb zum leichten Austausch nur aufgesteckt und verschraubt sind.

Hier wird eine verschlissene Schaufelecke abgezogen. Aus Unfallschutzgründen wird sie an den Kran gehängt. Die Ecke ist durch das Eindringen in harte Bodenschichten total verschlissen. Um den Verschleiß zu senken, werden auf die neuen Schaufelecken Hartmetallschichten aufgeschweißt. Die fertige Schaufelecke: Schweißraupen aus verschleißfester Legierung liegen in Reihen dicht aneinander. Ein Austausch der Schaufelecke kann je nach Einsatzart des Baggers und der Bodenbeschaffenheit mehrmals im Jahr erforderlich sein.

Ein weiteres Beispiel zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit sind beschichtete Schneidplatten für die spanende Bearbeitung, wie z.B. Fräsen und Drehen. Dieser Fräser hat noch unbeschichtete Schneidplatten und wird hier beim Spanen von Stahl schon bei relativ geringer Schnittgeschwindigkeit schnell stumpf. Wenn am Fräser die hier sichtbaren Schneidkanten der Schneidplatten verschlissen sind, kann jede Platte noch zweimal gewendet werden. Eine wesentliche Erhöhung der Schnittleistung und Standzeit erreicht

man durch Beschichten der Schneidplatten mit Titan-Carbid. Für diese chemische Beschichtung mit einer wenige Mikrometer dünnen Schicht werden die Schneidplatten in Körben übereinander gestapelt. Über den Stapel wird zur gasdichten Abschirmung ein Behälter gestülpt. Er dient als Reaktionskammer, in die gasförmige Titan- und Stickstoffverbindungen eingeleitet werden. Anschließend wird über den gasdichten Behälter ein Ofen zur Aufheizung der Reaktionskammer gesetzt, so daß sich die Gase bei ca. 1000°C zersetzen und auf den Schneidplatten eine sehr harte Titan-Carbid-Schicht bilden. Danach wird der Ofen wieder hochgefahren. Die abgekürzte Bezeichnung dieses Verfahrens CVD bedeutet Chemical Vapour Deposition, chemische Abscheidung aus der Gasphase. Nach dem Abkühlen des Reaktionsbehälters und seines Inhalts wird der Behälter entfernt. Die Titan-Carbid-Schicht macht die Schneidplatten zu standfesteren Werkzeugen. Mit ihnen kann die Fräsgeschwindigkeit verdoppelt werden, und dennoch bleiben die Schneiden länger scharf. Zum Vergleich noch einmal das Fräsen mit unbeschichteten Schneidplatten und jetzt wieder mit beschichteten Schneidplatten.

Nun noch ein Beispiel zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit im Großmotorenbau. Mit einem Hochleistungs-Laser wird die Lauffläche der Zylinderbuchse eines Schiffsdieselmotors gehärtet. Mit konventionellen Methoden war früher das Härten wegen zu starkem Härteverzug nicht möglich. Hier wird mit einem verfahrbaren Spiegelsystem ein Laserstrahl auf die Lauffläche gelenkt und zeilenweise geführt. Die so gehärtete Zylinderlaufbahn ermöglicht jetzt mehrfach längere Betriebszeiten der Schiffsdiesel, ehe die Buchsen ausgewechselt werden müssen.

Schmierstoff

Beim Senken von Verlusten durch Reibung und Verschleiß spielt der Zwischenstoff in vielen Fällen eine noch bedeutendere Rolle als der Werkstoff. Schmierstoffproben aus dem Betrieb sollten regelmäßig untersucht werden, um sicherzustellen, daß sie den Anforderungen gerecht werden. Je nach Einsatzgebiet werden hohe oder niedrige Viskositäten sowie hohe Scherfestigkeit bei sehr unterschiedlichen Drücken und Temperaturen gefordert. Der Schmierstoff soll alterungsbeständig, unempfindlich gegen Verunreinigung, schwer entflammbar und natürlich auch nicht toxisch sein. Dies sind nur einige der vielen Anforderungen. Hier wird an einer Schmieröl-Probe eine Spektralanalyse vorgenommen, um die Veränderungen des Öls durch Betriebseinsatz im Vergleich zu einem Frischöl festzustellen. Die moderne Analysetechnik erst ermöglicht präzise Qualitätssicherung und exakte Forschung an Schmierstoffen, damit Hochleistungsmaschinen – von der Turbine bis zum Industrieroboter – richtig laufen. Die Lichtintensitätskurven in Abhängigkeit von der Wellenlänge lassen auf die chemische Zusammensetzung schließen und zeigen im Vergleich zum Frischöl den Unterschied.

Eine wichtige Anforderung an die Schmierstoffe: Sie müssen sich mit dem Werkstoff des Grund- und Gegenkörpers vertragen. Hierzu ein einfacher Test: Auf vier verschiedene Kunststoffe wird ein in der Feinwerktechnik gebräuchliches Öl gegossen. Das Ergebnis ist nach einigen Wochen zu sehen.

Nach den Ölen bilden die Fette die zweitgrößte Schmierstoffklasse. Sie bestehen über 80 % aus Ölen und einem Eindicker, der wie ein Schwamm wirkt. Schmierfette werden bevorzugt in Wälzlagern eingesetzt und wenn sich bei zu langsamer Bewegung kein

tragfähiger Öl-Trennfilm ausbilden kann. Außerdem schützen sie in einfachen Fällen das Lager vor Schmutzeintritt. Der Betriebseinsatz neu entwickelter Schmierstoffe setzt sehr viele physikalisch-chemische Untersuchungen und Anwendungstests, wie z.B. in diesem Wälzlagerprüfstand, voraus. Alle wichtigen Schmierstoff-Kennwerte müssen ermittelt und dokumentiert werden, damit man später dem Betreiber entsprechende Garantien geben kann. Beim Hochlaufen der Wälzlager wird durch Erlöschen von Leuchtdioden angezeigt, wann anstelle der Mischreibung die verschleißfreie, flüssige Reibung einsetzt. Eine besondere Schmierstoffklasse bilden die Hydraulikflüssigkeiten. Für den Einsatz unter Tage sollten sie eigentlich unbrennbar sein. Wie weit die Entwicklung in dieser Richtung fortgeschritten ist, zeigt der Brenntestvergleich von zwei verschiedenen Hydraulikflüssigkeiten mit gleichen Schmierstoffeigenschaften. Hierzu wird zunächst ein sehr häufig verwendetes, normales Hydrauliköl auf Mineralölbasis getestet. Es ist leicht entflammbar. So kann sich ein Unfall im Bergwerk zur Katastrophe entwickeln. Zum Vergleich jetzt eine schwer entflammbare Hydraulikflüssigkeit. Erst am Schluß des Tests beginnen bestimmte Anteile der Flüssigkeit stärker zu brennen. Eine unbrennbare und ungiftige Hydraulikflüssigkeit, die auch noch gut schmiert, gibt es bis jetzt noch nicht.

Instandhaltung

Durch Instandhaltung schließlich werden alle zuvor erreichten Verbesserungen an den Tribosystemen auf Dauer erhalten, und erst dadurch ist ein zuverlässiger Betrieb von Maschinen und Anlagen über längere Zeit möglich. Instandhaltung, das bedeutet Wartung, Inspektion und Instandsetzung. Das Hauptproblem der Inspektion besteht darin, den Zustand der vielen Tribosysteme zu erkennen, um rechtzeitig vor einem Versagen Gegenmaßnahmen ergreifen zu können. Hierzu gehört zunächst die Überwachung des Schmierstoffes hinsichtlich seiner Gebrauchseigenschaften, aber auch hinsichtlich möglicher Verschleißpartikel von Grund- und Gegenkörper.

Mit einem anderen Verfahren läßt sich feststellen, wie stark ein Wälzlager verschlissen ist. An den Schwingungen, die beim Betrieb eines Lagers entstehen, kann man erkennen, wie gut es noch läuft, welche Ursache bei einem schlechten Lauf möglicherweise vorliegt und wann das Lager spätestens erneuert werden muß. Das Verfahren beruht im Prinzip auf der Messung des Schwingungsfrequenzspektrums, das mit Referenzdaten verglichen wird. Ähnliche Diagnoseverfahren werden auch bei der Instandhaltung in der Luftfahrt angewendet. Hier ist die Instandhaltung schon aus Sicherheitsgründen wohl die aufwendigste überhaupt. Immer wieder müssen alle Aggregate auf ihre Betriebszuverlässigkeit hin untersucht werden. Z.B. wird geprüft, ob an den Triebwerken die Kraftstoffpumpen Verschleiß aufweisen, der die Funktionssicherheit beeinträchtigen könnte. Sie liegen schwer zugänglich zwischen anderen Aggregaten und mußten früher bei jeder Inspektion ausgebaut und zerlegt werden. Jetzt werden die Kraftstoffpumpen nur noch ausgebaut und zerlegt, wenn die schnell am Flugzeug durchzuführende Schwingungsanalyse der Kraftstoffpumpe entsprechende Ergebnisse liefert. Noch weit vor dem Ausfall der Pumpe konnten mit Hilfe dieses Diagnoseverfahrens Kavitationsschäden an den Zahnflanken aufgespürt werden.

3. Forschung in der Tribologie

Die Grundlage für tribologische Maßnahmen zur Verminderung der Kosten und Folgekosten bildet in allen vier Bereichen die Forschung. Sie muß konsequent fortgeführt werden, um die hohen volkswirtschaftlichen Verluste von zur Zeit 40 Milliarden DM im Jahr drastisch zu senken. Das Bundesministerium für Forschung und Technologie hilft durch Förderung einer Reihe von Forschungsvorhaben. Dazu gehören Untersuchungen über die Beschichtung von Oberflächen mit sehr harten Werkstoffen durch physikalisches Abscheiden aus der Gasphase oder PVD-Verfahren. Beim Transport von hartem Schüttgut tritt erheblicher Verschleiß auf. Für die Erforschung dieses Abrasivverschleißes sind noch zahlreiche grundlegende Versuche durchzuführen. Das ist hierzu die Versuchsausrüstung. Die Verschleißspuren unter dem Rasterelektronenmikroskop. Ebenso gelten die Forschungsbemühungen vielen hochbelasteten Tribosystemen, deren Gleitflächen im rauen Betrieb zu schnell verschleifen. Prüfstandversuche mit entsprechenden Werkstoffproben werden unter verschiedenen Randbedingungen durchgeführt. Die Erkenntnisse aus diesen Versuchen helfen, den Verschleiß zu verringern. Für neue Werkstoffpaarungen muß das Reibverhalten erst noch unter den verschiedensten Bedingungen ermittelt werden. Dafür sind langwierige Versuchsreihen erforderlich.

4. Technologietransfer in der Tribologie

Damit die neuen Erkenntnisse in allen Bereichen der Tribologie vermehrt zur Anwendung kommen und zu Innovationen führen, ist ein entsprechender Technologietransfer notwendig. Um Unternehmen bei der Lösung ihrer tribologischen Probleme zu unterstützen, ist die Tribologieberatungsgesellschaft gegründet worden. Die Einrichtung dieser Beratungsstelle erfolgte mit finanzieller Unterstützung durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie und durch die Gesellschaft für Tribologie, die in der Bundesrepublik Deutschland das fachwissenschaftliche Forum für dieses neue Wissensgebiet ist. Viele kleine und mittelständische Unternehmen haben keine eigenen Tribologiefachleute und sind deshalb bei vielen Problemen auf Hilfe von außen angewiesen. Hier kann die Tribologieberatungsgesellschaft durch Fachinformation, Beratung und Vermittlung von Experten helfen. Es gibt viele Stellen, die Erfahrung auf einem Spezialgebiet der Tribologie haben. Diese Erfahrungen sollten allen, die nach Lösungen suchen, zugute kommen.

Reibung und Verschleiß sind nicht unabänderlich, sondern sie sind für Wissenschaftler und Techniker eine Herausforderung, Energien und Rohstoffe effektiver zu nutzen.

Literatur

- [1] DGMK: „Tribologie“. Eine Gliederung und Erfassung des Fachgebietes. FB 218. Hamburg 1977.
- [2] GÜLKER, E.: Tribotechnik in der Praxis – Aufgaben, Organisation und Erfolge. VDI-Bericht Nr. 185, (1972), 27–34.
- [3] GÜLKER, E.: Verschleiß und Energieverluste bekämpfen – Aufgaben der Tribotechnik, 7. Stahl und Eisen, 98, 22 (1978), 1188–1190.
- [4] HANSEN, J. (Hrsg.): „Tribologie“ 1. Fortschreibung der BMFT-Studie. DFVLR Köln 1985.
- [5] JOST, P.H.: Lubrication (Tribology) – A Report of the Present Position and Industry Needs, Department of Education and Science. London 1966.

Film C 1619 Tribologie – Reibung, Verschleiß, Schmierung

Ergänzung der Begleitveröffentlichung, Ausgabe 1986

English Version of the Spoken Commentary
Tribology – Friction, Wear, Lubrication

When an aircraft lands and its wheels touch the runway, there is considerable wear accompanied by clouds of abraded, burnt rubber. Wherever there's movement, there's also friction: in ships, aircraft, motor vehicles as well as railways. Friction costs energy and causes heavy overheads through wear. Every car driver knows how expensive wear is when he has to change tyres or replace worn brake linings, clutch-plates or even a worn-out engine. Wear can also adversely affect our environment. What happens to worn-out tyres? How much energy is wasted through friction? The driver of this car uses the petrol mainly to overcome friction in the engine, the gearbox and the transmission gear. This wasted frictional energy is released as wasted heat. She has to foot the bill.

Railways are also prone to problems with friction and wear.

In particular, the contact area between wheel and rail is extremely small. A train weighing several hundred tons accelerates, travels and brakes on a total surface area of little more than that of the palm of a hand. Wheel and rail are subject to repeated high intermittent loads while rolling and their surfaces rub and wear. That's why the wheel sets on rolling stock have to be changed at regular intervals. Federal German Railways own more than a million wheel sets. The worn wheels are either reground – or the tyres removed and replaced by new ones.

Friction and wear are highly detrimental to household appliances too. Refrigerators and washing machines often end up on the scrap heap because of worn bearings, gears or actuating pins, or simply because a link has worked loose. Wear losses of only a few milligrams of material often cause the total loss of the whole appliance.

In industry heavy losses through friction and wear are frequently due to faulty materials or assembly; inadequate maintenance, or to misuse. Under arduous running conditions gears, for example, often show damage on their tooth flanks. A gear wheel that cost several thousand marks is then worth only its scrap value.

Friction and wear all too often occur in manufacturing engineering as well. During machining of an engine cylinder block, material is removed from the casting by boring, milling or grinding. But the drill bits, milling cutters and grinding wheels also suffer loss of materials. In spite of lubrication and cooling they wear out far too quickly. After a relatively short time the drills become blunt and have to be replaced. The drill bits that are still long enough are re-sharpened. Those drills that are too short after repeated sharpening, are scrapped.

The steel industry is particularly prone to problems caused by friction and wear. They are largely due to a combination of high loads and large transmitted forces, high temperatures and speeds, as well as considerable contamination. The high forces applied in a rolling mill can be appreciated from this roll drive coupling. On a wide-strip hot mill, the energy lost through friction can amount to two million kilowatt hours per annum. Wear of the rolls themselves is also enormously expensive. The mill has to be shut down several times a day so that the rolls, whose surfaces are often worn after only six hours' operation, can be removed and replaced. The new work rolls are already on standby next to the mill stand. They are moved over and then inserted into the mill stand using a hydraulic manipulator. The worn rolls are taken to the roll-grinding shop. In extreme cases the roll surface can be heavily worn, as this 20 cm close-up view demonstrates. The score marks on the roll surface are removed by grinding. The grinding depth along the whole length of the roll must be precisely controlled, to ensure even thickness and surface finish of the rolled strip. Intensive maintenance is carried out every time the mill is shut down. But shut down causes production losses, up to 25,000 marks per hour.

In this case the shut down is due to a faulty pinion bearing. The bearing has now been stripped and the engineers are holding an inquest into the reasons for its failure. Since it is a difficult engineering problem they decide to consult a tribology specialist. The tribologist is a specialist in problems associated with friction, lubrication and wear.

In the steel industry friction is the cause of major losses – a consequence of the high transmission forces involved; also the high temperatures and contamination. In the transport sector the major contributors to frictional losses in vehicles are the driving and braking parts. These are responsible for 25% of all wear in the Federal Republic of Germany. In households, major losses result from incorrect operation, inadequate maintenance and faulty repair. Frictional problems arising in industrial applications can be more varied than the production processes themselves. The trend towards larger and more complex production units, higher speeds, increased automation and higher precision, place ever increasing demands on the various frictional surfaces. The sum total of losses in the Federal Republic of Germany as a consequence of friction and wear is about 40,000 million marks per annum.

In order to minimize these immense losses, many scientists and engineers are tackling the problems of friction and wear in the relatively new science of Tribology. By definition of the German and the British Standards Institution tribology is the "science and technology of interacting surfaces in relative motion and the practices related thereto".

The tribology specialist comes on the scene and assesses the damage.

He finds that the pinion journal shows considerable wear and that the bearings are worn through. Metal transfer to the journal indicates that the bearings have been worn to destruction. Frictional effects in engineering are so varied and complex that many large companies are now setting up their own Tribology Sections.

The discussion is continued in one such department. The maintenance engineer explains the position to the Tribologist: it is the second time this year that damage of this nature has occurred to the bearing, and the downtime these failures have caused has been consider-

able. The Design Engineer explains that the lubrication system had been improved after the previous failure.

The Tribo system defines the conditions of friction and the factors affecting it. Friction generally occurs between very small, discrete areas of contact "asperities" when surfaces are forced into contact with one another. Such areas are theoretically defined as "tribological systems" or "tribo-systems" for short.

The elements of a tribo-system are the Primary Element and the Opposing Element. The surfaces which may come into contact with one another are of special interest. A further element may be an Intermediate Material. It may, for example, be a lubricating oil or grease, or some other fluid; a solid (such as plastic or a soft metal) or a gaseous substance. Finally, there is the environment which in most cases is gaseous, that is the surrounding air. If the Primary and Opposing elements are separated by a fluid, fluid friction occurs when the opposed surfaces move in relation to one another, the intermediate material forms a separating film. In the absence of a separating film the two interacting surfaces will be in intimate contact a state known as "unlubricated" friction. If elements of the solid bodies as well as the intermediary are present, we speak of "mixed" or "boundary" lubrication. Both dry unlubricated sliding and "mixed" lubrication produce wear.

A tribo-system is subjected to various stresses, depending on the circumstances: These stresses make up the resultant stress. The resultant stress will arise from a combination of motion patterns, such as: sliding, rolling, cutting or impact. In addition, other relevant factors are speed, applied loads ambient temperature and also vibration.

As a consequence of all these relevant factors the tribo-system produces friction. Friction always gives rise to the dissipation of energy and unwanted wear. The task of tribology is therefore to determine the causes and the factors responsible for energy loss and find ways of influencing these loss factors. For given loading conditions, a tribo-system can be influenced positively by modifying the contacting geometry by altering the composition of the interacting surfaces or material combination as well as by the choice of a more appropriate "intermediary", to reduce friction and wear. There is a complex inter-dependence between these three factors influencing friction. They all have to be taken into consideration in designing machinery and plant. In addition, improved standards of maintenance should ensure that a tribo-system remains effective throughout the lifetime of a machine. Some examples will serve to show how improvements can be obtained by changing the geometry, the material combination, the intermediary; and by improving maintenance procedures.

To start with, here's an instance of improved geometry: An important component in mechanical engineering is the journal or plain bearing. The sleeve represents the Primary Element, in which the shaft rotates as the Opposing Element. In our example it is the shaft of a turbine. When in position, the split bearing would enclose the shaft at the point where it is now supported by the trestle. When the turbine is in operation, the bearing and the shaft are separated by a thin supporting film of lubricating oil. The turbine bearing must be designed to ensure the best possible load distribution. Comprehensive computer programs serve to simulate the behaviour of bearings of different configurations. This shaft runs in rigidly mounted bearings. When a load is applied to the centre of the shaft, it causes

it to sag, and the outer edges of the bearings are subject to concentrated loading. Flexibly mounted bearings on the other hand, avoid such load concentrations and thus the lubricant film in the bearing remains unbroken.

Another example of the importance of "Geometry": the faces of mechanical face seals are manufactured to extremely close tolerances. Such seals are used in high-pressure pumps, for example. The sealing efficiency of the mating surfaces depends on the dimensional accuracy and the surface finish of the counterface. In this case it has undulations only a few micrometres in depth, which facilitate the generation of a pressure profile in the lubricant film. To test the sealing effect the mechanical free seals are put on a special test bench. The test run can begin. The experimental data are stored in a computer and can be used to improve the design of the mechanical free seal.

A few examples from the materials sector illustrate how changing material combinations can give improvements in tribological performance. In open cast coal mining, extremely large bucket-wheel excavators are used to strip the overburden and to mine the seams of brown coal. Wear is exceptionally high on the bucket teeth, which are screwmounted to facilitate easy replacement.

Here a worn bucket tooth is due for replacement. As an accident-prevention measure it is held in position by a crane. As a result of digging the hard soil the tooth is completely worn away (it is abrasive wear). In order to reduce wear, the new bucket teeth will be hard-faced. The finished bucket tooth. The surface coating is built up by laying down a wear-resistant alloy in a series of close-packed rows. Bucket tooth replacement may be necessary several times a year, depending on the excavator duty and the type of soil.

A further example of optimizing wear-resistance is the use of hard-faced tool bits in metal cutting operations, such as milling or turning. The tool bits in this milling cutter are uncoated and it soon gets blunt, even while milling steel at relatively low cutting speed. Each tool bit has three cutting edges so that, when a cutting edge is worn, the bit can be indexed. A marked improvement in cutting efficiency and cutting life of the tool is achieved by coating the tool bits with titanium carbide. By chemical deposition a thin layer of a few micrometers thickness is coated onto the tool bits, which here are stacked in open baskets one above the other. The stack is then covered with a gas-tight protective container, which serves as a reaction chamber into which the gaseous titanium and nitrogen compound is introduced. A furnace is then lowered over the gas-tight container to heat up the reaction chamber, so that the gases decompose at about 1000°C and deposit an ultra-hard layer of titanium carbide onto the tool bits. Finally, the furnace is lifted off again. The process is known as Chemical Vapour Deposition, or CVD for short. After the reaction chamber and its contents have cooled down, the container is removed. The golden-coloured titanium carbide coating turns the cutting bits into much tougher tools. The milling speed can now be doubled, and even then the cutting edges remain sharp for much longer periods. A comparison between milling with uncoated cutting bits and again with coated tool bits.

Here is another example of enhanced wear-resistance: this time in the area of marine and stationary engines. A high-performance laser hardens the bore of a cylinder-liner of a marine diesel engine. Conventional methods of heat treatment would not be used because

they would have resulted in distortion. With the help of a mobile reflector system, a laser beam is directed at the contact surface and scanned line-by-line. The hardened cylinder bore thus enables the engine to operate for much longer periods before the liners need replacing.

In reducing losses through friction and wear, the intermediate material (the "lubricant") is often more important than the materials combination. Samples of lubricants should be taken from the workshops at regular intervals, to ascertain whether they are still doing their job properly. Depending on the application, they are required to have either high or low viscosity, as well as high shear strength, under widely different pressure and temperature conditions. The lubricant should not deteriorate with time; it should be tolerant of contaminants. It should have a high flash-point and, of course it must be non-toxic. These are only a few of the requirements. Here a spectroscopic analysis of an oil sample is being carried out to determine the changes that have occurred in service. State-of-the-art analytical techniques are a pre-requisite for precise quality assurance and detailed research on lubricants. These help to ensure the smooth-running of high-performance machines, ranging from turbines to industrial robots. Displays of light-intensity as a function of wavelength give an indication of the chemical composition of oils and of the changes that have taken place in service.

One important requirement which lubricants must fulfil is that they are compatible with the materials of the tribo-system. This can be tested quite simply: Four different plastic materials are immersed in a type of oil frequently applied in precision engineering. The results are clearly evident after only a few weeks.

Lubricating greases are the second most important class of lubricants. They consist of 80% liquid lubricants containing a thickening or gelling agent, which acts like a sponge. Lubricating grease finds applications in anti-friction bearings and in situations where movement is so slow that a supporting oil film cannot be maintained. They can also protect bearings against ingress of dirt. New lubricants cannot be used in practice until they have been subjected to exhaustive physical and chemical analyses and practical tests, such as for example in this rolling-element bearing test rig. All relevant lubrication data are recorded and stored for future reference. If boundary or (mixed) lubrication is replaced by "full-film" lubrication, LEDs indicate the break in the electrical circuit.

Hydraulic fluids are an important class of lubricants. For mining applications they should be non-flammable. The comparative flammability test between two hydraulic fluids with the same lubricating properties shows how far research has progressed in this direction. First a common type of hydraulic fluid based on a mineral oil is tested. It is highly flammable, which could easily lead to disastrous accidents in underground mining. In comparison a fire-resistant hydraulic fluid. Certain constituents of the fluid do not begin to burn until the test is almost concluded. A non-flammable and non-toxic hydraulic fluid with good lubricating properties has yet to be developed.

Finally, maintenance is the best way to obtain the benefits of the improvements made in the design of the tribo-system and thus ensure safe and reliable long-term operation of machinery and plant.

Maintenance includes servicing, inspection and repair. The main problem associated with

inspection is that of being able to assess the condition of the many tribo-systems, so that action can be taken before failure occurs. Essentially, this primarily involves monitoring lubricants in respect of their functional properties and also detecting possible wear particles which are frequently abrasive.

Another method enables us to determine the extent of wear in an anti-friction bearing. The vibrations that occur while a bearing is in operation give an indication of how accurately it is still running; what reasons there may be for uneven running; and when the bearing needs renewing. The test procedure relies on the principle of measuring the oscillation frequency spectrum and comparing it with reference data.

Similar diagnostic tests are applied during scheduled maintenance in aviation. In this case service is of paramount importance for safety reasons, and exhaustive test routines have been developed to check the reliability of all moving systems. Checks are made, for example, on engine fuel pumps to detect any wear that could hazard the reliable operation of the unit. The pumps are mounted behind the other units, and are thus not easily accessible. Previously they had to be taken out and dismantled at every inspection. Now the fuel pumps are only removed and stripped down if the vibrational analysis, performed quickly in situ, indicates the need for a closer inspection. Long before pump failure occurs, this diagnostic procedure leads to the discovery of cavitation pits on the tooth flanks. The fundamental component of all tribological measures, aimed at reducing initial cost and consequential losses in all four sectors, is research. It must be pursued with perseverance, in order to achieve a drastic reduction in the exorbitant loss to the Federal German economy. This loss accounts for approximately DM 40,000 million per annum. The Federal Ministry of Research and Technology is backing a whole range of research projects. Among these are studies to investigate the possibility of coating surfaces with extremely hard materials by the Physical Vapour Deposition process, or PVD. Considerable wear occurs during the bulk transportation of solids, for example by conveyors. More fundamental experiments are required in order to obtain data relevant to this sort of abrasive wear. Here is the experimental set-up designed for this purpose. Abrasive wear scars under the scanning electron microscope. Research is also directed at a number of highly-stressed tribo-system where surfaces in sliding contact wear out too quickly under the severe operating conditions. Test bench experiments with the appropriate material samples are carried out under various extreme conditions. The knowledge gained from these experiments helps to combat wear. For new material combinations we first have to ascertain frictional behaviour under a wide range of different conditions. Exhaustive test programmes are necessary.

In order to ensure that new findings in every sector of tribology are applied and lead to innovations, we need to step up technology transfer. In order to provide assistance, in solving tribological problems, the Tribology advisory service was set up. The establishment of this advisory body was made possible by a grant from the Federal Ministry of Research and Technology and the Tribology Society, which is the Federal German forum for all aspects of this new branch of science. Expert advice is provided on all aspects of tribology and solutions are offered for specific problems.

Many small and medium-sized firms cannot afford their own tribology specialists and are therefore dependent on external help and advice. The Tribology Advisory Service fulfils a much needed role in providing specialised information and guidance as well as putting firms in contact with experts in specific fields. There are many places where specialist know-how on particular aspects of tribology has been accumulating. This knowledge should be placed at the disposal of those who are seeking for solutions. Unwanted friction and wear are not inevitable; they are a challenge to science and technology to allow us to make fuller and more efficient use of available sources of energy and raw materials.