Axel Rossmann

Probleme der Maschinenelemente erkennen, verhüten und lösen

Unter besonderer Berücksichtigung des Leichtbaus

- Studierende
- Konstrukteure
- Betreiber
- Qualitätssicherung
- Wartung und Kundendienst
- Untersucher
- Gutachter

Band 2C: Versagensformen, typische Schadensbilder, Mechanismen, Ursachen von Versorgungsystemen und deren Medien: Ölsysteme, Ölprobleme, Ölüberwachung. Kraftstoffsysteme, Kraftstoffprobleme. Hilfsstoffe: Schmierung, Abdichtung, Reinigung.

© Axel Rossmann - turbo consult
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

turbo consult
Axel Rossmann

1. Auflage
(Serie 0.0)

© Axel Rossmann - Turboconsult
ausschulungsunterlage nur mit Lizenz

Bei der Erstellung dieses Buches wurde mit großer Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag und Autor können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgend eine Haftung übernehmen. Für Verbesserungsvorschläge und Hinweise auf Fehler sind Verlag und Autor dankbar.

© 2010 by A.Rossmann, Turbo Consult, Karlsfeld

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung von Turbo Consult unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Bestellung dieses Buches:

Fax Nr. (Deutschland) 08131 50 50 67

ISBN xxxxxxxxxxxxxx

Vorwort

Dieser Band 2 der Reihe „**Probleme der Maschinenelemente - erkennen, verhüten und lösen**“ befasst sich mit „**bauteilspezifischen Versagensformen von Maschinenelementen**“.

Um Schäden vorbeugend zu vermeiden oder gezielte Abhilfen zu erarbeiten, müssen zunächst die Ursachen gefunden werden. Dafür sind **Schäden als Betriebserfahrung** von großer Bedeutung. Dem Trend des modernen Maschinenbaus zum **Leichtbau entsprechen Beispiele aus Flugtriebwerken**.

Warum diese im vorliegenden Werk einen Schwerpunkt bilden, hat einen einleuchtenden Grund. Ihre Komponenten gehören zu den wenigen Maschinenelementen von High-Tech-Maschinen deren Schäden und Probleme wegen der Sicherheitsrelevanz bis ins Detail untersucht und die Ergebnisse dokumentiert veröffentlicht werden. Im Gegensatz dazu sind vergleichbare Untersuchungen und Ergebnisse üblicherweise in der Industrie firmenbezogen. Selbst wenn der Vorfall bekannt werden sollte, werden sie nicht vergleichbar veröffentlicht.

Gewöhnlich wirkt eine Kombination mehrerer Einflüsse auf Maschinenelemente:

- Fertigung, Montage, Betrieb, Wartung und Reparatur.
- Belastungsbedingte Mechanismen wie Werkstoffermüdung oder Schädigungen.
- Konstruktions- bzw. Auslegungsbesonderheiten.

Ein **Betriebsschaden** sollte, anders als ein Schaden in der Erprobung/Entwicklung, nicht nur als äußerst unerwünschtes Vorkommnis betrachtet werden. Er hat auch das Potenzial wichtiger Erkenntnisse zum Produkt. Das macht einen **Schaden geradezu wertvoll**. Wer diesen Lerninhalt nicht nutzt, d.h. den Schaden nicht analysiert und daraus lernt, setzt langfristig seine Konkurrenzfähigkeit aufs Spiel.

Speziell zur **Schadensanalyse** werden Fachliteratur und Weiterbildung angeboten (Lit. zu Band 1, Kapitel 1). Erfahrungsgemäß fühlen sich besonders Fachleute aus dem ‘Werkstoffbereich’, die sich mit Metallografie und mikroskopischen Bruchflächenanalysen (REM) beschäftigen, angesprochen. Doch auch dem Maschinenbauer in der Praxis wird zu diesen Angeboten geraten. Leider stehen allgemeingültige Lehren für den Konstrukteur nicht im Vordergrund. Hilfreich wäre eine intensivere Behandlung betriebsspezifischer Probleme im Rahmen der Gestaltung, Auswahl und Auslegung von Maschinenelementen.

Der vorliegende Band versucht diese Lücke zu schließen. Er ist auch als Nachschlagewerk für den Maschinenbauingenieur in der beruflichen Praxis gedacht. Dieser soll zumindest in die Lage versetzt werden, **Risiken von Problemen/Schäden einzuschätzen** und geeignete Fachleute (z.B. für eine Bruchflächenanalyse) **zu verstehen, zu konsultieren und zu beauftragen**. Die Skizzen und Bilder von Schäden wurden abstrahiert und auf das Wesentliche (charakteristische Merkmale) fokussiert sowie Literaturangaben nachempfunden. Dabei ging es in erster Linie um das Problembewusstsein.

Man erkennt, dass der Inhalt dieses Buchs fachgebietsübergreifend ist. Zusammen mit Band 1 ist Maschinendynamik, Physik und Chemie neben der Werkstofftechnik anwendungsorientiert in die Betrachtungen einbezogen. Der Autor würde es begrüßen, wenn so für den **‘Maschinenbauer’** die Motivation zu einer **ganzheitlichen Sichtweise** gefördert wird.

Axel Rossmann

© Axel Rossmann - Turbocosult
Abbildungsvorlagen nur mit Lizenz

Was mit der besonderen Form dieses Buchs erreicht werden soll.

Motivation: Interessante und überraschende Überschriften zu den Bildern.
Interesse wecken: Schnell erfassbare Bilder typischer Maschinenelemente mit inhaltsbezogenen Merkmalen.
Sinnhaftigkeit und Notwendigkeit des theoretischen Unterbaus im Studium erkennen.
Praxisrelevanz mit dem Bezug zur allgemeinen eigenen technischen Erfahrung. Der behandelte Stoff sollte bereits ohne den theoretischen Teil eines Studiums den Lernenden für die Industrie interessiert machen.
Erklärungen möglichst einfach mit Hilfe der Vernetzung (Bildangaben) im Text zu finden.
Praxistauglichkeit. Auch nach dem Studium soll das Buch als ein Ratgeber dienen. Es unterstützt dafür insbesondere das Erkennen auslegungsrelevanter Einflüsse. Dabei soll ein umfangreiches Sachregister helfen.
Vertiefungsmöglichkeit mit Hilfe von Literaturhinweisen. Viele haben Angaben zum kostenlosen Download im Internet.

ann & Turbo Consult
erlage nur mit Lizenz

Zur Gestaltung:

Am Anfang jeden Kapitels wird in einem ‘Fließtext’ eine Übersicht gegeben. Der fachliche Inhalt stützt sich jedoch überwiegend auf **Bilder mit ausführlichen Erklärungen** in einem **zugeordneten Text**. Dies ist eine Situation ähnlich einer Vorlesung. Wert wird auch auf die Einschätzung durch den ‘Vortragenden’ gelegt. Das soll Problematiken der Materie aufzeigen und nicht zuletzt ein Gefühl persönlichen Kontakts vermitteln.

Um diese Ziele zu erreichen wurde ein **Netzwerk** gewählt. Es verbindet die Bildbeschreibung mit **Hinweisen auf andere Bilder,** die ohne ermüdendes Suchen eine Vertiefung ermöglichen. Das ist besonders bei **Fachbegriffen** und **Schadensmechanismen** nützlich. Literaturangaben sollen, falls erwünscht, der Vertiefung dienen. Dabei handelt es sich auch um **Web-Inhalte** die direkt aus den angegebenen Adressen erreicht werden können.

Ein sehr umfangreiches **Sachregister** ermöglicht die Nutzung als Nachschlagewerk in der Praxis. In Pdf-Form kann das Buch hervorragend mit einer **Suchmaschine** im Reader auch in tragbaren elektronischen Geräten genutzt werden.

Beispiel:
Siehe Bild 6.1.1.2-2 (Lit. 6.1.1.2-3): Die weitaus meisten ***Brüche und Risse in Schrauben*** *des Triebwerksbaus haben, bis auf Gewaltbrüche (Bild 6.1.1.2-1) bei denen es sich gewöhnlich um Folgeschäden handelt, ein zumindest* ***makroskopisch sprödes Aussehen****. Dies kann verschiedene Ursachen haben.*

Schadensursächliche Versprödungen:

Spannungsrisskorrosion *(Band 1 Kapitel 5.6.3.1) ist eine potenzielle* ***Bedrohung hochfester Schrauben und Muttern*** *aus Stählen („****A1****“, „****A2****“). Zu Rissen und Brüchen kommt es unter auslegungskonformen Betriebseinflüssen nur, wenn* ***das Gefüge/der Werkstoff von den Vorschriften abweicht****. Meist lässt sich dies mit dem* ***Überschreiten spezifizierter Härtegrenzen*** *(meist 32 HRc) nachweisen. Die Bruchbilder (Bild 6.1.1.2-3 und Band 1 Bild 5.6.3.1.1-6) erscheinen oft ausgeprägt kristallin (Bild 6.1.1.2-3) und weisen Korrosionsmerkmale (Rost), insbesondere im Ausgangsbereich auf. Mikroskopisch lässt sich an auswertbaren Bruchflächen diese Schadensart vom Fachmann problemlos und sicher identifizieren. Merkmale zeigen die* ***Verwandtschaft des Schädigungsprozesses zur Wasserstoffversprödung*** *(Band 1 Bild 5.7.1-2) .*

Wasserstoffversprödung *(„****B1****“, „****B2****“, „****B3****“) wird von Wasserstoff verursacht, der bei einem* ***nicht vorschriftsgemäßen*** *(zu langer Zeitraum bis zur Entsprödung)* ***Fertigungs- oder Überholungsprozess*** *in das Material eingedrungen (diffundiert) ist (Band 1 Bild 5.7.1-3 und Bild 5.7.1-4). Diese Versprödung entwickelt sich über* ***längere Zeit*** *(Lagerung, Betrieb), ist* ***irreversibel*** *und* ***nicht mit einem Schlagversuch nachweisbar*** *(Band 1 Bild 5.7.1-6). Typische Verfahren, die eine Wasserstoffversprödung verursachen können, sind galvanische Beschichtungen, Ätzen und das Abziehen von Schichten (Band 1 Bild 5.7.1-3)*

Versprödung durch Eindiffusion von Fremdmetallen *(SMIE, Band 1 Bild 5.8.2-1). Diese Gefahr besteht bei unvorgesehen* ***hohen Betriebstemperaturen****. Risse gehen* ***bevorzugt vom Gewinde*** *(„****C1****“) aus (Bild 6.1.1.2-9).*

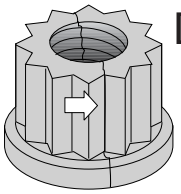
Versprödung durch ‘Einschießen’ von Fremdmetallschmelze *(Lötrissigkeit, engl. LME, Band 1 Bild 5.8.1-2 und Bild 5.8.1-3). Dabei dringt in einem schnellen Vorgang benetzende* ***Metallschmelze*** *in den unter ausreichender* ***Zugspannung*** *stehenden Werkstoff („****D1****“). Die Bruchfläche kann im Anrissbereich eine* ***ungewöhnliche Verfärbung*** *aufweisen (z.B. silbrig) die mit Oxidation nicht zu erklären ist.*

Versprödung durch ‘Werkstoffalterung’ *(Band 1 Bild 5.3-1.2). Beispielsweise können warmfeste Stähle mit Chrom, Molybdän und Vanadium bei zu hohem Vergüten nur noch ein Zehntel der geforderten Kerbschlagzähigkeit aufweisen. In diesem Fall der Flanschschraube eines Dampfturbinengehäuses lag die Zugfestigkeit mit über 1000 MPa deutlich über der maximal zulässigen von 850 MPa. Damit besteht im Betrieb die Gefahr von* ***Warmsprödbrüchen*** *(„****E1****“, Lit- 6.1.1.3-6). Auch hier zeigt sich wieder, dass bei der Werkstofffestigkeit ‘weniger mehr’ sein kann.*

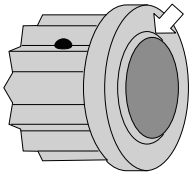
Bild zum Beispiel siehe folgende Seite.

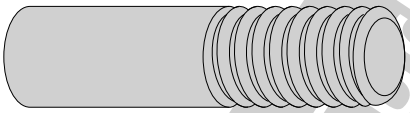
© Alle Rechte bei Turbomaschinen Ausschlußunterlage nur zum Lehrzweck

Wichtige Schadensbilder und Ursachen für Sprödbrüche an Schrauben und Muttern.

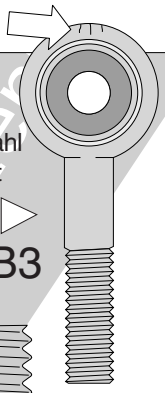


D1 Spröd durchgerissene Schraubenmutter. Material Typ 12%-Cr-Stahl, Härte 44 HRC, mit Kadmium-Korrosionsschutzschicht. Das bei Betrieb geschmolzene Kadmium führte zur Lötrissigkeit (LME)

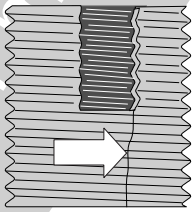




B1 Spröd durchgerissene Schraube. Material Typ 12%-Cr-Stahl. Härte/Festigkeit (bis 1480 MPa) über der max. zulässigen Grenze von 1380 MPa. Bei der Beschichtung mit Kadmium drang Wasserstoff ein und führte zur Wasserstoffversprödung.

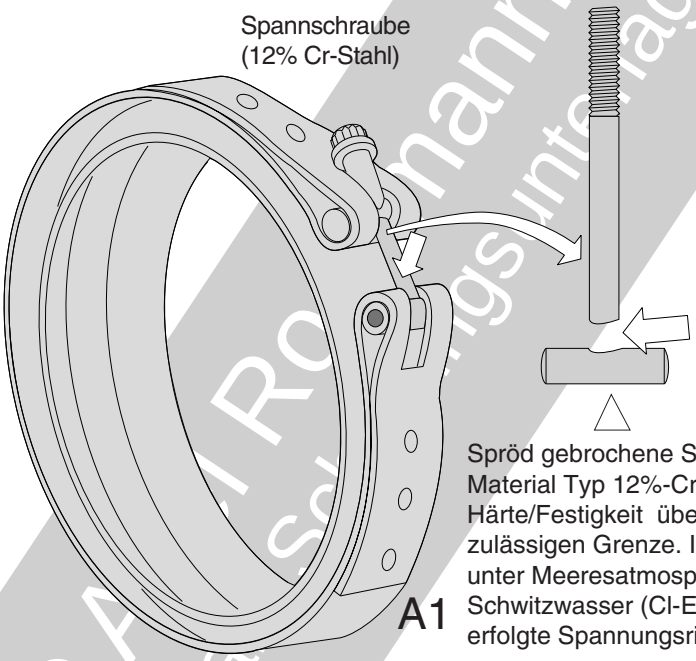


Schubstange (Vergütungsstahl verkadmet) mit Rissen durch Wasserstoff-versprödung B3



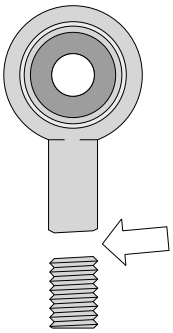
B2 Gewindeeinsatz (Einsatzstahl verkadmet) mit Riss durch Wasserstoffversprödung

Spannschraube (12% Cr-Stahl)

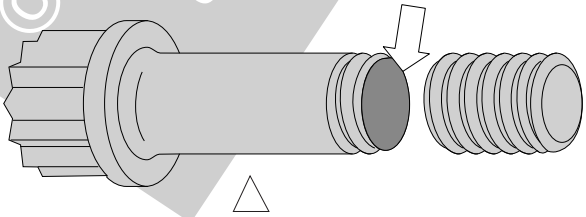


Schubstange (Vergütungsstahl) mit Bruch infolge Spannungsrisskorrosion wegen ungünstigem Gefüge (zu hart).

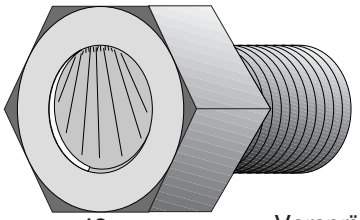
A2



A1 Spröd gebrochene Schrauben. Material Typ 12%-Cr-Stahl. Härte/Festigkeit über der max. zulässigen Grenze. Im Betrieb unter Meeresatmosphäre und/oder Schwitzwasser (Cl-Einwirkung) erfolgte Spannungsrisskorrosion.



C1 Sprödbruch durch Diffusion im festen Zustand (SMIE) von Metallen wie Silber oder Kadmium bei erhöhter Betriebstemperatur



48 mm

E1 Versprödung durch 'Werkstoffalterung'

Bild zum Beispiel

© A. Romann - Turbocons
als Schulungsunterlage nur mit Erlaubnis

Mein besonderer Dank für die Korrekturarbeiten gilt

dem Lektor, **Herrn Dipl.-Dokumentar Reinhard Glander**,

und

Herrn A.o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing.Dr.techn. Heinrich Hochleitner für die Durchsicht. mit dem Schwerpunkt des Verständnisses des Lesers für das Verhalten der Maschinenelemente. Dabei bin ich Ihm besonders für die Durchsicht und wertvollen Kommentare zum Teil „Elemente durchströmter Systeme“ dankbar.

© Axel Rossmann - Turboconsult
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Widmungen:

In Dankbarkeit für die ermunternde Begleitung bei der Entstehung dieser Bücher, meinem verstorbenen Zwillingsbruder dem **Architekten Gert Rossmann**, der mit seinem Schaffen den Münchner Stadtteil Allach deutlich geprägt hat.

Meinem verstorbenen Kollegen, fachlichen Berater und Freund **Reinhold Gräter** in Erinnerung an viele kreative gemeinsame ‘Fach’- und Sporturlaube mit unseren Familien.

Inhalt

Versagensformen von Maschinenelementen und ihre Ursachen

© Aarossmann - Turboconsult
Abschlungsunterlage nur mit Lizenz

6.1Verbindungselemente
6. 1.1 Schraubenverbindungen und Sicherungselemente
6.1.1.1 Probleme und Schäden an Schraubenverbindungen
6.1.1.2 Abhilfen bei Schäden an Schraubenverbindungen
6.1.2 Nietverbindungen
6.2 Elastische Federn
6.2.1Metall-/Stahlfedern
6.2.2 Elastomer-/Gummifedern
6.3 Lager
6.3.1 Wälzlager
6.3.1.1 Probleme und Schäden an Wälzlagern
6.3.2.1 Abhilfen bei Schäden an Wälzlagern
6.3.2 Gleitlager ölgeschmiert
6.3.2.1 Probleme und Schäden an Gleitlagern
6.3.2.2 Abhilfen bei Schäden an Gleitlagern
6.3.2 Gleitlager gasgeschmiert (‘Luftlager’)
6.3.4 Gelenklager
6.3.4.1 Kunststoffe für Gelenklager, Besonderheiten und Probleme
6.4 Zahnräder und Getriebe
6.4.1 Probleme und Schäden an Zahnrädern
6.4.2 Probleme und Schäden an Getrieben
6.4.3 Abhilfen bei Zahnradschäden durch Vorbeugung und Überwachung
6.5 Achsen und Wellen
6.5.1 Probleme und Schäden an Achsen und Wellen
6.5.1.1 Hohlwellen.
6.5.2 Abhilfen bei Schäden an Achsen und Wellen

6.6 Kupplungen/Wellenverbindungen
6.6.1 Vielkeil- und Zahnkupplungen
6.6.2 Reibkupplungen und Reibbremsen
6.6.2.1 Reibbremsen
6.6.2.2 Reibkupplungen
6.6.3 Elastische Kupplungen mit Elastomeren
6.6.4 Flanschkupplungen
6.7 Ketten
6.7.1 Rollenketten
6.7.2 Gliederketten / Rundstahlketten
6.8 Riementriebe
6.8.1 Keilriemen
6.8.2 Zahnriemen
6.8.3 Flachriemen
6.9 Seile und Seilzüge
6.9.1 Seile
6.9.1.1 Anschlagseile, Befestigungen, Schlingen, Ösen
6.9.2 Seilzüge System Bowden.

Elemente durchströmter Systeme

6.10 Dichtungen
6.10.1 Statische Dichtungen
6.10.1.1 Flansch-/Flachdichtungen (Zylinderkopfdichtungen)
6.10.1.2 O-Ring Dichtungen
6.10.2 Berührende Dichtungen
6.10.2.1 Radial-Wellendichtringe
6.10.2.2 Gleitringdichtungen
6.10.2.3 Stopfbuchsen
6.10.2.4 Elastomerdichtungen für Kolben- und Stangen
6.10.2.5 Kolbenringe (Verbrennungsmotoren)
6.10.3 Berührungsfreie Dichtungen
6.10.3.1 Labyrinthdichtungen
6.10.3.1.1 Grundlagen
6.10.3.1.2 Schäden
6.10.3.1.3 Schadenabhilfen
6.10.3.2 Bürstendichtungen
6.10.3.2.1 Grundlagen
6.10.3.2.2 Schäden
6.10.3.2.3 Schadenabhilfen

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

6.11 Rohrleitungen
6.11.1 Grundlagen und Schadensmechanismen
6.11.1.1 Druckrohre, insbesondere der Hydraulik.
6.11.1.2 Schmieröl- und Kraftstoffleitungen
6.11.1.2.1 Schäden an Schmieröl- und Kraftstoffleitungen
6.11.1.3 Rohrleitungen für Gase
6.11.1.4 Rohrleitungen wasserführender Anlagen insbesondere der Kraftwerks- und Haustechnik
6.12 Schlauchleitungen
6.12.1 Niederdruck-Schlauchleitungen
6.12.2 Hochdruck-Schlauchleitungen

rbooksult
mit Lizenz

Versorgungssysteme und deren Medien

7. Ölsysteme
7.1 Ölbezogene Probleme des Ölsystems
7.1.1Problematische Schmieröleigenschaften
7.1.2 Ölverkokung
7.1.3 Verunreinigungen in Schmierölen
7.1.3.1 Partikel im Öl
7.1.3.2 Flüssige Verunreinigungen im Öl
7.1.3.2.1 Wasser im Öl.
7.1.3.2.2 Kraftstoff im Öl
7.1.4 Ölfeuer
7.2 Überwachung des Öls und damit des Ölsystems.

8. Das Kraftstoffsystem
8.1 Kraftstoffbezogene Probleme des Kraftstoffsystems
8.2 Kraftstoffeigenschaften
8.3 Verschmutzung des Kraftstoffs

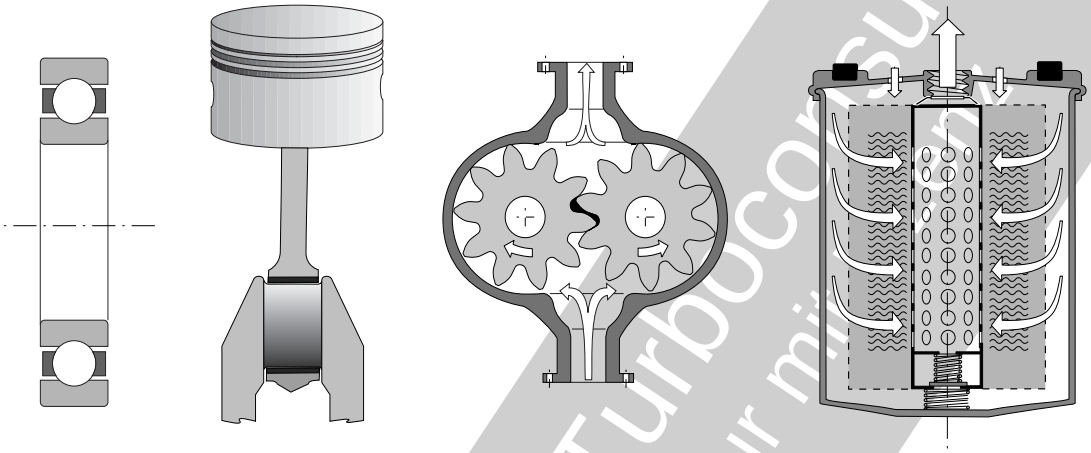
9. Hilfsstoffe
9.1 Schmierstoffe
9.1.1.Schmierfette für Wälzlager
9.1.2 Gleitmittel und Gleitpasten
9.2 Dichtmittel
9.3 Reinigungsmittel

Sachregister

Versorgungssysteme und deren Medien

© Axel Rossmann - Turbiconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Vorbemerkung:



Maschinenelemente sind Bestandteil der **Versorgungssysteme** von Maschinen. Gleichzeitig sind ihre Funktion und ihr Betriebsverhalten von diesen abhängig. Zu solchen Systemen zählen

- Schmiersysteme/Ölsysteme
- Kraftstoffsysteme für
  flüssige Kraftstoffe und
  Brenngase
- Luftsysteme
  Druckluft,
  Atemluft,
  Klimaanlagen.
- Kühlsysteme
- Heizungssysteme/-anlagen.

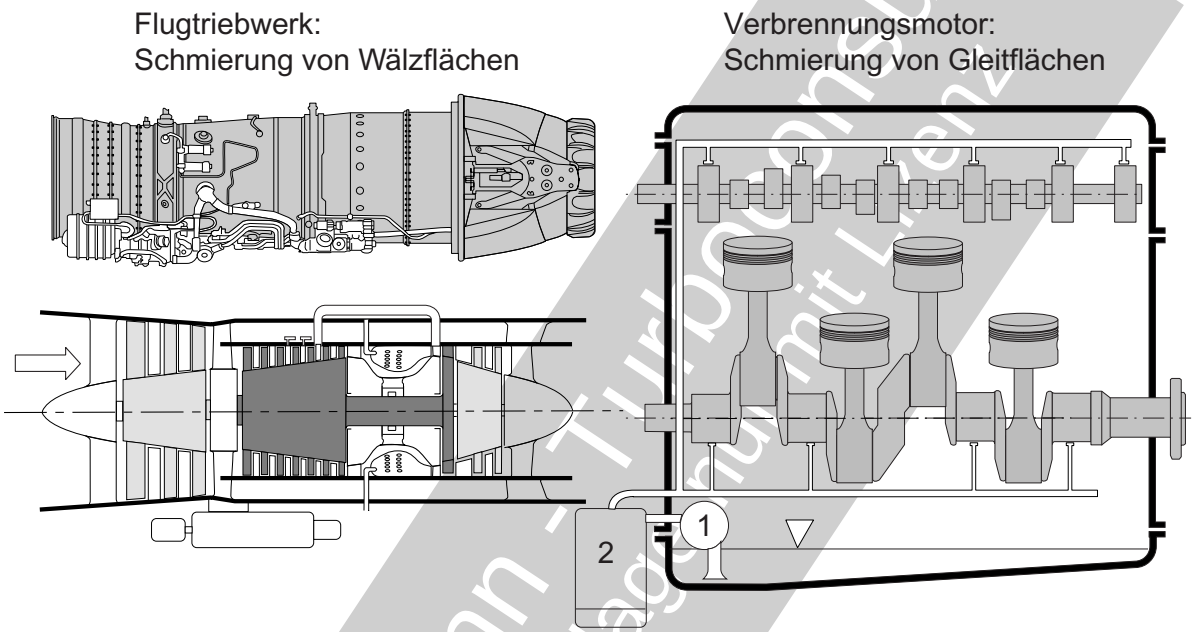
Wegen des Umfangs dieses Gebiets beschränken sich die Betrachtungen hier auf das (Schmier-) **Ölsystem** (Kapitel 7) und das Kraftstoffsystem (Kapitel 8).

Weil der Autor aus dem Bereich der **Turbomaschinen**, insbesondere dem Flugtriebwerksbau kommt und hier Erfahrungen sammeln konnte, die im High-Tech-Bereich sonst nicht frei zugänglich sind, beziehen sich die Darstellungen in Bildern und Text häufig auf dieses Gebiet. Herausforderungen solcher Systeme können auch für den modernen Maschinenbau beispielhaft und nützlich sein. Das gilt besonders für den **Trend zu höheren Betriebstemperaturen und Belastungen gleitender und wälzender Kraftübertragung** (z.B. Wälzlager, Kapitel 6.3.1; Zahnräder, Kapitel 6.4).

Schäden an Maschinenelementen bzw. Komponenten der Versorgungssysteme, insbesondere des Ölsystems haben das Potenzial umfangreicher **Folgen**. Es ist deshalb wichtig, diese **Abläufe zu kennen und zu vermeiden**. Dafür sind problemspezifische **Überwachungsanlagen** ('Monitoring') geeignet (Kapitel 7.2). Sie sind heute für **Anlagensicherheit** und **Logistik** von großer Bedeutung und vom **Konstrukteur** vorzusehen. Die notwendigen Geräte bieten spezielle Hersteller an. Aufgabe ist die geeignete **Auswahl** nach Gesichtspunkten der anwendungsspezifischen Eignung, Zuverlässigkeit und Nachweisempfindlichkeit. Dazu muss er für die **Sensoren geeignete Positionen** im System auswählen sowie die **Grenzwerte** spezifizieren. Ein wichtiger Aspekt sind die geeigneten **Maßnahmen,** die vom Konstrukteur zumindest bestätigt werden müssen.

© Axel Rossmann - Turbocorsult
Ausbildungsunterlagen nur mit

7. Ölsysteme



© Axel Bossmann - Turbocomsult
als Sonderausgabe nur mit Lizenz

Das Ölsystem (Bild 7.1-1) ist für die **Langzeitfunktion** wichtiger Komponenten wie Hauptlager und (Gleit-) Dichtungen, Getriebe und als Kraftübertragung (Hydraulik) von entscheidender Bedeutung. Darüber hinaus muss Öl aus Lagern, Getrieben, Dämpfungsfilmen (squeeze film dampers) und Gleitflächen die entstehende **Wärme transportieren**. Diese wird über Wärmetauscher wie Ölkühler oder Kraftstoffvorwärmung an Luft oder Kraftstoff abgegeben. Die gewählten Beispiele von Ölsystemen sind von einer Turbomaschine (Fluggasturbine/Flugtriebwerk) und einem Verbrennungsmotor. Sie unterscheiden sich in den zu schmierenden Komponenten deutlich. Während das **Flugtriebwerk Wälzlager** verwendet, handelt es sich beim **Verbrennungsmotor** vorzugsweise um **Gleitflächen** von **Gleitlagern** (Kurbelwellenlager, Nockenwellen) und **Führungen oszillierender Bewegungen** (Ventilschäfte, Kolben/Zylinder). Eine besondere Stellung nehmen Getriebe ein (Kapitel 6.4.2 und Kapitel 6.4.3).Hier geht es um die Ölversorgung der Zahnräder/-flanken und der Wellenlager. Eine Besonderheit sind Getriebe von Windkraftanlagen (Bild 6.4.2-7).

Bei seinen Funktionen wird **Öl unterschiedlich belastet**:

- Thermisch, zwischen Wälz- und Gleitflächen, an heißen Rohrwänden.
- Unter Scherbeanspruchung zwischen Gleit- (Gleitringdichtungen, Gleitlager) und Wälzflächen (Zahnräder, Wälzlager).
- Verdüsung.
- Druck bzw. Druckwechsel.
- Druckschwingungen in Dämpfungsfilmen von Lagern.
- Oxidation bei intensivem Kontakt mit Luft. Bildung von Schaum und feinen Tröpfchen.

Öl hat **als Arbeitsmedium eine vergleichsweise lange Lebensdauer** und zirkuliert. Damit erhalten die **Probleme spezifische Schwerpunkte**:

- Alterung unter Betriebsbedingungen.
- Entstehung von Verunreinigungen im System.
- Beeinflussung der Komponenten des Ölsystems durch längerfristige Mechanismen wie Materialermüdung, Reibverschleiß, Kavitation und Korrosion.
- Kontinuierliche Reinigung gegen Verunreinigungen.

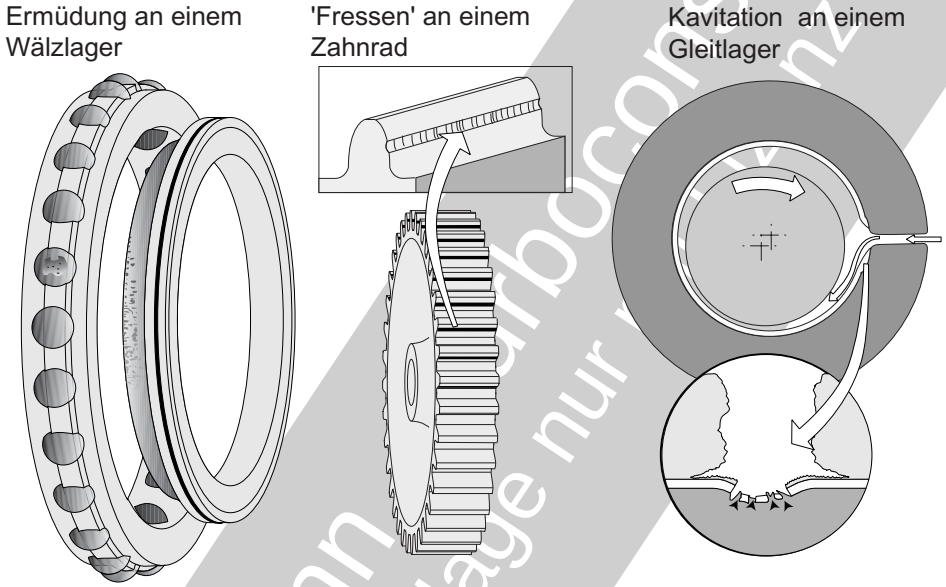
Systeme und Betriebsstoffe: Das Ölsystem, Probleme

- Probleme im Zusammenhang mit Austausch und Nachfüllen.
- Luftaufnahme/Schäumen.
- Überwachung des Systems auf Verunreinigungen.

Darüber hinaus spielen Sondereffekte wie Ölfeuer, Dampfpolster, der Funktion entzogene Ölmengen (oil hiding) und Koksbildung eine Rolle.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

7.1 Ölbezogene Probleme des Ölsystems.



Die Lebensdauer der Komponenten der **Ölversorgung** selbst und von ihr abhängiger **Anlagen** sind in besonderem Maß von der **Ölbeschaffenheit** abhängig. Diese ist insbesondere **betriebsbedingt produkt- und zeitabhängig**. Davon sind wichtige Eigenschaften wie **Schmierwirkung** und **Tragfähigkeit**, **Temperaturstabilität** und **Verschleißschutz** betroffen.

Im vorliegenden Kapitel werden die Probleme eines Ölsystems beispielhaft für ein Turboflugtriebwerk behandelt. Hier treten Effekte besonders harter Betriebsbedingungen moderner Hochleistungsmaschinen auf. Sie sind in Berichten von Flugsicherheitsbehörden (siehe Literaturangaben) im Internet zugänglich.

Hier geht es in erster Linie um Wälzlager. Im Gegensatz dazu sind wichtige Komponenten der Kolbenmotoren gleitgelagert. Damit unterscheiden sich Schadensbilder und Öleinflüsse. Beispielsweise wird das Öl von **Kolbenmotoren** über die nicht absolut dichten Kolbenringe vom **Verbrennungsvorgang** und **vom Kraftstoff** beeinflusst. Auch häufigere längere Stillstandszeiten sowie Phasen niedriger Betriebstemperatur spielen eine größere Rolle.

Auch in anderen, maschinenelementbezogenen Kapiteln werden Probleme im Zusammenhang mit Öleinflüssen angesprochen. Ein Beispiel sind Gleit- (Kapitel 6.3.2) und Wälzlager (Kapitel 6.3.1) sowie Getriebe/Zahnräder (Kapitel 6.4).

Schmieröl beeinflusst das **Betriebsverhalten** der Maschinenelemente auf vielfältige Weise (Bild 7.1-1):

- Wälzflächenermüdung an Zahnflanken und Wälzlagerlaufbahnen (Bild 6.3.1.1-4).
- Ermüdung von Gleitflächen an Gleitlagern (Bild 6.3.2-5).
- Kaltverschweißen (‘Fressen’, Bild 6.3.2-3 und Band 1 Bild 5.9.2-4).
- Kavitation an Gleitlagern (Bild 6.3.2-7 und Band 1 Bild 5.5.1.3-11, Pumpen (Band 1 Bild 5.5.1.3--1 und Bild 5.5.1.3-9) und in Rohrleitungen (Bild 6.11.1.2-7).
- Korrosion an Gleitlagerflächen (Bild 6.3.2-4) und Wälzlagern.
- Verschleiß durch mitgeführte Partikel (Gleitlager, Bild 6.3.2-3).
- Schädigung durch Explosion, Feuer (Kapitel 7.1.3.2.2)

© Expressmann Turboconsult
Ausbildungsunterlage nur für Inh.

Systeme und Betriebsstoffe: Das Ölsystem, Probleme

Bild 7.1-1 *(Lit. 7.1-1 und Lit. 7.1-6): Ein* ***Ölsystem*** *besteht aus mehreren Untersystemen. Das* ***Frischöl****- und das* ***Rückölsystem*** *(engl. Scavenge Oil System) wie das Überwachungssystem. Zu den Komponenten des Ölsystems zählen nicht Bauteile wie Lager, Lagerkammern oder Getriebe, deren Funktion und Betriebssicherheit Aufgabe des Ölsystems ist.* ***Probleme und Schäden*** *der typischen Komponenten eines Ölsystems werden an unterschiedlichen Stellen dieses Buchs und der anderen Bände behandelt. Das gilt auch für die Öleigenschaften.*
Im Folgenden wird auf zugehörige Bilder verwiesen.

Öleigenschaften
- Sorten (Bild 7.1.1-1)
- Dichte
- Viskosität
- Säuregrad
- Verträglichkeit mit Werkstoffen des Systems (Bild 7.1.1-2, Bild 7.1.1-3, Bild 7.1.1-4, Bild 7.1.1-5)
- Verfärbungen (Bild 7.1.1-6)
- Thermische Stabilität
Temperaturgrenzen
Verkokung
Struktur (Bild 7.1.2-2.1, Bild 7.1.2-3.1)
schädigende Wirkung (Bild 7.1.2-3.1, Bild 7.1.2-4.1, Bild 7.1.2-4.2)
Betriebseinfluss (Bild 7.1.2-6.1, Bild 7.1.2-6.2)
Ablagerungen (Bild 7.1.2-2.1, Bild 7.1.2-3.1)
- Verunreinigungen (Bild 7.1.3.1-2, Bild 7.1.3.1-4)
Partikel (Bild 7.1.3.1-1.1, Bild 7.1.3.1-1.2, Bild 7.1.3.1-3, Bild 7.1.3.1-4)
Wasser (Bild 7.1.3.2-1, Bild 7.1.3.2-2, Bild 7.1.3.2-3)
Nachweis (Bild 7.1.3.2-2, Bild 7.1.3.2.1-4)
- Neigung zur Kavitation (Bild 6.11.1.2-7, Bild 7.1.3.2.1--1)
- Öluntersuchungen/Eigenschaftsermittlung (Bild 7.2--1, Bild 7.2-2.1, Bild 7.2.4-2.1, Bild 7.2-5)

Komponenten *auf die sich Probleme des Öls/ Ölsystems auswirken (Bild 7.1-3, Bild 7.2-4.2, Bild 7.2-6, Bild 7.2-9).*

Öltank
Ölmenge (Bild 7.1-2)
Ölverbrauch
Ölstand
Ansaugung/Schnorchel/ (Bild 7.1.1-4, Bild 7.1.1-5, Bild 7.1-8).

Ölpumpen
Druckpumpen/Frischölpumpen (Band 1 Bild 5.5.1.3-1)
Absaugpumpen/Rückölpumpen

- Beschädigung, Fehlfunktion duch Ölverunreinigungen (Bild 6.4.1-19)
Partikel
Wasser
Luft
- Kavitation (Bild 6.4.1-19, Band 1 Bild 5.5.1.3-8 und Bild 7.1.3.2.1-1)

Ölfilter, Ölsiebe
- Blockieren/Zusetzen (Bild 7.1-3 und Bild 7.1.2-7)
- Ablagerungen identifizieren (Bild 7.2-1, Bild 7.2.1 und Bild 7.1.3.1-2 „8“).

Ölkühler
Luftgekühlt
Kraftstoffgekühlt (6.10.3.1.1-2)
- Beschädigung (Bild 7.1.3.2.2-1.2)

Ventile
Überdruckventile (Pressure Relief Valves. Relieve Valves)
Bypassventile
Regulierungsventil (z.B. für Öltemperatur)

- Festsitzen
- Verstopfen

Entlüfter *(Breather)*
- Zusetzen

Sensoren *für Anzeige und Warnung*
- Druck
- Temperatur
- Verunreinigungen
Magnetischer Späne Detektor (Magnetic Chip Detektor, Bild 7.2-7, Bild 7.2-8, Bild 7.2-10)
- Funktion (Bild 7.2-7, Bild 7.2-11)
- Fehlfunktion (Bild 7.2-12, Bild 7.2-13, Bild 7.2-14).

Öldüsen *für Lager- und Zahnradschmierung*
- Zusetzen
Verstopfen durch
Fremdkörper
Verkoken (Bild 7.1.2-7)
- Bruch

Dichtungen *(Bild 7.1.2-4.1)*
- Statische Dichtungen wie O-Ringe (Bild 6.10.1-4)
Schädigung (Bild 6.10.1-12)
- Bewegungsdichtungen (Bild 7.1-3)
Labyrinthe

© Axel Pessmann - Turbosonsult
ab Schulungsunterlagen mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Das Ölsystem, Probleme

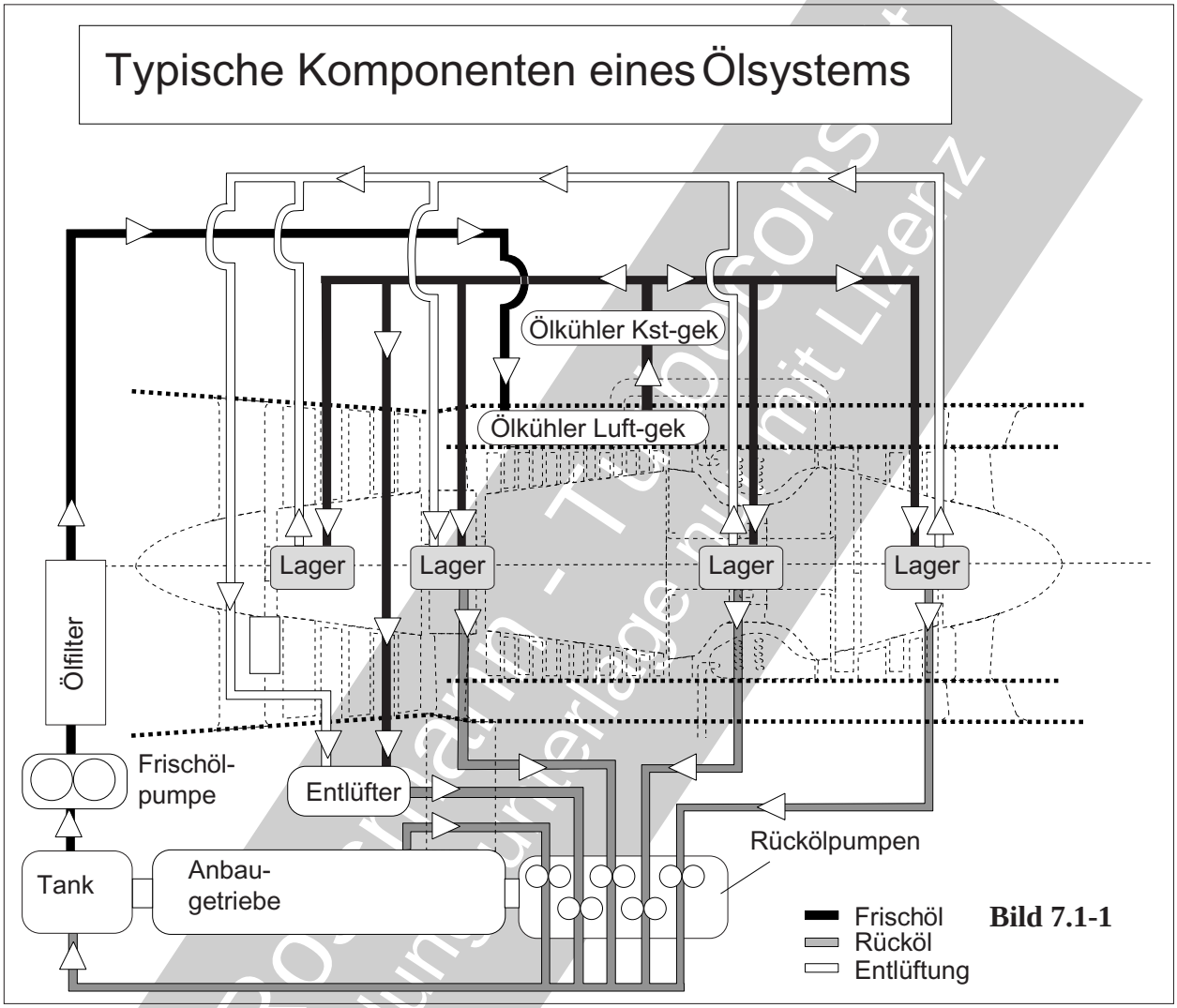


Bild 7.1-1

Verkoken
Beschädigung
Berührungsdichtungen/Gleitringdichtungen (Bild 6.10.2.2-3)
Verkoken
Kavitation
Verschleiß

Lager *(Bild 6.3.1.2- 4.1)*
Gleitlager (Bild 6.3.2-3 bis -7)
Wälzlager (Hauptlager, Getriebelager usw.)
- Schäden (Kapitel 6.3.1.1 und 6.3.1.2)
- Verunreinigungen von außen (Bild 7.1.3.1-1.1)
Entstehung (Bild 6.3.1.1-5.1)
Auswirkung
- Verunreinigungen aus dem Lager
Entstehung
Auswirkung
- Verkokung (Bild 7.1.2-6.2, Bild 7.1.2-7)

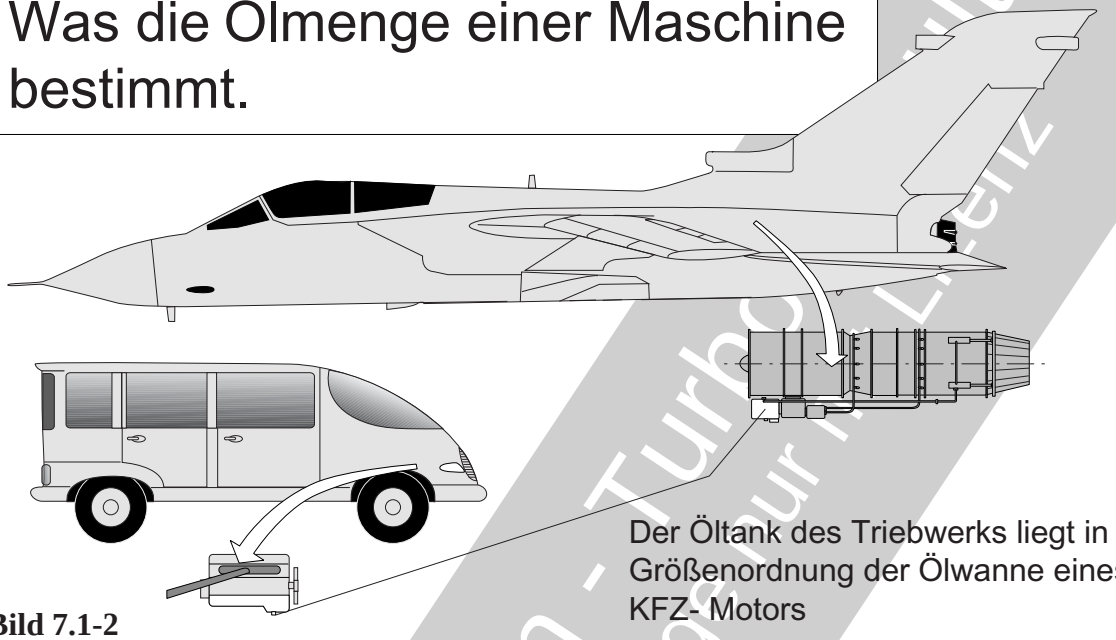
Quetschfilm-Dämpfer *(squeeze film damper, Bild 6.3.1.1-2)*

Lagerkammern *(Bild 7.1.2-5, Bild 7.1.2-7)*
- Ölfeuer (Bild 7.1-10 bis -23)
- Verunreinigungen (Bild 6.10.3.1.2-3.1, 6.10.3.2.2-12, 7.1.2-5)

Zahnräder/Getriebe *(Bild 7.1.2-4.1)*
- Verunreinigungen von außen
Entstehung
Auswirkung
- Verunreinigungen aus dem Lager (Bild 6.3.1.1-4)
Entstehung
Auswirkung

© Axel Rosenhahn - Tribosonst
Nur als Schulungsunterlage mit Lizenz

Was die Ölmenge einer Maschine bestimmt.



Der Öltank des Triebwerks liegt in der Größenordnung der Ölwanne eines KFZ- Motors

Bild 7.1-2

Bild 7.1-2 *(Lit. 7.1-1): Die* ***Ölmenge*** *(Tank + Leitungen + Verbraucher) in einem Triebwerk ist vergleichsweise klein und liegt in der* ***Größenordnung eines Automotors****. Dies ist besonders erstaunlich, wenn man sich die Leistung bzw. die umgesetzte Energie eines Triebwerks vor Augen hält. Bei Kampfflugzeugen beruht die geringe Ölmenge bei einem Tankvolumen von ca. 5 Litern nicht zuletzt auf dem kleinen verfügbaren Raum im Rumpf. Auch die im Vergleich zu einem Kolbenmotor geringe Zahl zu schmierender bewegter Teile benötigt weniger Öl. Aus diesem Grund kann im militärischen Einsatz die* ***Ölmenge*** *und nicht der mitgeführte Kraftstoff* ***die Flugzeit begrenzen****.*
Das Öltankvolumen großer Fantriebwerke kann deutlich über 50 Liter liegen. Zu dem Tankvolumen ist für die Ölmenge in jedem Fall noch die im System zu berücksichtigen.
Triebwerkstypische Ölverluste an Dichtungen (z.B. Labyrinthdichtungen) und Entlüftern (Bild 7.1-1) erfordern, verglichen mit einem Automotor, ***ein häufigeres Nachfüllen*** *(Bild 7.1-3). Der Ölverbrauch des Triebwerks eines Kampfflugzeugs liegt typischerweise im Bereich von 1 Liter pro Stunde. Das macht eine Ölstandsüberprüfung vor jedem Flug notwendig.*

Bild 7.1-3 *(Lit. 7.1-3): Den* ***Ölverbrauch*** *eines Triebwerks bestimmen viele Einflüsse.* ***Leckverluste****, z.B. an Labyrinthdichtungen und in der Entlüftung. Von besonderer Bedeutung ist die Ersatzmenge, die wegen der* ***Eigenschaftsveränderungen*** *des Öls notwendig wird.*
Sie lassen sich zwei Gruppen zuordnen: ***Konstruktion und Betrieb*** *auf der einen sowie* ***Ölqualität /Öleigenschaften*** *mit dem gewährleistenden* ***Überwachungssystem*** *(Kapitel 7.2) auf der anderen Seite.*

Einfluss von Betrieb und Konstruktion:

Nutzungsdauer/Wechsel *eines Öls wird entscheidend von der* ***Betriebstemperatur*** *bestimmt (Bild 7.1-3 und Kapitel 7.1.2). Ein Temperaturanstieg von ca.* ***8°C verdoppelt die Reaktionsgeschwindigkeit****. Bei Überschreiten einer Temperaturgrenze entstehen* ***auffällige Zersetzungsprodukte****. Deshalb ist die* ***Zeit*** *eines Öls bei hoher Temperatur für die* ***Nutzungsdauer entscheidend****. Das gilt besonders für die* ***maximale Betriebstemperatur****. Die Anforderungen an das Öl steigen also in modernen Triebwerken mit der Tendenz zu längeren* ***Laufzeiten*** *und höherem*

© Aldi Passmann - Turbomult
Alle Rechte vorbehalten, nur für Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Das Ölsystem, Probleme

Was beeinflusst den Ölverbrauch in Maschinen?

Konstruktion und Betrieb der Maschine

- Heiße Stellen (hot spots)
- Luftströmung im Ölsystem
- Werkstoffe im Ölsystem
- Physikalische Grenzen

Ölqualität und Überwachungssystem

Typen der Reaktionsprodukte:
- Säure
- Peroxide
- Ungesättigte Kohlenwasserstoffe
- Alkohole

Diese Reaktionsprodukte erzeugen:
- (Öl-) Schlamm
- Anstieg der Viskosität
- Saure Reaktionen
- Ablagerungen: Koks- und lackartig
- Korrosion

Ablassen des Öls entfernt gealtertes Öl, aus dem Schlamm entstehen kann.

- Tolerierbarer **Viskositätsanstieg** hängt vom Triebwerksyp ab.
- Reduziert die **Wärmeabgabe** und damit die Lagerlebensdauer
- Die Geschwindigkeit der Veränderung weist auf Verunreinigung oder starke **Alterung** hin.

- Die momentane Säurezahl ist wenig aussagefähig *)
- Die **Veränderungsgeschwindigkeit** der **Säurezahl** kann als Indikator der Ölalterung dienen.
- Für ein bestimmtes Ölsystem lässt sich ein **Verhältnis von Säurezahl und Korrosivität** angeben.

*) Druckflüssigkeiten mit EP-Zusätzen und/oder synthetische Ester können bereits im Neuzustand einen hohen Säuregrad aufweisen. Deshalb müssen sie aber nicht korrosiv wirken, solange Korrosionsschutzadditive nicht verbraucht sind.

- **Korrosionstests** sind gut für den Vergleich von Ölen, weniger geeignet zur Beurteilung des Betriebsverhaltens.
- Korrosionsprobleme stehen in erster Linie in Zusammenhang mit ungenügender Aufbewahrung oder Verunreinigungen.
- Korrosion wird mit Ölwechseln kontrolliert.

- 'Lacke' (Bild 7.1.2-3.1) bilden sich auf Dichtungen, Federn und unterschiedlichen Heißteilen.
- Koks findet sich im Bereich von Räumen mit Ölnebel oder Öldampf (Bild 7.1.2-3.1).

Die Ablagerungen sind Reaktionsprodukte von Ölzusätzen (Inhibitoren) oder Zersetzungsprodukte, jedoch kein Kohlenstoff!
Der größte Teil der Verunreinigungen wird von sehr geringen Ölmengen in der Dampfphase erzeugt.

Bild 7.1-3

***Temperaturniveau**. Es ist besonders vom Druckverhältnis des Verdichters und der Gastemperatur beeinflusst.*
*Die Zersetzung kann im **Kontakt mit heißen, katalytisch wirkenden Metalloberflächen** beschleunigt werden. Die Art dieser Reaktionsprodukte entscheidet über die Wirksamkeit eines Ölwechsels bzw. das Ablassen des Öls auf bleibende Auswirkungen im Ölsystem.*
*Damit spielt die **Konstruktion des Ölsystems** eine entscheidende Rolle für Ölveränderungen. Von besonderem Einfluss ist die **Wärme-***

abschirmung *ölführender Komponenten in heißer Umgebung. Dazu gehören* ***Lagerkammern*** *und angeschlossene* ***ölführende Leitungen****. Durch* ***heiße Gehäusestreben*** *(engl. hot struts Bild 7.1.2-7) geführte Leitungen werden von Strahlungswärme und Konvektion intensiv aufgeheizt und erfordern besondere Beachtung.*
Am meisten schädigt ***heiße Leckluft*** *das Ölsystem. Sie dringt im Bereich von Lagerkammern an* ***Labyrinthdichtungen*** *ein (Bild 7.1.4-2).* ***Verschlechtert sich mit der Betriebszeit die Dichtwirkung von Labyrinthen*** *(Abrieb, Erosion,6.10.3.1.1-2) nimmt die Ölalterung und damit der Ölverbrauch entsprechend zu.*
Natürlich spielt das ***Einsatzprofil*** *eines Triebwerks für die Ölaufheizung (Temperatur-Zeit-Verlauf) und damit die Öllebensdauer eine besondere Rolle. So kann der Einsatz im zivilen Bereich auf* ***Langstrecken*** *sich von* ***Kurzstrecken*** *mit vielen Starts im Ölverbrauch deutlich unterscheiden.*
Leckraten *und Öltemperaturen sind für besondere Betriebsbedingungen wie* ***Fluggeschwindigkeit*** *(z.B. bei Überschall, Bild 7.1.4-3, 7.1.4-4 und Bild 7.1.4-7) und* ***Manöver*** *(militärischer Einsatz, Bild 7.1.4-8) spezifisch. Im Extremfall kann ein inneres, von außen nicht erkennbares,* ***Ölfeuer*** *gezündet werden (7.1.4-7). Dabei ist mit* ***unerwartet hohem Ölverlust*** *zu rechnen. Dieser kann auch als Indiz für ein Ölfeuer gelten.*
Entstehen im Betrieb ***Risse****, z.B. durch Thermoermüdung oder hochfrequente Schwingungen in ölführenden Strukturen wie* ***Leitungen*** *oder* ***Lagergehäusen****, kann es zum* ***Einbruch von Heißgas /Heißluft*** *in das System kommen. Damit wird ein Ölfeuer durchaus wahrscheinlich (Bild 7.1.4-9).*
Nicht nur während des Triebwerksbetriebs wird das Öl temperaturgeschädigt. Einen merklichen Einfluss hat die ***Zeit nach dem Abschalten****. Heizt die Wärme der Heißteile durch Strahlung und Leitung im Stillstand das Öl örtlich auf (****heat soaking****), kann es sich zersetzen (Bild 7.1.2-6.1) und gefährliche Schäden (Bild 7.1.2-6.2) verursachen.*
Mit steigender Betriebstemperatur und -zeit werden ***Metalle wie Kupfer*** *(Lötungen, Lagerkäfige),* ***Magnesium*** *(Getriebegehäuse) oder* ***Blei*** *(dünne Einlaufschichten, „Flash“) verstärkt vom Öl angegriffen. Vom Öl aufgenommene* ***Reaktionsprodukte verschlechtern die thermische Stabilität*** *und unterstützen so die Bildung von Ölkohle. So entsteht ein selbstverstärkender Effekt.*
Für die thermische Ölstabilität haben sich ***Verschleißprodukte*** *(Reibrost/Frettingabrieb) als besonders schädlich erwiesen. Ein besonderes Problem sind Metallabriebe bei Feuchtigkeit (Wasser, Lit. 7.1.3.2.1-12) im Fluid. Verschleißflächen aus Cu, Al, Stahl und Blei sollten vermieden werden. Typisch ist eine Mischung aus Abrieb des Grundmaterials (Stahl) und von* ***Gleitbeschichtungen****. Eine Quelle sind* ***Vielkeilverzahnungen****, (Bild 6.6.1-1 und Bild 6.6.1-6) wie sie an* ***Wellen von Pumpen und Getrieben*** *vielfältig zum Einsatz kommen. Voraussetzung ist, dass sie direkten Kontakt zum Inneren des Ölsystems haben. Wie schnell sich dieser Einfluss auswirkt, hängt deshalb von der Konstruktion ab. Besonders schädigend wirken Beschichtungen wie* ***Trockenschmiermittel*** *mit* ***feinverteiltem Kupfer*** *oder* ***Zinkseifen****.*
Als anfällige Konstruktion für blockierte ölführende Öffnungen hat sich die ***Ölzufuhr über die Hauptwelle*** *gezeigt. Dabei wird die Zentrifugalkraft genutzt, um durch kleine Bohrungen die Lager mit Öl zu versorgen. Über sie können Zersetzungsprodukte (Koks) und äußere Verunreinigungen (Staub) eingebracht werden.*
Die Empfindlichkeit eines Ölsystems für Ablagerungen hängt auch von der ***Anordnung und Maschengröße der Siebe*** *ab. Hier muss ein vorzeitiges Blockieren vermieden werden.*
Um das Eindringen von Schmutz zu verhindern sind bei Hydraulikanlagen Belüftungsfilter sofein wie die feinsten Arbeitsfilter zu wählen und mit Lufttrocknungsgranulat zu kombinieren. Nicht zu verhindern ist der ***Einzug von Schmutz durch Kolbenstangen****. Es gilt der Erfahrngswert, dass pro cm² überstrichener*

© Axel Bosmann - Turbomaschinen
abschnittsunterlagen mit Lizenz

Fläche ein Teilchen > 10 µ m eingezogen wird (Kapitel 6.10.2.4).

*Eine besondere Gefahr geht von **Staubpartikeln** in der Ansaugluft des Triebwerks aus. Sie können mit Kühlluft über Labyrinthe der Lagerkammern in das Öl gelangen. Oft tragen die Partikel **angelagertes Meersalz**. Dann wirken sie besonders als '**Kondensationskeime' für eine Koksbildung** im Öl.*

Überwachungssystem für Ölqualität/Öleigenschaften:

In erster Linie wirken drei Mechanismen schädigend:

*- **Thermische Zersetzung** erzeugt Säuren und reaktive Kohlenwasserstoffe.*
*- **Oxidation** lässt Säuren und Wasser entstehen.*
*- **Hydrolyse** bei Wasserzutritt bildet Säuren und Alkohole.*

*Diese **Schädigungsmechanismen verändern die Eigenschaften des Öls**. Zusätzlich entstehen **Ablagerungen**.*
*Wird ein vom OEM angegebener triebwerksspezifischer Wert überschritten, ist gemäß Handbuchangaben vorzugehen (Bild 7.2-4.1.1 und 7.2-4.1.2). Verständlicherweise besteht hier ein Zusammenhang mit den **Intervallen für das Ölablassen** (drain periods).*

***Schlamm** (engl. **sludge**): Der Anteil liegt in zivilen Triebwerken normalerweise unter 0,001 % (10 ppm). In größerer Menge kann er kleine ölführende **Öffnungen zusetzen**. Welchen Anteil an Sludge ein Triebwerk toleriert, wird vom OEM angegeben.*

*Die **Viskosität** (Bild 7.1-5) steigt mit der Zersetzung des Öls. Damit wird die Funktion des Ölsystems und so die zu schmierenden Komponenten beeinflusst.*

*Eine zu hohe Viskosität kann den **Durchfluss vermindern,** was die **Aufheizung** des Öls verstärkt und die Alterung beschleunigt.*
*Dickflüssigeres Öl kann zum sog. **Käfigschlupf** (**Skidding**) in den Hauptlagern mit Schäden führen (Bild 6.3.1.1-14.1 und Bild 6.3.1.1-15).*
*Die Viskosität ist auch für die **Funktion** des Ölpolsters gedämpfter Lager (Bild 6.3.1.1-2) wichtig. Die Beurteilung einer möglichen Auswirkung kann nur vom OEM erfolgen. Er verfügt über das notwendige Hintergrundwissen.*
*Mit der Viskosität **steigt die Tragfähigkeit des Öls**. Das ist z.B. für Wälzlager und Zahnräder von Vorteil (Bild 6.3.1.1-8 und 7.1-5).*

***Säurebildung** (Acidity) bei der Zersetzung des Öls. Diese Schädigung ist von der **Zunahme** der **Säurezahl** (**Acid Number**) und weniger von deren akutem Wert gekennzeichnet. Dieses Verhalten ist auch produktabhängig . Es steht im Zusammenhang mit **sauren Additiven** für eine höhere Tragfähigkeit des Öls.*
*Säurebildung erhöht die Gefahr von Korrosionsschäden im Ölsystem. Für die Korrosionsempfindlichkeit der Werkstoffe bzw. Aggressivität der Öle gibt es standardisierte **Laboruntersuchungen** (Bild 7.2-1). Diese sind aufwändig und deshalb für eine Ölüberwachung vor Ort ungeeignet.*
*Die eigentliche Korrosionsgefahr geht erfahrungsgemäß eher von **eingebrachten Ölverunreinigungen** aus. Es handelt sich in erster Linie um **Wasch-/Reinigungsmittel, Hydraulikflüssigkeit und Wasser**. Gegebenenfalls ist ein Öltausch fällig.*
*Generell sind **Schmier-** und **Druckölsysteme** anforderungsbedingt zu **unterscheiden**. In modernen Hydraulikanlagen verhindern Detergent- und Dispersionsadditive ein Zusammenbacken kleinster Fremdpartikel was Ausfiltern möglich macht und Ablagerungen verhindern. Detergentadditiven wird auch ein **Reinigungseffkt** zugeschrieben indem sie Ablagerungen auflösen.*
***Kadmium** (engl. Cadmium) wird in älteren Triebwerkstypen als Korrosionsschutz für*

© A. Rossmann - Turbopsych
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Typische Temperaturgrenzen in Kraftstoff- und Ölsystemen hochbelasteter Maschinen.

Komponente	Temperaturen [°C] in Flug-Turbomaschinen (für zivile Nutziung konservative Annahmen)		
	mit Getriebe	Verkehrs-anwendung	Militärisch
Kraftstofftemperaturen			mit Anti-icing Additiv
- Kraftstofffilter ein (minimum)	0	0	
- Kraftstoffdüse ein (maximum stationär)	130	130	160
- Kraftstoffdüse ein (Maximum instationär)	140	140	180
Öltemperaturen am ölgekühlten Anlassergenerator (IDG)			
- Ölkühler aus (maximum)	100	100	-
- Ölkühler ein (maximum)	135	135	-
Öltemperaturen der Hydraulik			
- Ölkühler aus (maximum)	-	-	135
- Ölkühler ein (maximum)	-	-	165
Öltemperaturen des Schmiersystems			
- Ölkühler aus (Frischöl, stationär)	110	135	160
- Ölkühler aus (Frischöl, instationär)	125	160	180
- Rückölpumpe aus (stationär)	165	165	200
- Rückölpumpe aus (instationär)	180	180	220

Bild 7.1-4

Stahlteile verwendet. Bei höheren Temperaturen löst es sich in synthetischen Ölen. Damit steigt die Korrosionsempfindlichkeit der betroffenen Oberflächen.
***Blei** und alle **Bleilegierungen** werden von synthetischen Ölen angegriffen. Deshalb sollten sie im Ölsystem vermieden werden. Blei kommt als Lotbestandteil in Filtern oder als Beschichtung ('Flash') an Auflageflächen vor.*
***Silber** wird ebenfalls in Loten und wegen seiner guten Gleiteigenschaften als Beschichtung verwendet. Es reagiert mit bestimmten, die Druckfestigkeit erhöhenden Additiven in synthetischen Esterölen. Das kann bei dünnen Schichten zum **Entsilbern** führen.*
***Magnesium** wird lediglich dann angegriffen, wenn Wasser (Hydrolyse) zugegen ist.*

***Zink** dient als galvanischer Korrosionsschutz auch dem Kadmiumersatz. Es bildet mit synthetischen Ölen Zinkseifen. Deshalb ist es im Ölsystem nicht zu verwenden.*

***Koks- und lackartige Ablagerungen**: Gealtertes Öl neigt zur Bildung von Ablagerungen. Bereits geringe Mengen reichen aus, dass **Ventile hängen** bleiben oder damit sich ein **Breather (Luftabscheider) zusetzt**. Das Ablassen des „Altöls" **entfernt Verunreinigungen,** die sich an bereits vorhandene Ablagerungen anlagern und konzentrieren, nicht. Das **beschleunigt** deren Aufbau weiter.*
*So lässt sich, zusammen mit ungünstigen örtlichen Betriebsbedingungen ein **starker Aufbau von Koks** in triebwerksspezifischen Zonen erklären.*

© Axel Rossmann - Turbomoment
Lehrsammlungsunterlage nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Das Ölsystem, Probleme

Bereits anhaftende Ablagerungen *können mit dem Ablassen des Öls* ***nicht entfernt*** *werden. Auch in frischem Öl fehlt unter Betriebsbedingungen die notwendige* ***Löslichkeit****. Siebe und Filter enthalten dagegen bereits lose Ablagerungen.*
Auf ***lackähnliche (varnish) Ablagerungen*** *hat das Ölwechselintervall erfahrungsgemäß kaum Einfluss. Deshalb wurde vermutet, dass frisches Öl weniger schnell altert, wenn sich* ***Spuren instabiler Verbindungen*** *noch nicht absetzten. Trotzdem kann die Veränderung von Viskosität und Säurezahl den Ölwechsel notwendig machen.*

Bild 7.1-4 *(Lit. 7.1-2): Die angegebenen Temperaturen entsprechen näherungsweise den maximal zulässigen Werten für Öl und Kraftstoff ziviler Triebwerke. Wegen langer Zeitintervalle bis zum Ölwechsel sind diese Werte eher konservativ. Bei Kampfflugzeugen ist mit höheren Öltemperaturen zu rechnen. Das wird mit angehobenen Grenzwerten berücksichtigt (Bild 7.1.1-1). Die Temperatur hat entscheidenden Einfluss auf* ***Lebensdauer*** *(Bild 7.1-3) und* ***Betriebsverhalten*** *eines Triebwerksöls. Gegebenenfalls spielt ein* ***kraftstoffgekühlter Wärmetauscher*** *(Kraftstoffvorwärmung) eine große Rolle (Bild 7.1.3.2.2-1.2). Seine Wirksamkeit hängt von den* ***Kraftstofftemperaturen*** *ab. Zum einen muss ausreichende* ***Wärmeabfuhr aus dem Öl*** *gewährleistet sein. Zum anderen muss die* ***Vereisung des Kraftstoffs verhindert*** *werden.*
Für die Einschätzung der Viskosität sind als Hilfe Raumtemperaturwerte von Wasser und Honig als Extreme angegeben.

Bild 7.1-5 *(Lit. 7.1-3): Die* ***Viskosität*** *eines Triebwerksöls beeinflusst die* ***Tragfähigkeit*** *entscheidend. Es handelt sich um den Widerstand mit dem ein Ölfilm die Berührung zweier Flächen verhindert. Eine solche Situation tritt besonders bei Gleit- und Wälzlagern sowie an Zahnflanken auf. Je niedriger die Viskosität, d.h. je dünnflüssiger das Öl, umso geringer ist die Tragfähigkeit(Bild 6.3.1.1-8).*

Die Abhängigkeit der Viskosität eines Öls von der Temperatur ist u.A. von großer Bedeutung für die Schmierfilmdicke. Das beeinflusst die Wälzermüdung, d.h die Lebensdauer von Wälz-, Gleitlagern und Zahnrädern.

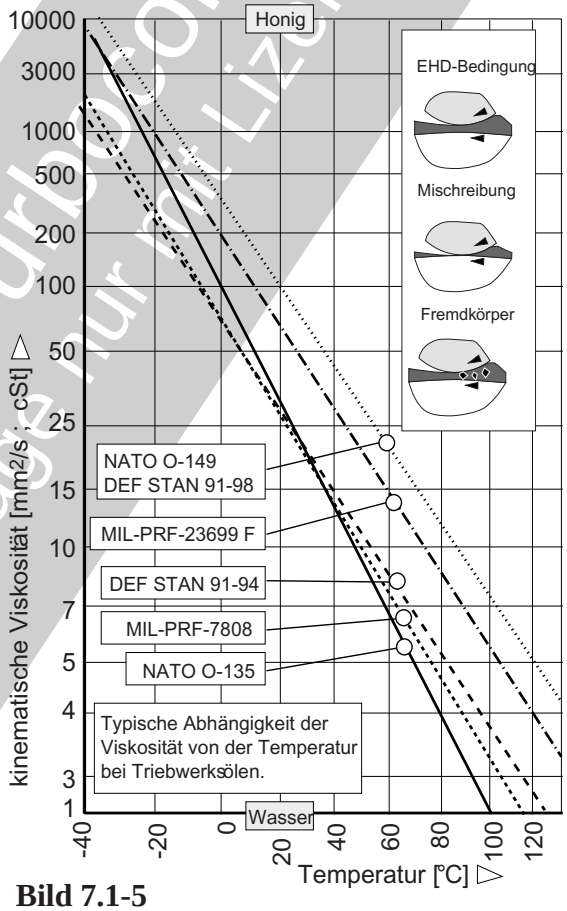


Bild 7.1-5

Die ***Wirkung der Viskosität*** *auf die Tragfähigkeit beruht auf zwei Effekten. Einmal, indem das Öl bei senkrechter Bewegung der Flächen zueinander* ***aus dem Spalt gedrückt*** *werden muss. Zum anderen, dass bei zueinander gleitenden Flächen das Öl von der* ***Haftung in den Spalt gezogen*** *wird. So kann sich ein trennender Druck dynamisch aufbauen. Er besteht nicht nur bei Gleitlagern, sondern auch zwischen abwälzenden Flächen. Beispiele sind Laufflächen von Wälzlagern und Zahnradflanken.*
Ist der trennende Schmierfilm dünner als die auslegungsgemäße ***Feinheit der Filter****, werden mögliche* ***Ölverunreinigungen*** *zwischen den kraftübertragenden Flächen gequetscht. Die*

© AVB Bossmann - Turbocom GmbH als Urheberrechtsinhaber nur mit Lizenz

Folgen sind mechanische Schädigungen wie Kerben, eingedrückte Partikel und Riefen. Sie ***verkürzen die Lebensdauer*** *(Bild 6.3.1.1-9) durch* ***Verschleiß*** *und* ***Ermüdungsausbrüche*** *(Ermüdungspittings, Bild 6.3.1.1-4 und Bild 6.4.1-5). Auch wenn die Feinheit der Filter unter der Schmierfilmdicke liegt ist definitionsgemäß mit* ***Verschleiß*** *zu rechnen. Selbst bei einem 3 µ m Filter können statistisch 50 µ m Partikel durchtreten. Eine* ***Ermüdung durch Partikeleindruck*** *(Bild 6.3.1.1-9) wird trotzdem unwahrscheinlicher.*
Akute Schädigungsgefahr besteht durch Verschleiß und ***Kaltverschweißen*** *(Fressen).*

Bild 7.1-6 *(Lit. 7.1-2): Der Wärmehaushalt des (Schmier-) Ölsystems ist für sein Betriebsverhalten entscheidend. Damit sind auch die zu versorgenden Teile (Bild 7.1-5) betroffen. Nutzungsdauer und Eigenschaften sind in erster Linie von den Betriebstemperaturen bestimmt (Bild 7.1-3). Das dargestellte Ölsystem ist ein vereinfachtes Schema. Es zeigt typische Komponenten, die zum Wärmehaushalt merklich beitragen (Bild 7.1-1).*
Wärmequellen *(siehe Schaubild unten):*

Hauptlager *tragen durch* ***Panschen, Walken*** *und* ***Reibung*** *(mechanisch, Gas) den größten Teil zur Ölerwärmung bei. Zusätzlich ist mit* ***Heißluftzutritt als Leckage*** *von Labyrinthdichtungen der Lagergehäuse zu rechnen. In den Labyrinthdichtungen kann durch* ***Luftreibung und Quirlverluste*** *(engl. windage) der Leckstrom weiter aufgeheizt werden.*
Von einem ***Öl****(film)* ***gedämpfte Lager*** *(Bild 6.3.1.1-2) erzeugen darin durch Walken (engl. churning) Wärme. Zusätzlich wird diese aus dem Lageraußenring in den Ölfilm übertragen.*

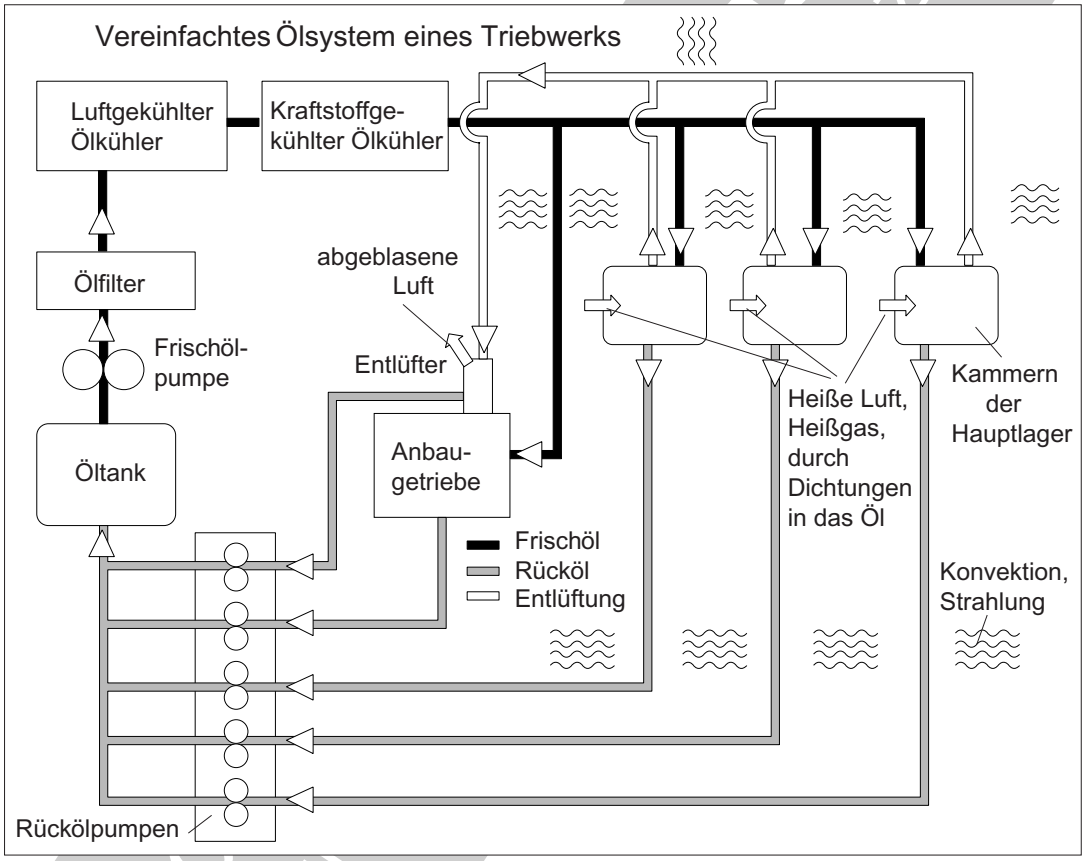
Anbaugetriebe *und* ***Hauptlagergehäuse*** *weisen mehrere wärmeerzeugende Komponenten auf. Die* ***Luftreibung*** *ist dabei nicht vernachlässigbar.*
- Durch ***Rohrleitungen*** *und Wände der* ***Lagergehäuse*** *kann trotz Isolation Wärme aus einer heißen Umgebung viel Wärme in das Innere und damit in das Öl gelangen.*
- ***Zahnräder*** *erzeugen besonders durch Reibung in den kraftübertragenden Verzahnungen und durch '****Panschen****' Wärme.*
- ***Wälzlager***
- ***Dichtungen*** *erzeugen ebenfalls Wärme. Bei Gleitringdichtungen entsteht Wärme im Ölfilm zwischen den Gleitflächen.*
- ***Kupplungen*** *mit Relativbewegungen zwischen den Anlageflächen.****Ölpumpen****: Die Menge der erzeugten Wärme ist in hohem Maß prinzipbedingt. In* ***Zahnradpumpen*** *entsteht sie durch Reibung (Zahneingriff, gegen Dichtungen, Gleitlager), Ölfilmscherung und Walken. Die Wärme wird zumindest teilweise an das Öl abgegeben.*

Ölkühler*: Für den Wärmehaushalt des Ölsystems ist die* ***Wärmeabfuhr*** *aus dem Öl von entscheidender Bedeutung. Hierfür werden* ***Wärmetauscher*** *verwendet. Sie übertragen die Wärme an Luft oder Kraftstoff (Bild 7.1.3.2.2-1.2). Die Effektivität hängt nicht zuletzt von der Temperatur dieser Transportmedien ab.*
In Öl/Kraftstoff-Wärmetauschern wird die Kraftstofftemperatur beispielsweise von ***aerodynamischer Aufheizung*** *mitbestimmt.* ***Dabei erwärmen sich besonders die Flügeltanks bei hohen Fluggeschwindigkeiten*** *und die Flügelvereisung wird vermindert (Bild 7.1.4-3). Das wird speziell beim* ***Überschallflug*** *deutlich und lässt über den Wärmetauscher die Öltemperatur ansteigen. Wurde dies in der Auslegung nicht ausreichend berücksichtigt, kann die Öltemperatur nicht mehr auf den angestrebten Wert abgesenkt werden (Bild 7.1.4-3). Damit werden sogar* ***Ölfeuer*** *begünstigt (Bild 7.1.4-4).*
Auch die ***Art der Kraftstoffpumpen*** *bestimmt die* ***Wärmeerzeugung*** *und beeinflusst damit die Kraftstofftemperatur. Wegen der Einstellbarkeit sind Axialkolbenpumpen (Bild 8.3-4, Lit. 7.1-9) günstiger. Ihr hoher Preis führte jedoch zu Zahnradpumpen mit höherem Wärmeanfall.*
Zu unterscheiden sind Innen- und Außenzahnradpumpen. Der Wärmeeintrag hängt in

© AVD PC Schmann - Tulpengasse 1 - 1010 Wien - Ausbildungsunterlagen Informatik

Systeme und Betriebsstoffe: Das Ölsystem, Probleme

Die Beherrschung des Wärmehaushalts eines Ölsystems ist eine anspruchsvolle Aufgabe.



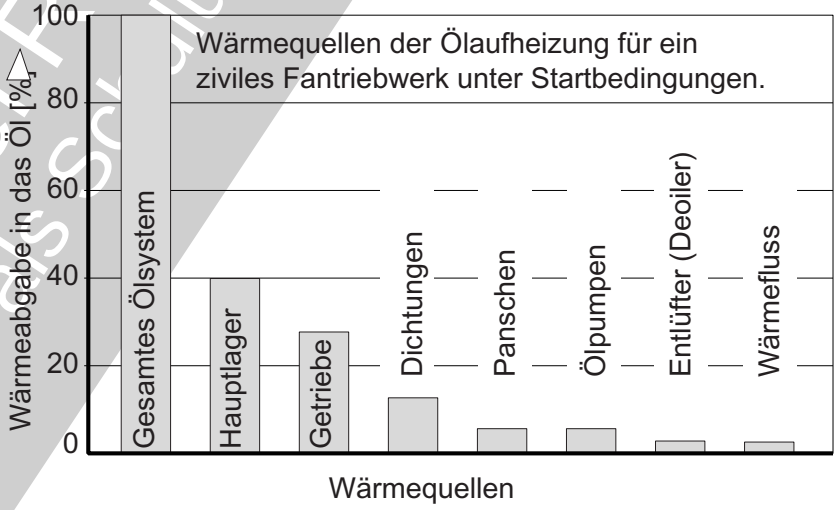


Bild 7.1-6

erster Linie vom Wirkungsgrad ab. Kompensierte Innenzahnradpumpen kommen Axialkolbenpumpen im Wirkungsgrad (92%) sehr nah.

© Axel Pu... als Skriptum

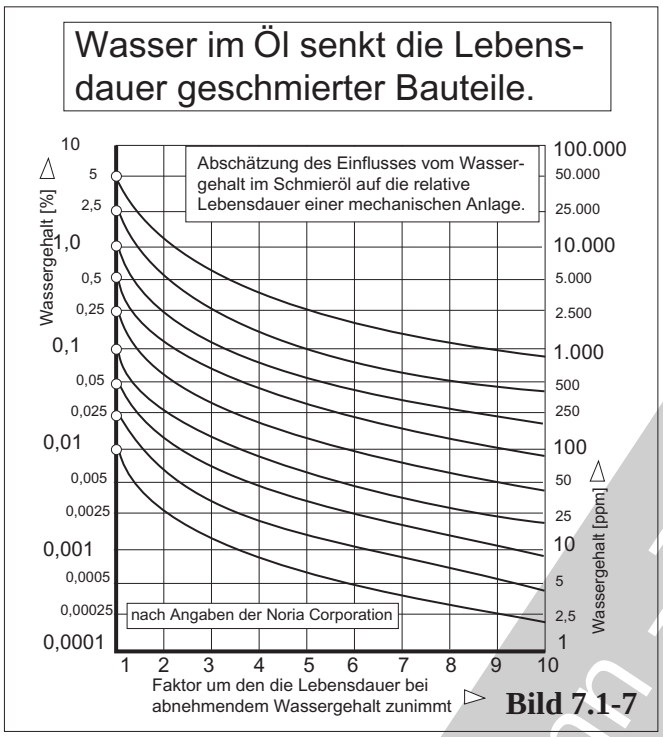


Bild 7.1-7

Bild 7.1-7 *(Lit. 7.1-7): Der* ***Wassergehalt*** *eines Öls kann mit der zu erwartenden* ***Lebensdauer der geschmierten Teile*** *in Verbindung gebracht werden. Dabei spielen auch* ***wasserbedingte Veränderungen*** *des Öls eine Rolle (Bild 7.1.3.2.1-1). Die* ***Schadensmechanismen*** *können sich auch in ihrer Wirkung kombinieren und so verstärken. Es handelt sich um:*

*- **Korrosion**: Besonders Stähle rosten, d.h. sie bilden Eisenoxide. Hat sich Säure gebildet (Bild 7.1-3) werden auch austenitische Stähle angegriffen.* ***Rostpartikel wirken abrasiv*** *und erzeugen frische reaktive Metalloberflächen. Diese korrodieren schneller und beschleunigen so die Schädigung.*

*- **Erosion** kann als reiner **Tropfenschlag** (Band 1 Kapitel 5.5.1.2) auftreten. Die Schädigung wird mit der Oberflächentemperatur verstärkt (engl.* ***water etching****). Dampfbildung und Thermoermüdung dürften dabei das Entstehen von Grübchen beschleunigen.*

*- **Kavitation** (Band 1 Kapitel 5.5.1.3) ist eine Folge der Implosion von Dampfblasen im Öl. Wasser neigt bei Druckabfall zum frühen Verdampfen. Das gilt für die Saugseite von Pumpen oder auf Gleitflächen (z.B. Gleitringdichtungen, Bild 6.10.2.2-2). Der Effekt wird durch eine von* ***Wasser begünstigte Luftaufnahme*** *des Öls verstärkt.*

*- **Wasserstoffversprödung** (engl. hydrogen embrittlement, Band 1 Kapitel 5.7) entsteht, wenn das im Öl befindliche* ***Wasser in Mikrorisse eindringt*** *und dort durch Öffnen und Schließen der Rissflächen unter hohen Druck gerät. Dabei zersetzt es sich und gibt atomaren Wasserstoff frei, der in den Stahl diffundiert. Das begünstigt den Rissfortschritt. Dieser Effekt tritt beispielsweise bei Ermüdungsrissen in Wälzflächen auf und beschleunigt so Ermüdungsausbrüche (pittings, Bild 6.3.1.1-4).*

*- **Oxidation von Gleitschichten** durch Säurebildung und Zersetzung von Wasser mit Entstehung von Sauerstoff. Auch scheinbar korrosionsfeste Schichten aus Zinn und Blei (‘**Weißmetall**’) können betroffen sein (engl. babbitt). Solche Schichten sind in Lagerungen mancher Propellergetriebe zu finden.*

*- **Verschleiß** durch metallischen Laufflächenkontakt als Folge einer zu geringen Tragfähigkeit des wasserbelasteten Öls. Auch harte Ablagerungen aus dem Wasser, können Verschleiß hervorrufen.*

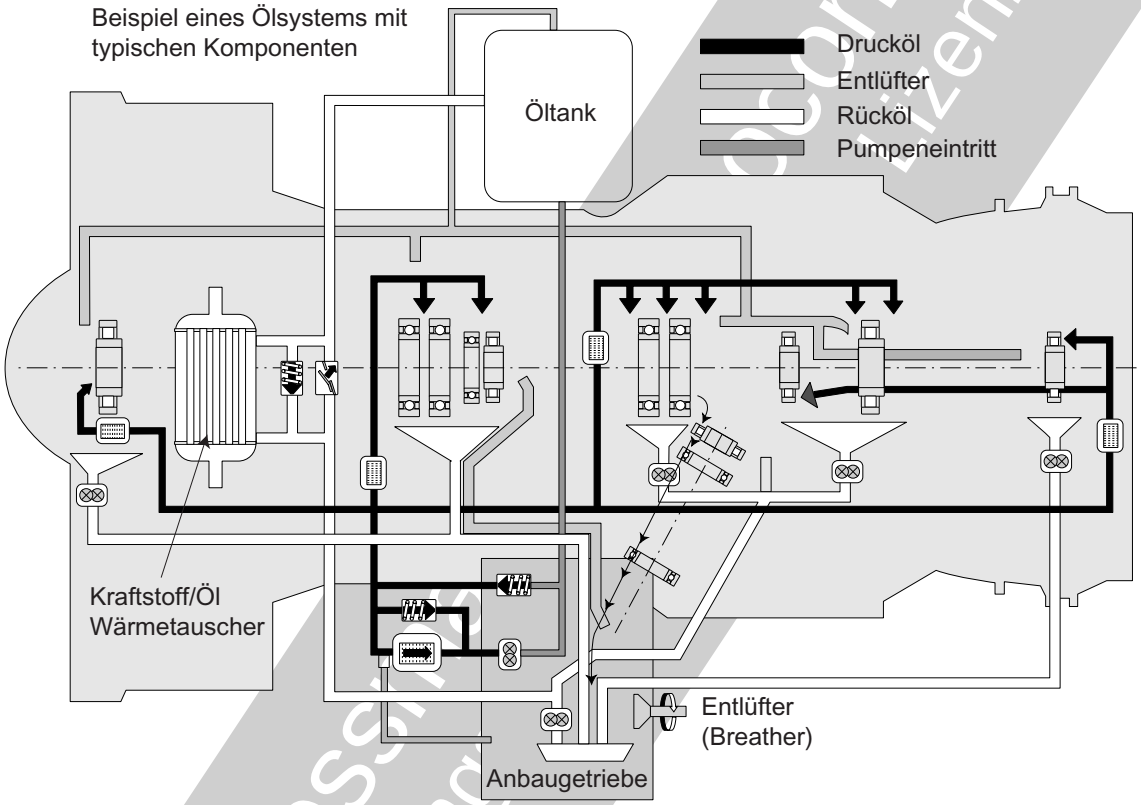
Bild 7.1-8 *(Lit. 7.1-5): Schäden an Komponenten eines Ölsystems können sich in Form von Partikeln anzeigen. Diese können auch im Öl feinst verteilt sein. Die* ***chemische Zusammensetzung*** *dieser Partikel lässt* ***Rückschlüsse auf betroffene Komponenten*** *zu (Bild 7.2-4.2 und 7.2-6). Damit besteht die Chance* ***frühzeitiger Identifikation und Ursachenfindung****. Im Schaubild unten sind die Legierungselemente typischer Werkstoffe von Komponenten im Ölsystem dem* ***Analysenbefund*** *der Partikel zugeordnet (siehe Kapitel 7.1.3.1 und Kapitel 7.2). Häufig werden vom OEM oder militärischen Betreibern dazu detaillierte Typspezifische Angaben gemacht (Lit. 7.2-16).*

© Ivo Rossmann - Tribocorrosion
ausschließlich als Unterlage zur Lehrveranstaltung

Systeme und Betriebsstoffe: Das Ölsystem, Probleme

Metallverunreinigungen im Ölkreislauf können wichtige Hinweise auf den Entstehungsort und ein Problem geben.

Beispiel eines Ölsystems mit typischen Komponenten



Ursprung \ Metalle im Öl	Fe	Ag	Al	Cr	Cu	Mg	Na	Ni	Pb	Si	Sn	Ti	B	Ba	Mo	Zn	Ca	Sb	Mn
Filter/Siebe (Strainer)																●			
Zahnradpumpe	●								●		●					●		●	
Bypassventil druckgesteuert	●																		●
Bypassventil temperaturgesteuert					●														
Wälzlager	●	●						●							●				●
Tank	●		●				○			○		●	●	●			○		
Entlüfter, Pumpe	●	●	●			●		●											●
Wärmetauscher	●		●		●														
Labyrinthe		○						●		○		●	●						
Gleitringdichtungen		●		●						○			●						
Gehäuse			●	○		●				○		●							

Die Angaben in dieser Tabelle haben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie sind stark konstruktionsabhängig.
● metallisch ○ Verbindung

Bild 7.1-8

© Axel Rossmann - Tutoconcept
als Schulungsunterlage nutzlizenz

Bild 7.1-9 *(Lit. 7.1-2): Sammelt sich Öl an einer Stelle im System, steht es dem Kreislauf und damit seiner Aufgabe nicht mehr zur Verfügung. Die geringere zirkulierende Ölmenge heizt sich durch die gleichbleibende, abzutransportierende Wärmemenge schneller auf.*
Es gibt zwei Hauptursachen die Öl dem Kreislauf entziehen:

*- **Oil Hiding** („Verstecken des Öls“): In einem Ölsystem sind genügend Möglichkeiten für eine **Ölansammlung** vorhanden. Es entzieht sich so der Absaugung. Dies gilt besonders für Triebwerke in Kampfflugzeugen bei besonderen Manövern mit hohen oder negativen g-Lasten (z.B. Rückenflug). **Ölnester** werden zwar im Tank minimiert, sind aber trotz Schnorchelsystemen nicht auszuschließen (Lit. 7.1-10). Die relativ komplexe Form der Anbaugetriebe (Skizzen oben, Lit. 7.1-10) oder in Bereichen des Rückölsystems begünstigen Ölansammlungen.*

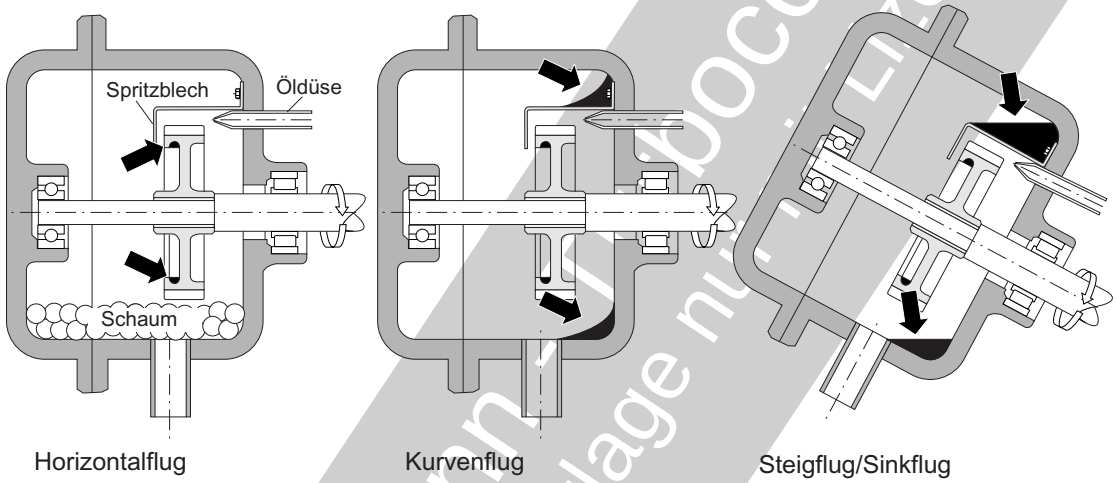
*- **Versagender oder nicht ausreichender Ölabfluss**: **Schaum- und Blasenbildung** können ausreichend Öl im Kreislauf verhindern. Das ist der Fall, wenn Schaum von der Absaugung nicht ausreichend erfasst wird. Blasen entstehen durch Luft und/oder Dampfbildung (z.B. Wasser im Kraftstoff). Sie wirken als **Pfropfen (vapor locking) im Rückflusssystem** (engl. scavenge system).*

*Bei **Ölmangel** und Schmierungsproblemen ist mit Überhitzung und Überlastung von Wälz- und Gleitflächen (Lagerlaufbahnen, Zahnflanken) zu rechnen. Die Folge sind gefährliche Schäden wie Hauptlagerschäden oder der Ausfall von Anbaugeräten.*
*Auch die **Ölansammlungen** (Rahmen unten) selbst können im Kontakt mit rotierenden Teilen schadenswirksam werden. Dabei wirkt*
*- **Panschen** mit Aufheizung des nicht abfließenden Öls.*
*- Erhöhte **Leckraten** in den Labyrinthen von Lagerkammern. Folgen sind Ölaustritt mit **Verschmutzungen** im Triebwerk. Im Extrem-*

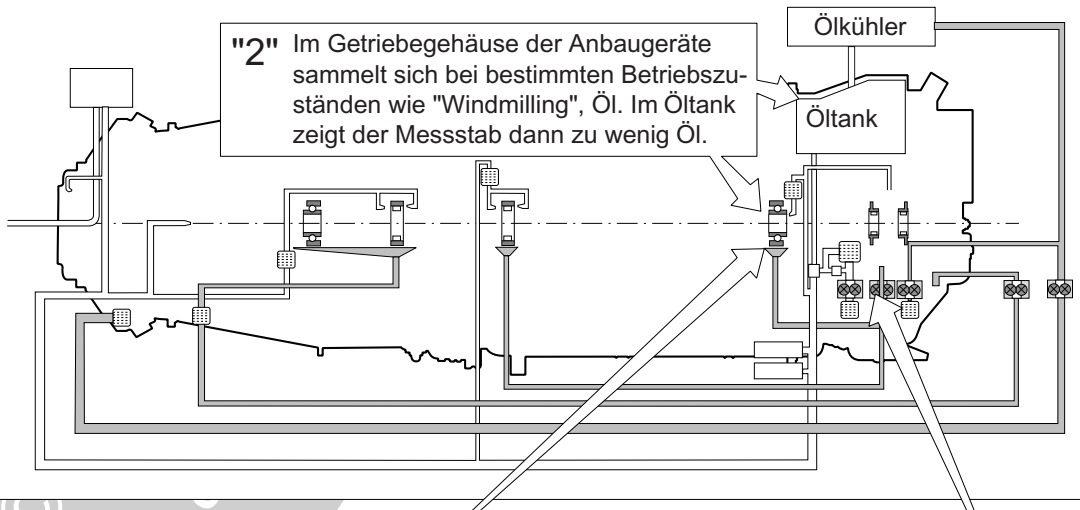
Systeme und Betriebsstoffe: Das Ölsystem, Probleme

Öl kann sich im Ölsystem "verstecken" und steht dann nicht mehr zur Verfügung. Man spricht von "Oil Hiding".

Schematisches Modell eines Getriebebereichs im Ölsystem mit typischen "Ölverstecken" ■



Beispiel für die Auswirkung von "Oilhiding"



"2" Im Getriebegehäuse der Anbaugeräte sammelt sich bei bestimmten Betriebszuständen wie "Windmilling", Öl. Im Öltank zeigt der Messstab dann zu wenig Öl.

"3" Wird das Lager vom gestauten Öl geflutet, läuft Öl in den Triebwerkseintritt und verschmutzt die Gondel sowie den Flügel.

"1" Bei niedriger Gaserzeugerdrehzahl kann die Rückölpumpe im Anbaugetriebe nicht mehr ausreichend Öl absaugen.

Bild 7.1-9

fall besteht die Gefahr eines ***Ölfeuers*** *(Bild 7.1.4-12).*

Literatur zu Kapitel 7.1

7.1-1 I.E.Traeger, „Aircraft Gas Turbine Engine Technology, Second Edition“, Verlag : Glencoe/McGraw-Hill 1994, ISBN 0-07-065158-2., Seite 267-293.

7.1-2 H.Streifinger, „Fuel/Oil System Thermal Management in Aircraft Turbine Engines“, Paper RTO MP-8, des RTO AVT Symposium on „Design Principles and Methods for Aircraft Gas Turbine Engines“, Toulouse, France, 11-15 May 1998 Seite 12-1 bis 12-10.

7.1-3 The AeroShell Book, Edition 18, 2003, „Aeroshell Turbine Oils“, www.shell.com/aviation, Seite 1-90.

7.1-4 D.W.Bendell, „Factors Influencing Aircraft Turbine Engine Oil Drain Practices“ Paper des SAE Automotive Engineering Congress, Detroit, Michigan, January 10-14, 1966, Seite 148-152.

7.1-5 „Tracking Footprints from Engine Oil“, Zeitschrift: „Aviation Engineering & Maintenance Magazin“, 1979, Sept, Seite 30-33.

7.1-6 M.J.Kroes, T.W.Wild, „Aircraft Powerplants, Seventh Edition“, Verlag : Glencoe/McGraw-Hill 1990, ISBN 0-02-801874-5, Seite 343-356, 470.

7.1-7 M.Duncanson, „Detecting and Controlling Water in Oil“, Exxon Mobil, www.practicingoilanalysis.com, 17.02.2006, Seite 1-9.

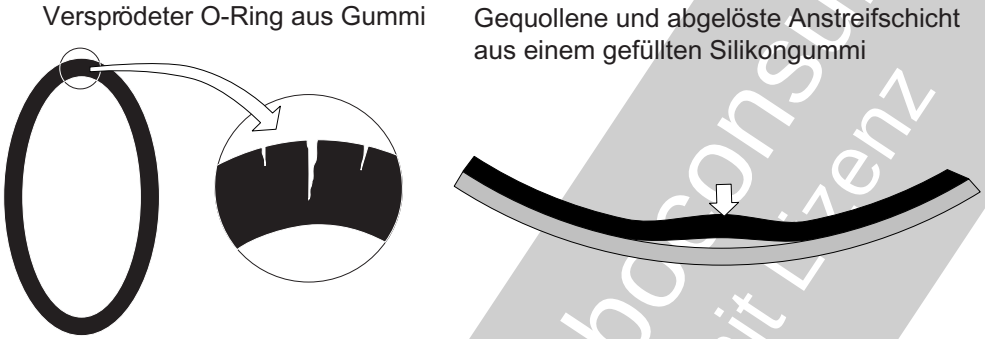
7.1-8 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 2 2001, ISBN 3-00-008429-0, Kapitel 9.2

7.1-9 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 5 2008, ISBN 978-3-00-025780-3, Kapitel 22.2.2

7.1-10 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 3 2000, ISBN 3-00-017733-7, Kapitel 11.2.5.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

7.1.1 Problematische Schmieröleigenschaften



Öl wird in der Fachliteratur auch als **Konstruktionselement** eingestuft. Der Konstrukteur hat keinen direkten Einfluss auf die Herstellung. Dafür sind, wie bei vielen Maschinenelementen, Hersteller/Anbieter verantwortlich. Aufgabe des Konstrukteurs ist es, die notwendigen Eigenschaften konstruktions- und anwendungsspezifisch zu definieren, um Funktion und Betriebsebensdauer der Maschine zu gewährleisten. Dabei dient Öl nicht nur der **Schmierung**. Meist liegt die dazu benötigte Menge bei lediglich 10%. Seine Hauptaufgabe ist gewöhnlich die **Wärmeabfuhr,** um Überhitzung zu verhindern. Dabei wird das Öl hoch temperaturbelastet, was die 'Öllebensdauer' stark reduziert. Trotzdem muss der Betrieb mit einer ausreichend langen Verwendbarkeit gewährleistet sein. Dazu haben die Schmieröle hochbelasteter Maschinen, insbesondere Turbomaschinen und Kolbenmotore viele Forderungen zu erfüllen. Das folgende Kapitel beruht auf Erfahrungen mit Flugtriebwerken, die in vieler Hinsicht als 'Spitze des Maschinenbaus' gelten können.

- Gute **Schmiereigenschaften**.
- **Wärmetransport** aus den geschmierten Komponenten.
- Gute **Pumpbarkeit**.
- Geringe **Entzündlichkeit**.
- **Thermische** und **mechanische Stabilität**.
- **Passive und aktive Verträglichkeit** gegenüber benetzten Werkstoffen.
- Geringe Neigung zur **Aufnahme von Wasser und Luft**.
- **Lagerfähigkeit**.
- Geringe **Schaumbildung**.
- Niedrige **Verdampfungsrate**.
- Gute **Filtrierbarkeit**.
- **Umweltverträglich**, möglichst nicht toxisch.
- **Kostengünstig**.
- **Verfügbar**.
- **Gesundheitsunbedenklichkeit**, z.B. Risiken bei TCP, siehe Bild 7.1.1-7

Diese Eigenschaften müssen von den spezifizierten chemischen und physikalischen Daten bestmöglich anwendungsspezifisch gewährleistet sein. Abhängig von der Konstruktion des Ölsystems, den zu schmierenden Komponenten und den Betriebsparametern ist das nicht immer voll befriedigend möglich. So kann sich ein Kurzzeiteinsatz mit vielen Unterbrechungen deutlich vom Langzeitbetrieb unterscheiden. Dabei spielen auch die Stillstandszeiten eine Rolle (Schwitzwasseransammlung, Gasaufnahme, Korrosion). Es ist durchaus möglich, dass Probleme erst nach längeren Laufzeiten, als **Folge betriebsbedingter Veränderungen der Öleigenschaften** auftreten. Hierzu zählen Alterungseffekte, Koksbildung und Wasseraufnahme.

© Axel Pressmann - Hydroconsult
aus Schulungsunterlagen mit Lizenz

Bild 7.1.1-1 *(Lit. 7.1.1-2 und Lit. 7.1.1-4):* ***Normen bzw. Spezifikationen*** *legen in vielen Fällen lediglich den* ***Rahmen bzw. die Grenzen der Öleigenschaften*** *fest. Diese können von unterschiedlichen produktspezifischen „Kompositionen" erfüllt werden. Das ist ein Grund, warum Öle einer Spezifikation verschiedene betriebsbedingte Änderungen (Alterung) erfahren (Bild 7.1.2-1).*

Die wichtigsten Forderungen an das Betriebsverhalten soll am Beispiel von Triebwerksölen gezeigt werden:

- Ausreichend niedrige Viskosität bzw. ***Dünnflüssigkeit bei niedrigen Temperaturen****. Die Viskosität liegt mit einer kinematischen Zähigkeit von 2 - 9 mm^2s^{-1} bei 100 °C deutlich unter der üblicher Motorenöle mit über 20 mm^2s^{-1}.*

- Genügend ***Tragfähigkeit bei hohen Temperaturen*** *und*

- hohe thermische Stabilität *mit* ***Oxidationsfestigkeit****. Dabei sind hochbelastete* ***Getriebe*** *im Ölkreislauf, der auch der Lagerschmierung dient, besonders zu berücksichtigen.*

Beispielsweise wurden ***Mineralöle*** *in Triebwerkstypen der 50er Jahre verwendet. Ihre Viskosität über 10 mm^2s^{-1} bei 40 °C war relativ hoch und wurde für die damals häufigeren hochbelasteten* ***Propellergetriebe*** *benötigt. Trotzdem wurden besonders für* ***Hubschraubergetriebe*** *zusätzlich Additive (Extreme Pressure = EP-Zusätze) verwendet, um die erforderliche* ***Tragfähigkeit*** *zu gewährleisten.*

Die zwei Öle am Anfang der Tabelle (Öl 2 und Öl 3)sind mineralisch. Ihre Viskosität liegt für Raumtemperatur bei ca. 10 und 12 mm^2s^{-1} und 100°C im Bereich von 2 mm^2s^{-1} bzw. 3 mm^2s^{-1}. Mit der Entwicklung zu höheren Betriebsbelastungen/-temperaturen stiegen die Anforderungen an das Öl. ***Stabilität und Flüchtigkeit der Mineralöle genügten nun nicht mehr****. Man ging deshalb zu* ***synthetischen Ölen*** *(dunkles Feld) über. Die Herstellung erfolgte aus natürlichen Ölen. Ihre Basis sind* ***organische Verbindungen,*** *sog.* ***Ester****. Diese bilden sich bei der Reaktion mit Säuren und bestehen aus Kohlenwasserstoffketten die über Doppelbindungen mit Sauerstoffatomen verbunden sind. Die Viskosität liegt um 3 mm^2s^{-1} bei 100°C und ist damit relativ niedrig (Bild 7.1-5). Der* ***Viskositätswert bei 100 °C dient der Einordnung zu einem Öltyp/einer Gruppe****. Um die Tragfähigkeit zu verbessern, wurden* ***Verdicker****, ebenfalls Ester, hinzugefügt. Zusätzlich sind* ***Stabilisatoren*** *zur Verbesserung der thermischen Stabilität notwendig.*

*Es gelang Viskositäten bei 100 °C von ca. 7 mm^2s^{-1} zu erreichen. Sie wurden besonders in England bevorzugt (DEF-STAN 91-96). Anfangs verwendete man in den USA synthetische Öle entsprechend dem Viskositätstyp von 3 mm^2s^{-1}(****MIL- 7808****), sie setzten sich allgemein durch. Für eine erhöhte Öllebensdauer wurde DEF-STAN 91-94 entwickelt.*

Zur weiteren Verbesserung thermischer Stabilität und Tragfähigkeit wurden '5 mm^2s^{-1}- Öle' nach MIL-PRF-23699 geschaffen. Für einen noch anspruchsvolleren Einsatz wie in zivilen ***Überschallflugzeugen*** *hat das Öl nach DEF-STAN-91-100/1 (DOD-L-65734) weiter verbesserte Werte.*

Obwohl sich die 5 mm^2s^{-1}-Öle für die Anwendung in den ***Haupttriebwerken*** *von Verkehrsflugzeugen durchsetzten, werden '3 mm^2s^{-1}-Öle' vermehrt in* ***Hilfsantrieben*** *für Klimaanlage und Bordstrom (engl. APUs) verwendet. Der Grund ist die vergleichsweise niedrige Viskosität bei sehr niedrigen Temperaturen zwischen -20 und -40°C. APUs werden gewöhnlich beim Reiseflug in großen Höhen abgeschaltet und kühlen dann auf die* ***extremen Umgebungstemperaturen*** *ab. Eine hohe Ölviskosität lässt die zu überwindende Zähigkeit ansteigen. Das führt beim Start zu besonderer* ***Anlasserbeanspruchung mit einem Drehzahlabfall****. Damit wird das anzulassende Aggregat gefährdet (Lit.7.1.1-15). Dieses Problem verschärft sich mit der schlechteren Zündwilligkeit kalter Kraftstoffe (Bild 8.1-2 und Lit.7.1.1-17).*

Grundsätzlich ist anzumerken, dass die Ester-Verbindungen in den synthetischen Ölen ***Kunststoffe wie Elastomere (Dichtungen, Anstreifbeläge), Kunstharze (Farben und Beschichtungen, Isolationen, Plastikwerkstoffe) angreifen*** *und schädigen können. Das gilt auch*

© Vogelpohl - Turbopropdt als Schulungsunterlage nutzen

Systeme und Betriebsstoffe: Schmieröleigenschaften

Schmieröle hochbelasteter Maschinen am Beispiel von Turbotriebwerken

Schmierölbezeichnungen (Normen)				Firmen-Bezeichnungen
NATO	USA	GB	FR	☐ Mineralöl ■ synthetisch /Ester
O-133	MIL-O-6081 MIL-PRF-6801D (Grade 1010)	-	AIR 3516/A	Aeroshell Oil 2
O-135	-	DEF STAN 91-99	AIR 3516/B	Aeroshell Oil 3
O-148	MIL-L-7808 (Type I) MIL-PRF-7808L Grade 3	-	-	BPTO 2389 Aeroshell Oil 308
-	-	DEF STAN 91-94	-	Aeroshell Oil 390
O-149	-	DEF STAN 91-98	AIR 3517	Aeroshell Oil 750
O-154 O-156	MIL-L-23699 (Type II) MIL-L-23699 C			Mobil Jet Oil II, Turbo Oil 2380
	MIL-PRF-23699E			Mobil Jet Oil 254
	MIL-PRF-23699F (HTS)	DEF STAN 91-101	DCSEA 299/A	Aeroshell Oil 560, BPTO 2197
	MIL-PRF-23699F (STD)	DEF STAN 91-101/1	DCSEA 299/A	Aeroshell Oil 500 und 529, BPTO 2380
O-160	DOD-L-85734 (AS)	DEF STAN 91-100/1	-	Aeroshell Oil 555, BPTO 274

Bei Verwendung dieser Angaben ist in jedem Fall die Gültigkeit zu prüfen.

Bild 7.1.1-1

für einige ***Metalle*** *(Bild 7.1-8 und Bild 7.1.1-2). Das erfordert die* ***Auswahl geeigneter Werkstoffe im Ölsystem****. Zu bedenken ist, dass auch Triebwerksbereiche außerhalb des Ölsystems bei Einfüllen oder Demontagen (****Wartung****) von* ***Lecköl*** *benetzt werden können. Dazu gehören Elastomere Anstreifschichten und Kunststoffe im Fan. Gegebenenfalls ist für alle potenziell betroffenen Werkstoffe in der Entwicklungsphase des Triebwerks oder bei Änderungen ein* ***Unbedenklichkeitsnachweis*** *zu erbringen (Lit. 2.3.1-8). Das gilt auch für ölbenetzte* ***Vielkeilverzahnungen*** *von Kupplungen (Bild 6.6.1-1 und 6.6.1-2). Dabei sind auch veränderte Öleigenschaften wie Alterung (Bild 7.1-3), zu berücksichtigen.* ***Proben für den Nachweis*** *haben diese Möglichkeit mit der geeigneten, ausreichend realitätsnahen,* ***Entnahme*** *zu berücksichtigen.*

Anmerkungen *zu den in der Tabelle angegebenen Ölen (Kennzeichnung durch NATO-Code oder GB-Code):*

O-133*: Mineralöl vom 2 mm²s⁻¹-Typ mit oxidationshemmendem Zusatz (anti-oxidant). Wird auch als* ***Korrosionsschutzöl*** *in gelagerten Kraftstoffsystemen, insbesondere Tanks verwendet. Es entspricht dem* ***russischen Öltyp*** *MK-8.*

O-135*: Mineralöl vom 3 mm²s⁻¹-Typ mit korrosionshemmendem Zusatz (anti-corrosion). Für frühe Einwellen-Einkreiser-Triebwerke entwickelt und für bestimmte* ***Hubschraubertriebwerke*** *zugelassen. Als* ***Korrosionsschutzöl*** *in gelagerten Kraftstoffsystemen, insbesondere Tanks verwendet. Es entspricht dem russischen Öltyp MK-8.*

O-148*: Synthetisches Öl vom 3 mm²s⁻¹-Typ mit Zusätzen zur Verbesserung des Verhaltens bei Oxidation, Korrosion und Verschleiß.*

DEF STAN 91-94*: Synthetisches Öl vom 3 mm²s⁻¹-Typ mit Zusätzen zur Verbesserung der Oxidationsfestigkeit und der Tragfähigkeit. Wegen seiner* ***relativ niedrigen Viskosität bei niedrigen Temperaturen*** *(Bild 7.1-5) bietet es*

© Axel Gesmann - Turbomaschinen - Ausschnittsunterlage nur zur Ansicht

*sich besonders für **APU**s an, um die Auswirkungen des sog. „**Cold Soak**“ zu minimieren. Standardöle haben bei - 40°C eine Viskosität von 10 000 mm^2s^{-1} verglichen mit 2000 mm^2s^{-1} dieses Öls.*

***O-149/O-159**: Synthetisches Öl vom $7^1/_2$ mm^2s^{-1}-Typ mit Zusätzen zur Anhebung der Viskosität sowie verbesserter Oxidationsbeständigkeit, thermischer Stabilität und Tragfähigkeit. Besonders für **Turboprop-Triebwerke** wegen der **Propellergetriebe** geeignet.*

***O-154**: Synthetisches Öl der „dritten Generation“ vom 5 mm^2s^{-1}-Typ mit Zusätzen zur **Unterdrückung der Koksbildung,** indem Oxidationsfestigkeit und thermische Stabilität erhöht werden. Bietet damit besonders für **moderne Ziviltriebwerke mit typisch hohen Druckverhältnissen** Vorteile wie:*

- *Sauberes Ölsystem,*
- *Erhöhte Tragfähigkeit ermöglicht längere Lagerlebensdauern.*
- *Niedrigere Wartungskosten.*

*Zu diesem gehören die militärischen Varianten „High Thermal Stability (**HTS**), Standard (**STD**) und der korrosionsschützende Öltyp (**C/L**).*

***O-160**: Synthetisches Öl der „dritten Generation“ vom 5 mm^2s^{-1}-Typ mit Zusätzen zur Verbesserung der Oxidationsfestigkeit und thermischen Stabilität sowie der Tragfähigkeit. Es wurde im Hinblick auf projektierte **Überschallverkehrsflugzeuge** konzipiert. Die Anwendung erfolgt nun in steigendem Maß in **Übertragungsgetrieben von Hubschraubern**.*

***Mischen von Ölen** einer Viskositätsgruppe ist bei synthetischen Ölen **untereinander möglich**. Erfolgt dies durch wiederholtes **Zugießen** in den Öltank bei aufeinander folgenden Wartungen (**top-off mixing**) ist die Veränderung („Schock“) für die Maschine nicht so abrupt. Aus diesem Grund wird bei Triebwerken üblicherweise nur nachgefüllt. Ein Ölwechsel wird vermieden. Bild 7.1.2-7 zeigt einen Fall, bei dem Schäden durch Ölkohle deutlich durch **Mischen verschiedener Öle** beeinflusst wurde. Deshalb wurden Vorgehensweisen genau vorgeschrieben. Grundsätzlich gelten jedoch die Angaben des OEM. Zusätzlich wird eine häufigere Inspektion der Ölfilter empfohlen.*

Unzulässig und gefährlich ist das Mischen von Mineralölen mit synthetischen Ölen!

*Abschließend soll auf **Gesundheitsrisiken** (Bild 7.1.1-7) im Umgang mit Schmierölen (Lit. 7.1.1-6) eingegangen werden.*

*Das wahrscheinlichste Risiko bei allen Ölen ist eine **Reizung von Augen, Haut und Atemwegen**. Das kann durch direkten, bei Haut mehrfachen Kontakt mit **Öl**, Öldampf und/oder **Ölnebel** geschehen. Bei **erhöhten Öltemperaturen** und **schlecht belüfteten Räumen** besteht eine Gefahr durch **Öldampf** und/oder Ölnebel. Deshalb müssen **Sicherheitsvorschriften** eingehalten werden (z.B. Safety Data Sheet = MSDS). Zur Vermeidung eines Kontakts mit Öl sind bei der **Handhabung vorgeschriebener Augenschutz, Handschuhe und Kleidung** zu tragen.*

*Auf keinen Fall darf das Öl mit dem Mund (z.B. über einen Schlauch) **angesaugt** werden. Dies ist weniger für den Magen bedenklich. Es besteht aber die Gefahr einer zeitweisen **Lungenentzündung**. **Gelangte Öl in den Mund, ist sofort ein Arzt zu konsultieren**.*

***Brennendes Öl** kann giftige Gase und **Verbrennungsprodukte** wie Aldehyde und Kohlenmonoxid freisetzen. Deshalb gilt hier besondere Vorsicht. Gegebenenfalls ist Sauerstoff zu inhalieren. In diesem Zusammenhang sind auch **Ölverunreinigungen in der Kabinenluft** zu betrachten (Lit. 7.1.1-17).*

© Aerospsmann - Turbopsmann - alle Rechte vorbehalten

Systeme und Betriebsstoffe: Schmieröleigenschaften

Die Verträglichkeit der Öle mit den Werkstoffen im Ölsystem ist ein wichtiges Auswahlkriterium.

Plastik Elastomere	Turbinenöle	
	Mineralbasis	synthetisch Ester
Fluorkarbon (Viton)	sehr gut	sehr gut
Acrylnitrile	gut	schlecht, bei hohem Nitrilanteil bis gut
Polyester	gut	schlecht bis ausreichend
Silikone	schlecht bis gut	schlecht bis ausreichend
PTFE (Teflon)	sehr gut	sehr gut
Nylon	schlecht bis gut	schlecht
Buna-S	schlecht	schlecht
Perbunan	gut	ausreichend bis gut
Methacrylate	gut	schlecht bis ausreichend
Neoprene	ausreichend bis gut	schlecht
Naturgummi	schlecht bis ausreichend	schlecht
Polyethylen	gut	gut
Butylgummi	sehr schlecht bis schlecht	schlecht bis ausreichend
PVC	schlecht bis gut	schlecht
Farben	Nur Epoxidbasis befriedigend, jedochVerfärbung durch Additive.	
Lacke/Imprägnierungen	Viele erweichen, Alkydlacke gut, aber wasserempfindlich	
Mineralöle, Pflanzenöle	Nicht kompatibel, auf keinen Fall mischen, auch nicht in Spuren!	
Metalle		
Kupfer	schlecht, fördert Ölalterung (katalytische Wirkung)	
Messing, Bronze	gut, kein unzulässiger Effekt	
Aluminium und Stähle	unbeeinflusst	
Kadmium	wird langsam angelöst, das verschlechtert den Korrosionsschutz	
Blei und Leg. mit Blei	vermeiden da Angriff	
Magnesium	bei Hydrolyse schlecht. Lackieren	
Inconel	gut/unbeeinflusst	
Zink	schlecht, bildet Zinkseifen. Auch nicht in Behältern verwenden.	
Titan	gut/unbeeinflusst	
Silber	gut, kann mit Additiven reagieren (Schwarzfärbung), Gleitverhalten?	
Chrom	gut/unbeeinflusst	
Nickel und Ni-Leg.	gut	
Zinn	gut	

Bild 7.1.1-2

© Axel Possnecker - Turbocons
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Bild 7.1.1-2 *(Lit. 7.1.1-2 und Lit. 7.1.1-4): Der Konstrukteur hat bereits eine geeignete Auswahl der* ***Werkstoffe für das Ölsystem*** *zu treffen. Dazu muss er auf* ***Kompatibilität*** *zu dem verwendeten Öl,* ***auch nach den vorgesehenen Betriebszeiten****, achten. Im Betrieb, bei Montage und Wartung, müssen die vorgeschriebenen/zugelassenen Bauteile verwendet werden. In diesem Zusammenhang können Kleinteile (z.B. Gleitdichtungen mit Elastomeren) und Hilfsstoffe (z.B. Beschichtungen, Dichtungspasten) besonders problematisch sein. Hier spielen auch Suspected Unapproved Parts (SUPs, Lit. 7.1.1-17) eine Rolle. Im Folgen-*

den wird das Verhalten einiger Materialien gegenüber synthetischen Kraftstoffen genauer betrachtet:

***Farben**: Die einzigen nicht angegriffenen bzw. weich werdenden sind Epoxide. Sie verfärben sich lediglich zu leichten Schattierungen. Das kann im Zusammenhang mit oxidationshemmenden Additiven stehen.*

***Kunststoffe** (Plastics): Die beste Beständigkeit zeigen **Polytetrafluorethylene** (= **PTFE**, „Teflon"®). Dass diese Werkstoffe nicht ganz unproblematisch sind, zeigt Bild 7.1.1-3. Besonders mit Bronze gefüllte PTFE -Lagerwerkstoffe haben eine herabgesetzte chemische Beständigkeit, was in erster Linie auf den **Füllstoff** zurückzuführen ist. Auch leichtes **Quellen** kann für Lagerungen mit engen Spielen äußerst bedenklich sein. Ein Beispiel ist das Klemmen von Leitschaufelverstellungen am Verdichter.*

***PVC** ist empfindlicher und wird in heißem Öl schnell weich.*

***Glasuren auf Kunststoffbasis** (engl. varnishes) auf Phenol- und Silikonbasis können in heißem Öl weich werden. Ausgehärtete Alkyd-Basis zeigt dagegen gute Beständigkeit, ist aber **wasserempfindlich**. In diesem Fall muss zusätzlich eine wasserfeste Versiegelung erfolgen.*

***Mineral- und Speiseöle sind mit synthetischen Ölen inkompatibel**. Sie dürfen auf keinen Fall vermischt werden. Besteht die Möglichkeit eines Kontakts, sind vorher **alle Spuren des anderen Öls zu entfernen**.*

***Reines Kupfer** hat in Mineralöl und synthetischen Ölen bei hohen Öltemperaturen einen ausgeprägten katalytischen Effekt. Es bilden sich Säuren. Eine solche Schädigung wird von **Kupferlegierungen** wie Messing (engl. brass) und Bronze nicht ausgelöst.*

***Aluminiumlegierungen und Stähle** sind beständig.*

***Magnesiumlegierungen** werden nur unter Gegenwart von Wasser angegriffen. Dazu ist eine Spaltung der Ester des synthetischen Öls durch eine **Reaktion mit Wasser** (**Hydrolyse**) notwendig. Als Schutz sind Epoxidharze geeignet (Band 1 Seite 5.4.1.2-9).*

*Ein Maß für **Säurebildung** ist die sog. **TAN** (Bild 7.1.2-1 und 7.2-4.1.2). Sie ist von der Alterung des Öls abhängig.*

***Zink** als galvanisch aufgebrachter Korrosionsschutz bildet mit synthetischem Öl Zinkseifen. Deshalb sollten für die Aufbewahrung und das Handling Gefäße aus verzinntem Stahlblech (**Zinn** wird nicht angegriffen) oder rostfreie Stahlbleche (Typ CrNi18/8) verwendet werden.*

***Silber und Silberlegierungen** können sich in synthetischem Öl mit bestimmten Additiven (zur Erhöhung der Tragfähigkeit) dunkel verfärben. Im Extremfall lösen sich dünne Schichten auf.*

***Kadmium** dient als Korrosionsschutz für Stähle in älteren Triebwerkstypen. Es geht bei höheren Temperaturen in synthetischem Öl in Lösung. Zwar werden dabei die Öleigenschaften nicht bedenklich verändert, der Korrosionsschutz verschlechtert sich jedoch.*

***Blei und Bleilegierungen** werden von synthetischen Ölen angegriffen und sind deshalb in solchen Ölsystemen (z.B.als Lot in Filtern und Sieben) zu vermeiden.*

***Chrom- und Nickel sowie deren Legierungen** werden nicht angegriffen.*

Merksatz: Auch die **Kompatibilität** möglicherweise/versehentlich von Triebwerksöl **benetzter Komponenten** ist zu überprüfen. Dies gilt besonders für die **Einführung einer anderen Ölsorte**.

***Bild 7.1.1-3** (Lit.7.1.1-8): Das **Quellen von Kunststoffen im Triebwerksöl** kann **reversibel** sein. In diesem Fall wird das Öl wieder ausgetrieben, ohne dass sich der Kunststoff in seinen Eigenschaften bleibend verändert. Trotzdem kann Quellen zu gefährlichen Problemen führen. Das gilt besonders für ein Klemmen von Gleitflächen mit engen Spalten. Im dargestellten Fall, der in einer Werkszeitschrift beschrieben wurde, blockierte offenbar nach der **Einführung einer neuen Ölsorte** eine wichtige Reglerwelle. Das wurde auf eine **quellende PTFE-Lagerbuchse** zurückgeführt. Kurzfristige Abhilfe war eine Spielvergrößerung, lang-*

© Vogelsmann - Turbosoft als Schulungsunterlage für Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Schmieröleigenschaften

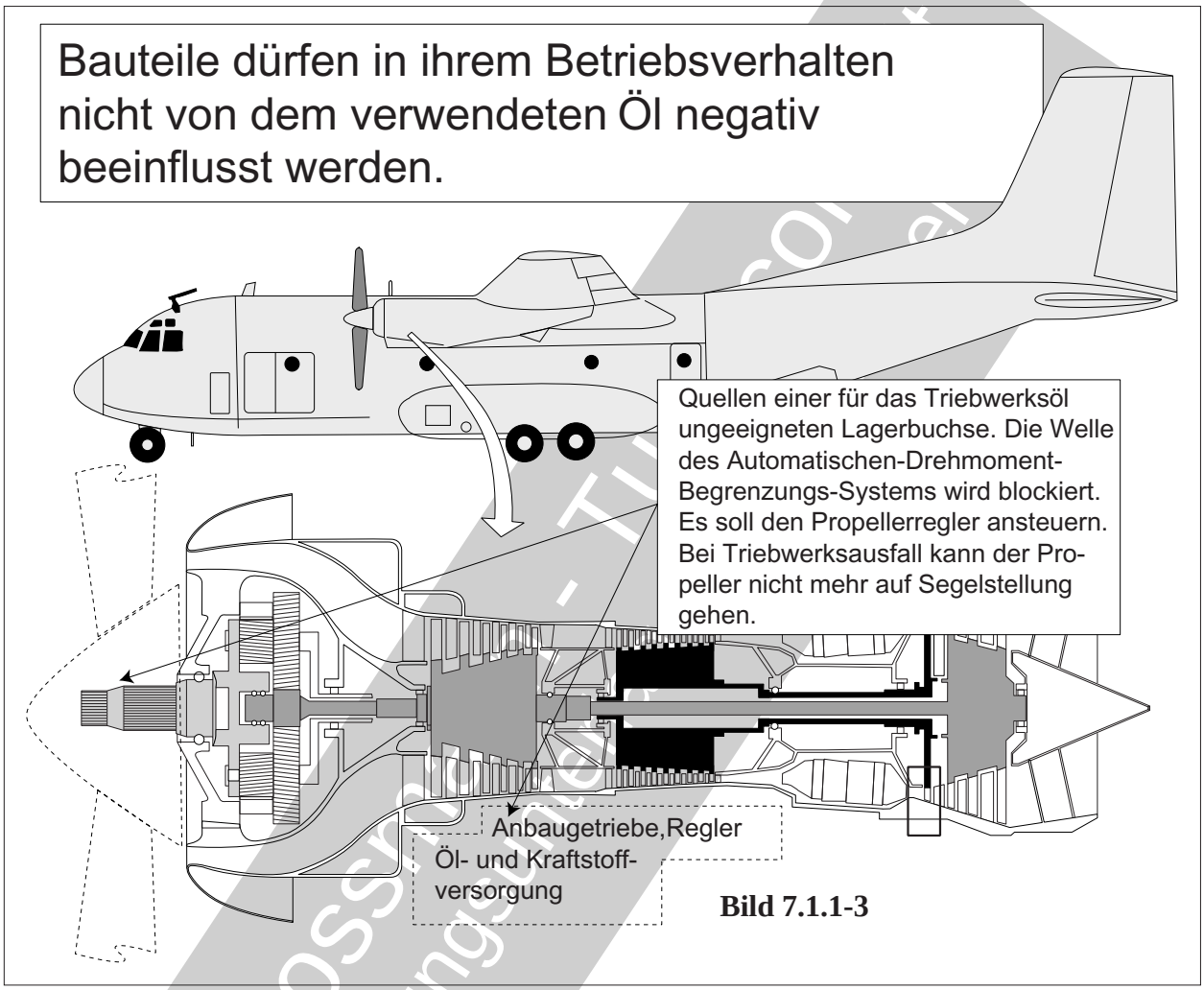


Bild 7.1.1-3

fristig bietet sich ein Wechsel des Buchsenwerkstoffs an. Dies dürfte jedoch schwer sein. Ist doch das hier verwendete PTFE der Buchse einer der wenigen Kunststoffe, die sich normalerweise mit synthetischen Ölen vertragen (Bild 7.1.1-2). Möglicherweise wies die Buchse einen druckfestigkeitssteigernden ***Füllstoff*** *auf, der die Volumenveränderung begünstigte.*

Allgemein ist zum ***Quellen von Kunststoffen in Triebwerksöl*** *zu sagen:*

Das größte Risiko besteht im ***Quellen von Elastomerdichtungen*** *des Ölsystems. Ein* ***Ölleck*** *als Folge kann zumindest umfangreiche Wartungsarbeiten erfordern.*

In Triebwerken werden an wichtigen Stellen eng tolerierte Gleitlagerbuchsen verwendet. Hierzu gehören auch ***Leitschaufelverstellungen*** *in Verdichtern. Zwar ist hier üblicherweise eine Ölbenetzung als Schmierung nicht vorgesehen. Kommt jedoch Öl versehentlich (als Lecköl) oder bewusst (Schmierung mit nicht vorgesehenem Öl) bei Wartungsarbeiten mit* ***Lagerbuchsen aus Kunststoffen*** *in Kontakt, kann ein* ***Quellen zum Blockieren*** *führen. Die Einführung einer neuen Ölsorte muss deshalb neben den Werkstoffen des Ölsystems auch immer solche Teile auf ihre Kompatibilität prüfen. Besonders bei* ***Montage- und Wartungsarbeiten besteht die Wahrscheinlichkeit einer versehentlichen Benetzung*** *(Bild 7.1.1-4 und Lit. 7.1.1-16). Kritisch sind* ***Anstreifbeläge aus gefüllten Elastomeren im vorderen Verdichterbereich von Turbomaschinen*** *(Bild 7.1.1-5 und Lit. 7.1.1-16).*

© Axel Rossmann - TU Clausthal
abgeänderte Vorlesungsunterlagen

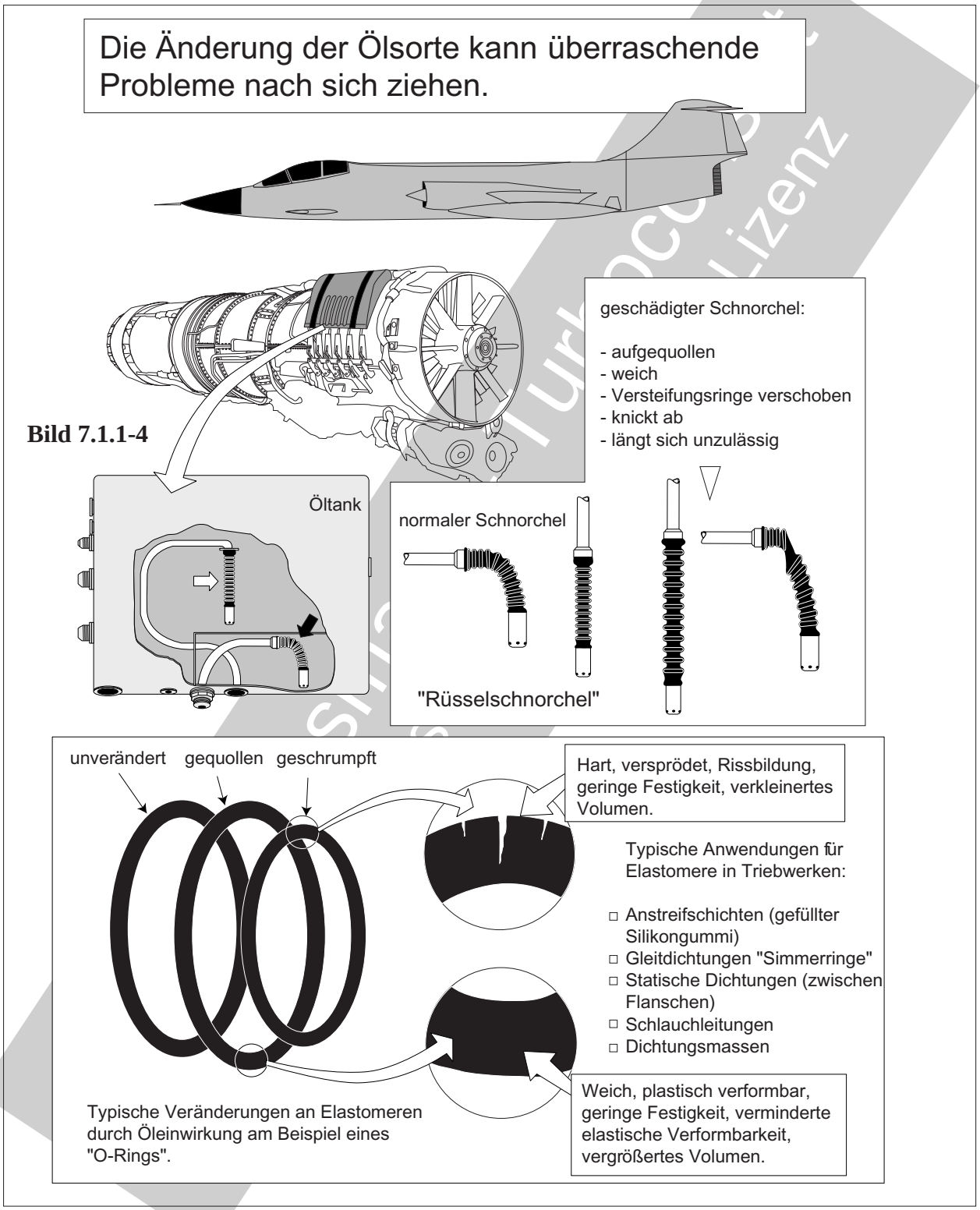


Bild 7.1.1-4 *(Lit. 7.1.1-9): Elastomere sind durch synthetische Öle bzw. deren Additive besonders schädigungsgefährdet (Bild 7.1.1-2). Diese Einflüsse können sich durch* ***Alterungsprozesse*** *im Öl noch verstärken. Dabei kann es Öl- und materialspezifisch zu unterschiedlichen* ***Veränderungen*** *kommen (Bild 6.10.1.2-12):*

- ***Versprödung*** *mit* ***Rissbildung*** *(Skizzen unten)*
- ***Quellen*** *mit* ***Festigkeitsverlust*** *und* ***Ablösungen*** *(Bild 7.1.1-5) oder* ***Quetschungen*** *mit dem* ***Austritt aus Spalten****.*

Systeme und Betriebsstoffe: Schmieröleigenschaften

Quellen von Kunststoffen, insbesondere Elastomeren, kann die Betriebseigenschaften gefährlich verändern.

Folgen eines gequollenen Elastomers in einer Flanschdichtung mit metallischer Stützplatte führen zur Undichtigkeit:
"1" Aufwürfe, Faltenbildung des Dichtungselastomers
"2" Austritt des Dichtungselastomers ("Extrusions).

Abheben als Folge des Quellens eines gefüllten Elastomeranstreifbelags im Verdichterbereich. Es kann unzulässig heftiges Anstreifen mit Herausreißen des Belags auslösen.

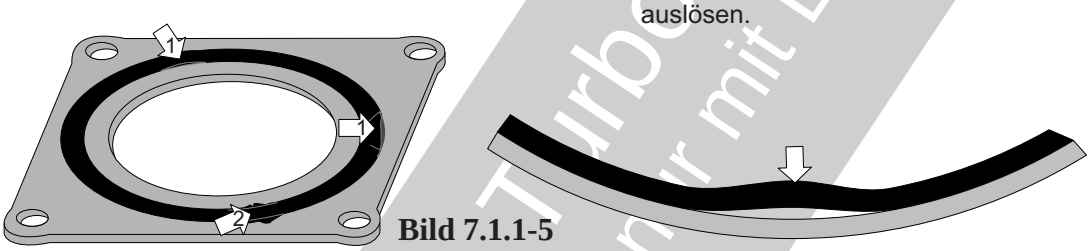


Bild 7.1.1-5

- ***Plastische*** *(bleibende)* ***Verformungen*** *wie* ***Ab****plattungen (Skizze unten, Bild 6.10.1.2-10) oder* ***Längungen*** *(Skizzen oben).*
- ***Veränderte Reibungs-/Gleiteigenschaften.***
- ***Verschlechterte thermische Beständigkeit****.*

Im oben dargestellten Fall kam es mit der Einführung eines anderen Öltyps zur plastischen Verformung des ***Ansaugschnorchels****. Dieser bestand aus einem mit einzelnen Drahtringen innen versteiften Gummi(?)-Wellschlauch. Die plastische Dehnung führte zu einer Verlagerung der Versteifungsringe und damit zum Abknicken des Schlauchs. So war die Funktion nicht mehr gewährleistet.*

Die Skizzen unten zeigen ***O-Ringe*** *aus einem gegen synthetisches Öl unbeständigen Elastomer. Je nach Art der ölbedingten Veränderung können unterschiedliche Schadensbilder auftreten (Bild 6.10.1.2-4).*

Bild 7.1.1-5 *(Lit. 7.1.1-9): Das* ***Quellen von Elastomerdichtungen*** *kann durch plastische Verformung und Abheben zu Leckagen führen. Das kann selbst bei Dichtungen die von einem Metallrahmen abgestützt werden auftreten. Üblicherweise sind solche Dichtungen vom OEM ausreichend geprüft und zugelassen. Bei unerwarteten Veränderungen der Öleigenschaften oder der Verwendung nicht zugelassener bzw. vom OEM vorgesehener und erprobter Dichtungen (SUPs, Lit. 7.1.1-17) sind jedoch derartige Probleme möglich.*

© Ayen Fossmann - Turbomaschinen
ausschließlich nur mit Lizenz

© Axel Rossmann - Turbocorner
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 7.1.1-6 *(Lit. 7.1.1-10 und Lit. 7.1.1-11):* ***Ungewöhnliche Verfärbungen des Öls*** *können ein (Früh-)* ***Indikator*** *für Schäden im Ölsystem sein. Sie sind deshalb ernst zu nehmen und die* ***Ursache bzw. der Entstehungsmechanismus zu klären****.*

Im dargestellten Fall fanden Betreiber eines Flugzeugtyps ***schwarze Kohleansammlungen*** *in den* ***Ölrohren von Hauptlagern*** *und dem* ***Ölfilter*** *der Triebwerke. In einigen Fällen kam es zu* ***Öldruckschwankungen*** *und/oder dem Zusetzen des Eingangsfilters zur Hauptrückölpumpe.*

Eingehende Untersuchungen ergaben, dass es sich ***nicht um Ölverkokung*** *handelte. Stattdessen waren die Ursache* ***Kohlepartikel*** *eines* ***zersetzten gefüllten Gummis*** *(Nitril Butadien Rubber = NBR) von* ***Rohren im Ölkühler****. Daraufhin wurden diese durch Teflonschläuche ersetzt.*

Den Betreibern wurde von der zuständigen Aufsichtsbehörde folgendes Vorgehen empfohlen:

- ***Abdrucktest des Ölfilters. Visuelle Prüfung*** *einer Ölprobe auf schwebende Kohlenstoffpartikel.*

- ***Inspektion des Einlasssiebs*** *zur Rückölpumpe des Anbaugetriebes auf Kohleablagerungen.*

- ***Meldung eines „positiven“ Befunds*** *an die zuständige Aufsichtsbehörde.*

In einem informellen Schreiben (Service Information Letter) wurden die Betreiber des betroffenen Triebwerkstyps über die ***Hintergründe*** *informiert. Es handelt sich um* ***synthetisches Öl*** *eines bestimmten Herstellers, entsprechend der Spec MIL-L-23699F STD (Bild 7.1.1-1). Die dunkle Verfärbung („****black oil****“) hat* ***keine direkten Auswirkungen auf Schmiereigenschaften und Kühlwirkung****. Dunkles Öl muss nicht notwendigerweise freien Kohlenstoff enthalten. Seine Farbe kann von Orange bis schwarz variieren. Die Verfärbung entsteht im vorliegenden Fall bei besonders langen akkumulierten Laufzeiten (mehrere 1000 Stunden). Sie ist dann lediglich ein Zeichen, dass die*

Systeme und Betriebsstoffe: Schmieröleigenschaften

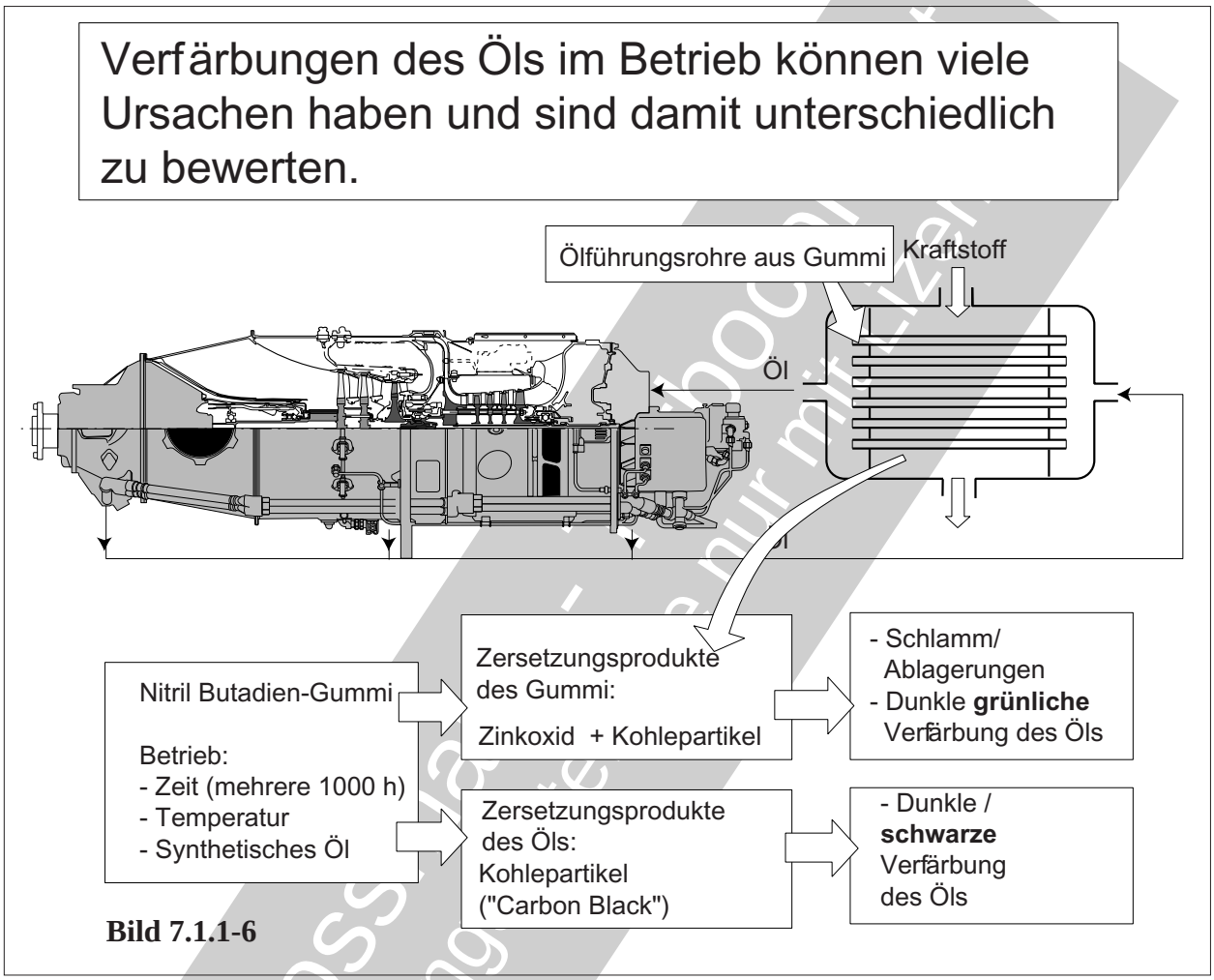


Bild 7.1.1-6

oxidationshemmenden Additive wirksam *sind und ist somit als normal zu werten.*
Fein verteilter Kohlenstoff verfärbt das Öl ***dunkel mit einem Grünstich****. Am besten ist an einer* ***Ölprobe in einem Glasröhrchen*** *(unter 2 cm Durchmesser) zu entscheiden, ob die dunkle Verfärbung von freien Kohlenstoffpartikeln stammt.*
Verunreinigte Triebwerke wiesen im Ölsystem hohe ***Anreicherungen von Zinkoxiden*** *und* ***schwarzen Kohlepartikeln/Ruß*** *(carbon black) auf. Die Tauscherröhrchen im* ***zellenseitigen Ölkühler*** *(Detail oben rechts) bestehen aus einem* ***Gummi*** *(NBR). Sie hatten auf der* ***Innenseite Längs- und Querrisse,*** *die von außen nicht sichtbar waren. Der Gummi hat* ***Zinkoxide als Füllmaterial*** *und* ***Ruß als Gummibestandteil****. Beide werden* ***bei Zersetzung an das Öl abgegeben*** *(Schaubild unten) und gelangen so in das gesamte Ölsystem.* ***Zinkoxid setzt sich als schlammartige Verbindung ab, Ruß bleibt im Öl fein verteilt****.*

Bild 7.1.1-7 *(Lit. 7.1.1-12, -13, -14): Synthetische Schmieröle für Triebwerke bestehen aus Estern mit Additiven (Bild 7.1.1-1). Es handelt sich um* ***organische Phosphorverbindungen****. Deren Verhalten gegenüber ungewöhnlichen Bedingungen in Lagern wie erhöhte Drücke und Temperaturen ist vielfach nicht befriedigend bekannt.*
TCP*, ist ein Additiv mit ausgeprägten verschleißhemmenden Eigenschaften. Es handelt sich um ein sog. EP-Additiv (Extreme Pressure-Additiv = Hochdruck-Additiv). Seine* ***verschleißhemmende Wirkung*** *beruht auf der Bildung einer zähen* ***Reaktionsschicht*** *die als* ***Festschmierstoff mit Notlaufeigenschaften***

© Aya Rossmann - Skript nur mit Zustimmung als Schulung

Das Additiv TCP in Schmierölen ist hochgiftig. Es darf auch über kleine Leckagen nicht in die Atemluft gelangen.

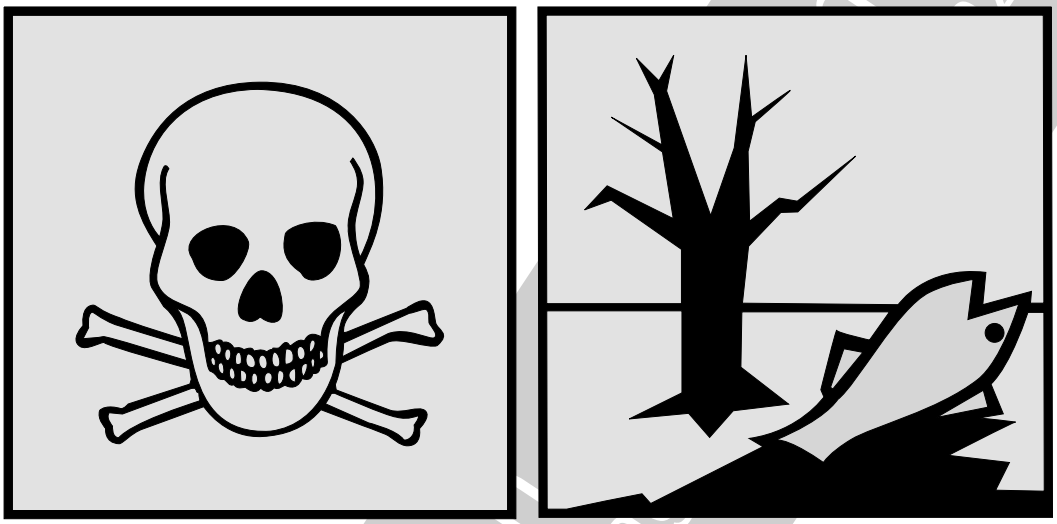


Bild 7.1.1-7

dient (Lit. 22.3.1-15 und Lit. 22.3.1-16). Sie entsteht infolge einer Reaktion unter den hohen Temperaturen und Drücken im Schmierspalt. Diese Schicht verhindert bei metallischem Kontakt (z.B. Mischreibung) das Fressen (Kaltverschweißen) der Berührungsflächen. Damit ist TCP für die Lebensdauer aber auch die Sicherheit von Wälzlagern und Zahnrädern/Getrieben von großer Bedeutung. Deshalb lässt es sich offenbar nicht einfach ein gesundheitlich unbedenklicher Ersatz finden oder ganz auf TCP verzichten.

TCP hat besonders ***umweltbedenkliche Eigenschaften****. Es handelt sich um* ***Trikresylphosphat*** *(engl. Tri-Cresyl Phosphate = TCP), ein* **Nervengift***. Der Anteil von TCP liegt im Öl bei ca* ***3 % bis 5 %****. Dies erscheint wenig, trotzdem kann es in der Kabinenluft die Cockpitbesatzung zeitweise bis hin zur Ohnmacht gefährlich beeinflussen. Aus diesem Grund musste in vielen Fällen von* ***Sauerstoffmasken*** *Gebrauch gemacht werden. Hierzu gibt es inzwischen Verhaltensvorschriften der zuständigen Luftfahrtbehörden.*

Offenbar wurden über lange Zeit die gefährlichen Symptome wie eingeschränkte Reaktion und Handlungsfähigkeit der Piloten und starke Kopfschmerzen und Unwohlsein nicht TCP zugeschrieben. Aus diesem Grund erfolgten auch keine Nachweise in der Kabinenluft.

Ein weiteres Problem sind mögliche Dauerschäden durch häufigeres Einatmen in besonders betroffenen Flugzeugtypen.

TCP gelangt über ***Öllecks*** *als Folge von* ***Dichtungs- und Lagerschäden*** *oder kurzfristig* ***betriebsbedingten Undichtigkeiten*** *(z.B. zu wenig Sperrluft bei niedrigen Drehzahlen) in die Verdichterluft. So kommt z.B. Öldampf von unvermeidlicher Leckage an Labyrinthdichtungen der Lagerkammern (Bild 7.1.4-1) in* ***Entnahmeluft*** *(Zapfluft). Das wird kritisch wenn sie so in eine Belüftung (z.B. KLabine und Cockpit) gerät.*

© Axel Pesmann
Lehrmaterialien

Literatur zu Kapitel 7.1.1

7.1.1-1 I.E.Traeger, „Aircraft Gas Turbine Engine Technology, Second Edition“, Verlag : Glencoe/McGraw-Hill 1994, ISBN 0-07-065158-2., Seite 204, 209, 245.

7.1.1-2 The AeroShell Book, Edition 18, 2003, „Aeroshell Turbine Oils“, www.shell.com/aviation, Seite 1-90.

7.1.1-3 M.J.Kroes, T.W.Wild, „Aircraft Powerplants, Seventh Edition“, Verlag : Glencoe/McGraw-Hill 1990, ISBN 0-02-801874-5, Seite 343-356, 470.

7.1.1-4 M.Duncanson, „Detecting and Controlling Water in Oil“, Exxon Mobil, www.practicingoilanalysis.com, 17.02.2006, Seite 1-9.

7.1.1-5 W.R.Herguth, „New Lubricant Evaluation and Acceptance - A Laboratory’s Perspective“, Proceedings des „Annual Meeting der Society of Tribologists and Lubricant Engineers“ Cincinnati Ohio 1996 Seite 1-5.

7.1.1-6 „Turbo Oil for Industrial & Marine Gas Turbines“, Air BP, www.airbp.com, 17.02.2006, Seite 1-20.

7.1.1-7 F.T.Barcroft, „Lubricants for the Aircraft Gas Turbine“, Zeitschrift „Aircraft Engineering“, Okt. 1979, Seite 7-9.

7.1.1-8 W.Uedelhoven, „Testing of Elastomer Compatibility of Turbine Aviation Oils“, Wehrwissenschaftliches Institut für Materialuntersuchungen (WIM), Erding, BRD Okt. 1979, Seite 7-9.

7.1.1-9 K.Meier, „In-service Engine Oil Problems“, MTU-München, Seite 4.1-4.10.

7.1.1-10 Transport Canada, Service Difficulty Advisory AV 2005-02 vom 12 April 2005, „Possible Oil Contamination“, Pratt & Whitney Canada, PT6A-67D Series Engines, www.tc.gc.ca/, Seite 1 und 2.

7.1.1-11 Pratt & Whitney Canada, Service Information Letter, S.I.L No. PT6A-112R1, „PT6A-67D, Oil Discoloration“, 29.Oct 2004, Seite 1-3.

7.1.1-12 O.Lundström, H.Elinder, Statens haverikommission (SHK), Report RL 2001:41e (ISSN 1400-5719) „Incident onboard aircraft SE-DRE during flight between Stockholm and Malmö, M county, Sweden, on 12 November 1999“, 2001-11-23, Seite 1-34.

7.1.1-13 „Trikresylphosphate“, de.wikipedia.org/wiki, aktualisiert 24. März 2009, Seite1-3.

© Axel Pössmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

7.1.1-14 Air Accident Investigation Branch, (AAIB) Air Accident Report 1/2004, „Report on the incident to BAe 146, G-JEAK, during the descent into Birmingham Airport on November 2000“, January 2004, Seite1-61.

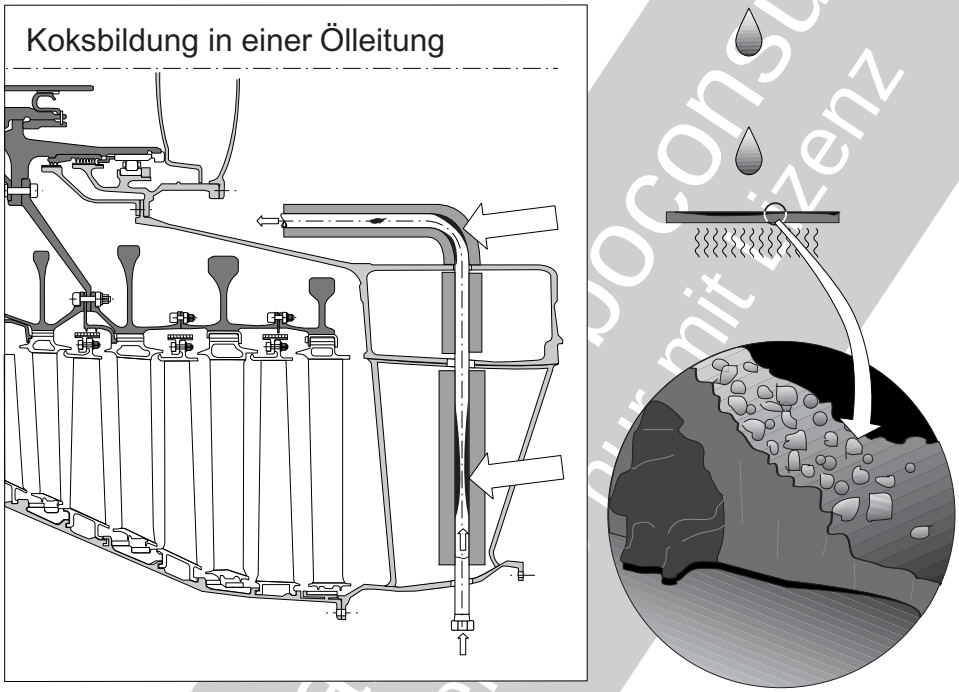
7.1.1-15 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 3 2000, ISBN 3-00-017733-7, Kapitel 11.2.1.1.

7.1.1-16 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 2 2001, ISBN 3-00-008429-0, Kapitel 7.1.3.

7.1.1-17 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 5 2008, ISBN 978-3-00-025780-3, Kapitel 20.2.1.

© Axel Rossmann - Turbocorsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

7.1.2 Ölverkokung



Ölverkokung ist ein **häufiges und gravierendes Problem, das sich mit dem Trend zu Leistungskonzentration und Wirkungsgradsteigerung verschärft**. Gewöhnlich ist die Hauptursache eine zu **hohe örtliche Temperatur** im Ölsystem. Typische Stellen sind **Durchführungen von Rücköl- und Entlüftungsleitungen** in **heißgasumströmten Lagerstreben** (Bild 7.1.2-5 und Bild 7.1.2-7). Hier kann sich Ölkoks bis zum Blockieren des Strömungsquerschnitts aufbauen. Wände der heißteilseitigen Lagerkammern können sowohl im Betrieb als auch im Stillstand Koks aufbauen. Das ist der Fall, wenn die notwendige **Wärmeisolation** örtlich auslegungsbedingt nicht ausreicht oder beschädigt ist. Örtliche Koksablagerungen in Lagergehäusen können auch ein Indiz für zeitweise, begrenzte **Ölfeuer** (Bild 7.1.4-6) sein.

Ölkoks entsteht nicht nur im Betrieb. Gerade nach dem **Abschalten**, wenn kein kühlender Durchfluss vorhanden ist, können Wärmestrahlung und Wärmeleitung Überhitzungen mit Koksbildung auslösen. In diesem Fall sind auch Frischölleitungen betroffen. Ein weiteres Problem ist die Koksbildung im Stillstand an **Labyrinthen** und **Hauptlagern**. Hier gelangt die Wärme aus den relativ massiven heißen Turbinenrädern über die Welle zum Lager (**Heat Soaking**, Bild 7.1.2-6.2).

Eine weitere Gefahr geht von **abgelöstem Koks** aus (Bild 7.1.2-7). Es kann sich sowohl um feine Partikel als auch um flächige größere Plättchen handeln. Sie setzen Durchflussquerschnitte wie Öldüsen oder Siebe zu. Entsteht so merklicher **Ölmangel in den Lagern**, wird die Gefahr eines umfangreichen Schadens akut. Gerät Koks auf **Laufflächen von Wälzlagern**, ist mit einer Abnahme der Lagerlebensdauer infolge **Ermüdungsgrübchen** (Bild 6.3.1.1-4, Bild 6.3.1.1-5.1, Bild 6.3.1.1-9 und Bild 7.1.2-4.1) zu rechnen.

Baut sich Koks in **Labyrinthspalten** oder **zwischen konzentrischen Wellen** auf, kann das **Anstreifvorgänge** mit Überhitzung der benachbarten Bauteile, besonders der Wellen auslösen (Bild 7.1.2-4.2). Ein Wellenbruch lässt das Durchgehen und **Bersten eines Turbinenrads** befürchten.

Es ist zu erwarten, dass die Neigung zur Ölkohlebildung mit der Betriebszeit durch Alterungsprozesse und chemische Reaktionen mit Metallen des Ölsystems zunimmt.

© Alle Rechte bei bocconsult
Weitergabe an Dritte nur mit Lizenz

Bild 7.1.2-1 *(Lit. 7.1.2-3, Lit. 7.1.2-4 und Lit. 7.1.2-12): Viele Einflüsse beruhen auf der Bildung von Ablagerungen bzw. Ölkoks. Sie können in komplexer Weise zusammenwirken. Das* ***Verständnis der Entstehungsmechanismen*** *und der Abscheidung in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen ist eine* ***Voraussetzung für gezielte Abhilfen****. So lässt sich gegebenenfalls aus einem* ***Lagenaufbau*** *auf die* ***Abscheidungsgeschwindigkeit*** *und damit auf den* ***Entstehungsvorgang*** *schließen (Bild 7.1.2-3.2). Auch die* ***Härte der Ablagerungen*** *kann hilfreich sein. Diese Befunde zusammen mit dem* ***Aussehen*** *(Bild 7.1.2-2.1 und Bild 7.1.2-3.1) ermöglichen bereits einigermaßen fundierte Rückschlüsse auf wichtige Entstehungsparameter. Dies lässt sich mit* ***mikroskopischen Strukturuntersuchungen*** *absichern (Bild 7.1.2-2, Lit. 7.1.2-3). Im Folgenden werden solche Effekte genauer betrachtet.*

Diagramm ***A****: Bereits bei normaler Temperatur verändert Öl über typische* ***Betriebszeiten*** *in Triebwerken seine Eigenschaften. Es entstehen* ***Säuren*** *(Kenngröße: Total Acidity Number = TAN),* ***verdampfen flüchtige Bestandteile*** *und Moleküle werden in leichter flüchtige Bestandteile gespalten oder polymerisieren (verbinden sich) zu größeren Molekülen. Dabei* ***steigt die Dichte und Viskosität****. Äußeres Anzeichen für solche Veränderungen des Öls ist eine* ***dunkle Verfärbung****. Sie wird in Kontakt mit einer deutlich* ***über 200 °C heißen Oberfläche*** *merklich beschleunigt. Unterstützend wirkt der* ***Kontakt mit Luft*** *(Oxidation).* ***Staubpartikel*** *aus der Ansaugluft, besonders zusammen mit* ***angelagertem Salz*** *(Meeresatmosphäre) unterstützen den Vorgang zusätzlich. Sie gelangen über* ***Leckluft der Labyrinthdichtungen*** *(z.B. an den Lagerkammern) in das Öl. Dort wirken sie* ***wie Kondensationskeime*** *auf die Koksbildung im Öl. Diese Veränderungen begünstigen wiederum die Neigung des Öls zur Bildung von Ablagerungen.* ***Ist Öl also bereits „gealtert“, neigt es noch mehr zur Koksbildung****. So vermindert die* ***Häufigkeit von Ölwechseln*** *oder* ***das Nachfüllen*** *die Koksbildung.*

Diagramm ***B****:* ***Oberhalb von 200 °C kommt es zu einer sprunghaften Viskositätsveränderung*** *als Schädigungsmerkmal des Öls.* ***Betriebszustände*** *wie Startfrequenz und Manöver, die sich auf die Leistungsabgabe und damit auf das* ***Temperaturniveau*** *im Triebwerk auswirken, spielen deshalb eine überproportionale Rolle. Wird der Öldurchfluss, z.B. bei besonderen* ***Fluglagen im militärischen Betrieb*** *(z.B. Rückenflug) verringert (Lit. 7.1.2-2), fördert dies einen Temperaturanstieg.*

Diagramm ***C****: Nicht nur die Oberflächentemperatur der ölbenetzten Fläche, auch die* ***Art*** *wie das Öl aufgebracht wird und der* ***Zeitablauf*** *spielen eine wichtige Rolle für die Koksbildung. In erster Linie unterscheidet man den Kontakt mit einer* ***Ölschicht*** *(Bild 7.1.2-2,* ***statische Bedingungen****) von* ***aufgesprühten Tröpfchen oder schnell wechselnder Benetzung (dynamische Bedingungen****). Wie zu erkennen, ist die Ablagerungsmenge* ***temperaturabhängig*** *sehr unterschiedlich. Unter statischen Bedingungen ergibt sich ein ausgeprägtes Maximum im Bereich hoher Betriebstemperaturen. Bei extremen Temperaturen sinkt die Ablagerungsrate aber wieder. Unter dynamischen Bedingungen steigt sie dagegen exponentiell an.*

Diagramm ***D****: Gegenüber dem temperaturabhängigen Koksaufbau („C“) kehrt sich das Verhalten in* ***Abhängigkeit vom Luftstrom*** *geradezu um. Je stärker dieser ist, umso größer ist die Ablagerungsmenge unter dynamischen, und umso kleiner bei statischen Bedingungen (siehe Erklärung in Bild 7.1.2-2).*

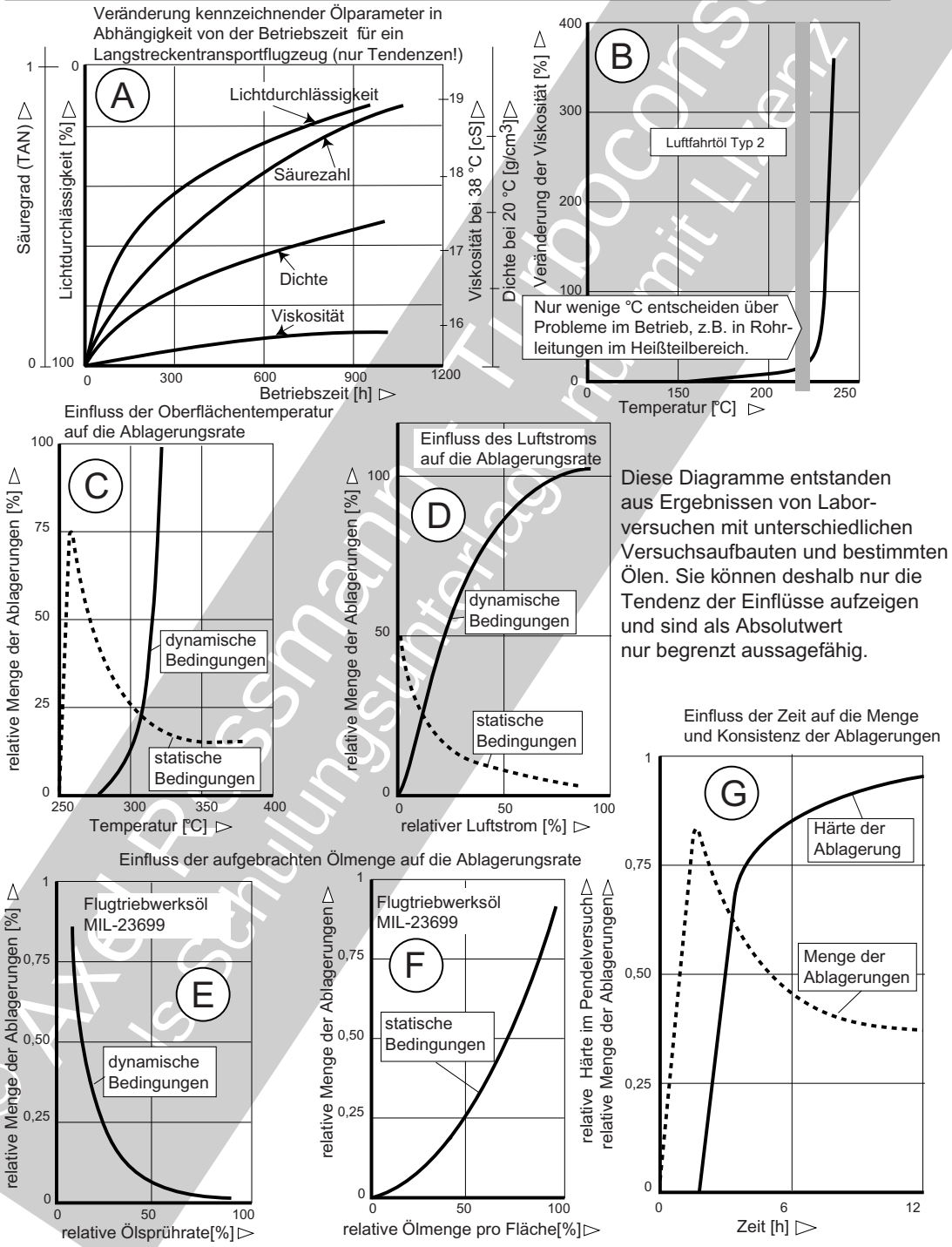
Diagramm ***E*** *und* ***F****: Erstaunlicherweise nimmt unter dynamischen Bedingungen mit steigender* ***Sprührate*** *(Menge des aufgesprühten Öls in der Zeit) die Abscheidungsmenge ab (siehe Erklärung in Bild 7.1.2-2). Das Gegenteil ist unter statischen Bedingungen der Fall.*

Diagramm ***G****: Betrachtet man die* ***Zeitabhängigkeit*** *der Ölkoksbildung, nimmt diese in allen Fällen anfangs linear stark zu, um dann wieder abzunehmen. Die* ***Härte der Ablagerun-***

© Kaupp, Gramann - Turbomasch
ausschließlich für Lehrzwecke

Systeme und Betriebsstoffe: Ölverkokung

Einflüsse auf die Bildung von ("Koks") Ablagerungen in heißen Ölsystemen.



Diese Diagramme entstanden aus Ergebnissen von Laborversuchen mit unterschiedlichen Versuchsaufbauten und bestimmten Ölen. Sie können deshalb nur die Tendenz der Einflüsse aufzeigen und sind als Absolutwert nur begrenzt aussagefähig.

Bild 7.1.2-1

gen *steigt ebenfalls mit der Zeit linear deutlich an. Die Kurve verflacht jedoch ab einem bestimmten Zeitpunkt.*

© Wolfgang Bussmann, TU Innoconsult
Lehrschulungsunterlagen nur mit Lizenz

Der Fachmann kann aus Struktur, Dicke und Homogenität einer "Koks"-Ablagerung auf die Entstehungsbedingungen schließen.

Einflüsse welche die Bildung von "Koks"-Ablagerungen im Ölsystem begünstigen, sind sowohl von den Betriebsbedingungen als auch von der Konstruktion abhängig :

- Hohe Oberflächentemperaturen
- Langsamer Ölfluss oder geringer Ölaustausch an heißen Oberflächen
- Hohe Öltemperatur
- Hohe Lufttemperaturen und große Luftvolumina
- Feine Verteilung (Versprühung) von Öltröpfchen auf Oberflächen und in der Luft
- Partikel im Öl
- Öl und Kunstharzschichten auf vorhandenen Partikeln

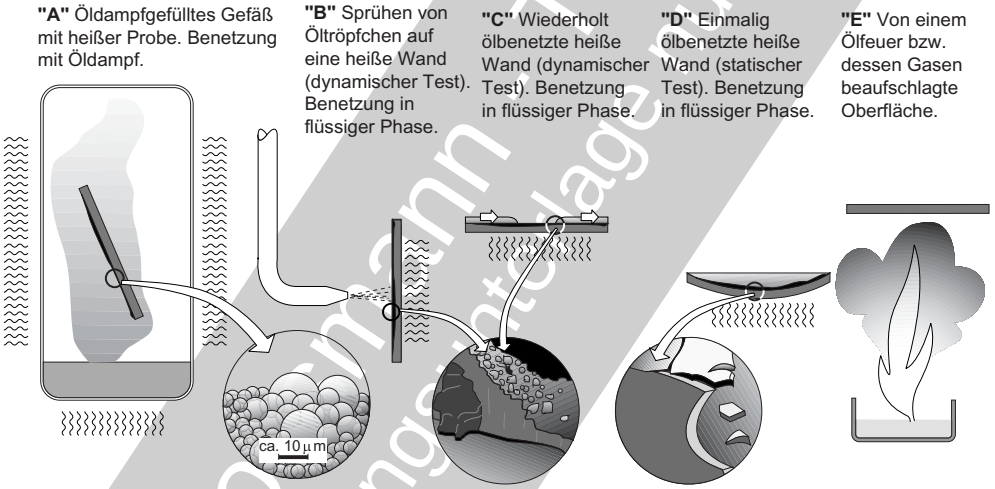


Bild 7.1.2-2.1

Erscheinungsformen ölbedingter Ablagerungen ("Ölkoks")	A	B	C	D	E
▪ Gleichmäßige glatte dünne Schicht, lackartig. Zuerst braun und klebrig, dann hart,spröd und glasartig. Nach längerer Zeit matt und rissig. Splittert ab.	○			○	
▪ Matte, rußartige Schicht unterschiedlicher Dicke					?
▪ Körnige dichte Schichten. Häufig mit Kügelchenstruktur. Oft auf einer glatten homogenen Unterschicht.	○		○		
▪ Matte oder glänzende Krusten unregelmäßiger Dicke Lagenaufbau	○	○	○		

Bild 7.1.2-2.1 *(Lit. 7.1.2-1, Lit. 7.1.2-4 und Lit. 7.1.2-12): Koksablagerungen können ein großes Gefahrenpotenzial darstellen. Um diesem gezielt zu begegnen, ist es erforderlich, die* ***Entstehungsursachen bzw. -bedingungen möglichst genau zu identifizieren****. Dabei hilft die Beobachtung, dass offenbar bestimmte* ***Parameter*** *(Bild 7.1.2-1)* ***im Zusammenhang mit charakteristischen Ablagerungsmerkmalen*** *(Bild 7.1.2-3.1) stehen. Wie es dazu kommt, lassen spezifische Verkokungsversuche (mittlere Skizzen) erkennen.*

*„**A**“: Von* ***Öldampf*** *beaufschlagte heiße Wand (Schichtstruktur siehe „III“ in Bild 7.1.2-3.1). Diese Bedingungen herrschen beispielsweise*

© Axel Rossmann TU Ilmenau Lehrstuhl Konstruktionstechnik

*im **Leckluftstrom** aus einer turbinenseitigen Lagerkammer zwischen Wellen mit Wandtemperaturen um 300 °C . Im Stillstand können bei „**Heat Soaking**“ in Lagerkammern oder Rohrleitungen ähnliche Bedingungen auftreten. Das ist in **Entlüftungsleitungen**/Ventlines während des Betriebs zu erwarten. Verlaufen diese **senkrecht,** unterstützt das Ablaufen des Ölfilms den Vorgang*

*„**B**“: In einem Triebwerk gibt es durchaus Bereiche wie **Wände von Lagerkammern** oder **Lagerkäfige**, wo **Öltröpfchen** auf eine heiße Wand sprühen (Schichtstruktur siehe „II“ in Bild 7.1.2-3.1). Sie können von **Öldüsenstrahlen** und deren **Rückspritzern** stammen. Auch beim **Abschleudern** aus rotierenden Teilen wie Käfigen entstehen entsprechende Öltröpfchen.*

*„**C**“: Ähnliche Ablagerungen wie bei einem Ölnebel (Schichtstruktur siehe „II“ in Bild 7.1.2-3.1) erzeugt eine **wiederkehrende Benetzung** mit einem nicht konstanten Ölstrom. Eine solche Situation dürfte beispielsweise in **Rückölleitungen** zu finden sein.*
*Mit einer geeigneten Probenpräparation besteht die Chance aus der **Schichtstruktur** (Bild 7.1.2-3.2) **Rückschlüsse auf Häufigkeit, und Zeitabstände** der Schichtbildung zu ziehen. Damit lassen sich **Betriebsbedingungen** und **ursächliche Einflüsse** (z.B. zeitweise Leckagen) identifizieren.*

*„**D**“: Solche Bedingungen können beispielsweise im **Ölsumpf** eines Hauptlagers auftreten (Schichtstruktur siehe „I“ in Bild 7.1.2-3.1). Bilden sich hier **Ölpfützen,** sind diese besonders von Koksbildung betroffen (**Puddle Coking**).*

*„**E**“: Im Bereich **brennenden Öls** werden benachbarte Flächen sehr schnell (Bruchteile von Minuten) auf Temperaturen über 700°C aufgeheizt. Dabei kommt es zum **Verbrennen vorhandener Koksablagerungen**. Diese Flächen sind dann belagsfrei und weisen **Überhitzungsmerkmale** wie **plastische Verformungen und Oxidation** auf. In Richtung niedrigerer Temperaturen befinden sich meist bereits nicht verbrannte, oft sehr **raue und dicke Koksablagerungen aus Öldampf** (Bild 7.1.2-2.2). Es handelt sich um ein Zeichen, für häufig auftretenden Öldampf. Besonders interessant ist dies in unerwarteten Bereichen. Sie sind ein Zeichen für, zumindest **zeitweise, Leckagen**. Oft gibt es eine Verbindung zu **Labyrinthen,** die ölführende Bereiche wie **Lagerkammern** abdichten. Situationen mit Öldampfaustritt entstehen z.B. bei militärischen Triebwerken während **besonderer Manöver** und **hohen Fluggeschwindigkeiten in Bodennähe** (Bild 7.1.4-3, und Bild 7.1.5-7, Lit 7.1.2-2).*

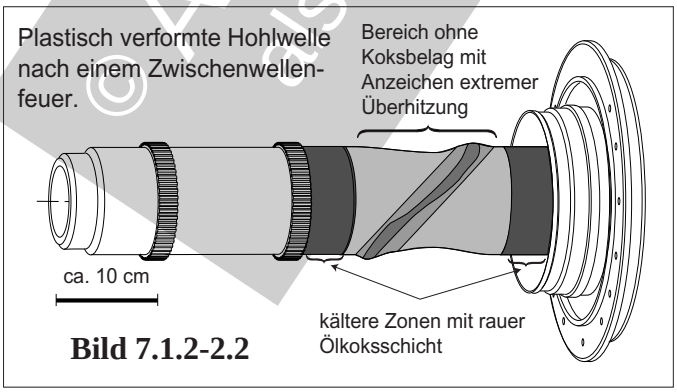


Bild 7.1.2-2.2

***Bild 7.1.2-2.2** (Lit 7.1.2-2): Schaden an einer **Turbinenwelle nach einem Ölfeuer**. Diese Welle eines Mehrwellentriebwerks läuft mit **engem Abstand in einer äußeren Welle**. Die extrem hohe Temperatur im Bereich des Ölfeuers hat Koksablagerungen verbrannt und die **Welle bis zur plastischen Verformung erweicht**. Die dicken **Koksschichten auf beiden Seiten** der Überhitzungszone dürften vor dem Feuer von häufigen öldampfführenden Leckgasen aus einer **turbinenseitigen Lagerkammer** erzeugt worden sein (Bild 7.1.4-7 und Bild 7.1.4-8).*

© Akademie Turbomaschinen - Turbomaschinen als Schadensursache

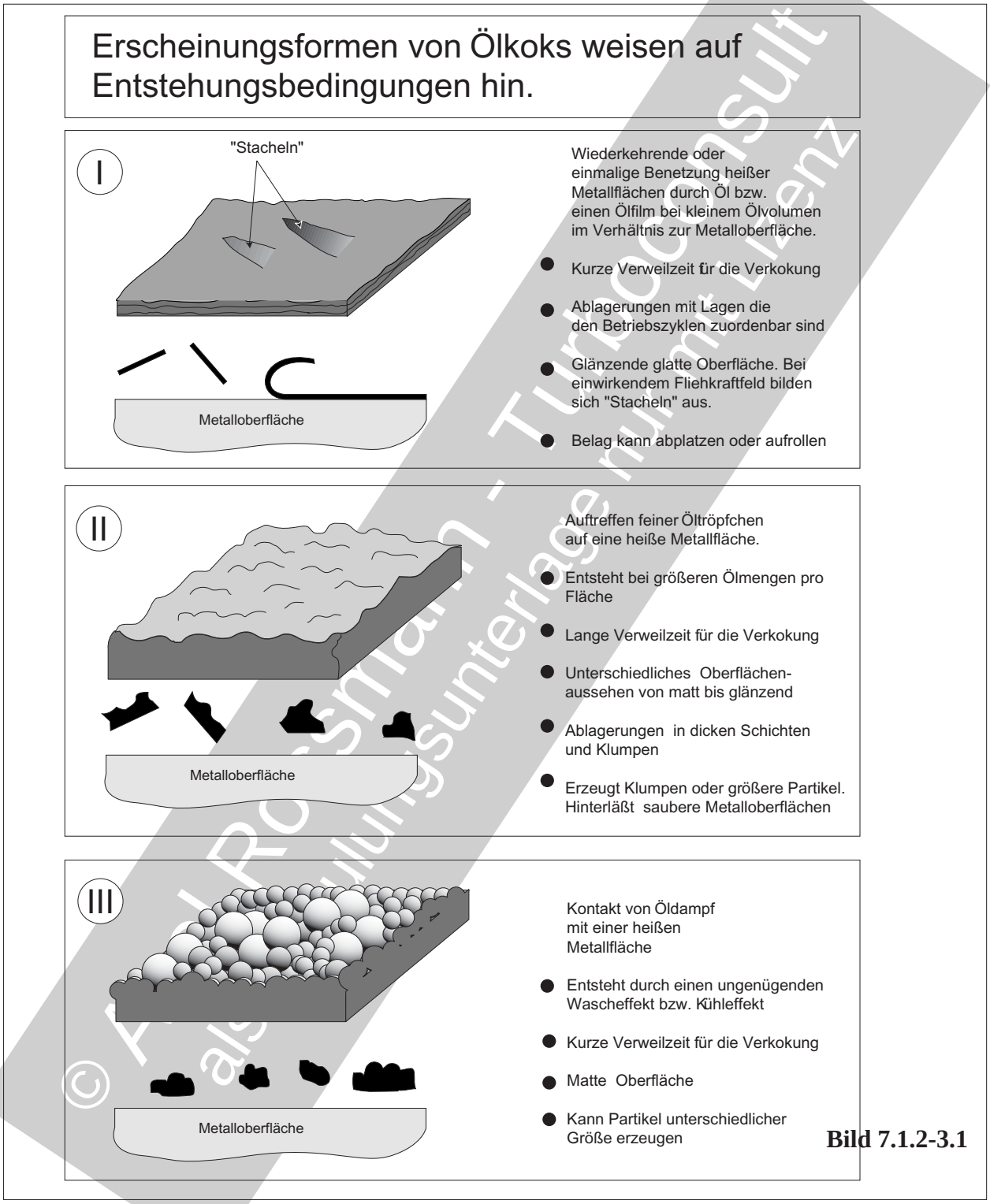


Bild 7.1.2-3.1

© Ad Rossmann - Turboconsult
als Vorlesungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 7.1.2-3.1 *(Lit. 7.1.2-3 und Lit. 7.1.2-4): Ablagerungen können sich aus Partikeln die bereits im Öl entstanden sind aufbauen. Diese Partikel sind Folge einer Art* ***Kondensation um winzige Fremdpartikel****. Typisch ist* ***metallischer Abrieb*** *von Lagerlaufflächen, Käfigen, Zahnflanken und Vielkeilkupplungen. Auch die angesaugte Luft bringt Partikel als* ***Staub*** *ein. An sie können sich in Meeresatmosphäre* ***Salze anlagern****. Diese Teilchen gelangen beispielsweise mit Leckluft über Labyrinthe der Lagergehäuse in das Öl. Solche* ***'Hybridpartikel'*** *können sehr unterschiedliche Anteile des verharzten Öls (Harz) enthalten. Dieser Ef-*

fekt lässt zwischen ***Reinölablagerungen*** *(pure oil deposits) und* ***Partikelablagerungen*** *(Particle deposits) unterscheiden. Das ist mit einer chemischen Analyse auf einfache Weise möglich.*

*„**I**“: Glatte,* ***lackartige Schichten*** *sind anfangs klebrig, mit leicht brauner Farbe, die mit der Betriebszeit dunkler wird. Dabei werden die Schichten* ***hart und glasspröd****,* ***mit steigender Temperatur trüb und rissig****. Einflüsse auf das Schichtdickenwachstum sind den Diagrammen „**C**“ und „**D**“ des Bilds 7.1.2-1 zu entnehmen. Mit der Schichtdicke ändert sich auch die chemische Zusammensetzung. Dazu gehört der Wasserstoffanteil. Er wird bei der Polymerisation (Verharzung) frei.*
Unter statischen Bedingungen entsteht aus dem Ölfilm eine harzartige Schicht. Diese härtet ähnlich wie ein klarer Kunstharzlack aus. Bei steigender Substrattemperatur steigt mit der benetzenden Ölmenge auch die Ablagerungsmenge. Wird die Temperatur jedoch sehr hoch, kommt es zum ***Verdampfen der leichteren Verbindungen****. Damit nimmt das Ablagerungsgewicht (nicht unbedingt die Dicke!) ab. Der Belag wird trüb und rissig. Einen ähnlichen Effekt erzeugt ein* ***starker Luftstrom,*** *der die Verdampfung der Ölbestandteile beschleunigt. Denkbar ist, dass der Belag wegen der schrittweisen Bildung eine* ***bewertbare Schichtstruktur*** *(Bild 7.1.2-3.2) aufweist. Sie ermöglicht Rückschlüsse auf die Häufigkeit des Benetzungsereignisses.*

*„**II**“: Raue Schichten entstehen durch* ***aufgesprühteTröpfchen*** *(dynamische Bedingungen). Auf der heißen Substratoberfläche entstehen dabei Harzpartikel, die kleinste Öltröpfchen einschließen. Sie können zu einem glatten Belag verschmelzen. Verdampfen die im Harz gefangenen Ölreste, entsteht eine raue und poröse Struktur.*
*Sinkt mit der Schichtdicke die Temperatur auf Grund von deren Isolationswirkung, können die einzelnen Harzpartikel der nachfolgenden Schicht nicht mehr verschmelzen. Unter der Oberflächenspannung bilden die weichen Tröpfchen Kügelchen. Diese haften zwar aneinander, bilden jedoch keine glatte Schicht. Inwieweit dieser Mechanismus überwiegt ist unklar. Tröpfchen können auch bereits im heißen Luftstrom zur Kugelform aushärten und so ein Pulver bilden. Steigt die Sprühmenge (dynamische Bedingungen), verkürzt das die Zeit für eine Aushärtung und verhindert auf diese Weise Ablagerungen (Diagramm „**E**“in Bild 7.1.2-1).*
*Mit der Ölmenge erhöht sich die Menge der Ablagerungen in Abhängigkeit von der Polymerisationsgeschwindigkeit (Diagramm „**F**“in Bild 7.1.2-1). Der Grund ist, dass die Partikel nicht mehr fortgeschwemmt werden.*

*„**III**“: Die* ***Ablagerungen aus der Dampfphase*** *werden von Temperatur und Zeit bestimmt. Makroskopisch sind sie matt und können über längere Zeiten eine Kruste bilden. Üblicherweise sind diese eher hart und dünn. Mikroskopisch liegt eine charakteristische „kugelige“ Struktur vor.*

Schnitt durch eine Koksablagerung mit Schichtbildung

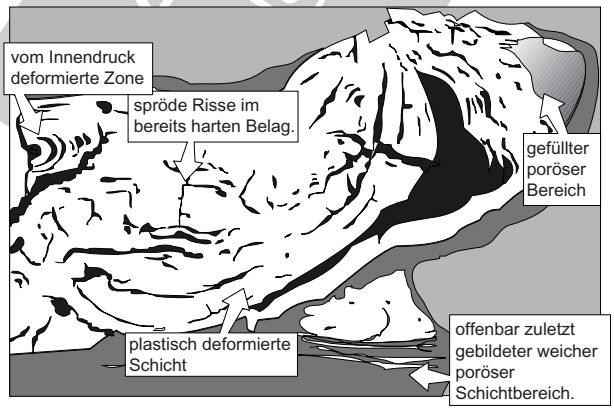


Bild 7.1.2-3.2

Bild 7.1.2-3.2 *(Lit. 7.1.2-3): Das Bild zeigt die mikroskopische Aufnahme eines* ***Schliffs durch eine Ölkoksablagerung****. Deutlich ist eine* ***Schichtenstruktur*** *zu erkennen. Neben der*

Axel Nissen - Turbocoach Schulungsunterlagen mit Lizenz

bewertbaren Schichtzahl und -dicke sind weitere wichtige Merkmale erkennbar. Die bogenförmigen Risse lassen auf einen plastisch verformbaren, weichen Anfangszustand schließen. Dieser dürfte mit der Betriebszeit ausgehärtet und versprödet sein (Bild 7.1.2-1). Das zeigen von den gebogenen Rissen ausgehende, quer verlaufende Sprödrisse. Die Ummantelung des gesamten Partikels mit einer porösen weichen Struktur (graue Umhüllung) lässt Rückschlüsse auf die zuletzt herrschenden Abscheidungsbedingungen zu (Bild 7.1.2-2.1 und Bild 7.1.2-3.1).

Bild 7.1.2-4.1 *(Lit. 7.1.2-4 und Lit. 7.1.2-5): Ölverkokung kann sich auf sehr unterschiedliche Weise auf* **Triebwerkskomponenten schädigend** *auswirken. Das gilt nicht nur für das Ölsystem selbst, sondern auch für Bauteile außerhalb. Ein direkter Zusammenhang muss dabei nicht sofort erkennbar sein.*

*„**A**“: Das wohl häufigste Problem ist das ganze oder teilweise* **Zusetzen von Ölrohren**. *Gewöhnlich handelt es sich um* **Rückölleitungen** *(scavenge) die das heiße* **Öl mit Luft vermengt (Schaum)** *abtransportieren. Sie werden nicht wie eine Frischölleitung kühlend von Drucköl durchströmt. In der Frischölzufuhr sind Öldüsen gefährdet. Deren kleiner Austrittsquerschnitt verstopft mit vom Öl transportierten Partikeln. In einer Frischölleitung und den Öldüsen selbst, kann auch* **Koksbildung** *auftreten (Lit. 7.2.1-15). Dies ist der Fall, wenn im Stillstand aus den umliegenden Heißteilen durch Wärmeleitung, Konvektion oder Strahlung die leere oder nur teilweise gefüllte Leitung zu Temperaturen über 250 °C aufgeheizt wird (Heat Soaking). Diese Gefahr besteht besonders in Rohrzonen (Bild 7.1.2-5 und Bild 7.1.2-7) die durch von Heißgas umströmte Streben in turbinenseitigen Lagerträgern (Hot Struts) geführt sind. Ein verminderter Öldurchfluss ist für Lager und Zahnräder besonders gefährlich (Überhitzung, Verschleiß). Gefährdet sind auch Entlüftungsleitungen (Ventleitungen) die nur ein Gemisch aus* **Öldampf und Luft** *mitführen, das zur Koksbildung neigt (Bild 7.1.2-3.1 „III“)*

*„**B**“:* **Abblätternder Ölkoks** *wird vom Öl mitgeführt und kann die durchströmten Komponenten schädigen. Dazu gehört das* **Zusetzen von Filtern, Sieben und Wärmetauschern** *(Skizze „G“). Wie ein verminderter Öldurchfluss ist auch eine* **Veränderung und/oder Ablenkung des Sprühkegels** *gefährlich für Lager und Zahnräder.*

Fortsetzung auf Seite 7.1.2-10

© Axel Rossmann - Turbocoach als Schulungsunterlage mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Ölverkokung

Schädigende Wirkungen einer Ölverkokung

Verengung oder Blockierung von
- Frisch- und Rückölleitungen
- Entlüftungsrohren
- Entlüftern (Breathern)

Folgen: Funktionsausfall, Ölmangel, Lagerschaden

A

Verlegen durch ausbrechende Partikel von
- Filtern und Sieben
- Öldüsen
- Wärmetauschern/Kühlern

Folgen: Lagerschäden, Funktionsausfall

B

Erhöhte Leckraten in Öl- oder Luftströmungen durch die Beeinträchtigung von Dichtungen

Folgen:
- Gleitring-, Labyrinthschäden
- Lagerschäden,
- Ölfeuer mit Überhitzung von Rotorteilen

C

Schädigung und Lebensdauerverkürzung von Wälzlagern beim Überrollen harter Partikel
- direkt abgelagert
- eingeschwemmt

Folgen: Lagerschäden

D

Schädigung von Ölpumpen (Zahnradpumpen)
- Verschleiß
- Blockieren
- Ermüdung der Zahnflanken

Folgen:
- Pumpenschaden mit Spänebildung
- Lagerschaden

E

Schädigung von Wellen durch Anstreifen an aufgebauten dickeren Ablagerungen

Folgen:
- Unwuchten
- Kerben
- Wellenbruch, Bersten von Scheiben

F

Beeinträchtigung des Wärmeaustauschs durch die isolierende Wirkung im Rohrinneren

Folgen:
- zu heißes Öl, schnelle Alterung
- zu kalter Kraftstoff, Vereisungsgefahr

G

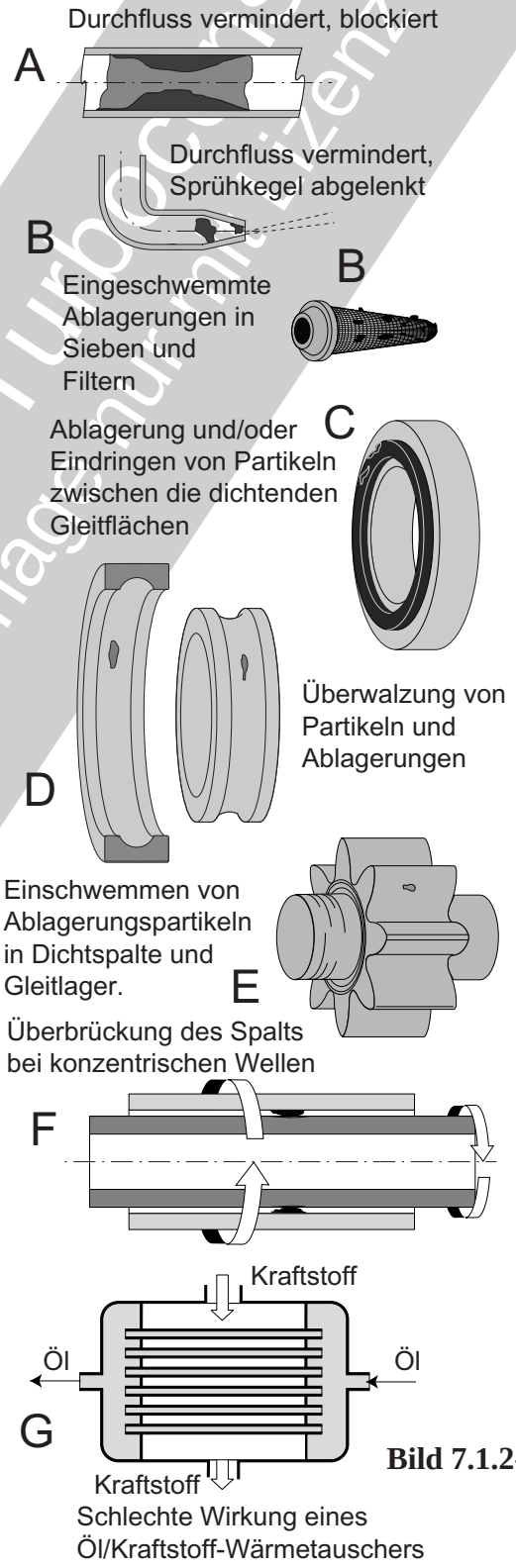


Bild 7.1.2-4.1

Turbomaschinen Unterlagen nur mit Lizenz

Fortsetzung von Seite 7.1.2-8

*„**C**“: Werden **Gleitring-** oder **Labyrinthdichtungen** durch Partikel im Leckstrom verschlissen, steigt die Menge austretenden Lecköls. So verstärkt sich der Vorgang selbst. Das kann zur Ölkohlebildung außerhalb des Ölsystems führen. Damit entsteht die Gefahr von gefährlichen Anstreifvorgängen (Bild 7.1.2-4.2 und Lit. 7.1.2-16) und im Extremfall ein Ölfeuer (Kapitel 7.1.4). Verkokt in Labyrinthspalten im Stillstand Öl, kann dies eine **Schwergängigkeit bis zum Festsitzen des Rotors** bewirken. Die potenziellen Folgen sind Startprobleme bis zur Gefahr einer Überhitzung der Turbine. Ähnliche Probleme sind auch bei **Bürstendichtungen** (Kapitel 6.10.3.2) nicht auszuschließen. Hier ist eine **Zusetzung der Bürste mit Versteifung** und Beeinträchtigung der Funktion (elastische Nachgiebigkeit) zu erwarten.*

*„**D**“: **Wälzlager** sind in erster Linie indirekt durch Einschwemmung von **Kokspartikeln mit dem Schmieröl** gefährdet. Damit ist **Laufbahn- und Käfigverschleiß** (Bild 6.3.1.1-20) sowie eine merkliche Verkürzung der Ermüdungslebensdauer der Laufflächen verbunden. Im Stillstand besteht besonders bei turbinenseitigen Lagern Heat Soaking-Gefahr. Die Folge ist **Verkokung des Lagers** und seiner Umgebung mit beträchtlich schädigender Wirkung (Bild 7.1.2-6.1, Bild 7.1.2-6.2 und Bild 7.1.2-7).*

*„**E**“: **Zahnradpumpen** (Bild 6.4.1-19, Lit. 7.1.2-17) werden im Ölsystem als Frischöl- und Rückölpumpen eingesetzt. Eingeschwemmte harte Ölkokspartikel können die **Zahnflanken verschleißen** und zur **Ermüdung** beitragen (Bild 6.4.1-3). Dieser metallische Abrieb kann weitere Folgeschäden, beispielsweise in Lagern, verursachen. Gefährlich ist auch, wenn vom **Quetschöl** abrasive Partikel in die seitlichen **Dichtspalte** geraten und Verschleiß verursachen. Damit fällt der Wirkungsgrad, d.h. die Fördermenge ab.*

*„**F**“: Zu dickeren Lagen aufgebaute Ölkohle kann gefährliche selbstverstärkende Anstreifschäden auslösen. Ein Beispiel ist die **Ölkohlebildung zwischen konzentrischen Wellen** (Bild 7.1.2-4.2, Beschreibung Bild 7.1.2-6.2). Der Anstreifvorgang führte über Aufheizung und Verschleiß zum Wellenbruch. In diesem Fall führt das Durchgehen der Turbine zum Bersten eines Rades.*

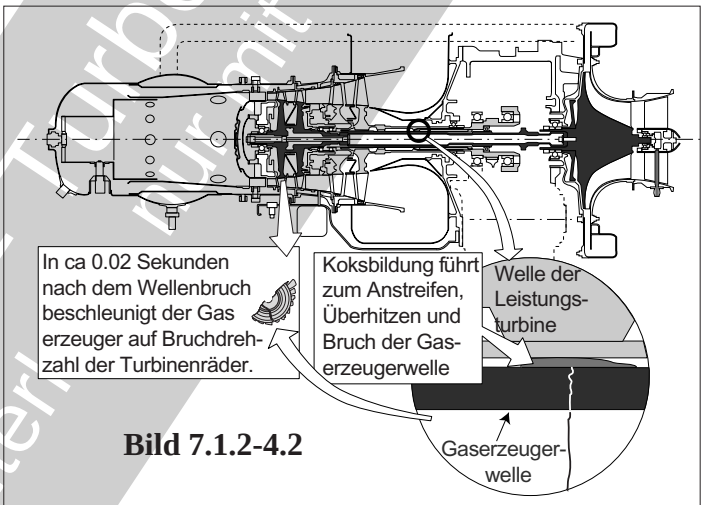


Bild 7.1.2-4.2

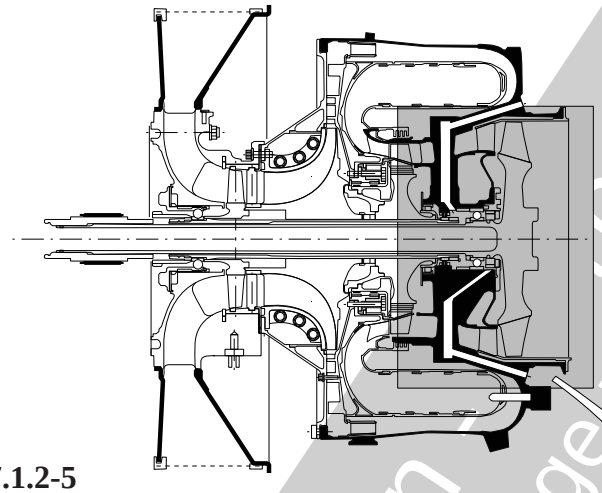
*„**G**“: **Ölkoks wirkt wärmeisolierend**. Das beeinträchtigt die Kühlung des Öls in den Rückölrohren. So kann das Temperaturniveau des Öls ansteigen, was die Alterung weiter beschleunigt bzw. die Öllebensdauer verkürzt. Das begünstigt die Koksbildung in heißeren Bereichen des Ölsystems.*

***Wärmetauscher** (Bild 7.1.3.2.2-1.2) dienen der Vorwärmung des Kraftstoffs, um bei Wassergehalt Vereisung zu vermeiden (Lit.7.1.2-17). Gleichzeitig wird die Öltemperatur abgesenkt. Werden Kokspartikel eingeschwemmt, können sich diese ablagern. Das verschlechtert den Wärmedurchgang und beeinträchtigt dessen Funktion.*

© Axel Rossmann - Turbocert
das Schulungsunternehmen
für mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Ölverkokung

Typische Probleme von Lagerkammern im Heißteilbereich im Zusammenhang mit der Bildung von Ölkoks.



Leitungen im Bereich einer Heißteillagerkammer sind von Ölkoksbildung bedroht:
- Frischölleitung
- Rückölleitung
- Entlüftung

Dieses Problem ist von vielen, sehr unterschiedlichen Triebwerkstypen bekannt und hat schon zu umfangreichen Schäden geführt.

Bild 7.1.2-5

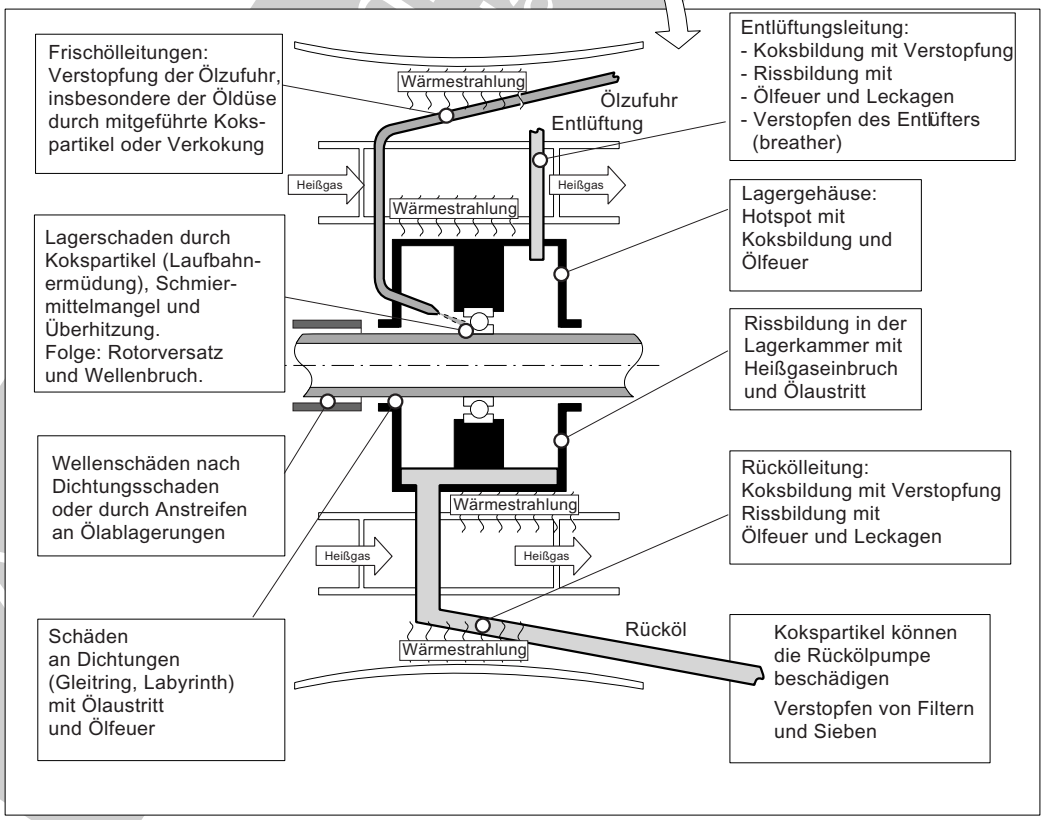


Bild 7.1.2-5 *(Lit. 7.1.2- 2, Lit. 7.1.2-8 und Lit. 7.1.2-9): Das in der oberen Skizze dargestellte Hubschraubertriebwerk hatte nach seiner Einführung in den 80er-Jahren große Probleme. Sie waren auf* ***Verkokung von Leitungen im Ölsystem*** *zurückzuführen (Beispiel 7.1.2-1). Auch von einer Vielzahl anderer großer (Bild 7.1.2-7) und kleiner Triebwerkstypen (Bild 7.1.2-6.1) sind Probleme und Schäden im Zusammenhang mit Ölverkokung bekannt geworden. Überwiegend handelt es sich um den Bereich der turbinenseitigen Lager bzw. Lager-*

kammern. Deshalb wurde das Beispiel einer typischen turbinenseitigen Lagerkammer (Rahmen unten) mit der zugehörigen Peripherie gewählt. So lassen sich die mit Verkokung zusammenhängenden Probleme aufzeigen.

Frischölleitung und Öldüse *(Bild 7.1.2-7): Eine anhaftende Verkokung in der Leitung ist im Ölstrom offenbar weniger wahrscheinlich. Die Bedingungen, dass sich ein Koksbelag bildet, erscheinen nach dem Abschalten des Triebwerks sehr viel wahrscheinlicher (Bild 7.1.2-3.1 „I“). Diese Beläge können ensprechend Bild 7.1.2-4.1 „A“ und „B“ Schäden verursachen.*

Lagerschäden *können von Ölmangel oder eingeschwemmten Kokspartikeln aus Öldüse oder Käfig ausgelöst werden (Bild 7.1.2-4.1 „D“).*

Dichtungen *der Lagerkammer gewährleisten einen Druck in der Lagerkammer, der ein Ölleck verhindert. Meist handelt es sich um Labyrinthe. Auch Gleitringdichtungen (Bild 6.10.2.2-1) und in letzter Zeit Bürstendichtungen (Kapitel 6.10.3.2) kommen zum Einsatz. Versagende Dichtungen können je nach Druckgefälle Heißgaseinbruch oder Ölaustritt ermöglichen. Im Extremfall ist in diesen Fällen die Zündung eines Ölfeuers (Kapitel 7.1.4) außerhalb oder innerhalb der Lagerkammer möglich. Weitere Schäden wie gefährliche Anstreifvorgänge beschreibt Bild 7.1.2-4.1 „C“.*

Lagergehäuse*: Dazu gehören auch die abstützenden Streben. Kommt es zur Rissbildung, z.B. durch Vibrationen oder Thermoermüdung, besteht die Gefahr eines Heißgaseinbruchs (Bild 7.1.4-9) mit Ölfeuer.*

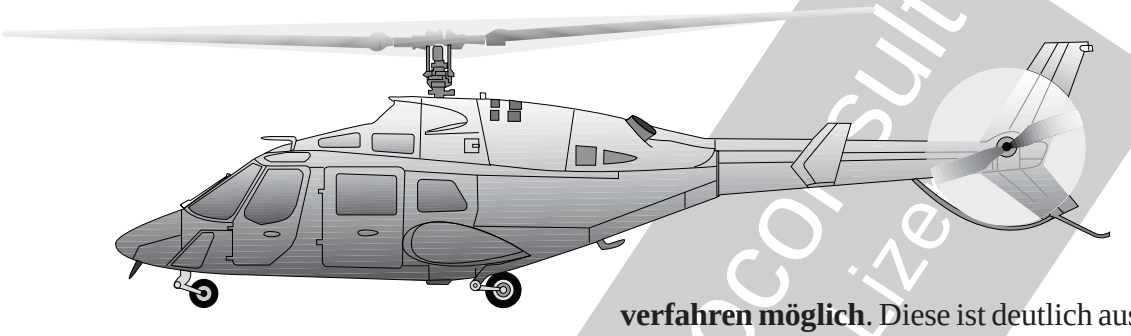
Entlüftungsleitungen *(Ventleitungen): Die durchtretenden Dämpfe und Gase gewährleisten lediglich eine wenig effektive Kühlung. Damit können sich die Rohre, insbesondere im Bereich heißer Streben, stark aufheizen (Bild 7.1.2-7). Öldampf und großes Luftangebot begünstigen Koks (Bild 7.1.2-3.1 „III“). Eine weitere Gefahr besteht in Ermüdungsrissen als Folge von Wärmespannungen zwischen Rohr und Turbinengehäuse (Bild 6.11.1.2.1-4). Einbrechendes Heißgas kann über die leichtentzündlichen Dämpfe ein Feuer auslösen. Das ist in der Lage, sich auch über längere Leitungen auszubreiten. Ein Entlüfter (Breezer) trennt das Öl von der Gasphase und bringt es in den Kreislauf zurück. Er kann von abblätternder Ölkohle verstopft werden.*

Rückölleitungen *(Scavenge-Leitungen): In diesen ist der Ölfluss so gering, dass sich bereits im Betrieb Ölkohle ablagern kann (Bild 7.1.2-3.1 „I“ und „II“). Dies wird von hohen Rücköltemperaturen unterstützt. Die Aufheizung im Betrieb und nach dem Abstellen kann die Temperatur der Rohrwandungen gefährlich ansteigen lassen. Lagern sich zusätzlich eingeschwemmte Partikel aus der Lagerkammer ab, kann das die Bildung von Koks unterstützen (Bild 7.1.2.2-1).*

Ölsystemkomponenten *wie Zahnradpumpen Bild 7.1.2-4.1 „D“ und Wärmetauscher/ Ölkühler Bild 7.1.2-4.1 „G“ sind von Partikeln die aus der Lagerkammer eingeschwemmt wurden gefährdet.*

© AVL Ressourcen - TU Ilmenau
als Schulungsunterlagen nutzen

Systeme und Betriebsstoffe: Ölverkokung



Beispiel 7.1.2-1 (Bild 7.1.2-5, Lit. 7.1.2-8 und Lit. 7.1.2-9):
Für ein Hubschraubertriebwerk wurden mehrere ADs (Lufttüchtigkeitsanweisungen) herausgegeben die ein **Verkokungsproblem in der Leistungsturbine** behandelten. In den **Entlüftungsleitungen** (vent) **innerhalb der Gehäusestreben zur Turbinenlagerkammer** bildete sich **Koks**. **Leckendes Heißgas** der Dichtungen heizt diese Rohre stark auf. Wegen der Verkokung entstand Ölmangel und führte zu **Hauptlagerschäden**. Die Folge war das Versagen von Rotorkomponenten mit Bruchstückaustritt.
Der betroffene Triebwerkstyp hatte wegen Fertigungsproblemen und Leckagen ein sehr hohes Temperaturniveau.
Offenbar wurde das Problem der Lagerschäden durch das von den Vorschriften abweichende Verhalten des **Wartungspersonals** begünstigt. So zeigt die Ölanalyse in einem Fall sehr starken **Metallabrieb**. Dieser wurde jedoch nicht von der Warnlampe im Cockpit angezeigt. Die Kabel zum Chip Detektor waren bei der Wartung getrennt worden. In einem anderen Fall leuchtete zwar die Warnlampe mehrfach auf, der **Pilot** beachtete sie jedoch nicht.
Erschwerend war wohl, dass der OEM nur sehr schwer an befriedigende **Informationen der Betreiber** gelangte. Diese beschränkten sich oft auf anfragende Telephongespräche.
Der OEM entwickelte **neue Dichtungen** und führte einen **0,003mm-Ölfilter** ein, der Kokspartikel zurückhält. Damit ist eine Ölanalyse der **Filterrückstände** nach dem **Ferrografieverfahren möglich**. Diese ist deutlich aussagefähiger als die bisher angewandte s**pektrometrische Analyse** (SOAP, Bild 7.2-1 und Bild 7.2-2.1) von **Ölproben,** deren **Säuregehalt** (TAN) gemessen wird. Zusätzlich werden die **Anzeigen der Chip-Detektoren genau verfolgt**.
Gleichzeitig wurde ein weniger verkokungsempfindliches **Schmieröl** eingeführt. Dieses entspricht MIL-PRF-23699 HTS-Spezifikation (Bild 7.1.1-1) und ist für ca. 40 °C höhere Öltemperaturen geeignet.
Darüber hinaus wurde eine Vorrichtung angebracht, die im Fall eines Lagerschadens einen **axialen Versatz der Welle** begrenzt. Diese Vorrichtung schaltet bei Wellenbruch das Triebwerk ab. So wird über die Kraftstoffzufuhr ein Durchgehen der Maschine und die Gefahr eines Turbinenradbruchs mit katastrophalen Folgen verhindert (Lit. 7.1.2-18).
Zur **Demonstration der Funktion** wurde beim OEM in einem Versuch das Öl für 20 Minuten abgeschaltet. Zwar bewegte sich nach dem so erzwungenen Lagerschaden die Turbinenwelle nach hinten, katastrophale Folgen blieben aber aus.

Kommentar: Diese Schäden gehen auf die 80er-Jahre zurück. Es handelt sich hier um eine Rekonstruktion aus einer Vielzahl von Literaturstellen. Deshalb sind Abweichungen in Details möglich. Beispielsweise ist nicht klar, inwieweit es zu Wellenbrüchen kam. Dabei besteht die Gefahr von Überdrehzahlen und Turbinenradbruch. Offenbar lösten aber auch Lagerschäden Unwuchten und gefährliche Folgeschäden aus.

© Axel Rossmann - Turboconsult
ausschließlich Ausbildungsunterlage nutzen

"Heat Soaking" bestimmt die Abstellprozedur einer Maschine. Abweichungen von den Betriebsvorschriften beeinflussen Sicherheit und Kosten.

Bild 7.1.2-6.1

Bild 7.1.2-6.1 und Bild 7.1.2-6.2 *(Lit. 7.1.2-10 und Lit. 7.1.2-11): Triebwerke haben leistungsbezogen bzw. im Umsatz thermischer Energie gegenüber Kolbenmotoren eine geringe Ölmenge. Sie liegt je nach Triebwerksgröße zwischen 2 und 40 Liter (Bild 7.1-2). Von ihr wird sowohl die Schmierung als auch die Kühlung der Lager und Zahnräder übernommen. Andererseits speichern Triebwerksteile (besonders Turbinenscheiben) mit hoher Betriebstemperatur und großen Massen erhebliche Wärmemengen. Diese fließen im Stillstand ab und können ölgekühlte Nachbarbereiche so hoch aufheizen, dass es zur Verkokung des Öls kommt ('heat soaking').*

Bei ***Verkehrsflugzeugen*** *laufen die Triebwerke im Landeanflug und noch einige Zeit nach der Landung (Rollen) bei niedriger Leistung bzw. im Leerlauf. Das ermöglicht eine Abkühlzeit des Triebwerks. Im Gegensatz dazu bietet das übliche Einsatzprofil der* ***Hubschrauber*** *dies nicht. Es gibt keine* ***Anflugphase mit niedriger Triebwerksleistung*** *und einem anschließenden* ***Rollen*** *bis zum Ausstieg. Ganz im Gegenteil, der Schwebeflug beim Landen des Hubschraubers fordert eine* ***hohe Triebwerksleistung****.*

*Das dargestellte kleine Triebwerk hat das Problem des „****Heat Soaking****" (Bild 7.1.2-4.1 „A"). Dabei wird das Turbinenlager und der umgebende Bereich der Lagerkammer nach dem Abschalten vom* ***heißen Turbinenrad*** *über die Welle aufgeheizt. Die eingeleitete Wärme wird wegen des im Stillstand* ***fehlenden Kühlluft- und Frischölstroms*** *ungenügend abgeführt. Das begünstigt besonders bei älteren Triebwerkstypen die* ***Verkokung des Öls in der turbinenseitigen Lagerkammer****.*

Aus diesem Grund wird das Triebwerk nicht einfach aus dem Betrieb abgestellt. Stattdessen schreibt der OEM den ***zeitlichen Ablauf beim Abstellvorgang*** *vor (Lit. 7.1.2-17).*

Im dargestellten Fall wird das Triebwerk vor dem Abstellen einige Zeit (ca. ***2 Minuten****)* ***im Leerlauf*** *gehalten. Dabei sinkt die Abgastemperatur von ca. 700°C auf ca. 400°C. Nach dem Abstellen hat die Luft im Abgasbereich noch ca. 150°C. Sie erhitzt sich aber durch*

© Axel Bossmann, Turbomot assessment, für mich

Systeme und Betriebsstoffe: Ölverkokung

Die Verweilzeit im Leerlauf beim Abschalten eines Maschine ist unbedingt einzuhalten, sonst droht Verkokungsgefahr.

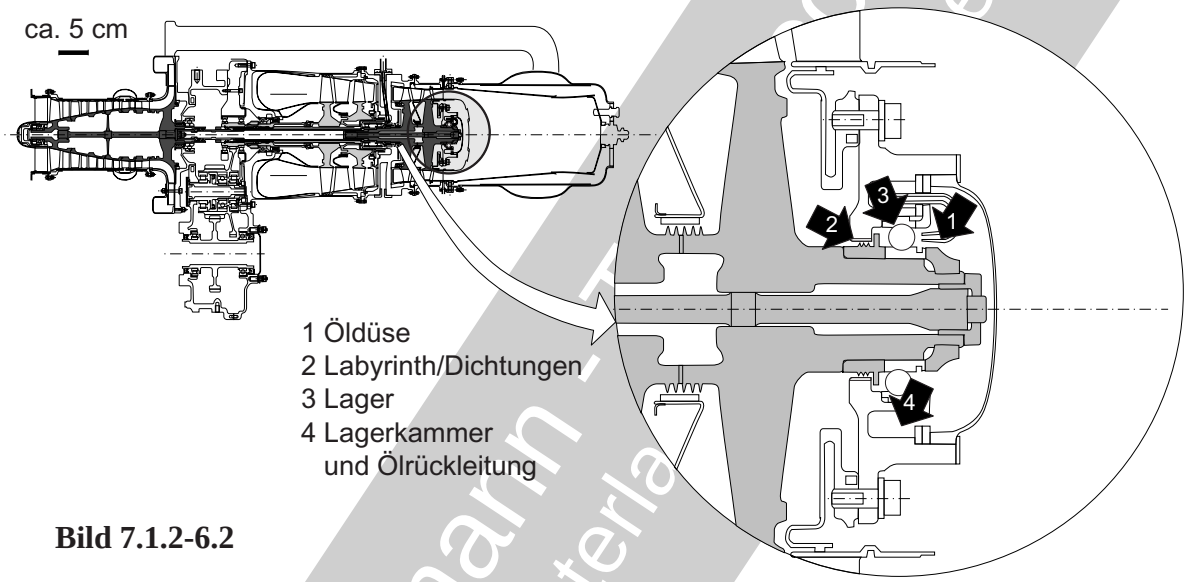


Bild 7.1.2-6.2

Heat Soaking wieder auf ca. 320°C. Diese Temperaturen zeigt im Cockpit das Instrument für die Abgastemperatur an.
*Neuere Triebwerkstypen mit digitaler elektronischer Regelung (**Full Authority Digital Engine Control** = **FADEC**) müssen gewöhnlich keine derartigen Abstellprozeduren einhalten. Ein Grund ist, dass verkokungsgefährdetes Öl abgepumpt wird und **Ventile** ein Nachlaufen von Öl verhindern.*

Merksatz: Die OEMs als **Konstruktionsverantwortliche** des Triebwerks müssen alle konstruktiven Möglichkeiten ausschöpfen, um potenziell schädigende **Koksentstehung zu verhindern**.

Merksatz: Die Vorgehensweise einer **Ölumstellung** und/oder **-mischung** ist detailliert festzuschreiben und dafür zu sorgen, dass das Wartungspersonal sich genau daran hält.

Bild 7.1.2-7 *(Lit. 7.1.2-1): Dieses Beispiel zeigt, wie **langwierig und schwierig Verkokungsprobleme** in den Griff zu bekommen sind. Die Situation ist besonders anspruchsvoll, wenn es sich um viele Triebwerke einer Flotte von Verkehrsflugzeugen handelt. Hier muss die **Verfügbarkeit** im Betrieb aufrechterhalten werden. **ETOPS-Betrieb** (Lit. 7.1.2-18) verschärfte das Problem.*
*Das Lager im **Turbinenaustrittsgehäuse** zeigte in mehreren Fällen Schäden, die sich auf **Öl-Verkokungsprobleme in der Frischölzufuhr** (!) zurückführen ließen. Aber auch Rückölleitungen zeigten starke Verkokung. Die Probleme waren einem speziellen Öltyp nicht zuordenbar. Offenbar wurde Öl entsprechend der U.S.-Spec DOD-L-85734 AS (Bild 7.1.1.1-1) verwendet.*
*Eine Untersuchung des OEM ergab, dass die **Öldüse** des Lagers durch eine **abgeplatzte Koksschicht** aus der Frischölleitung verlegt wurde.*
Leider geht aus der vorliegenden Literatur nicht hervor, ob sich der Ölkoks im Stillstand

Axel Rossmann - Technische Universität Berlin - Vorlesungsunterlagen

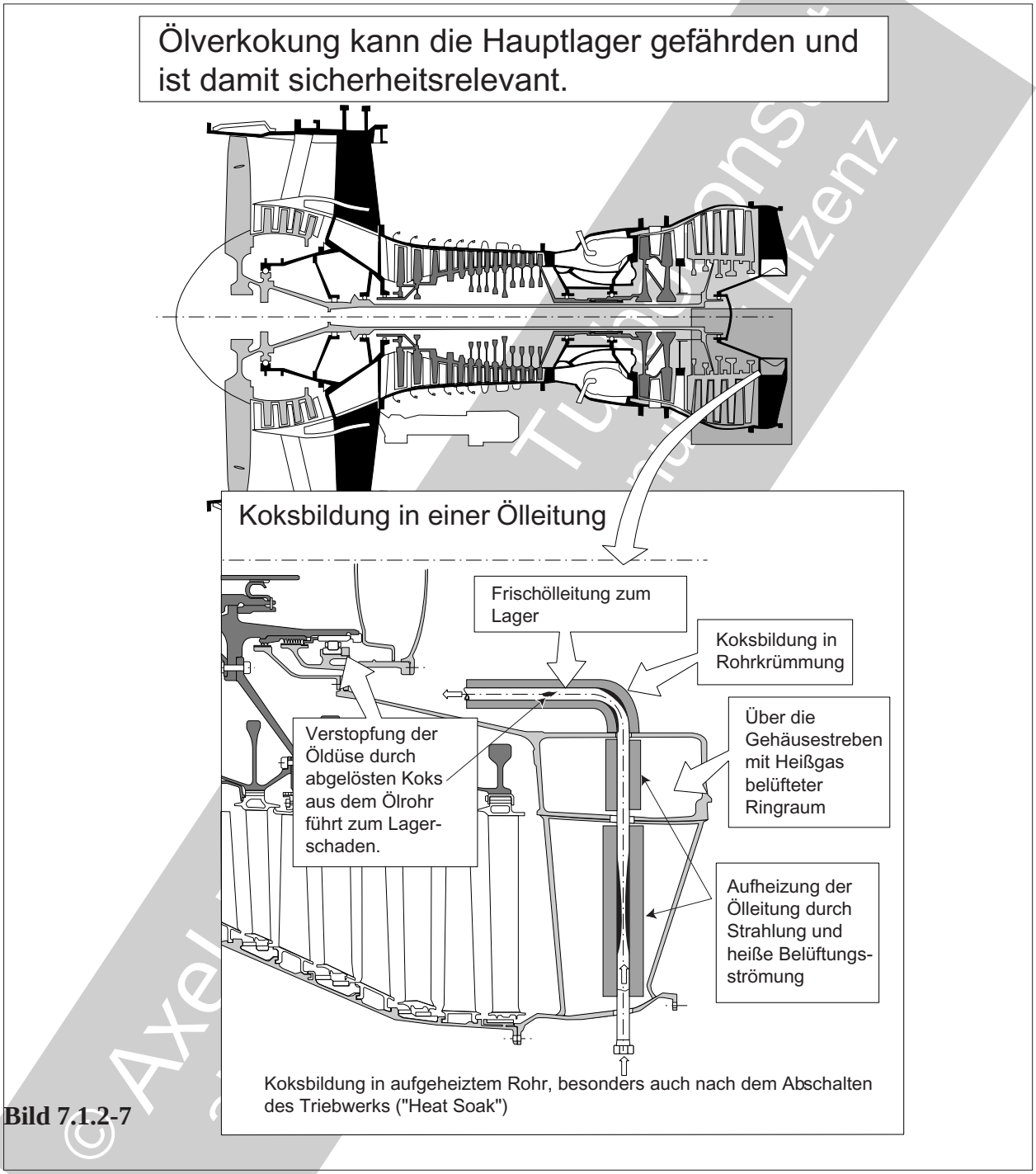


Bild 7.1.2-7

kurz nach dem Abschalten (heat soaking) oder während des Betriebs bildete. Der ***von den Koksablagerungen verringerte Ölfluss*** *verminderte die Kühlung. Das beschleunigte die Verkokung in der Frischöl- und Rückölleitung bis zur vollständigen Verstopfung.*

Offenbar war die ***Frischölzufuhr durch die Gehäusestreben*** *bereits* ***konstruktionsbedingt empfindlich für Verkokung*** *(Rahmen unten).*

Auf diese Erkenntnis reagierte der OEM mit einer ***Reinigungsvorschrift*** *für die Werkstatt (shop). Es handelte sich um eine* ***thermische Behandlung*** *mit dem Verbrennen (?) der Ablagerungen in den Ölleitungen (baking method). So ließen sich die Schäden anscheinend begrenzen.*

Nachdem jedoch weitere schwere Verkokungsfälle auftraten, wurde die Ölsorte geändert. Die

gesamte Flotte des betroffenen Betreibers ging auf ein Öl nach U.S. Spec MIL-L-23699 Type II (Bild 7.1.1-1) über. Dieses Öl hatte sich bei anderen Betreibern bewährt. Man entschied sich für einen **Ölwechsel** *bei der gesamten Flotte, um ein unkontrolliertes Mischen mit Ölen der Triebwerkstypen anderer Flugzeuge des Betreibers zu verhindern. Für den Ölwechsel schrieb der OEM ein* **Ablassen und Nachfüllen** *(drain and flush) des Ölsystem vor. Mit* **Warnaufklebern** *wurde das Wartungspersonal vor einem* **Vermischen der Öle gewarnt**.

Leider wurde das Verkokungsproblem nach der Ölumstellung erst richtig ernst. Bereits ein Vierteljahr später, kam es zu einem **Lagerschaden mit heftigen Vibrationen**. *Gleiche Symptome traten kurz darauf an einem anderen Triebwerk auf. Ähnliche Erfahrungen machte ein anderer Betreiber. Weitere Fälle mit Lagerverkokung folgten. Die Triebwerke hatten zwischen 500 und 1000 Start-Abstellzyklen nach der letzten Ölsumpfreinigung.*

*Ein ungünstiger Einfluss ging offenbar von der Reinigung der Rohre durch „***Ausbrennen***" aus. So nahm die* **Haftfestiggkeit verbliebener Koksschichten** *ab. Nun konnten sie sich leichter im Betrieb lösen und den Ölfluss behindern. Das veranlasste den OEM zu einer Umstellung auf eine* **alkalische Spülung** *(flushing method). Weil jede Methode ihre spezifischen Vorteile hat, wendete der Betreiber nun* **vorsichtshalber beide Methoden** *in Folge an.*

Es zeigte sich, dass die **Art des Ölwechsels für das Abplatzen bereits vorhandener Koksablagerungen** *in der Frischölleitung entscheidend ist. Verantwortlich war die* **hohe Additivkonzentration** *im frischen Öl. Diese unterstützt ein Ablösen des Koksbelags. Eine Verstärkung der Koksbildung als Folge vermischter alter und neuer Ölsorte ließ sich jedoch nicht ausschließen.*

Eine Durchflussmessung an den Triebwerken am Flügel *war die einzige vorbeugende Prüfung auf eine Blockierung der Öldüsen. Diese erforderte eine spezielle Vorrichtung, die der OEM bereitstellte. Bereits die ersten so überprüften Triebwerke bestanden den Test nicht. Nun wurde es offenbar hektisch. Mit einem vereinfachten, vom Betreiber entwickelten* **Durchblastest** *der potenziell betroffenen Leitungen wurden alle Triebwerke in wenigen Tagen überprüft. Auf diese Weise konnten wahrscheinlich in etlichen Fällen Lagerschäden verhindert werden.*

Die Durchflussprüfungen werden im **monatlichen Abstand** *wiederholt (beim A-check des Flugzeugs).*

Es erfolgte eine Umstellung der Prozedur des Ölwechsels von **Ablassen und Auffüllen** *(drain and flush)* **auf Nachgießen (top-up method)**.

Zusätzlich wurden die betroffenen **Ölleitungen demontierbar** *gestaltet. Das erleichterte die Wartungsarbeiten in kritischen Bereichen.*

Untersuchungen des OEM ließen mit einer **Überwachung des Öldrucks** *(monitoring) zusätzliche Sicherheit erwarten.*

© Axel Bossmann - Turbocourse.it
aus Lehrunterlagen mit Lizenz

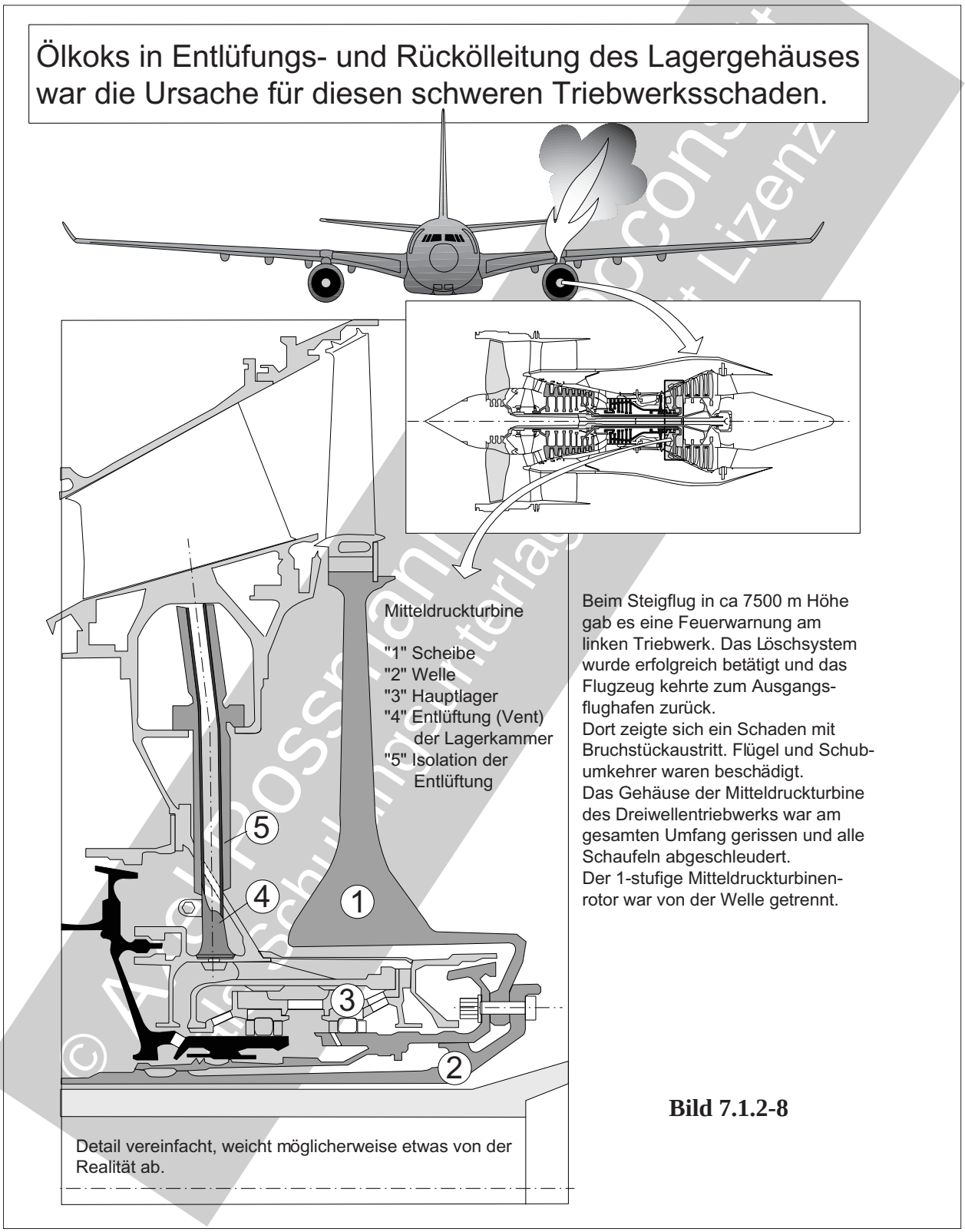


Bild 7.1.2-8

Bild 7.1.2-8 *(Lit. 7.1.2-13 und Lit. 7.1.2-14): Der betroffene Flugzeugtyp ist für ETOPS 180 zugelassen. Die Untersuchung des* ***Schadenstriebwerks*** *durch Behörden und OEM ergab:*

Das ***Turbinengehäuse*** *der Mitteldruckturbine (IPT) war* ***am gesamten Umfang aufgerissen****. Die* ***Welle der IPT*** *(„2“) war im Bereich der hinteren Verschraubung zur Scheibe (‘drive arm’) im Bereich der Kühlbohrungen* ***abge-***

***trennt**. Eine Werkstoffuntersuchung ließ auf **Bauteiltemperaturen über 1000°C** schließen. Offenbar führte die folgende Überdrehzahl der freien Turbinenscheibe („1“) zum **Abschleudern aller Schaufeln**. Die zugehörige **Hauptlagerkammer wies zwei Brandlöcher** mit Durchmessern im Zentimeterbereich auf.*

*Vom oberen Teil der **Enlüftungsleitung** (vent tube, „4“) war lediglich noch ein kleines, am Turbinengehäuse befestigtes Reststück mit Anzeichen **extremer Überhitzung** vorhanden. Das Leitungsstück in der Lagerkammer fehlte bis auf ein kleines Stück. Die Wärmeisolation („5“) war nicht mehr vorhanden.*

*Eine Untersuchung des **Paralleltriebwerks** ergab:*

***Weiche, körnige Koksablagerungen** in der Entlüftungsleitung im Bereich der Lagerkammerwand. Die Leitung wurde nicht vollkommen blockiert. Diese Ablagerungen haben im Vergleich zum üblichen Koks in Entlüftungsleitungen eine **ungewöhnliche Struktur**. Sie unterstützt **Selbstzündung** (engl. autoignition, Lit. 7.1.2-13) und wirkt als Flammhalter. Das beschleunigt den Koksaufbau. Die Entlüftungs- und Rückölleitung zeigte starken aber entsprechend dem OEM nicht ungewöhnlichen **Frettingverschleiß**. Die Wärmeisolation („5“) um die Rohre fehlte.*

***Zusätzliche Erkenntnisse**:*

*Der betroffene Betreiber war der Einzige der bei diesem Triebwerkstyp **ein bestimmtes Öl** (HJO 291) verwendet. Ein Verkokungstest ergab jedoch keine Abweichungen von den Vorschriften. Im Rahmen der Untersuchungen wurde festgestellt, dass die **Ölzulassung** offenbar **nicht ausreichend die Forderungen in den modernen Fantriebwerken** berücksichtigt.*

***Frühere Vorkommnisse**: Bereits ca. 10 Jahre vor dem Schaden wurden bei zwei Triebwerken an gleicher Stelle Verkokungen gefunden. Der OEM reagierte mit einem Service Bulletin. Es sah regelmäßige Boroskopinspektionen (alle 1500 Betriebsstunden) am Flügel vor. Gegebenenfalls hatte eine Reinigung des Rohrs zu erfolgen. Bedenkliche Koksablagerungen wurden offenbar nur nach 3000 Stunden und einem bestimmten Öl (ASTO 560) beobachtet. Dieses nahm der OEM aus der Liste anerkannter Öle. Seither wurden auch bis über 10 000 Betriebsstunden keine nennenswerten Koksablagerungen festgestellt. Darauf brach man die Inspektionen ab. Deshalb war das erst später zum Einsatz gekommene Schadenstriebwerk und dessen Paralleltriebwerk mit ca. 15 000 Betriebsstunden bei ca. 2300 Zyklen seit Neu nie überprüft worden.*

***Weiteres Vorgehen**:*

Nach dem Schaden wurden alle Triebwerke des betroffenen Typs, unabhängig vom verwendeten Öl, am Flügel überprüft. Dabei war es lediglich möglich, in den Entlüftungsleitungen Anzeichen für eine Verstopfung zu erkennen. Beschädigungen der Leitungen oder der Isolation waren so nicht zu finden. Etwa 180 Triebwerke mit langen Laufzeiten zeigten Koksablagerungen, aber weniger als im akuten Fall. In drei Fällen waren jedoch 75% des Leitungsquerschnitts verlegt.

*Dann wurden bei Überholungen an 70 Triebwerken die Rohrleitungen mit dem Wärmeschutz äußerlich inspiziert. In jedem zweiten Fall war die **Wärmeisolation in der kritischen Zone** (Nähe zur Lagerkammer) als auch im äußeren Bereich (Nähe des Turbinengehäuses) **gerissen, aufgeplatzt oder fehlte**.*

***Wahrscheinlicher Schadensablauf**:*

*- Beschädigte **Wärmeisolation** führt zu erhöhter Wandtemperatur.*
*- **Koksaufbau** in der Entlüftungsleitung.*
*- **Selbstentzündung** des Öls.*
*- **Überhitzung der Leitung und Lagerkammer**.*
- Ölaustritt mit Ölfeuer.
*- **Überhitzung der IPT-Welle bis Bruch**.*
*- **Durchgehen der IPT**.*
*- Schwächung des Turbinengehäuses (Anstreifen?) und **Abschleudern der Beschaufelung mit Bruchstückaustritt**.*

© Verlag Bertsch - Turbomaschinen
Lehrbuchunterlagen Band 7

Empfohlene Maßnahmen gegen potenziell gefährliches Ölverkoken in Schmierölsystemen:

Konstruktionsmerkmale:
- Möglichst starker Öldurchfluss
- Möglichst niedrige Öltemperatur
- Möglichst niedrige Temperatur ölbenetzter Wände (Isolation, Kühlung)
- Keine scharfen Rohrbiegungen
- Keine strömungshemmenden Querschnitte

Wartung:
- Geeignete Reinigung der Komponenten des Ölsystems
- Überwachung der Ölparameter im Betrieb
- Durchflussmessungen am Flügel.
- Festgelegte Methoden des Wechsels und Mischens von Schmieröl.

Öl:
- Auswahl optimal betriebsspezifisch geeigneten Öls mit möglichst hoher thermischer Stabilität.

© Vogelpohl - TU Berlin
Nur für den Schmierstoffunterlage

7.1.2.1 Alterung von Ölen und Flüssigkeiten durch Kavitation und elektrische Entladungen.

Bei Ölen und Flüssigkeiten für **Hydrauliken** aber auch in **Ölschmierungssystemen** kann man eine **ungewöhnlich schnelle Dunkelfärbung** beobachten (Lit. 7.1.2-19 und Lit. 7.1.2-20). Beispiele in der Literatur sind Servosysteme von Wasserturbinen, numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen, Extrusionspressen sowie die Druckölschmierung in Gasturbinen. Es ist eine Tendenz mit der **Leistungskonzentration** von Hydrauliken erkennbar. Betroffen sind nicht nur mineralische Öle sondern auch unbrennbare Öle auf Phosphatbasis. Die Dunkelfärbung lässt sich **nicht auf zu erwartende und 'normale', unbedenkliche, häufig über längere Zeit entstehende Veränderung von Ölzusätzen** (Bild 7.1.1-6) zurückführen. Auch ist die Flüssigkeitstemperatur im Vergleich zu Schmierölsystemen mit temperaturbedingten Verkokungen niedrig. So sind keine heißen Bereiche wie hochtourige Wälzlager (Bild 7.1.2-6.2) mit ungenügender Wärmeabfuhr oder Ölleitungen mit hohen Temperaturen vorhanden. Solche Betriebsbedingungen sind eher für Gasturbinen typisch (Bild 7.1.2-7 und Bild 7.1.2-8). In der Literatur werden dafür zwei ursächliche Effekte verantwortlich gemacht bzw. vermutet.

- **Kavitation** in Form des Makro- und Mikro-Dieseleffekts (Band 1 Bild 5.5.1.3-12, Lit. 7.1.2-20 und Lit. 7.1.2-22). Erkennungsmerkmale und deren Kombination:
- Deutlich zischendes bis zu einem prasselnden Geräusch.
- Bei optischer Zugänglichkeit wahrnehmbare feinste Lichtblitze.
- Ungewöhnlich schnelle Dunkelfärbung des Öls auf Grund von Überhitzungsprodukten ('Rußpartikel' ($< 1\ \mu$).

Eine Unterscheidung von unbedenklichen Verfärbungsursachen im Zusammenhang mit den Additiven dürfte mit den heutigen Analysenverfahren und Mikroskopen (REM) möglich sein. Vor Maßnahmen in Richtung Kavitationsvermeidung sollte eine solche Klärung erfolgen.

- Schnelle Bildung von dunklem Schlamm und dunklen lackartigen Belägen.
- Kavitationsmerkmale (Band 1 Kapitel 5.5.1.3) an strömungsführenden Wänden.

- **Elektrische Entladung** als Folge des Flüssigkeitsstroms (Lit. 7.1.2-20 und Lit. 7.1.2-22). Ursache ist **Triboelektrische Aufladung** (Band 1 Kapitel 5.1.2) Diese entsteht in Systemen mit strömenden Fluiden, insbesondree Hydrauliken. Kommt es zur Entladung mit

Funken bzw. Mikrolichtbögen können sowohl das Fluid/Öl als auch Komponenten (z.B. Filter, Lit. 7.1.2-22) schädigen. Solche Entladungen können sich auf verschiedene Weise bemerkbar machen:

- Klick- und Knallgeräusche,
- Optisch wahrnehmbare Effekte wie
  Blitze in Strömungsrichtung,
  Spitzenentladungen (Koronaentladung, 'Elmsfeuer' an metallischen Gehäusen (z.B. Filter)). Tritt auch als **Büschelentladung** auf, wenn man sich der Gehäuseoberfläche oder einem zugänglichen Austrittsstrahl mit einer geerdeten Sonde nähert.
  Flammeneffekt bei Einschalten der Anlage zwischen Ölstrahl und dem Filteraustritt (Gehäuse) der deutlich oberhalb (Zentimeter) des Ölspiegels liegt.
- Messung von Spannungsimpulsen
- Schädigungen wie Brandspuren (z.B. an Filtern, Lit. 7.1.2-24) oder kleine Anschmelzungen an metallischen Rohrleitungen (Lit. 7.1.2-22).

Bild 7.1.2.1-1 *(Lit. 7.1.2-19 bis Lit. 7.1.2-23): Maßnahmen können erforderlich werden wenn eine* ***unerwartet schnelle Alterung****, insbesondere* ***Dunkelfärbung*** *durch 'Rußpartikel' (< 1 µ) auftritt. Dies gilt nicht für viele Schmiersysteme (z.B. hochtourige Lager, heiße Lagerkammern in Turbomaschinen , Kolbenmotoren) bei denen verkokende Öltemperaturen zu erwarten sind. Dagegen sind Anlagen mit eher niedrigen Betriebstemperaturen wie Hydrauliksysteme verdächtig.*

*Als Hauptursache für '****Dieseleffekte****' (Band 1 Bild 5.5.1.3-12) wird Kavitation verantwortlich gemacht. Eine Implosion der Bläschen führt zu einer* ***adiabatischen Erhitzung*** *mit hohen Temperaturen (Diagramm unten links). Das kann offenbar bis zur* ***Zündung des Öl-Luftgemischs in der Luftblase*** *führen. Es sind Folgen einer* ***Blasenbildung aus gelöster Luft*** *im Öl/Fluid. Sie ist nicht zuletzt von dessen* ***Entlüftungszeit*** *bestimmt (Diagramm unten rechts). Es gilt deshalb bereits die* ***Luftaufnahme in der Flüssigkeit zu verhindern****. Hier bieten sich als Maßnahmen an:*

- Pumpen die mit fester Drehzahl laufen und dabei einen konstanten Förderstrom erzeugen (z.B. Zahnradpumpen) sind ungünstig. Sie regeln die Fördermenge mit einem Ölrücklauf, was zu mehr Turbulenzen führt. Das begünstigt die Aufnahme von Luft. Dagegen wird zu ***Pumpen*** *mit dem Betriebszustand mit* ***angepasstem Fördervolumen*** *geraten. Hierzu gehören Kolbenpumpen (Skizzen oben).*

- Optimierung der ***Öltemperatur****. Sie bestimmt die Löslichkeit der Luft im Öl. Das lässt sich nutzen die Luftaufnahme zu minimieren und die kontrollierte Abscheidung zu maximieren (Diagramm unten rechts).*

- Der ***Öldruck****, insbesondere die* ***Anstiegsgeschwindigkeit*** *(Diagramm unten links) in der Pumpe beeinflusst die Luftaufnahme der Flüssigkeit. Diese ist von der Auflösung der Luftblasen durch Lösung in die Flüssigkeit bestimmt.*

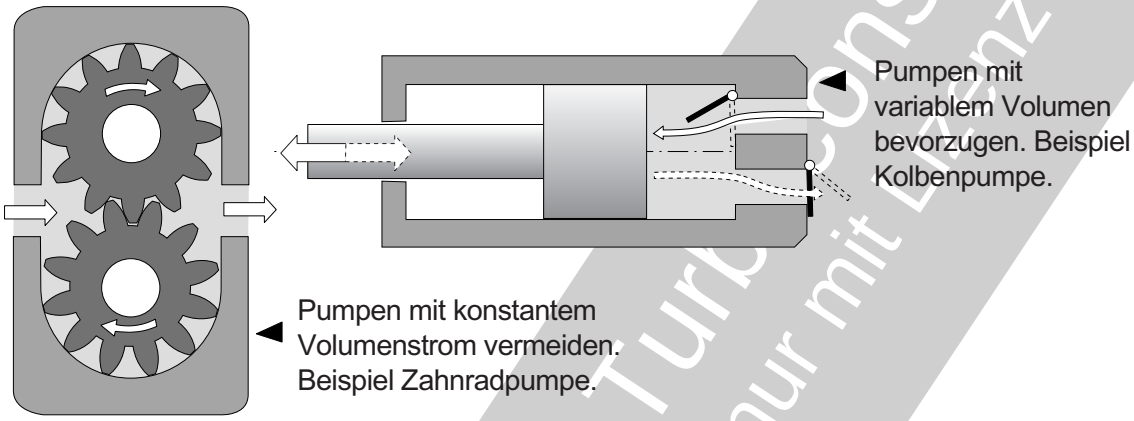
- Der ***Tank*** *spielt in mehrfacher Hinsicht eine wichtige Rolle (Rahmen).*

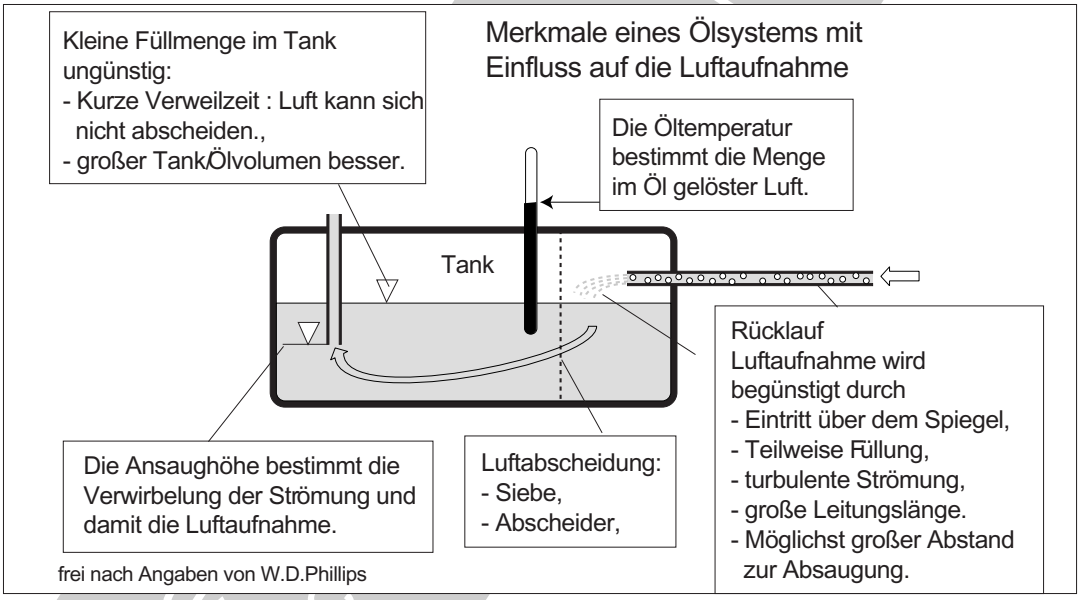
Je größer das ***Tankvolumen,*** *umso länger hat die Flüssigkeit Zeit für die Entlüftung.*
Ansaugstutzen *der Pumpe (Ansaughöhe) und* ***Anordnung eines möglichst turbulenzarmen Rücköleintritts*** *ohne Verspritzen. D.h.* ***nicht oberhalb des Flüssigkeitsspiegels****.*

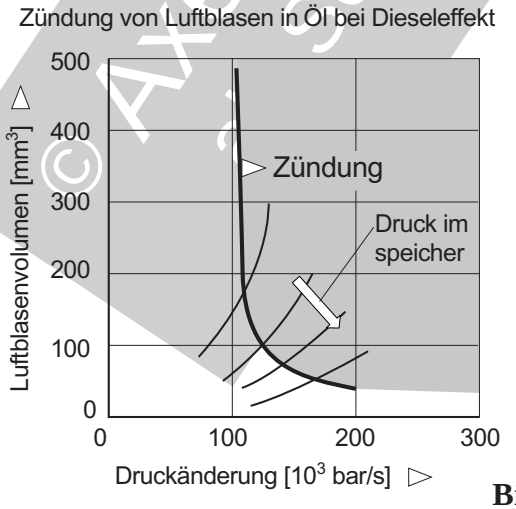
- ***Luftabscheider*** *und* ***Siebe*** *nutzen.*

© Academia - Turbosoft
Abbildungsoberfläche nur mit Lizenz

Komponenten und Bedingungen die eine Fluidalterung durch Dieseleffekte beeinflussen.







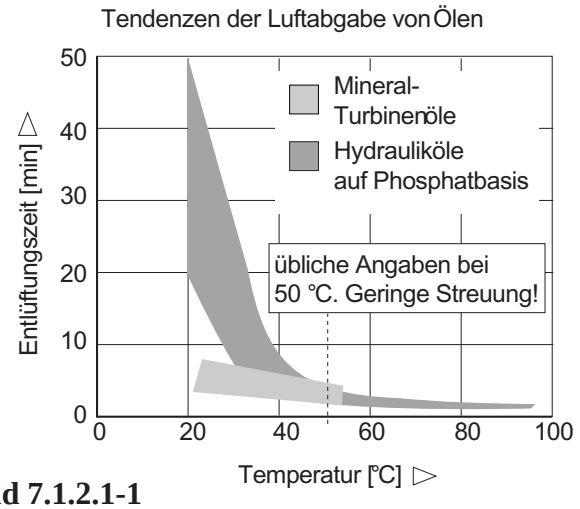


Bild 7.1.2.1-1

© Axel Schmidt Turbokonsult nur mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 7.1.2

7.1.2-1 D.Santamaria, „Engine oil coking and its effect on performance“, Zeitschrift „Aircraft Technology & Maintenance - Engine Yearbook“, 1999, Seite 48 - 53.

7.1..2-2 J.Schmidt, W.K.Hank, A.Klein, K.Maier, „The Oil/Air System of a Modern Fighter Aircraft Engine“, MTU-München GmbH, Seite 1-20.

7.1.2-3 D.G.Dowse, E.Jantzen, K.Maier, „Deposition in Gas Turbine Oil Systems - Part 1: Analysis and Classification“, SAE-Publication SP-633 „Aviation Gas Turbine Lubricants-Military and Civil Aspects“, „Aviation Fuel and Lubricants - Performance Testing“, October 1985, Seite 115-131.

7.1.2-4 E.Jantzen, „Tendency of Deposit Formation of Aircraft Engine Oils“, Symposium „Aviation Turbine Oils“, an der Technische Akademie Esslingen, December 14th - 16th, ISBN 3-924813-11-6, 1988, Seite 9.1-9.20.

7.1.2-5 K.Meier, „In-service Engine Oil Problems“, MTU-München, Seite 4.1-4.10.

7.1.2-6 NTSB Identification FTW84FA216, Microfiche number 26590, „Turbine Assembly Shaft Fatigue“, Seite 1.

7.1.2-7 Interavia AirLetter No. 10,675 - January 23, 1985 - 5, „Allison Fix for S.76 Engines“, Seite 1.

7.1.2-8 E.J.Bulban, „Can Textron Lycoming Fix the LTS 101 - This Time?“, Zeitschrift „Rotor & Wing International“, November 1987, Seite 34-36.

22.3.2-9 „Lycoming spends $30 million on LTS101 turbine“, Zeitschrift „Flight International“, 14 October 1989, Seite 10.

7.1.2-10 R.Strecker, „Der richtige Dreh beim Abstellen“, Zeitschrift “aerokurier“, 2/2002, Seite 60,61.

7.1.2-11 „Lubricating Systems“, www.globalsecurity.org/military/, 2005, Seite 1-17.

7.1.2-12 E.Jantzen, „Behaviour of Aircraft Engine Oils at High Temperature“, DFVLR, Seite 1-12.

7.1.2-13 V.Rosenecker, „NTSB, Safety Recommendation - In reply refer to A-06-85 through -87“, December 14, 2006, Seite 1-5.

7.1.2-14 „NTSB, Accident Report DCA04IA002“, April 25, 2006, Seite 1-5.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

7.1.2-15 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 3 2000, ISBN 3-00-017733-7, Kapitel 11.2.2.2.

7.1.2-16 „Allison Fix for S-76 Engines“, Zeitschrift „Interavia AirLetter“, No. 10,675 - January 23, 1985 - 5.

7.1.2-17 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 5 2008, ISBN 978-3-00-025780-3, Kapitel 11, Kapitel 22.2 und Kapitel 23.2.1.

7.1.2-18 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 1 2000, ISBN 978-3-00-005842-7, Kapitel 4.5.

7.1.2-19 H.-J.Lohrentz, „Mikro-Dieseleffekt als Folge der Kavitation in Hydrauliksystemen“, Zeitschrift „Ölhydraulik und Pneumatik“ 18 (1974) NR.3, www.lohrentz-gmbh.de/unternehmen/.../kavitation.pdf, Seite 3-8.

7.1.2-20 W.D.Phillips, „The high-temperature degradation of hydraulic oils and fluids“, „Journal of Synthetic Lubrication“Verlag John Wiley & Sons 2006, https://www.hyprofiltration.com/.../, 23, Seite 39-70.

7.1.2-21 H.-J.Lohrentz, „Dichtheitsmessmethoden und die Einflüsse des Schmutzes auf die Messung und Prüfstandstechnik“, Zeitschrift „Ölhydraulik und Pneumatik“ 43 (1999) NR.2, www.lohrentz-gmbh.de/unternehmen/.../einfluesse-mess-pruef.pdf, Seite 120 - 122

7.1.2-22 H.-J.Lohrentz, „Elektrische Entladungsvorgänge verursacht durch Flüssigkeitsstrom“, Zeitschrift „Ölhydraulik und Pneumatik“ 24 (1980) NR.3, www.lohrentz-gmbh.de/.../elektrostatische_entladungen.pdf, Seite 120 - 122

7.1.2-23 H.-J.Lohrentz, „Die Entwicklung extrem hoher Temperaturen in Hydrauliksystemen und Einflüsse dieser Temperaturen auf die Bauteile und ihre Funktionen“, Vortrag auf der ‘Technischen Arbeitstagung des MZV’1968,Stuttgart-Hohenheim,www.lohrentz-gmbh.de/unternehmen/veroeffentlichungen/dieseleffekt.pdf, Seite 1 30.

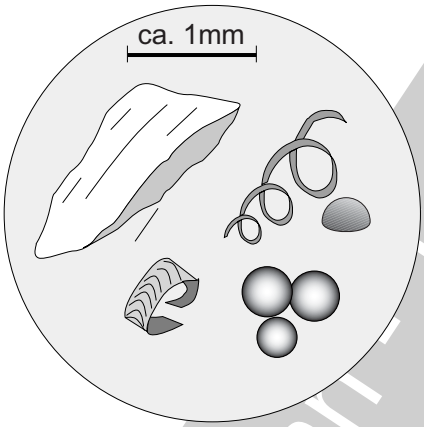
7.1.2-24 M.Mahapatro, C.Bauer, I.Borchers, „Die triboelektrische Aufladung im Griff“, Zeitschrift ‘Fluid’, 5/2010, http://imperia.mi-verlag.de/imperia/md/upload/.../flu10_5_028_030.pdf, Seite 28-30.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

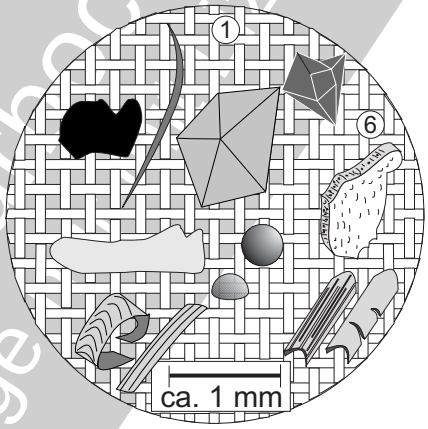
7.1.3 Verunreinigungen in Schmierölen

7.1.3.1 Partikel im Öl

Magnetstopfenbefund



Filterbefund



Partikel im Öl können auf unterschiedliche Weise **schädigend wirken**. Dazu gehören **Verschleiß, Ermüdung von Wälzflächen, Verlegen von durchströmten Öffnungen, Filtern und Sieben, Klemmen und Kaltverschweißen von bewegten Teilen und abrasiver Verschleiß**.

Die **Identifikation von Verunreinigungen** im Öl ist in zweifacher Hinsicht von großer Bedeutung. So können **Verunreinigungen** wichtige **Bauteile bis zum katastrophalen Versagen schädigen**. Man denke nur an Wälzlagerlaufbahnen in die harte Partikel eingedrückt werden (Bild 6.3.1.1-9). Also müssen Partikel gefunden und vermieden werden. Außerdem ist es wichtig, die Quelle der Partikel zu identifizieren, um sich anbahnende **Schäden für gezielte Maßnahmen rechtzeitig zu erkennen**.

Verunreinigungen im Schmieröl eines Triebwerks haben eine spezifische „Geschichte“. Sie enthält **Entstehungsort, Entstehungsmechanismus und Schädigungspotenzial**. Die Entschlüsselung dieser „Geschichte“ einer Verunreinigung ist Voraussetzung für **Risikoabschätzungen** und **gezielte Abhilfen**.

Dem erfahrenen Praktiker kann bereits das Aussehen (Augenschein, Binokular) von **Filter-** (Bild 7.1.3.1-2) oder **Magnetstopfenablagerungen** (Bild 7.1.3.1-4) wichtige Erkenntnisse erschließen.

Diese lassen sich mit etwas Glück mit vergrößernden Methoden wie **Lichtmikroskopie** und **Rasterelektronenmikroskop** (REM, engl. SEM) absichern und erweitern. Voraussetzung ist die Kenntnis typischer **Merkmale zur Identifikation bestimmter Partikel**.

Darüber hinaus stehen eine Vielzahl **Analysenmethoden** in Labors zur Verfügung. So lässt sich die **chemische Zusammensetzung** der Partikel ermitteln.

Dazu ist die richtige **Probenentnahme** in Ort und Technik erforderlich (Kapitel 7.2). Weiter können die gewonnenen Ergebnisse **Entstehungs-/Schadensmechanismus** der Partikel klären. Anhand der chemischen Zusammensetzung kann die Komponente, von der die Verunreinigung durch Verschleiß oder Ermüdung stammt, identifiziert werden. Unter **Anwendung von Vorschriften** (z.B. Wartungshandbuch) lassen sich die nächsten Schritte zur Risikominimierung und Schadensverhütung festlegen (Bild 7.2-10). Im akuten Fall, dessen Merkmale auf den Schadensablauf schließen lassen, sollte der Fachmann eine **Risikoabschätzung** vornehmen.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage verwendbar

Systeme und Betriebsstoffe: Ölverunreinigungen: Partikel

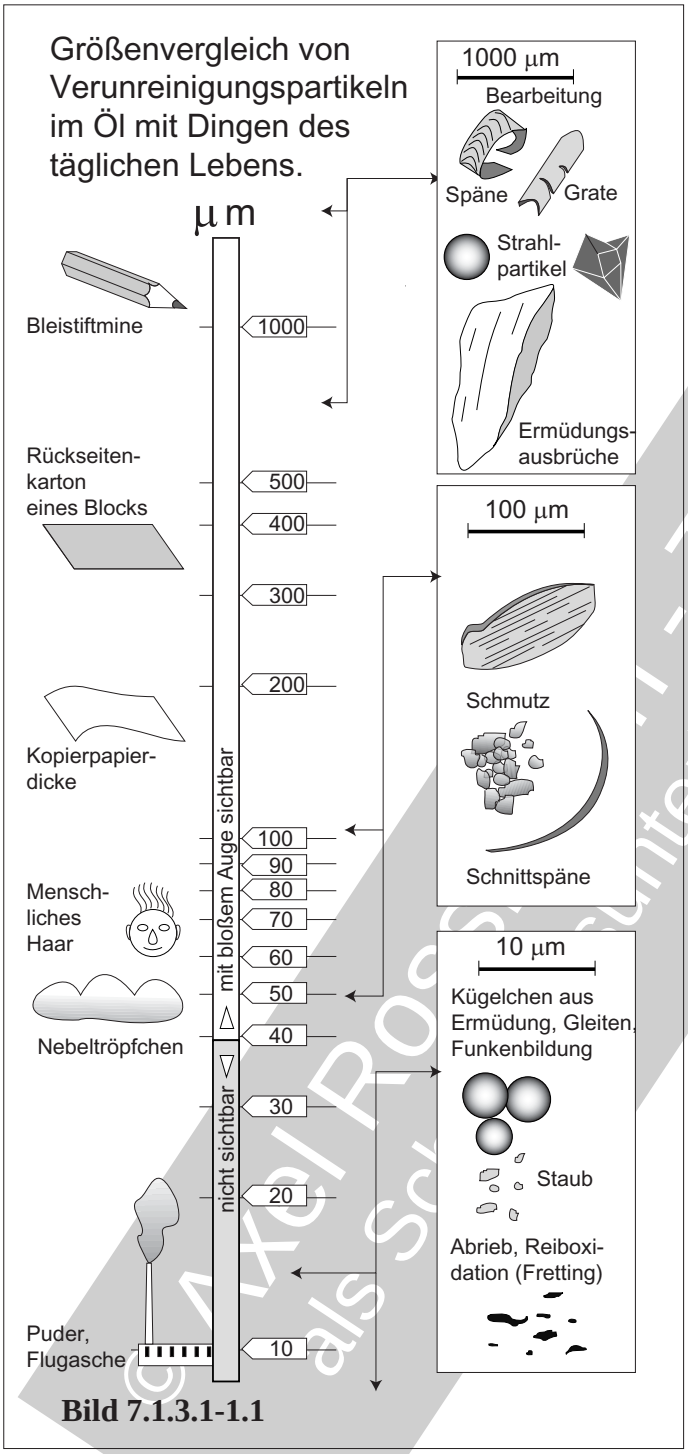


Bild 7.1.3.1-1.1

Bild 7.1.3.1-1.1 *und* ***Bild 7.1.3-1.2*** *(Lit. 7.1.3.1-1 und Lit. 7.1.3.1-6): Dem Praktiker dürfte eine Vorstellung von den* ***Partikelgrößen der Ölverunreinigungen*** *hilfreich sein. Das ermöglicht erste Hinweise zur Beurteilung von Filter- und Magnetstopfenablagerungen auf ihre Schadensrelevanz.*

Die Eigenschaften der Partikel sind von großem Interesse. Als charakteristische Merkmale ermöglichen sie eine Identifikation. Damit wäre die ***Voraussetzung für Abhilfen und Risikoabschätzungen*** *gegeben.*
Die potenziell schädigende Wirkung eines Partikels beruht in erster Linie auf ***Eindrücken*** *(Bild 6.3.1.1-9) und* ***abrasivem Verschleiß****. Hierbei spielt neben der* ***Größe,*** *die* ***Form*** *(Bild 7.1.3.1-3) und die* ***Härte*** *(Bild 7.1.3.1-3) eine wichtige Rolle.*
Im Folgenden wird der Einfluss dieser Merkmale auf die schädigende Wirkung von Fremdpartikeln betrachtet.

Partikelgröße*: Angaben beziehen sich gewöhnlich auf den Durchmesser einer gedachten Kugel die das Partikel umhüllt. Überschreitet diese die übliche* ***Ölfilmdicke*** *zwischen Gleit- und Wälzflächen (Wälzlagerlaufbahnen, Zahnradflanken) ist die Bedingung für eine gefährliche mechanische Schädigung gegeben (Bild 6.3.1.1-6). Spröde Partikel, die den* ***tragenden Ölfilm überbrücken, zersplittern*** *in eine der Spaltweite entsprechenden Größe. Damit können mehrere hundert kleine Partikel entstehen. Sie können in den Spalt eintreten und die schädigende Wirkung erhöhen.*

Partikeloberfläche*: Mit dem Zerkleinern eines Partikels steigt die* ***Gesamtoberfläche*** *stark an. So haben beispielsweise 100 gleiche Bruchstücke eine 4,5 mal größere Oberfläche als das ursprüngliche Partikel aus dem sie entstanden sind.*
Diese ist für die ***Absetzgeschwindigkeit*** *von Bedeutung. Sie steigt mit der Partikelgröße und der* ***Partikeloberfläche im Verhältnis zum Partikelgewicht*** *exponentiell an (Bild 7.1.3.1-1.2). Die Absetzgeschwindigkeit typischer Partikel ist deutlich langsamer als die Strömungsgeschwindigkeiten im Ölsystem. Damit reicht sie kaum, um im Betrieb ohne Trägheitseinflüsse wie Fliehkraft bei Strömungsumlenkung, Ablagerungen zu bilden. Beim Stillstand und in Lagertanks ist das jedoch anders.*

© Axel Rossmann - Turbocoach als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Ölverunreinigungen: Partikel

*In der **Hydraulik** ist das **Absetzen von Partikeln unerwünscht** weil dies den Transport mit der Strömung und damit die Filtration verhindert. Das gilt insbesondere für Partikelgrößen über 20 µ m. Finden sie sich im Zwischenbehälter ist das ein Zeichen für ungenügende Filtration.*

*Die **Oberflächengröße verstärkt potenziell schädigende Effekte** wie:*

*- **Wasser im Öl** (Kapitel 7.1.3.2) wird von einer größeren Partikeloberfläche gebunden. So entsteht ein **emulgierender Effekt**.*

*- **Katalytische Effekte** im Zusammenhang mit metallischen Verschleißpartikeln im Öl werden verstärkt.*

*- Die **Wirkung von Additiven** für Verschleißminderung oder Korrosionsschutz wird herabgesetzt.*

*- Die Partikel dienen als **Kondensationskeime für Luftbläschen**. Damit wird die Neigung des Öls zum **Schäumen** begünstigt, gleichzeitig die **Trennung von Luft und Öl erschwert**.*

*Die **Partikelform** ist aus dem Gesichtspunkt der Tribologie bzw. der **Verschleißwirkung** von großem Einfluss. Verständlicherweise verhalten sich kugelige Partikel (Bild 7.1.3.1-5) weniger abrasiv als kantige (Bild 7.1.3.1-3). Kantige Partikel entstehen in erster Linie durch **Zersplittern**. Ob dies jedoch im Ölkreislauf erfolgte oder wie bei Strahlgut (Aluminiumoxid, Glas, Bild 7.1.3.1-2) bereits vor der Einbringung in das Öl, ist nicht immer klar. Von Bedeutung ist die **Anordnung der Bruchfacetten** harter spröder Partikel. So ist leicht einzusehen, dass davon abrasive Vorgänge betroffen sind (Bild 7.1.3.1-3).*

*Die **Partikelzahl** erhöht das potenzielle Schädigungsvermögen. Damit steigt das **Risiko schädigender Eindrücke und erosiven Abtrags linear** an. Die Verschleißmenge kann leicht ein Mehrfaches (Zehnerpotenz) der Partikelmasse übersteigen. Dieses Risiko besteht in Bereichen des Ölsystems die kein Filter vor der „Verunreinigungsquelle" schützt. Gleichzeitig können Partikel durch **Erosion und chemische Reaktionen die Entstehung neuer Partikel** fördern. Korrosionshemmende Additive können diesen Effekt minimieren.*

Bild 7.1.3.1-3 behandelt weitere, über das äußere Erscheinungsbild hinausgehende, jedoch aussagefähige Partikeleigenschaften. Dazu gehören Härte, Dichte, Zusammensetzung, Polarität, magnetisches Verhalten und elektrische Leitfähigkeit.

Tendenz des größenabhängigen Absetzverhaltens von Partikeln in einem Öl.

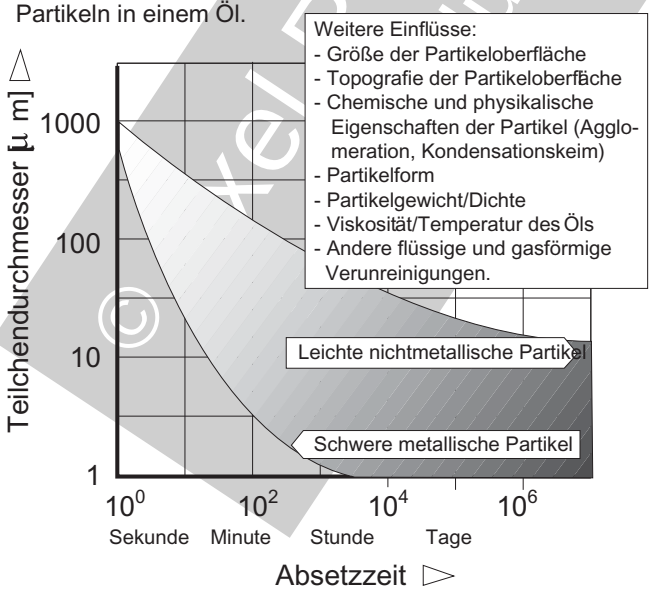


Bild 7.1.3.1-1.2

***Bild 7.1.3.1-2** (Lit. 7.1.3.1-3): **Ölfilter** (Skizze unten links) können im Gegensatz zu Magnetstopfen alle Sorten Verunreinigungen auffangen. Sie müssen lediglich größer als die **Maschenweite** sein. Dabei ist zu bedenken, dass es sich bei der Partikelgröße und Maschengröße um insbesondere bei Fasermatten um ststistische Werte handelt. So kann en 3 µ m Filter abhängig vom β x-Wert (Lit. 7.1.3.1-10, Partikelzahl > x (µ m) **vor** dem Filter / Partikelzahl > x (µ m) **nach** dem Filter) 100 µ m Teilchen durchlassen. Typisch sind sog.*

© Exel Prosstream - Turbocharger Ausgangsunterlagen mit Verz

*„**Fische**“die wegen ihrer länglichen Form durchschlüpfen wenn es sich um keinen Tiefenfilter handelt.*
*Andrerseits besteht sogar die Möglichkeit selbst kleinere Partikel als die Maschweite zurückzuhalten. Dazu müssen die **Filterfasern** eine gewisse **Oberflächenaktivität** und/oder eine faserige Struktur (z.B. Papierfilter) aufweisen. Filter werden in regelmäßigen Abständen gewartet bzw. die Filterelemente (Patronen, Skizze oben) ausgetauscht. Filterrückstände sind damit auf diesen Zeitraum zu beziehen.*
*Partikel über 0,1 mm lassen sich mit dem Binokular untersuchen. Eine Bewertung ist bei ausreichend Fachkenntnis und Erfahrung möglich. Hierbei sind gegebenenfalls **Bildbeispiele in Wartungshandbüchern und Spezifikationen** heranzuziehen.*
*Liegt die Porengröße eines Filters bei ca. 0,03 mm sind Partikel im Größenbereich 0,015 - 0,025 mm erste Anzeichen für beschleunigten Verschleiß einer Komponente im Ölsystem. Handelt es sich um ferromagnetische Partikel, ist davon auszugehen, dass sich Größen über 0,1 mm an Magnetstopfen ablagern. Mit Filtern, die Partikel von ca. 0,003 mm zurückhalten, gewinnen die Untersuchungen der Oberfläche, Struktur und Form weiter an Bedeutung. Zum Einsatz kommen moderne **Mikroskope**. **Optisch** unter Nutzung von Computerprogrammen (z.b. für eine bessere Tiefenschärfe) und/oder elektronenmikroskopisch (**REM**, Band 1 Bild 2.2.2.4-3) lassen sich selbst kleine Partikel bewerten. So werden wichtige Schlüsse auf den Entstehungsmechanismus möglich. Typische makroskopisch und mikroskopisch (REM) bewertbare Partikel (Detail) sind:*

*„**1**“ **Nadelförmige Metallspäne** dürften bei **Gleitverschleiß** entstanden sein wenn Primär- und Sekundärverschmutzungen auszuschließen sind. Typisch sind Anstreifvorgänge oder Trockenlauf an weichen Werkstoffen wie Messing, Kupfer (z.B. Käfig) oder Leichtmetallen von Gehäusen (Al-, Mg-Legierungen). Bei Stahlspänen besteht der Verdacht eines intensiven Anstreifvorgangs mit Überhitzung und Härteabfall.*

*„**2**“ **Metallgrate** sind an Merkmalen wie scharfkantigem Querschnitt und rissartigen Einkerbungen erkennbar. Zunächst besteht der Verdacht ungenügender Entgratung im **Fertigungsprozess** (Band 1 Bild 5.4.1.1-8 und Lit. 7.1.3.1-8). Bei solchen Graten sind Querriefen an der Außenoberfläche zu erwarten. Grate können auch bei einem **Anstreifvorgang** entstehen. In diesem Fall ist auf **Anzeichen für hohe Temperaturen** (Anlauffarben) und Längsriefen zu achten.*

*„**3**“ **Bearbeitungsspäne** haben ihren Ursprung in der Fertigung (Neuteil, Reparatur). Sie gelangen bei nicht ausreichender Sauberkeit oder bei Unachtsamkeit in den Ölkreislauf. Eine solche Möglichkeit ist die Ansammlung in einer schlecht einsehbaren Ölbohrung. Die Späne haben oft eine längs **eingerollte Form** mit querorientierter Schuppenbildung. Glatte Späne mit Längsriefen entstanden als Fließspan.*

*„**4**“ **abgeplatzte Schichtpartikel** sind gewöhnlich flach, gegebenenfalls mit **Strukturen aus dem Herstellungsprozess**. Hierzu gehören Merkmale nicht nachgearbeiteter **galvanischer** Oberflächen (z.B. Silber) und **Poren thermischer Spritzschichten** (Panzerung von Labyrinthspitzen Bild 6.10.3.1.2-3.1; Einlaufschichten). Poren und besondere Strukturen sind auch auf Bruchflächen in der Schicht zu erwarten. **Geschliffene** harte Schichten wie Cr- werden besonders als Gleitschichten für Dichtringe und/oder als Maßkorrekturen in der Reparatur verwendet. Die Struktur ihrer Bruchflächen sind für den Fachmann charakteristische Merkmale (z.B. Stängelstruktur). Auf einer Oberfläche sind Schleifriefen, auf der Haftseite eine unbearbeitete Struktur zu erwarten.*

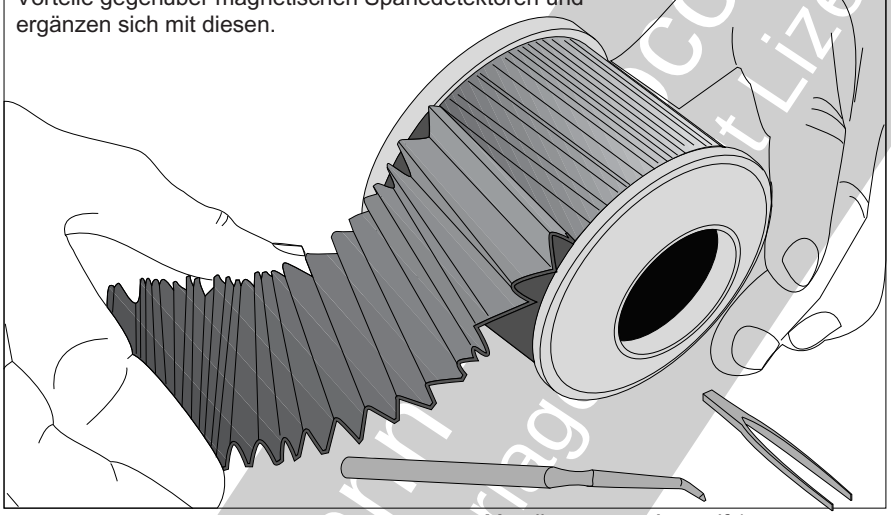
*„**5**“**Nichtmetallische Partikel die im Triebwerk selbst entstanden** sind (Bild 7.1.3.1-3) zeigen häufig ein sprödes Erscheinungsbild. Ty-*

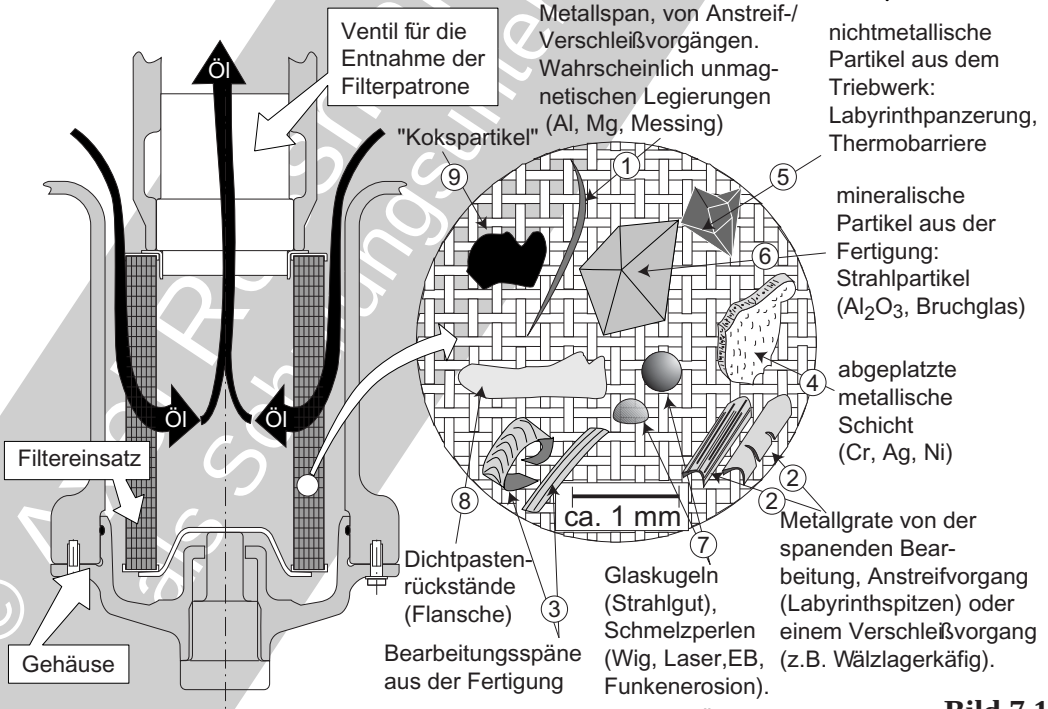
© Adressmann - Turbopolsuit
Alle Schutzrechte vorbehalten

Systeme und Betriebsstoffe: Ölverunreinigungen: Partikel

! Der Ölfilter, eine wichtige Diagnosehilfe.

Ölfilter bzw. deren Rückstände sind ein wichtiges Hilfsmittel, um die "Gesundheit" eines Triebwerks zu überwachen. Sie haben auch Vorteile gegenüber magnetischen Spänedetektoren und ergänzen sich mit diesen.





Einige typische Partikel die sich in Ölfiltern finden können. **Bild 7.1.3.1-2**

pisch sind ausbröckelnde ***Panzerungen der Spitzen*** *(Bild 6.10.3.1.2-3.1) von* ***Labyrinthdichtungen*** *der Hauptlagergehäuse. Es handelt sich gewöhnlich um* ***Aluminiumoxid*** *(Al_2O_3). Auch* ***Wolframkarbid*** *als* ***Verschleißschutz*** *kann abplatzen. Partikel von* ***Wärmedämmschichten*** *(Zirkonoxid) der Heißteile können von der* ***Sperrluft*** *in das Öl gebracht werden.*

„6“ ***Nichtmetallische Partikel aus der Fertigung*** *(Bild 7.1.3.1-3): Typisch sind Aluminiumoxid* ***Strahlpartikel von Reinigungsprozessen****. Auch Bruchglas von Glasperlen ei-*

nes Reinigungs- und Verfestigungsprozesses findet sich. Partikel die weitgehend ihre ursprüngliche Form behalten haben (Glasperle, Korundkristall) dürften bei Neuteilfertigung oder Reparatur in Komponenten des Ölsystems (z.B. Getriebegehäuse) verblieben sein. Bei Splittern macht sich der ***Beladungseffekt*** *abrasiv gestrahlter Oberflächen bemerkbar (Band 1 Bild 5.5.1.1-5). Dabei bleiben in weichen Metallen (z.B. Leichtmetall-Getriebegehäuse) Splitter des Strahlguts stecken. Diese lösen sich mit der Zeit im Betrieb und werden vom Ölstrom mitgeführt.*

*„**7**“* ***Kugeln*** *können sehr unterschiedlichen Ursprungs sein (Bild 7.1.3.1-5). Zum Beispiel zurückgebliebenes Strahlgut aus Verfestigungsprozessen (Glasperlenstrahlen, Kugelstrahlen) oder Schmelzperlen aus Schweißprozessen oder von thermischen Bohrverfahren (z.B. Laserbohren, Funkenerosion). Die Oberfläche von Kugeln die sich aus einer Schmelze bildeten, weisen oft eine charakteristische Dendritenstruktur auf, die im REM leicht zu identifizieren ist.*
Sehr kleine Kügelchen können sich auch in einem Schwingriss bilden (Bild 7.1.3.1-5).

*„**8**“* ***Dichtpastenrückstände*** *sind gewöhnlich gallertige, gefärbte (häufig blau) Partikel. Sie stammen von überschüssiger Dichtpaste (Bild 19.2-7) zwischen* ***Flanschen****. Diese Paste quillt beim Anziehen der Flanschschrauben aus dem Spalt in das Gehäuseinnere. An* ***Flanschen von Getriebegehäusen*** *besteht besonders die Gefahr, dass Dichtungsreste in den Ölkreislauf gelangen. Bei großen Mengen ist die* ***Verstopfungsgefahr*** *für* ***Ölsiebe*** *besonders groß (Bild 7.1.4.2-1).*

*„**9**“* ***Kokspartikel*** *stammen von Koksansammlungen in heißen Zonen des Ölsystems. Sie sind häufig und können als* ***Verstopfungsursache*** *kleiner Querschnitte (z.B.* ***Öldüsen****) durchaus gefährlich werden. (Bild 7.1.2-5 und Bild 7.1.2-7).*

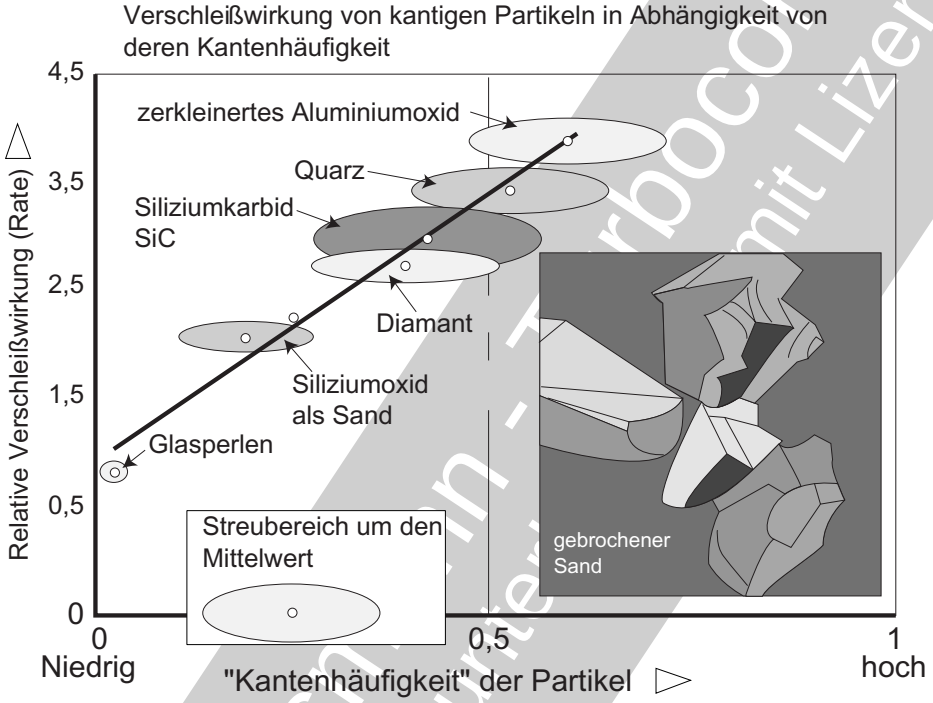
Bild 7.1.3.1-3 *(Lit. 7.1.3.1-6): Den* ***Einfluss der Form*** *spröd brechender kristalliner Partikel zeigt das Diagramm oben. Man erkennt, dass die Verschleißwirkung von der sog. Kantenhäufigkeit , d.h. der Zahl der* ***Facetten*** *abhängt. Erstaunlicherweise ist offenbar nicht immer die* ***Härte entscheidend****. Beispielsweise liegt Diamant trotz seiner hohen Härte in der Verschleißwirkung deutlich niedriger als die sehr viel „weicheren“ Mineralien Aluminiumoxid und Quarz.*
Neben Partikelgröße und Form (Bild 7.1.3.1-1) wird die schädigende Wirkung von Fremdpartikeln im Öl auch von anderen Eigenschaften beeinflusst.

Partikelhärte *beeinflusst Verschleißwirkung und Schädigungen durch* ***Eindrücke in Funktionsflächen*** *(Bild 6.3.1.1-9) der Komponenten im Ölsystem. In der Tabelle wird die Härte in* ***Mohs*** *angegeben. Sie wird mit der* ***Ritzfähigkeit*** *des Materials mit dem niedrigeren Wert durch das mit dem höheren ermittelt. Handelt es sich um spröde Werkstoffe wie Staub, Partikel vom Reinigungsstrahlen, thermische Spritzschichten wie Panzerungen und Thermobarrieren, ist die* ***Druckfestigkeit entscheidend****.*
Auch harte Metalle wie Wälzlagerstähle lassen sich ***zähen Werkstoffen*** *zuordnen. Das gilt unter dem Gesichtspunkt einer Verformung zwischen zwei Druckflächen. Diese Partikel werden lediglich deformiert und können so mehrfach hintereinander schädigende Eindrücke erzeugen.*
Anzumerken ist, dass ***metallische Werkstoffe bei Kaltverformung verfestigen****. Das kann ihre Härte deutlich steigern. So erfahren scheinbar weiche zähe Metalle durch Kaltverfestigung eine gefährliche Härtesteigerung. Aus diesem Gesichtspunkt können Angaben der Härtetabelle irreführen.*
Um in Lauf-/Wälzflächen gefährliche Abdrücke zu hinterlassen, ist eine hohe Härte der Partikel nicht unbedingt notwendig. Wird die plastische Verformung beim Eindruck behindert, kann die Inkompressibilität wirksam wer-

© A. Rossmann - TU Chemnitz
Als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Ölverunreinigungen: Partikel

Die Schädlichkeit von Partikeln im Öl hängt von vielen Eigenschaften ab.



Härte und Dichte einiger typischer Partikel die im Triebwerksöl zu finden sind.

Partikeltyp	typische Dichte [g/cm3]	Mohs-Härte
Grate und Drehspäne	6-9	3-7
Schleifspäne	6-9	3-7
Abrasive Partikel	3-6	7-9
Staub vom Werkstattboden	1-5	2-8
Staub von der Strasse	2-6	2-8
Aluminiumoxid		9
Rotes Eisenoxid (Rost)	2,4-3,6	5-6
Schwarzes Eisenoxid (Magnetit)	4-5,2	5-6
Kupferoxide	6,4	3,5-4
Werkzeugstahl	7-8	6-7
Vergütungsstähle	7-8	4-5
Weiche Stähle	7-8	3
Gusseisen	6,7-7,9	3-5
Kupferlegierungen, Bronze	7,4-8,9	1-4
Weichmetall, Gleitlagerschicht	7,5-10,5	1
Ruß, "Koks"	1,7-2	

Bild 7.1.3.1-3

*den. **Partikeldichte** bzw. das spezifische Gewicht ist für das **Schweben im Öl** von Bedeutung (Bild 7.1.3.1-1.2). Das **Absetzen** von Partikeln kann **unerwünscht** sein (z.B. **Hydraulik**, Bild 7.1.3.1-1.2) wenn sie sich so der Filtration entziehen. Damit wird die **Neigung zum Absetzen** beeinflusst (. Beispielsweise bedarf es Minuten, bis sich ein Weißmetallpartikel (Gleitschicht aus Blei und Zinn) von 0,02 mm Größe in Turbinenöl absetzt. So verbessert das*

© Rossmann - Turboconsult Schulungsunterlagen mit Lizenz

Partikelgewicht unter Zentrifugalkräften die ***Ölreinigung****. Das ist besonders wichtig, weil sonst schwerere Partikel den* ***Verschleiß*** *im Ölsystem ansteigen lassen. Der Grund ist, dass die Partikel bei Umlenkungen (Ölleitung) oder aufprallenden Ölstrahlen intensiveren Kontakt mit der Bauteiloberfläche haben.*

Zusammensetzung der Partikel*: Das Schädigungspotenzial eines Partikels wird von der chemischen Reaktivität beeinflusst. Keramische Partikel wie Staub, Glas und Abrasionsstrahlgut reagieren kaum chemisch, sie sind inert. Das gilt, solange sie nicht* ***Verschmutzungen wie Salzablagerungen*** *tragen. Anders verhält es sich jedoch mit erosionbedingten frischen metallischen Flächen. Das gilt für Bauteil und Verschleißpartikel. Diese* ***frischen metallischen Mikroflächen*** *sind nicht von Oxidschichten geschützt. Sie sind hochreaktiv. Eisen- und Kupfer begünstigen die Alterung (Oxidation) des Öls. Es entstehen Säuren, Ablagerungsschichten und Schlamm (Bild 7.1.2-1 und Bild 7.1.2-3.1).*

Polarität *ist die Folge elektrischer Ladung von Molekülen bzw. Ionen (geladene Molekülteile). Diese können das Öl um* ***polare Additive verarmen****. Sie dienen dem Korrosions-(Rostinhibitoren) und Verschleißschutz (engl. antiwear agents). Ihre Reinigungswirkung verhindert eine Zusammenballung von Schadstoffen. Andere betroffene Additive sollen die Druckfestigkeit des Öls steigern.*
So wird nicht verhindert, dass zum Zusammenballen neigende geladene Partikel Ablagerungen bilden. Diese verstopfen enge Querschnitte des Ölsystems. Dabei kann ***Wasser im Öl als Bindemittel*** *wirken. Das unterstützt mit der Verarmung an Additiven die Bildung von* ***Emulsionen und Schlamm****.*

Magnetische Eigenschaften *von Partikeln macht man sich zu Nutze, um sie mit Magnetstopfen aus dem Öl abzuscheiden (Bild 7.2-7). Wieder abgelöste magnetisierte Partikel werden vom Ölstrom abtransportiert. Damit neigen sie zum* ***Haften und zu Ansammlungen an magnetischen Oberflächen****. So besteht die Gefahr, dass sich feine Öffnungen schließen oder Gleitflächen verschleißen. Das ist besonders bei* ***Reglern und Ventilen in Hydraulikanlagen*** *bedenklich. Hierzu gehören Aktuatoren für Schubumkehrer oder Verstellungen von Verdichterleitschaufeln.* ***Oft erfolgen diese Verstellbewegungen über Elektromagnete****. Ihr Magnetfeld kann magnetische oder magnetisierte Partikel aus dem Öl anziehen und ansammeln.*
Anzumerken ist, dass auch ***hochlegierte austenitische Stähle,*** *die normalerweise unmagnetisch sind, bei* ***starker plastischer Verformung magnetisch*** *werden können (Band 1 Bild 5.12.2-2).*

Elektrische Leitfähigkeit *hat mit der höheren* ***Reinheit des Öls*** *für die Bildung und Wirkung von Verunreinigungen an Bedeutung gewonnen. Im Ölstrom kann die* ***innere Reibung statische Elektrizität erzeugen (Band 1 Kapitel 5.12.1)****. Löst diese im Öl kleine Blitze aus, führen die hohen Temperaturen zum Verkoken. Dieser Effekt wird von elektrisch leitenden feinen Partikeln im Öl verhindert.*

Bild 7.1.3.1-4 *(Lit. 7.1.3.1-4 und Lit. 7.1.3.1-5):* ***Magnetstopfen*** *(Magnet Chip Plug, Skizze oben) und Magnetpartikelsensor (Magnet Chip Detector, Bild 7.2-7) sammeln ferromagnetische Partikel die vom Ölstrom vorbeigeführt werden. Dabei löst der Detektor bei* ***Überbrückung der Pole*** *ein Warnsignal im Cockpit aus. Wegen dem erforderlichen Magnetismus handelt es sich bei den Partikeln um Stähle verschiedenen Ursprungs.* ***Eine größere Partikelzahl*** *kann ein Zeichen für* ***ungenügende Sauberkeit*** *vor der Inbetriebnahme bei* ***Zusammenbau*** *und* ***Spülung*** *sein. Typische Merkmale (Bild 7.1.3.1-2) ermöglichen dem Fachmann Rückschlüsse. Neben der potenziell schädigenden Wirkung an ölbenetzten Komponenten gilt das besondere Augenmerk* ***Partikeln, die auf entstehende oder bereits gefährlich weit ausgebildete Schäden hinweisen*** *(Rahmen unten).*

© Axel Rossmann - Turbomaschinen
aus Schulungsunterlagen Turbinenlehrer

Systeme und Betriebsstoffe: Ölverunreinigungen: Partikel

! Magnetstopfenanlagerungen kann der Fachmann wie ein Buch lesen.

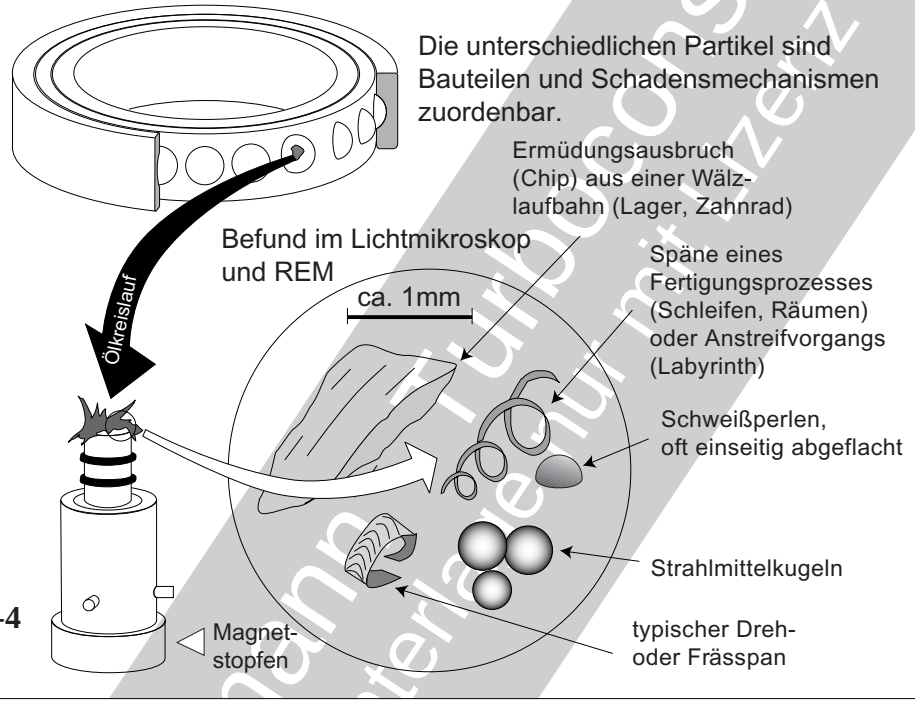
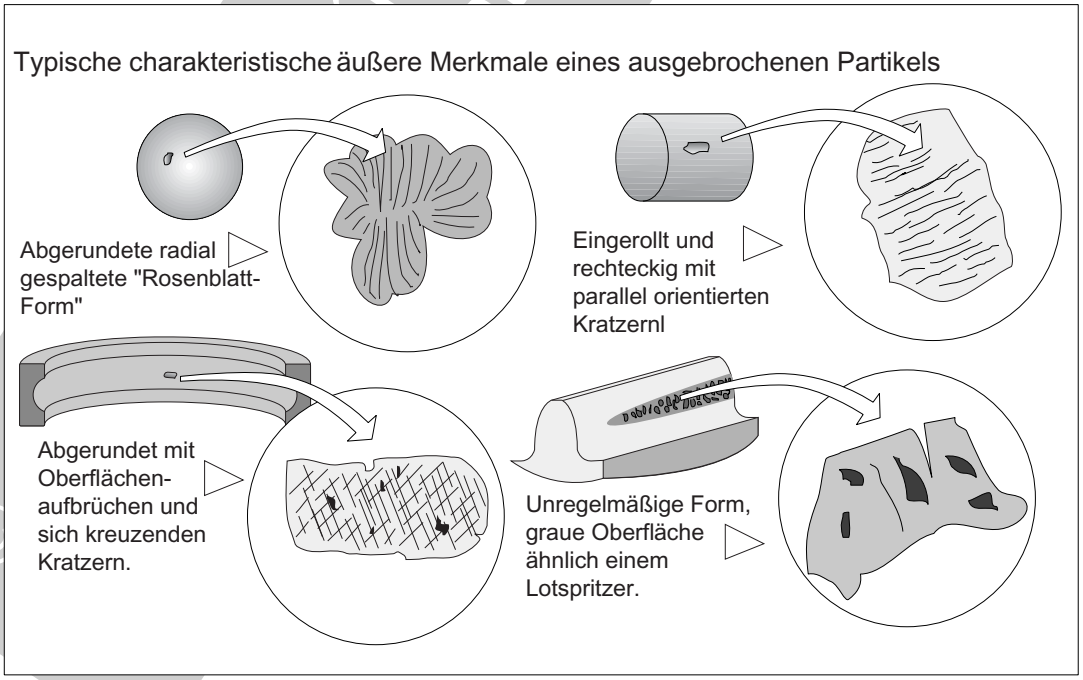


Bild 7.1.3.1-4



Es handelt sich in erster Linie um Ermüdungsschäden an Wälzflächen. Die ***Ermüdungspartikel*** *sind für Wälzlagerlaufbahnen (Bild 6.3.1.1-4) und Zahnflanken von Getrieberädern und Pumpen typisch (Bild 6.4.1-5). Ihre Merkmale bilden sich bei dem besonderen Schadensmechanismus der Schwingermüdung aus.*

Bild 7.1.3.1-5 *(Lit.7.1.3.1-2): In* ***Filterrückständen und Magnetstopfenablagerungen*** *finden sich immer wieder* ***Kügelchen oder Teile*** *von solchen. Diese können sich nach Art, Zusammensetzung, Oberflächenstruktur und Größe charakteristisch unter-*

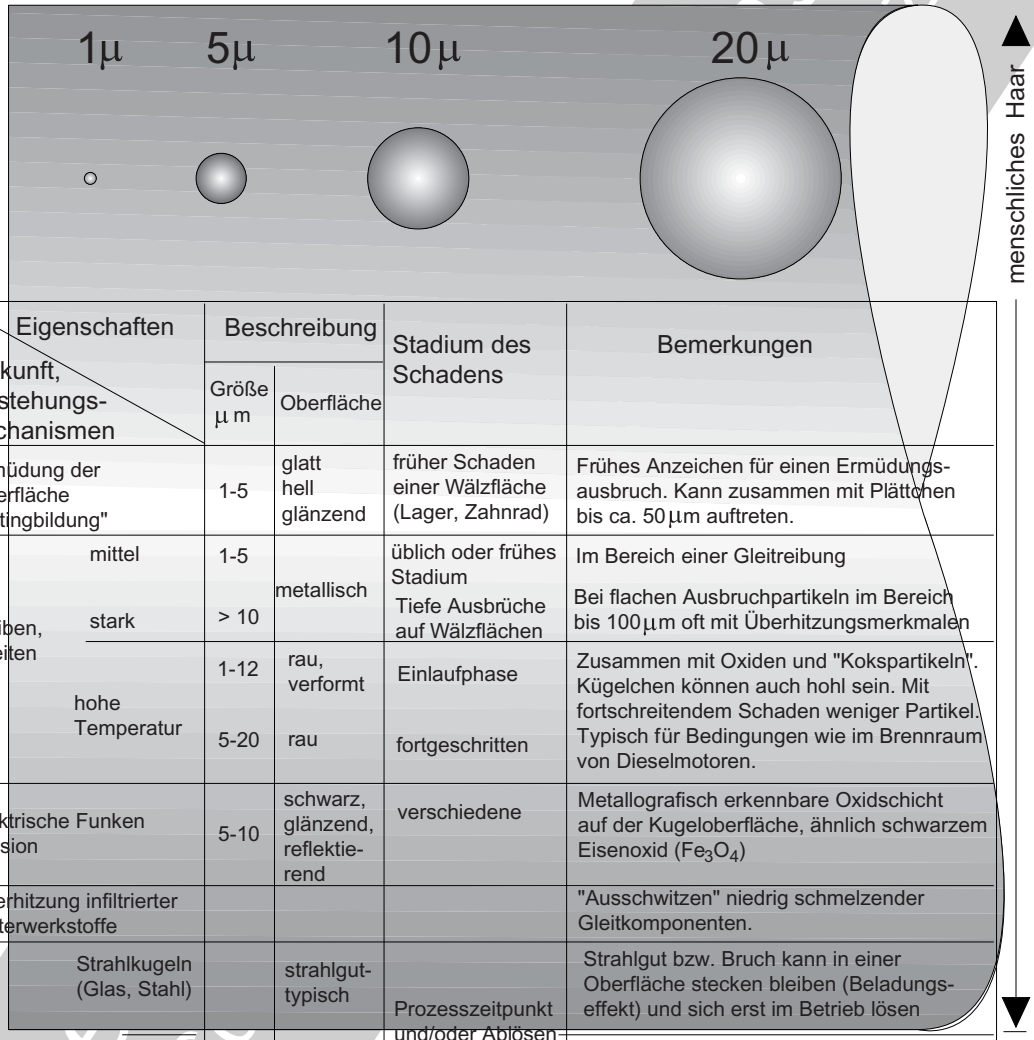
© Dr. Dohmann Turboconsult Unterlagen nur mit Verz

scheiden. Am geeignetsten ist eine mikroskopische Untersuchung mit dem **Rasterelektronenmikroskop** *(REM, engl. SEM).*
Typische Ursachen für Kügelchen im Öl sind: **Ermüdungsvorgänge** *in Metallen: In einem* **Ermüdungsriss** *können sich winzige Abrieb- oder Bruchpartikel zu Kugeln (< 0,005mm Durchmesser) formen. Wirksam ist die plastische Verformung* **zwischen bewegten Rissufern** *und/oder Verschleiß. Sie werden mit eingesaugtem und ausgepresstem Öl aus dem Riss geschwemmt oder treten beim Aufbrechen des Risses (Ermüdungspits) in das Öl. Dem Fachmann dienen sie als zusätzlicher Hinweis auf einen* **beginnenden oder fortgeschrittenen Ermüdungsschaden**. *Solche Kügelchen wurden schon nach 60 % der Lagerlebensdauer im Öl gefunden. Nach 80 % treten die Kügelchen regelmäßig in einem sog. Ferrogramm auf.* **Fehlende Kügelchen schließen jedoch einen entstehenden oder vorhandenen Ermüdungsschaden nicht aus**.
Reib- und Gleitvorgänge *können Kügelchen (< 0,005mm Durchmesser) kurz nach dem* **Einlaufvorgang** *erzeugen. Es wird vermutet, dass sie sich aus metallischen Abriebpartikeln in Rauigkeitstälern bilden. Auch bei Verschleißprozessen unter* **oszillierenden Gleitbewegungen** *(Fretting) scheinen Kügelchen zu entstehen.*
Offenbar bilden Reibvorgänge bei hohen Temperaturen Kügelchen im Bereich < 0,005mm Durchmesser in erster Linie durch **Aufschmelzen**.
In diesem Zusammenhang sei noch die Bildung von ebenfalls sehr kleinen **kugeligen Oxiden** *bei der* **Korrosion von Stählen** *erwähnt (Lit. 7.1.3.1-7).*
Größere Kügelchen (> 0,01 mm Durchmesser) werden besonders auf **durchrutschende Wälzflächen** *(z.B Skidding, Bild 6.3.1.1-14.1 und Bild 6.3.1.1-15) zurückgeführt. Sie entstehen unter* **Fress-** *(Kaltverschweißen, engl. galling) und* **Furchvorgängen**. *Damit wäre auch erklärlich, warum die Oberfläche der Kügelchen oft Überhitzungsanzeichen wie* **Schmelzstrukturen** *zeigen.*
Gleitschichten *(z.B. in Zahnradpumpen) aus porösen Sinterwerkstoffen „***schwitzen***" bei* **Heißlauf** *Kügelchen aus. Es handelt sich um infiltrierte niedrig schmelzende Metalle (Blei). Diese Kügelchen sind jedoch mit Durchmessern bis 1 mm deutlich größer als die vorstehend genannten (Lit. 7.1.3.1-8).*
Elektrische Funken *können Kügelchen entstehen lassen. Das ist sowohl im Ölkreislauf bei Stromdurchgang (Blitz?) als auch im Rahmen von* **Fertigungs- oder Reparaturprozessen** *möglich. Bereits Mikrofunken sind in der Lage, metallische* **Abriebansammlungen zu kleinen Kügelchen aufzuschmelzen**. *Auch unrunde oder kantige Partikel können beim Erhitzen schon* **unterhalb** *(!)* **des Schmelzpunktes durch Sintern** *Kugelgestalt annehmen. Hierbei hilft die hohe Oberflächenenergie des Abriebs beim Entstehungsprozess.*
In **Fertigungsprozessen,** *die mit Funkenbildung ablaufen, ist immer mit der Bildung kleiner Metallkügelchen zu rechnen. Funken können erwünscht oder unerwünscht auftreten. Beispielsweise beim thermischen Spritzen (Lit. 7.1.3.1-10), Schweißen (Lit. 7.1.3.1-8) oder Laserbohren.* **Lose anhaftend** *gelangen sie bei Unachtsamkeit in das Ölsystem.*
Galvanische *Abscheidung wie* **Verchromen** *und* **Vernickeln** *kann an Kanten kugelförmige* **Warzen** *entstehen lassen (Lit. 7.1.3.1-8). Diese Verfahren werden bei Reparaturen verschlissener Gleitflächen der Gleitringdichtungen oder Laufflächen von Hydraulikkolben angewendet. Wird nicht sorgfältig entgratet (Lit. 7.1.3.1-8), können sich zurückgebliebene Warzen im Betrieb ablösen.*
Nichtmetallische Kugeln *im Durchmesserbereich bis zu mehreren hundertstel Millimetern bilden sich im Öl* **aus Additiven** *(weiße Kügelchen, sog. „***Oil Balls***"). Es wurden erstaunlich* **hohe Härten** *von 48 Rc, ähnlich einem Werkzeugstahl, gemessen. Damit besteht ein großes Schädigungspotenzial.*

© Axel Rossmann - Tribocontact
als Schulungsunterlage nutzen

Systeme und Betriebsstoffe: Ölverunreinigungen: Partikel

Kugelige Ölverunreinigungen können dem Fachmann ein wichtiges Indiz für Probleme und Schäden sein.



Eigenschaften / Herkunft, Entstehungsmechanismen		Beschreibung: Größe µm	Beschreibung: Oberfläche	Stadium des Schadens	Bemerkungen
Ermüdung der Oberfläche "Pittingbildung"		1-5	glatt hell glänzend	früher Schaden einer Wälzfläche (Lager, Zahnrad)	Frühes Anzeichen für einen Ermüdungsausbruch. Kann zusammen mit Plättchen bis ca. 50 µm auftreten.
Reiben, Gleiten	mittel	1-5	metallisch	üblich oder frühes Stadium	Im Bereich einer Gleitreibung
	stark	> 10		Tiefe Ausbrüche auf Wälzflächen	Bei flachen Ausbruchpartikeln im Bereich bis 100 µm oft mit Überhitzungsmerkmalen
	hohe Temperatur	1-12	rau, verformt	Einlaufphase	Zusammen mit Oxiden und "Kokspartikeln". Kügelchen können auch hohl sein. Mit fortschreitendem Schaden weniger Partikel. Typisch für Bedingungen wie im Brennraum von Dieselmotoren.
		5-20	rau	fortgeschritten	
Elektrische Funken Erosion		5-10	schwarz, glänzend, reflektierend	verschiedene	Metallografisch erkennbare Oxidschicht auf der Kugeloberfläche, ähnlich schwarzem Eisenoxid (Fe_3O_4)
Überhitzung infiltrierter Sinterwerkstoffe					"Ausschwitzen" niedrig schmelzender Gleitkomponenten.
Fertigung, Reparatur bzw. Überholung	Strahlkugeln (Glas, Stahl)	Unterschiedlich	strahlgut-typisch	Prozesszeitpunkt und/oder Ablösen im Betrieb. Erzeugen Verschleiß und auf Wälzflächen Ermüdung	Strahlgut bzw. Bruch kann in einer Oberfläche stecken bleiben (Beladungseffekt) und sich erst im Betrieb lösen
	Schweißen: Arc, Laser, EB		manchmal abgeflacht, Dendritenstruktur		Spritzer von EB-Schweißen ohne Oxidschicht.
	Bohren/ Bearbeiten: Laser, EB, EDM				Bohren dünner Löcher für Öl oder Luft. Schnittflächen. EDM lässt durch Aufkohlung sehr harte spröde Partikel entstehen.
	Thermisches Spritzen				Rückpraller ("Kügelchenproblem")
	Galvanische Beschichtung				"Abscheidungswarzen" an Kanten
Polymere in neuem Öl			spezifische Färbung	kein Zusammenhang mit Verschleiß	Aus dem Ölherstellungsprozess. Kollabieren beim Aufheizen.
Ölkugeln ("Oil Balls")		5-40	glatt, weiß	erzeugen Verschleiß	Entstehen wenn Glykol mit Additiven (Reinigungszusätze) bestimmter Schmieröle reagiert.

Bild 7.1.3.1-5

© Axel Springer Verlag

Literatur zu Kapitel 7.1.3.1

7.1.3.1-1 M.Smith, „Oil Analysis vs. Microscopic Analysis: When and Why to Choose“, www.analystinc.com, 15.11.2005, Seite 1-5.

7.1.3.1-4 Transportation Safety Board of Canada, Airworthiness Notice - B009, Edition 1 - 21, June 1993, „Chip Detectors in Aircraft Engines, APU’s, Transmissions and Reduction Gearboxes“,Seite 1-3.

7.1.3.1-3 P.Madhvan, „Engine health assured with oil monitoring system“,Zeitschrift „Aircraft Technology & Maintenance - Engine Yearbook 1999“, Seite 58-61.

7.1.3.1-2 S.Gebarin, J.Fitch, „Origin of Spherical Particles in Lubricants“, Zeitschrift „Practicing Oil Analysis Magazine“, July 2005, www.practicingoilanalysis.com, Seite 1-8.

7.1.3.1-5 R.A.Collacott, „On-Condition Maintenance“, UKM Paper Nr. 4152, nach. 1978, Seite 1-14.

7.1.3.1-6 J.Fitch, „A Much Closer Look at Particle Contamination“, Zeitschrift „Practicing Oil Analysis Magazine“, July 2005, www.practicingoilanalysis.com, Seite 1-5.

7.1.3.1-7 L.Engel, H.Klingele**,** „Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Metallschäden“, Carl Hanser Verlag, ISBN 3-446-13416-5, 2. Auflage, 1982, Seite 14.

7.1.3.1-8 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 4 2000, ISBN 3-00-017734-5, Kapitel 16.2.1.8.2. Kapitel 16.2.1.8.3 und Kapitel 16.2.2.2.

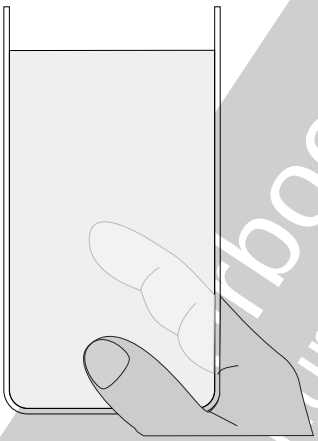
7.1.3.1-9 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 1 2000, ISBN 3-00-005842-7, Kapitel 5.1.5.

7.1.3.1-10 „Filterelemente für Flüssigkeitsfilter“, Fa. Mahle-Industry-Filtration, Stand 2012, www.mahle-industriefiltration.com/.../$FILE/Filterelemente_de.pdf, 22 Seiten.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

7.1.3.2 Flüssige Verunreinigungen im Öl.

7.1.3.2.1 Wasser im Öl



© Arbeitsgemeinschaft Tribotechnik - Tribconsult
Abdruck nur mit Lizenz

Wasser kann in Schmieröl wie im Kraftstoff (Kapitel 8.3) **gelöst** und als **freies Wasser** in Form einer **Emulsion** auftreten. Die Wasseraufnahme ist mit ausreichender Erwärmung des Öls ein reversibler Vorgang. Dazu genügt eine zulässige möglichst hohe Betriebstemperatur über eine ausreichende Zeit. Nicht reversibel sind bereits entstandene Veränderungen des Öls durch Reaktionen mit Verschleißpartikeln (Bild 7.1-3.1), Korrosion (Verträglichkeit, Bild 7.1.1-2) und Alterung.

Wasser gelangt auf unterschiedliche Weise in das Schmieröl (Bild 7.1.3.2.1-3). Dabei entstehen gefährlich **schädigende Auswirkungen** auf das Öl (Bild 7.1-7 und Bild 7.1.3.2.1-1 und Bild 7.1.3.2.1-2) und auf Komponenten im Ölkreislauf (Bild 7.1.3.2.1-1 und Bild 7.1.3.2.1-3.2).

- Absenken der **Viskosität** verschlechtert die Tragfähigkeit von Ölfilmen in Lagern. Es kommt eher (z.B. bei niedrigen Drehzahlen oder hoher Lagerbelastung) zur **Mischreibung** bzw. diese Phase hält beim Start und Abstellen länger an. So erhöht sich der **Reibverschleiß**. Im Extremfall kommt es zur **Kaltverschweißung** (Fressen, Band 1 Kapitel 5.9.2) gleitender Flächen (Gleitlager, Wälzflächen mit Gleitung, z.B. Zahnflanken).
- Neigung zur **Dampfblasenbildung** begünstigt **Kavitation** (Bild 6.11.1.2-7, Bild 6.11.1.2-8 und Band 1 Kapitel 5.5.1.3). Gefährdet sind viele Komponenten des Ölsystems wie Gleitlager (Bild 6.3.2-7, Kurbelwelle, Nockenwelle, Turbolader), Pumpen (z.B. Zahnradpumpen Bild 6.4.1-19), Gleitringdichtungen (Bild 6.10.2.2-2).
- **Korrosion** tritt im Stillstand der Maschine auf. Die Gefahr steigt mit Häufigkeit und Länge der Stillstandszeiten. Verstärkend können Alterungsprozesse im Öl wirken (Säurezahl TAN, Bild 7.1.2-1). Betroffen sind alle korrodierenden Metalle/Legierungen wie martensitische Stähle von Bauteilen wie Kurbelwelle, Wälzlager und Regler aber auch Gleitlager (Bild 6.3.2-4). Auch Leichtmetalle wie Al-Legierungen und besonders Magnesiumlegierungen (Band 1 Bild 5.6.1.2-2) können auf der Innenseite betroffen sein. Die Korrosionsprodukte können im Extremfall Filter und Siebe sowie enge Querschnitte blockieren.

Der **Nachweis von Wasser** gelingt dem erfahrenen Praktiker bei freiem Wasser (Emulsion) mit einer visuellen Prüfung (Bild 7.1.3.2.1-4). Auch ein einfacher Erwärmungstest („crackle test“) erfordert keine aufwändigen Geräte. Gelöstes Wasser lässt sich dagegen nur unter Laborbedingungen nachweisen bzw. messen. In Erprobung befinden sich **Sensorsysteme** mit denen es in „real time“ gelingt, neben Additiven und thermisch bedingten Zersetzungsprodukten den Wassergehalt im Schmieröl kontinuierlich zu messen (Lit. 7.1.3.2.1-2, Kapitel 7.2).

Bild 7.1.3.2.1-1 *(Lit. 7.1.3.2.1-1): Wasser kann sich direkt und indirekt über eine* **Veränderung des Schmieröls** *(Bild 7.1.3.2.1-1 und Bild 7.1.3.2.1-2) auf das Betriebsverhalten der Bauteile im Ölsystem auswirken.*

*„**A**“* ***Lebensdauerverkürzung durch Rostbildung****: Im Stillstand kann Wasser in Wälzlagern Korrosion hervorrufen (Kapitel 6.3.1.2). Dabei kann Schwitzwasser direkt oder im Kraftstoff einwirken. Zusätzlich verstärken die bei der* **Alterung des Öls gebildeten Säuren** *den Korrosionsangriff. Korrosion wird gegebenenfalls von salzhaltigen Staubpartikeln im Öl unterstützt (Bild 7.1.3.1-3). Sie können im Stillstand durch Luftaustausch über Labyrinthspalte in das Öl gelangen. Luftdruckschwankungen und/oder Temperaturänderungen erzeugen eine Pumpwirkung (Bild 7.1.3.2.1-3.1 und Bild 7.1.3.2.1-3.2). Im Betrieb kann Staub über Sperrluft in das Ölsystem (Lagerkammern) gelangen. Es entsteht mit Wasser ein aggressiver Elektrolyt, der nicht nur rostende Stähle, sondern auch „korrosionsfeste“ Werkstoffe wie Nichteisenmetalle angreift („**E**“). Die vom Ölstrom mitgeführten Rostpartikel wirken abrasiv und legen frische reaktive Metalloberflächen frei die leichter rosten. So entsteht ein selbstverstärkender Vorgang, der die Bauteillebensdauer deutlich reduziert (Bild 7.1.3.2.1-2).*
*Eine besondere Korrosionsform an Oberflächen, insbesondere Laufbahnen von Wälzlagern wird mit „**Water Etching**“ bezeichnet. Der Effekt beruht auf der Bildung von Wasserstoffsulfid (H_2S). Mit dem* **Wasser** *entsteht* **schweflige Säure** *bei der Zersetzung des Öls.*
„Eine Art **Tropfenschlag**“ *(„**H**“, Band 1 Bild 5.5.1.2-5) entsteht, wenn freies Wasser (feine Wassertröpfchen) auf eine* **heiße Metalloberfläche** *trifft. Es handelt sich um einen Erosionsvorgang mit lochartigem Angriff (Erosion Pittings).*

*„**B**“* ***Abrasivverschleiß bei Durchbruch des trennenden Ölfilms*** *kann auftreten, wenn die Tragfähigkeit des Öls durch* **wasserbedingte Veränderungen** *(Bild 7.1.3.2.1-2) abgefallen ist. Es handelt sich um:*

- Beschleunigte Oxidation des Öls.
- Abbau von Additiven wie Oxidationsinhibitoren und Entschwefelungszusätze.
- Absetzen von Additiven.
- Destabilisieren verschleißverhindernder Additive oberhalb 80 °C.
- Behinderung der Haftung polarer Additive an Metalloberflächen.

Zwischen den Laufbahnen der Ringe und Wälzkörper von Lagern und den Zahnflanken von Zahnrädern muss ein Ölfilm die Berührung und damit Verschleiß verhindern. Dabei nutzt man das Verhalten von Ölen deren **Viskosität mit dem (hydraulischen) Druck (im Spalt) ansteigt***. Diese Eigenschaft besitzt Wasser nicht. Seine Viskosität kann sogar unter Druck leicht abfallen.*
Führt dies zur Berührung der Kontaktflächen, besteht die Gefahr von Fressverschleiß und Ermüdungsausbrüchen (fatigue pittings, Bild 6.3.1.1-4 und Bild 6.4.1-5 und Kapitel 6.6.1).

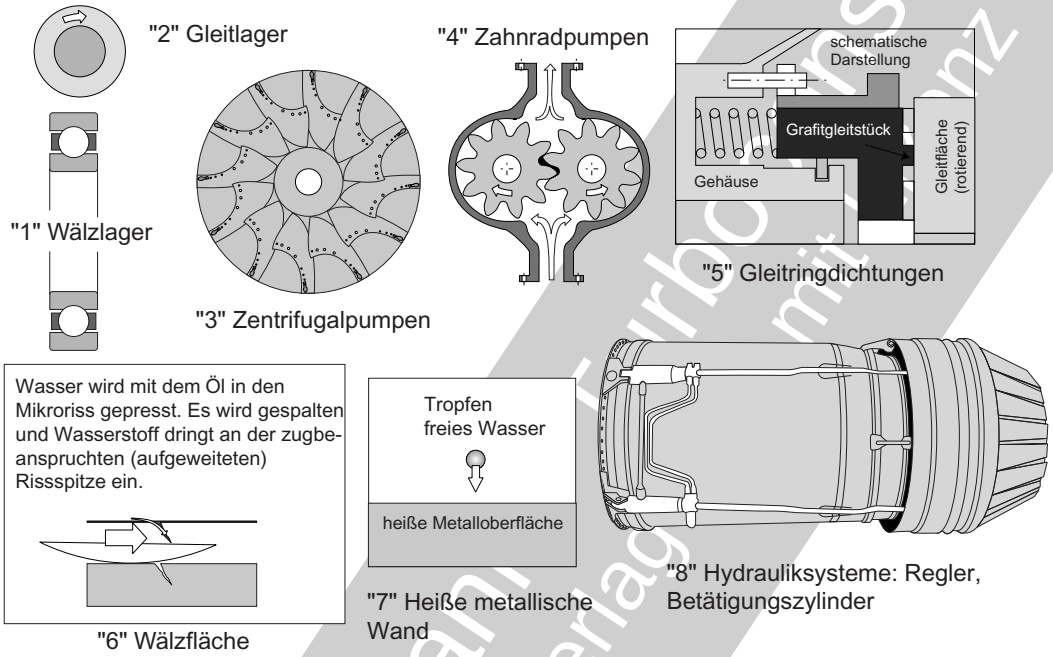
*„**C**“* ***Verschleiß durch Ablagerungen aus „hartem Wasser****“: Hat Wasser Kalk aufgenommen (z.B. aus* **Staub***), kann sich dieser bei Erhitzung wieder abscheiden und abrasiv wirken.*

*„**D**“* ***Wasserstoffversprödung*** *(Hydrogen Embrittlement, Band 1 Kapitel 5.7.1): Wasserstoff muss atomar vorliegen, um in Metalle einzudringen. Dafür müssen Wassermoleküle gespalten werden (Band 1 Bild 5.7.1-3.1). Das ist offenbar in mikroskopisch kleinen Oberflächenrissen unter dem extrem hohen Druck zwischen Wälzflächen möglich (Bild 7.1.3.2.1-1). So wird der* **Rissfortschritt** *auf zweifache Weise* **beschleunigt***. Dabei wird der Wasserstoff (Band 1, Bild 5.7.1-2) und der Sprengeffekt des hohen hydraulischen Drucks wirksam. Die-*

© Axel Bossmann - Turbocon
Abschnittsinformation

Systeme und Betriebsstoffe: Ölverunreinigungen: Wasser

Probleme und schädigende Wirkungen im Zusammenhang mit Wasser im Schmieröl.



Schädigungsmechanismus \ Beispiel	"1"	"2"	"3"	"4"	"5"	"6"	"7"	"8"
"A" Verkürzung der Betriebslebensdauer durch Korrosion bzw. Rost	●							
"B" Verschleiß bei Durchbruch bzw. Fehlen des Ölfilms an Oberflächen mit Relativbewegung	●	●			●			
"C" Verschleiß durch Ablagerungen von "hartem Wasser" (Kalk)					●			
"D" Wasserstoffversprödung	●					●		
"E" Ätzeffekte	●						●	
"F" Kavitation			●	●	●			
"G" Dampfpolster (engl. vapor lock)								●
"H" Erosion /Tropfenschlag							●	
"I" Oxidation der Gleitflächen		●						

Bild 7.1.3.2.1-1

ses Modell scheint unter dem Gesichtspunkt, dass Wasserstoffversprödung unter statischer Beanspruchung wirksam wird, fraglich. Deshalb ist auch sog. Schwingungsrisskorrosion (Band 1 Bild 5.6.3.2-2) unter Einfluss korrosiver, von Wasser ausgelöster Medien (Säuren), nicht auszuschließen. Beim Risswachstum können Bruchbilder, die einer Wasserstoffversprödung ähneln, entstehen (Lit. 7.1.3.2.1-3).

© Axel Rossmann Turbomaschinen GmbH als Schulungsunterlage mit Erlaubnis

Die "Lebensdauer" der Bauteile im Ölsystem kann stark vom Wassergehalt des Öls abhängen.

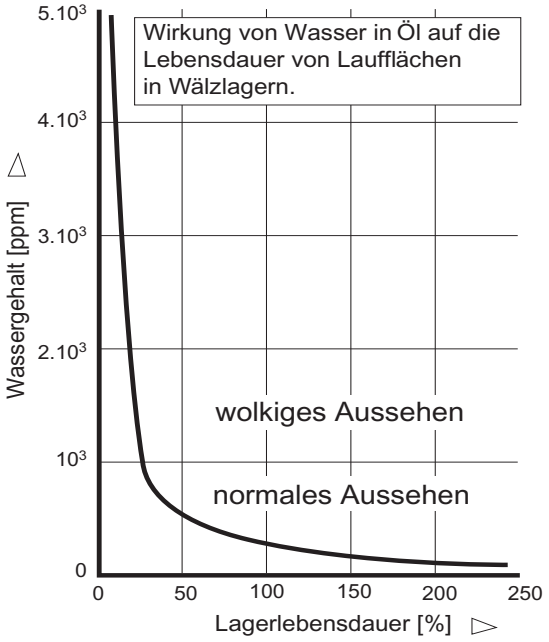


Bild 7.1.3.2.1-2

*„**F**“ **Kavitation** (Band 1Kapitel 5.5.1.3): Wasser kann, abhängig von (hoher) Temperatur und (niedrigem) Druck im Ölstrom **Dampfblasen** bilden. Steigt der Druck an anderer Stelle wieder an, **implodieren die Blasen**. Dabei schlägt die Flüssigkeit (kondensiertes Wasser, Öl) im mikroskopischen Bereich auf die Metalloberfläche. Dieser vielfach wiederholte Vorgang hat eine, dem Tropfenschlag (Band 1 Bild 5.5.1.2-5) ähnliche, erosive Wirkung. Typisch sind lochartige Oberflächenschädigungen. Wasser begünstigt auch die **Aufnahme von Luft** in das Öl. Das trägt zur Blasenbildung bei und verstärkt so die Kavitation (**gaseous cavitation**).*

*„**G**“ **Dampfpolster** können sich in heißem Öl bilden**.** Ähnlich dem Bremsenfading in einem Kfz, können sie die Funktion der **Kraftübertragung in einem Hydrauliksystem** verschlechtern. Im Ölsystem wirken Dampf- oder Luftpolster störend. Beispielsweise indem sie das **Ansaugen einer Pumpe behindern**. Die **Funktion von Reglern** kann ebenfalls gefährlich beeinträchtigt werden. Dabei spielt die federnde Wirkung im Zusammenhang mit Schwingungen eine Rolle.*

*„**I**“ **Oxidation von Lagermetall:** Gleitschichten in ölgeschmierten Gleitlagern bestehen vorzugsweise aus niedrig schmelzenden Legierungen (Lagermetall, engl. babitt). Sie werden in Planetengetrieben von Turboproptriebwerken zum Propeller verwendet. Offenbar können Legierungsbestandteile im Zusammenhang mit Wasser im Öl oxidieren.*

***Bild 7.1.3.2.1-2** (Lit. 7.1.3.2.1-1, Lit. 7.1.3.2.1-4, Lit. 7.1.3-5 und Lit. 7.1.3-6): Wasser im Schmieröl kann bereits in kleinsten Mengen die Lebensdauer von Maschinenkomponenten deutlich beeinflussen (Bild 22.3-7, Lit. 7.1.3.2.1-13). Dabei wirken sich unterschiedliche **Schädigungsmechanismen** direkt durch Wassereinwirkung (z.B. Korrosion, ungenügende Tragfähigkeit, Kavitation) oder indirekt (Rost, Ölalterung/-oxidation) aus (Bild 7.1.1-1). Leider sind in der angeführten Literatur keine bauteilspezifischen Hinweise vorhanden.*
*Im Diagramm ist der **Einfluss von Wasser** in Schmieröl auf die **Lebensdauer von Wälzlagern** angegeben. Selbst ein Wassergehalt von 200 ppm der an der Erkennungsgrenze liegt, (Bild 7.1.3.2.1-4) lässt bereits eine Lebensdauerabnahme von ca. 50% erwarten.*

***Bild 7.1.3.2.1-3.1** (Lit. 7.1.3.2.1-1 und Lit. 7.1.3.2.1-6): Wasser hat viele Möglichkeiten in Schmieröl zu gelangen. Grundsätzlich gibt es **zwei Möglichkeiten der Wasseraufnahme. Über die Absorption** der **Luftfeuchtigkeit** durch das immer bis zu einem gewissen Grad **hygroskopische Öl**. Dabei können bis ca. 100 ppm (0,01%) Wasser im Öl gelöst werden. Die*

Fortsetzung auf Seite 7.1.3.2-6

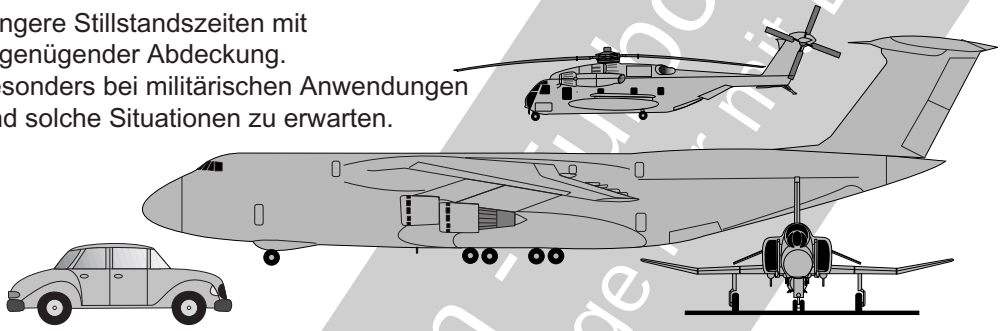
© Weidemann - Turbocon
Unterlagen nur mit Lizenz

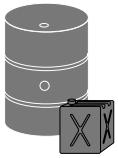
Systeme und Betriebsstoffe: Ölverunreinigungen: Wasser

Wie kann Wasser in das Schmieröl einer Maschine gelangen?

Atmosphärische Temperaturwechsel (Tag/Nacht)- und Druckwechsel (Wetter: Hoch/Tief) sowie Änderung der Höhe (Transport) können zu Luftaustausch über Labyrinthdichtungen oder Abluftöffnungen (Breather) führen. Auf diese Weise kann das Öl Wasser als Schwitzwasser und/oder durch Absorption der Luftfeuchtigkeit aufnehmen .

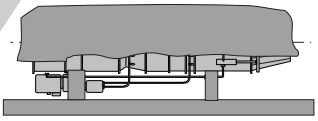
Längere Stillstandszeiten mit ungenügender Abdeckung. Besonders bei militärischen Anwendungen sind solche Situationen zu erwarten.



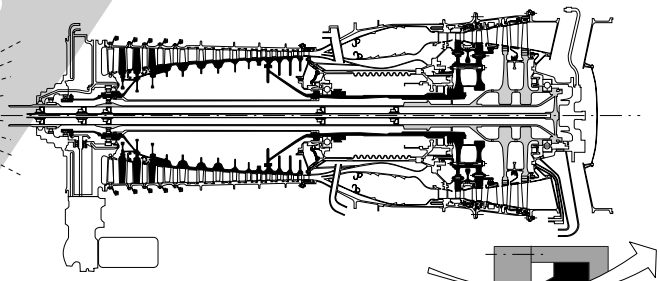


Nicht ausreichend verschlossene (Luftaustausch) oder häufig geöffnete, nur teilweise gefüllte Lagertanks/-behälter.

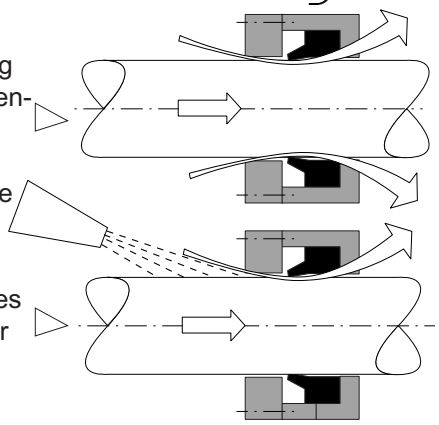
Nicht ausreichend abgedeckt gelagerte Triebwerke,



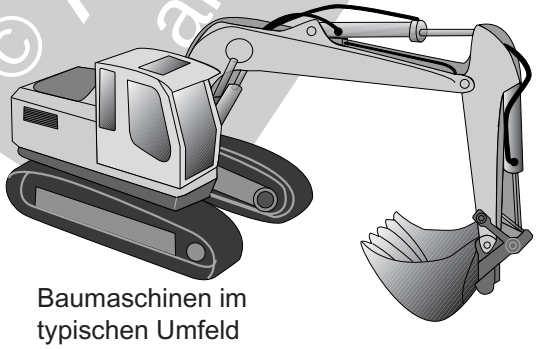
Waschvorgang an einer kalten Turbomaschine. Dies wird dabei vom Starter durchgedreht. Die verschmutzte Waschflüssigkeit wird drainiert. Eindringen von Wasser über Labyrinthe bei unzureichendem Sperrluftdruck in Lagerkammern.



Wassereinzug von der Kolbenstange unter die Abstreif- und Dichtlippe



Eindringendes Wasser einer Hochdruckreinigung.



Baumaschinen im typischen Umfeld

Bild 7.1.3.2.1-3.1

© Ayman Hassmann - Fuhocomsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Fortsetzung von Seite 7.1.3.2-4

zweite Möglichkeit ist ***Kondensation*** *(Schwitzwasser). Sie tritt ein, wenn warme feuchte Luft mit einer* ***kalten Oberfläche*** *(Bierglaseffekt) in Berührung kommt. Kann die abkühlende Luft nicht mehr die Luftfeuchtigkeit halten, schlägt sich diese an der kalten Wand nieder.*
In folgenden Situationen tritt Wasser in das Schmieröl:

Lagerung des Öls*: In erster Linie kann Wasser aus der Luftfeuchtigkeit auch über* ***Schwitzwasserbildung*** *vom Öl aufgenommen werden. Dabei dürfte ein auch beim Kraftstoff bekannter Mechanismus auftreten (Bild 8.3-0). Ausreichend Luftfeuchtigkeit ist in nur teilweise gefüllten Tanks und Kanistern zu erwarten. Sind* ***Verschlüsse nicht dicht,*** *besteht die Möglichkeit des Luftaustauschs nach außen. Die Pumpwirkung entsteht mit Temperatur- und/oder Luftdruckänderungen (Höhe, Wetter).*
Auch mit Ölwechseln oder Nachfüllen kann ***freies Wasser*** *in das Öl gelangen. Das kann aus Wasseransammlungen in Öl-Vorratsbehältern stammen.*

Stillstand der Maschine*: Ähnlich wie in halbgefüllten Öltanks kann Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft auch* ***in das Ölsystem einer stehenden Maschine*** *gelangen. Veränderungen des* ***Luftdrucks*** *führen über Abluftöffnungen und Labyrinthspalte zum Austausch. Kühlt sich das Triebwerk ab, zieht sich die Luft im Ölsystem zusammen und Luft wird angesaugt. Ist die Temperatur im Ölsystem ausreichend niedrig, entsteht* ***Schwitzwasser****. Bei Erwärmung dehnt sich die Luft im Ölsystem und wird ausgeblasen. Dieser Vorgang kann sowohl im eingebauten Triebwerk (Band 1 Bild 7.1.3.2.1-3.1) bei längeren* ***Stillstandzeiten*** *(militärischer Einsatz) als auch am* ***unzureichend gelagerten,*** *ausgebauten Triebwerk erfolgen.*
Eine weitere Möglichkeit ist die ***Oxidation*** *merklicher Ölmengen durch „Heat Soaking“ im Stillstand .(Bild 7.1.2-5, Bild 7.1.2-6.1, Bild 7.1.2-6.2 und Bild 7.1.2-7).*

Verdichterwaschen *(Lit. 7.1.3.2.1-12): Erfolgt dies beim* ***Drehen mit dem Anlasser,*** *ist die Drehzahl so niedrig, dass* ***kein ausreichender Sperrluft- und Lagerkammerdruck aufgebaut*** *wird. So können* ***Sprühwasser*** *und* ***Wasserdampf*** *in das Ölsystem gelangen. Um dieses Risiko zu minimieren, ist den Anweisungen des Wartungshandbuchs genau zu folgen.*

Im Triebwerksbetrieb*: Bei bestimmten Oxidations- und Korrosionsvorgängen im Öl kann Wasser entstehen. Das ist besonders bei örtlichen Temperaturen mit Koksbildung zu erwarten. Im Extremfall eines begrenzten, wieder verlöschenden Ölfeuers (z.B. in einer Lagerkammer), kann* ***Wasser als Verbrennungsprodukt*** *gebildet werden.*

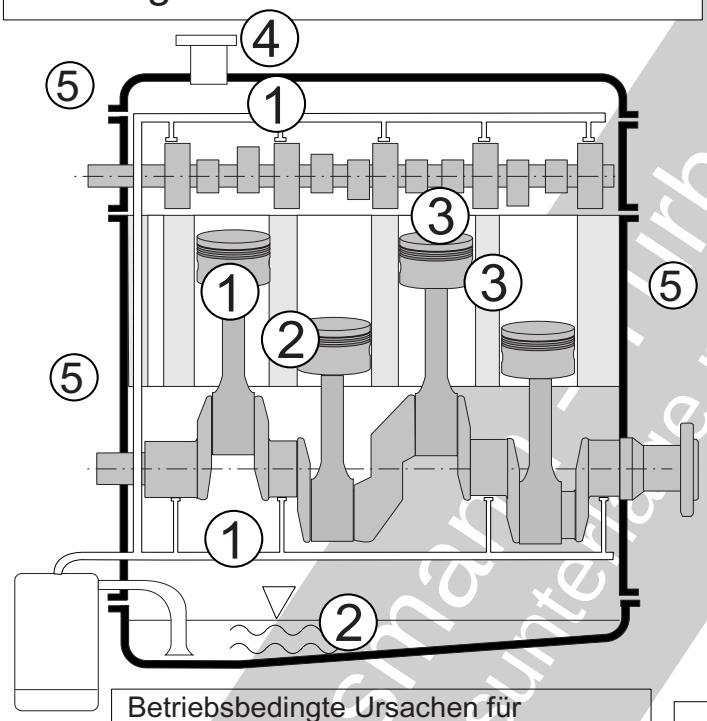
Aktuatorkolben/ Hydraulikkolben *sind für 2 typische Mechanismen des Wassereintritts ins Innere und damit zum Öl empfindlich.*
- Bei der Bewegung der ***Einwärtsbewegung der Kolbenstange*** *tritt anhaftendes Wasser unter der Dichtlippe durch.*
- Besonders bei Maschinen im ‘rauen’ Einsatz (z.B. Baumaschinen) kann eine ***Reinigung der Kolbenstange mit Hochdruckwasser*** *erfolgen. Daben ist es möglich, dass der direkte Strahl die Dichtwirkung überwindet.*

Bild 7.1.3.2.1-3.2*: Die Wahrscheinlichkeit, dass gefährlich viel* ***Wasser vom Öl aufgenommen*** *wird, steht bei* ***Kolbenmotoren*** *in erster Linie im Zusammenhang mit einem* ***Kühlwassereinbruch****. Er steht im Zusammenhang mit Dichtungsschäden (Zylinderkopfdichtung) oder Rissbildung (zu Kühlkanälen). Die zu erwartenden Folgeschäden durch derartig viel Wasser im Öl sind relativ kurzzeitig. Es handelt sich um starken Verschleiß bis zum Fressen der Gleitflächen. Es kommt zum Ausfall des Motors. Dabei spielen verschlechterte Tragfähigkeit des Ölfilms und Ölmangel (Dampfblasenbildung, Schaum) eine Rolle.*

© Alex Rossmann - Turbomaschinen
Abschnittsunterlagen mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Ölverunreinigungen: Wasser

Wasser im Öl eines Kolbenmotors kann verschiedene Ursachen haben und ist auf mehrere Weise schädigend.



1 **Schwitzwasser** im
- Zylinderkopfdeckel
- Kurbelgehäuse
- Zylinder- und Kolbenwände
- Luftfilter

2 **Luftfeuchtigkeit**
- Aufnahme im Ölsumpf aus dem Kurbelgehäuse und von Ölfilmen im Stillstand "atmen" der Maschine.
- Permeation durch Schläuche und Dichtungen (Bild 6.12.2-3.2)

3 **Kühlwasser**
- Leck an Dichtungen Zylinderkopfdichtung
- Risse im Motorblock oder Zylinderkopf
- Leck im Wasser/Öl-Ölkühler

4 **Wasser im Nachfüllöl**
- Aufbewahrung mit Luftzutritt.
- Aufbewahrung mit Wasserzutritt (Regenwasser).

5 **Reinigungswasser**
- Dampfstrahlen

Betriebsbedingte Ursachen für Wasser im Öl:
- Stillstandszeiten: Häufig, lang
- Nur kurze Laufzeiten ohne Öltemperatur bei der das Wasser ausgetrieben wird.
- Vereisung mit Rissbildung (Bild 6.11.1.4-6).
- Ungünstiges Klima:
  große Temperaturschwankungen
  hohe Luftfeuchtigkeit

Schädigungen an Maschinen, insbesondere Kolbenmotoren durch Wasser im Öl.
- Verschleiß und 'Fressen von Gleitflächen (Gleitlager, Laufflächen)
- Korrosion im Stillstand.
- Kavitation im Ösystem (Gleitlager, Ölpumpen, Leitungen)

Bild 7.1.3.2.1-3.2

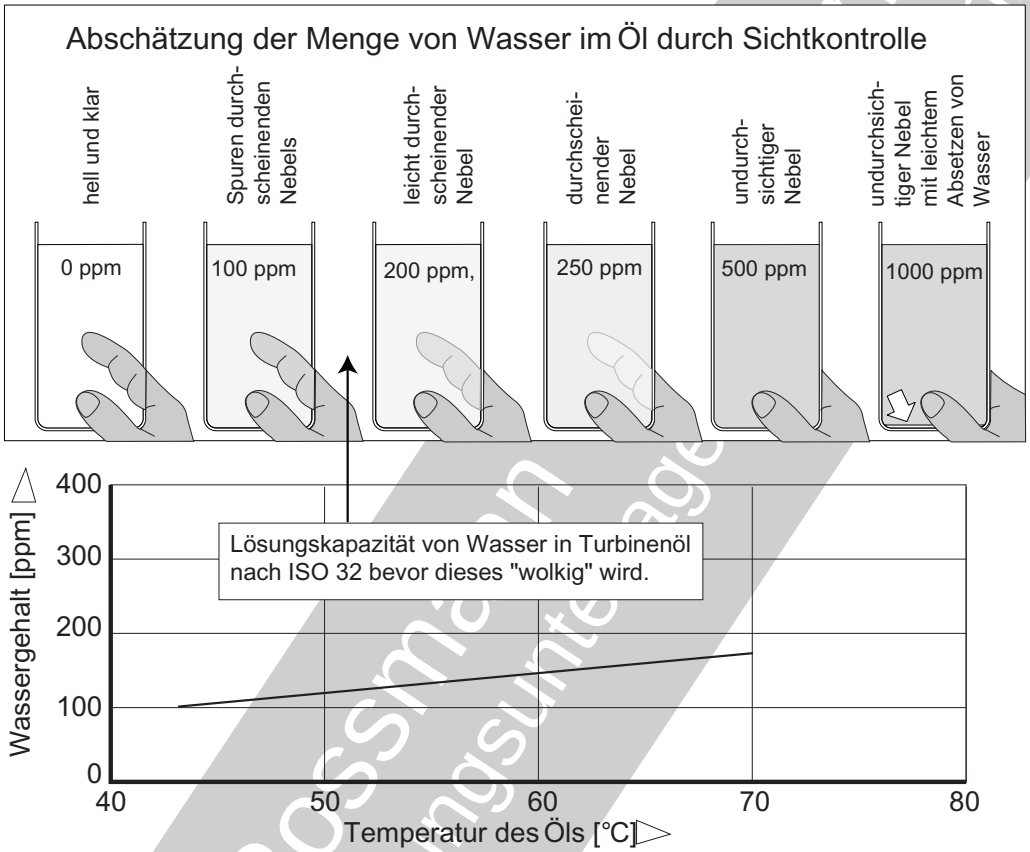
Langfristiger *wirkt Wasser im Öl aus* ***Luftfeuchtigkeit bzw. Schwitzwasser lebensdauerbeeinflussend****. Mit einem* ***Luftaustausch*** *ist* ***konstruktionsbedingt*** *(Ansaugluft, Entlüftung des Kurbelwellengehäuses) immer zu rechnen. Dieser Effekt wird jedoch* ***auslegungsgemäß bei vorgesehenem Betrieb beherrscht****. Bei* ***extremen Betriebsbedingen*** *(häufige Kaltstarts, lange Stillstandszeiten) kann jedoch die Lebensdauer des Motors merklich verkürzt werden. Solche Langzeitschäden (Gleitlager, Verschleiß) lassen sich jedoch nur selten Wasser im Öl ursächlich zuordnen. Die vorherrschenden Schmierbedingungen beeinflussen potenzielle Schädigungen.*

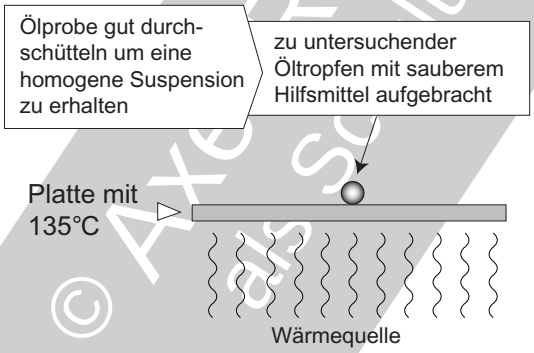
In ***Kolbenmotoren*** *kommt das Schmieröl statt an Wälzflächen von Wälzlagern und Zahnrädern (Bild 6.4.1-1) in erster Linie an* ***Gleitflächen*** *zum Einsatz (Bild 6.10.2.5-2). Dabei unterliegt es einer ausgeprägten* ***Scherung****.*

- Kolbenhemd,
- Kolbenbolzen,
- Ventile,
- Nockenwelle,
- Kurbelwellenlager und

© Axel Hannemann - Turbocoach
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

An welchen Merkmalen lässt sich auf einfache Weise die Wassermenge im Öl erkennen und abschätzen?





Crackle Tests (nach Noria)

Versuchsauswertung:

Wenn nach einigen Sekunden keine knackenden Geräusche oder Dampfblasen entstehen, ist kein emulgiertes Wasser in der Probe.
Entstehen Dampfblasen, bedeutet das, abhängig von deren Größe, einen geschätzten Wasseranteil:

- 0,5 mm Blasen, verschwinden schnell: ca. 0,05 - 0,1 %
- 2 mm Blasen, sammeln sich im Zentrum des Ölflecks und wachsen auf 4 mm bevor sie verschwinden: 0,1-0,2 %
- Bei mehr Wassergehalt entsteht heftige Blasenbildung und hörbares Knacken.

Bild 7.1.3.2.1-4

- Steuerketten.
Charakteristisch sind auch ***oszillierende Bewegungen*** *und häufige* ***Start/Stop-Zyklen.*** *Diese Besonderheiten beeinflussen auch die Wasseraufnahme des Öls. Denkbar sind der* ***Durchtritt von Schwitzwasser*** *im Stillstand oder ein bewegungsbedingter Pumpeffekt beim Start.*

Bild 7.1.3.2.1-4 *(Lit. 7.1.3.2.1-1): Neben Untersuchungsmethoden des Labors, gibt es bei ausreichend Erfahrung noch vergleichsweise* ***einfache Möglichkeiten.***
Die Skizzen oben zeigen die Auswirkung ***freien Wassers*** *auf das Aussehen einer Ölprobe in einem Glas bei Raumtemperatur. Die Veränderungen werden von* ***kleinsten Tröpfchen*** *ver-*

© Axel Rossmann als Schulungsunterlage

Systeme und Betriebsstoffe: Ölverunreinigungen: Wasser

ursacht. Selbst wenn keine solchen Anzeichen vorhanden sind, lassen sich schädigende Mengen ***gelösten Wassers*** *nicht ausschließen (Diagramm).*
Ein ***einfacher Test für freies Wasser,*** *der nur wenig Hilfsmittel erfordert, ist der sog.* ***Crackle Test****. Dabei wird ein Tropfen des zu untersuchenden Öls auf eine 135°C heiße, plane Metalloberfläche gebracht und in einer Metallschale schnell erhitzt. Aus dem zu beobachtenden Verhalten (Skizze und Beschreibung unten) lässt sich näherungsweise auf den Wassergehalt schließen (Nachweisgrenze ca. 0,1 % Wasser entsprechend 1000 ppm).*

Bild 7.1.3.2.1-5 *(Lit. 7.1.3.2.1-1): Die beste* ***Abhilfe für Wasser im Schmieröl*** *ist, wie in vielen Fällen, die* ***Ursachen zu vermeiden****. Diese Zusammenstellung vermittelt dazu einen Überblick. Indirekt werden Ansatzpunkte bereits in Bild 7.1.3.2.1-3 gegeben. Es beschäftigt sich mit den Möglichkeiten wie Wasser in Triebwerksöl gelangt. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass sich selbst* ***kleinste, auch gelöste Mengen Wasser schädlich auswirken*** *(Bild 7.1.3.2.1-1). Deshalb sind auch scheinbar vernachlässigbare Mengen zu vermeiden. Das gilt insbesondere für Luftfeuchtigkeit. So ist grundsätzlich* ***der Kontakt größerer Luftmengen mit Öl bedenklich****.*

Wie lässt sich Wasser im Öl vermeiden?

- **Sauberkeit** beim Umgang mit neuem Öl (Good Housekeeping).
- Möglichst **keine teilweise gefüllten Behälter**.
- Keine **undichten Öffnungen** an Ölbehältern.
- **Entfeuchtungseinrichtungen** in Vorratstanks für den Luftraum über dem Öl.
- Bei Waschvorgängen an Tanks auf **Entlüftungsstutzen** achten. **Abdeckungen** benutzen!
- Falls vorgesehen, **Drainage** des am Boden angesammelten Wassers.
- Ölkanister möglichst in einem **geeigneten Raum** bei konstanter Temperatur aufbewahren.
- Bei **Waschvorgängen** an Turbomaschinen (Verdichter) Vorsicht im Bereich von Spaltdichtungen (Labyrinthe) und Öffnungen (z.B. Entlüftung) zum Ölsystem.
- Beim Verdichterwaschen **Hinweise im Wartungshandbuch** beachten.
- Möglichst **keine Hochdruckverdüsung** im Bereich von Dichtungen einsetzen.
- Achtung auf **Leckagen in Wärmetauschern/ Kühlern**.
- **Lagern der Maschinen** in vorgesehenen dichten, trockenen Behältern.
- Geeignete **Entfeuchtung bei Maschinen** im eingebauten Zustand.
- **Kolbenmotoren** siehe auch Bild 7.1.3.2.1-3.2

Bild 7.1.3.2.1-5

© Axel Rossmann - Tr
ausbildungsunterl

Literatur zu Kapitel 7.1.3.2.1

7.1.3.2.1-1 M.Duncanson, „Detecting and Controlling Water in Oil“, Exxon Mobil, www.practicingoilanalysis.com, 17.02.2006, Seite 1-9.

7.1.3.2.1-2 R.L.Wright Jr., J.A.Pearce, „Sensor Technology Improves Jet Engine Reliability“, Dokument PR-00-03, AFRL, www.afrlhorizons.com, Seite 1-3.

7.1.3.2.1-3 L.Engel, H.Klingele, „Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Metallschäden“, 2. Auflage 1982, Carl Hanser Verlag, ISBN 3-446-13416-6, Seite 113 und 120.

7.1.3.2.1-4 C.D.Whitefield, „Clean Up Your Oil“, Zeitschrift Orbit, 4.Quartal 2001, Seite 13-20.

7.1.3.2.1-5 M.Barnes, „Water- The Forgotten Contaminant“, Zeitschrift „Maintenance World, www.maintenanceworld.com, Seite 1 und 2.

7.1.3.2.1-6 J.C.Fitch, S.Jaggemauth, „Moisture - The second most Destructive Lubricant Contaminate and its Effects on Bearing Life“, www.maintenanceresources.com, Seite 1-3.

7.1.3.2.1-7 P.Weismann, R.Krethe, C.Heine, „Schadensfrüherkennung und zustandsabhängige Ölwechselintervalle in WEA durch Ölanalysen“, www.windwin.de/images.../wc03032%20Schadensfrüherkennung.pdf, 15 Seiten.

7.1.3.2.1-8 „Grundlegende Eigenschaften von Getriebeöl“, Firmenangaben, http://de.hicow.com/motor., Seite 1.

7.1.3.2.1-9 „Was bedeutet Strong Acid Number“, Angaben der Fa. OELCHECK, http://www.oelcheck.de/wissen-von-a-z, 1 Seite.

7.1.3.2.1-10 R.Luther, „Biobasierte Schmierstoffe und Windkraftanlagen - ein starkes Team“, Vortrag am „Projekttag Stoffliche Biomassenutzung...“, 15.12.2010 - Berlin, www.fnr-server.de/cm535, 16 Folien.

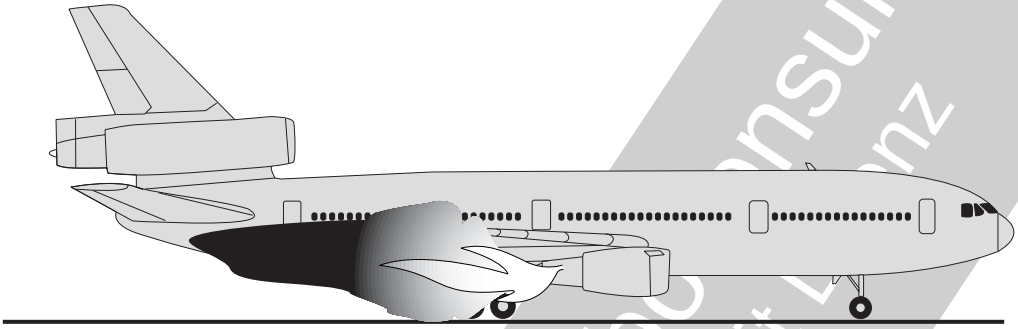
7.1.3.2.1-11 C.Lechner, J.Seume (Herausgeber), „Stationäre Gasturbinen“, T, Deeg, Kapitel 4.2.7 „Schmierung und Getriebeverluste“, Springer-Verlag Berlin,Heidelberg New York, ISBN 3-540-42831-3, 2002, Seite 129 - 134.

7.1.3.2.1-12 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken Band 5“, 2008, ISBN 978-3-00-025780-3, Kapitel 19.2.3.

7.1.3.2.1-13 „Wasserkontamination im Öl“, Stand Dez. 2012, (basiert auf Untersuchungen der Fa. Timken 1986) www.kleenoilpanolin.com/de/kleenoil/technik/wasserkontamination-im-oel/, 2 Seiten

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

7.1.3.2.2 Kraftstoff im Öl



Gerät Kraftstoff in das Schmieröl entstehen mehrere potenzielle **Probleme**:

Für Turbomaschinen gibt es offenbar nur eine Möglichkeit wie **nennenswerte Kraftstoffmengen in das Schmieröl gelangen**. Diese besteht im **Wärmetauscher/Ölkühler** zur Kraftstoffvorwärmung bzw. Ölkühlung. Kommt es hier zum Leck (Bild 7.1.3.2.2-1.2) kann, abhängig von der Druckverteilung, Kraftstoff in den Ölkreislauf eintreten. Dazu muss der Kraftstoffdruck deutlich höher als der Öldruck sein.

- Bei größeren Kraftstoffmengen können **Feuer in Lagerkammern** (Bild 7.1.3.2.2-1.1) von **Turbomaschinen** gezündet werden. Dabei besteht die Gefahr eines **Wellenbruchs** durch Überhitzung und katastrophalem Folgeschaden mit **Bruchstückaustritt**.
- Bei kaltem **Kolbenmotor** kann während der Startphase bei vielen Kurzfahrten oder bei fehlerhafter Einspritzanlage über die Kolbenringe Kraftstoff in die Ölwanne gelangen (Bild 7.1.3.2.2-2 Lit. 7.1.3.2.2-3). Sammelt sich bei einem Kolbenmotor Kraftstoff im Öl, kann die **Tragfähigkeit des Ölfilms** (Viskosität, Schmierfilmaufbau) verschlechtert werden. Damit besteht die Gefahr von erhöhtem **Verschleiß** bis zum **'Fressen'** (Band 1 Bild 5.9.2-1) von Gleitflächen (Kolben, Kurbelwelle).
- **Unverträglichkeiten** mit dem Kraftstoff führt zu beschleunigter **Ölalterung** und **verschlechterter Schmierfähigkeit** (Bild 7.1-3). Damit zur Verkürzung der Lagerlebensdauer.
- Begünstigte **Kavitation und Dampfblasenbildung**. Schäden an Pumpen, Gleitringdichtungen und Reglerprobleme (Band 1 Kapitel 5.5.1.3).

Dabei ist zu bemerken, dass bisher lediglich Feuer in den Lagerkammern bekannt wurden (Bild 7.1.3.2.2-1.1). Von Langzeiteffekten wie Lagerschäden wird nicht berichtet. Das kann mehrere Gründe haben.

- Kraftstoffverunreinigungen im Öl werden wegen des **Geruchs** („sniff test") **rechtzeitig erkannt**.
- Der relativ häufige Ölwechsel lässt negative Langzeitauswirkungen wie Alterung des Kraftstoffs nicht merklich wirksam werden.
- Die verschlechterten Öleigenschaften werden von den Lagern toleriert.
- Lagerschäden werden nicht auf Kraftstoffverunreinigungen im Öl zurückgeführt, weil der Zusammenhang nicht erkannt wird. Das kann z.B. an größeren Zeitabständen zwischen der Ölverunreinigung und dem Lagerschaden liegen.

In **Verbrennungsmotoren** kann kondensierter Kraftstoff beim Kaltstart (Bild 7.1.3.2.2-2) über die Kolbenringe und konstruktionsabhängig auch andere Wege in das Schmieröl gelangen.Dieser Kraftstoff soll bei Betriebstemperatur ausdampfen und durch die Entlüftung des Kurbelgehäuses entweichen. Im Extremfall, wie vielen kurzen Fahrten bei niedrigen Umgebungstemperaturen wird die Schmierfähigkeit so verschlechtert, dass es zu Verschleißproblemen an Gleitflächen kommt.

© Adolf Rosenberg Turbo Consult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

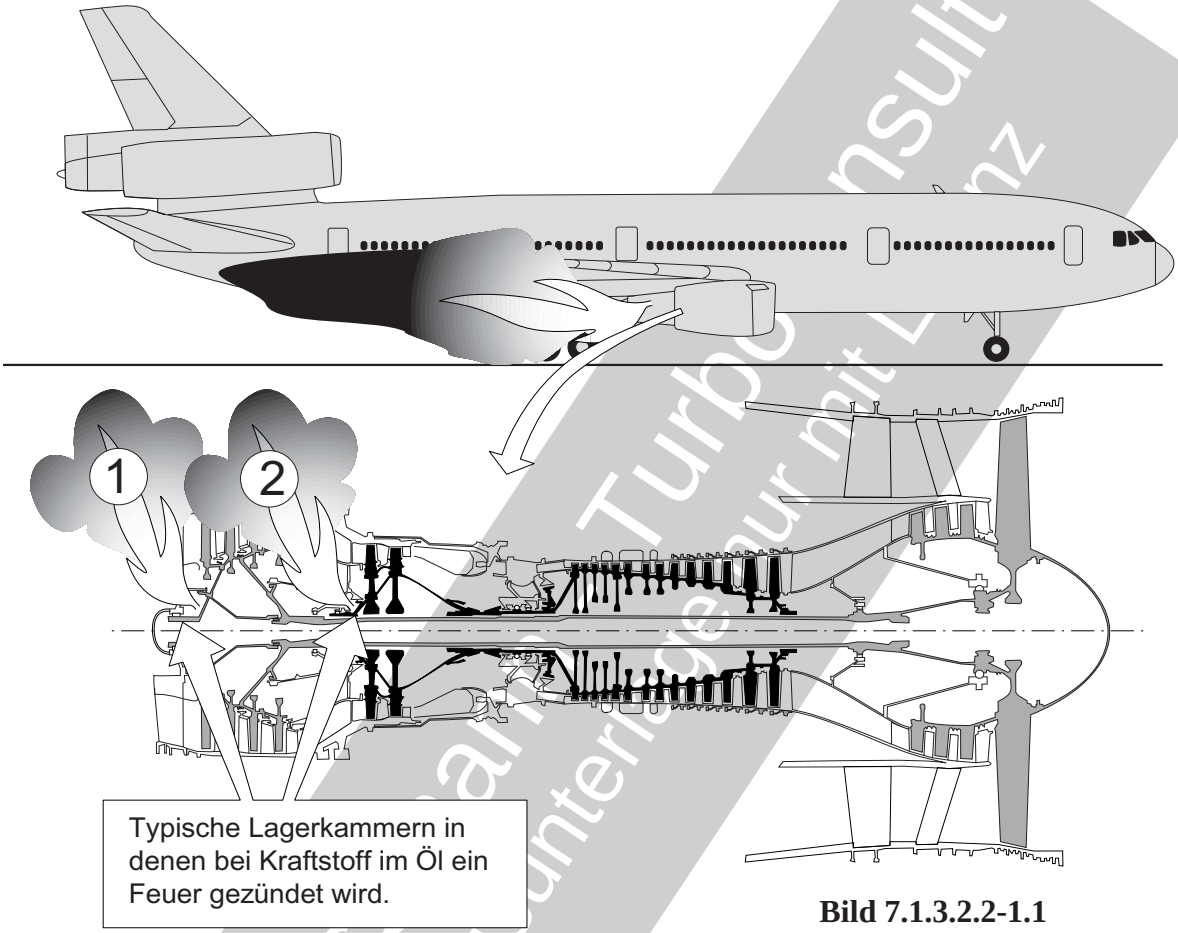


Bild 7.1.3.2.2-1.1

Bild 7.1.3.2.2-1 *(Lit. 7.1.3.2.2-1 und Lit. 7.1.3.2.2-2): Beim Rollen des Flugzeugs zur Startbahn kam es zu intensivem* ***Kraftstoffgeruch und Nebelbildung*** *in der Passagierkabine. Darauf wurde das Flugzeug geparkt. Von einem nachfolgenden Flugzeug wurde Feuer am rechten Triebwerk beobachtet. Trotzdem zeigten die Bordinstrumente des betroffenen Flugzeugs keine Feuerwarnung. Die sofort erschienene Feuerwehr versuchte das Feuer von der Triebwerksrückseite mit Wasser zu löschen. Es entstand weißer Rauch der jedoch schnell wieder schwarz wurde. Dann traten* ***ca. 3 Meter lange Flammen hinten aus dem Triebwerk****. Nach wenigen Sekunden verlosch das Feuer. Die nachfolgende Inspektion ergab:*

- Am Austrittskonus und der Düse rußartige Kraftstoff- und Ölrückstände.

- Der gesamte Fan- und Bypassbereich war mit Öl und Kraftstoff verschmutzt. Diese Verunreinigungen kamen aus verschiedenen Entlüftungsöffnungen.

- Beim Öffnen des Öltankdeckels quoll ein kontinuierlicher Strom Kraftstoff heraus.

Dies ließ auf ein großes internes Leck schließen. Sofort stand der ***Öl/Kraftstoff-Wärmetauscher*** *(Fuel Cooled Oil Cooler = FCOC) in Verdacht (Skizze oben rechts). In ihm ist der Kraftstoffdruck, auch bei Leerlauf, deutlich höher als der des Öls. Ein Leck wird also immer Kraftstoff in das Öl leiten.*

Beim vorhergegangenen Flug hatte die Ölmenge bereits um ca. 3,5-Liter zugenommen. Das zeigt, dass bereits ein kleines Leck vorhanden gewesen ist. Der Wärmetauscher war bereits ein Jahr vorher gegen einen anderen lecken gewechselt worden. Damals verriet ***intensiver Kraftstoffgeruch des Öls*** *das Leck.*

© MC Poss Turbo Consult
Ausbildungsunterlagen nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Ölverunreinigungen: Kraftstoff

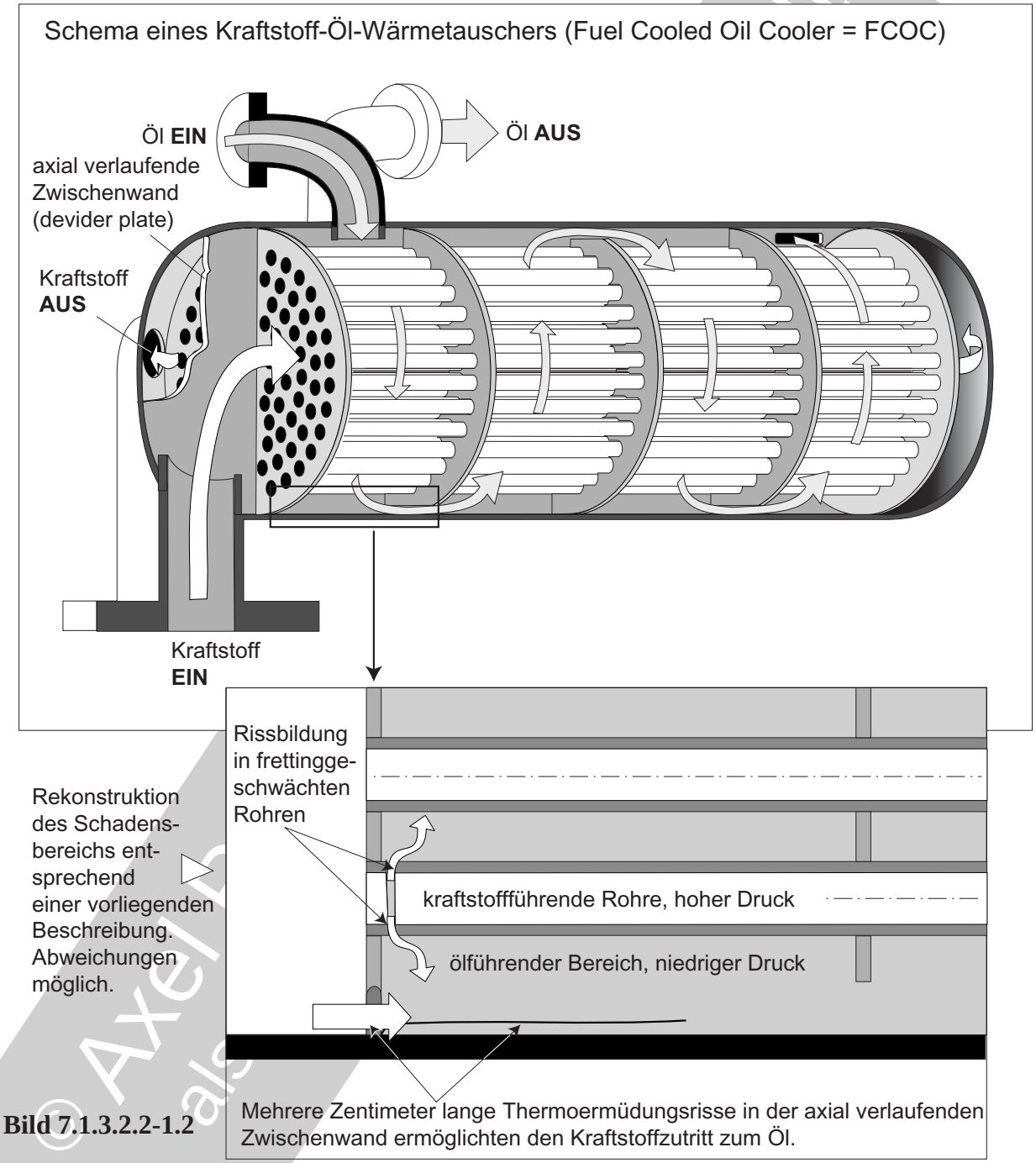


Bild 7.1.3.2.2-1.2

Der Wärmetauscher besteht aus einer hochfesten ***Aluminiumlegierung*** *(Lit. 7.1.3.2.2-2). Deren Festigkeit reagiert sehr empfindlich auf Temperatureinwirkung im Fertigungsprozess (z.B. Löten). Der Tauscher wird von einer axial stehenden Trennwand längsgeteilt. Diese ist* ***in das Gehäuse gelötet****. Damit können hohe* ***Wärmespannungen*** *zwischen Gehäuse und Axialwand auftreten. In die querstehenden Deckplatten sind die Enden der kraftstoffdurchflossenen Tauschröhrchen ebenfalls eingelötet. Die anderen Querwände dienen lediglich der Positionierung. Sie sind im Gehäuse fixiert, die Röhrchen können jedoch in ihnen gleiten. Das ermöglicht gefährlichen* ***Reibverschleiß*** *(Fretting) in den Kontaktzonen.*

*Bereits beim **Röntgen** des Wärmetauschers zeigten sich Verschiebungen der Röhrchen.*
*Eine **Boroskopinspektion** ergab, dass Röhrchen gebrochen waren und die **axiale Trennwand** einen **mehrere Zentimeter langen Riss** aufwies. Die mikroskopische Bruchflächenanalyse (REM, Band 1 Bild 2.2.2.4-4) ließ auf einen **LCF-Ermüdungsriss** schließen. Er entstand unter **zyklischen Wärmespannungen** (Thermoermüdung) im Bereich der **Spannungskonzentration** (Steifigkeitssprung, Kerbe) am Übergang der Trennwand in das Gehäuse. Hier an der Lötung ist die Werkstofffestigkeit niedriger. Das ist fertigungsbedingt (Löten) aber unvermeidlich (Schwachstelle, kein Fehler!).*
*Nach dem Öffnen des Tauschers zeigten sich **Brüche und Risse in Rohrleitungen und in der** axialen Trennwand. **Intensives Fretting** hatte einige **Rohrwände stark geschwächt.***
Offenbar wurden bereits früher Kraftstofflecks an gerissenen Röhrchen repariert. Das zeigten die eingeklebten Stopfen.

***Historie**: Beim Triebwerks-OEM waren bereits ähnliche Fälle eines Kraftstofflecks zum Öl bekannt. In allen Fällen war die Ursache eine Rissbildung im Wärmetauscher. Bereits ca. zwanzig Jahre früher kam es zum **Feuer im Ölsumpf des Lagers einer Niederdruckturbine** („1“ in Detail unten links).*
*Zumindest in einem Fall brach die Niederdruckwelle durch Überhitzung. Es kam zur **Überdrehzahl und dem Abschleudern der Schaufeln** zweier Stufen (Lit. 7.3.2.2-4).*
*In elf Fällen brachen **Feuer im mittleren Turbinenlager** aus („2“ in Detail unten links).*
Mit verschiedenen Maßnahmen und entsprechenden Service Bulletins wurde versucht das Problem zu lösen.
*- **Verbesserung des Entlüftungssystems** mit einer zusätzlichen Rohrleitung (extension tube).*
- Einbringen einer Flammenfalle (flame trap), um eine gefährliche Ausbreitung der Flammen aus der mittleren Lagerkammer nach vorne zu verhindern.
*- Mehrere **Informationen** an die Betreiber.*
*- **Geruchstest** (sniff test) bei Ölstandskontrollen.*
*- **Boroskopinspektionen** der Lötungen an der axialen Trennwand.*
*- Einführung einer verbesserten Tauschervariante. Bei dieser wurden die **Röhrchen** in die Deckplatten **eingepresst**, **statt eingelötet**.*

Merksatz:
Steigt der Ölstand/das Ölvolumen an, ist grundsätzlich die Ursache zu ermitteln. Dazu gehören ein **Geruchstest** und eine **Ölanalyse** auf **Verunreinigungen durch Kraftstoff**.

***Bild 7.1.3.2.2-2** (Lit. 7.1.3.2.2-3): Die häufigste Ursache für eine bedenkliche Ansammlung von **Kraftstoff im Schmieröl eines Kolbenmotors** beruht letztendlich auf **Kondensation von Kraftstoffdampf**. Es bildet sich **während der Startphase** (Kaltstart) ein **Kraftstofffilm an kalten Oberflächen**. Bevorzugte Bereiche sind Zylinderwände, Ansaugrohre und Ventile. Bei den niedrigen Temperaturen wird der Kraftstoff zusätzlich unzureichend verbrannt. In diesem Temperaturbereich arbeiten auch die Lambda-Sonde und das Steuergerät (zu niedrige Kühlwassertemperatur <30°C) noch nicht. Das zeigt sich am intensiven Kraftstoffgeruch der Abgase.*
*Jede Beeinträchtigung der Verbrennung wie durch eine defekte **Zündung** (Zündkerze, Zündkontakte/-stecker, Verteiler) begünstigt Kraftstoffansammlungen im Öl.*
*Das gilt auch, wenn für die Verbrennung zuviel Kraftstoff zur Verfügung steht. Das ist z.B. bei Schäden an der **Einspritzung** (Einspritzdüse defekt) als Folge eines nicht sachgerecht zu hoch eingestellten **Einspritzdrucks** der Fall.*
*Ähnlich wirkt sich Verschleiß von **Vergaserkomponenten** (Düse, Düsennadel) aus.*
*Wegen **ungenügender Verbrennung bei niedriger Betriebstemperatur** gelangt der Kraftstoff über die Kolbendichtung (Kolbenringe, Lauffläche) in das Öl (Ölsumpf, Skizze). Wird*

© Axel Neßmann - Ingenieurbüro aus Schulungsunterlagen - Referenz

Systeme und Betriebsstoffe: Ölverunreinigungen: Kraftstoff

Eine verschlechterte Tragfähigkeit des Öls durch Kraftstoff gefährdet die Gleitflächen im Ölsystem eines Kolbenmotors.

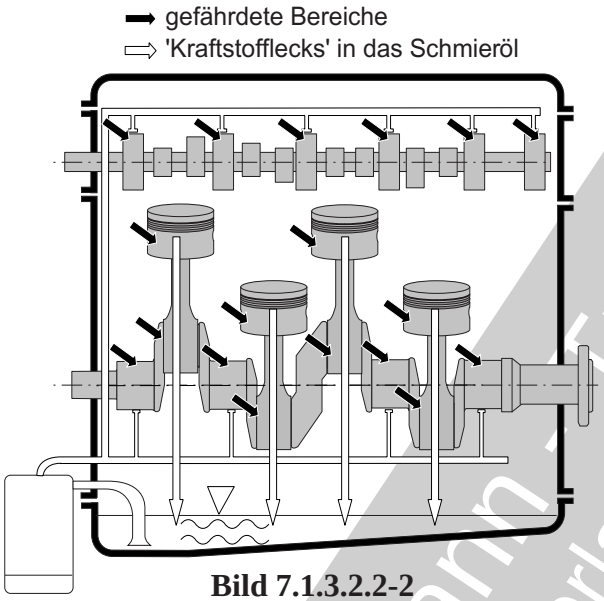


Bild 7.1.3.2.2-2

Ansammlung von Kraftstoff im Öl wird begünstigt von

- Kaltstarts, Leerlaufbetrieb, 'Stop-and Go', Kurzzeitbetrieb.
- Leckage an Zylindergleitflächen und Kolbenringen durch Verschleiß und/oder Bruch.
- Zu niedrige Kompression.
- Verschlissenes Einspritzsystem insbesondere Einspritzdüsen.
- Zündung: Zündzeitpunkt falsch, Schaden an Zündkerzen.
- Ventile: Verschleiß
- Ansaugluftproblem, Luftfilterproblem.
- Kraftstoff mit verschlechterter Zündwilligkeit: z.B. Biodiesel (FAME, RME).
- Abwechselnde Verwendung von Pflanzenöl.
- Leckagen zum Kühlwasser durch Dichtungsversagen oder Rissbildung.

er nicht bei ausreichender Motortemperatur (>90°C) und Betriebszeit ausgetrieben, sammelt er sich im Öl. Das ist bei häufigen Kaltstarts und intermittierendem Betrieb der Fall (siehe Zusammenstellung).
Selbst bei normalem Fahrbetrieb bleibt etwas Restkraftstoff im Abgas. Davon gerät über die wenn auch geringfügige, unvermeidliche Leckage der Kolbenringe ('Blowby') etwas in das Kurbelgehäuse zum Schmieröl. Dieser Effekt ist bei älteren Motoren verschleißbedingt ausgeprägter. Das kann dazu führen, dass scheinbar kein Ölverbrauch stattfindet oder sogar der Ölstand steigt. Der Kraftstoffanteil senkt die Viskosität und damit die Tragfähigkeit des Schmierölfilms ab. Es kommt zu Misch- und Trockenreibung mit ***Kaltverschweissung*** *('Fressen', Band 1 Kapitel 5.9.2). Typisch sind* ***Kolbenfresser****.*

Abhilfen*:*
- Zunächst sind in der ***Fahrweise*** *die als schadensbegünstigend angegebenen Betriebseinflüsse zu vermeiden.*
- Der ***technische Zustand*** *ist entsprechend den Vorgaben und Empfehlungen des OEM zu gewährleisten.*
- Reichen diese Maßnahmen nicht aus (z.B. in kalten Klimazonen) ist eine nachträgliche Ausrüstung mit einer ***Motorvorwärmung*** *wirksame Abhilfe. Diese wärmt das* ***Kühlwasser*** *auf. Bei luftgekühlten Motoren lässt sich das* ***Öl*** *vorwärmen (Ölvorwärmer) .*

© Axel Bossmann - Transcript alle Rechte vorbehalten - Nur zum Lizenzunterlage

Literatur zu Kapitel 7.1.3.2.2

7.1.3.2.2-1 AAIB Bulletin No: 4/99 Ref: EW/A97/5/1 Category: 1.1, „Mc. Donnell Douglas DC-10-30 Incident 11 May 1997“, Seite 1-12.

7.1.3.2.2-2 I.E.Traeger, „Aircraft Gas Turbine Engine Technology“, Second Edition, Glencoe, ISBN 0-07-065158-2, 1994, Seite 509 und 514.

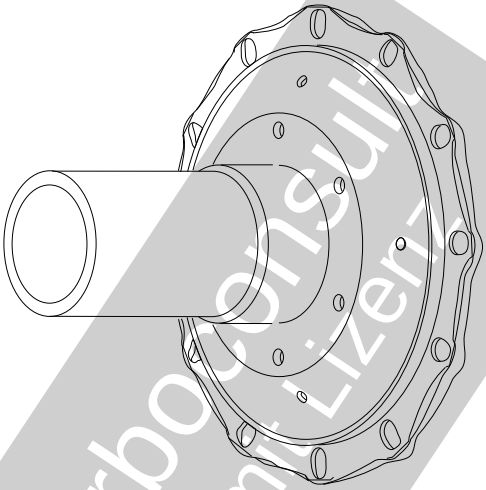
7.1.3.2.2-3 „Kraftstoff im Öl...“, www.wearcheck.de/dt_oc/02wissen/inhalte/123.htm, Seite 1-3

7.1.3.2.2-4 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 1 2000, ISBN 3-00-005842-7, Kapitel 4.5.

7.1.3.2.2-5 A. Rosmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 5 2008, ISBN 978-3-00-025780-3, Kapitel 25.2.2.1

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

7.1.4 Ölfeuer



© Yal Rossmann - Turbomaschinen Consulting
Abschlussunterlagen nur mit Lizenz

Das **Temperaturniveau und damit das Ölfeuerrisiko** in ölgeschmierten Maschinen, insbesondere Turbomaschinen steigt mit der Leistungskonzentration. In diesem Kapitel wird das Problem am Beispiel von Flugtriebwerken behandelt. Eine erhöhte Gefahr für Feuer in einem Ölsumpf besteht bei hohen Betriebstemperaturen (Bild 7.1.4-3) im Zusammenhang mit **Wellendichtungen** der Hauptlagerkammern (Bild 7.1.4-1 und ild 7.1.4-2). Erhöhen sich die Öltemperaturen in Nähe der Zündung (Bild 7.1.4-4 und 7.1.4-5) des Öls (engl. **Oilfire, Oilsumpfire**) kann dafür ein kleiner außerplanmäßiger Temperaturanstieg ausreichen. Bei synthetischen Ölen ist ab **260°C mit einer Selbstzündung** zu rechnen. Ölfeuer können unterschiedliche Erscheinungsformen haben (Bild 7.1.4-7, Bild 7.1.4-9, Bild 7.1.4-10 und Bild 7.1.4-11). Auch die Zeitabläufe sind nicht unbedingt gleich.(Lit 7.1.4-5).

Ölfeuer lassen sich gewöhnlich zwei Hauptursachen zuordnen:

- Ölfeuer im Lagerkammerbereich auf Grund zu hoher Temperaturen im Ölsumpf, in Entlüftungsleitungen (engl. „Vent“) und Rückölleitungen (engl. scavenge lines).
- Leckagen im Öl- bzw. Hydrauliksystem nach Dichtungsversagen und Leitungsundichtigkeiten (Beispiel 7.1.4-1).

Ölsumpffeuer:

Solche Feuer entstehen in einem zündfähigen Öl/Luftgemisch in Lagerkammern. Das Öl kann dabei als Öldampf, Ölnebel oder in Tropfenform vorliegen. Man hat **kurzzeitige** Ölfeuer in Lagerkammern beobachtet, als auch solche die über **längere Zeit** auftraten. In erster Linie entstanden **Koksablagerungen** mit der Gefahr einer Verstopfung von Rückölrohrleitungen und Filtern und der **Schädigung von Lagerlaufbahnen** (Eindrücke und Verschleiß in den Laufbahnen).

Das Feuer bei der Verbrennung des Öls ist sehr intensiv. Es kann in kurzer Zeit (Minuten) große Bauteilquerschnitte bis ‘zur Glut’ und **spontanem katastrophalen Versagen** aufheizen (Bild 7.1.4-11).

Versuche im Ölfeuerprüfstand (Bild 7.1.4-8) zeigen die Bedingungen für die Zündung eines Ölfeuers:

- die Öltemperatur ist von entscheidender Bedeutung, damit eine Zündung durch einen Funken (Bild 7.1.4-4) eintritt. Sie liegt z.B. für ein typisches synthetisches Triebwerksöl im Bereich von 217°C, (Lit 7.1.4-5). Die Zündung ist auch vom vorhandenen Öldampfdruck abhängig. Eine Zündung erfolgt nicht, wenn ein Öldampfdruck unter oder deutlich über der **Zündgrenze** liegt.

Damit ein gezündetes Feuer ohne eine andauernde Zündquelle **weiter brennt,** muss das Öl/Luftgemisch über der Temperatur des **„Brennpunkts“** liegen (z.B. 285 °C).

Liegt die Temperatur so hoch, dass eine **Selbstzündung** erfolgt (z.B. 432 °C) ist keine Zündquelle für die Entstehung eines Feuers erforderlich.

- Liegt kein zündgeeignetes Öl/Luftgemisch vor (entweder zu mager oder zu reich), kann kein Feuer entstehen.
- Bei Temperaturen unterhalb der Selbstzündung muss eine ausreichend starke Zündquelle vorhanden sein (Bild 7.1.4-4).

Auf dieser Erkenntnis lassen sich auch Abhilfemassnahmen erarbeiten.

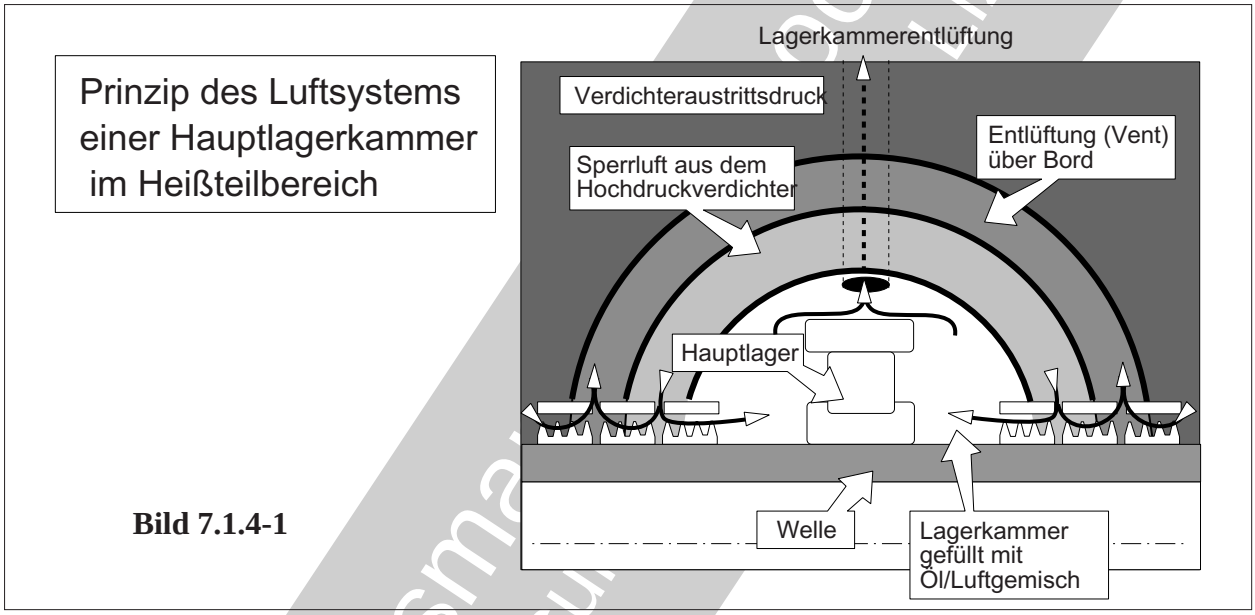


Bild 7.1.4-1

Bild 7.1.4-1 *(Lit 7.1.4-8): Die Hauptaufgabe des Luftsystems einer Lagerkammer im Heißteilbereich besteht darin, den Lagersumpf vor der heißen Umgebung zu schützen. Die Umgebungsbedingungen einer* ***besonders brandgefährdeten Hauptlagerkammer werden von Temperatur und Druck am Verdichteraustritt*** *bestimmt. Das Dichtungssystem der Lagerkammer sollte es ermöglichen, unterhalb der Zündfähigkeit des Öls zu bleiben (Bild 7.1.4-4 und 7.1.4-5). Das folgende Beispiel für eine typische Hauptlagerkammer mit Labyrinthdichtungen verdeutlicht dies:*

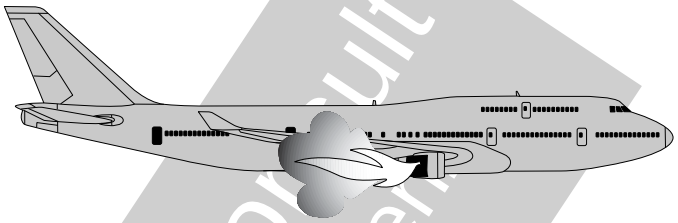
Die innen liegende Kammer, in der sich das Hauptlager befindet, ist mit einem Öl/Luft Gemisch gefüllt. (Temp. ca. 180°C, Druck ca.0,14 bar).
Die Lagerkammer ist vom ersten „Hüllkanal“ umgeben und wird von Luft aus dem Hochdruckverdichter (Temperatur ca. 200°C, Druck ca. 5,5 bar), die als Sperrluft und Kühlluft für den Lagerbereich dient, beaufschlagt. Das hohe Druckniveau erzeugt eine Leckströmung zur Entlüftung und verhindert einen Heißgaseinbruch zum Lager. Damit wird auch verhindert, dass Fremdkörper von außen in das Lager gelangen. Lediglich eine relativ kühle Leckströmung aus der Sperrluft dringt über die Labyrinthdichtungen zum Lager vor.
Der zweite „Hüllkanal“ wird durch die Entlüftung (vent) gebildet, welche die Leckluft aus den Labyrinthen über Bord abbläst und einen Heißgaseinbruch zum Lager verhindert.
Um die Lagerkammer herrschen die Austrittsdaten des Hochdruckverdichters (Temperatur ca. 650°C , Druck ca. 25 bar).

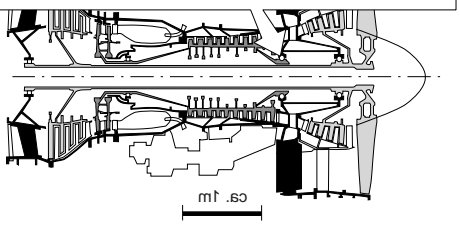
Es sei angemerkt, dass es auch Lagerkammern mit einer Kombination aus Labyrinth- und Gleitringdichtungen gibt. Dabei werden die sehr dichten Gleitringe zur Abdichtung des Öl/Luft-Gemischs der inneren Kammer um das Lager verwendet.

© Aßmann Beraten + Planen
Nachdruck nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Das Ölsystem: Ölfeuer

Heiße Luft aus dem Bereich des Verdichteraustritts strömt durch einen Riss in einer Entlüftungsleitung in die Lagerkammer und entzündet das Öl.





Beispiel 7.1.4-1 (Lit 7.1.4-2):

Zitat: Beim Steigflug wurden ein lauter Knall und Schütteln des Flugzeugs registriert. Die Instrumente zeigten der Besatzung, dass Öldruck und Ölfüllung eines Triebwerks stark abgefallen waren. Gleichzeitig ging die Feuerwarnung (Licht, Signalton) an. Nach Abschalten des betroffenen Triebwerks gelang eine problemlose Landung. Die Außeninspektion zeigte, dass dessen außenseitige Gondelverkleidung fehlte. Diese wurde in einer Vorstadt ca. 10 km vom Flughafen entfernt gefunden. Die Zerlegung des Triebwerks zeigte einen Riss in der Durchgangsstrebe (engl. vent line strut) des Gehäuses für die Entlüftungsleitung **einer Hauptlagerkammer**. **Damit hatte die heiße Zapfluft am Verdichter Zutritt**. Das führte zur **Zündung des Öls**. Der Druckverlauf im System ermöglichte die Ausbreitung des Feuers und es kam zur explosionsartigen Zerstörung im Bereich des Entlüfters (engl. Breather). **Diese Druckwelle sprengte die außenseitige Gondelverkleidung ab.**

Kommentar: Eine häufige Ursache für ein Ölfeuer ist erfahrungsgemäß der **Heißlufteinbruch in die Entlüftung**. Gerade Entlüftungsleitungen die durch heiße Gehäusestreben verlaufen bilden eine typische Schwachstelle. Wärmedehnungen, Verspannung durch Montageeinflüsse oder Schwingungen an solchen Leitungen führen bevorzugt zu Ermüdungsbrüchen durch die Heißgas bzw. Heißluft in das Ölsystem eintreten kann.

Bild 7.1.4-2 *(Lit 7.1.4-5):* ***Ölfeuer*** *im Bereich der Lagerkammern und des Ölsumpfsystems im hinteren Verdichter- und Heißteilbereich* ***bestimmen die Häufigkeit eines Feuers in Triebwerken****. Diese Häufigkeit ist nicht zuletzt auf die Vielzahl potenzieller Ursachen (Skizze oben) zurückzuführen:*

- Probleme im Lagerkammerbereich
- Ölnebelaustritt in und zwischen konzentrischen Wellen
- ***Leckagen****. Besonders gefährlich ist die Entzündung einer* ***Spraywolke unter Druck stehenden Lecköls*** *aus einem Riss oder Spalt (Bild 6.12.2-6).*
- Leckagen am inneren Ölsystem und Zündung des Lecköls durch Heißgaseinwirkung (Beispiel 7.1.4-1).
- Leckagen im äußeren Ölsystem.
- Perforation von Ölleitungen und Entzündung eines Ölfeuers durch ein Titanfeuer
*- Bei schlechten Lagerkammerdichtungen können Schockwellen im Ölnebel Zündbedingungen entstehen lassen (****„Dieseleffekt“****).*

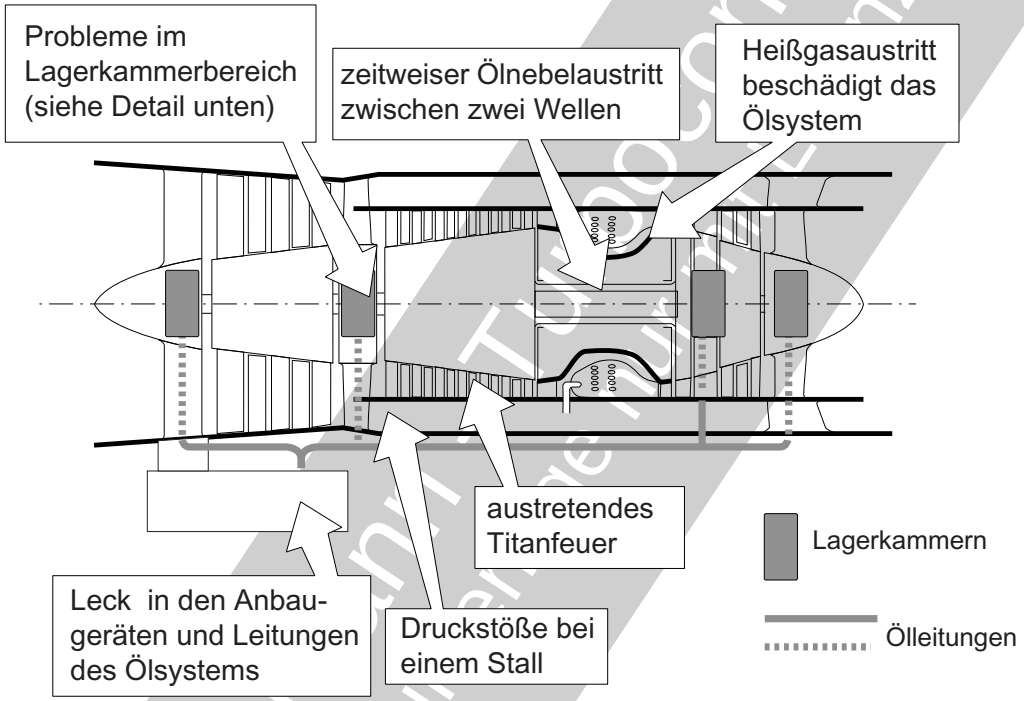
Am häufigsten treten Ölfeuer im Bereich von Hauptlager-Kammern auf. Die begünstigenden Einflüsse und auslösenden Ursachen zeigt die Skizze unten:

Heißgaseinbruch in das ***Lagergehäuse*** *nach Rissbildung (Lit. 7.1.4-16). Lagergehäuse sind hohen dynamischen Beanspruchungen aus Lagerschüben, Vibrationen der Rotoren und zyklischen Wärmedehnungen unterworfen. Bilden sich* ***Ermüdungsrisse,*** *besteht entspre-*

Fortsetzung auf Seite 7.1.4-5

© Axel Rossmann - Turbomaschinen - Lehrunterlagen

Ursachen für Ölfeuer



Ursachen für Ölfeuer in einer Hauptlagerkammer

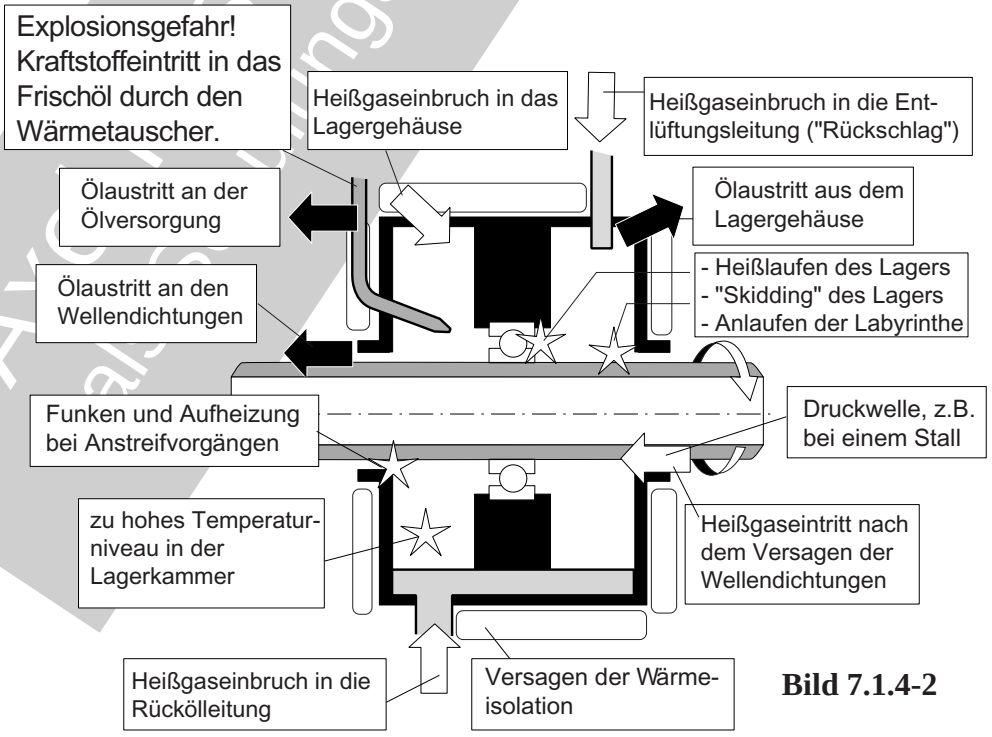


Bild 7.1.4-2

© Axel Gasch und Turbocomsult
als Übungsunterlage nur für Lehrzwecke

Systeme und Betriebsstoffe: Das Ölsystem: Ölfeuer

Fortsetzung von Seite 7.1.4-3

chend dem üblichen Druckgefälle zum Lager hin (Bild 7.1.4-1) die Möglichkeit, dass Heißluft bzw. Heißgas in die Lagerkammer strömt. Ähnliches gilt für ***Rückö l- und Entlüftungs-*** *(engl. Vent-)* ***leitungen*** *(Beispiel 7.1.4-1). Gerade über Risse und Brüche an solchen Leitungen wird immer wieder berichtet (Bild 7.1.4-10). Diese Leitungen mit niedrigem Druckniveau verlaufen typischerweise durch Heißluftbereiche mit hohem Druck (z.B. Verdichteraustrittsbedingungen), was den Heißgaseinbruch unterstützt (Bild 7.1.4-1).*
Gefährlicher Heißgaseintritt in die Lagerkammer an den ***Wellendichtungen*** *ist bei starkem Dichtungsabrieb zu erwarten.*
Druckwellen *können über eine solche Undichtigkeit (z.B. während eines Strömungsabrisses im Verdichter) zündend wirken.*

Als Folge eines Schadens können auch Druckgefälle entstehen, die einen Austritt von Öl aus einer lecken Lagerkammer begünstigen. Dieses Öl kann sich dann an der heißen Peripherie der Lagerkammer entzünden.
Ölaustritt an ***Wellendichtungen****: Ein gefährlicher Ölaustritt ist nur bei ungenügender Dichtwirkung zu erwarten. Es gibt jedoch Sonderfälle wo eine* ***Änderung der Druckgefälle*** *(Bild 7.1.4-7 und Bild 7.1.4-8) zu einem Überdruck in der Lagerkammer und zum Austritt eines feuergefährlichen Ölnebels führt.*

Kraftstoff im Öl *(Lit. 7.1.4-15 und Bild 7.1.3.2.2-3.1, Bild 7.1.3.2.2-3.2) durch ein Leck im Ölkühler (Öl/Kraftstoff-Wärmetauscher). Damit besteht die Gefahr einer Entzündung mit einer* ***Explosion in Lagerkammern****.*

Funken und Aufheizungen *bei* ***Anstreifvorgängen*** *in Dichtungen (Labyrinthen) mit einem ungünstigen Tribosystem können zündfähige Ölgemische zum Brennen bringen.*

Heißlaufen eines Lagers *ermöglicht gegebenenfalls die Bildung eines zünd- und brennfähigen Luft/Öldampf-Gemischs und dessen Zündung. Als Folge des Lagerversagens und so ausgelöster großer Axial- und Radialbewegungen der Welle, kann ein solches Feuer aus der Lagerkammer durch die ausgeriebenen Labyrinthe treten und den Rotor gefährlich aufheizen (Bild 7.1.4-11 und Bild 7.1.4-12).*

Herrscht in der Lagerkammer ein zu ***hohes Temperaturniveau*** *(Bild 7.1.4-4, 7.1.4-5 und 7.1.4-8) ist die Gefahr eines Ölfeuers besonders hoch. Ein solches Temperaturniveau stellt sich in besonderen Missionen (Bild 7.1.4-3) ein. Dazu gehört immer auch eine „****Auslegungsschwäche****", wenn diesem Betriebszustand in der Triebwerksentwicklung nicht genügend Aufmerksamkeit gewidmet wurde.*

Bild 7.1.4-3 *(Lit 7.1.4-8): Die* ***Gefahr eines Ölfeuers*** *im Lagerkammer- und Rückölbereich steigt erfahrungsgemäß mit dem* ***Temperaturniveau des Triebwerks*** *und der damit in Zusammenhang stehenden Zellenkomponenten (z.B. Tanks). Wann solche Zustände zu erwarten sind, lässt sich im Betriebsbereich (****flight envelope****) der Flugzeuge gut erkennen. Kampfflugzeuge (rechte untere Ecke) benötigen bei hohen Fluggeschwindigkeiten in Bodennähe viel Triebwerksleistung und erzeugen hohe Staudrücke. Für ein Überschallverkehrsflugzeug befindet sich der für Ölfeuer gefährliche Bereich in der oberen rechten Ecke. Kritisch sind hohe Fluggeschwindigkeiten, die über längere Zeit den Treibstoff in den Flügeltanks so weit aufheizen, dass das Schmieröl im*

© Axel Grossmann - Turbomeca
Alle Schulungsunterlagen urheberrechtlich geschützt

Ölfeuergefahr in Abhängigkeit von den Betriebsdaten.

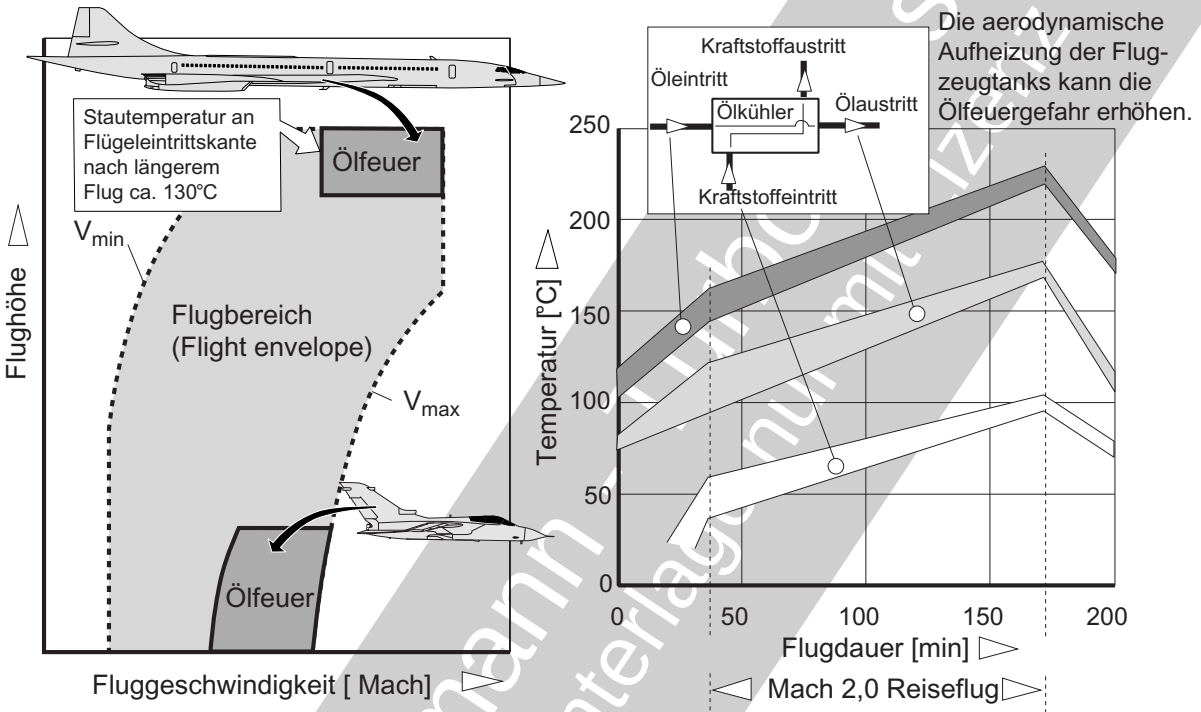


Bild 7.1.4-3

Ölkühler(Bild 7.1.3.2.2-1.2) nicht mehr ausreichend gekühlt und zu heiß wird (Diagramm rechts und Bild 7.1.4-4).
In diesem Überschallverkehrsflugzeug wird das ***Triebwerksöl durch den Kraftstoff als kältestes zur Verfügung stehendes, flüssiges Medium gekühlt****. Die Kraftstofftanks befinden sich in den Tragflächen. Es zeigte sich, dass bei längerem Reiseflug (ca. 2 Stunden) im Bereich von Mach 2,0 die Tragflächentemperatur an der Eintrittskante und die Temperatur am Triebwerkseintritt von anfangs 92°C auf 127°C ansteigt. Damit steigt die Temperatur des Kraftstoffs bevor er in das Kraftstoffsystem des Triebwerks gelangt von 45° C auf 115°C. Als Folge steigt die Öleinlasstemperatur von anfangs 180°C auf 230°C. Das eintretende Öl berührt TWKs -Oberflächen mit bis zu 310°C, die wiederum vom Öl gekühlt werden müssen. Ab ca. 350°C besteht nach Literaturangaben für das verwendete Öl Feuerrisiko.*

© Prof. Rosemann - Nur zur Verwendung mit Vorlesungsunterlagen

Systeme und Betriebsstoffe: Das Ölsystem: Ölfeuer

! Mit den Lagerkammertemperaturen steigt das Ölfeuerrisiko

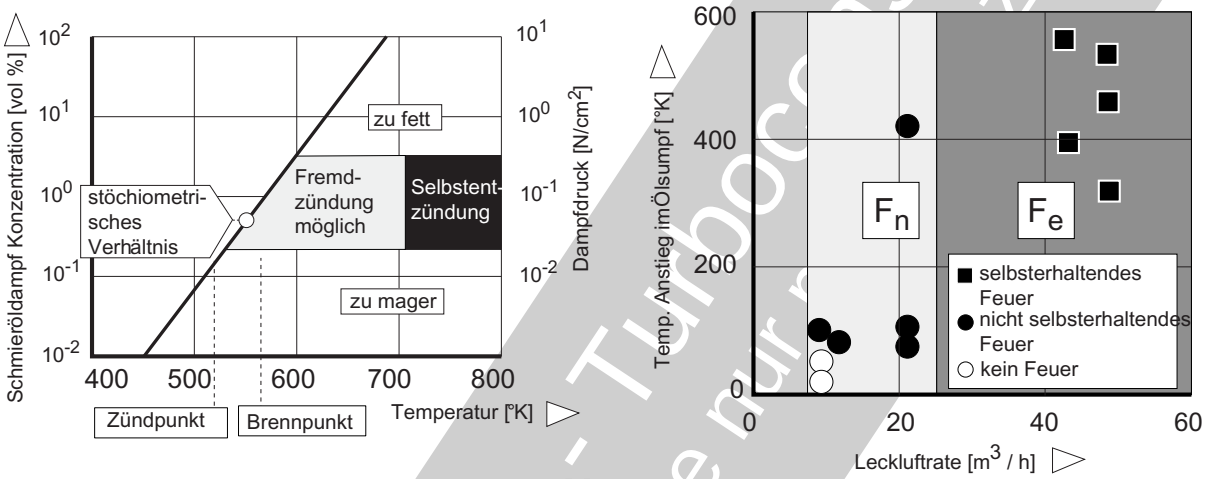


Bild 7.1.4-4

Bild 7.1.4-4 *(Lit 7.1.4-5): Die* ***Zündung*** *eines weiterbrennenden* ***Öldampf/Luftgemischs*** *ist nur in einem bestimmten* ***Konzentrationsbereich****, der von Druck und Temperatur abhängt, möglich (Diagramm links). Bei höheren Öldampfkonzentrationen spricht man von einem für ein Brennen zu* ***„reichen“*** *(rich), bei niedrigeren von einem zu* ***„mageren“*** *(lean) Gemisch.*

Die ***Durchflussrate des Öl/Luft Gemischs*** *kann die* ***Intensität und die Ausbreitung*** *eines gezündeten Feuers entscheidend beeinflussen (Diagramm rechts). Maßstab für die Intensität eines Ölfeuers ist die Temperaturerhöhung nach der Zündung. Eingetragen sind die Ergebnisse an einem Ölfeuerprüfstand mit einer Lagerkammer. Offenbar gibt es Grenzen von Leckluftraten unterhalb der keine Zündung (F_n) bzw kein selbsterhaltendes Feuer (F_e) auftritt.*

Die höchste ***Brenngeschwindigkeit wird bei einem stöchiometrischen Verhältnis*** *von Öldampf und Sauerstoff erreicht.*

Die ***Entflammbarkeit*** *wird jedoch von der Durchflussrate von Luft und flüssigem Öl* ***nicht bestimmt,*** *wenn man von deren Einfluss auf die Temperatur und damit den Dampfdruck absieht.*

© AZ Rossmann - Turboconsult
Ausschnittunterlage nur n. z.

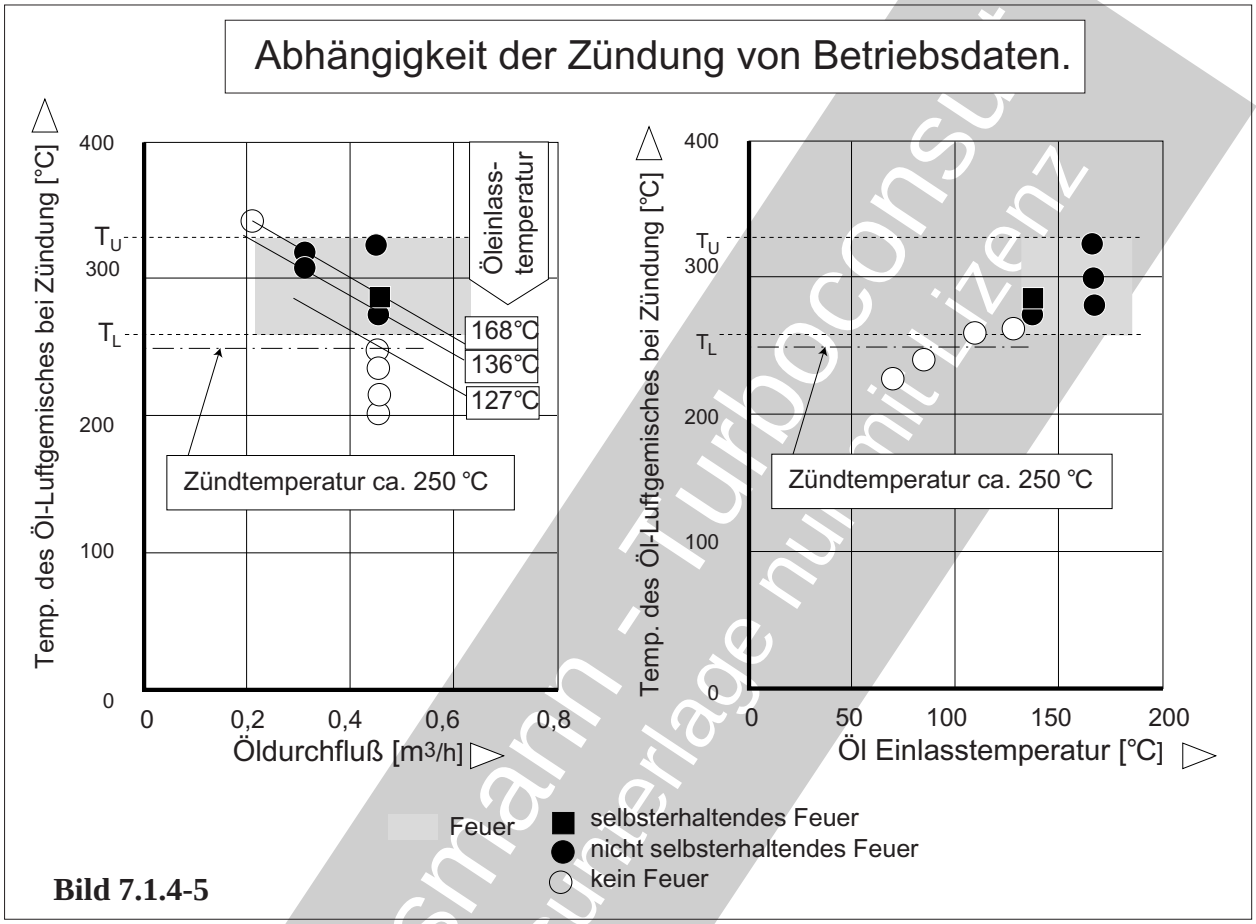


Bild 7.1.4-5

Bild 7.1.4-5 *(Lit 7.1.4-5): Der Einfluss des Öldurchflusses in einem Lagerkammerprüfstand auf die Temperatur des Luft/Öl Gemischs und die Zündung bei verschiedenen Öleinlasstemperaturen zeigt das linke Diagramm. Je* ***höher der Öldurchfluss*** *aus der Einspritzdüse ist, umso mehr wird die Temperatur des Öl/Luftgemischs in der Lagerkammer abgesenkt, was wiederum die* ***Sicherheit gegen einen Brand*** *erhöht. Bei dem geprüften Öl handelt es sich um einen Typ II Ester, die Lecklufttemperatur beträgt ca. 530 °C, Zündquelle ist ein elektrischer Funke.*

Keine Zündung erfolgte erwartungsgemäß bei Gemischtemperaturen unterhalb der Zündtemperatur (T_L). Selbst wenn die Temperaturen merklich ***oberhalb der Zündtemperatur*** *lagen (Pfeil) konnte nicht* ***immer ein Feuer gezündet*** *werden. Es lässt sich eine obere Entflammbarkeitsgrenze (T_U) angeben oberhalb der keine Zündung mehr erfolgt, weil die erforderlichen Druck/Temperaturvoraussetzungen im Öldampf nicht mehr gegeben sind (Bild 7.1.4-3). Siehe Diagramm links, Schnittpunkt der oberen Konzentrationsgrenze mit der Öldruck/Temperaturkurve.*

Das Diagramm rechts zeigt den Einfluss der Öl-Einlasstemperatur (des Ölstrahls aus der Einspritzdüse) auf die Temperatur des Öl/Luftgemischs und die Brandgefahr. Versuchsbedingungen: Lecklufttemperatur ca. 540°C, Feuer traten nur auf wenn die Öl-Einlasstemperatur über 146 °C stieg. Damit zeigt sich, welche große ***Bedeutung einer ausreichend niedrigen Öltemperatur*** *zukommt.*

© Aertossmann - Turboconsult
Abschnittsunterlage nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Das Ölsystem: Ölfeuer

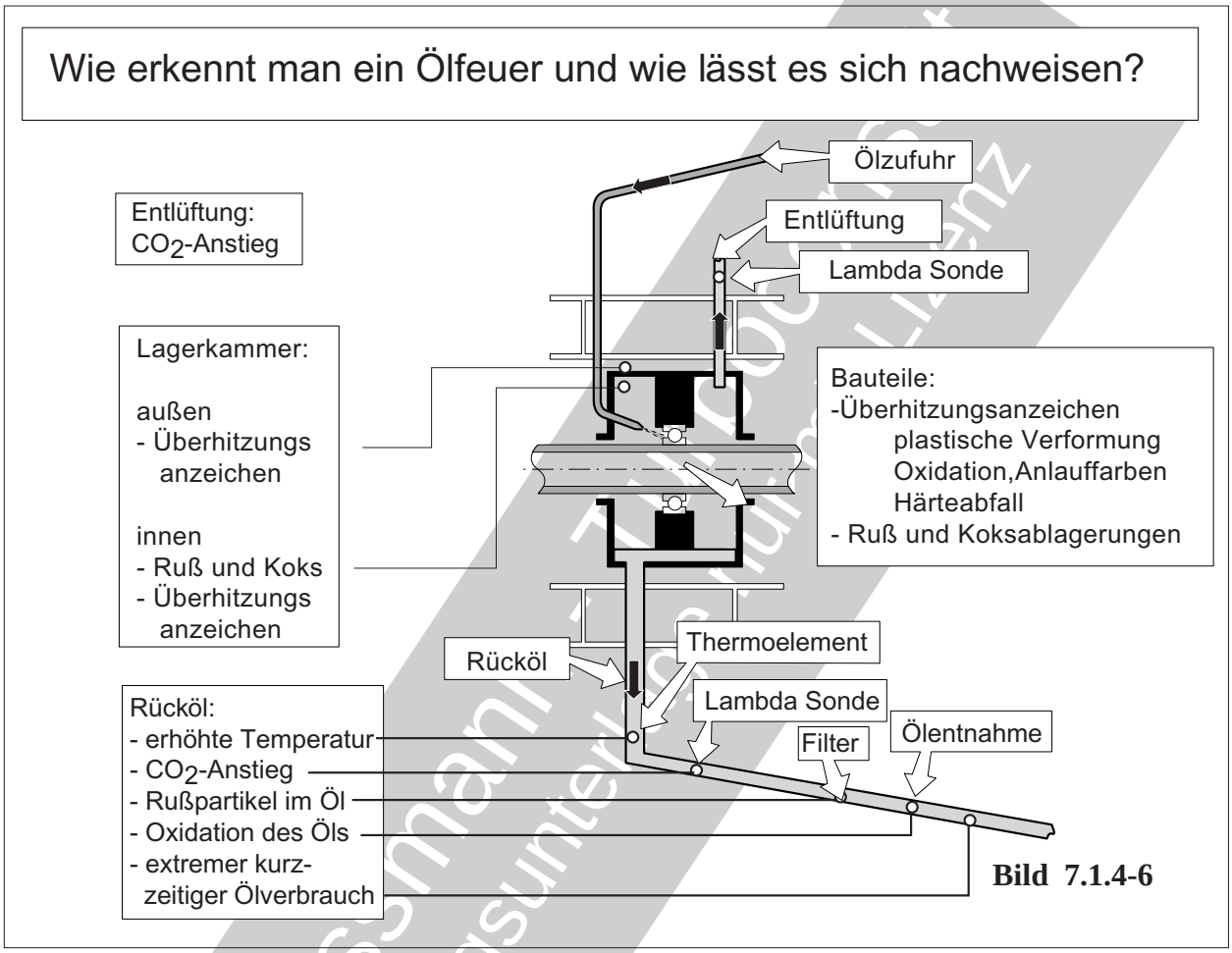


Bild 7.1.4-6

Bild 7.1.4-6: Erkennen und Nachweis eines Ölfeuers *ist die Voraussetzung für gezielte Gegenmaßnahmen. Es gibt Anzeichen für ein brennendes Ölfeuer und nach einem Ölfeuer lassen sich Identifikationsspuren finden.*

Während eines Ölfeuers:

- *CO_2- Anstieg in der Entlüftung und/oder im Rückölsystem.*
- *Temperaturanstieg (Lagerkammer, Öl).*
- *Verschlechterter Öldurchfluss (Filterverstopfung, Verkokung und/oder Zusetzen von Ölleitungen).*
- *Unwuchten, Folgeschäden (muss nicht ölfeuerspezifisch sein).*
- *Abfall des Öldrucks (bei Leckage der Druckölzufuhr).*

Nach einem Ölfeuer:

Ohne Zerlegung *(Wartung):*

- *Veränderungen des Öls (chemisch/Oxidation, Rußgehalt).*
- *Rußablagerungen im Filter.*
- *Ungewöhnlicher Ölverbrauch.*
- *Ungewöhnliche Rußspuren im Austrittsbereich des Triebwerks.*

Mit Zerlegung:

- *Überhitzungsspuren an der Lagerkammer (Anlauffarben, Oxidation, Verformungen, Rissbildung).*
- *Überhitzung von Bauteilen, insbesondere Rotorkomponenten (plastische Verformung, Härteabfall).*

© Axel Rossmann - TU München
als Vorlesungsunterlage nur für Lehrzwecke

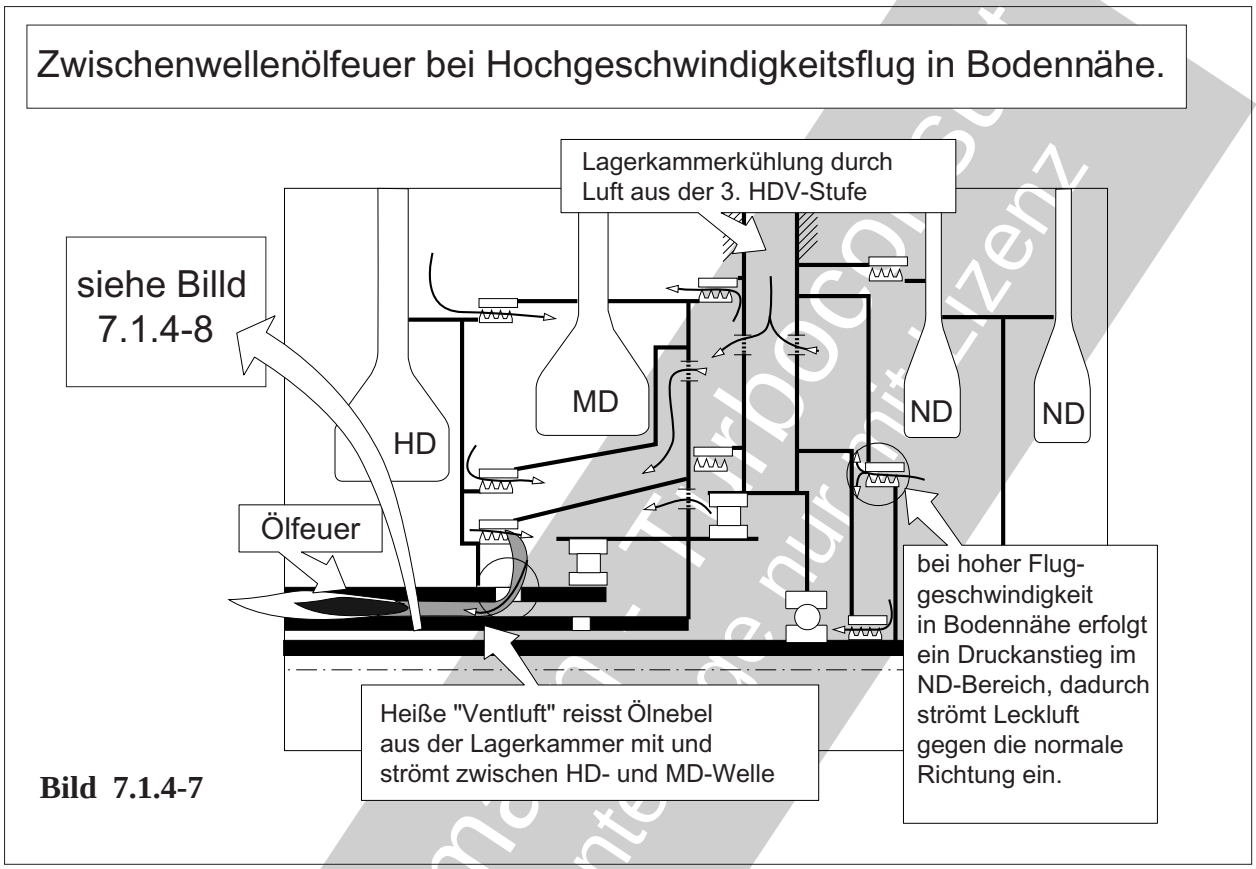


Bild 7.1.4-7

Bild 7.1.4-7: Örtlich 'stabile', intensive Ölfeuer *können in Bereichen von Maschinen auftreten, in denen scheinbar nicht die Voraussetzungen gegeben sind. So ist zur Stabilisierung der Flamme eine Art* ***Flammhalter*** *erforderlich. Dieser wird beim ersten Blick möglicherweise nicht erkannt. Dies gelang erst mit einem geeigneten* ***Bauteilversuch*** *(Bild 7.1.4-8). Dazu das folgende Beispiel.*
An Mehrwellentriebwerken eines Kampfflugzeugs traten in der Entwicklungsphase Zwischenwellenölfeuer im Bereich der Mitteldruckturbine auf (Skizze oben). Bei Hochgeschwindigkeitsflug in Bodennähe (Bild 7.1.4-3) änderten sich die Druckgefälle um die Hauptlagerkammer so ungünstig, dass Öldampf aus der Lagerkammer zwischen die Wellen strömen konnte und sich dort an den ca. 550°C heißen Wellen entzündete. Dies führte in wenigen Minuten zu einer Erweichung und plastischen Torsion der Welle (Skizze unten).

Bild 7.1.4-8: *In einem mehrwelligen Triebwerk eines zweistrahligen Kampfflugzeugs traten während eines Erprobungsflugs mit hoher Geschwindigkeit in niedriger Höhe starke Vibrationen auf, die zum Abschalten des betroffenen Mehrwellentriebwerks führten. Die Demontage des Triebwerks mit drei konzentrischen Hohlwellensträngen ergab, dass eine innen laufende Welle offenbar im Betrieb extrem überhitzt wurde. Die* ***Welle zeigte eine plastische Verformung,*** *die einen* ***spiralförmig umlaufenden Wulst*** *bildete. Starke Ölkohleablagerungen in der Welle deuteten auf ein Ölfeuer hin. Die Mehrheit der involvierten Experten vermutete, dass die Ursache für die Aufheizung des Wellenschafts und der Verformungswulst die Folge eines Anstreifvorgangs der Welle im Zusammenhang mit extremen Biegeschwingungen war. Wie sich ebenfalls herausstellte, fehlten nach dem Flug mehrere Liter Öl, was aber auf ein Ölleck als Folge des Schadens zurückgeführt wurde. Die Möglichkeit eines* ***Ölfeuers*** *(Bild 7.1.4-7) wurde eben-*

© Ayd Rossmann Turbodoc GmbH
alle Schutzrechte nur mit Lizenz

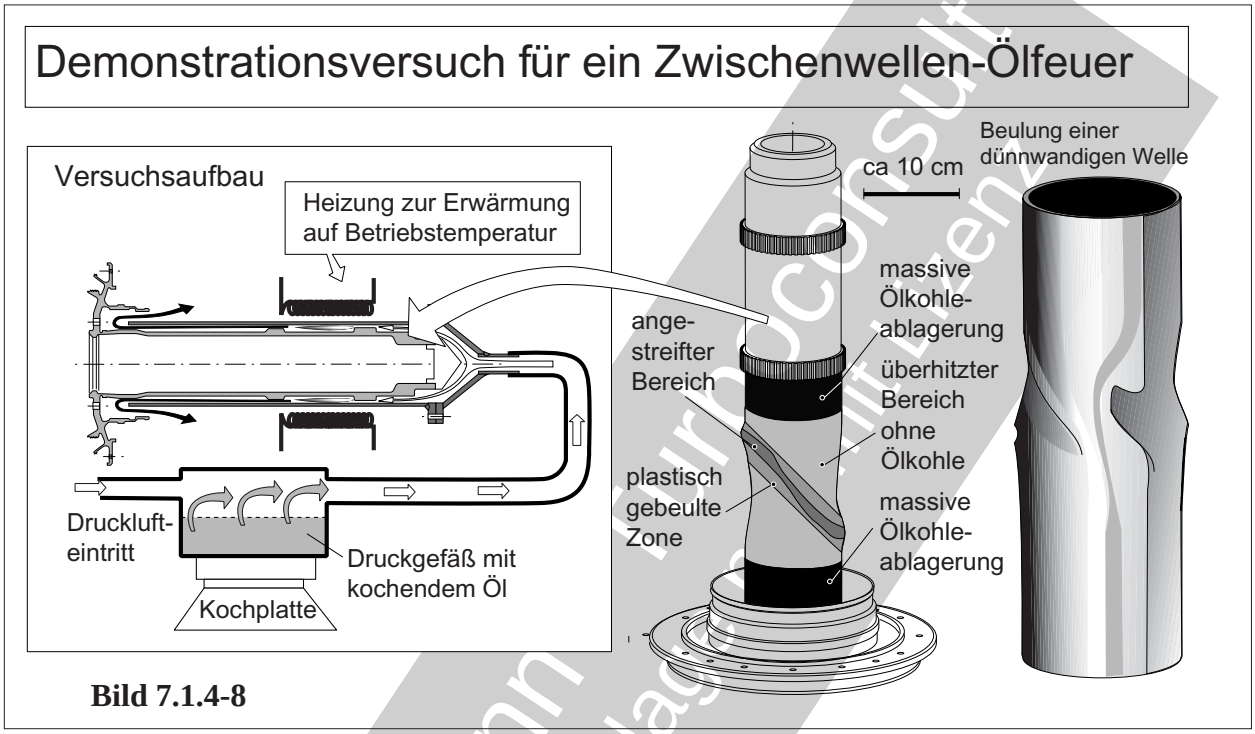


Bild 7.1.4-8

*falls erwogen, jedoch als wenig wahrscheinlich eingeschätzt. Es war z.B. nicht plausibel, warum überhaupt ein „**Zwischenwellenfeuer**“ möglich war, und wie es sich gegebenenfalls im fraglichen Bereich stabilisieren konnte.*

*Ein sehr erfahrener Prüfingenieur erstellte innerhalb weniger Stunden einen Prüfaufbau der trotz seiner Einfachheit die Vorgänge überzeugend demonstrierte. Er ordnete die Wellen wie im Betrieb konzentrisch zueinander, jedoch nicht rotierend an, erhitzte auf einer Kochplatte das Triebwerksöl (richtiger Öltyp) in einem Gefäß, durch das er heiße Druckluft, entsprechend den Bedingungen im Triebwerk, leitete. Die **öldampfführende Heißluft** wurde durch einen Rohranschluss in den Ringraum zwischen die Wellen geführt und diese auf Betriebstemperatur gebracht. Es gelang unter der Simulation extremer Betriebsbedingungen das Öl-Luftgemisch zu zünden. Wie sich schnell zeigte, wirkte ein ringförmiger Wuchtbund in der Welle als „**Flammhalter**“ und stabilisierte die Ölflamme so, dass der Wellenschaft in Bruchteilen einer Minute derart aufgeheizt wurde, dass er sich unter dem, zwischen Turbine und Verdichter zu übertragenden Torsionsmoment, vergleichbar mit dem Betriebsschaden plastisch verformte.*

Der Versuch ergab weiter, dass unter diesen Betriebsbedingungen der Ölverlust von mehreren Litern in Minutenschnelle bei einem starken Ölfeuer durchaus realistisch ist.

Spätere Messungen an anderen Erprobungstriebwerken bestätigten diese Beobachtungen und Schlussfolgerungen.

© Axel Rossmann Eurocon Consult
Lehrgangsunterlagen mit Lizenz

Brüche an Öl- und Entlüftungsleitungen die durch Gehäusestreben geführt werden sind typische Ursachen für Ölfeuer.

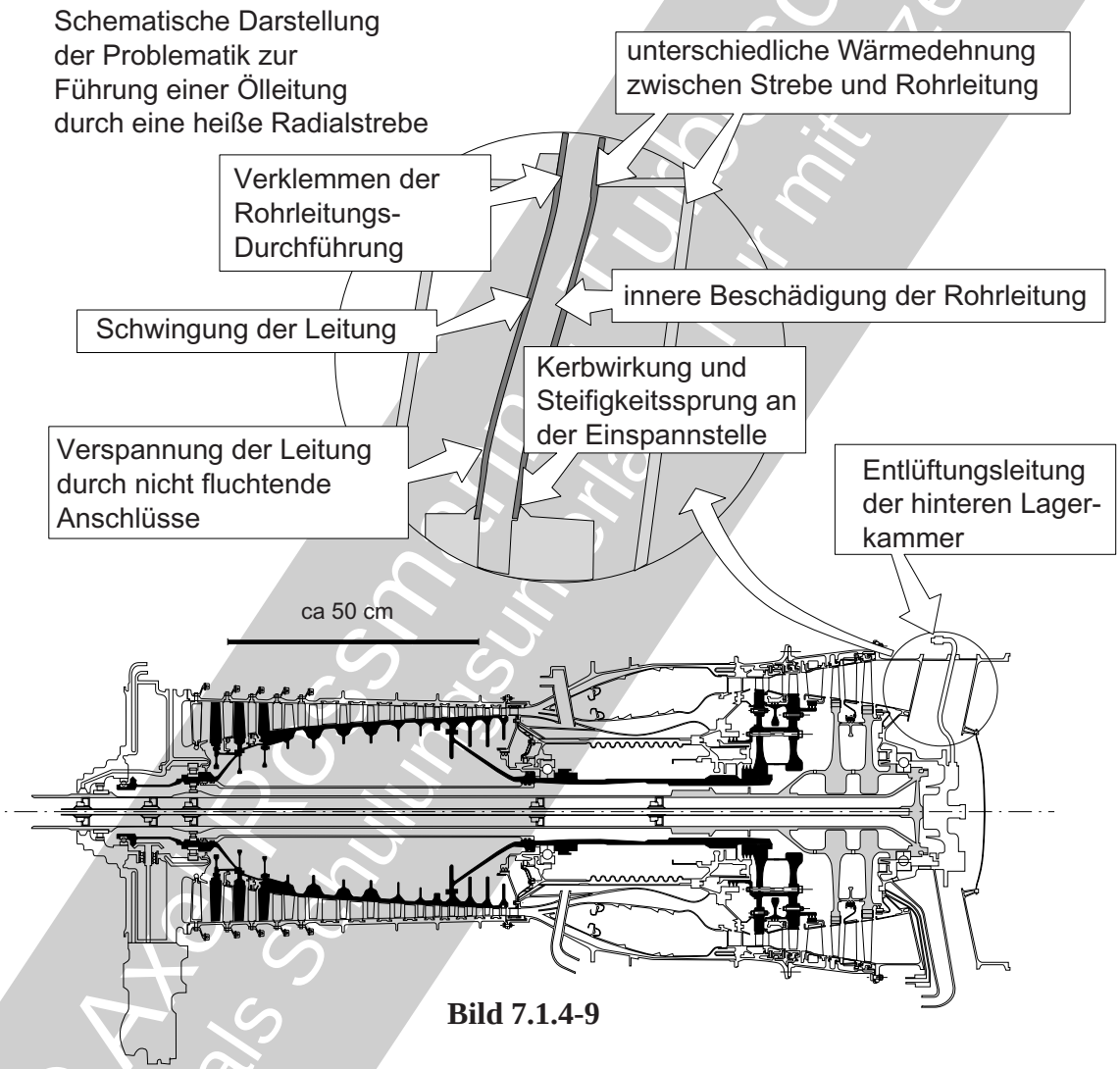


Bild 7.1.4-9

Bild 7.1.4-9: *Dieses Wellenleistungstriebwerk eines großen* ***militärischen Hubschraubers*** *(Skizze unten) erlitt mehrmals ein* ***Ölfeuer*** *in einer gerissenen* ***Entlüftungsleitung*** *(Detail oben). Es zeigte sich, dass die Leitung hohen zyklischen Wärmedehnungen ausgesetzt war, die von der Befestigung der Leitung nicht ausgeglichen werden konnten. Es kam zu einer entsprechenden Vorspannung, die Schwingbrüche durch Vibrationen im Zusammenspiel mit Steifigkeits- und Formkerben (Schweißung) begünstigte.*

© AxoPhysmo GmbH
Nur für Lehrzwecke
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Das Ölsystem: Ölfeuer

Ölfeuer können in Maschinen an unterschiedlichen Orten auftreten. Hier das Beispiel eines Triebwerks.

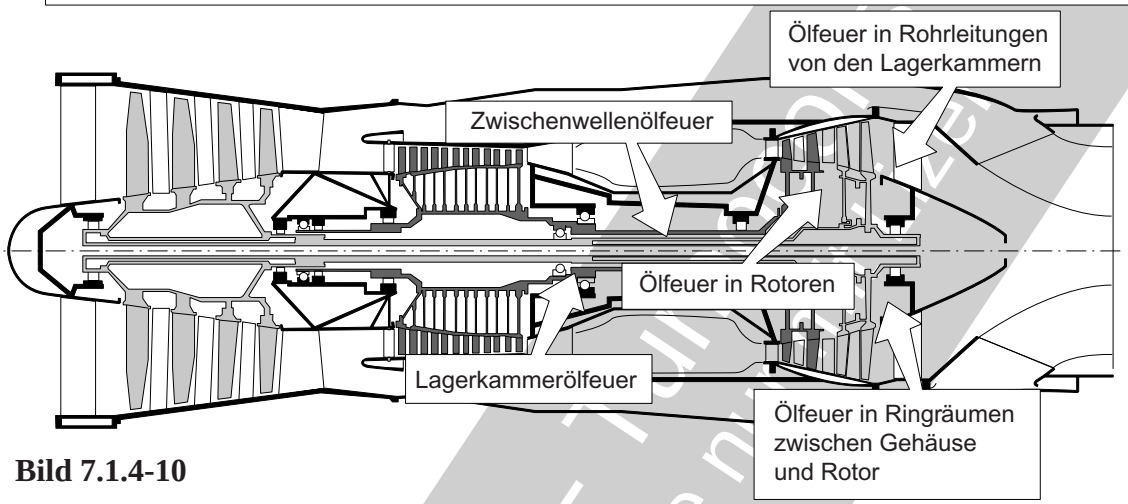


Bild 7.1.4-10

Ölspray aus Lecks von Druckölleitungen ist bei Entzündung besonders gefährlich.

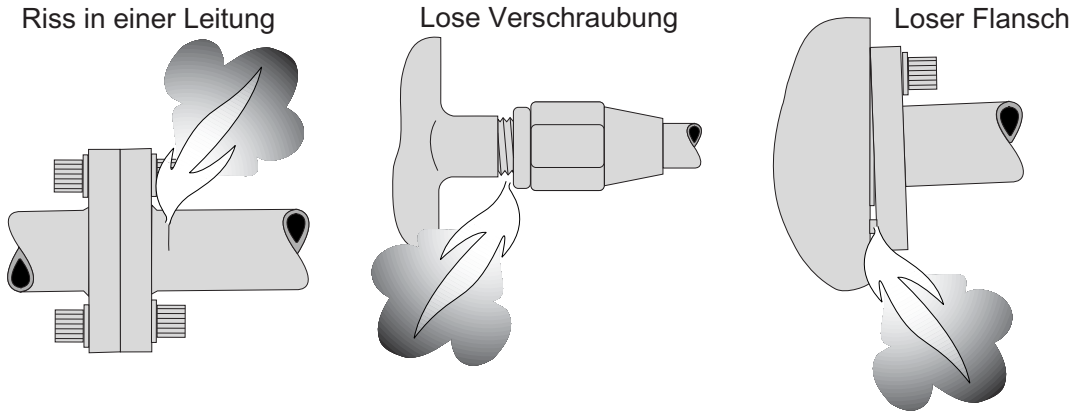


Bild 7.1.4-10: *In einem Triebwerk können* ***Ölfeuer an sehr unterschiedlichen Orten*** *auftreten. Diese sind in erster Linie vom Öl-Luftsystem und dessen Strömungsverhältnissen bzw. Druckunterschieden bestimmt. Bei Versagen von Lagerkammerdichtungen treten Ölfeuer in Rotoren oder Gehäusen auf. Hierzu gehören* ***Ringräume*** *zwischen Gehäuse und Rotor. Der Bruch oder die Überhitzung von Entlüftungs- und Rückölleitungen ermöglicht Ölfeuer in* ***Gehäusestreben*** *und in* ***Rohrleitungen*** *(Bild 7.1.4-9). Dabei kann ein Ölfeuer sich über längere Strecken ausbreiten. Besonders intensive Ölfeuer entstehen aus* ***Ölspray bei Lecks in Druckleitungen*** *(Skizzen unten).*

Gelangt zündfähiges Luft-Ölgemisch zwischen ***Wellen,*** *kann ein Feuer gezündet werden, das sich an Wuchtbunden stabilisiert (Bild 7.1.4-7).*

Hauptorte von Ölfeuern bzw. von deren Ausgang sind ***Lagerkammern*** *(Bild 7.1.4-2). Nicht nur Lagerkammern im Heißteilbereich sind gefährdet, sondern auch solche im vorderen Verdichterbereich, z.B. im Zusammenhang mit einer Lagerüberhitzung bzw. einem Lagerschaden.*

Ölfeuer können in kurzer Zeit zu Übertemperaturen und Überlastung der Bauteile unter normalen mechanischen Betriebsbeanspruchungen führen.

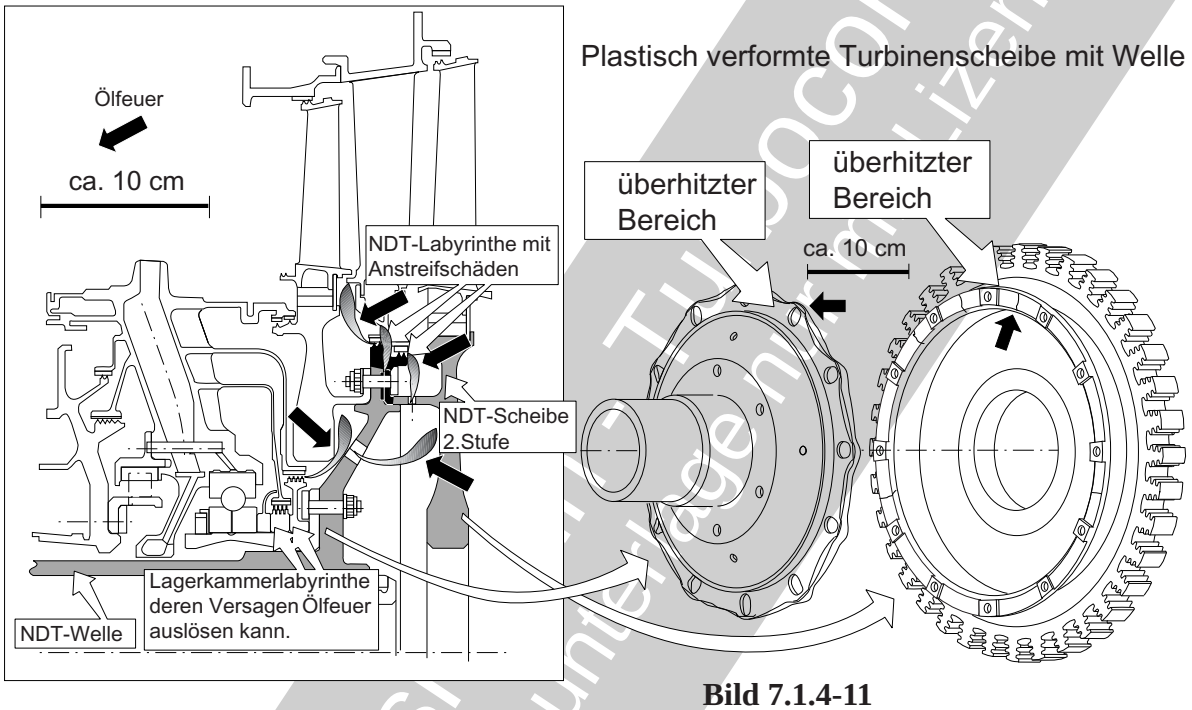


Bild 7.1.4-11

Bild 7.1.4-11: *Typisches Beispiel eines* ***Ölfeuers in einer Niederdruckturbine*** *(Skizze links) nach dem Versagen der Labyrinthdichtungen in der Kammer des Hauptlagers. Gerade in Niederdruckturbinen sind solche Ölfeuer erfahrungsgemäß äußerst gefährlich für die Integrität des Rotors (siehe auch Bild 7.1.4-12). Das Ölfeuer heizte in Minutenschnelle den Wellen-/Scheibenflansch bis zur Erweichung auf. So trat entsprechend der unteren Skizze eine auffallende plastische Verformung ein.*

© AXC Press TU Ilmenau
Ausschnittsunterlagen mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Das Ölsystem: Ölfeuer

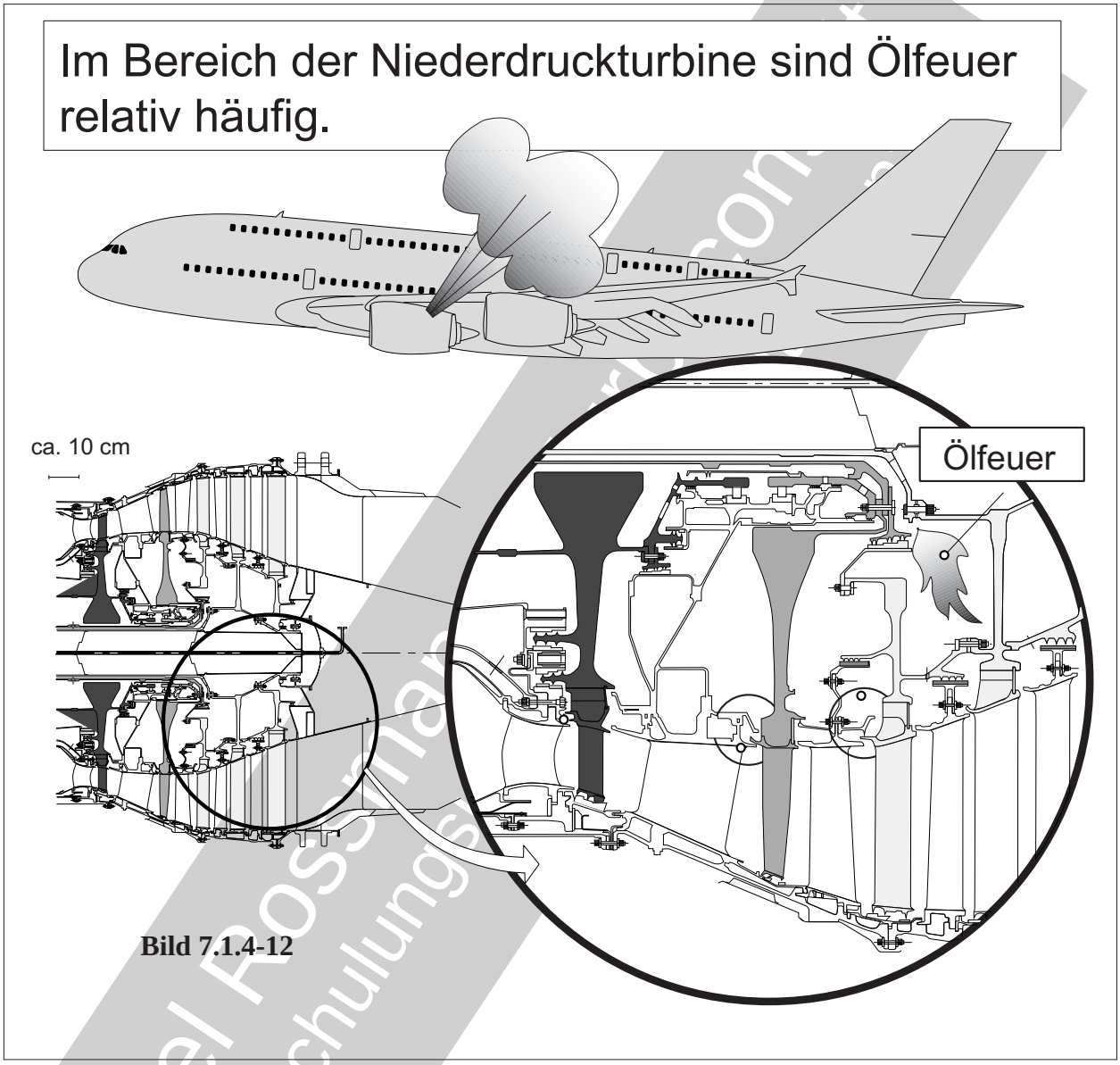


Bild 7.1.4-12

Bild 7.1.4-12 *(Lit 7.1.4-10): Dieses Bild zeigt ein* ***Ölfeuer in einer Niederdruckturbine*** *eines großen Fantriebwerks. Offenbar ist die Niederdruckturbine bei einigen Triebwerkstypen für Ölfeuer empfindlich (siehe auch Beispiel 7.1.4-1)****. Es entsteht die Gefahr von Scheibenplatzern und Scheibenaufweitung mit dem Abwerfen der gesamten Beschaufelung.***

Ein ähnlicher, spektakulärer Schaden wurde an einem 'vierstrahligen' Großraumflugzeug in der Startphase bekannt.

© Axel Rossmann Luftfahrtschulungen

Abhilfen gegen Ölfeuer:

- Verwendung von möglichst schlecht entzündlichen und schlecht brennbaren Schmierstoffen.

- Ermittlung der ein Ölfeuer beeinflussenden **Daten** (Öldurchsatz, Öleinlasstemperatur, Leckluftrate in den Sumpf, Lagerbelastung, Intensität der Zündquelle usw.) mit Hilfe von (nach Möglichkeit durch Messungen gestützten) Computerrechnungen, um Bedingungen sicherzustellen die ein Feuer ausschließen (Bild 7.1.4-4 und Bild 7.1.4-5).

- Die **Temperaturen** des Öl/Luftgemischs müssen überall in der Lagerkammer **unter der Zündtemperatur** gehalten werden (Lit 7.1.4-5).

- Verwendung eines **Ölkühlers** im Bypasskanal (Bild 7.1.4-14).

- Ausreichend **niedrige Öleinspritztemperaturen** können das Temperaturniveau in der Lagerkammer soweit absenken, dass keine Brandgefahr besteht. Gelingt mit Vorrichtungen wie z.B. Wärmetauschern ein geeignetes **Wärmemanagement**, kann die Öl-Einlasstemperatur auf einem ausreichend niedrigen Niveau gehalten werden, sodass die Temperatur des Öldampfs unter den Flammpunkt absinkt (Lit. 7.1.4-5).

- Absenkung der Lagerkammertemperaturen durch höheren **Öldurchsatz** (Bild 7.1.4-5).

- Da schwer zu gewährleisten ist, dass immer ein zu fettes Öl/Luft Gemisch für eine Verbrennung vorliegt, sollte die Auslegung auf ein für eine Verbrennung zu **mageres Gemisch** abzielen (Lit. 7.1.4-5).

- Gewährleisten, dass kein **Heißgaseinbruch** in das Ölsystem erfolgt oder Öldampf aus der Lagerkammer entweicht. Dies lässt sich mit der Optimierung des **Lagerkammerdrucks** über das Entlüftungssystem erreichen (Bild 7.1.4-7).

- Kein **Wechsel zu Ölen** oder **Mischen mit Ölen** die nicht für das Triebwerk als unbedenklich nachgewiesen wurden.

- Keine **Dichtungsbeläge** die zu gefährlichen Aufheizvorgängen beim Anstreifen oder zu Fun kenflug neigen.

- Abgestimmte Temperaturen, Drücke und Durchflussmengen der **Kühl- und Sperrluft**.

- Geeignete **thermische Isolation** der Lagerkammer.

- Bruch- und risssichere **Zuführungsleitungen** (siehe Bild 7.1.4-9).

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Das Ölsystem: Ölfeuer

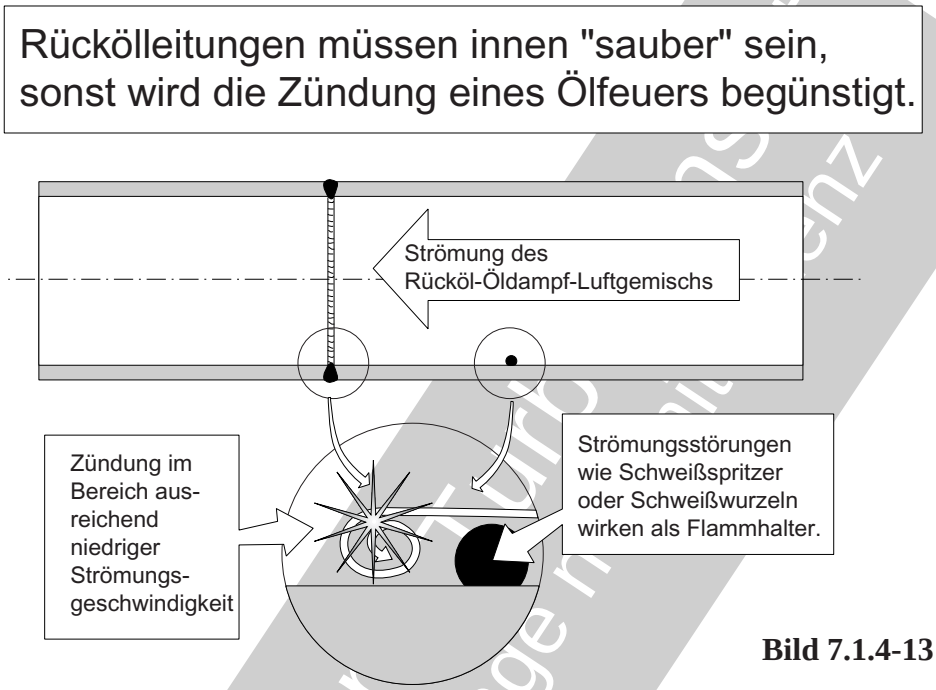


Bild 7.1.4-13

Bild 7.1.4-13: *Üblicherweise ist die* ***Geschwindigkeit der Öl-Öldampf-Luft-Strömung*** *in der Rückölleitung höher als die Fortschrittsgeschwindigkeit der Flamme eines Ölfeuers. Damit kommt es nicht zur* ***Zündung eines Feuers****, die Flamme wird weggeblasen. Sind jedoch in der* ***Rückölleitung*** *ausreichend große Strömungsstörungen wie* ***Schweißspritzer oder Schweißnahtwurzeln*** *vorhanden, können diese über die Verwirbelung als Flammhalter wirken und ein Ölfeuer zünden. Dies stabilisiert sich an den Störungen .*

Bild 7.1.4-14: *Häufig haben Ölfeuer ihre Ursache in einer* ***Lagerkammer****. Dabei geht es um den Austritt von Öl/Öldampf. Ist der Grund eine* ***Überlastung der Dichtungen*** *infolge* ***zu hohen Lagerkammerdrucks,*** *hat sich in diesem Fall (Bild 7.1.4-7) die* ***Optimierung der Austrittsöffnungen in den Entlüftungsleitungen*** *(engl. vent trimming) bewährt.*

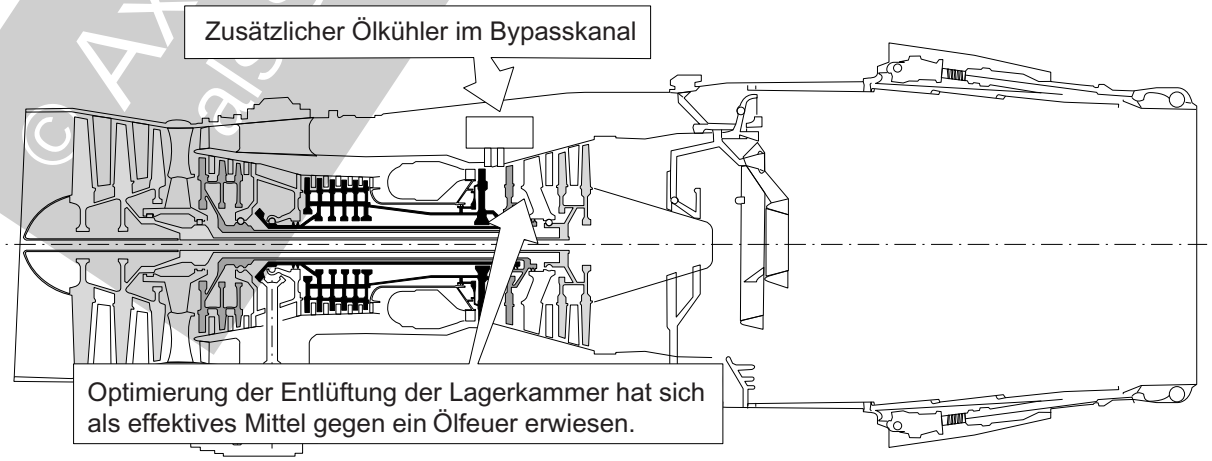


Bild 7.1.4-14

© Axel Rossmann Turbomaschinen als Schulungsunterlage nur zur Information

Literatur zu Kapitel 7.1.4

7.1.4-1 J.Auger, „Les Risques Affectant la Resistance Structurale et la Securité des Propulseurs Modernes“, Proceedings AGARD-CP-215, der AGARD Conference „Power Plant Reliability“, Seite 6-1 bis 6-14.

7.1.4-2 NTSB Identification CHI86IA034, microfiche 30398A, 1985.

7.1.4-3 NTSB Identification LAX96IA087, 1996.

7.1.4-4 E.W. Doherty, „Lubricant Experience and Duties in a Civil Supersonic Gas Turbine Engine“, Proceedings AGARD-CP-84-71 der AGARD Conference „Aircraft Fuels, Lubricants, and Fire Safety“, 1984, Seite 30-1 bis 30-12.

7.1.4-5 W.R. Loomis, „Aircraft Engine Sump-Fire Studies“, ca. 1974, Seite 443-456.

7.1.4-6 J.W. Rosenlieb, „Aircraft Engine Sump Fire Mitigation“, Bericht NASA CR-121158, SKF AL73T007, 1973, Seite 1-59.

7.1.4-7 „GE Tests Sump Cracking Fix“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology, July 10, 1972, Seite 25.

7.1.4-8 „CF6-6D Inspection Frequency Increased“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, August 7, 1972, Seite 23.

7.1.4-9 „GE, Airline Users Press Fixes for CF6“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, September 11, 1972, Seite 28 und 29.

7.1.4-10 E.H. Phillips, „CF6 Engine Incidents Prompt NTSB Inquiry“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, July 20, 1998, Seite 39.

7.1.4-11 E.A. Witmer, T.R. Stagliano, J.J.A. Rodal, „Engine Rotor Burst Containment/Control Studies“, AGARD-CP-248, 1978, Seite 15-15 Fig. 9.

7.1.4-12 Civil Aviation Savety Authority (of Australia), Civil Aviation Regulations 1998, Part 39-106, Airworthiness Directive AD/CF34/7, No.5 Bearing Rotating Air Seal, 10/2002 DM.

7.1.4-13 G. Fischbach, “916 Deutsche F-104 Starfighter, ihre Bau- und Lebensgeschichten“, Seite 216.

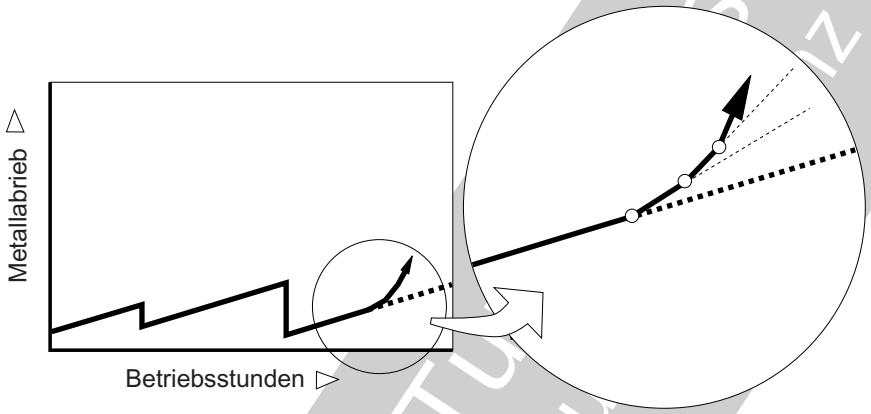
7.1.4-14 G. Fischbach, “916 Deutsche F-104 Starfighter, ihre Bau- und Lebensgeschichten“, Seite 304.

7.1.4-15 AAIB Bulletin No: 4/99 Ref: EW/A97/5/1 Category: 1.1, „Mc. Donnell Douglas DC-10-30 Incident 11 May 1997“, Seite 1-12.

7.1.4-16 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 2 2001, ISBN 3-00-008429-0, Kapitel 9.2

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

7.2 Überwachung des Öls und damit des Ölsystems



Das **Schadenspotenzial von Verunreinigungen im Öl** macht eine **Kontrolle und/oder Überwachung** notwendig. Dabei geht es um mehrere Aufgaben:

- Erkennen gefährlicher **Mengen** von **Verunreinigungen** (Kapitel 7.1.3.1 und Bild 7.2-14).
- Rechtzeitiges Erkennen beginnender **Schäden** (Bild 7.2-12) .
- Identifikation betroffener **Komponenten** im Ölsystem (Bild 7.1.-4 und Bild 7.2-6).
- Festlegung von **Zwischenprüfungen** des Schmieröls.
- **Risikoabschätzungen** zum Vorgehen.
- **Warnanzeigen** in Anlagensteuerung/ -überwachung/ Cockpit (Bild 7.2-14).
- **Ölwechsel** bei alterungs-/ oxidationsbedingter Ölschädigung (Bild 7.1-3, 7.1.2-1 und 7.2-1).

Die Überwachung kann auf unterschiedliche Weise erfolgen (Bild 7.2-2.1):

- Bei **Sammlern** (**Magnetstopfen,** engl. magnet plug, Bild 7.1.3.1-4 und 7.2-8) werden lediglich die **angelagerten Späne** begutachtet und untersucht. **Magnetsonden** (Detektoren) dienen der **kontinuierlichen Überwachung** und melden auf elektrischem Weg die Überbrückung eines Spalts zwischen den Polen durch magnetische Ablagerungen an ein Warninstrument (Bild 7.2-7).
- Begutachtung und Untersuchung von **Filter- und Siebrückständen**. Zum Ölfilterwechsel, der entsprechend den **Wartungsvorschriften** in **regelmäßigen Abständen** durchgeführt wird, gehört auch eine Überprüfung der Rückstände im ausgebauten Filter. Gegebenenfalls erfolgt entsprechend der Wartungsvorschriften eine **Untersuchung und Begutachtung** (Bild 7.2-4.1.1, 7.2.4-1.2, 7.2-4, 7.2-9 und 7.1.3.1-2).
- Untersuchung von **Ölproben**. Diese werden entsprechend den Angaben im Wartungshandbuch dem Ölsystem **entnommen** (Bild 7.2-5). Dabei haben Ort, Prozedur und **Behandlung der Proben** genau nach vorliegenden Vorschriften zu erfolgen. Hiervon hängt die Verlässlichkeit und Aussagesicherheit des Untersuchungsergebnisses der Ölprobe entscheidend ab. Bisher ist die Öluntersuchung entsprechend der Intervalle für die Probenentnahme nicht kontinuierlich. Der **Untersuchungsbericht eines Öllabors** muss für den Praktiker verständlich sein. Dazu gehört auch eine Bewertung mit Einschätzung möglicher Risiken, falls dafür Hinweise gefunden wurden (Bild 7.2-4.1.1, 7.2-4.1.2, 7.2-4.2).

In Entwicklung und offenbar im praktischen Einsatz in Flugtriebwerken sind Sonden zur **kontinuierlichen Überwachung des Ölzustands** (ODMs, Bild 7.2-7). Mit ihnen werden sowohl Verunreinigungen (nicht nur magnetische, Bild 7.1.3.1-2 bis Bild 7.1.3.1-5) „on line“ in „real time“ untersucht, als auch das Öl auf bedenkliche Veränderungen überwacht.

© Vogelpoesnem, TU Berlin, Institut für Maschinenelemente und Konstruktionstechnik

© Axel Rossmann - Turboconsult
aus Schulungsunterlagen nur mit Lizenz

Fachbegriffe für die Bewertung eines Schmierölzustands und ihre Bedeutung

Besonders aus der Umweltüberwachung kommen einige **Fachbegriffe** (Bild 7.2-4.1.1, 7.2-4.1.2 und Lit. 7.2-31) die sich auch für Lebensdauer bzw. Wechsel von Schmierölen im Maschinenbau anbieten. Im Folgenden wird versucht, die Erklärungen der Begriffe zu übertragen.

1. Grenzwert beschreibt einen von Vorschriften vorgegebenen Höchstwert. Er ist in der Technik an Nutzung und Vermeidung orientiert.

2. Höchstwert ist ein festgesetzter technisch begründeter Grenzwert. Er hängt vom Wissensstand ab und ist nachfolgenden Wertekategorien zuordenbar.

2.1 Versorgungswerte (Vorsorgewerte) beschreiben Höchstwerte mit Langzeitgültigkeit auf der Basis des Wissensstands.

2.2 Warn- oder Indikatorwerte (Orientierungswerte). Diese Anzeige-Werte sind besser als die Vorsorgewerte fundiert/gesichert und system-/anlagenspezifisch. Sie geben an, dass ein **unnormaler, auch instabiler Zustand** erreicht ist und ermöglichen eine Vorsorge für einen störungsfreien Betrieb. Ein besserer Wissensstand kann nur zum Anstieg der Werte führen. Damit besteht zwar keine erhöhte Gefahr, die Vorsorge sollte jedoch verbessert werden. Besteht eine **Gefährdung** bzw. ein **unakzeptables Risiko** spricht man von einem **Warnwert**.

2.3 Besorgniswerte (Leitwerte oder Eingreifwerte) markieren eine wissenschaftlich begründete Gefahr für die Stabilität eines Systems. Sie sind im Zusammenhang mit der Belastungsdauer zu sehen. Bei deren Überdschreitung ist mit einem Anstieg des Besorgniswerts zu rechnen. Der Besorgniswert kann nur mit nachweislicher Begründung erhöht werden. Ein **Leitwert** ist ein Besorgniswert der zum Handeln auffordert, um die Stabilität eines Systems zu gewährleisten.

2.4 Gefahrenwerte (Prüf- und Maßnahmenwerte) liegen über einem Leitwert und sind wissenschaflich fundierte Höchstwerte, die zu einer Gefährdung des Systems führen. Durch Interpolation aus einem Trend kann von einem Leitwert auf einen Gefahrenwert geschlossen werden. Ein solcher Wert wird als **Prüfwert** bezeichnet. Er bedeutet nur bei ausreichend Praxisbezug Gefahr.

2.5 Vorsorge-Maßnahmewert als Sonderfall dient der Vorsorge ohne unmittelbare Gefährdung. Diese lässt sich der Art nach, jedoch nicht in der Höhe exakt angeben.

Bild 7.2-1 *(Lit. 7.2-3,-4,-5, -9,-13,-24): Die vielfältigen Ursachen und Eigenschaften von* ***Ölverunreinigungen und Ölveränderungen*** *erfordern* ***für Nachweis und Identifikation spezifische Verfahren*** *(Bild 7.2-2 und Bild 7.2-3).*
Häufig benötigen befriedigend sichere Rückschlüsse mehrere Prüfungsmethoden deren Ergebnisse kombiniert werden.

Systeme und Betriebsstoffe: Ölsystem: Ölüberwachung

***Rückschlüsse auf betroffene Bauteile**: Die **Identifikation geschädigter Bauteile** vor dem katastrophalen Versagen, ist von großer Bedeutung. Wichtig ist die Ermittlung der **chemischen Zusammensetzung** der Partikel. Für viele Triebwerkstypen (Lit. 7.2-3) gibt es Aufstellungen, die **Analysenergebnisse den Bauteilen im Ölsystem zuordnen**. So weisen beispielsweise Silberpartikel auf eine Beschichtung von Wälzlagerkäfigen hin. Das Gleiche gilt für Bronzeabrieb. Viele Bauteile wie Wälzlagerringe und Wälzkörper oder Zahnräder bestehen aus ähnlichen gehärteten Stählen. Das macht eine individuelle Zuordnung, allein über die Analyse, schwierig. Leichtmetallspäne weisen auf einen Anstreifvorgang gegen die Wand des Gehäuses eines öldurchflossenen Anbaugeräts (Getriebe, Pumpe, Ventil) hin.*

***Rückschlüsse auf den Schadensmechanismus**: Auskunft kann die **äußere Erscheinung** eines Partikels geben (Bild 7.1.3.1-4). Geeignet sind sowohl optisch-makroskopische (z.B. Binokular) als auch mikroskopische oder elektronenmikroskopische (REM = Rasterelektronenmikroskop, engl. SEM = Scanning Electron Microscopy) Verfahren. Der Fachmann kann aus **Oberflächenmerkmalen** erkennen, ob ein Partikel durch einen **Ermüdungsvorgang** entstand. Typischerweise stammen solche Partikel von **Wälzflächen wie Lagerlaufbahnen oder Zahnflanken**. Feine nadelartige Späne sind eher typisch für **Anstreifvorgänge** (Bild 7.1.3.1-2). Winzige **Kügelchen** sind ein Indiz für **Ermüdungsrissbildung** (Bild 7.1.3.1-5).*

***Rückschlüsse auf Art und Herkunft von Fremdpartikeln** im Öl, die aus verschiedensten Quellen stammen können (Bild 7.1.3.1-2 und Bild 7.1.3.1-4).*

*- **Fertigungsverfahren** wie Kugelstrahlen, Abrasivstrahlen, Zerspanung (Bild 7.1.3.1-5).*

*- **Komponenten außerhalb des Ölsystems** wie Panzerungen von Labyrinthdichtungen, Haare von Bürstendichtungen.*

*- **Wartung und Montage** wie überschüssige Dichtmasse, Staub*

*- Vom Triebwerk **angesaugte Partikel** wie Staub und Salzablagerungen.*

Aussehen (makroskopisch, mikroskopisch), chemische Zusammensetzung, Härte (Bild 7.1.3.1-3) und magnetische Eigenschaften sind auch hier wichtige Merkmale.

***Rückschlüsse auf schädigende Einflüsse**: Es handelt sich um **alterungsbedingte Ölveränderungen** (Säurezahl Bild 7.1-3, Viskosität, Bild 7.1-3, Bild 7.1-5 und Bild 7.1.2-2.1) und **flüssige bzw. gelöste Ölverunreinigungen** wie Wasser (Bild 7.1.3.2.1-1). Ein Beispiel ist die Korrosion von Getriebegehäusen aus Leichtmetall auf der Innenseite.*

***Rückschlüsse auf zeitliche Abläufe und Risiken** sind für Entscheidungen zum **weiteren Vorgehen bzw. der Einleitung von gezielten Maßnahmen** unentbehrlich. Sie ermöglichen eine Abschätzung der Risiken. Der Zeitablauf ergibt sich aus der Veränderung der **Partikelmenge** über den **Kontroll-/Wartungsintervallen**. Die Partikelmenge (Partikelzahl = Particle Count, Bild 7.2-3) kann je nach Art als Magnetstopfenanlagerung, Filterrückstand oder in einer Ölprobe schwebend, ermittelt werden (Bild 7.1.3.2.1-2 und Bild 7.2-3).*

Je mehr Ergebnisse aus voneinander unabhängigen Prüfungen vorliegen, umso höher ist die Erfolgswahrscheinlichkeit / Sicherheit durch Maßnahmen.

*Zeitliche Abläufe sind besonders bei **Ermüdungsvorgängen** wie Ermüdungspittings auf Wälzlagerlaufflächen oder Zahnradflanken von Interesse. Sie sollen **ein rechtzeitiges Eingreifen zulassen**. Auch bei **Verschleißvorgängen** wie **Reibverschleiß** an Vielkeilkupplungen (Bild 6.6.1-1) mit Verbindung zum Ölsystem, besteht die Chance einer rechtzeitigen Erkennung.*

© Vogelsang - Turbocentum
Lehrschulunterlagen - Urmitz

Was Öluntersuchungen aussagen können.

Untersuchungsmethoden an Proben:

Zweck der Untersuchung / Art der Untersuchung, Eigenschaft (Öl / Filterrückstände)	Öl													Bauteilschaden		
		Alterung / Veränderungen					Verunreinigungen									
	Identifikation	Schmier-fähigkeit	Korrosivität	Schäumen	Alterung	Tragfähigkeit	Schmutz	Wasser	Kraftstoff	Koks/ Kohlenstoff	Dichtmittel	Fertigungs-partikel	Schädigende Wirkung	Bauteil	Art / Mechanismus	Phase /zeitl. Ablauf
Optisch/Visuell (Ölprobe, Filterrückstände,Patch Test)		■			■			■	■	■						
Elektrische Leitfähigkeit							■	■								
Magnetische Eigenschaften: Ferrography, Particle Quantifier (PQ-Index)																■
Härtemessung von Partikeln	■											■		■		
Analyse der Elemente: SOAP= Spectrometric Oil Analysis = AES = Atom-Emissions-Spektroskopie	■						■					■				
RFS= Rotrode Filter Spectroscopy RDE= Rotating Disc Electrode ICP= Inductive Coupsled Plasma	■						■					■				
Zündtemperatur									■							
Bestimmung des Wassergehalts		■	■	■	■	■		■		■						
Viskositätsbestimmung (Viskositätsindex VI)					■	■			■							
Bestimmung saurer Substanzen Säurezahl (TAN, NZ)					■		■								■	
Untersuchung mit Säure "Acid Digestion"					■		■								■	
Bestimmung der Partikelzahl "Particle Count" Optische Partikelanalyse (OPA)					■										■	■
REM (SEM)-Untersuchung einzelner Partikel:							■				■	■	■	■	◥	■
Form/Größe												■	■		■	
Oberfläche/Reaktivität																
EDX-Analyse: Chemische Zusammensetzung			■				■						■	■		
Dichte / spezifisches Gewicht: Absetzungsgeschwindigkeit							■			■			■			

Untersuchungsmethoden vor Ort:

Magnetic Chip Detector												■		■	■	■
Magnetic Filter Plug												■		■	■	■
Ferrous Debris Monitor (PQA)												■		■	■	■
Direct Reading Ferrography												■		■	■	■

Bild 7.2-1 Bildbeschreibung vorhergehende Seiten

© Axel Rossmann - Turbocons
Als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Ölsystem: Ölüberwachung

Welche Untersuchungsmethode ist für einen bestimmten Fall am geeignetsten? Hier eine Hilfe:

Verfahren ▽ / Verunreinigung ▷ Prinzip, Anwendung		Bereich der Partikelgröße	Geeignete Partikelart	Proben-entnahme
Instrumentenbasierte Technik auf der Basis von Magnetismus				
Direkt ausgebende Ferrografie (Direct Reading Ferrography = DRF)	Anwendungsabhängig: Trends oder feste Grenzwerte	Zwei Bereiche: 1µm - 3 µm (DS) 5 µm - 100 µm (DL)	Ferromagnetische Partikel: Stähle	Ölprobe
Eisenpartikel Überwachung (PQA Ferrous Debris Monitor, Particle Quantifier)	Anwendungsabhängig: Trends oder feste Grenzwerte	1µm - 1000 µm unter 5 µm leichte Nachweis-verschlechterung	Ferromagnetische Partikel: Stähle	Ölprobe
Spektrometrische Ölanalyse (Spectrometric Oil Analysis)				
Atomemission Ae / AES (Atomic Emission = AE Direct Reading)	Anwendungsabhängig: Auch in Kombination mit Säureextraktion	< 5 µm Darüber schlechtere Nachweisempfindlichkeit	Metalle, besonders Abrieb- und Ermüdungspartikel	Ölprobe
Atomabsorption (Atomic Absorption = AA, Direct Reading)				
Mikroskopische Technik für Magnetstopfenanlagerungen				
Magnetstopfen im Filter (Magnetic Filter Plug)	Visuelle/mikroskopische Untersuchung auf: Dichte, Größe, Form Entstehungsmerkmale	Vergrößerungsabhängig, Partikelart/Eigenschaften, Viskosität und Durchfluss. Typisch: 1µm - 1000 µm	Ferromagnetische Partikel: Stähle	Ausbaubarer Magnetstopfen
Magnetstopfen Partikel Anzeige (Magnetic Chip Detector)	Visuelle/mikroskopische Untersuchung auf: Dichte, Größe, Form Entstehungsmerkmale	Vergrößerungsabhängig, Partikelart/Eigenschaften, Viskosität und Durchfluss. Typisch: 1µm - 1000 µm	Ferromagnetische Partikel: Stähle	Ausbaubarer Magnetstopfen-Einsatz
Mikroskopische Technik für Filterrückstände				
Untersuchung der Ablagerungen aus einer Ölprobe (Patch Test)	Visuelle/mikroskopische Untersuchung auf: Dichte, Größe, Form Entstehungsmerkmale	Abhängig von der Vergrößerung und der Porengröße des Filtermediums	Alle Arten ausfilterbarer Verunreinigungen	Ölprobe
Rotrode Filter (Patch Test)	Trend mehrerer Elemente [ppm]: Kein Standardverfahren	5 µm - 150 µm	Verschleißpartikel und Verunreinigungen	Ölprobe
Säureextraktion (Acid Digestion)	Zusatztest zur Ermittlung der Elementkonzentration löslicher und unlöslicher Ölbestandteile wie Schlamm und Ablagerungen.	Unabhängig von Partikelgröße	Verschleißpartikel und Verunreinigungen	Proben von Öl, Schlamm, Ablagerungen und Filterrückständen
Untersuchung einzelner Partikel (Chip Analysis): Rasterelektronenmikroskop (= REM, engl. SEM)	Zusatztest zur Ermittlung der Elemente von Bestandteilen wie einer Legierung. Besonders geeignet für Schadensanalyse.	Unabhängig von Partikelgröße. < 1µm bis > 32 mm (abhängig vom Gerät).	Verschleißpartikel und Verunreinigungen	Proben von Öl, Schlamm, Ablagerungen und Filterrückständen

Bild 7.2-2.1

Bild 7.2-2.1 *(Lit. 7.3-2 und Lit. 7.3-9): Die Analyse von Verunreinigungen, besonders von Partikeln im Öl, ist von großer Bedeutung für die* ***rechtzeitige Erkennung von Schäden*** *(Bild 7.2-9 und Bild 7.2-4.1). Damit werden* ***gezielte, geeignete Maßnahmen*** *möglich (Bild 7.2-10).*

© Axel Rossmann - Technocrsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Das minimiert Risiken wie Kosten, Zeitverlust und Sicherheitsprobleme. Die Tabelle enthält ***typische Untersuchungsmethoden*** *mit charakteristischen Anwendungsmerkmalen. Im Folgenden werden ausgewählte Verfahren für den Praktiker beschrieben.*

Spektrometrische Ölanalysen *lassen eine schnelle Analyse der* ***chemischen Zusammensetzung*** *auch bei einer größeren Probenzahl, zu. Weil sie* ***bei kleinen Metallpartikeln*** *(Bild 7.2-3) einsetzbar sind, besteht die Möglichkeit der* ***Schadensfrüherkennung****. Typische Beispiele sind Ermüdungs- und Verschleißschäden an Wälzlagern. Diese Früherkennung läuft unter dem Stichwort* ***Spectrometric Oil Analysis Program*** *(SOAP, Lit. 7.2-14, Bild 7.2-6 und Bild 7.2-7).*

Bild 7.2-2.2 *(Lit. 7.2-29): Die* ***Ferrografie*** *setzt das Öl einem magnetischen Feld aus, während es über eine kleine Glasplatte fließt. Diese dient als Probenträger für eine mikroskopische Auswertung. Die so nach Größe/Gewicht und Magnetismus sortierten Partikel ermöglichen dem Fachmann* ***Rückschlüsse auf den Entstehungs-/Schadensmechanismus****. Dazu gehören Abrasion, Fressverschleiß, Anstreifen, Abrasion, Korrosion und verschiedene Formen der Schwingermüdung (Ermüdungsausbrüche).*

Beispielsweise findet man neben anderen magnetischen Verschleiß- und gegebenenfalls Ermüdungspartikeln, kleine ***Kügelchen*** *die unterschiedlichen Schadensmechanismen zuordenbar sind (Bild 7.1.3.1-5, Lit. 7.2-28).*

Bild 7.2-3 *(Lit. 7.2-9):* ***Partikelmenge und Größenverteilung*** *(Particle Count) kann die Analysen zur* ***Beurteilung der Ölreinheit und Risiken*** *ergänzen (Diagramm unten). Beispielsweise lässt sich die* ***Anforderung absichernder Proben*** *begründen (Lit. 7.2-16). Soll die Größenverteilung der Partikel zur Beurteilung ungewöhnlichen* ***Verschleißes/ Partikelanfalls*** *dienen, ist die zeitliche Verteilung im* ***Vergleich zum Normalfall*** *bedeutsam. Den* ***verfahrensspezifischen Nachweisbereich*** *von Partikeln zeigen die Schaubilder oben.*

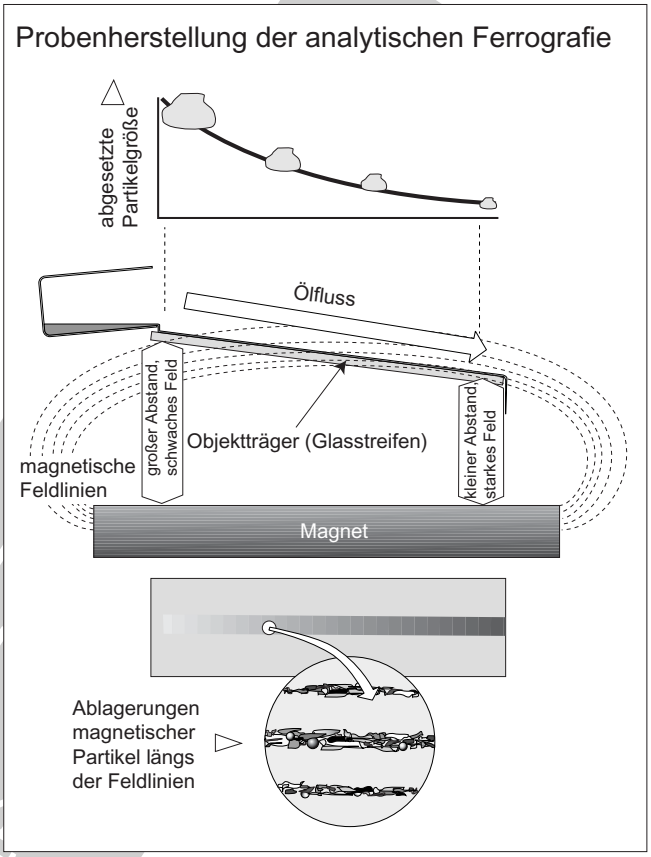


Bild 7.2-2.2

Bild 7.2-4.2 *(Lit. 7.2-30): Die ölgeschmierten Komponenten (Getriebe, Lager) von* ***Windenergieanlagen*** *(WEA) unterliegen höchsten Beanspruchungen. Kommt es zu Schäden, ist mit großen Kosten zu rechnen. Zusätzlich sind die Anlagen einer häufigen Kontrolle durch Fachpersonal vor Ort (Vibrationen, Geräusche, Temperaturen, optische Besonderheiten) standort- und bauartbedingt entzogen (z.B. off shore). Es besteht deshalb ein besonderes Interesse an einer Überwachung in kurzen Intervallen, am besten kontinuierlich. Diese soll ausreichend sicher rechtzeitig Probleme erkennen (****Schadensfrüherkennung****) lassen. Dafür bietet sich die Überwachung des Schmieröls mit Ölanalysen an.* ***Bewertungsstandard*** *(Empfehlungen) sind Angaben des Herstellers der Anlagen bzw. der Komponenten.*

Kennwerte und die zugehörige Ermittlungsmethode *(siehe auch Bild 7.2-2.1 und 7.2-4.1.2):*

© Ayer Pusenger als Sauriyunto

Systeme und Betriebsstoffe: Ölsystem: Ölüberwachung

Die optimale Analysentechnik ist abhängig von der Partikelgröße.

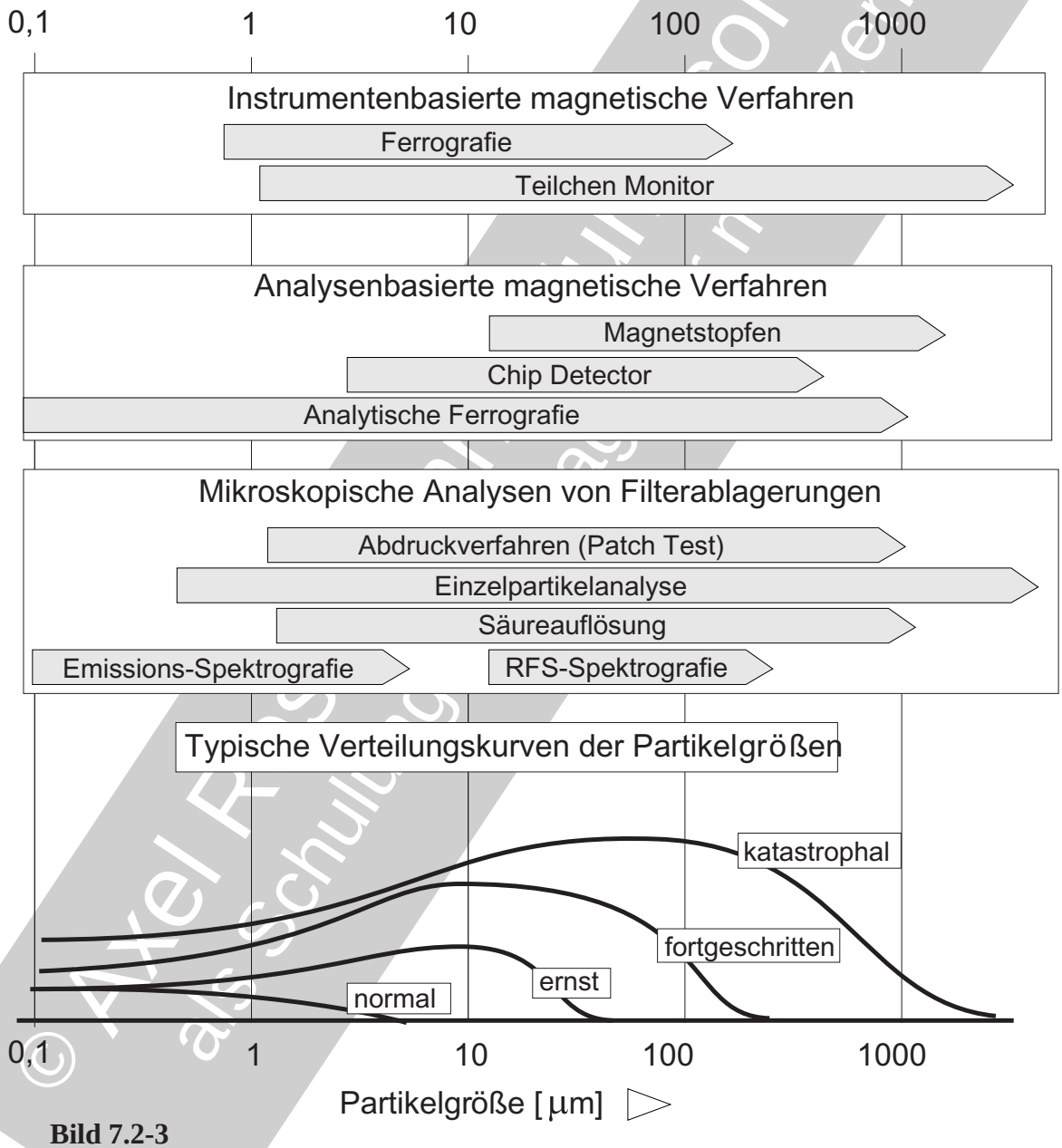


Bild 7.2-3

Atom-Emissions-Spektroskopie *(**AES** = engl. AE) dient der **Identifikation** von bis zu 25 **Metallen** in einem Versuch von wenigen Minuten .Die zwei gebräuchlichsten Verfahren mit gleichem Messprinzip sind Inductive Coupled Plasma (**ICP**) und Rotating Disc Electrode (**RDE**). Partikel müssen jedoch < 2 - 5 µ m sein.*

Ferro Index *und* ***Particle Quantifier*** *(**PQ-Index**): Geeignet für Partikel > 5 µ m. Durch Vergleich der Ergebnisse mit AES können Partikel die typisch sehr kleinen aus korrosivem Verschleiß (Bild 6.3.1.1-12 und Bild 6.3.1.1-13) von den größeren Ermüdungsausbrüchen*

(Ermüdungspittings, Bild 6.3.1.1-4 und Bild 6.4.1-5) unterschieden werden (Bild 7.2-2.2).

***Partikelzählung**, Bestimmung der **Reinheitsklasse** auf Basis der Lebensdauer von Wälzlagern (Bild 6.3.1.1-9). Solche Angaben werden von Versicherungen für Getriebeöle spezifiziert. Sie werden mit Hilfe eines Lasers oder als Schatten auf Filterpapier ermittelt (Bild 7.2-3). Es handelt sich um die Partikelzahl in Größenklassen (drei, > 4 µm, > 6 µm, > 15 µm) pro 100 cm³ Öl. Diese werden den Reinheitsklassen zugeordnet. Unterschieden wird zusätzlich noch Härte (weich, hart) und Form (länglich, rund). Bei Getriebeölen ist eine reproduzierbare Partikelzählung häufig nicht möglich.*

***Feste Fremdstoffe** (Bild 7.1.3.1-2) werden auf einfache Weise durch **Filtration** (0,5 µ - Filter) und mikroskopische Auswertung ermittelt. Leider verhindert dies eine häufig dunkle Verfärbung des Öls.*

***Optische Partikelanalyse (OPA)** bietet sich wegen der Einschränkungen von Partikelzählung, AES und PQ für die Routineüberwachung zur Früherkennung von Getriebeschäden an. Entsprechend dem lichtoptisch erfassten Umriss, lassen sich Form und Größe der Partikel bestimmen und dem Entstehungsmechanismus zuordnen. Die Angaben entsprechen einer Partikelzählung.*

***Untersuchung der Veränderung von Additiven** erfolgt mit AES (**Infra-Rot-Spektroskopie (FT-IR).** Basis ist der Vergleich mit dem Frischöl. Damit gelingt dem Fachmann eine Einschätzung des Abbaus der Additive, einer Ölvermischung, Oxidation und Schlammbildung. Das ermöglicht Rückschlüsse auf Betriebstemperatur und Betriebszeit. Auf Antischaumzusätze (Si-haltig) und **EP-Additive** ('Tribopolymere', Bild 7.1.3.1-5) lässt sich indirekt über Reaktionsprodukte schließen.*

***Viskositätsbestimmung** ist von großer Bedeutung. Die Funktion der Schmierung hängt von einer für die Tragfähigkeit notwendigen Viskosität ab (Bild 7.1-5). Alterung des Öls (Oxidation) kann die Viskosität ansteigen lassen. Einen Abfall der Viskosität bewirken Scherbeanspruchung im Schmierspalt und Vermischung mit anderen Ölen (z.B. anderer Öltyp oder zur Spülung oder als Korrosionsschutz). Die Angabe erfolgt als **Viskositätsindex** (VI) aus den **kinematischen Zähigkeiten** für 40 °C und 100 °C. Für WEA Getriebe typische Werte sind bei Mineralölen ca. 100 und synthetische Öle 150.*

*Ölalterung (Bild 7.1-3) als Wirkung von Betriebstemperatur und Sauerstoffzutritt auf die **Oxidation.** Es entstehen Säuren und Feststoffe, die sich als 'Lack' oder Schlamm ablagern (Bild 7.1.2-1 und Bild 7.1.2-3.1). Auf den Alterungsprozess wirken spezielle **Additive** verzögernd (Anti-Oxidantien). Sie 'entschärfen' die katalytische Wirkung metallischer Verschleißprodukte und neutralisieren saure Oxidationsprodukte des Öls. Dabei verbrauchen sie sich - das **Öl wird 'sauer'**.*

Über das Ausmaß der Oxidation gibt sowohl die TAN/NZ als auch ein Vergleich der FT-IR-Spektroskopie mit Frischöl Auskunft. Das Kennzeichen 'A' in der Angabe steht für die Absorption von Infrarot-Licht einer bestimmten Wellenlänge von einer Ölschichtdicke in Zentimetern.

***Neutralisationszahl** NZ oder TAN (Total Acid Number) steht für den Anteil saurer Ölbestandteile. Sie lässt sich elektrochemisch oder mit einer Farbreaktion bestimmen. Angegeben wird die zur Neutralisation notwendige Laugenmenge. Gerade bei den hochbelasteten Getrieben von WEAs werden Additive genutzt. So lassen sich Korrosion durch Ölversauerung und Verschleiß (EP-Addituve) bei Langzeitbetrieb minimieren. Die Neutralisation des Öls während des Betriebs verbraucht Additive. Die Verschleißminderung beruht auf Oberflächenreaktionen an Gleitflächen die eine Mikroverschweißung verhindern (Fressen,*

© Axel Bossmann - Turbonsult
das Schulungsunterlagenportal

Band 1 Kapitel 5.9.2 und Bild 5.9.3-3). Zusätzlich wird eine Beschleunigung des Alterungsprozesses durch die katalytische Wirkung der metallischen Verschleißprodukte (Kupfer, Bild 7.1.1-2) verhindert.

Bild 7.2-4.1.2 *(Lit. 7.2-30)*
Warn- und Grenzwerte *(Definitionen Seite 7.2-2) für Schmieröl in WEA-Anlagen gehen auf umfangreiche (>10^4) Probenuntersuchungen über Jahre zurück. Sie erhöhen die Wahrscheinlichkeit einer* ***Schadensfrüherkennung*** *und sicherer Ölwechselintervalle. Damit lassen sich die Überwachungskosten durchaus begründen Eine brauchbare Aussage erfordert eine* ***Trendanalyse*** *zum Anstieg der einzelnen Elemente in 1000 Betriebsstunden (Bh) und ein gesichertes Erreichen der* ***Grenzwerte*** *in der Einsatzzeit einer Ölfüllung (z.B. 8000 Bh).Auch bei kleinen* ***Abweichungen vom Trend*** *wird eine erneute Probe gefordert. Bestätigt sich die Abweichung ist vom WEA-OEM oder dem Hersteller des Getriebes eine Bewertung anzufordern.*

Bewertung ***metallischer*** *(Verschleißmetalle)* ***und nichtmetallischer Ölbestandteile*** *(„**A**“) mit AES und PQ (-Index). Sie dient einer Einschätzung des* ***Verschleißfortschritts*** *und kann gegebenenfalls wichtige* ***Hiweise auf die betroffene Komponente*** *ermöglichen (Spalte ‘Ursache’, Bild 7.1-8 und Bild 7.2-4.2). Die (Warn-)Werte der Tabelle gelten für eine Öleinsatzzeit von 8000 Bh mit einem Trend von ca. + 10% in 1000 Bh. Niedrige Warnwerte hängen mit den Gewichtsanteilen (Legierung) im verschleißenden Werkstoff (z.B. Zahnflanken aus niedrig legiertem Stahl) zusammen. Bemerkenswert ist auch der gegenüber einem Planetengetriebe niedrige Warnwert (stärkere Gefährdung) eines Stirnradgetriebes.*

Einfluss des Getriebetyps *(„**B**“): Die Bewertung von Hauptgetriebe, Azimut-(Turm drehen) und Pitchgetriebe (Blattverstellung) sind sowohl wegen Unterschieden in Konstruktion als auch der Betriebsbelastung und herstellerbeeinflussten Eigenschaften spezifisch. Eine wichtige Rolle spielen Unterschiede im Ölsystem (z.B. Filter) sowie Additive des Schmieröls. Die Angaben in der Tabelle fußen auf umfangreichen Efahrungen an mehreren 1000 Ölproben. Sie gelten nur für Stirnrad- und Planeten-***Hauptgetriebe*** *und setzen voraus:*
- ca. 8000 ***Betriebsstunden*** *(Bh) einer Getriebeölmenge von 30 l - 300 l.*
- ***Übertragungsleistung*** *zwischen 80 kW und 1500 kW.*

Grenzwerte einer ***optischen Partikelanalyse*** *(OPA, „**C**“, Bild 7.2-3) beziehen sich auf Getriebetyp (Planeten, Stirnrad) bezogene Reinheitsklasse und Partikel. Der ‘Partikeltyp’ lässt auch auf den Entstehungs-/ Schadensmechanismus der Partikelentstehung rückschließen (Bild 7.1.3.1-1.1, Bild 7.1.3.1-2 und Bild 7.1.3.1-4).*

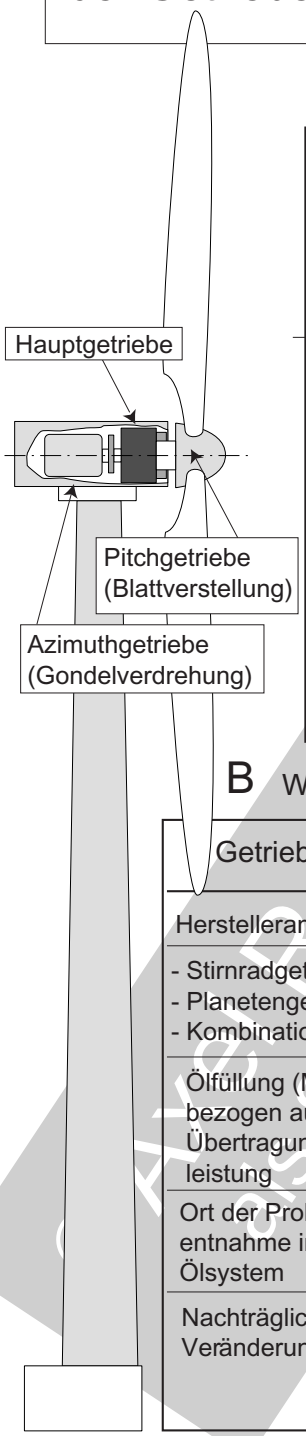
Ölverunreinigungen *(„**D**“) können über die Angaben der Tabelle hinaus auch weitere Ursachen haben, die in den anderen Tabellen zu finden sind. Im vorliegenden Fall handelt es sich um Bestandteile von* ***Hilfs- und Betriebsstoffen*** *(Kapitel 9). Dazu gehören ‘Montagehilfen’ wie Dichtpasten, aber auch Konservierungsöl und Kühlwasser. Eine weitere Quelle sind* ***Umwelteinflüsse*** *(Staub, Luftfeuchtigkeit Kapitel 7.1.3.2.1).*

Der ***Ölzustand*** *(„**E**“) lässt sich im Vergleich mit Frischöl (Veränderungen) mit Hilfe der* ***Vis-***

© Axel Hoßmann - TU Ilmenau
alle Rechte vorbehalten

Warn- und Grenzwerte der Ölüberwachung am Beispiel der Getriebe von Windenergieanlagen (WEA).

nach Lit. 7.2-30



A Metallische und nichtmetallische Ölbestandteile:

Metall	Warn-wert	'Quelle' (Ursache) keine Gewähr für Vollständigkeit
Fe	80 - 120	Zahnräder, Wälzlager, Rohrleitungen (Schweißperlen), Gehäuse
Cr	2 - 3	Wälzlager, Zahnräder, beschichtete Bauteile (Chromschichten)
Zn	9 - 15	Gleitlager, Lötungen, synthetische Öle (Katalysator Rückstände)
Al	10 - 15	Ölpumpe (Gehäuse), Ölkühler, Wälzlager (Käfig), Staub, Schmierfett
Ni	1- 2	Zahnräder, Filter (Nickelschichten)
Cu	20 - 30	Wälzlager (Käfig), Gleitlager (Bronze, Messing), Ölkühler, Schmierpaste
Pb	10 - 15	Gleitlager, Bauteile aus Bleibronze, Schmieröl (EP-Additive)
Mo	40 - 1800	Schmieröl (ölspezifische Additive), Schmierpasten, Zahnräder
PQ-Index	80	**Stirnradgetriebe:** Magnetisierbares Eisen (Verschleiß, Ermüdung, Partikel > 5 µ)
PQ-Index	180	**Planetengetriebe:** Magnetisierbares Eisen (Verschleißpartikel > 5 µ)
Fremd-partikel	< 0,5% Gewicht	Alle Filterrückstände > 0,8 µ

B Warnwerte richten sich nach:

Getriebetyp	Öl
Herstellerangaben	Ölhersteller
- Stirnradgetriebe - Planetengetriebe - Kombinationen	Öltyp - Mineralöl - Synthetisches Öl
Ölfüllung (Menge) bezogen auf die Übertragungs-leistung	Nachfüllung (Menge) bezogen auf die Gesamt-Ölfüllung
Ort der Proben-entnahme im Ölsystem	Einsatzzeit des Öls Gesamtlaufzeit des Getriebes
Nachträgliche Veränderungen	Nachträgliche Zugaben wie Entschäumungs-additive

C Grenzwerte optischer Partikelanalyse

Partikeltyp	An-zahl	Ursache
spanender Verschleiß	25	Staub, Schweißperlen abrasive Metallpartikel
Gleit-verschleiß	85	Additivabbau, EP-Wirkung zu schwach, zu wenig Phosphor
Ermüdungs-verschleiß	110	Ermüdung von Wälz- und Gleitflächen, Wälzlager-laufflächen, Zahnflanken, Öllebensdauer über-schritten.
Reaktions-produkte	ölspe-zifisch 450	unschädliche Tribopolymere bestimmter Getriebeöle.
nicht klassifiziert	50	Schmierfett, Wassertröpf-chen, Luftbläschen, unschädliche Schwebe-stoffe

Bild 7.2-4.1

kosität *(Index VI) und* ***Oxidationsmerkmalen*** *kennzeichnen. Interessant ist, dass sowohl eine hohe Visviskosität als auch eine niedrige bedenklich sein kann. Die Einschätzung erfordert Erfahrung und Fachkunde.*

Additivmetalle *als Warnindikatoren („**F**“). Die angegebenen Metalle können auich vielen an-*

© Axel Rossmann - Turbomaschinen
ausschließlich für Ausbildungszwecke nutzbar

Systeme und Betriebsstoffe: Ölsystem: Ölüberwachung

D Verunreinigungen (Verwechslungsgefahr mit Bestandteilen von Additiven!)

Verunrei-nigung	Warn-wert	'Quelle' (Ursache) keine Gewähr für Vollständigkeit
Si	10 - 15 > 0	Entschäumer, Staub, Silikone (Dichtungsmasse), Pasten
K	2 - 3	Kühlwasser, Salzhaltige Umgebung, Korrosionsschutz
Na	Frischöl + 20 - 30	Salzhaltige Umgebung, Kühlwasser (Undichtigkeit), Konservierungsöl
Wasser	0,1 - 0,14	Kondensation (Schwitzwasser), Kühlwasser (Undichtigkeit)

E Ölzustand (Beurteilung nur im Vergleich mit Frischöl (Veränderung)!)

Zustand	Warn-wert	'Quelle' (Ursache) keine Gewähr für Vollständigkeit
Viskosität bei 40°C	280 - 350	Alterung und Oxidation, Additivabbau, Ölvermischung
Viskosität bei 100°C	Zunahme > 5	Frischölabhängig, Ölvermischung mit anderem Typ
Viskositäts-index	95 - 150	Frischölabhängig, Ölvermischung mit anderem Typ
Oxidation	20 - 35 A/cm	Temperatur und Einsatzzeit, Ölvermischung, Additivreaktion
TAN, NZ	0,9 - 4,2	Additivreaktion und Oxidation. TAN-Anstieg 0,8 - 1,5 (Frischöl-vergleich). Nicht anwendbar für Syntheseöle auf Esterbasis.

F Additivmetalle (Beurteilung nur im Vergleich mit Frischöl (Veränderung)!) Veränderungen im Bereich von +- 10 - 20% tolerierbar.

Additiv-Metall	Warn-wert	'Quelle' (Ursache) keine Gewähr für Vollständigkeit
Ca	ölspezifisch 20 - 200	Additiv, Schmutz (z.B. Kalk), Wasserbestandteile (Kühlwasserleck?), Schmierfett
Mg	ölspezifisch 20 - 2000	Additiv, Ölvermischung, Wasserbestandteil (hartes Wasser, Kühlwasserleck?)
B	25	Wasserbestandteil (Glykol, Kühlwasserleck?), Schmierfett
Zn	ölspezifisch 50 - 2000	EP-Additiv, Montagepasten,Korrosions-Schutzschichten (Verzinkung, Lack), Schmierfett
P	ölspezifisch 150 - 3500	EP-Additiv, Korrosions-Schutzschichten (Phospatschichten), dem Öl zugesetzte Wirkstoffe
Ba	ölspezifisch 40 - 55	Verschleißschutz, Hochtemperaturfett, Ölvermischung mit ATF - Hydrauliköl.

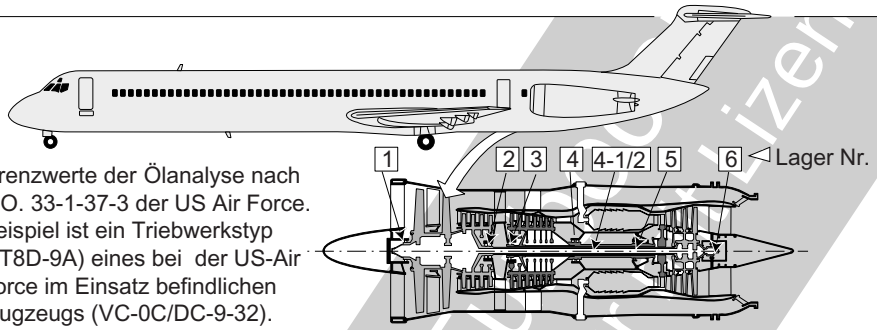
deren Ursprungs sein. Deshalb sind erst Abweichungen über + 10 - 20 % vom Frischöl bemerkenswert. In jedem Fall ist für eine Bewertung Expertise erforderlich.

***Ölreinheitsklassen** haben sich wegen zu vieler Einflüsse als unzuverlässig gezeigt.*

© Axel Rossmann - Turbocoursult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Ölsystem: Ölüberwachung

Spezifikationen, Handbücher und Fachliteratur enthalten Angaben zur Bewertung maschinentypspezifischer Ölverunreinigungen. Hier das Beispiel eines Flugtriebwerks



Grenzwerte der Ölanalyse nach T.O. 33-1-37-3 der US Air Force. Beispiel ist ein Triebwerkstyp (JT8D-9A) eines bei der US-Air Force im Einsatz befindlichen Flugzeugs (VC-0C/DC-9-32).

Bewertung für Maßnahmen / Elemente aus der JOAP-Analyse	Fe	Ag	Al	Cr	Cu	Mg	Ni	Si	Ti
Abnormaler Trend (PPM Anstieg in 10 h)	5	2	2	2	3	3	2	5	3
Normaler Bereich	0-1,5	0-3	0-5	0-3	0-5	0-5	0-3	0-16	0-5
Geringfügiger Bereich "1" (Marginal Range)	16-19	4-6	6-7	4-6	6-7	6-7	4-5	17-24	6-7
Hoher Bereich "2" (High Range)	20-24	7-8	8-9	7-9	8-9	8-9	6-8	25-49	8-9
Abnormal "3" (Abnormal)	25 +	9 +	10 +	10 +	10 +	10 +	9 +	50 +	10 +

"1" Halbierung des Probenintervalls
"2" Wiederhole die Probenentnahme nach jeder Rückkehr zum Heimatflugplatz
"3" Überprüfe Hauptölsiebe und Ölfilter auf Metallverunreinigungen. Wiederhole die Probenentnahme nach jeder Rückkehr zum Heimatflugplatz über einen Zeitraum von 100 Betriebsstunden

Zusammensetzung der Ölverunreinigungen	Mögliche Quellen/Bauteile im Ölkreislauf
Fe	Lager Nr. 1,3,4-1/2, 5 und 6 Rollenlager mit Laufflächen Lager Nr. 3 Abstandsring/Kegelgetriebe zum Getriebegehäuse. Kugellager Nr. 2 und Nr 4 mit Laufbahnen der Getriebezahnräder.
Fe Al	Rückölpumpe der Lager 1 und 6
Fe Cu Ag	Abrieb der Hauptlager, Lager im Anbaugetriebe
Ag Cu	Käfige des Lagers No. 3
Ag Cu Sn	Käfige der Lager No. 1, 2, 4, 4-1/2, 5 und 6
Fe Al Ag Cu	Rückölpumpen der Lager No. 4, 4-1/2 und 5
Fe Al Cr	Hauptölpumpe im Anbaugetriebe
Al Mg	Gehäuse und Anschluss des Anbaugetriebes

Bild 7.2-4.2

Bild 7.2-4.2 *(Lit. 7.2-16): Es ist naheliegend, dass OEMs und/oder Betreiber (z.B. militärisch) für* ***triebwerkstypenspezifische Angaben*** *erstellen. Das kann auch als Beispiel für Ölsysteme von Maschinen/Anlagen, insbesondere Turbomaschinen dienen. Sie enthalten die* ***Werkstoffzusammensetzung von Komponenten*** *des Ölsystems. Damit ist es schneller und sicherer möglich, die jeweiligen* ***ursächlichen Komponenten, mit Partikeln im Öl in Verbindung*** *zu bringen (Beispiel in Tabelle unten, siehe auch Bild 7.1-8). Ein ent-*

©Prof. Bossmann - TU Darmstadt
als Schulungsunterlage nur lizenziert

Systeme und Betriebsstoffe: Ölsystem: Ölüberwachung

sprechendes Programm läuft unter Joint Oil Analysis Program (JOAP) bei Army, Navy und Air Force der U.S-Streitkräfte. In diesem, im Internet zugänglichen Schriftstück (Lit 7.2-16), sind für eine große Zahl Triebwerkstypen, von denen sich viele auch im zivilen Einsatz befinden, ***hilfreiche Angaben*** *zu finden. In der oberen Tabelle werden für einen sehr häufigen älteren Triebwerkstyp von Verkehrsflugzeugen* ***Entscheidungshilfen für absichernde Probenentnahmen*** *gegeben.*

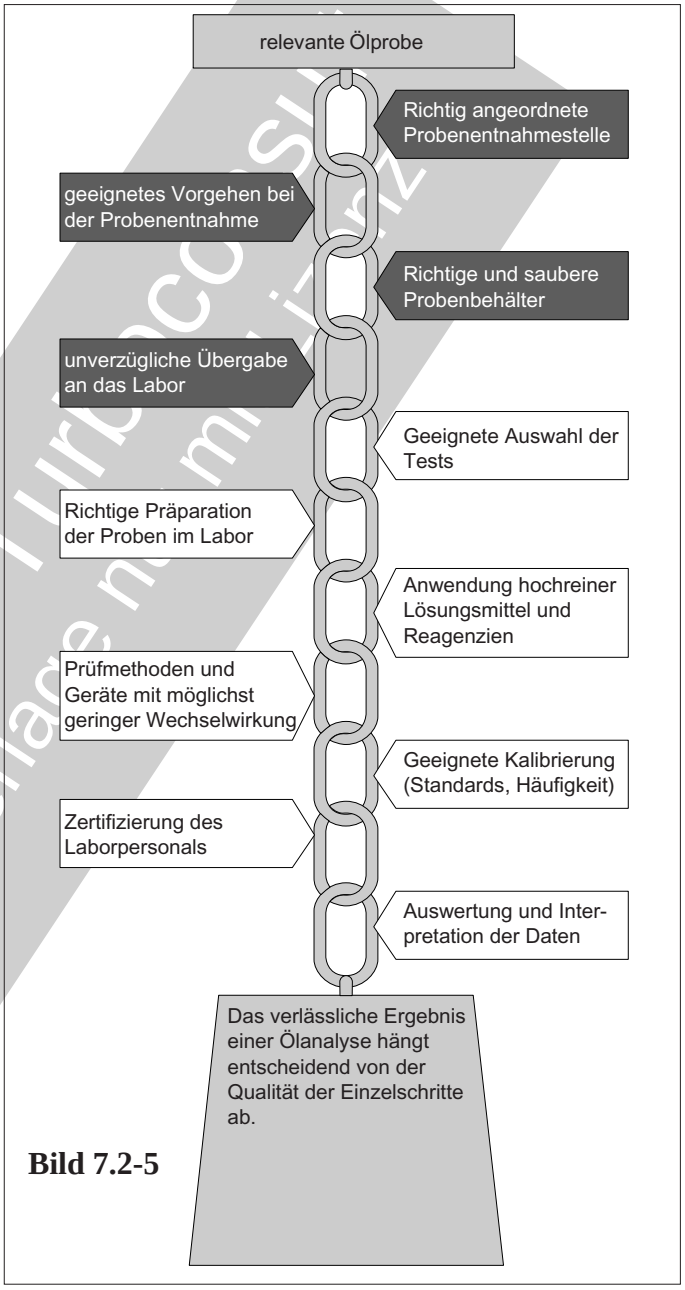


Bild 7.2-5

Bild 7.2-5 *(Lit. 7.2-23): Für Ölanalysen gilt besonders, dass das Ergebnis von der Qualität jedes Einzelschritts abhängt. Das beginnt bereits mit der* ***Probenentnahme****. Grundsätzlich sind die Angaben im* ***Wartungshandbuch*** *strikt zu befolgen, im Zweifelsfall ist der* ***OEM zu konsultieren****. Für den* ***Wartungsbereich*** *gilt (dunkle Felder):*

- Der geeignete ***Entnahmeort*** *ist bereits bei der Triebwerksentwicklung vorzusehen.*
- Vorschriftsmäßige ***Probenentnahme*** *entsprechend den Angaben des Wartungshandbuchs.*
- Saubere ***Ölprobenbehälter*** *verwenden.*
- Schnellstmögliche ***Überstellung*** *der Ölproben zur Untersuchung. Zumindest im festgelegten Zeitraum, muss die Ölprobe das untersuchende Labor erreichen.*

Auch ***für das Labor gelten Grundregeln*** *eines „****Good Housekeeping****“.*
Von Fachleuten wird der Einfluss der angeführten Regeln auf ein brauchbares Untersuchungsergebnis höher eingeschätzt als die ***übliche Geräteungenauigkeit****.*

Bild 7.2-6 *(Lit. 7.3-14): Diese Diagramme zeigen für drei Schadensfälle den zeitlichen Partikelanfall („****Footprint****“) im Schmieröl.*
Beispiel „1“*(Skizze und Diagramm): Es handelt sich um eine* ***Gleitring-Öldichtung*** *(Bild 6.10.2.2-1) einer Lagerkammer eines älteren zivilen Triebwerkstyps. Auf Grund des Verunreinigungstrends dreizehn aufeinanderfolgender Proben, entschloss man sich nach einer* ***SOAP-Empfehlung*** *zum Austausch des Triebwerks. Bei der Zerlegung ergab sich, dass zwei Segmente des* ***Kohledichtrings*** *(Gegenfläche aus Cr-Ni-Stahl?) versagt hatten.*

© Axel Rosemann - Turbocoach
das Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Beispiele für die Veränderung der werkstoffspezifischen Partikelmenge im Öl während sich ein Schaden ausbildet.

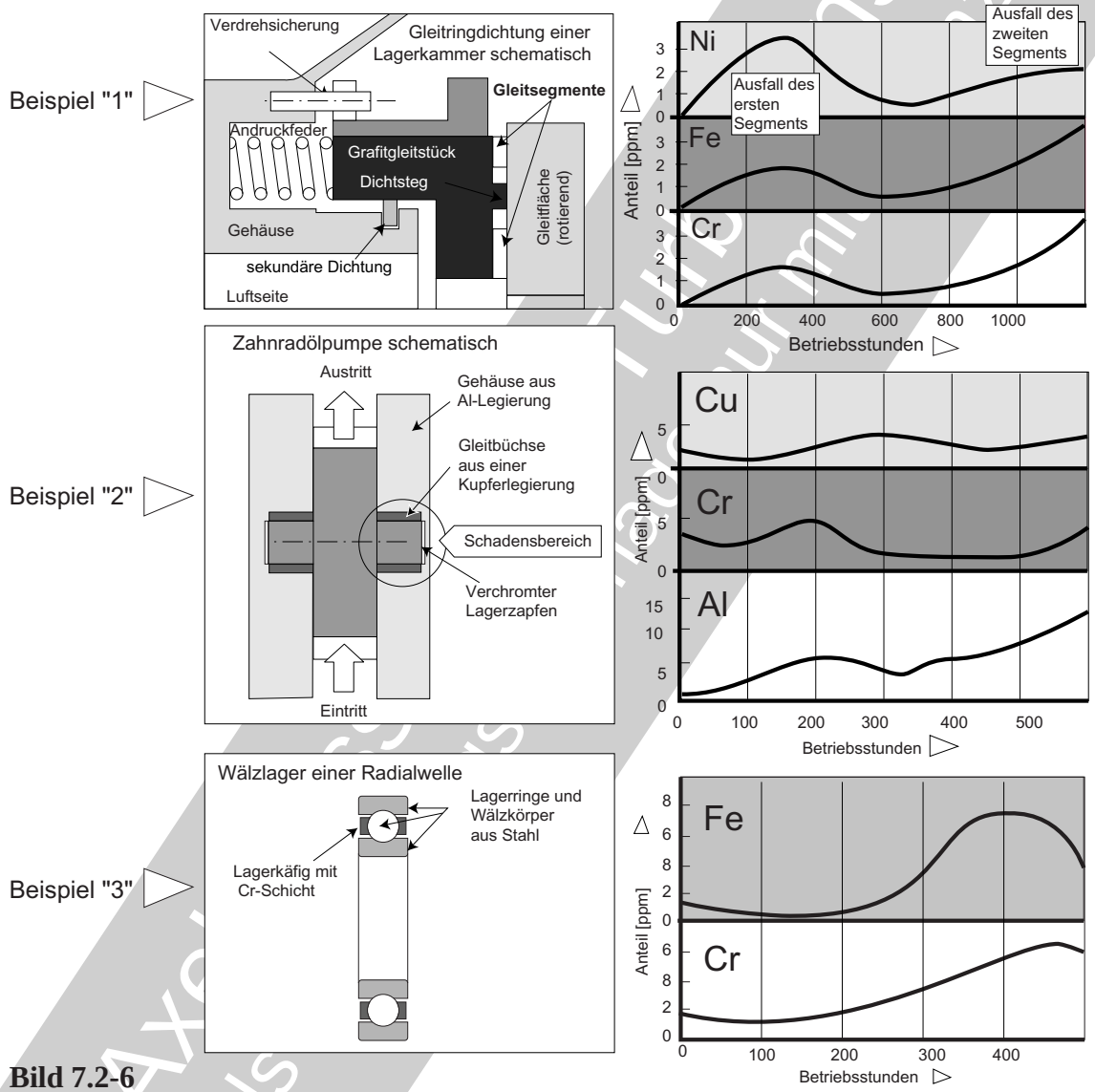


Bild 7.2-6

Beispiel „2“*: An einem älteren zivilen Triebwerkstyp wurde nach diesem Trend die* ***Hauptölpumpe*** *(wie mittleres Beispiel) getauscht. Die Zerlegung der Pumpe ergab stark verschlissene* ***Gleitlager*** *(Cu) der Zahnräder. Die Zahnräder hatten offenbar das* ***Pumpengehäuse*** *ausgefräst (Al). Eine Dichtung auf der verchromten* ***Antriebswelle*** *(Cr) hatte versagt. Das hatte einen Ölverlust von ca. 1 l/h zur Folge.*

Beispiel „3“*: Nach acht aufeinanderfolgenden Ölproben führte dieser „Footprint“ eines älteren zivilen Triebwerkstyps zu Tausch und Demontage. Ursache für den Partikelanfall war ein Schaden des* ***Wälzlagers*** *(Fe und Cr des Lagerstahls) der Radialwelle.*

Bild 7.2-7 *(Lit. 7.2-18, Lit.7.2-20 und Lit. 7.2-27): Es handelt sich um die Überwachung des Öls auf* ***magnetische Partikel****. Zum Einsatz kommt ein* ***kontinuierlich arbeitender****, magnetischer* ***Sensor*** *(Quantitative Debris Monitor*

Systeme und Betriebsstoffe: Ölsystem: Ölüberwachung

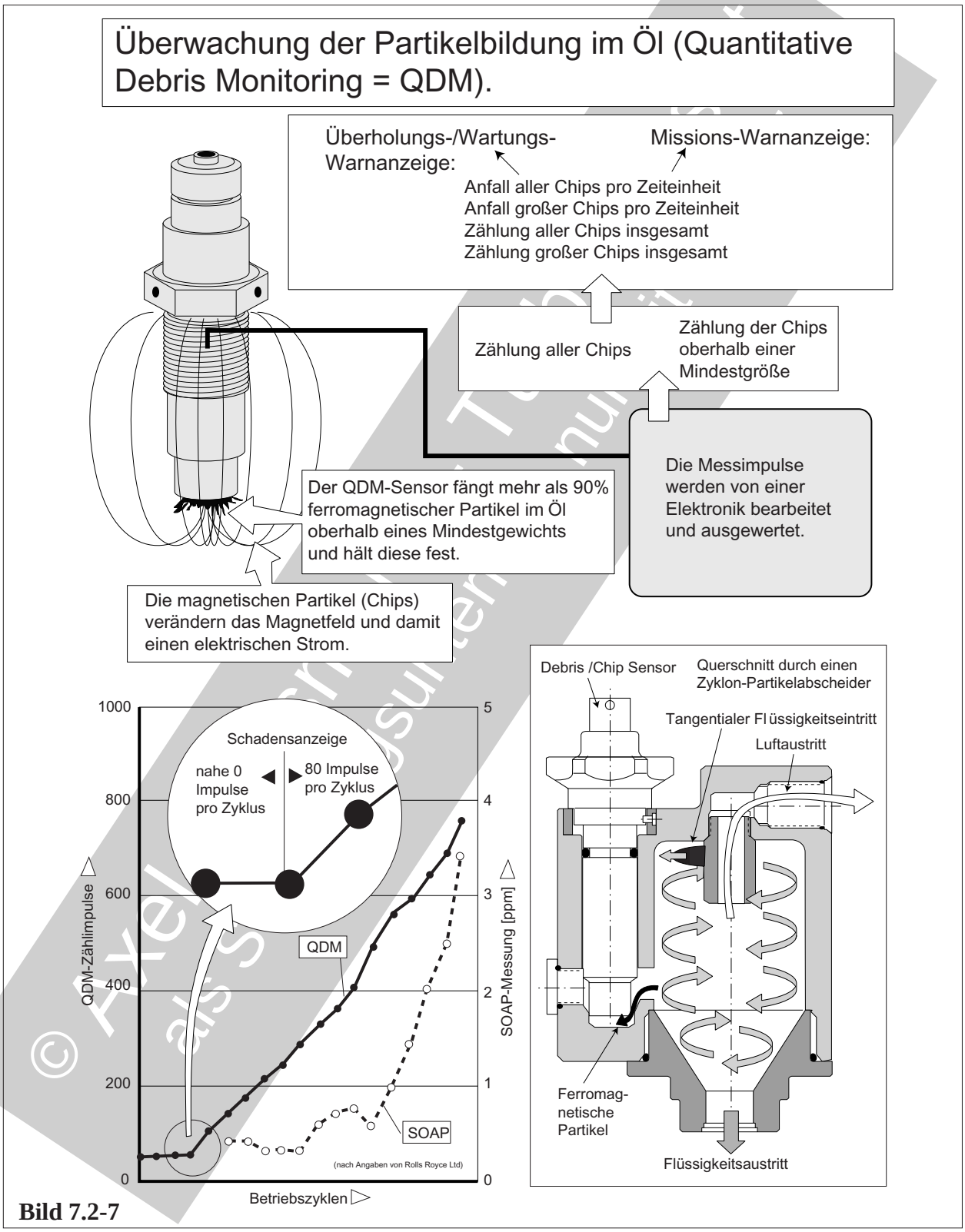


Bild 7.2-7

= **QDM**, *Skizze oben links). Seine Position befindet sich am Fangehäuse direkt hinter der Rückölpumpe. Er kann ein* **Warnsignal in das Cockpit** *geben. Zusätzlich kann er wie ein üblicher Magnetstopfen,* **Partikel abscheiden** *und so für eine Untersuchung* **sammeln**. *Darüber hinaus ist er in der Lage,* **große und kleine Partikel** *(Chips, Bild 7.1.3.1-1.1)* **zu unterscheiden** *und* **getrennt zu zählen**. *Eine* **Warnanzeige** *ist für den Wart* **von außen erkenn-**

***bar**. Die **gut zugängliche Lage des Sensors** am Triebwerk in der Nähe des Öltanks erleichtert die Kontrolle.*
*Für Ausbau und Kontrolle des Stopfens ist der Sensor an günstiger **Position im Ölfilter** angebracht (Detail unten rechts). Der rotierende Ölstrom **zentrifugiert** ausreichend große Partikel. Diese treten durch eine Öffnung und kommen so mit der aktiven Stirnseite des zylindrischen Sensors in Kontakt. Bei Start und Marschflug werden 75 % der Partikel über einer bestimmten Masse auszentrifugiert. Das ist ein Mehrfaches eines üblichen Magnetstopfens der lediglich 25 % erreicht. Während des Ausbaus des Sensors verhindert ein Ventil den Ölaustritt. Das im Diagramm unten links dargestellte Beispiel zeigt einen Vergleich von QDM-Sensor und SOAP-Überwachung. Es handelt sich um die Zunahme von Partikeln des Hauptlagerschadens eines großen zivilen Fantriebwerks. Von Bedeutung ist die **deutlich frühere Erkennbarkeit** des sich entwickelnden Schadens mit dem QDM-Sensor.*
*Natürlich ist eine Frühwarnung nur möglich, wenn **rechtzeitig registrierbare Partikel entstehen**.*
*Das ist bei Ermüdung von Wälzflächen an Lagerlaufbahnen und Zahnflanken der Fall (Bild 6.3.1.1-4 und Bild 6.3.4.1-5). Bei Zahnbrüchen geht jedoch ein **Riss bzw. Bruch häufig von innen** aus (Kapitel 6.4.1). In diesem Fall kann **mit einer Frühwarnung nicht gerechnet** werden. In der Serieneinführung befinden sich sog. **On-Line Diagnostic Sensors** (ODMs) die das Öl auf **magnetische und unmagnetische** metallische Partikel überwachen (Lit. 7.2-40).*

! Magnetstopfenabrieb als Überwachungsmedium.

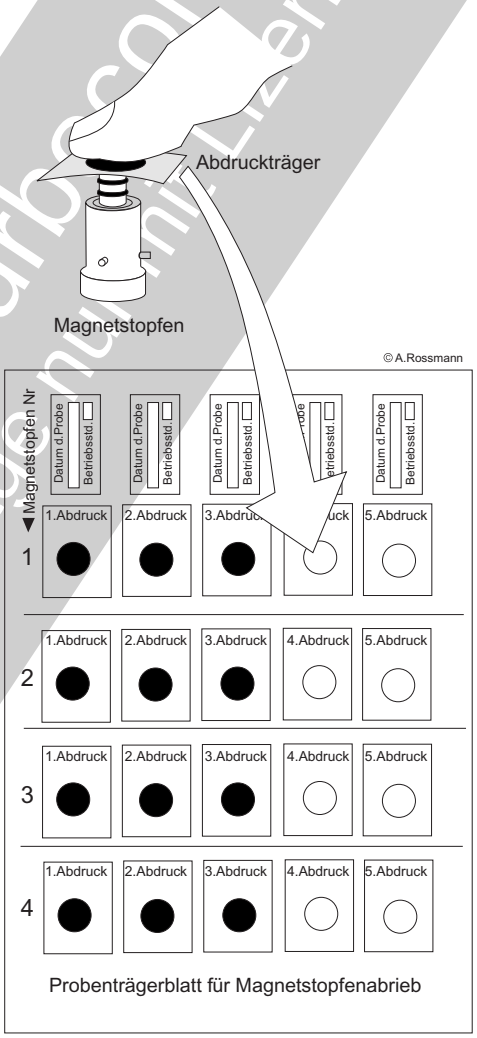


Bild 7.2-8

***Bild 7.2-8** (Lit. 7.2-22): Der am Magnetstopfen gesammelte "Abrieb" besteht aus ferromagnetischen Partikeln. Sie sind unterschiedlichster Herkunft und bilden sich bei verschiedenen Mechanismen (Bild 7.2-2.2). Die Anlagerungen sind nach dem bei Zahnbrüchen **geltenden Maßstab** des OEM zu bewerten (z.B. in Art und Menge). Um das weitere Vorgehen zu klären, ist ein **Entscheidungsbaum,** wie in Bild 7.2-10 beispielhaft dargestellt, vorteilhaft. Die Menge des Abriebs ist häufig nach einer Revision oder Überholung am größten. Meist nimmt sie dann deutlich ab.*
***Ein Wiederanstieg ist,** entsprechend den Herstellerangaben, **aufmerksam zu beobachten**. Hierzu ist eine **Dokumentation**, wie sie das nebenstehende Bild zeigt, hilfreich. Abdrücke von Anlagerungen werden mit einem Spezial--**Klebefilm**, zur Not auch mit einem "Tesafilm*

© A.Rossmann - Turbomott
Abschnittsunterlagen nur mit Lizenz

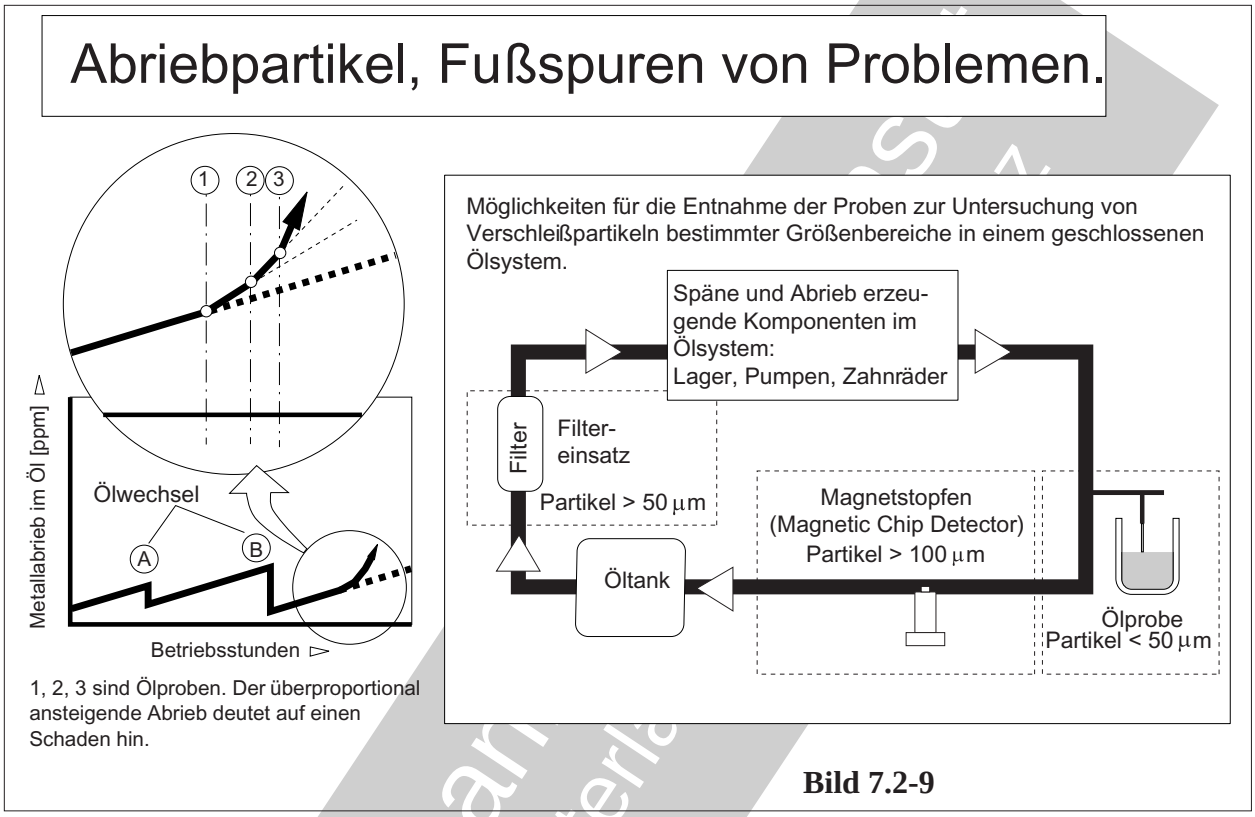


Bild 7.2-9

®", **gesichert**. *Sie werden auf dem* **Blatt mit den notwendigen Vermerken** *wie*
- Datum und
- **Anlass** *der Probenentnahme,*
- **Betriebsstunden**,
- Magnetstopfen **Kennzeichnung** *(wenn mehrere vorhanden sind),*
gesammelt und stehen eventuellen späteren Untersuchungen zur Verfügung. Dieses Blatt mit den Abriebfolien wird der **Dokumentation der Maschine beigelegt**. *Das kann später wichtig werden, wenn ein größerer Schaden die Vermutung nahe legt, dass die Schadensentstehung bereits einige Zeit zurückliegt. So besteht die Chance, auch auf den Ablauf des Schadens* **Rückschlüsse zu ziehen**.

Bild 7.2-9 *(Lit. 7.2-1 und Lit. 7.2-15): Eine* **Ölanalyse kann zur Identifikation und Früherkennung von Problemen** *dienen. Das gilt auch, wenn feine* **Abriebpartikel in den Ölkreislauf** *eingebracht wurden (< 0,001 mm = ca. 1/50 eines Haares!). Sie halten sich als Schwebestoffe im Öl und passieren die Ölfilter. Konzentrationen liegen in millionstel Gewichtsanteilen (ppm). Typische Metalle als Feinstabrieb im Ölkreislauf sind:*
- **Fe** *von Stählen aus Zahnrädern und Lagern,*
- **Ni** *aus Ni-Legierungen von Labyrinthspitzen,*
- **Cr** *von verchromten Dichtungslaufflächen oder aufgechromten Lagersitzen,*
- **Ti** *von Frettingverschleiß zwischen Stahl und Ti-Legierungen (z.B. Lagersitze von Ti-Wellen oder Ti- Gehäusen) und*
- **Cu** *oder* **Messing** *von Lagerkäfigen (Bild 7.1-8). Für die Nutzung dieser* **Überwachungsmöglichkeit** *ist es wichtig, dass* **vom OEM Erfahrungs- und Grenzwerte** *angegeben werden. Die beiden typischen Analyseverfahren sind Atomabsorption und optische Emissionsspektrometrie (Bild 7.2-2.1 und Bild 7.2-3). In beiden Fällen ist* **eine kleine Ölprobe** *erfor-*

© Axel Rossmann
Abschlussunterlagen

derlich. Für eine erfolgreiche Auswertung dieser Verfahren ist der ***Zeitpunkt der Probenentnahmen*** *bzw. die Kenntnis der* ***zugehörigen Betriebsstunden Voraussetzung****. Zu beachten ist, dass Nachfüllen des Öls (****"A"****) und Öltausch (****"B"****) den Kurvenverlauf beeinflusst. Ein plötzlicher Anstieg der Kurve (Probenentnahmen* ***"1","2","3"****) ist besonders aufmerksam zu beobachten. Wenn der Trend nicht wieder normal wird, dürfte sich ein Schaden ankündigen. Filter- (Bild 7.1.3.1-2) und Magnetstopfenablagerungen (Bild 7.1.3.1-4) sind zur sicherereren* ***Identifikation des Problems*** *auszuwerten. Ort und Entnahmeintervall von Ölproben sind triebwerksspezifisch. Von einer* ***vorschriftsmäßigen Probenentnahme*** *(Bild 7.2-5) hängt das Untersuchungsergebnis und seine Verlässlichkeit entscheidend ab. Absichernde Ölproben werden gewöhnlich nach einer* ***Entscheidungssystematik*** *im Wartungshandbuch vorgenommen (Bild 7.2-10). Ein tabellarisches Beispiel zeigt Bild 7.2-4.2).*

Bild 7.2-10 *(Lit. 7.2-16):* ***Ablagerungen an den Magnetstopfen*** *(Bild 7.1.3.1-4) können ähnlich wie die Filterrückstände Auskunft über den Zustand wichtiger Komponenten des Triebwerks geben und/oder den* ***Trend von Problemen*** *aufzeigen. Eine Kombination mit Ölfilteruntersuchungen ist in der Lage, die* ***Aussagesicherheit deutlich zu verbessern****. Bei Magnetstopfensystemen, die unzulässige Ablagerungen elektrisch anzeigen (Bild 7.2-7), ist zuerst das Anzeigesystem auf eine eventuelle Fehlfunktion zu überprüfen (Lit. 7.2-40).*
Je nach Befund der Filter- und der Magnetstopfenablagerungen hilft ein hier als Beispiel dargestellter ***Entscheidungsbaum****.* ***Schwarze Felder*** *zeigen Ergebnisse, die ohne Rücksprache mit dem OEM einen Weiterbetrieb ausschließen.* ***Graue Felder*** *erfordern absichernde Aktionen wie vom OEM in Wartungsanweisungen/Handbuch empfohlen.* ***Weiße Felder*** *können je nach Befund den uneingeschränkten Weiterbetrieb erlauben.*

Mit Hilfe des Befunds der Magnetstopfenablagerungen sind Entscheidungen zu fällen.

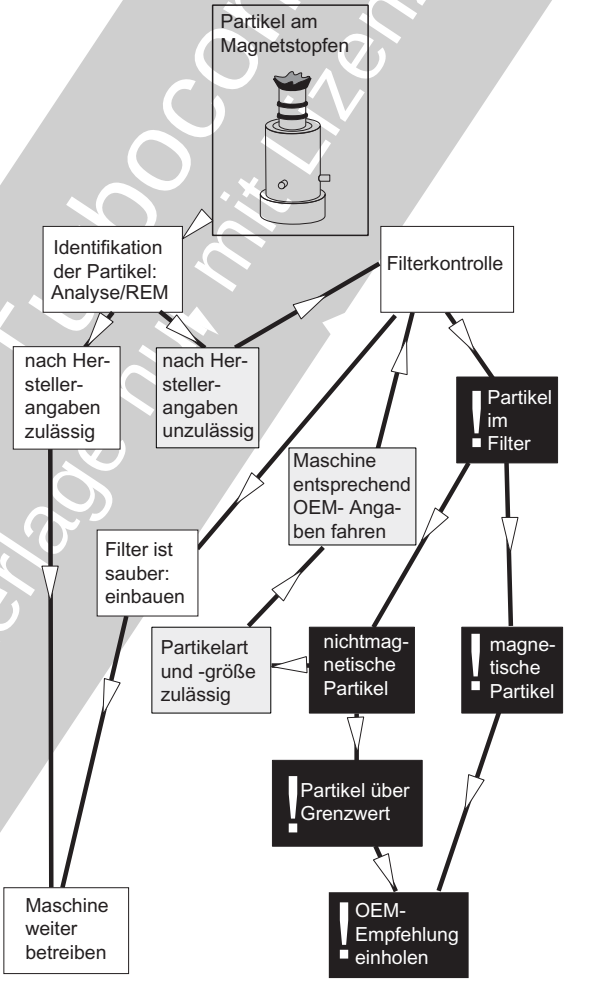


Bild 7.2-10

© Wolfgang Rossmann - Turboconsult
Abschlussunterlage nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Ölsystem: Ölüberwachung

Warum "Magnetic Chip Detectoren" keine Garantie für die rechtzeitige Warnung vor einem Lagerschaden sind.

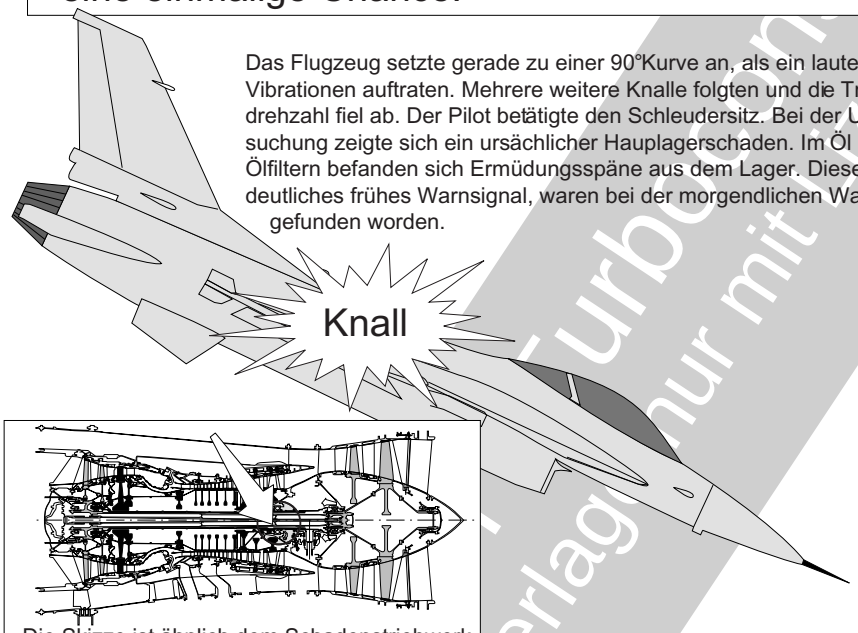
Ursachen	zugehörige Beispiele
- Späne nicht erkannt, Magnetstopfen nicht kontrolliert	Bild 7.2-12
- Falsche Bewertung/Einschätzung der Ablagerungen	Bild 7.2-14 und Bild 7.2-13
- Falsche Einschätzung eines Warnsignals durch Warte und/oder Pilot	Bild 7.2-14
- Keine ausreichend kurzen Prüfintervalle	
- Fehlerhafter Detektor	
- Fehler im elektrischen Übertragungssystem zum Cockpit	
- Ungeeignete Anordnung des Detektors im System	Bild 7.2-13
- Zu schneller Schadensablauf	Bild 7.2-13
- Kein Schadensablauf mit Chip-Entstehung	
- Keine magnetischen Chips	Bild 6.3.1.1-13

Bild 7.2-11

Bild 7.2-11 *(Lit. 7.2-12): Magnetstopfen und Magnet-Chip Sensoren sind, wie andere Sensoren, durchaus* ***nicht absolut zuverlässig*** *(Bild 7.2-12, Bild 7.2-14, Lit. 7.2-40). Dazu lassen sich auch* ***Fehler der Einschätzung von Warnsignalen*** *rechnen.*
In der Tabelle werden typische Fehlerursachen der Magnetstopfenkontrolle Fällen (Bilder) zugeordnet.

© Axel Rossmann - Turbocons
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Offenbar gibt es für die rechtzeitige Erkennung eines Lagerschadens an Spänen in manchen Fällen nur eine einmalige Chance.



Die Skizze ist ähnlich dem Schadenstriebwerk. Betroffenes Lager mit Pfeil gekennzeichnet.

Bild 7.2-12

Bild 7.2-12 *(Lit. 7.2-17):* ***Wartungstechniker*** *dieses Kampfflugzeugs* ***übersahen die Frühwarnung eines Lagerschadens.*** *Der hatte sich offenbar durch* ***Späneanfall im Öl*** *angekündigt. Dabei handelt es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um den* ***Ermüdungsschaden einer Wälzfläche****. Ein solcher Schaden kündigt sich mit steigendem Späneanfall (Ermüdungsausbrüche) an (Bild 7.1.3.1-4). Der Schaden begann mit einem* ***lauten Knall*** *und heftigen* ***Vibrationen*** *des Flugzeugs. Darauf folgten weitere Knalle. Dies lässt auf einen Strömungsabriss (Pumpen) im Verdichter schließen (Lit. 7.2-39). Er kann vom Lagerschaden, der den Rotor abbremst, ausgelöst werden. Es kam zum Absturz.*

Die Untersuchung zeigte, dass ein Hauptlager (Nr. 3, Lage siehe Detail) versagt hatte. In den ***Rückölfiltern*** *befanden sich* ***Späne****. Sie wurden wahrscheinlich bei den Wartungsarbeiten* ***am Morgen vor dem Unfall bei der Filterkontrolle von den Mechanikern übersehen****.*

Bild 7.2-13 *(Lit. 7.2-1 und Lit. 7.2-11): Das Ölsystem des Triebwerks ist mit einem* ***Magnet-Spänedetektor*** *(Magnetic Chip Detector = MCD) im Gehäuse des Propellergetriebes (Reduction Gearbox = RGB, TWK-Skizze) ausgestattet. Es handelt sich um einen Dipolmagneten (Bild 7.2-7). Magnetische Späne aus dem Öl, die den Ringspalt zwischen den Polen überbrücken, zeigen über ein* ***Warnlicht dem Piloten*** *ein Triebwerksproblem an.*

Die Zerlegung des Triebwerks nach dem Unfall ergab einen in mehrere Stücke zerbrochenen Käfig des Kugellagers Nr.1 (Skizze). Damit konnten die Kugeln in das Lagergehäuse austreten. Metallspäne bedeckten die Wand des Geräte-Getriebegehäuses (Accessory Gearbox = AGB). Späne fanden sich auch im Ölfilter und im Propellergetriebe. Sie ***reichten aber nicht aus, um den Sensor zu überbrücken und ein Warnsignal auszulösen****. Weiter zeigten die Flanken der* ***Zahnräder*** *im AGB viele* ***Ermüdungsausbrüche,*** *die offenbar von* ***Kratern örtlicher Überhitzung*** *(elektrische Funkenbildung) ausgingen.*

© Axel Bossmann, Turbomat
ausschließlich Unterlage nur mit Genehmigung

Systeme und Betriebsstoffe: Ölsystem: Ölüberwachung

Ölüberwachung verringert das Risiko von Schäden, und ist deshalb unverzichtbar. Es gibt jedoch Fälle in denen diese Methoden versagen.

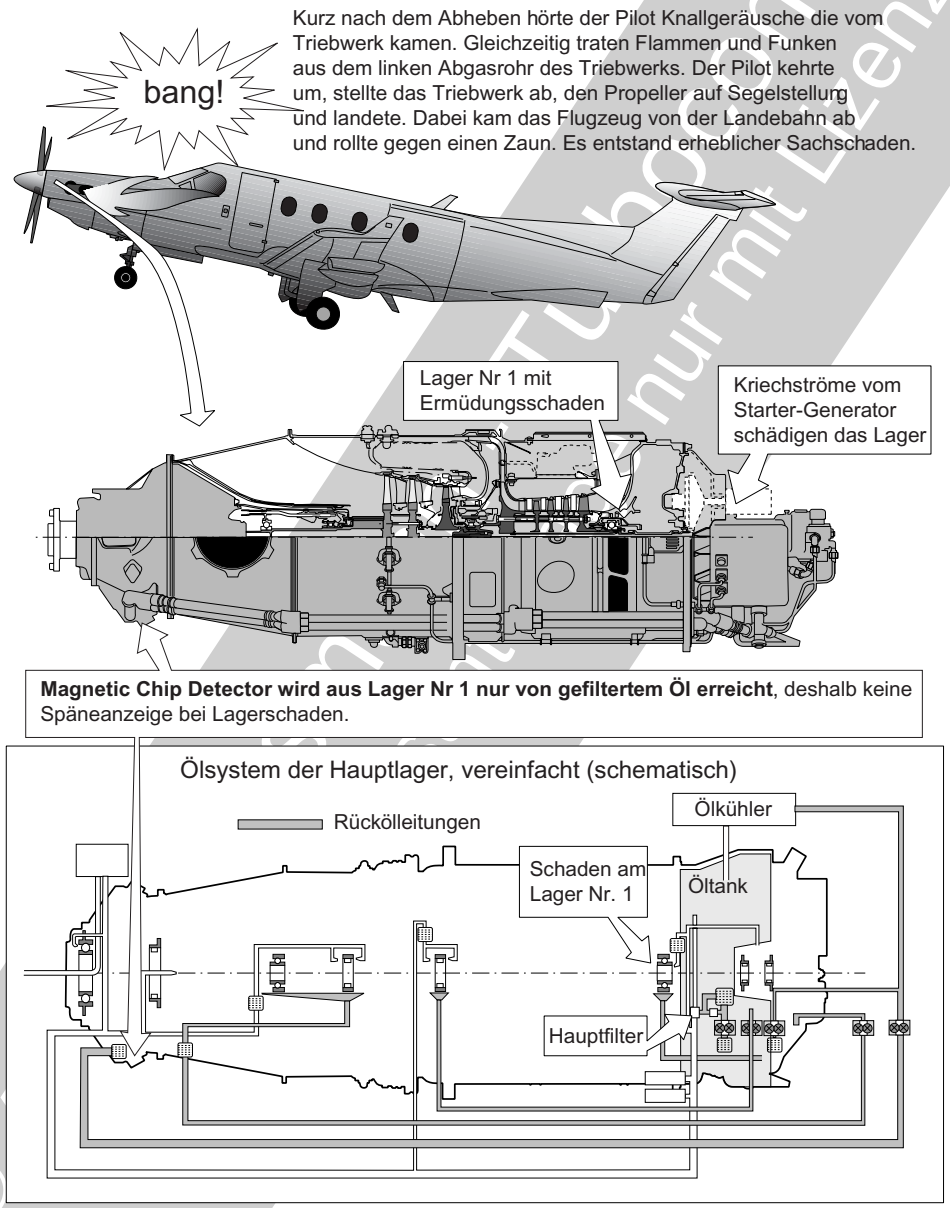


Bild 7.2-13

Eine Recherche ergab, dass ca. 700 Betriebsstunden früher der ***Startergenerator*** *einen Schaden erlitt. Das führte offenbar an den Zahnrädern des Gerätegetriebes zu schädigender* ***Funkenbildung****. Bei der 100h-Inspektion nach dem Generatorschaden wurde die vorgeschriebene* ***Untersuchung*** *(Patchtest)* ***einer Filterprobe*** *nicht vorgenommen. Dabei muss der Filter mit einem Lösungsmittel ausgewaschen werden. Die Waschflüssigkeit wird mit einem kleinen Papierfilter (Patch) von den Partikeln getrennt. Dieser Test zeigt jedes Material an. Er ist also nicht auf magnetische Späne beschränkt.* ***Mit einem solchen Test wurde jedoch nach Angaben des OEM bei diesem Triebwerkstyp noch nie ein beginnender Wälzlagerschaden gefunden****.*

*Eine **spektrometrische Ölanalyse** des SOAP (Bild 7.2-2.1) erfolgte jedoch. Selbst sie zeigte ca. 30 Stunden vor dem Unfall keinen bedenklichen Trend.*
Der OEM erklärte dazu, dass sich beim betroffenen Triebwerkstyp diese Untersuchung bereits als unzuverlässig für beginnende Wälzlagerschäden erwiesen hatte.
*Der **Lagerschaden ließ sich als Folge** des **Späneanfalls der Zahnradschäden** deuten. Für die **ungenügende Anzeige** des MCD wurde folgende plausible Erklärung gefunden:*
*Der MCD überwacht nicht das Rücköl aus der AGB und der Hauptlager. Von der AGB wird das Öl in den Tank zurückgepumpt. Von hier gelangt das Öl **über den Hauptfilter in den Frischölkreislauf**. Dabei werden alle gefährlichen Partikel zurückgehalten. So kann der **im Propellergetriebe vorne angeordnete MCD keine Späne aus der AGB registrieren**. Der Pilot erhält kein Warnsignal.*
Es stellte sich somit heraus, dass die Ölüberwachung mit dem eingebauten MCD-System insbesondere für ein einmotoriges Flugzeug ungeeignet ist.

***Bild 7.2-14** (Lit. 7.3-19): Die **Warnleuchte für die Späne im Öl leuchtete mehrfach auf.** Trotzdem setzte der Pilot nach kurzem Zwischenstop und Überprüfung des Magnetsensors den Flug fort. Kurz darauf kam es zum Triebwerksausfall.*
Nach dem Unfall wurde beim OEM, im Beisein eines Behördenvertreters, das Getriebe und das Lagergehäuse am Verdichtereintritt (Lager Nr. 1) untersucht. Ein Funktionstest mit nachträglicher Inspektion der Komponenten des Getriebes ergab keine Besonderheiten.
*Das Lager Nr. 1 zeigte dagegen **Verschleißschäden an Käfig und Rollen**. Zusätzlich fehlten zwei Käfigstege. Das wurde als Folgeschaden gedeutet. Ein ursächlicher Werkstofffehler oder Mangel im Ölfluss wurde nicht gefunden.*

*Das **Wartungshandbuch** des betroffenen Triebwerkstyps gibt genaue **Anweisungen** wie im Fall einer Anzeige der Chip-Warnleuchte im Cockpit zu verfahren ist. Sinngemäß gilt:*
*Baldmöglichste Inspektion der Magnetchipsensoren. Dabei ist der **Befund** wie folgt zu werten (siehe auch Bild 7.2-10):*
*- Magnetische Partikel (Bild 7.1.3.1-2 und Bild 7.1.3.1-4) wie kleine Bruchstücke (debris), Späne (sliver) sowie Ausbrüche (Chips) sind mögliche **Anzeichen eines Lager- oder Zahnradschadens und/oder für ungewöhnlichen Verschleiß** im Triebwerk.*
*- Ausbrüche oder Abblätterungen (flakes) größer als 0,8 mm oder mehr als vier Späne bei einer Warnanzeige sind **nicht zulässig**. Das Triebwerk ist an eine vom OEM zugelassene Reparaturwerkstatt zu schicken.*
*- Ausbrüche oder Abblätterungen (flakes) **kleiner als 0,8 mm oder weniger als vier Späne** sind bei einer Warnanzeige unter Auflagen **zulässig**. Das gilt auch für feine Ansammlungen von Abrieb (fuzz).*

*Nach dem Wiedereinbau des Magnetsensors sind entsprechend dem Wartungshandbuch (Operation and Maintenance -O&M- Manual) folgende **Aufgaben** durchzuführen:*
*- Nach 30-minütigem **Lauf bei Leistungsabgabe** ohne Warnlichtanzeige ist der Magnetsensor **auf Späneansammlung zu überprüfen**. Wenn das Warnlicht beim Prüflauf aufleuchtet, muss das Triebwerk ausgebaut werden.*
Ist der Befund entsprechend obigen Kriterien zulässig, ist der Sensor zu reinigen und wieder einzubauen. Darauf kann das Triebwerk in den Flugbetrieb genommen werden.
*Leuchtet das Warnlicht in den **nächsten acht Betriebsstunden** wieder auf und zeigt der Magnetsensor Partikelansammlungen ist das **Triebwerk auszubauen**.*

*Zusammengefasste **Schlussfolgerungen**:*

*- Der Triebwerksausfall ist auf einen **Verschleißschaden an Käfig und Rollen** des verdichterseitigen Lagers zurückzuführen.*

© Axel Rossmann - Turbocontrol als Schulungsunterlage nutzen

Systeme und Betriebsstoffe: Ölsystem: Ölüberwachung

Eine Warnanzeige vom "Chip Detector" ist immer ernst zu nehmen. Vor dem Weiterbetrieb ist die Ursache zweifelsfrei festzustellen. Das war vielleicht die letzte Chance.

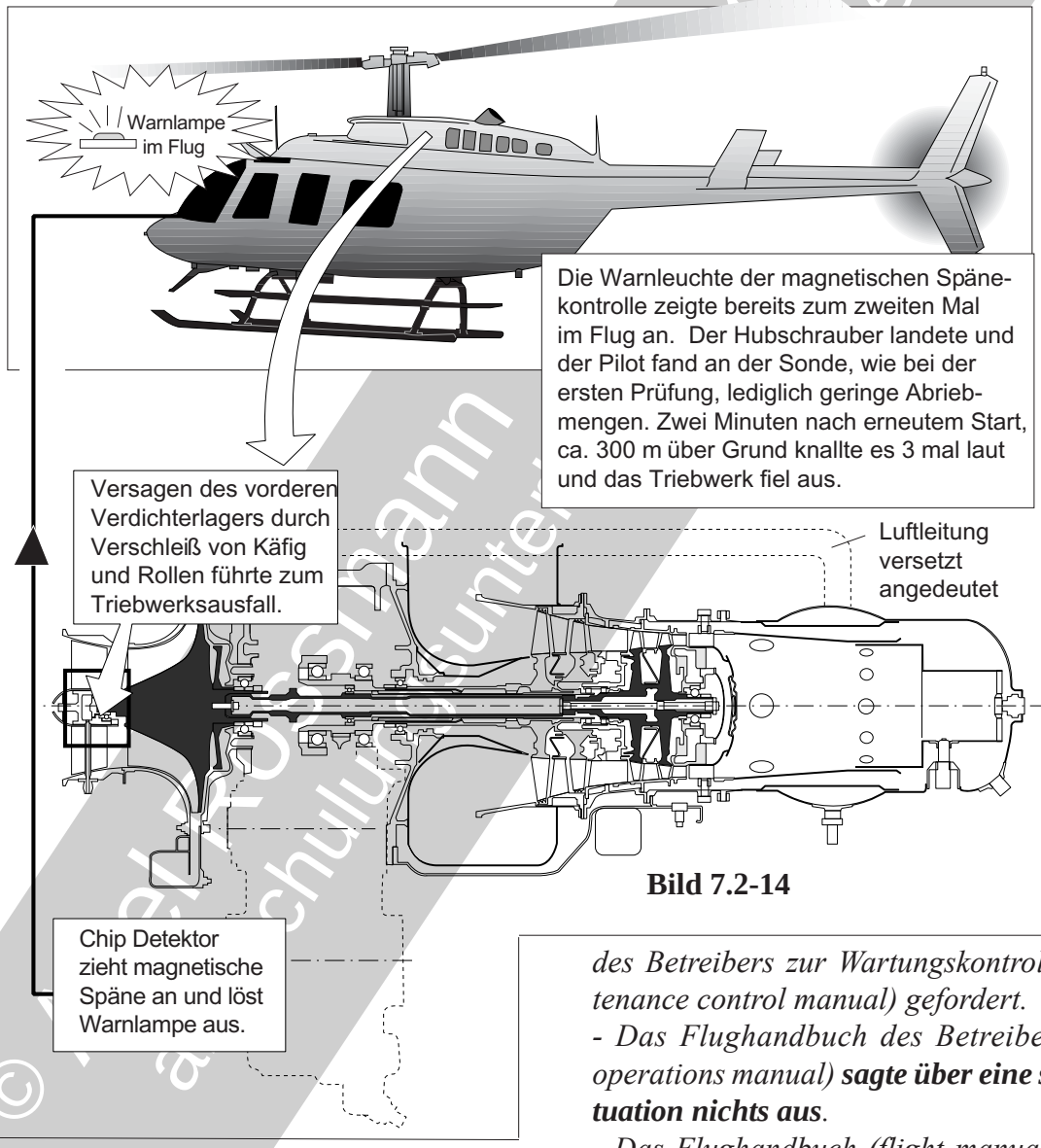


Bild 7.2-14

*- Der **Pilot** stufte das Triebwerk **fälschlicherweise als flugtauglich** ein, obwohl innerhalb weniger Stunden die Warnleuchte zweimal aufleuchtete.*

*- Der **Pilot** war nicht über die Bedeutung wiederholter Warnanzeigen und den vorzunehmenden Prüflauf **unterrichtet**. Er erhielt auch kein formales Training zur **Inspektion des Magnetsensors.** Dies wird aber im Handbuch des Betreibers zur Wartungskontrolle (maintenance control manual) gefordert.*

*- Das Flughandbuch des Betreibers (flight operations manual) **sagte über eine solche Situation nichts aus**.*

*- Das Flughandbuch (flight manual) des betroffenen Hubschraubertyps lässt bei Warnanzeigen die durchzuführenden Maßnahmen als **weniger dringend interpretieren**.*

Literatur zu Kapitel 7.2

7.2-1 M.J.Kroes, T.W.Wild, „Aircraft Powerplants, Seventh Edition“, Verlag : Glencoe/ McGraw-Hill 1990, ISBN 0-02-801874-5, Seite 354, 470.

7.2-2 „Aviation - Analysis Tests“, Fa. Spectro, www.spectro-oil.com, 17.02.2006, Seite 1-5.

7.2-3 J.Fitch, „Oil Analysis Reports - What’s missing in the Comments?“, Zeitschrift „Practicing Oil Analysis Magazine“, July 2004, www.practicingoilanalysis.com, Seite 1-3.

7.2-4 „Oil Analysis Lab. Inc.“, Zeitschrift „Practicing Oil Analysis Magazine“, July 2000, www.practicingoilanalysis.com, Seite 1-3.

7.2-5 J.Evans, „How to Calculate the Effect of Oil Analysis on the Bottom Line.“, Zeitschrift „Practicing Oil Analysis Magazine“, July 2004, www.practicingoilanalysis.com, Seite 1-6.

7.2-6 J.Fitch, „A Much Closer Look at Particle Contamination“, Zeitschrift „Practicing Oil Analysis Magazine“, July 2005, www.practicingoilanalysis.com, Seite 1-5.

7.2-7 M.K.Smith, „Interpreting an Oil Analysis Report- The Top 10 Tips“, Zeitschrift „Practicing Oil Analysis Magazine“, July 2003, www.practicingoilanalysis.com, Seite 1-6.

7.2-8 Dr. R.L.Wright jr., J.A.Pearce, „Sensor Technology Improves Jet Engine Reliability“, Air Force Research Laboratory’s, Document No. PR-00-03, www.afrlhorizons.com, Seite 1-3.

7.2-9 M.Smith, „Oil Analysis vs. Microscopic Analysis: When and Why to Choose“, www.analystinc.com, 15.11.2005, Seite 1-5.

7.2-10 M.Mayworm, „Revitalized Oil Analysis Program Produces Impressive Results“, Zeitschrift „Practicing Oil Analysis Magazine“, July 2004, www.apracticingoilanalysis.com, Seite 1-6.

7.3-11 M.C.Blakey, NTSB, „Safety Recommendation“, Reply to A-03-58bis 61, Accident NYC03FA008, January 7, 2004, Seite 1-6.

7.2-12 Transportation Safety Board of Canada, Airworthiness Notice - B009, Edition 1 - 21, June 1993, „Chip Detectors in Aircraft Engines, APU’s, Transmissions and Reduction Gearboxes“, Seite 1-3.

7.2-13 P.Madhvan, „Engine health assured with oil monitoring system“,Zeitschrift „Aircraft Technology & Maintenance - Engine Yearbook 1999“, Seite 58-61.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

7.2-14 „Tracking Footprints from Engine Oil“, Zeitschrift: „Aviation Engineering & Maintenance Magazin“, 1979, Sept, Seite 30-33.

7.2-15 C.A.Waggoner, „Detection and Diagnosis of Bearing Deterioration in Aircraft Propulsion Systems by Wear Debris Analysis“, Seite 1-13.

7.2-16 „Joint Oil Analysis Program Manual - Volume III - Laboratory Analytical Methodology and Equipmant Criteria (Aeronautical)“, Air Force T.O. 33-1-37-3, Seite A1-A201.

7.2-17 „Technicians missed warnings in F-16 crash“, Zeitschrift „Military Affairs“, No. 14,826, 13. September, 2001, Seite 4.

7.2-18 J.Crowe, P.Higgins, „Lube debris monitoring marches on“,Zeitschrift „Aircraft Technology & Maintenance - Engine Yearbook 1997 - 1998“, Seite 48-52.

7.2-19 Transportation Safety Board of Canada, Aviation Occurrence Report Number A94A0180, „Power Loss Forced Landing“, Universal Helicopters...Long Ranger...15 September 1994“, Seite 1-9.

7.2-20 F.DiPasquale, „Field Experience with Quantitative Debris Monitoring“, Paper No. 871736 der „Aerospace Technology Conference and Exposition“ Long Beach, California, October 5-8. 1987, Seite 1-7.

7.2-21 R.A.Collacott, „On-Condition Maintenance“, UKM Paper Nr. 4152, nach. 1978, Seite 1-14.

7.2-22 H.Brenneke, „Early Failure Detection in Gas Turbine Aero Engines Using Magnetic Plugs“, Zeitschrift „British Journal of Nondestructive Testing“, Vol 31 No 2 February 1989, Seite 87-90.

7.2-23 C.Jones, „More to lube-oil services than meets the eye“, Zeitschrift „Power“, July/ August 1997, Seite 59-60.

7.2-24 M.Duncanson, „Detecting and Controlling Water in Oil“, Exxon Mobil, www.practicingoilanalysis.com, 17.02.2006, Seite 1-9.

7.2-25 R.L.Wright Jr., J.A.Pearce, „Sensor Technology Improves Jet Engine Reliability“, Document PR-00-03, AFRL, www.afrlhorizons.com, Seite 1-3.

7.2-27 „Lubrication System Diagnostics - Introduction“, Firmenveröffentlichung „Engineered Sensors Tedeco Products “,www.tedecoindustrial.com., Seite 1 und 2.

7.2-28 „Where’s the Wear?“, Zeitschrift „Airline Executive“ August 1984, Seite 28,29.

7.2-29 R.Lovicz, R.Dalley, „Wear Particle Analysis - A Predictive Maintenance Tool“, Paper der „Predictive Maintenance Technology Conference“ (PdM-2005), September 19-22, 2005 Atlanta Georgia, www.reliabilityweb.com, Seite 1-18.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

7.2-30 P.Weismann, R.Krethe, C.Heine, „Schadensfrüherkennung und zustandsabhängige Ölwechselintervalle in WEA durch Ölanalysen“, www.windwin.de/images.../wc03032%20Schadensfrüherkennung.pdf, 15 Seiten.

7.2-31 H.H.Dieter, „Grenzwerte, Leitwerte, Orientierungswerte, Maßnahmenwerte - Aktuelle Definitionen und Höchstwerte“, http://www.umweltbundesamt.de, Stand 16.12.2011 Seite 1-9.

7.2-32 T.Kretschmer, „Schmierstoffverhalten im hochbeanspruchten Kontakt“, Haus der Technik 10.06.2010, darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2010/3298, (Folien) Seite 1-40.

7.2-33 W.J.Bartz, „Tribologische Aspekte von Windenergie-Anlagen“, Beitrag an der ‘Technische Akademie Esslingen’, www.swisstribology.ch/documents/bartz.pdf, Folien 1-114.

7.2-34 E.Bauer, „Windenergieanlagen Schadenbetrachtungen“, Beitrag zu ‘Expertentage Windenergieanlagen’, www.windwin.de/.../pdf, Allianz Report 2/2001, Seite 72 - 77.

7.2-35 “Wechselnde Winde stellen Getriebe auf die Probe“, VDI-Nachrichten 05.06.2009, http://www.vdi-nachrichten.com/artikel/.../43523/7, Seite 1 und 2.

7.2-36 „Contamination Management in der Praxis - Von der Bearbeitung bis zur Auslieferung“, Hydac Filtertechnik GmbH, Prospekt D 7.604 0/0403, www.hydac.com/de-de/produkte/...schmierölfilter/.../index.html, Seite 1-49.

7.2-37 „Filterfibel“, Hydac International, Prospekt D 7.011.1/04.11, www.hydac.com/de-de/produkte/...schmierölfilter/.../index.html, Seite 1-52.

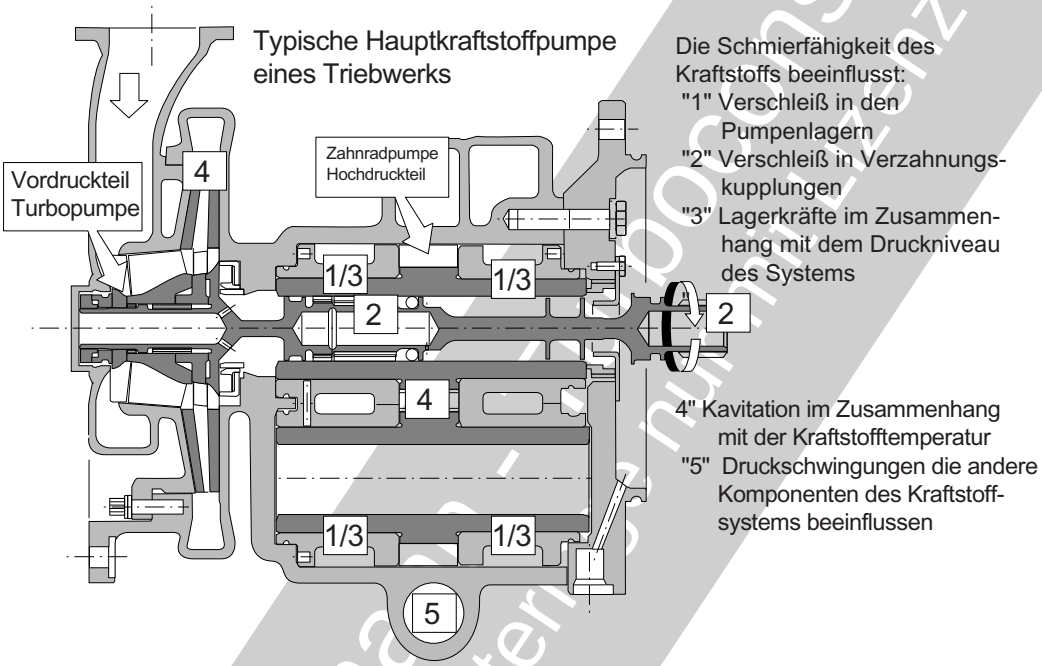
7.2-38 „Fluidcontrolling Kontaminationsfibel“, Hydac Filter Systems GmbH, Prospekt DEF 7.603.5/04.09, www.hydac.com/de-de/produkte/...schmierölfilter/.../index.html, Seite 1-52.

7.2-39 A. Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 3“, 2000, I‘SBN 3-00-017733-7, Kapitel 11.2.1.3

7.2-40 A. Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 5“, 2010, ISBN 978-3-00-034550-0, Kapitel 19.2.1, Kapitel 23.1.1, Kapitel 23.2.1, Kapitel 23.4.2.2 und Kaitel 25.2.1.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

8.1 Kraftstoffbezogene Probleme des Kraftstoffsystems



In der Technik findet man eine Vielzahl **anwendungsspezifischer Kraftstoffe**. Auch die **Anlagen** und ihre **Komponenten** unterscheiden sich. Man denke nur an das **Kraftstoffsystem** einer **Turbomaschine** (z.B. Flugtriebwerk (Bild 8.1-9, Lit. 8.1-25), eines **Kraftwerks** oder im Vergleich dazu die **Hochdruckeinspritzung** (z.B. Commonrail, Bild 8.2-2.1) eines modernen **Fahrzeugmotors**. Dieses Kapitel beschränkt sich auf **flüssige Kraftstoffe**.

- Dieselkraftstoffe
  - erdölbasiert (fossil) für Straßenfahrzeuge.
  - aus regenerativen Ressourcen (‘Biodiesel’/Agro-Diesel),
  - Schweröl für Schiffsdiesel.
- ‘Kerosin’ (für Flugtriebwerke).
- Heizöl für Wohnanlagen,
- Schweröl für Kraftwerke.

Weil dem Autor berufsbedingt insbesondere Kraftstoffprobleme bei Flugtriebwerken zugänglich sind, liegt ein Schwerpunkt der Darstellungen hier.

Der Kraftstoff (Kapitel 8.2) selbst und/oder **Verunreinigungen im Kraftstoff** (Kapitel 8.3) beeinflussen wechselseitig das Kraftstoffsystem (Bild 8.1-1 und Bild 8.1-10) mit seinen Komponenten wie

- Pumpen (Bild oben, Bild 6.4.1-19, Bild 8.1-11und Band 1 Bild 5.5.1.2-0),
- Filter (Bild 8.1-5 und Bild 8.1-20),
- Regler (indirekte Beeinflussung Bild 8.1-1, Bild 8.1-9),
- Ventile (Bild 8.1-17, Bild 8.1-18),

© Dr. Rossmann - Tribocontact
alle Rechte vorbehalten, nur mit Erlaubnis

- Rohrleitungen (Bild 8.1-9, Bild 8.1-18),
- Dichtungen (Bild 8.1-8, Bild 6.10.1.2-12 und Band 1 Bild 5.3.1-5),
- Einspritzdüsen (Dampfbildung, Bild 8.1-13, Bild 8.1-15, Bild 8.1-17 und Bild 8.2-2.1).

Das Eingangsbild zeigt eine mehrstufige **Kraftstoffpumpe mit Turbo- und Zahnrad-komponenten** und **typischen Schädigungen,** die im Zusammenhang mit dem geförderten Kraftstoff stehen können. Sie können zu Fehlfunktionen führen, die ihrerseits Schäden an anderen Triebwerkskomponenten auslösen. Hierzu gehören

- Überhitzungen/Lebensdauerverkürzung von Heißteilen (Bild 8.1-2, Bild 8.1-4):
  - Brennkammerschäden (Bild 8.1-3, Bild 8.1-4, Viskosität und Flüchtigkeit, Bild 8.2-4).
  - Überhitzung der Turbinenbeschaufelung (Bild 8.1-17 und Bild 8.1-18).
- Explosionsartiges Versagen des Brennkammermantels (Lit. 8.1-23).
- Schwingbrüche an Rohrleitungen (Bild 6.11.1.1-1 und Bild 6.11.1.2-2).
- Startprobleme (8.1-4) durch schlechtere Zündung (Bild 8.2-5) oder überhitzten Kraftstoff. (Bild 8.1-18).
- Zündprobleme der Brennkammer oder des Nachbrenners (Bild 8.1-4Bild 8.1-15, Lit. 8.1-23 und Lit. 8.1-24).
- Korrosion (Band 1 Kapitel 5.6.1):
  - Hochtemperaturkorrosion an Heißteilen (Bild 8.1-7, Band 1 Kapitel 5.6.1.4).
  - Korrosion in Gehäusen aus Al- oder Mg-Legierungen.
  - Schäden an Kraftstoffpumpen durch Schwefelreaktion mit Silberbeschichtungen (Bild 8.3-4, Band 1 Bild 5.3-8).

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Das Kraftstoffsystem

Bild 8.1-1 *(Lit. 8.1-3, Lit. 8.1-8 und Lit. 8.1-12): Dieses Bild zeigt die typischen Komponenten des Kraftstoffsystems eines Flugtriebwerks mit* ***kraftstoffbeeinflussten Problemen und Schäden****. Sie stehen beispielhaft für viele Verbrennungsmaschinen mit ähnlichen Komponenten. Arbeiten diese Systeme mit Verdrängerpumpen (Zahnrad, Axialkolben, Bild 8.1-11), sind mittlere Ausfallzeiten (MTBF) von 175 000 Betriebsstunden und ein ungeplanter Austausch (MTBUR) nach 75 000 Betriebsstunden zu erwarten. Damit werden Abschaltungen (Inflight Shut Downs = IFSD) auf 0,6 pro 10^6 Flugstunden bei Überholintervallen von ca. 14 000 Stunden heruntergedrückt. Besonders Zuverlässigkeitsforderungen im Zusammenhang mit einer* ***ETOPS-Zulassung*** *(Flugzeit ohne Landemöglichkeit bei Ausfall eines Triebwerks) sind für ein Kraftstoffsystem sehr anspruchsvoll.*
Die meisten der angeführten komponentenspezifischen Schäden werden an anderer Stelle ausführlich behandelt. Im Folgenden werden hierzu die nötigen Querverweise zu ***Bildern*** *gegeben.*

Kraftstoffeigenschaften *8.1-1, 8.1-2, 8.1-3, 8.1-30, 8.2-2.2, 8.2-3*
- Siedeverhalten/Kavitationsneigung 8.1-12, 8.1-15
- Heizwert 8.2-1.1.
- Dichte 8.1-15.
- Viskosität Bild 8.2-1.1
Erstarrung 8.2-1.1, 8.2-6-6
Absetzrate 8.3-1, 8.3-3, 8.3-9
- Wasserlöslichkeit/Wasseraufnahme 8.2-1.1, 8.3-9
- Schmierfähigkeit 8.2-4, 8.3-4, 8.1-19
- Farbe 8.3-3, 8.3-5
- Thermische Stabilität 8.1-13, 8.1-16, 8.2-3
Ruß-Koksbildung 8.1-2, 8.1-3, 8.1-4
- Verunreinigungen 8.3-1, 8.3-2, 8.3-3, 8.3-6, 8.3-12, 8.3-13
Gase: Luft/Stickstoff 8.3-3
Wasser 8.3-3, 8.3-4, 8.3-5, 8.3-6
Surfactants
Gum 8.3-1,
Rost 8.3-1
Schwefel (Mikroorganismen) 8.2-7, 8.3-4, 8.3-5
- Korrosive Wirkung 8.2-4, 8.2-7, 8.3-4, 8.3-5, 8.3-10
- Angriff auf Elastomere 6.10.1.2-12, 8.1-8, 8.2-4, 8.2-8
- Flammtemperatur 8.1-2, 8.1-3, 8.1-4
- Sicherheit 8.2-7

Triebwerkskomponenten *auf die sich Probleme des Kraftstoffsystems auswirken:*

Kraftstoffpumpen *8.1-11, 8.2-4*
- Ansaugen/Kavitation 8.1-9, 8.1-11
- Fressen/Klemmen/Blockieren 8.3-4, 8.3-10
- Korrosion 8.2-4, 8.3-4, 8.3-5

Kraftstofffilter *8.2-4*
- verstopfen 8.1-5
blockieren/Vereisung 8.1-21, 8.3-7, 8.3-10
- Verunreinigung 8.4-10

Kraftstoffregler*, relevante Eigenschaften 8.2-4*
- Fehlfunktion
Vereisung 8.2-8
Dampfblase 8.1-15, 8.2-4
- Verschleiß 8.3-4, 8.1-15
- Fressen/Klemmen/Blockieren 8.1-18, 8.3-4

Einspritzdüsen *8.2-4, 8.3-6*
- Überhitzung 8.1-16, 8.1-17, 8.1-18
- Verstopfung 8.1-16, 8.1-18, 8.1-20
- Verkokung 8.1-16, 8.3-4
- Sprühverhalten 8.2-4

Brennkammer *8.1-4, 8.1-13*
- Zündprobleme 8.2-1.1
Kaltstart , 8.2-8, 8.2-9
Wiederstartprobleme
- Verbrennungsinstabilitäten (Lit. 8.1-23), 8.1-12
Gasschwingungen 8.1-1, 8.1-12, 8.2-3
Verbrennungscharakteristik, 8.2-3
Verdampfungsverhalten 8.2-4
Verlöschen 8.1-15, 8.2-9,
- thermische Belastung 8.1-3, 8.1-17
Thermoermüdung 8.1-12 (Band 1 Kapitel 5.4.2)
Überhitzung 8.1-3,8.1-13, 8.1-17, 8.1-18

Hochdruckturbine *(Lit. 8.1-23)*
- Erosion 8.1-7, 8.1-14
- OOD (Kokseinschlag, engl. carbon impact)
- Sulfidation 8.1-7 (Band 1 Kapitel 5.6.1.4)
- thermische Belastung 8.2-8
- Schwingungen (von BK-Instabilitäten) 8.2-3

Niederdruckturbine *(Lit. 8.1-23), 8.2-4*
- Sulfidation 8.1-7
- Schwingungen (von NB-Instabilitäten) 8.2-3

Nachbrenner *(Lit. 8.1-23), 8.2-3, 8.1-15*
- Zündprobleme 8.1-15, 8.2-1 Wiederstart, 8.2-5, 8.2-8
- Gasdruckimpulse/Verpuffung, 8.1-15
- Verbrennungsinstabilitäten (engl. buzz, screech, Lit. 8.1-23), 8.2-5 Verbrennungscharakteristik, 8.2-3 Zündpunkt 8.2-5.

© Axel Rossmann - Turbomult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Das Kraftstoffsystem

Der Kraftstoff beeinflusst schadensrelevant die Maschinenkomponenten auch außerhalb des Kraftstoffsystems und das Betriebsverhalten der gesamten Anlage. Hier am Beispiel eines Flugtriebwerks.

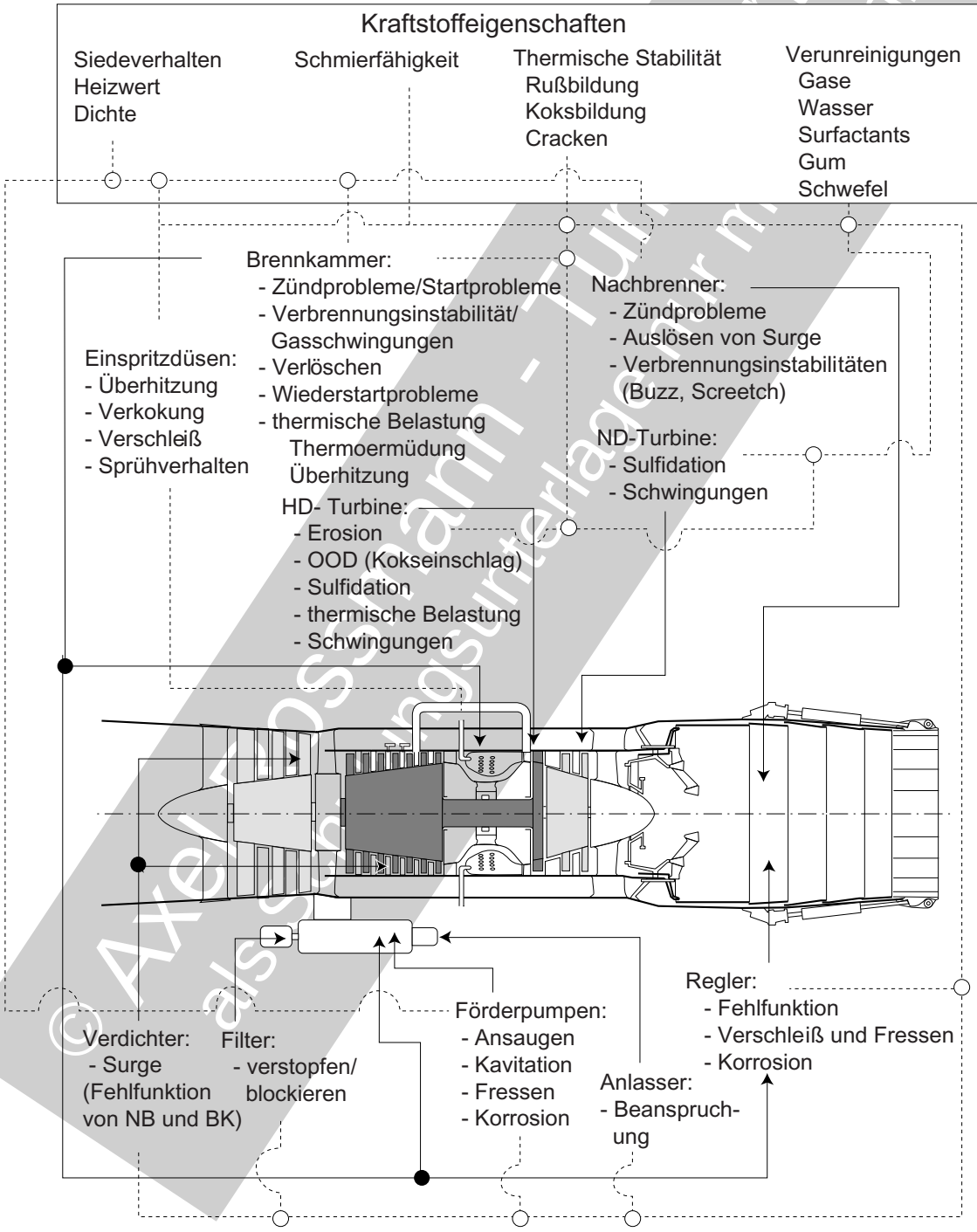


Bild 8.1-1

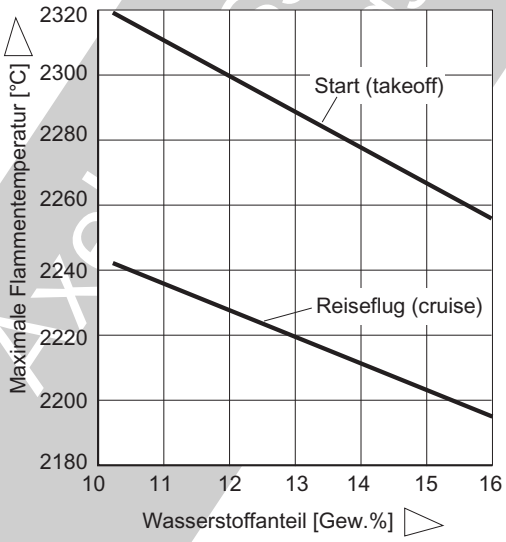
© Axel Bossmann - Turbomaschinen
als Schulungsunterlagen nur mit

Systeme und Betriebsstoffe: Das Kraftstoffsystem

Selbst scheinbar kleine Unterschiede der Kraftstoffe können sich merklich auf das Betriebsverhalten einer Maschine auswirken. Hier am Beispiel eines Flugtriebwerks

Veränderte Kraftstoffeigenschaft	Auswirkung auf das Betriebsverhalten
Höherer oberer Siedepunkt	Schlechteres Zündverhalten
	Erhöhte Schadstoffemission bei Leerlauf
Erhöhter Anteil aromatischer Verbindungen	Ansteigende Rauchbildung und Flammenstrahlung
	Schlechtere chemische Stabilität
Erhöhter Anteil an Stickstoff-verbindungen	Ansteigende Stickoxidemission
Erhöhter Erstarrungspunkt	Eingeschränkte Pumpbarkeit

Ein geringerer Wasserstoffanteil (erhöhter Kohlenstoffanteil) erhöht die Flammtemperatur und damit die Heißteiltemperatur.



Die Temperatur der Brennkammerwand verkürzt die Lebensdauer der Brennkammer überproportional.

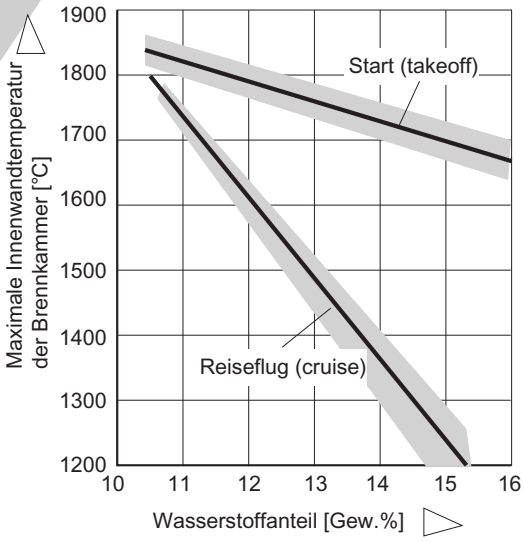


Bild 22.2-2

Bild 8.1-2 *(Lit. 8.1-13 und Lit. 6.1-30): Es ist zu erwarten, dass kraftstoffspezifische Probleme (Bild 8.1-1, Bild 8.1-4 bis Bild 8.1-19) ansteigen werden. Probleme der Verfügbarkeit und berechtigte Forderungen des Umweltschutzes dürften dafür Ursachen sein. Bereits* ***kleine Abweichungen der Kraftstoffeigenschaften*** *(Kapitel 8.2)* ***innerhalb der Spezifikation*** *(Bild 8.1-3 und Bild 8.1-4) können in modernen Triebwerken Probleme ver-*

Bereits unterschiedliche Erdölquellen für die Herstellung des gleichen Kraftstoffs können die Heißteillebensdauer und das Betriebsverhalten einer Gasturbine merklich beeinflussen. Hier am Beispiel eines Flugtriebwerks.

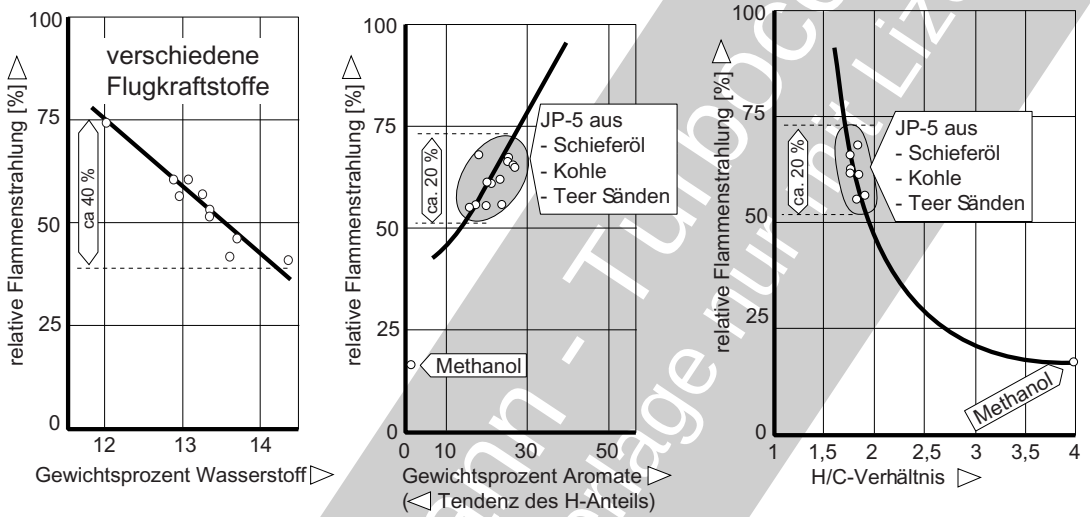


Bild 8.1-3

stärken. Sie können bereits auf unterschiedliche Herstellungsverfahren zurückzuführen sein (Bild 8.1-3). Ein Beispiel sind ***Flamminstabilitäten*** *in* ***Low-NOx-Brennkammern*** *(Bild 8.1-12, Lit. 8.1-23). Auch können sich* ***Überhitzungsschäden*** *und* ***Erosion an Heißteilen*** *(Bild 8.1-14) häufen.*

In Bild 8.1-12 sind Probleme im Zusammenhang mit dem ***Verdampfungsverhalten*** *und der temperaturabhängigen* ***Viskosität*** *dargestellt. Diese Eigenschaften sind für das* ***Start/Zündverhalten und das Brennverhalten*** *von Bedeutung (Bild 8.2-5, 8.2-9 und Lit. 8.1-23).*

Der Einfluss von Anteilen verschiedener Molekülstrukturen (Ketten unterschiedlicher Länge, Ring) im Kraftstoff auf die ***Heißteilbeanspruchung durch Wärmestrahlung*** *in der Brennkammer (Flammtemperatur, Temperatur der Brennkammerwand) zeigen die Diagramme unten. Je niedriger der* ***Wasserstoffanteil*** *bzw. je höher der des* ***Kohlenstoffs,*** *umso höher sind die* ***strahlungsbedingten Bauteiltemperaturen*** *(Lit. 8.1-23). Damit sinkt deren* ***Lebensdauer*** *(Bild 8.1-3 und 8.1-12, Band 1 Kapitel 5.3.2), Überholintervalle und -kosten (Lit. 8.1-23).*

Bild 8.1-3 *(Lit. 8.1-12 und Lit. 8.1-30): Die* ***Streuung der Kraftstoffeigenschaften*** *innerhalb der Spezifikationsgrenzen kann schadensrelevant sein (Bild 8.1-1, Bild 8.1-4 und Bild 8.1-15).*

Die ***Flammtemperatur*** *und damit die Aufheizung der angestrahlten Heißteilwände kann, abhängig vom Kraftstofftyp (Wasserstoffanteil), um 40 % streuen (Diagramm links). Selbst innerhalb eines Kraftstofftyps (hier JP5) kann,* ***abhängig von der Herkunft*** *(geologisch, geografisch, Raffinerie, Syntheseverfahren, Katalysatoren), die Flammtemperatur um 20% streuen. Damit streut der Anteil von* ***Ringkohlenwasserstoffen*** *(Aromate, mittleres Diagramm) und so das* ***Wasserstoff/Kohlenstoff-Gewichtsverhältnis*** *(Diagramm rechts).*

©Aldrossmann - Turbocad
Lizenz für Lehrzwecke
Nur zum Lehrgebrauch

Systeme und Betriebsstoffe: Das Kraftstoffsystem

Die "Aufweichung" von Kraftstoffspezifikationen kann unterschiedliche, bauteilspezifische Probleme nach sich ziehen. Hier am Beispiel einer Gasturbinenbrennkammer.

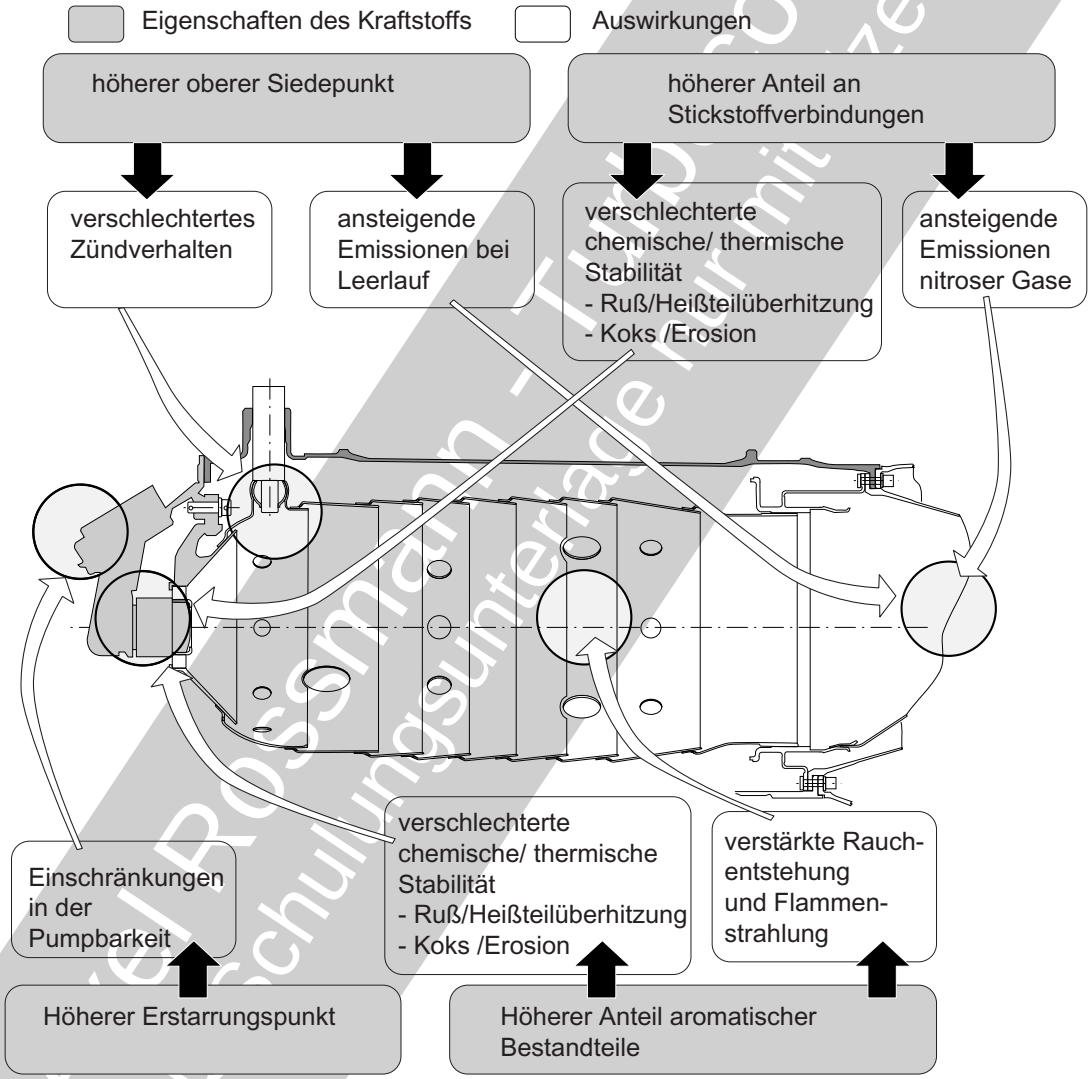


Bild 8.1-4

Bild 8.1-4 *(Lit. 8.1-10 , Lit. 8.1-13und Lit. 8.1-30): Unter Zwängen der Verfügbarkeit kann eine* ***Erweiterung der Kraftstoffspezifikation*** *notwendig werden. Dabei sind viele mögliche Auswirkungen zu berücksichtigen und gegebenenfalls geeignete Maßnahmen notwendig. Die* ***Empfindlichkeit eines Triebwerks hängt von der konstruktiven Gestaltung und den Betriebsparametern wie dem Gesamtdruckverhältnis ab****. Moderne Triebwerke mit hohem Druckverhältnis zeigen beispielsweise bei „empfindlichen" Kraftstoffen eine weniger starke Ruß- und Koksbildung.*

Ein ***höherer Erstarrungspunkt*** *kann bei extrem niedrigen Kraftstofftemperaturen (engl. freeze point) die* ***Viskosität*** *so weit erhöhen (Bild 8.1-5 und Bild 8.2-4), dass* ***mit den Pumpen*** *eine ausreichende* ***Förderung nicht mehr möglich*** *ist. Damit besteht Absturzgefahr.*

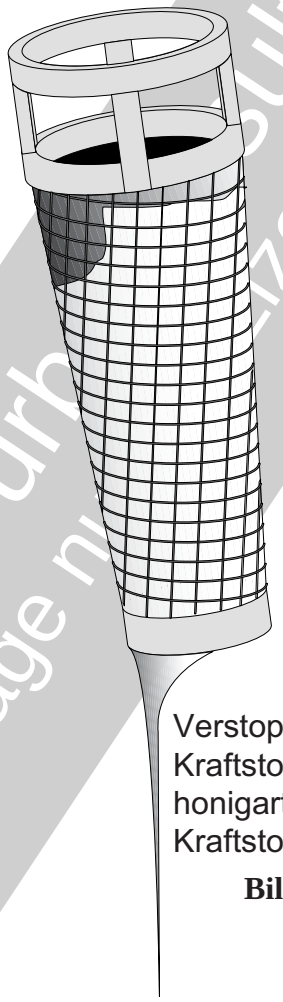
© Axel Rossmann - Tumbolt
ausschließlich Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Ein ***höherer Anteil aromatischer Bestandteile*** *bedeutet weniger Wasserstoff, mehr Kohlenstoff und einen vergrößerten Siedebereich (z.B. Dieselkraftstoff). Die Folge ist* ***stärkere Bildung von Rauch, Ruß und Koks*** *mit hohem Schadenspotenzial (Bild 8.1-14 und Lit. 8.1-23).*
Die erhöhte Rußbildung in der Flamme führt zu intensiverer Wärmestrahlung. Das hebt die ***Heißteiltemperatur*** *und* ***verkürzt die Lebensdauer*** *(Bild 8.1-12, Band 1 Kapitel 5.3.2).*

Höherer oberster Siedepunkt*:*

Damit wird die Verdampfung des Brennstoffs und so die ***Zündfähigkeit*** *verschlechtert (Bild 8.1-15, Bild 8.2-5 und Bild 8.2-9). Bei Leerlauf ist die unvollkommene Verbrennung des nicht verdampften Kraftstoffs und damit die* ***Emissionen*** *(Ruß, CO) besonders ausgeprägt. Der Grund ist das niedrige Temperaturniveau, das die Verdampfung des höher siedenden Kraftstoffs zusätzlich beeinträchtigt (Lit. 8.1-23).*

Ein ***höherer Anteil an Stickstoffverbindungen*** *im Kraftstoff beeinträchtigt, ähnlich wie ein erhöhter aromatischer Anteil, die chemische/thermische Stabilität. Das kann zur Zersetzung und* ***Verkokung*** *vor der Kraftstoffdüse mit gefährlichen Auswirkungen führen (Lit. 8.1-23). Auch die* ***Emission von NOx*** *(nitrose Gase) wird erhöht. Obwohl diese in der Hauptsache aus der Oxidation des Luftstickstoffs in der Brennkammer stammen (Lit. 8.1-23).*



Verstopfung eines Kraftstoffsiebs durch honigartigen kalten Kraftstoff.

Bild 8.1-5

Bild 8.1-5 *(Lit. 8.1-13): Ein Kraftstoffsieb (screen) bei einem* ***Kälteversuch****. Die übliche* ***Temperaturgrenze*** *(engl.* ***freezing point****) für eine unzulässige hohe Viskosität kalten Kraftstoffs liegt bei -40°C. Solche Kraftstoffe benötigen unter üblichen Bedingungen in Verkehrsflugzeugen für das Triebwerk keine Kraftstofferwärmung. Selbst auf* ***Polarrouten*** *ist auch nach mehreren Flugstunden nicht mit einem Abfall der Kraftstofftemperatur unter -30°C in den Flügeltanks zu rechnen. Ist jedoch diese Grenztemperatur auf -29°C in der Spezifikation angehoben, kann eine leichte Vorwärmung, abhängig vom Flugzeugtyp und dem Einsatzprofil, notwendig werden. Grenztemperaturen von -19°C erfordern jedoch in jedem Fall eine* ***Vorwärmung*** *des Kraftstoffs.*

© A. Grossmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Spezifischer Kraftstoffverbrauch (SFC) in Abhängigkeit von der Deterioration (Wirkungsgrad-Verschlechterung) und wiederholten Überholungen einer Maschine. Hier am Beispiel eines Flugtriebwerks.

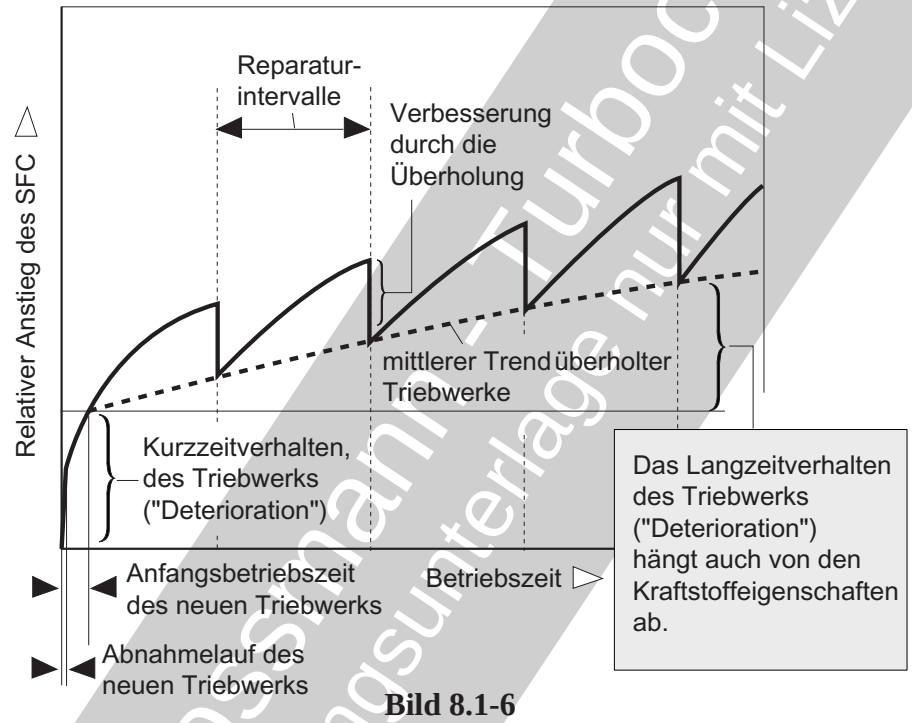


Bild 8.1-6

Bild 8.1-6 *(Lit. 8.1-13): Eine Abnahme des Wirkungsgrads eines Triebwerks/Verbrennungsmaschine und damit die Zunahme des* ***spezifischen Kraftstoffverbrauchs*** *(SFC, Band 2 Lit. 8.1-26) kann auch im Zusammenhang mit den Kraftstoffeigenschaften stehen. Die* ***ansteigende Sägezahnkurve*** *ist die Folge der Überholvorgänge. Trotz des Tauschs der Heißteile lässt sich das Wirkungsgradniveau der vorhergehenden Überholung offenbar nicht mehr ganz erreichen.*

Ein solcher Effekt ist zu erwarten, wenn z.B. jede Reparatur mit der aerodynamisch oder thermodynamisch wirksamen Geometrie den Wirkungsgrad der Heißteile verschlechtert. Das kann in Zusammenhang mit reparaturgelöteten Schaufeln (Lit. 8.1-25) oder dem Richten von Leitschaufeln (Lit. 8.1-25) stehen. Maßänderungen an Bauteilen wie Turbinengehäusen die Beschaufelungen positionieren, dürften sich ähnlich auswirken. Von der Verfügbarkeit erzwungene, ***erweiterte Kraftstoffspezifikationen mit erhöhtem Anteil von Ringkohlenwasserstoffen*** *(Bild 8.1-2 bis Bild 8.1-4)* ***und Verunreinigungsspuren*** *wie* ***Vanadium und Schwefel*** *(Bild 8.1-7) können diesen Trend verstärken.*

© MTU Friedrichshafen GmbH Turbocomponents
Abbildungsunterlage nur mit Lizenz

Zum Oberflächenangriff an Heißteilen können Verunreinigungen im Kraftstoff erheblich beitragen und so die Überholungskosten entscheidend beeinflussen.

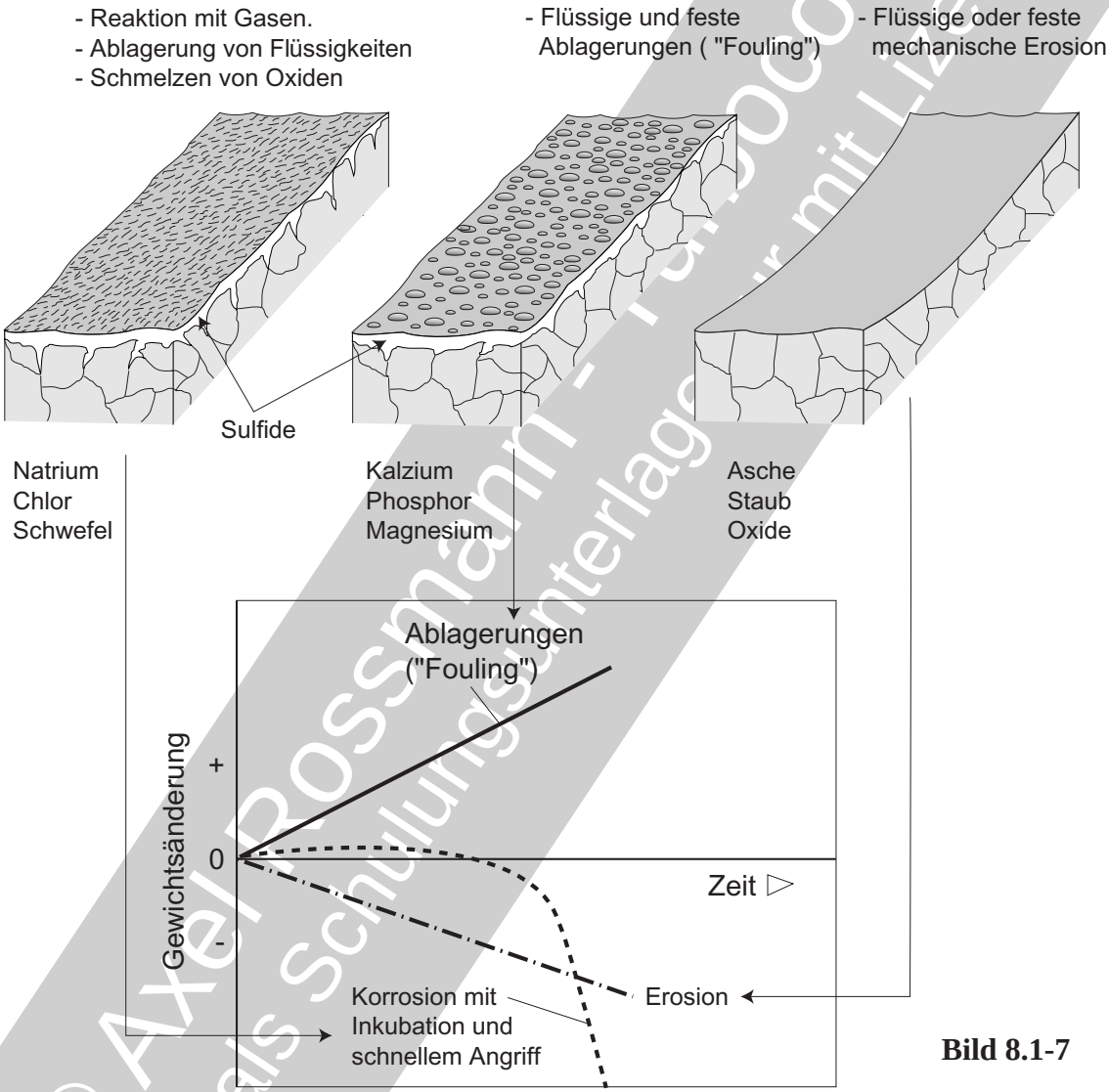


Bild 8.1-7

Bild 8.1-7 *(Lit. 8.1-13):* ***Verunreinigungen in der Ansaugluft und im Kraftstoff*** *können zusammenwirken und so die Schädigungswirkung auf Heißteile verstärken (Lit. 8.1-24). Diese Kombination läuft in der Brennkammer beim Verbrennungsprozess ab. Besonders wirksam sind angesaugte Verbindungen die* ***Natrium, Schwefel und Chlor*** *enthalten. Sie reagieren mit* ***Kalzium (Ca), Kalium (K) und Magnesium aus dem Kraftstoff*** *(Skizze oben links und Mitte). Diese Schädigung wird von erosiven Effekten (Skizze oben rechts) mit der Entstehung* ***frischer reaktiver Oberflächen*** *unterstützt (Diagramm unten). Dazu gehören verstärkte Bildung von Kokspartikeln (Lit. 8.1-23) oder* ***abplatzende, aufgeschmolzene Staubablagerungen*** *(Lit. 8.1-24).*

© Axel Rossmann - Fachbücher
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

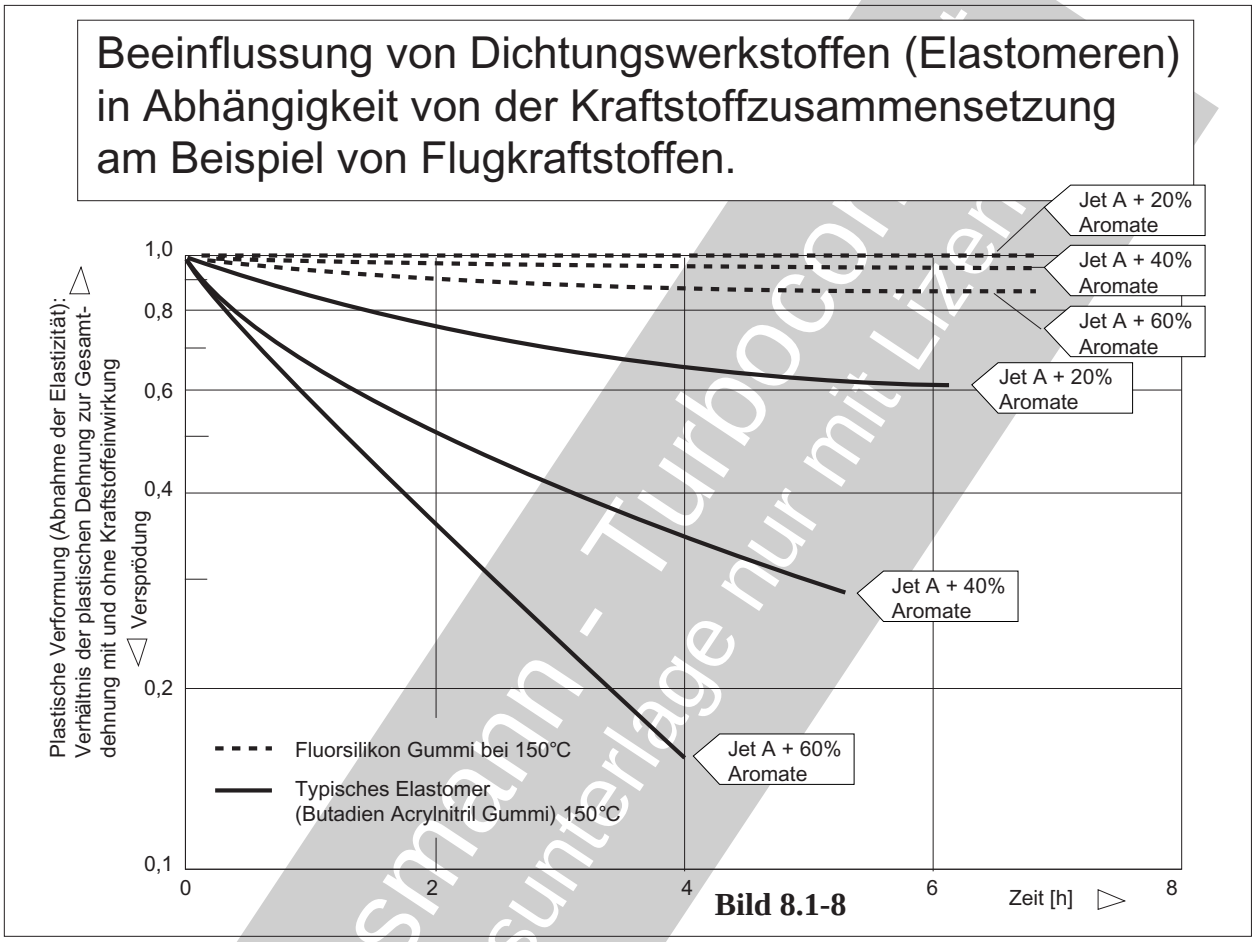


Bild 8.1-8

Bild 8.1-8 *(Lit. 8.1-6, Lit. 8.1-11 und Lit. 8.1-13):* ***Elastomere*** *wie Gummimischungen können ihre funktionsnotwendigen Eigenschaften durch* ***Einwirkung spezifischer Kraftstoffe*** *verlieren. Das gilt, wenn sich die Zusammensetzung des Kraftstoffs geändert hat. Es ist möglich, dass die Beständigkeit der Elastomere, die dafür nicht geprüft und zugelassen wurden, nicht mehr ausreicht. Besonders einflussreich ist dabei offenbar der* ***Gehalt an Aromaten*** *(Ringkohlenwasserstoffen). Eine Schädigung macht sich üblicherweise in* ***verringerter elastischer Verformbarkeit*** *bemerkbar. Das führt zur* ***Relaxation, nicht selten mit Rissbildung und frühzeitigem Bruch****. Verlieren Dichtungen wie* ***O-Ringe*** *(Kapitel 6.10.1.2),* ***Wellendichtringe*** *(Kapitel 6.10.2.1) oder* ***Flanschdichtungen*** *auf diese Weise ihre Wirkung, kann dies gefährliche Schäden zur Folge haben.*

Schrumpfung *ist eine weitere Schädigung. Sie ist eine Folge des* ***Herauslösens von Bestandteilen*** *wie Weichmacher aus dem Elastomer. Damit steigt die* ***Härte und die Sprödigkeit*** *(Abnahme der plastischen Verformbarkeit) erhöht sich. Zusätzlich kann sich die* ***Zugspannung*** *im aufgedehnten Elastomerbereich (z.B. Dichtlippe) erhöhen. Beides begünstigt eine Rissbildung. Auch* ***bleibende plastische Verformung,*** *wie eine* ***Abplattung,*** *kann als Folge einer Reaktion mit dem Kraftstoff auftreten und ein Leck verursachen. Empfindliche* ***Anstreifbeläge*** *aus Elastomeren, die versehentlich mit Kraftstoff in Berührung kamen, können beim* ***Schrumpfen und Verspröden*** *einreißen und ihre Funktionstauglichkeit verlieren (Lit. 8.1-26) .*

Quillt *dagegen das Elastomer als Folge einer* ***Aufnahme des Kraftstoffs bzw. von dessen Bestandteilen,*** *kann eine Drucküberlastung die Folge sein (Quetschen eines O-Rings). Teile des O-Rings werden durch den Dichtspalt gepresst und beeinträchtigen die Dichtfunktion. Werden* ***herausgepresste Dichtungspartikel*** *vom Kraftstoffstrom mitgenommen, besteht die Ge-*

© Axel Bossmann - Turbocom
Abbildungsunterlage nur mit Lizenz

fahr, dass enge Querschnitte, wie in Düsen, verstopfen.
Quellen kann auch notwendige ***Bewegungskräfte*** *(z.B. von Betätigungskolben) unzulässig ansteigen lassen. Damit lässt sich die Funktion ganzer Systeme verhindern.*
Neben funktionsbedingt kraftstoffbenetzten Elastomeren besteht eine ***Schädigungsgefahr bei unbeabsichtigter Kraftstoffeinwirkung****. Typisches Beispiel ist bei der Montage verschütteter Kraftstoff (Lösen einer Rohrverbindung). Er kann einen* ***Gummi-Anstreifbelag im Fan-Gehäuse*** *schädigen. Ein Quellen des Elastomers führt zum Abheben und „Aufstehen" des Anstreifbelags, besonders wenn sich auch die* ***Haftfestigkeit*** *verschlechterte. Im Extremfall kann es zu schwerem Anstreifen mit einer* ***gefährlichen Beschädigung der Schaufeln*** *kommen (Lit. 8.1-26).*
Weisen Kraftstoffe abhängig vom Raffinerieverfahren keine ***Antioxidantien*** *auf, können sich* ***Peroxide*** *bilden, die Gummi (Neopren und Nitril) mit* ***Poren, Rissen und Blasen*** *schädigen. Das gilt insbesondere für gummierte Gewebe. Eine gelbe* ***Verfärbung des Kraftstoffs*** *bei Nitril weist auf hinausgelösten Weichmacher hin.*
Andere Kraftstoffe verfärben sich offenbar bei einer ***chemischen Reaktion mit dem Elastomer*** *orange und bilden* ***dicke braune Ablagerungen****.*

Bild 8.1-9 *(Lit. 8.1-4): Ein in großer Zahl eingesetzter Triebwerkstyp verschiedener Kampfflugzeuge hatte Probleme mit* ***Kavitation*** *(und Pseudokavitation ?, Bild 6.11.1.2-7) Davon waren* ***Kraftstoffpumpen mit besonderen Konstruktionsmerkmalen*** *betroffen. Zwanzig Proben des JP-4 Kraftstoffs (MIL-T-5624L) wurden auf chemische und physikalische Eigenschaften untersucht. Alle Daten lagen im Spezifikationsbereich. Das wies auf den Einfluss* ***nicht spezifizierter Eigenschaften hin****.*

Der Kraftstoff beeinflusst auch das Kavitationsverhalten des Kraftstoffsystems und damit unterschiedliche Symptome des Betriebsverhaltens einer Maschine.

Kavitationsprobleme in der Kraftstoffpumpe von Kampfflugzeugtriebwerken haben umfangreiche Kraftstoffuntersuchungen ausgelöst, um die Ursache von Pumpenschäden zu klären. Es zeigte sich, dass ein Hauptgrund in der speziellen konstruktiven Ausführung der Pumpe zu suchen war.

Potenzielle Probleme durch Kavitation und Pseudokavitation im Kraftstoffsystem:
- Anfressungen an Bauteilen wie Pumpenrädern (Turbopumpen und Zahnradpumpen)
- Regelungsinstabilitäten
- Schwingungen und Schwingermüdung von Komponenten wie Rohrleitungen

Was die Neigung zu Kavitation und Pseudokavitation eines Kraftstoffs beeinflussen kann:
- gelöste Gase
- angesaugte Luft
- Wasser, gelöst oder ungelöst
- Zusammensetzung, leicht verdampfende Anteile

Bild 8.1-9

© Axel Grimm - Turbocomsult als Schulungsunterlage mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Das Kraftstoffsystem

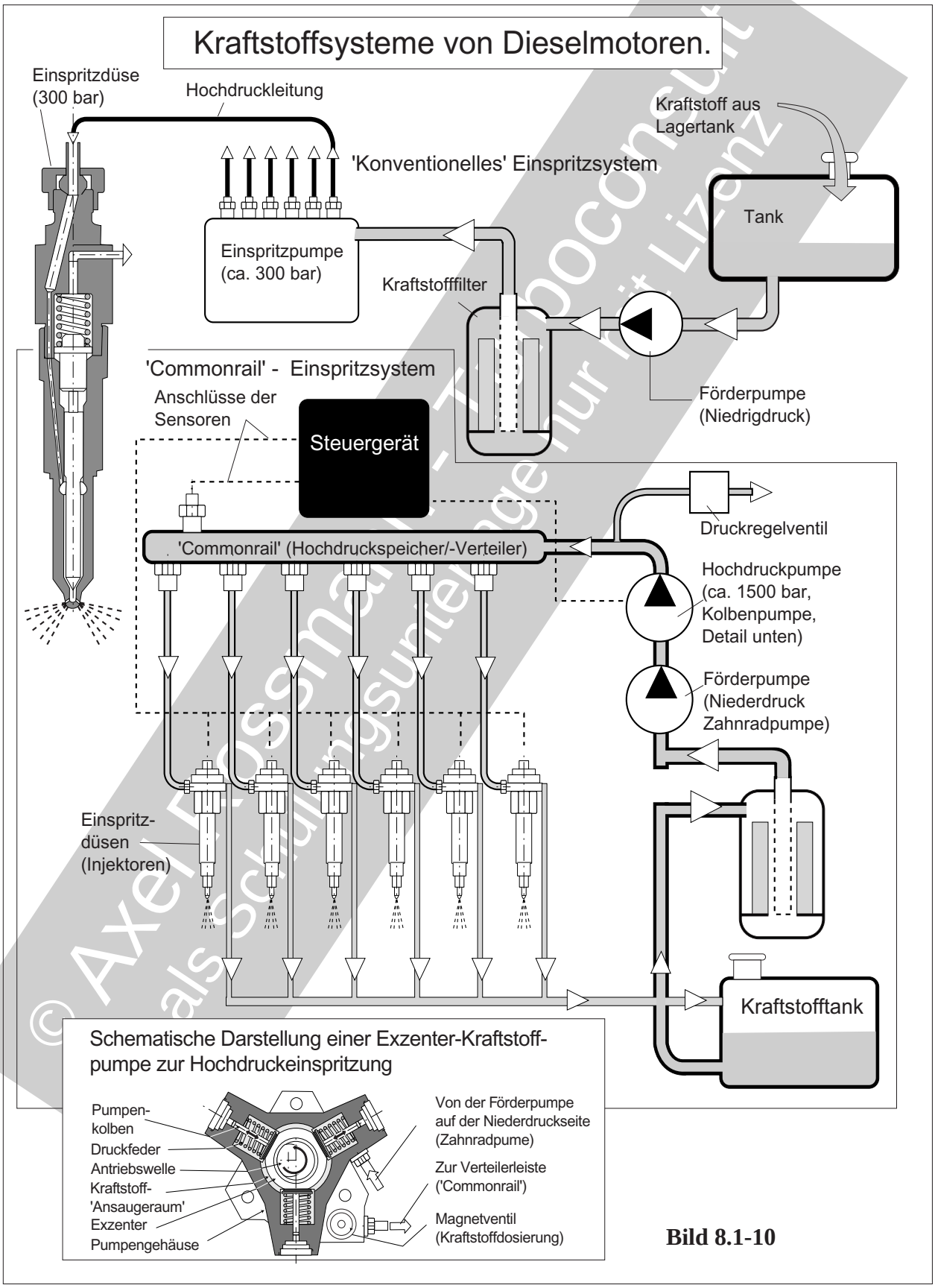


Bild 8.1-10

© Axel Rossmann - Techniconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bildbeschreibung auf nächster Seite.

Bild 8.1-10 *(Lit. 8.1-19, Lit. 8.1-21, Lit. 8.1-22 und Lit. 8.1-27): Für Dieselmotore ist eine* ***intermittierende Kraftstoffeinspritzung*** *unter hohem Druck erforderlich. Die Skizze oben zeigt ein '****konventionelles****' ****Einspritzsystem****. Benötigt werden für den Niederdruckbereich eine Förderpumpe (üblich* ***ist eine Zahnradpumpe****, Bild 8.1-11) und die eigentliche Einspritzpumpe. Es handelt es sich dabei meist um eine* ***Kolbenpumpe*** *mit Exzenterbetätigung (nockenwellenartig).*
Die Besonderheit der Kraftstoffzufuhr moderner Dieselmotoren ist die ***Hochdruckeinspritzung****. Erforderlich sind eine Höchstdruckpumpe (Kolbenpumpe mit deutlich über 1000 bar, Detail unten links) und hochfrequent gesteuerte* ***Nadelventile in den Düsen****. Der Druckaufbau wird auf unterschiedliche Weise im Serieneinsatz realisiert. Über einen Hochdruckspeicher ('Common Rail', Schema unten) oder indem die Pumpe mit Piezobetätigung in die Düse integriert ist ('Pumpe-Düse').*
Von den beschriebenen Anlagen unterscheiden sich Kraftstoffsysteme der ***Gasturbinen*** *und* ***Kraftwerkskessel*** *mit kontinuierlicher Einspritzung.*
In allen Fällen kommen ***kraftstoffgeschmierte Pumpen****,* ***Ventile*** *und verschiebliche* ***Wellenverbindungen*** *(Keilwellen, Bild 6.6.1-1 und Bild 8.1-19) mit hochbelasteten Gleitflächen und mit sehr engen Spielen zum Einsatz. Sie benötigen eine gewisse* ***Schmierfähigkeit des Kraftstoffs****. Diese ist auch von den Gleitoberflächen abhängig. Gefährdet sind z.B.* ***Silberschichten durch Schwefelverbindungen*** *(Bild 8.3-4). Auch erosive (z.B. Verschleißpartikel, Bild 8.3-1) und korrosive (Wasser, Bild 8.3-3) Kraftstoffverunreinigungen sind zu vermeiden.*
Trotz dieser ***Herausforderungen für Konstruktion und Entwicklung*** *ist es offensichtlich gelungen, das Ausfallrisiko für Lebensdauern von 10^5 Betriebsstunden auf ein für den Großserieneinsatz akzeptables Maß zu begrenzen.*

Bild 8.1-11 *(Lit. 8.1-1, Lit. 8.1-2, Lit. 8.1-11, Lit.8.1-17, Lit. 8.1-19 und Lit. 8.1-20): Die Komponenten von Turbo-, Zahnrad- (Skizze oben), Radialkolben-(Skizze unten links) und Axialkolben- (Skizze unten rechts) Kraftstoffpumpen werden vom geförderten* ***Kraftstoff geschmiert****. Abhängig von relativ kleinen Unterschieden in der Kraftstoffzusammensetzung, kann es zu Problemen kommen:*

Schmierwirkung des Kraftstoffs*: Mehrfach wurde ein* ***Festsitzen*** *(Kaltverschweißen = „****Fressen****", engl. seizure Band 1 Kapitel 5.9.2) von Gleitlagern (Bild 6.3.2-3) in Pumpen bekannt. Das gilt gerade auch für Kolben von Axialkolbenpumpen (Bild 8.3-4). Die Mehrzahl dieser Schäden konnte* ***hydrierten Kraftstoffen*** *zugeordnet werden. Es wurde vermutet, dass durch die Hydrierung ein Mangel an Bestandteilen besteht, welche die Schmierwirkung unterstützen. Bestandteile des Kraftstoffs werden an der Grenzschicht von der Metalloberfläche absorbiert und beeinflussen das Gleitverhalten.* ***Betriebszustände mit hohen radialen Lagerkräften und niedriger Gleitgeschwindigkeit*** *begünstigen Fressschäden.*
Lagerschäden oder verstärkter ***Verschleiß*** *wie an den Kugelköpfen zu den Gleitschuhen der Axialkolbenpumpen („1" in unterer Skizze), ließen sich in einigen Fällen einem* ***Zusatz für den Korrosionsschutz*** *(engl. corrosion inhibitor) zuordnen.*

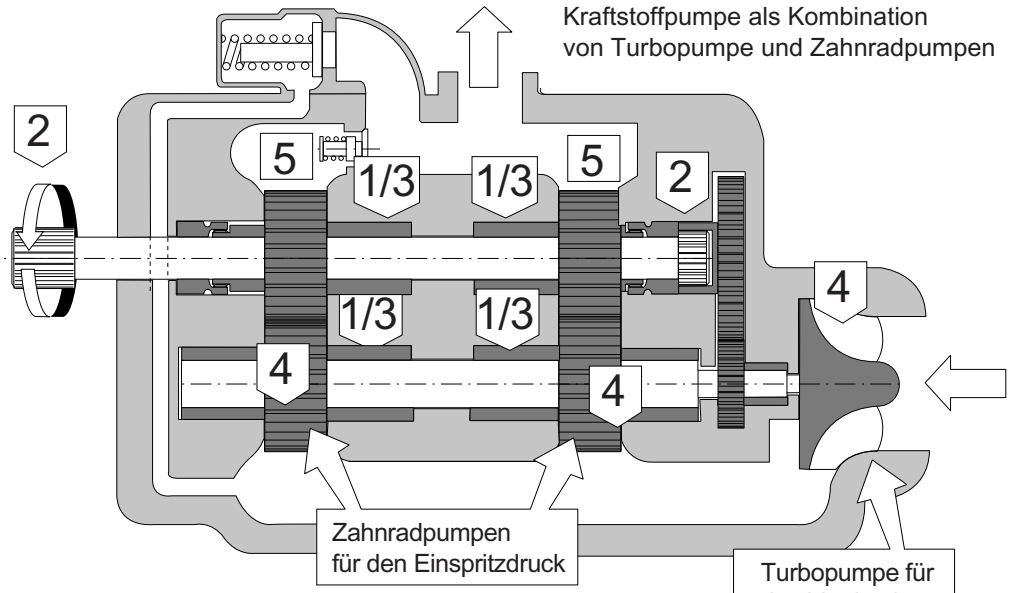
Korrosion durch Kraftstoff*: Gefährlich sind Kraftstoffe mit ungewöhnlich viel* ***korrosiv wirkendem Schwefel*** *in Form von* ***Schwefelwasserstoff*** *(H_2S). Das muss nicht bedeuten, dass die Gesamtmenge des Schwefels, zu dem auch nicht korrosiv wirkende Schwefelverbindungen gehören, sehr hoch ist.*
Es bilden sich auf versilberten Gleitflächen ***Silbersulfide****. Dabei kommt es zu einer* ***Volumenvergrößerung****. Löst sich das Silbersulfid*

Fortsetzung auf S. 8.1-16

© Vorlesungsunterlage Turbomaschinen - Turbocoursat
Prof. Jürgen Lienz

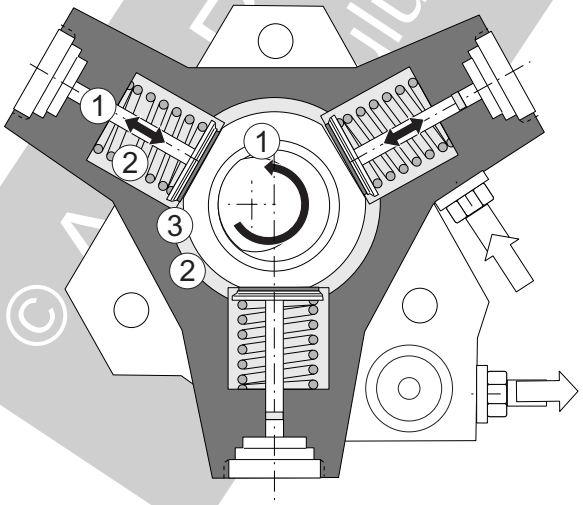
Systeme und Betriebsstoffe: Das Kraftstoffsystem

Kraftstoffpumpen können auf unterschiedliche Weise mit dem Kraftstoff schadensrelevant in Wechselwirkung treten.



Die Schmierfähigkeit des Kraftstoffs beeinflusst:
"1" Verschleiß in den Pumpenlagern
"2" Verschleiß in Verzahnungskupplungen
"3" Lagerkräfte im Zusammenhang mit dem Druckniveau des Systems
"4" Kavitation im Zusammenhang mit der Kraftstofftemperatur
"5" Druckvibrationen die andere Komponenten des Kraftstoffsystems beeinflussen

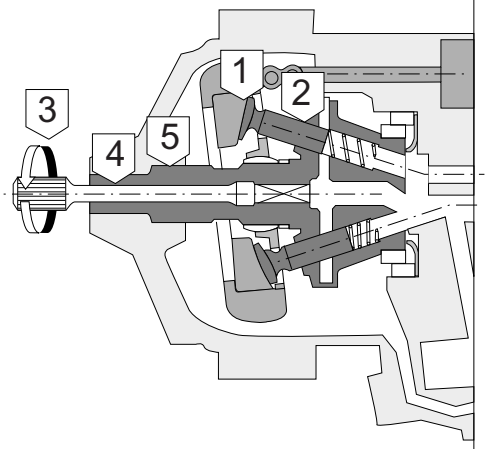
Schematische Darstellung einer Exzenter-Kraftstoffpumpe zur Hochdruckeinspritzung eines Dieselmotors



Vom Kraftstoff beeinflusste Schadensmechanismen

1 Verschleiß, 'Fressen'
2 Korrosion
3 Kavitation

Axialkolbenpumpe als Kraftstoffpumpe



Die Schmierfähigkeit des Kraftstoffs beeinflusst:
"1" Verschleiß und Reibung der Gleitschuhe
"2" Verschleiß der Kolben und Gleitkräfte
"3" Verschleiß der Verzahnungskupplung
"4" Antriebskräfte: mechanische Überlastung
"5" Lagerkräfte

Bild 8.1-11

Fortsetzung von S. 8.1-14

ab, werden die frischen Silberflächen angegriffen.
Das **Silbersulfid** *hat verglichen mit Silber einen höheren* **Reibbeiwert**. *Diese verstärkte Reibung, gegebenenfalls zusammen mit einer Klemmwirkung (z.B. bei Kolben) auf Grund der Volumenvergrößerung, lässt* **Bewegungskräfte und Reibungswärme ansteigen**. *Das begünstigt ein Fressen der Gleitflächen. Derartige Schäden treten oft ohne Vorwarnung an Axialkolbenpumpen auf und führen zur totalen Zerstörung.*
Gefährliche Schwefelverbindungen können sich bei der Lagerung des Kraftstoffs im Tank bilden (Bild8.3-5).

Kavitation des Kraftstoffs *(Bild 8.1-9 und Bild 8.1-15, Band 1 Kapitel 5.5.1.3): Zahnradpumpen sind bei höheren Kraftstofftemperaturen kavitationsgefährdet. Dabei auftretende* **hochfrequente Druckimpulse** *stehen im Verdacht, gefährliche* **Schwingungen** *im Regler, den Rohrleitungen und den Kraftstoffdüsen anzuregen.*

Bild 8.1-12*: Selbst nicht verunreinigter* **spezifikationsgerechter Kraftstoff** *kann schädigend bzw.* **lebensdauerverkürzend** *auf Heißteile wirken. Das Bild zeigt die* **Brennkammer einer Gasturbine**. *Einige Schadensmechanismen sind auch im Bereich des* **Brennraums** *von* **Verbrennungs/-Kolbenmotoren** *zu finden. Das gilt z.B. für den* **Kolbenboden**. *Hier entsteht Rissbildung durch* **Thermoermüdung** *(Band 1 Bild 4.3-22) und Erosion als Folge eines Zusammenwirkens von Heißgaskorrosion/ Oxidation. Dabei verstärken sich Angriff und Abtrag mit der Erosion durch Kraftstofftröpfchen und Rußpartikel. Ähnliches gilt für die Ventile, insbesondere die* **Auslassventile** *(Band 1 Bild 5.4.2.1-1.3).*

Einfluss auf die Heißteillebensdauer*:* **Art und Anteil unterschiedlicher Kohlenwasserstoffmoleküle** *beeinflussen die* **Rußbildung** *(Lit. 8.1-23). Diese steigt mit dem Kohlenstoffanteil bzw. fällt mit höherem* **Wasserstoffanteil** *(Bild 8.1-2 und Lit. 8.1-23). In der Brennkammer ist Rußbildung für die Intensität der* **Wärmestrahlung der Flamme** *(Lit. 8.1-23) verantwortlich. Davon ist die* **Aufheizung der Brennkammerwände und Vorderkanten der Turbineneintrittsleitschaufeln** *(HDT-Leitapparat erste Stufe = nozzle guide vanes , Rahmen unten) betroffen. Eine erhöhte* **Thermoermüdungsbeanspruchung** *(Lit. 8.1-23) ist die Folge (Diagramm oben links, Lit. 8.1-23). Typische Brennkammerschäden zeigt die Skizze oben rechts (Lit. 8.1-23).*
Bildung und **Ablagerung von Ruß** *kann ebenfalls Schäden auslösen. Der Kraftstoff kann sich bei hohen Betriebstemperaturen bereits in* **den Zuführungsrohren** *zersetzen (cracken). Kommt es zur Veränderung des* **Sprühkegels** *(Ablenkung), ist eine gefährliche Überhitzung der Brennkammerwand möglich (Lit. 8.1-23).*
Bildet sich Ruß an der Brennkammerwand oder außen an der Düse und platzt ab, kann die **Turbinenbeschaufelung in erstaunlich kurzer Zeit unzulässig erodieren** *(Lit. 8.1-23 und Lit. 8.1-24).*

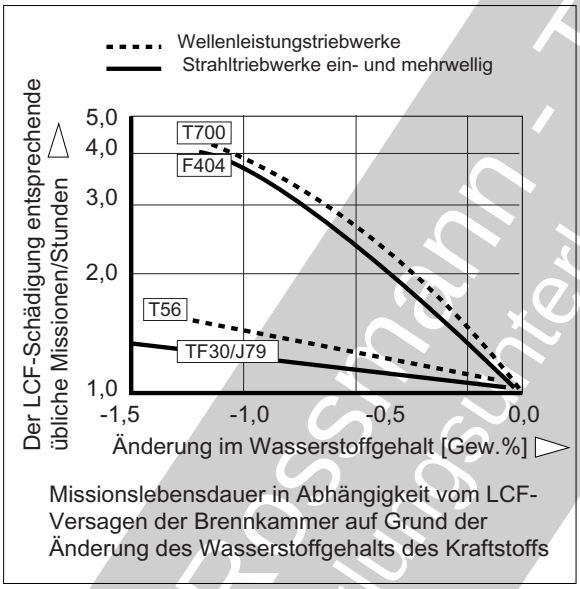
Einfluss auf die Verbrennungsstabilität*: Auch das* **Verbrennungsverhalten** *eines Kraftstoffs hängt von seiner Zusammensetzung ab. Selbst innerhalb der Kraftstoffspezifikationen kann es bei „sensiblen Brennkammern", z.B. mit* **Low NOx-Eigenschaften**, *zu gefährlichen* **Verbrennungsinstabilitäten** *kommen (Rahmen unten). Diese hängen mit dem* **Verdüsungs- und Verdampfungsverhalten** *zusammen (Lit. 8.1-23 und Lit. 8.1-24). Die Folgen sind Schwingbrüche (Band 1 Kapitel 5.4) der Brennkammerwand (Lit. 8.1-23), Reibverschleiß an allen Auflagen bzw. Steckflächen (Lit. 8.1-26) und der Turbinenbeschaufelung.*

© Axel Bossmann - Turbomaschinen als Antriebsmaschinen

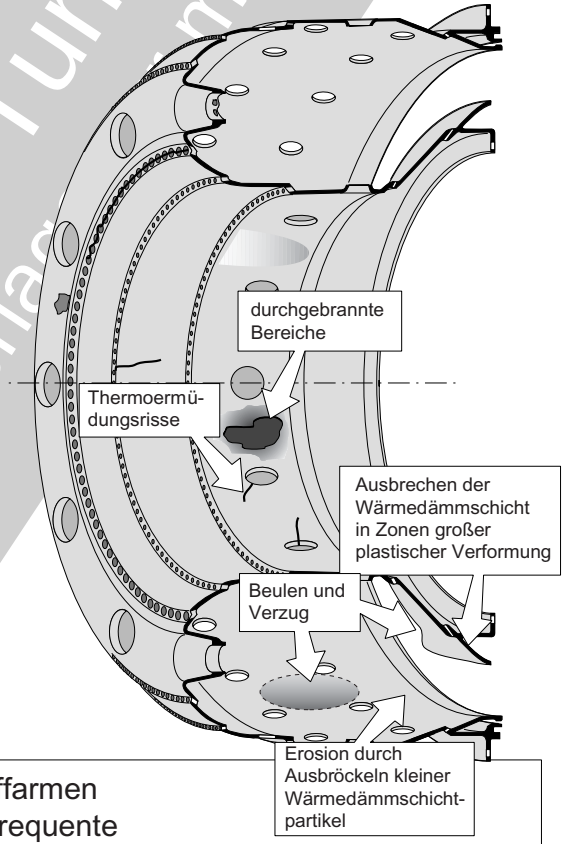
Systeme und Betriebsstoffe: Das Kraftstoffsystem

Die Heißteillebensdauer und damit auch die Überholintervalle einer Maschine können vom Kraftstoff deutlich beeinflusst sein. Das zeigt die Brennkammer einer Gasturbine. Hier von Flugtriebwerken.

Der Wasserstoffgehalt eines Kraftstoffs ergibt sich aus den Anteilen an Ketten- und Ringkohlenwasserstoffen. Das kann sich bei unterschiedlichen Lieferanten durchaus merklich unterscheiden. Der Einfluss dürfte besonders bei militärischen Triebwerken für die Heißteillebensdauer von Bedeutung sein. Hier ist vor Ort von sehr unterschiedlichen Kraftstofflieferanten auszugehen.



Missionslebensdauer in Abhängigkeit vom LCF-Versagen der Brennkammer auf Grund der Änderung des Wasserstoffgehalts des Kraftstoffs



Kraftstoffänderungen können in schadstoffarmen Brennkammern schadenswirksame hochfrequente Schwingungen auslösen

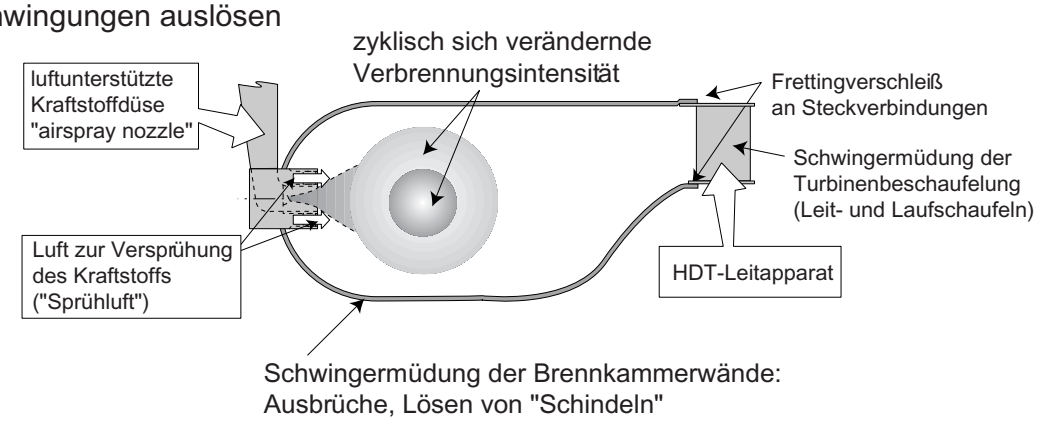


Bild 8.1-12

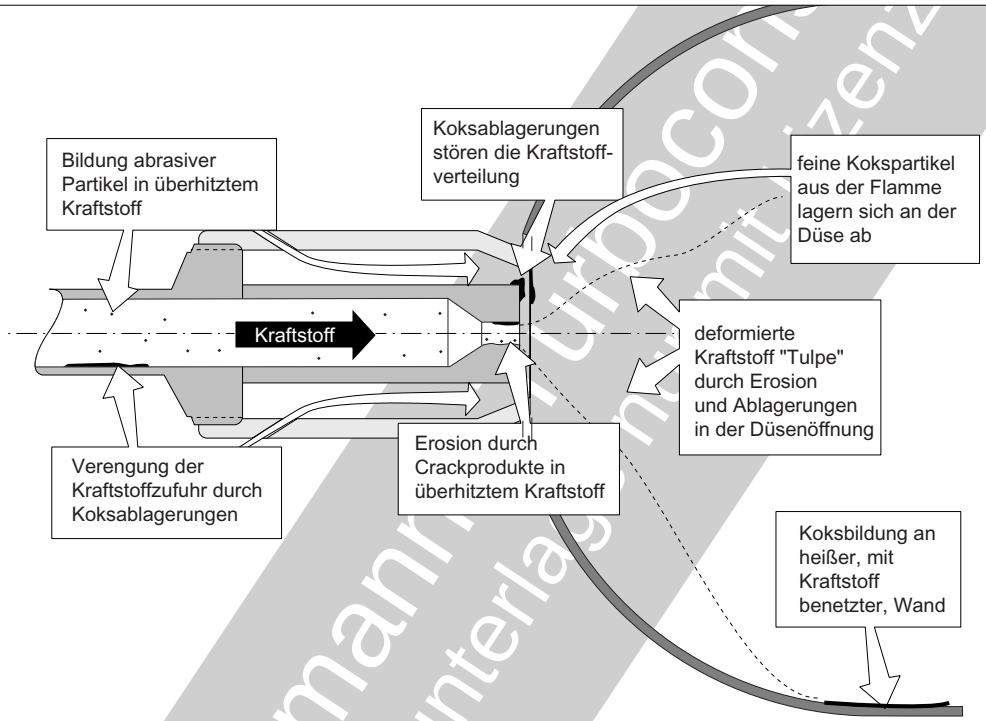
Bild 8.1-13 *(Lit. 8.1-29): Am häufigsten weist die* **Kraftstoffdüse und der sie umgebende Bereich** *Koksablagerungen auf. Das gilt in erster Linie für Turbomaschinen und Brennerdüsen. Nicht zuletzt dürfte dies auf im Vergleich zur Flamme und den Brennkammerwandungen relativ niedrige Oberflächentemperaturen (Kühlwirkung des Kraftstoffflusses) zurückzuführen sein. Wie aus dem Diagramm unten zu erkennen, ist die* **Zusammensetzung des Kraftstoffs bei Koksbildung** *von entscheidender Bedeutung. Koksablagerungen werden von Kraftstoffen mit einem großen Anteil* **hochsiedender Bestandteile** *begünstigt. Während z.B. der Siedebereich von Kerosin zwischen 140°C und 235°C liegt, befindet sich dieser Bereich bei Dieselöl zwischen 180°C und 380°C. Damit werden die* **vergleichsweise starken Koksablagerungen bei der kontinuierlichen Verbrennung von Dieselkraftstoff** *verständlich.*
Grundsätzlich beobachtet man in Brennkammern **zwei unterschiedliche Mechanismen der Koksbildung***:*

Koksablagerungen in der Nähe der Kraftstoffdüse und auf der Stirnseite der Kraftstoffdüse *bestehen zu ca. 98 % aus Kohlenstoff und 1-2 % aus Sauerstoff. Sie haben eine amorphe Mikrostruktur aus Kügelchen im Durchmesserbereich um 10^{-3} mm. Diese Partikel sind deutlich größer als gewöhnliche Rußpartikel. Vereinzelt sind sie grafitisiert, was auf eine Entstehung bei Temperaturen über 900°C hinweist. Weil solche Temperaturen nicht an den koksbesetzten Wänden auftreten, müssen die Partikel sich* **in der Flamme gebildet** *haben. Als Erklärung bietet sich an, dass es sich um verkokte* **relativ große Tröpfchen des Sprühkegels** *handelt. Die verkokten Partikel setzten sich, offenbar nachdem sie von den* **rezirkulierenden Heißgasen** *in den Bereich der Kraftstoffdüse und des Brennkammerdoms transportiert wurden,* **auf den relativ kalten Oberflächen** *ab (Lit. 8.1-23). Enthalten die Ablagerungen korrosive Bestandteile wie Schwefel, ist mit Anfressungen im Bereich der Ablagerungen zu rechnen (Lit. 8.1-23).*

Die Koksablagerungen auf den im Gasstrom folgenden Brennkammerwandungen beruhen auf einem völlig unterschiedlichen Entstehungsmechanismus als an der Düse. Darauf weist der relativ hohe Sauerstoffgehalt von ca. 20 % und ein, wenn auch geringer, Wasserstoffanteil von einigen Prozent hin. **Während des Flugs findet eine Autooxidation relativ großer Kraftstofftröpfchen** *bei Temperaturen unterhalb 300°C statt. Höhere Temperaturen führen zu einer Abnahme der Autooxidation und zu einem zu schnellen Verdampfen der Tröpfchen. Die Ablagerungen werden also damit erklärt, dass* **Kraftstofftröpfchen auf heiße Brennkammerwände treffen und dort verkoken** *(Überschreiten der thermischen Stabilität). Dieser Vorgang benötigt Wandtemperaturen zwischen 180°C und 460°C.* **Je größer der Durchmesser der Kraftstofftröpfchen, umso eher erreichen sie die heiße Brennkammerwand und umso stärker ist die Koksbildung***.*
Die verlängerte Verdampfungszeit von Kraftstoffen mit höherem Siedebereich begünstigt auch die Bildung von Koks nach dem Auftreffen auf der Wand. So entsteht ein Vielfaches an Ablagerungen.
Verunreinigte oder **nicht spezifikationsgerechte Kraftstoffe** *können Kraftstoffdüsen zusetzen, die unter normalen Betriebsbedingungen eine solche Anfälligkeit nicht zeigen (Lit. 8.1-23). Entweder begünstigen diese Verunreinigungen eine Verkokung der Düsen bei den relativ hohen Temperaturen oder sie verstopfen selbst die Düsen. Solche Verunreinigungen können angelöste, für das Kraftstoffsystem ungeeignete, Kunststoffe (z.B. Dichtungen) sein.*
Von Lecks in Kraftstoffdüsen sind gefährliche Folgeschäden wie das Versagen überhitzter Druckgehäuse (hinteres Verdichtergehäuse, Brennkammergehäuse) zu erwarten (Lit. 8.1-23). Deshalb sind solche Undichtigkeiten unbedingt zu vermeiden. Tritt ein Kraftstofffleck

©Kurt Strasmann - Turbocoursu
Abbildungsunterlagen

Schäden durch Koksbildung innerhalb und außerhalb von Kraftstoffdüsen einer Turbomaschine (schematisch).



Die Menge der Koksablagerungen ist stark von der Wandtemperatur und dem Kraftstofftyp abhängig!

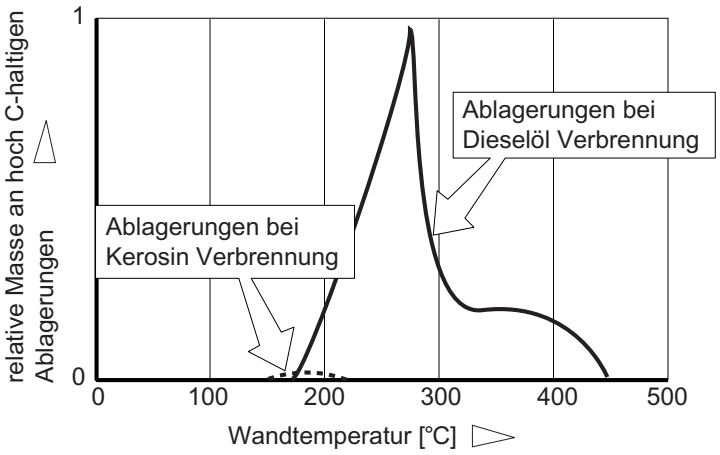


Bild 8.1-13

auf, ist dies nicht nur zu beseitigen, sondern seine Ursache ist zu ermitteln und gezielte Abhilfemaßnahmen sind zu ergreifen.

© Axel Hermann Turbocomp
Unterlagen mit Lizenz

In Brennräumen von Motoren, Heizkesseln und Turbinen von Turbomaschinen kann 'Koks' erstaunlich erosiv wirken. Hier das Beispiel von "Carbon Erosion" an den Schaufeln der Hochdruckturbine eines älteren Flugtriebwerkstyps.

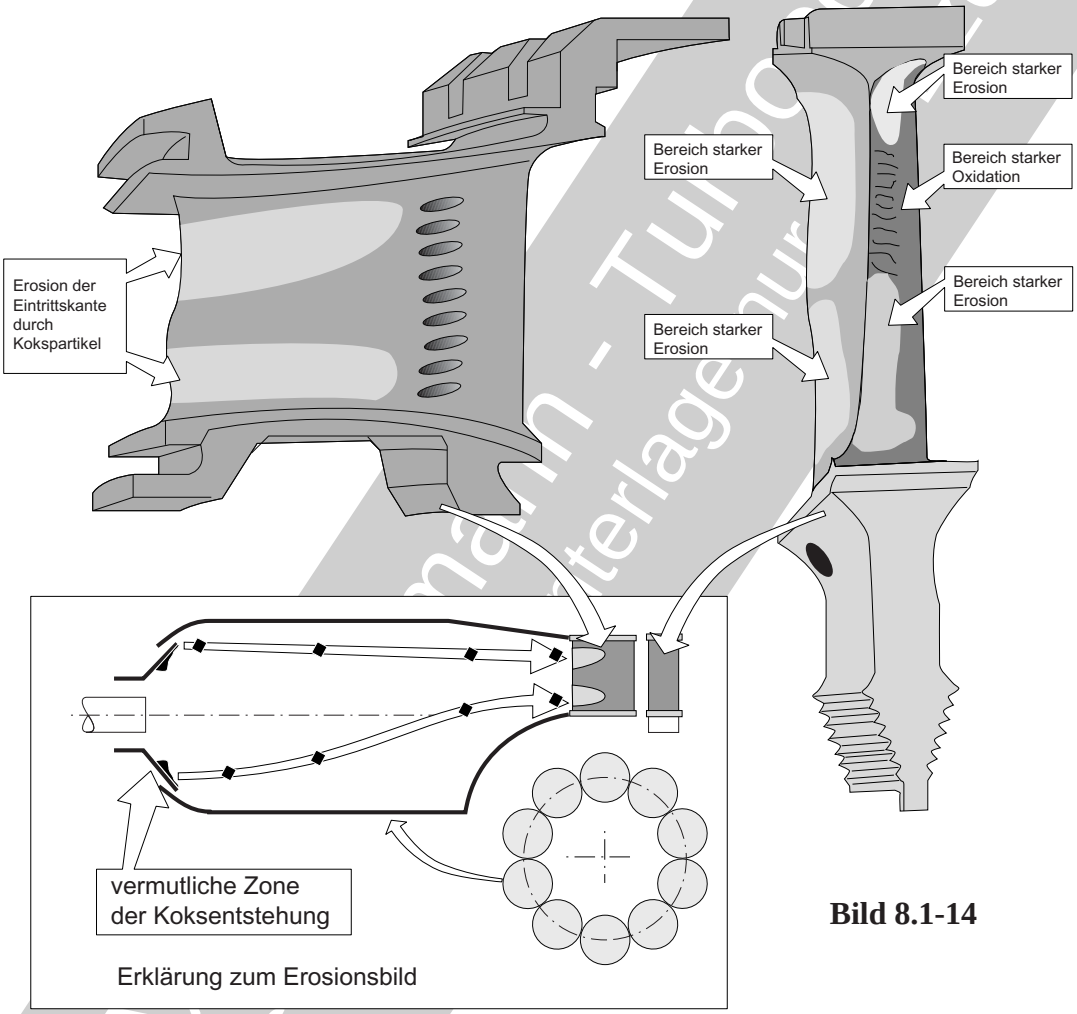


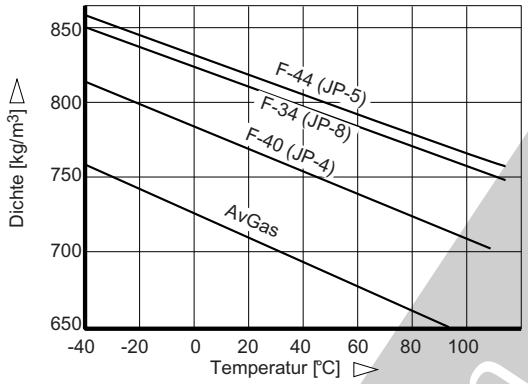
Bild 8.1-14

Bild 8.1-14 *(Lit 8.1-23):* ***Erosion durch Kokspartikel*** *(engl. carbon erosion) kann zum gravierenden Problem werden. Im dargestellten Fall handelt es sich um eine Marineanwendung. Sicher hat hier auch Heißgaskorrosion mitgewirkt und den Abtrag begünstigt. Interessant ist der verstärkte Abtrag in den Außenbereichen der Schaufelblätter sowie in der Nähe von Fußplattform- und Deckband. Anders als erwartet ist die Blattmitte offenbar weniger erodiert.*

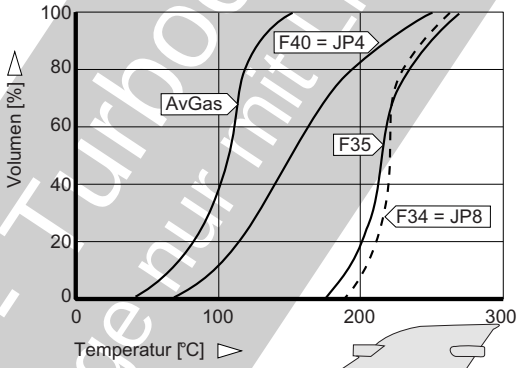
Als Abhilfe können die Blattflächen mit ***wärmebeständigen Hartschichten*** *versehen werden.*

Systeme und Betriebsstoffe: Das Kraftstoffsystem

Dichte, Siedeverlauf und Dampfdruck können Verbrennungsvorgänge stark beeinflussen und müssen deshalb beim Wechsel des Kraftstoffs berücksichtigt werden. Das gilt auch für Verbrennungsmotoren und Kraftwerke.



Siedeverhalten verschiedener Kraftstoffe bei atmosphärischem Druck



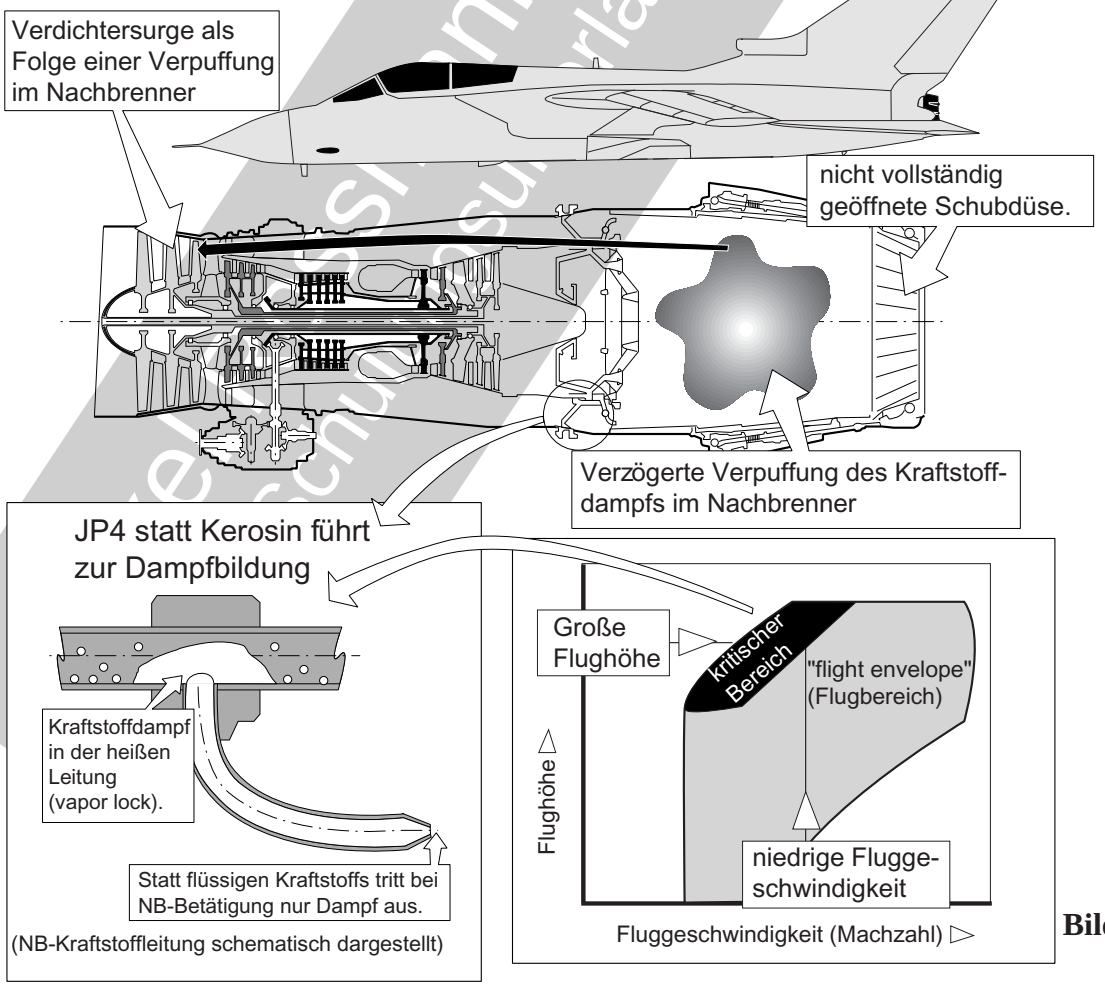


Bild 8.1-15

Bildbeschreibung nächste Seite

Bild 8.1-15 *(Lit. 8.1-3):* ***Verbrennungsvorgänge*** *bei* ***Zündung und Betrieb*** *(Bild 8.1-3) von* ***Brennkammer und Nachbrenner*** *werden von den Kraftstoffeigenschaften merklich beeinflusst (Bild 8.1-12). Auch Probleme an anderen Triebwerkskomponenten, die auf den ersten Blick kaum mit Kraftstoffeigenschaften in Verbindung gebracht werden, können ausgelöst werden.*
Zu den problemrelevanten Eigenschaften eines Kraftstoffs gehört die ***Zusammensetzung****. In erster Linie ist es das Mengenverhältnis von Ketten-(aliphatisch) und Ringkohlenwasserstoffen (aromatisch, Bild 8.1-4). Von ihm sind wichtige Merkmale wie* ***Verdampfungsverhalten/Siedeverlauf*** *(Diagramm oben rechts) und Oxidationsverhalten abhängig. Kerosin (F34 und F35, Bild 8.2-1.1) verdampft erst ab ca. 180°C. Dagegen beginnt F40 (JP4) bereits bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen von 65°C zu verdampfen. Die Kurven verschieben sich unter steigendem Atmosphärendruck zu höheren Temperaturen.*
Die temperaturabhängige ***Viskosität*** *des Kraftstoffs beeinflusst* ***Sprühbild*** *und* ***Tröpfchengröße****.*
Zusätzlich sind ***Umgebungsparameter wie Temperatur und Druck*** *für Eigenschaften wie die* ***Dichte*** *(Diagramm oben links) von Bedeutung. Diese wirkt sich auf das Kraftstoffvolumen und damit auf den* ***Tankvorgang*** *aus.*

Startprobleme*: Die* ***Startcharakteristik*** *des früh verdampfenden JP4 ist von einer kürzeren Zeit bis zur Zündung charakterisiert (Lit. 8.1-24). Das wirkt sich entsprechend auf die Zeit des* ***Anlassvorgangs*** *aus. So wird der* ***Anlasser geschont*** *(Lit. 8.1-24). In diesem Zusammenhang spielt die hohe Zähigkeit des kalten Öls eine verschärfende Rolle (Bild 8.1-1).*
Auch Probleme beim ***Start des Nachbrenners*** *in großen Höhen und bei niedrigen Fluggeschwindigkeiten (Lit. 8.1-23; Diagramm unten rechts) können im Zusammenhang mit den Zündeigenschaften des Kraftstoffs stehen. Führt eine* ***verzögerte Zündung*** *zu einem starken Druckimpuls, kann das einen gefährlichen* ***Strömungsabriss*** *(Pumpen, Surge) im Verdichter auslösen (Skizzen Mitte).*

Probleme durch Kavitation*: Ein frühes Verdampfen bei niedrigen Temperaturen (z.B. JP4) begünstigt* ***Dampfblasenbildung*** *im Kraftstoffstrom. Bei der Implosion der Dampfblasen an Orten höheren Drucks können* ***hochfrequente Schwingungen*** *entstehen.* ***Ermüdungsschäden*** *und Beschädigungen der Oberflächen kraftstoffleitender Komponenten sind mögliche Folgen. Gefährdet sind* ***Pumpen, Dichtungen und Regler*** *(Lit. 8.1-24). Darüber hinaus können* ***Schwingungen im Kraftstoffstrom*** *die Funktion des* ***Reglers*** *und des* ***Einspritzsystems beeinträchtigen****.*

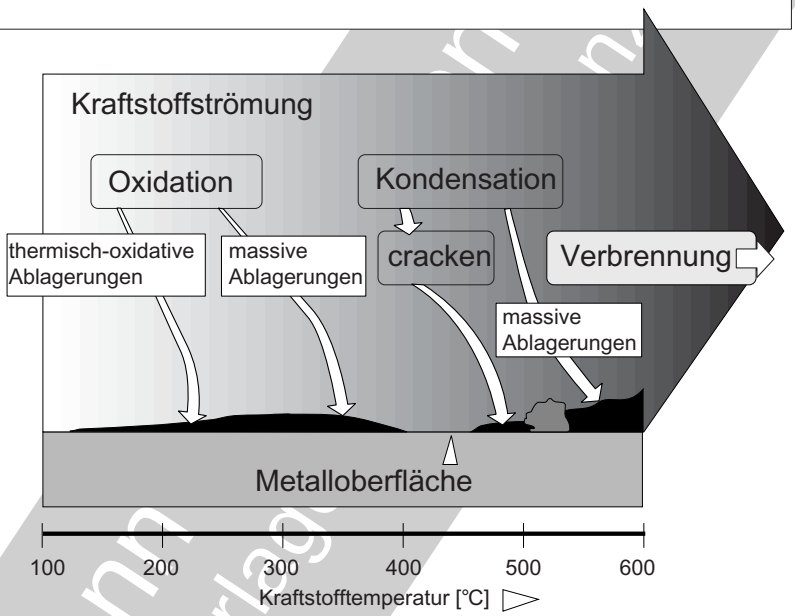
Die ***behinderte Kraftstoffzufuhr durch Dampfblasenbildung*** *(vapor lock) vor einer Kraftstoffdüse (Rahmen unten links) ist ein verwandtes Problem.*

© Axel Rossmann - Turbomaschinen
Ausschnittsunterlagen/Illustrationen

Systeme und Betriebsstoffe: Das Kraftstoffsystem

Die thermische Überlastung von Kraftstoffen bleibt ein aktuelles Thema. Sie kann auf vielfältige Weise zu Schäden beitragen.

Ablagerungen aus dem Kraftstoff infolge erhöhter Temperaturen.



Übergeordnete chemische Abläufe

- Kohlenwasserstoffe aus dem Kraftstoff: C-5 bis C15, Paraffine, Naphtane, Aromate
- Spuren von Schwefel- und Stickstoffverbindungen
- Geringe Anteile von Olefinen
- Additive

→

- Erste Oxidationsprodukte
- Lösliche Produkte entstehen im Kraftstoff
- Niedriger Sauerstoffgehalt z.B. 8 - 10 %
- Einbau von Schwefel und Stickstoff in die entstehenden Produkte

→

- Erweiterte Oxidationsprodukte
- Unlösliche Produkte im Kraftstoff
- Hoher Sauerstoffanteil, 18 -25%
- Einbau von Schwefel und Stickstoff
- Hohes Molekulargewicht (200-600)

Übergeordnete physikalische Abläufe

Agglomeration von Molekülen unlöslicher Oxidationsprodukte im Kraftstoff.
Es entstehen spärische Mikropartikel von 500 - 3000 Angström (typisch 1000 A)

→

Sphärische Mikropartikel lagern sich an der Oberfläche aus der flüssigen Phase ab. Sie sammeln sich auch aus bewegter Flüssigkeit an Oberflächen.
Der Verlust flüchtiger Kraftstoff-anteile kann Partikel auf den Oberflächen zurücklassen.

→

Partikel vereinigen sich und fließen zäh. Sie erzeugen so lackartige Ablagerungen auf denen sich Partikel sammeln. Weitere Oxidation kann koks-artige Ablagerungen entstehen lassen

Bild 8.1-16

© Xenomnemon Schulungsunterlagen

Bild 8.1-16 *(Lit. 8.1-9, Lit. 8.1-14 und Lit. 8.1-17): Kraftstoffe können sich bei Betriebstemperaturen, für die ihre* ***thermische Stabilität*** *nicht ausreicht, zersetzen. Man unterscheidet in der Fachliteratur zwischen* ***Thermal Oxidation Stability*** *bei Sauerstoffzutritt und Thermal Stability wenn der Kraftstoff keinen gelösten Sauerstoff aufweist. Dabei entstehen feine* ***Kokspartikel*** *und/oder* ***Koksablagerungen*** *in unterschiedlicher Form (Skizze oben).*

- ***Weiche und gummiartige*** *werden als „****Gum****" bezeichnet.*
- ***Harte lackartige*** *(engl. fuel lacquering, varnishes),*
- ***Spröde Kokse****.*

Gewöhnlich bestehen alle aus ***Ansammlungen kleiner Kügelchen*** *(engl. microspheres), seltener aus Plättchen oder Stäbchen. Im Vergleich zum Kraftstoff ist ihr Wasserstoffanteil abgesenkt, die* ***Sauerstoffkonzentration und der Anteil an Stickstoff und Schwefelverbindungen*** *aber extrem erhöht.*

Eine thermische Zersetzung des Kraftstoffs kann im ***überhitzten Kraftstoff*** *oder an* ***heißen Wänden*** *erfolgen. Ein Beispiel sind* ***Zuleitungen*** *der* ***Düsen*** *und diese selbst (Lit. 8.1-23). Auch die Funktion anderer Elemente des Kraftstoffsystems wie* ***Wärmetauscher*** *(Kraftstoff/Öl) oder* ***Ventile*** *kann beeinträchtigt werden (Bild 8.1-15). Vom Kraftstoff können zusätzlich mitgeführte Partikel* ***Filter*** *blockieren.*

Am Übergang vom zellenseitigen Kraftstoffsystem zum Triebwerk liegen die ***Kraftstofftemperaturen*** *zwischen 80°C und 120°C. An den Kraftstoffdüsen wird die Kraftstofftemperatur unter 163 °C gehalten. Die höchsten Kraftstofftemperaturen, mit denen bei der heutigen Triebwerksgeneration zu rechnen ist, liegen bei 200 °C. Die maximal zulässige Temperatur kraftstoffbenetzter Düsenwände muss unter 205°C liegen.*

In Unterschall-Verkehrsflugzeugen dürfte die thermische Beständigkeit derzeitiger Kraftstoffe kein Problem sein. Kraftstoffe mit erweiterten Eigenschaften/Spezifkation können dagegen problematisch werden. Dazu gehören auch solche die nicht auf Petroleum basieren wie Kohle, Teersande und Schieferöl. Dies liegt an höheren Gehalten von Alkenen (Olefinen, Kohlenwasserstoffe mit Doppelbindungen), Verbindungen mit ***Stickstoff, Sauerstoff*** *oder* ***Schwefel*** *und* ***Spurenmetallen*** *(besonders Kupfer).*

Die Veränderung der Kraftstoffe (Folgen) unter erhöhten Betriebtemperaturen erfolgt chemisch und physikalisch (dargestellte Folgen). Das lässt auf die wichtige Rolle aromatischer Verbindungen und Spuren von organischen Stickstoff- oder Schwefelverbindungen beim thermischen Zersetzungsprozess schließen.

Die thermische Stabilität der Kraftstoffe ist mit ***Additiven*** *deutlich zu erhöhen. Es handelt sich um sog.* ***Antioxidantien*** *(Lit. 8.1-17). Sie verhindern die Bildung von Peroxiden (mit -O-O Gruppe). Ablagerungen werden kraftstoffabhängig bei 250°C bis um eine Zehnerpotenz verringert.*

Solche Additive (z.B. „+100") sind in der Lage, bereits vorhandene ***Koks-Ablagerungen bis zu 90% aufzulösen****. Damit besteht eine* ***reinigende Wirkung*** *auf das Kraftstoffsystem, insbesondere Rohrleitungen und Düsen.*

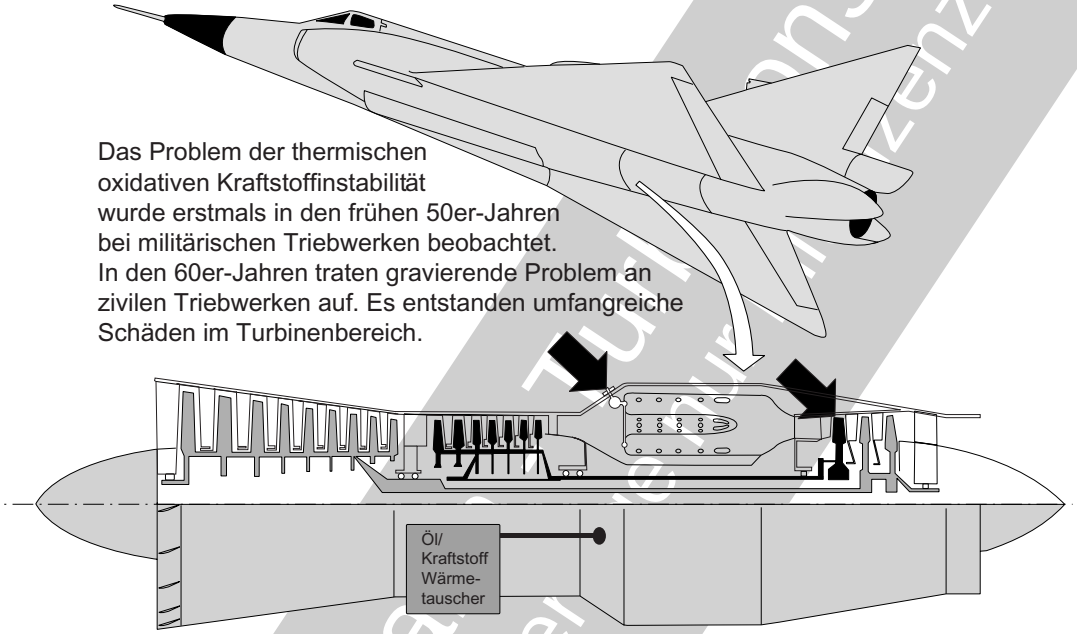
In besonderen ***Prüfeinrichtungen*** *(dünne erhitzte Rohre, Thermal Stability Rig = TSR) erfolgt die Untersuchung der thermischen Beständigkeit. Dabei werden erhöhte Temperaturen von 250, 350 und 400 °C angewendet, um die Versuchszeit abzukürzen.*

Bild 8.1-17 *(Lit. 8.1-1, Lit. 8.1-10 und Lit. 8.1-12): Bereits in den frühen 50er-Jahren traten bei ersten Militärtriebwerken mit höherem Druckverhältnis Probleme als Folge* ***zu hoher Kraftstofftemperatur*** *auf. Dies war konstruktionsbedingt, weil die Kraftstoffverteilung zu den Düsen in einem Primär- und Sekundärsystem im Verdichteraustrittsbereich angeordnet war. Das Sekundärsystem hatte im*

© Alfred Rossmann - Turbomaschinenlaboratorium

Systeme und Betriebsstoffe: Das Kraftstoffsystem

Typische Probleme und Schäden en ainer Turbomaschine (hier Flugtriebwerk) durch überhitzten Kraftstoff.



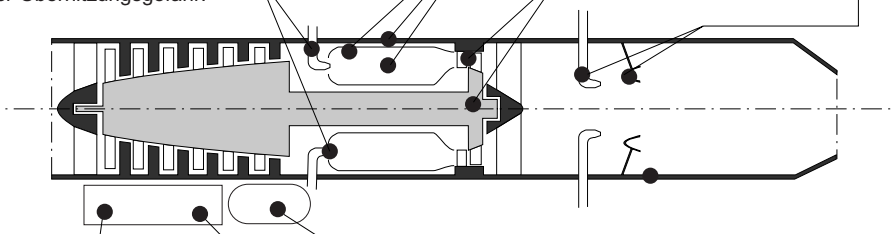
Instabiles Betriebsverhalten des Triebwerks

Kraftstoffverteilung und Kraftstoffdüsen: Verstopfen durch lackartige Ablagerungen oder Partikel. Erosion von Querschnitten. Betroffen sind enge Passungen, enge Strömungsquerschnitte, Strömungsteilerventile und Messquerschnitte Die Veränderungen erzeugen: Abnormalen Kraftstofffluss, unregelmäßige Verbrennung/Wärmeabgabe, Deformation des Sprühkegels mit örtlicher Überhitzungsgefahr.

Brennkammerwandung, Brennkammermantel: Schwingungen, Ausbrüche Überhitzen/ Durchbrennen Instabiles Verhalten

Beeinträchtigung der Funktion des **Nachbrenner-kraftstoffsystems** und des Betriebsverhaltens, Schwingungen.

Turbinenbereich: Schwere mechanische Schäden durch Schwingungen, Erosion der vorderen Stufen.



Blockieren beweglicher Teile im Kraftstoffsystem: Regler: Kolben, Ventile, Schieber

Lackartige Ablagerungen verschlechtern die Wirkung des **Öl /Kraftstoff-Wärmetauschers**

Blockieren beweglicher Teile in **Servosystemen:** Kolben, Ventile

Bild 8.1-17

Gegensatz zum Primärsystem nur einen geringen Kraftstoffdurchfluss. Das ließ die Kraftstofftemperatur über eine längere Betriebszeit ansteigen. In weniger als 100 Betriebsstunden bildeten sich im Kraftstoff unlösliche ***Ablagerungen,*** *die Zuführungen und Düsen verlegten. Die Folge waren* ***ungleichmäßige Temperaturverteilung und schwere Überhitzungen der Brennkammern****.*

Auch die Zuleitungen für den Kraftstoff dürfen nicht zu heiß sein. Überhitzungsgefährdete Kraftstoffverteilung und Einspritzung am Beispiel eines älteren Triebwerkstyps.

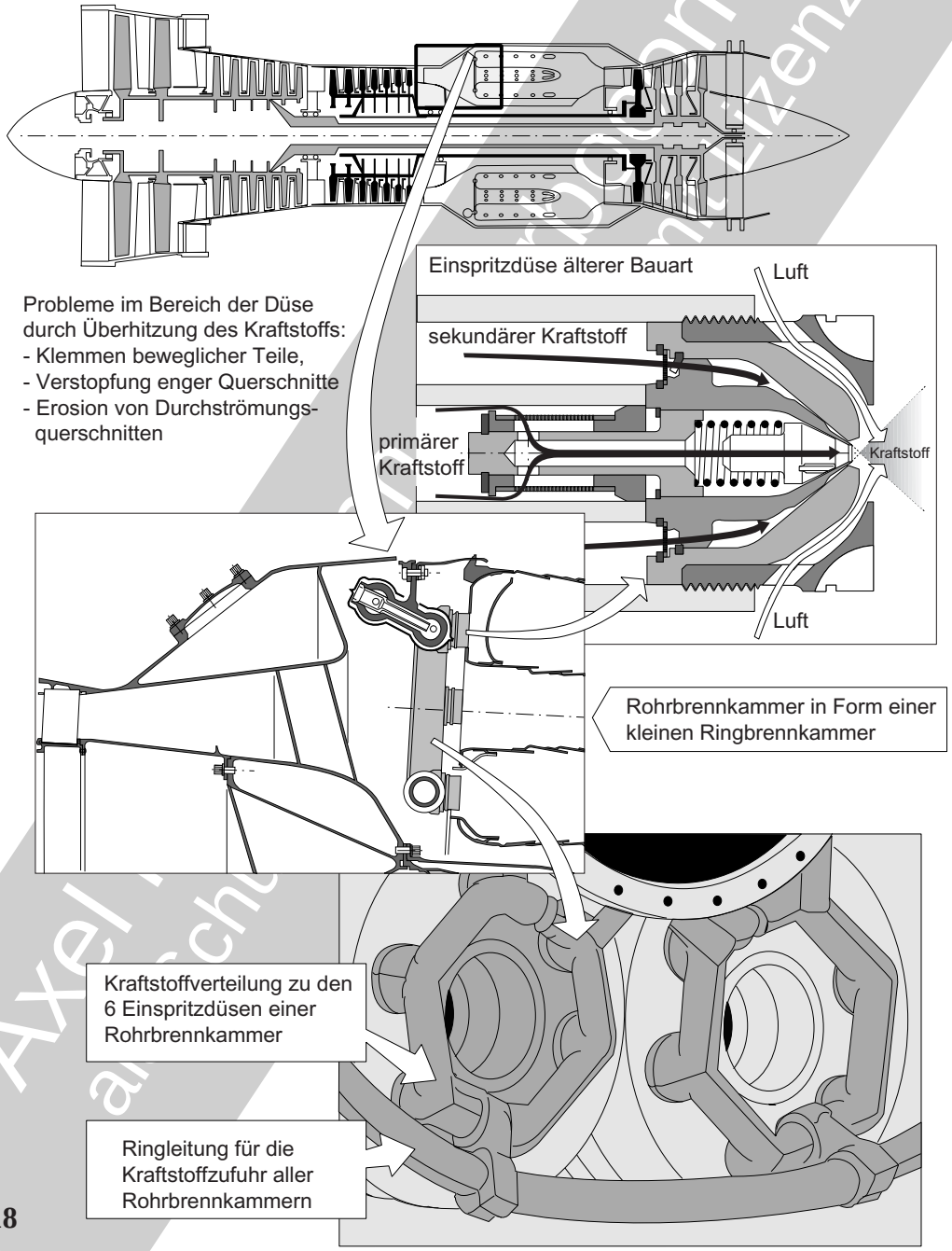


Bild 8.1-18

Bild 8.1-18 *(Lit. 8.1-10): In diesem frühen zivilen Triebwerkstyp kam es zu* ***gefährlicher Erosion von Luftdichtungen*** *und* ***Turbinenschaufeln.*** *So entstanden an der ersten Stufe hohe Reparaturkosten. Ursache waren Ablagerungen in den Kraftstoffdüsen (Detail oben rechts) die das* ***Sprühbild der Düsen*** *veränderten. Die* ***Kraftstoffverteilung am Verdichteraustritt*** *(Rahmen Mitte und unten) begünstigte eine gefährliche Aufheizung. Wahrscheinlich bildeten sich* ***erosiv wirkende Kokspartikel*** *in der Brennkammer (Bild 8.1-14 und*

Lit. 8.1-23). Ursache waren ***kupferhaltige Verunreinigungen im Kraftstoff*** *aus dem* ***Raffinerieprozess****.*
Probleme wurden auch an ***modernen Fantriebwerken*** *bei bestimmten Betreibern beobachtet. Dabei spielten geringe* ***Spezifikationsabweichungen*** *des Kraftstoffs eine Rolle. Bereits nach 3000 Betriebsstunden traten Folgen einer Beeinträchtigung der Funktion des Kraftstoffreglers auf. Es handelte sich um ungleichmäßige* ***Drehzahl/Leistungsschwankungen, Heißstarts, Verdichterpumpen und zu hohe Gastemperaturen****. Die schädlich hohen Kraftstofftemperaturen waren auf zu hohe Wärmeeinbringung aus dem Öl im Wärmetauscher für die* ***Kraftstoffenteisung*** *zurückzuführen.*

Bild 8.1-19 *(Lit. 8.1-5 und Lit. 8.1-7):*
Zum ***oben gezeigten Flugunfall*** *kam es nach ca. 650 Betriebsstunden. Ursache war das* ***verschleißbedingte Versagen*** *der* ***Vielkeilkupplung*** *der* ***Antriebswelle zur Kraftstoffpumpe****. In einer Woche hatten sich zwei weitere Fälle, beide am Boden, ereignet. Hier trat der Schaden jeweils nach einer Betriebszeit von ca. 800 Stunden auf.*
Nach dem Zerlegen der Pumpe war im Bereich der verschlissenen Kupplung ein roter ***pulveriger Belag*** *in Nuten und Dichtungen zu erkennen. Es handelte sich um ein Verschleißprodukt (****Reibrost****, Band 1 Bild 5.9.3-1, Lit. 8.1-26) der Wellenverzahnung. Der Kraftstofffilter hinter der Pumpe enthielt kleine Verzahnungsbruchstücke. Eine mechanische Ursache wurde für den Verschleiß nicht gefunden.*
Auffällig war, dass nur die Pumpen eines Herstellers im Betrieb ***besonders rauen Lauf und Vibrationen*** *zeigten. Sie liefen bei einem bestimmten Kraftstoff (Jet B)* ***deutlich lauter*** *als in Jet A. Entsprechend der Spezifikation hat Jet B einen* ***höheren Naphtha-*** *(engl naptha, niedriger siedendes Destillat) Anteil. Das erklärt eine* ***schlechtere Schmierfähigkeit*** *und damit den beschleunigten Verschleiß.*

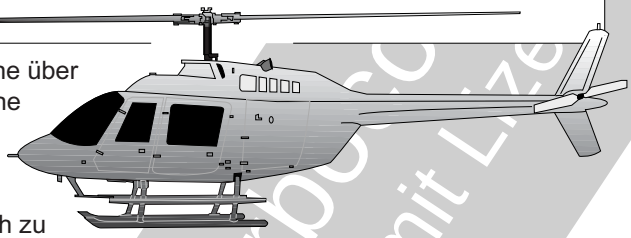
Im ***unten dargestellten Problem*** *handelte es sich um mehrere Ausfälle unterschiedlicher Triebwerkstypen die einem* ***speziell raffinierten Kraftstoff*** *(Jet-A1) zugeordnet werden konnten. In den kraftstoffgeschmierten Reglern war es zu starkem Verschleiß von* ***Vielkeilverzahnungen*** *der Wellenverbindung zwischen Kraftstoffpumpe und Regler (Rahmen unten links) gekommen. Dies wurde auf eine* ***schlechte Schmierfähigkeit des Kraftstoffs*** *zurückgeführt. Die Probleme traten ein, nachdem in der* ***Raffinerie mit einem neuen Verfahren*** *der* ***Schwefelgehalt*** *und andere Bestandteile im Kraftstoff reduziert wurden. Als Abhilfen dienten* ***Materialänderungen in den Kupplungsverzahnungen und Additive im Kraftstoff****.*

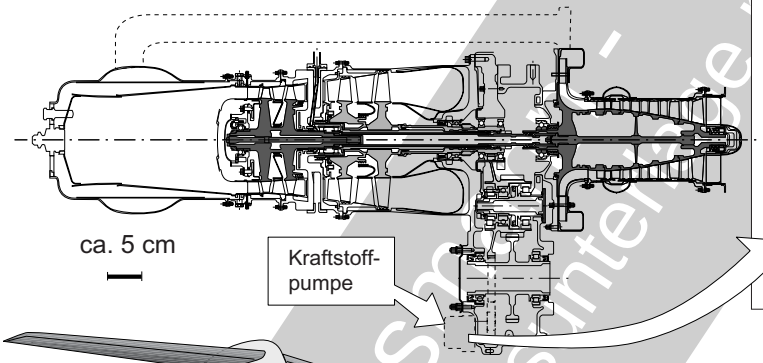
© Axel Rossmann - Turbocoach
als Schulungsunterlagen mit Lizenz

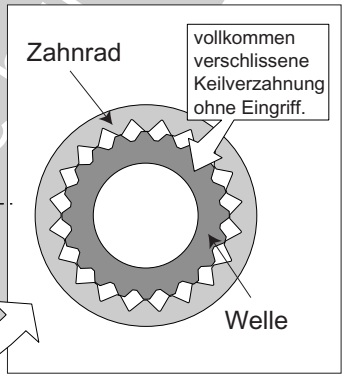
Systeme und Betriebsstoffe: Das Kraftstoffsystem

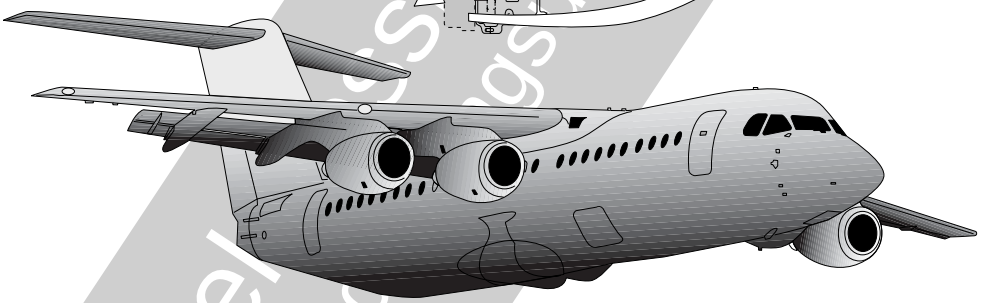
Kraftstoff mit schlechter Schmierwirkung steht im Verdacht Vibrationen und starken Verschleiß an Vielkeilwellen für den Kraftstoffpumpenantrieb auszulösen.

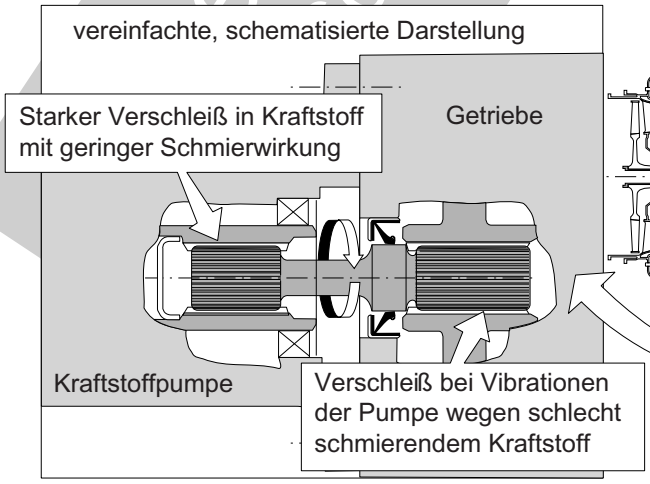
Während des Flugs in etwa 30 m Höhe über Grund fiel plötzlich das Triebwerk ohne warnende Geräusche oder Instrumentenanzeigen aus . Bei der eingeleiteten Autorotation versuchte der Pilot in einem Gleitflug einen Bach zu überqueren. Dabei verlor der Hauptrotor so viel Drehenergie, dass sich eine Landekufe in den Boden bohrte. Der Hubschrauber fiel auf die Seite und wurde stark beschädigt.











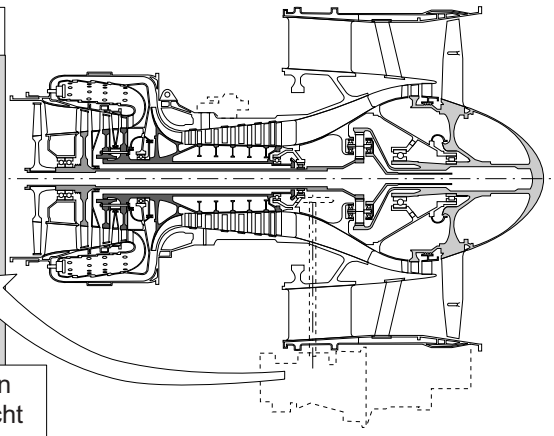


Bild 8.1-19

elektronisches Turbo - Lehrmaterial
Verwendungsinteresse nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Das Kraftstoffsystem

Filtersysteme müssen für anwendungsspezifische Sauberkeit des Kraftstoffs sorgen. In diesem Fall war das nicht gewährleistet. Es traten mehrere Flugunfälle durch Fehlfunktionen bis zum Versagen des Triebwerks wegen verstopfter Kraftstoffdüsen auf.

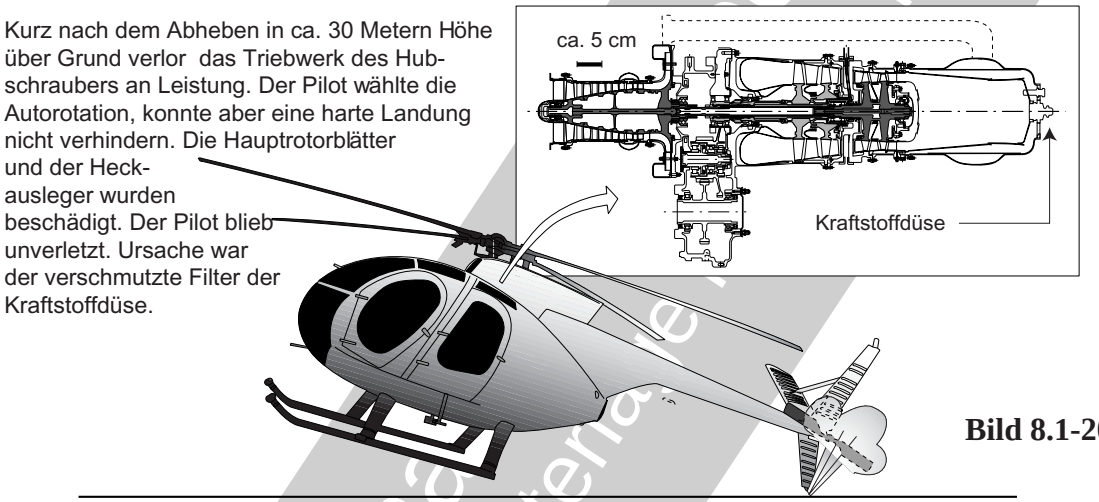


Bild 8.1-20

Drei Filtersysteme sollen für ausreichende Kraftstoffsauberkeit sorgen.

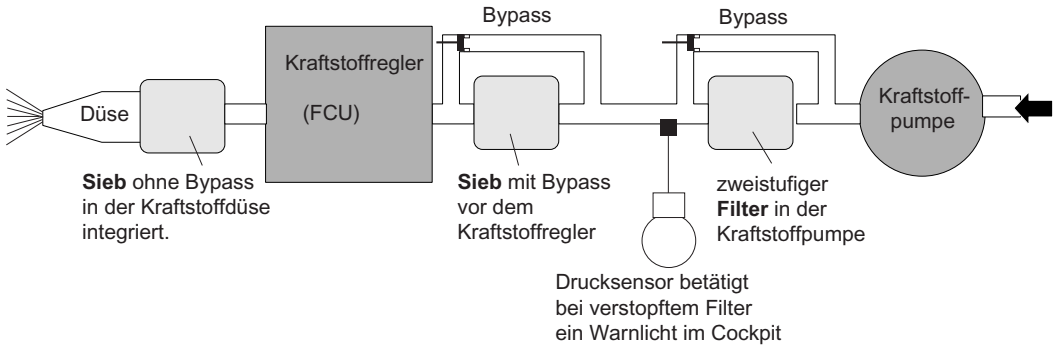


Bild 8.1-20 *(Lit. 8.1-15): Die nachfolgende Untersuchung ergab als Unfallursache eine* ***Verstopfung des Siebs*** *(engl. screen),* ***der bei diesem Triebwerkstyp einzigen Kraftstoffdüse*** *(Rahmen oben). Es handelt sich nicht um ein Fail-Safe-Design. Auch das Sieb des Kraftstoffreglers (Fuel Control Unit = FCU) und der Filter der Kraftstoffpumpe waren verschmutzt (Rahmen unten). Die Verschmutzung bestand aus* ***Fremdmaterial das Natriumchlorid*** *(Kochsalz)* ***enthielt.*** *Es ist in* ***Meeresatmosphäre*** *zu erwarten, in der das Triebwerk betrieben wurde. Die Notwendigkeit* ***regelmäßiges Verdichterwaschens*** *ist ebenfalls ein Indiz für erhebliche Luftverschmutzung. Offenbar waren diese Verunreinigungen in den* ***Kraftstofftank*** *eingebracht worden. Eine Erklärung könnte Bild 8.3-7 liefern.*

Vorgeschichte*: Eine 100/300-Stunden-Inspektion erfolgte ca. 20 Stunden vor dem Unfall. Das galt* ***nicht für die Siebe der Düse und der FCU****. Diese sind nur zu überprüfen, wenn das Bypasswarnlicht der Pumpenfilter aufleuchtet oder diese veschmutzt sind. Die Filter wurden jedoch getauscht.*

Vereisung des Kraftstoffsystems durch Kraftstoff ohne im Handbuch zwingend vorgeschriebenen "Anti Icing-Zusatz" kann katastrophal enden.

Der Hubschrauber mit zwei Piloten an Bord befand sich auf einem Übungsflug. Die Umgebungstemperatur lag bei -27 °C. Während einer Annäherung zu einer großen Lichtung ca. 25 Minuten nach dem Start in einer Höhe von ca. 50 Metern über Grund sank die Hauptrotordrehzahl ab und das Warnhorn ertönte. Der Pilot sah die Warnleuchte für niedrigen Öldruck und ging in Autorotation. Die Sinkgeschwindigkeit war hoch.
Bei der folgenden harten Landung berührten die durchschwingenden Hauptrotorblätter den Heckausleger und schlugen den Heckimpeller (Fenestron) ab.

Bild 8.1-21

In den vielen bereits aufgetretenen Fällen wurden die ***Kraftstoffdüsen nicht wie vom OEM vorgesehen getauscht.*** *Statt dessen ging das Wartungspersonal* ***bei Leistungsabfall entsprechend der Erfahrung*** *vor.*
Als eine Maßnahme wurden periodische Inspektionen auch des Siebs der Kraftstoffdüse vorgesehen.
Kommentar*: Leider ist der vorliegenden Literatur nicht zu entnehmen,* ***um welches Fremdmaterial*** *es sich handelte und wie dieses in den zahlreichen Fällen in das Kraftstoffsystem gelangen konnte. Da die Vorkommnisse* ***nur an Hubschraubern ohne die optionalen Filter im Kraftstofftank*** *auftraten, ist davon auszugehen, dass die Verunreinigungen bei der Einfüllung des (bereits verunreinigten?) Kraftstoffs oder bei einer Tankentlüftung über längere Zeit in den Tank gelangten.*

Bild 8.1-21 *(Lit. 8.1-16): Die Untersuchung des Hubschraubers an der Unfallstelle gab keinerlei Hinweise auf den Leistungsabfall des Triebwerks. Bei einem nachfolgenden Prüflauf erreichte es alle Spezifikationswerte. Die vor dem Aufsetzen elektronisch gespeicherten Triebwerksdaten zeigten keine Überlastung des Triebwerks. Ebenso wenig ließ das Kraftstoffsystem Verunreinigungen erkennen. Das gilt auch für Wasser und Eis.*
Vor dem Flug wurde der Hubschrauber mit einer ausreichenden Menge von 130 Litern Jet A-1 Treibstoff betankt.Bei ***Außentemperaturen unter 0°C ist ein Enteisungszusatz verbindlich vorgeschrieben****. Dieser Zusatz verbindet sich unterhalb des Gefrierpunkts mit freiem Wasser im Kraftstoff. So können sich keine Eiskristalle bilden, welche die* ***Filter verstopfen*** *könnten.* ***Mit Enteisungszusatz vorgemischter Kraftstoff war nicht vorhanden****. Die Kraftstoff-*

© Aviomsshop.com
als Schulungsunterlage verwendet

rechnung ließ darauf schließen, dass auch ***kein Zusatz direkt in den Tank gegeben*** *wurde. Die Besatzung verlangte weder einen Zusatz noch sorgte sie selbst dafür.*
Obwohl kein direkter Nachweis möglich war, ***lag als Unfallursache nahe, dass der Kraftstoff bei niedrigen Außentemperaturen ohne Enteisungszusatz verwendet wurde****. Die entfernte Position des Triebwerks vom Cockpit und die Konzentration des Piloten auf den Landevorgang dürften das Unfallgeschehen beeinflusst haben. Das erklärt, warum der Leistungsabfall des Triebwerks nicht am Laufgeräusch erkannt wurde, sondern erst an den Warnsignalen.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 8.1

8.1-1 I.E.Traeger, „Aircraft Gas Turbine Engine Technology, Second Edition“, Verlag : Glencoe/McGraw-Hill 1994, ISBN 0-07-065158-2, Seite 204, 209, 245.

8.1-2 „The Jet Engine“, 5th Edition, Rolls-Royce plc, 1986, ISBN 0-9021231-2-35.

8.1-3 K.Bauerfeind, „Steuerung und Regelung der Turboflugtriebwerke“, Birkhäuser Verlag : 1999, ISBN 3-7643-6021-6, Seite 13, 135 und 136 bis 139.

8.1-4 L.Q.Maurice „F100 Fuel Sampling Analysis“, Wright-Patterson AFB OH, Report Number A766161, Sept. 1985, 136 Pages.

8.1-5 P.Phelan „’Green’ fuel sparks off fears of engine failure“, Zeitschrift „Flight International“. 17-23 August 1994, Seite 6.

8.1-6 „Aviation Jet Fuel Information“, www.csgnetwork.com/jetfuel.html, 25.08.2006, Seite 1-4.

8.1-7 Transportation Safety Board of Canada, Aviation Occurrence Report Number A97W041, „Engine Failure, Fireweed Helicopters Ltd., Bell 206B C-FNIQ, Dawson, Yukon, 24 July 1997“,Seite 1-4.

8.1-8 „Aviation fuels“, Chapter 2 Aviation Turbine Fuel Performance, Fa. Chevron, 5.11.2005, Seite 1-8.

8.1-9 T.Edwards „Prospects for JP-8+225, A Stepping Stone to JP-900“, Paper AIAA 98-3532 der „34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, July 13-15, 1998, Cleveland,OH“, Seite 1-13.

8.1-10 R.N.Hazlett, „Thermal Oxidation Stability of Aviation Turbine Fuels“, ASTM Publication Code Number (PCN) 31-001092-12.

8.1-11 S.L.Forgham, R.G.Beckett, „Fuel Related Problems in Aircraft Fuel Systems“, Proceedings No. AGARD-CP-84-71 der AGARD Conference on „Aircraft Fuels, Lubricants, and Fire Safety“, Seite 9-1 bis 9-14.

8.1-12 C.A.Moses, „U.S. Army Alternative Gas-Turbine Fuels Research: MERADCOM“, Proceedings No. AGARD-CP-353 der AGARD Conference on „Combustion Problems in Turbine Engines“, Cesme, Türkei, 3-6 Oktober 1983, Seite 7-1 bis 7-5.

8.1-13 R.A.Rudey, J.S.Grobman, „Impact of Future Fuel Properties on Aircraft Engines and Fuel Systems“, Proceedings No. AGARD-LS-96 der AGARD Lecture Series on „Aircraft Engine Future Fuels and Energy Conservation“, Cesme, Türkei, 16-17 Oktober 1978, Seite 6-1 bis 6-29.

© Axel Bossmann - Turboconsult
Ausbildungsunterlage nur mit Lizenz

8.1.2-14 C.E.Baker, D.A.Bittker, S.M.Cohen, G.T.Seng,, „Research on Aviation Fuel Instability“, Proceedings No. AGARD-CP-353 der AGARD Conference on „Combustion Problems in Turbine Engines“, Cesme, Türkei, 3-6 Oktober 1983, Seite 2-1 bis 2-7.

8.1.2-15 National Transportation Safety Board, Safety Recommendation, J.Hall, „In reply refer to: A-98-84 through -86“, September 8, 1998, Seite 1-4.

28.1-16 Transportation Safety Board of Canada, Aviation Occurrence Report Number A01W0297, „Loss of Engine Power, Hard Landing“, Arctic Sunwest Charters LTD., Eurocopter EC120B C-GRTA, Yellowknife, Northwest Territories, 18 December 2001, Seite 1-4.

8.1-17 L.H.Hansen, G.D.Kucera, J.S.Clemons, J.Lee, „ Aircraft Gas Turbine Engine Fuel Pumping Systems in the 21st Century“, Paper No. 96-GT-148 der „International Gas Turbine and Aeroengine Congress & Exhibition“, Birmingham, UK, June 10-13, 1996, Seite 1-9.

8.1-18 P. Rawson, „AMRL Evaluation of the JP-8+100 Jet Fuel Thermal Stability Additive“, Bericht Nr. DSTO-TR-1135 des „Defence Science & Technology Organisation, Airframes and Engine Division, Aeronautical and Maritime Research Laboratory“, Australia, April 2001, Seite 1-17.

8.1-19 „Common Rail - Was ist das und wie ist deren Funktion?“, http://www.commonrail.ch/ Stand Jan. 2012, Seite 1-6.

8.1-20 „Über Diesel-Injektoren und das Common-Rail-Einspritzsystem“, http:// Angaben der Fa. ‘Rösner’, www.werkzeugeonline.eu/diesel_injektoren, Stand Jan.2012, Seite 1-7.

8.1-21 „Einspritzdüse“, Angaben der Fa. ‘Rösner’, http://,www.14-wiki.de/wiki/ Einspritzd%C3%BCse, Stand Jan.2012, Seite 1-8.

8.1-22 „Bosch Einspritzsystem Düsen und Düsenhalter“, Angaben der Fa. ‘Bosch’, http:// www.umbscheiden.de/content/bosch-dieseltechnik.html, Stand Jan.2012, Seite 1und 2.

8.1-23 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 3“, 2000, ISBN 3-00-017733-7, Kapitel 11.2.1(.2), Kapitel 11.2.2 (.1, .2), Kapitel 11.2.3.2, Kapitel 11.2.4, Kapitel 11.4.und Kapitel 12.6.2.

8.1-24 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 1“, 2000, ISBN 3-00-005842-7, Kapitel 5.1.5, Kapitel 5.3.1, Kapitel 5.3.2 und Kapitel 5.4.5.

8.1-25 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 5“, 2008, ISBN 978-3-00-025780-3, Kapitel 21.2.2 und Kapitel 21.2.7.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

8.1-26 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 2“, 2001, ISBN 3-00-008429-0, Kapitel 6.1, Kapitel 6.2, Kapitel 7.0, und Kapitel 7.1.3.

8.1-27 E.Greuter, „Motorschäden - Schäden an Verbrennungsmotoren und deren Ursachen“, Vogel Buchverlag, 1994, ISBN 3-8023-1515-4, Seite 263 - 387.

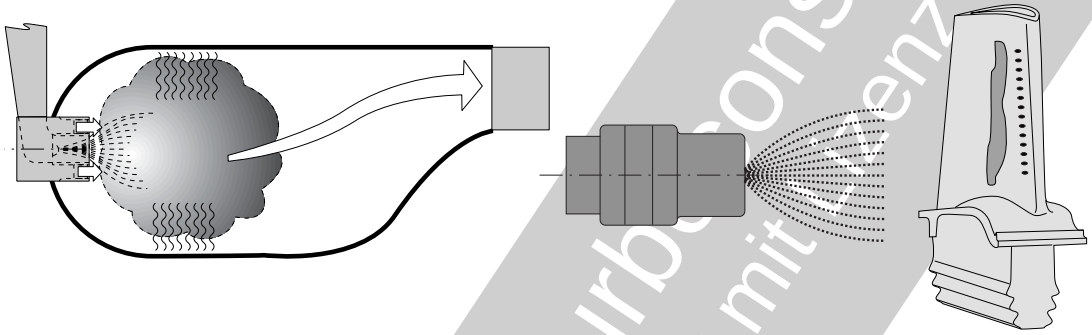
8.1-28 A. Rossmann „Industrie Gasturbinen - Problemorientierter Rateber für Betreiber“, 2009, ISBN 3-00-008428-2, Kapitel 2.6.

8.1-29 M. Brandauer, A. Schulz, S. Wittig, „Mechanisms of Coke Formation in Gas Turbine and Aeroegine Congress and Exhibition“, June 5-8, 1995.

8.1-30 „MotorAnalyser - Die ‘Do it Yourself’ Analyse für Ihren Motor“, Stand 2012, http://www.elv-downloads.de/Assets/Produkte/8/894/89498/Downloads/89498_motoranalyser_ds.pdf.. 2 Seiten

© Axel Rossmann - Turbocomsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

8.2 Kraftstoffeigenschaften



© Axel Rossmann - Turbosonsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Im **zivilen** (Bild 8.2-1.2) und **militärischen** Bereich kommen unterschiedliche, der Anwendung **angepasste Kraftstoffe** zum Einsatz (Bild 8.2-1.1). Herstellung, Transport und Lagerung (Bild 8.2-3) bestimmen die Qualität des Kraftstoffs. Damit werden typische Eigenschaften mit ihrer Wirkung auf Betriebsverhalten (Bild 8.2-8), Umwelt (Emissionen und Verbrauch) und Sicherheit der Maschinen beeinflusst. Der Konstrukteur hat sich heute gegebenenfalls auch auf ‘alternative’Kraftstoffe einzustellen (Lit. 8.2-9, Bild 8.2-2.1). Dazu gehören reine Pflanzenöle (z.B. **Rapsöl**), Gemische aus erdölbasiertem Dieselkraftstoff mit regenerativen Zusätzen (‘**Biodiesel**’), Dieselkraftstoffe aus Biomasse (Band 1 Bild 5.6.1.2-6) und **Alkohole** (Methanol, Ethanol). Deren Eigenschaften können sich deutlich unterscheiden. Das gilt sowohl für das Betriebsverhalten der Verbrennungskraftmaschinen/Motoren (Bild 8.1-1) als auch für spezifische Schadensmechanismen und deren Häufigkeit.

Hier spielen bereits die **Ausgangsstoffe** (Rohöl, Kohle bei synthetischen Verfahren) bzw. deren **Herkunft** (z.B. Ölquellen) eine Rolle. Die **Herstellung** wirkt sich über Verfahren und Verfahrenssparameter, Hilfsstoffe wie Katalysatoren sowie Additive aus. Deshalb kann es von Bedeutung sein, wo getankt wird bzw. von welchem Hersteller der Kraftstoff stammt.

Handhabung und Transport des Kraftstoffs kann die Qualität beeinflussen (Bild 8.2-7, Lit. 8.2-2). Während der **Lagerung** kann sich der Kraftstoff ebenfalls verändern. Typisch ist die Aufnahme von Wasser (Bild 8.3-3) als Voraussetzung für bakteriell angereicherten Schwefel (Bild 8.3-5).

Bild 8.2-1.1 *und* ***Bild 8.2-1.2*** *(Lit.8.2-9 und Lit. 8.2-10):* ***Kraftstoffe*** *werden heute aus Erdöl (fossile Brennstoffe) durch fraktionierte Destillation in einem turmartigen Aufbau erzeugt (Skizze oben). Dabei nutzt man die unterschiedlichen Verdampfungstemperaturen der Rohölbestandteile. Diese Fraktionen werden anwendungsspezifisch nachbehandelt. Damit soll erreicht werden:*

*- **Reduzierung von Schwefel**, Rückständen aus Reaktionen mit der Luft („Gums“) und Harzen.*

*- **Aufspaltung** („Cracken“) langkettiger Moleküle, um einen höheren Kraftstoffteil (z.B. Kerosin, Diesel Kraftstoff) zu gewinnen. Dies erfolgt thermisch und/oder katalytisch.*

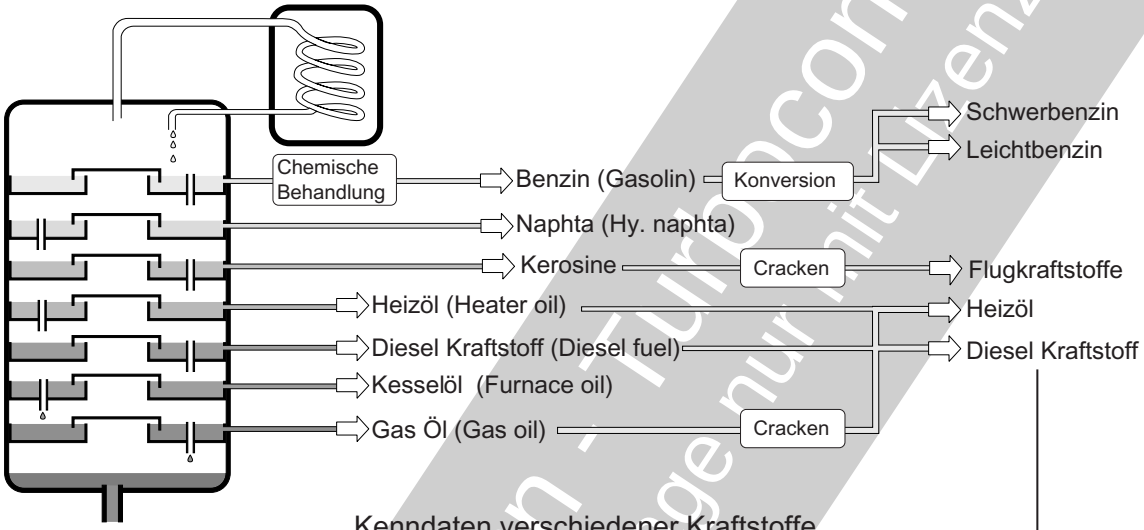
*- Kürzere Ketten können durch **Polymerisation** zu längeren Ketten verbunden werden.*

*- Einbringen von **Additiven,** die besonderen Eigenschaften des Kraftstoffs dienen (siehe Bild 8.2-1.2) :*

Unterdrücken von Bakterienwachstum,
Verhindern von Eisbildung,
thermische Stabilität,
Schmierfähigkeit,
zur Verhinderung von Korrosion (Inhibitor),
Reduzierung statischer Aufladung,
thermische Stabilität,

Systeme und Betriebsstoffe: Kraftstoffeigenschaften

Auch wenn Kraftstoffe aus der gleichen Fraktion stammen, können sich ihre Eigenschaften deutlich unterscheiden.



Kenndaten verschiedener Kraftstoffe

Kennwert		Einheit	Grenzwerte		
			Rapsöl	Rapsölmethyl-ester ("Biodiesel")	Dieselkraftstoff (DIN EN 590)
Dichte bei 15 °C		kg/m³	900 bis 930	875 bis 900	820 bis 845
Cetanzahl			> 42	> 49	> 51
Viskosität bei 40 °C		mm²/s	< 38	> 3,5 < 5,0	> 2,0 < 4.5
Flammpunkt		°C	> 220	> 110	> 55
Heizwert		MJ/l	> 35,8	> 35,2	> 35,6
CFPP Cold Filter Plugging Point		°C	> + 10	> - 10	> 0
Schwefelgehalt		mg/Kg	< 20	< 10	< 350
Koksrückstand		Gew.-%	< 0,4	< 0,05	< 0,3
Asche		Gew.-%	< 0,01	< 0,03	< 0,01
Wassergehalt		mg/Kg	< 800	< 300	< 200
Neutralisationszahl		mg KOH/g	< 2,0	< 0,5	
Iodzahl			100 - 120	< 115	
Phosphorgehalt		mg/Kg	< 15	< 10	
Methanolgehalt		Gew.-%		< 0,8	
Monoglyceride	Diglyceride	Gew.-%		< 0,4	
	Triglyceride	Gew.-%		< 0,4	
	Freies Glycerin	Gew.-%		< 0,02	
Alkaligehalt (Natrium + Kalium)		mg/Kg		< 5	

Bild 8.2-1.1

Oxidationsstabilität (Metalldeaktivatoren). Die historische Entwicklung vieler Triebwerkskraftstoffe sollte geeignete Betriebseigenschaften bei gesicherter Versorgung gewährleisten.

© Axel Rossmann - Turbocons
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Kraftstoffeigenschaften

Beispiele für Additive in Dieselkraftstoffen

nach Lit. 8.2-9

Typ	Wirkung
Zündbeschleuniger	Erhöhung der Cetanzahl
Oxidationsinhibitor	Lagerungsstabilität
Rußvermeidung (Anti-Smoke)	Vollständige Verbrennung im Katalysator
Korrosionsschutz	im Kraftstoffsystem
Detergent/ Dispersant	Verhindert Ablagerungen in der Einspritzung
Leitfähigkeitsverbesserer	verhindert elektrostatische Aufladung
Metalldeaktivatoren	verhindert Katalysatoreffekt von Cu-Ionen
Fließverbesserer	dünnflüssig bei Kälte
Aromastoffe	reduziert Dieselgeruch
Biozide	verhindert Bakterien- und Pilzwachstum
Verschleißschutz	Schmiert Komponenten des Kraftstoffsystems (Pumpen, Einspritzventile)

Bild 8.2-1.2

Dieselkraftstoff *stammt aus einer Fraktion zwischen Heizöl und Kerosinen. Er enthält eine Reihe von Additiven (Bild 8.2-1.2) mit unterschiedlicher Wirkung.*

Flugkraftstoffe *für Turbotriebwerke sind Mischungen (z.B. mit Benzin), die nur zum Teil Kerosin enthalten. Im militärischen Bereich wurden so* ***„JP-Kraftstoffe“*** *entwickelt. Sie entsprechen der MIL-J-5624 -Spezifikation. Im* ***zivilen*** *Einsatz kennt man die „****Jet-A und Jet-B****“ Kraftstoffe nach der ASTM-Spezifikation D-1655. Darüber hinaus gibt es nationale, militärische und firmeneigene Bezeichnungen (Lit. 8.2-10).*

Bild 8.2-2.1 *und* ***8.2-2.2*** *(Lit.8.2-9): Reine* ***Planzenöle****, insbesondere* ***Rapsöl*** *erfordern insbesondere wegen Fettbegleitstoffen eigens* ***abgestimmte und konstruktiv angepasste Maschinen/Motoren****. Dabei geht es nicht nur um Mechanische Problöeme wie Verschleiß oder Korrosion sondern auch u8m den Verbrennungsvorgang.*

Rapsöl *(siehe auch Bild 8.2-1) in reiner Form im raffinierten Zustand ist trotz Entfernung störender Begleitstoffe (Bild 8.2-2.2) für den Konstrukteur und Entwickler eine Herausforderung. Bei motortypischer Erwärmung kann es zu Verharzung kommen. Besonders problematisch sind* ***Schleimstoffe*** *die Kraftstofffilter zusetzen. Wie allgemein in Pflanzenölen vermehren sich im Rapsöl während des Stillstands verstärkt* ***Pilze*** *und* ***Bakterien****. Betroffen ist das gesamte Kraftstoffsystem.*

Rapsöl enthält ca. 11 % chemisch ***gebundenen Sauerstoff****. Dies gleicht den energetischen Vorteil der höheren* ***Dichte*** *gegenüber Dieselkraftstoff wieder aus*

Die vergleichsweise niedrige ***Cetanzahl*** *beeinträchtigt das Laufverhalten und erhöht das Geräusch des Motors. Die hohe* ***Viskosität*** *beeinträchtigt die* ***Zerstäubung und damit die Verbrennung.*** *Deshalb genügen die im ‘normalen’ Dieselmotor üblichen Verbrennungstemperaturen nicht. Die Folge sind Verkokung der Einspritzdüsen und Kolbenringe sowie Rußablagerungen und -emission. Abhilfe kann ein geeignet gestalteter Brennraum (z.B. kugelige Mulde im Kolbenboden) bringen. Die hohen Bauteiltemperaturen machen eine Eisen- statt Aluminiumlegierung notwendig. Die* ***geringe Entflammbarkeit*** *vermeidet eine Gefahrenklasse was Transport, Lagerung und Handhabung sicherheitstechnisch erleichtert. Problematisch ist die* ***Filterung*** *im Motor, da früh* ***Dickflüssigkeit*** *eintritt (Bild 8.1-5). Die* ***Kaltstarteigenschaften*** *bei niedrigen Außentemperaturen können auf Grund fehlender*

Fortsetzung auf Seite 5

© Axel Rossmann - Turbocoach
Vorlesungsunterlage mit Lizenz

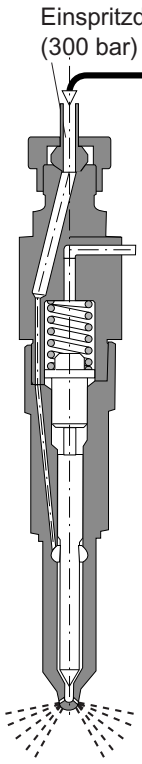
'Biodiesel' und Rapsöl haben Besonderheiten die vom Konstrukteur zu berücksichtigen sind.

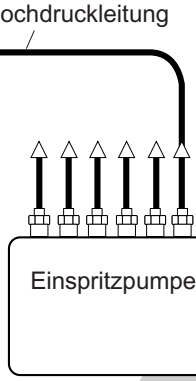
Besonderheiten im ('konventionellen') Einspritzsystem bei 'Biodiesel'.

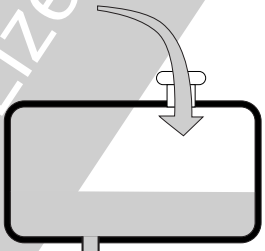
zu berücksichtigen
- Quellen von Gummi- und Kunststoffen (Leckagen)
- Materialtausch benetzungsgefährdeter Schläuche

Vorteile
Lagerung und Transport
- Nicht als Gefahrgut eingestuft
- Niedrige Wassergefährdungsklasse (biologische Abbaubarkeit)

zu berücksichtigen
- Deutlich verstärktes Biofouling in Lagertanks.
- Methanolgehalt kann Gefahrenklasse erhöhen.







Vorteile
- Filtrierbarkeit ohne Winteradditiv bis -10°C

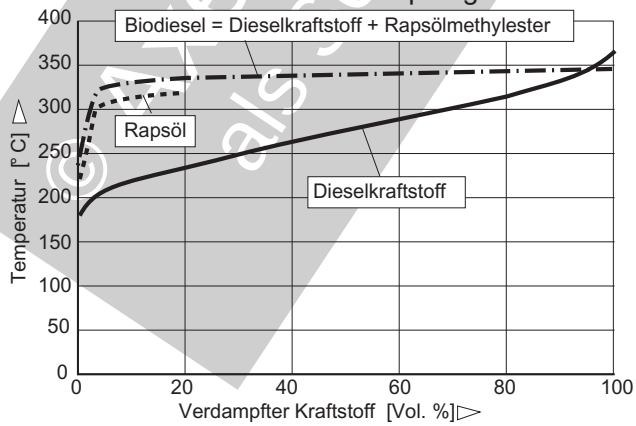
zu berücksichtigen
- Quellen von Gummi- und Kunststoffen
- Filtertausch nach Wechsel zu 'Biodiesel' weil vorhandene Ablagerungen gelöst wurden.

Höhere Viskosität verbessert die Schmierung gleitender Teile.

Vorteile
- Kraftstoffdichte ca. 5 % höher
- beschleunigte (bessere) Verbrennung
- deutlich höherer Flammpunkt (>100 °C)
- sehr wenig Schwefel günstig für Kat.
- 'Biodieselgeruch' durch Glyceride.

zu berücksichtigen
- Verdünnung des Motoröls bei Niedrigdrehzahlbetrieb vergleichbar Diesel-Kraftstoff.

Unterschiede im Verdampfungsverhalten



Abgasemissionsgrenzen

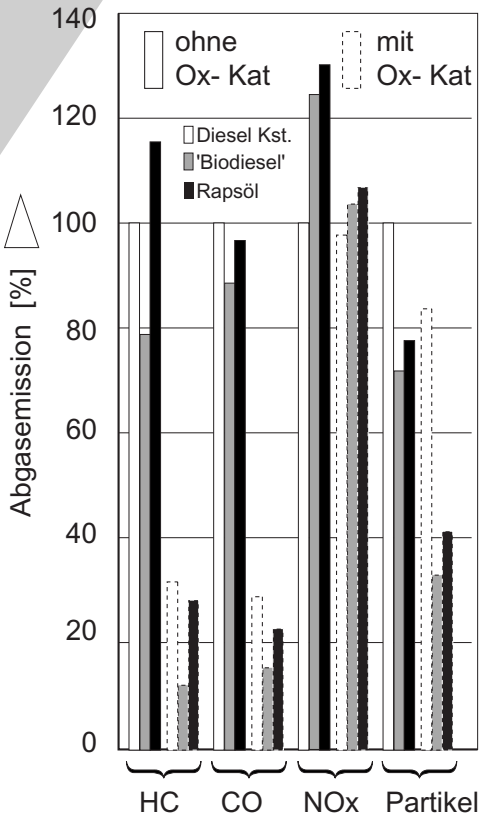


Bild 8.2-2.1

Systeme und Betriebsstoffe: Kraftstoffeigenschaften

Eigenschaften der Fettbegleitstoffe am Beispiel von Rapsöl

frei nach Lit. 8.2-9

Fettbegleitstoffe	Gewichts-Anteil [%]	Problematische Eigenschaften	Trenn-verfahren
Ungelöste, suspendierte Bestandteile	0,3 - 0,5	Verstopfen von Systemkomponenten wie Filter und Leitungen	Filterung (mechanisch)
Harze und Schleime, Proteine, Phosphatide	0,1 - 2	Verstopfen von Systemkomponenten wie Filter und Leitungen	'Entschleimung' mit sauren Phosphorverbindungen
Freie Fettsäuren	0,3 - 22	Senkung des Flammpunkts, Korrosiv bei Eisenwerkstoffen	Entsäuerung mit Laugen
Farbstoffe	0,1	Ablagerungen (Düsen, Brennraum)	Bleichen mit Adsorptionsmitteln
Geruchsstoffe	0,1	Ablagerungen (Düsen, Brennraum)	Desodorieren durch Destillation

Bild 8.2-2.2

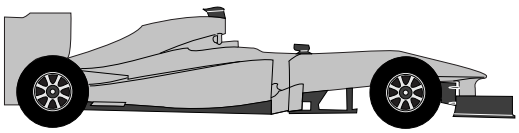
Fortsetzung von S. 8.2-3

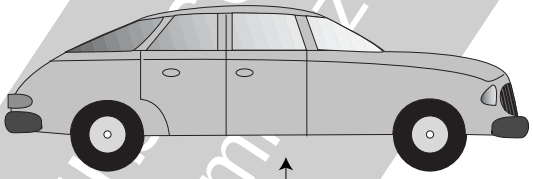
leichflüchtiger Bestandteile problematisch sein. Das erfordert eine angepasste ***Startautomatik****. Darüber hinaus ist eine* ***Heizung*** *der Rohrleitungen, des Tanks und der Filter notwendig. Der mehrfach gegenüber Diesel Kraftstoff höhere* ***Wassergehalt*** *kann sich korrosiv bemerkbar machen.Das gilt auch für verbliebene freie Fettsäuren.* ***Phosphorbestandteile*** *können als Oxide sehr hartnäckige* ***Ablagerungen*** *bilden. Wegen der schlechteren Verbrennung kann insbesondere bei niedrigen Drehzahlen mehr Rapsöl über die Kolbenringe* ***in das Schmieröl*** *des Motors gelangen und die* ***Schmierfähigkeit*** *gefährlich verschlechtern. Das erfordert eine deutlich* ***höhere Schmierölmenge*** *und kürzere* ***Ölwechselintervalle****. Grundsätzlich müssen alle* ***Werkstoffe*** *im Kraftstoffsystem, insbesondere* ***Kunststoffe*** *(Dichtungen, Schläuche) aber auch Metalle so gewählt sein, dass keine Schädigung eintritt. '****Biodiesel****' ist Diesel Kraftstoff mit bis zu 10%* ***Rapsölmethylester*** *(RME). Im Folgenden werden Unterschiede zum üblichen Diesel Kraftstoff beschrieben. Viele Nachteile des reinen Rapsöls werden so deutlich gemildert. Gegenüber Rapsöl verbessert sich die Verbrennung. Das reicht für einen ruhigen Lauf des Motors und verbesserten Wirkungsgrad. Biodiesel ist mit einem Flammpunkt über 100°C ähnlich wie Rapsöl kein Gefahrengut. Das hat entsprechende Vorteile für Handling, Transport und Lagerung. Katalysatoren profitieren von der weitgehenden Schwefelfreiheit. Die biologische Abbaubarkeit des RME führt zu Problemen bei der Lagerung. Selbst der relativ kleine Anteil kann die* ***Bildung von Mikroorganismen*** *(Bakterien, Pilze, Bild 8.3-5) bis zu verzehnfachen (Lit. 8.2-11). Das macht sich bei langen Stillstandszeiten und besonders der Langzeitlagerung bemerkbar. Es kommt zur Schleimbildung und Verstopfungsgefahr. Im Gegensatz zu Flugkraftstoffen mit merklich höherem Schwefelgehalt durfte dessen Anreicherung bei Biodiesel keine Gefahr für Heißteile (Sulfidation) darstellen. Der Wassergehalt ist nicht so gravierend wie bei Rapsöl. Enthält Biodiesel Methanol erhöht sich der Flammpunkt (Sicherheit?).* ***Rapsölmethylester*** *und gegebenenfalls der Methanolgehalt erfordern eine Anpassung der Werkstoffe im Kraftstoffsystem. Das gilt besonders für Kunststoffe. Dazu gehören Filter, Gummiteile (Schläuche und Dichtungen) und Lacke. Die Elastomere lassen sich mit Fluorkautschuk ersetzen.*

© Zöllmann - Fuhrobrsult
Vorlesungsunterlage nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Kraftstoffeigenschaften

Die Eigenschaften der Flüssigkraftstoffe mit zugehörigen Fachbegriffen sollten dem Konstrukteur von Verbrennungskraftmaschinen bekannt sein.



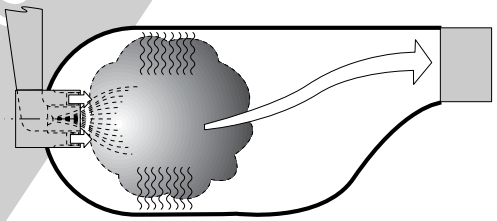


Dichte/Energiedichte

- Kraftstoffe mit hohem gewichtsbezogenem Energiegehalt sind eher für Maschinen mit ausreichend Tankvolumen und langen Lebensdauern geeignet.
- Kraftstoffe mit hohem volumenbezogenem Energiegehalt (höhere Dichte) sind eher für Maschinen mit für den Einsatz eingeschränktem Tankvolumen (Langstrecken) oder für den Hochleistungseinsatz interessant.

Verbrennungscharakteristik

Die Neigung zur Rußbildung, d.h. Verdampfungs- und Oxidationseigenschaften beeinflussen die Wärmestrahlung und damit die Heißteillebensdauer (Bild 8.1-12).
In Kolbenmotoren wirkt sie sich auf die Belastung des Kurbeltriebs (Klopfen) und die Leistung aus.

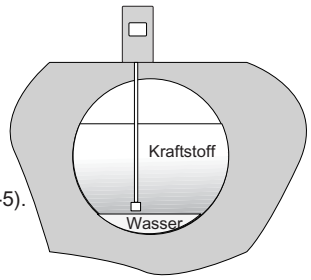


Chemische Stabilität:

Ein stabiler Kraftstoff behält seine Eigenschaften bei Lagerung (Storage Stability) und unter hohen Temperaturen (Thermal Stability, Bild 8.1-13 und Bild8.1-16) bei. Die Zersetzungsprodukte können indirekt und/oder direkt schadenswirksam werden.

Stabilität bei Lagerung (Storage Stability):

Mindestzeit 1 Jahr. Das Verhalten ist von derKraftstoffkomposition, Verunreinigungen (z.B. Wasser) und den Lagerungsbedingungen (Bild 8.2-7), insbesondere der Temperatur abhängig (Wachstum der Mikroorganismen, Bild 8.3-5).



Thermische Stabilität (Thermal Stability):

Eine der wichtigsten Kraftstoffeigenschaften (Bild 8.1-16). Erhöhte Temperaturen beschleunigen die Zersetzung. Diese Produkte können Filter, Düsen (Bild 8.1-13), Regler und Wärmetauscher (Öl) blockieren.

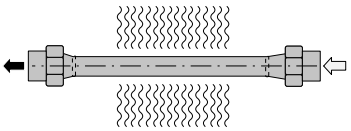


Bild 8.2-3

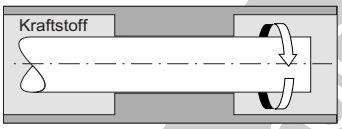
Bild 8.2-3, -4, -5 *(Lit. 8.2-9 und Lit. 8.2-10, Lit. 22.2.1-2 und Lit. 22.2.1-6): In diesen Bildern werden* ***Eigenschaften*** *der Kraftstoffe (Bild 8.2-6)* ***mit zugehörigen Begriffen*** *genauer erklärt.*

©Ave Rossmann - Tutorium für die Schulungsunterlage nur mit Zeichen

Systeme und Betriebsstoffe: Kraftstoffeigenschaften

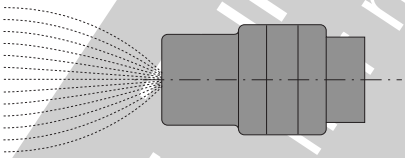
Schmierfähigkeit (Lubricity):

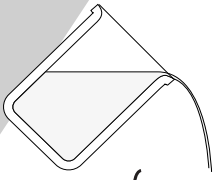
Es handelt sich um eine nicht spezifizierte Eigenschaft, die nur versuchstechnisch überprüfbar ist. Sie minimiert die Reibung zwischen Gleitflächen (Bild 8.1-11 und Bild 8.1-19). Wirksam werden dabei Grenzflächen- und hydrodynamische Schmierung.
Höhere Viskosität (siehe auch "Viskosität") verbessert die hydrodynamische Schmierung. Grenzflächenschmierung wird von schützenden Verbindungen die an den Gleitflächen haften, unterstützt. Dafür sind Spuren (wenige ppm) an Sauerstoff, Stickstoff- und Schwefelverbindungen im Kraftstoff verantwortlich. Diese können im ungünstigen Fall infolge Reaktion mit dem Gleitflächenmetall die Reibung ansteigen lassen (siehe auch "Bakterieller Einfluss").



Fließfähigkeit (Fluidity):

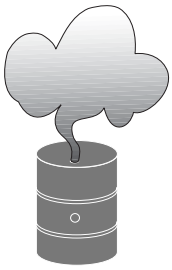
Es ist keine physikalisch definierte Eigenschaft. Sie ist gemeinsam mit Viskosität und Gefrierpunkt zu sehen (Bild 8.2-1.1).





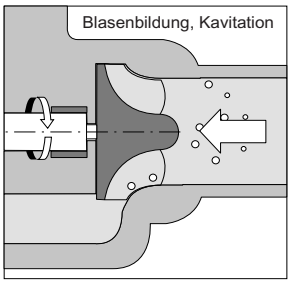
Viskosität (Viscosity):

Sie ist ein Maß für den Widerstand, den die Strömung einer Flüssigkeit der treibenden Kraft entgegensetzt.
Die Viskosität der Kraftstoffe (Bild 8.2-1.1) beeinflusst die Zerstäubung in den Kraftstoffdüsen (Tröpfchengröße,Sprühkegel). Davon ist der Verbrennungsvorgang (Leistung), sowiedas Start- bzw. Startverhalten in kalter Umgebung (bei Flugtriebwerken auch großen Höhen) betroffen. Der Widerstand in den durchflossenen Systemen wirkt sich auf die Leistung der Förderpumpen aus.
"Wide-cut"-Kraftstoffe sind wegen ihrer niedrigeren Viskosität für kalte Wetterbedingungen besser geeignet als Kerosin.



Gefrierpunkt, Erstarrungspunkt (Freezing Point):

Kraftstoffe haben wegen ihrer Zusammensetzung aus vielen Verbindungen einen Erstarrungsbereich (Bild 8.2-1.1). Der Gefrierpunkt ist deshalb als die Temperatur definiert, bei der während einer Erwärmung der letzte Bestandteil (Wachs) flüssig wird.
Der wichtigste Gesichtspunkt ist die Pumpbarkeit (Pumpability) aus dem Kraftstofftank.
Diese liegt für Turbinenkraftstoffe 4°C - 15 °C unter dem Gefrierpunkt.



Flüchtigkeit, Verdampfungsverhalten (Volatility):

Diese Neigung zur Dampfbildung wird vom Dampfdruck und dem Destillationsverhalten (Destillationsprofil) charakterisiert. Sie bestimmt die Verbrennungseigenschaften in der Brennkammer, aber auch Dampfbildung (Bild 8.1-15) und Kavitation (Bild 6.11.1.2-7 und Band 1 Kapitel 5.5.1.3) im Kraftstoffsystem sowie Verdampfungsverluste während der Lagerung.

Korrosives Verhalten (corrosivity):

Die vielfältigen Werkstoffe im Kraftstoffsystem, aber auch solche die versehentlich mit Kraftstoff in Kontakt kommen können, sind zu beachten: Metalle, Kunststoffe/Elastomere/Lacke, Beschichtungen, Verbundwerkstoffe usw. Korrosiv wirken z.B. organische Säuren und schwefelhaltige Verbindungen (Alkanthiole/Mercaptane). Das kraftstoffspezifische, korrosive Verhalten wird in Versuchen ermittelt. Bereits Spuren von Natrium, Kalium und anderen Alkali-Metallen können im Heißteil Korrosion auslösen (Bild 8.1-7 und Band 1 Kapitel 5.6.1.4).

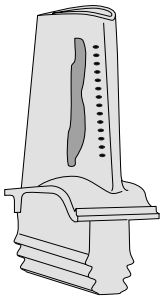
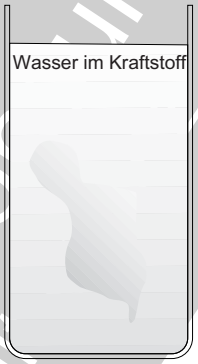


Bild 8.2-4

© Axel Kissmann - Ingocensult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Reinheit (Cleanliness):

Der Kraftstoff soll weder freies Wasser (Bild 8.3-3) noch Partikel wie Rost oder Schmutz (Bild 8.3-1) aufweisen. Hierbei kann es sich auch um im System gelöste Stoffe wie ungeeignete Elastomere (Bild 8.1-8) oder Filtermaterial handeln. Diese Verunreinigungen wirken auf vielfältige Weise schadensauslösend:



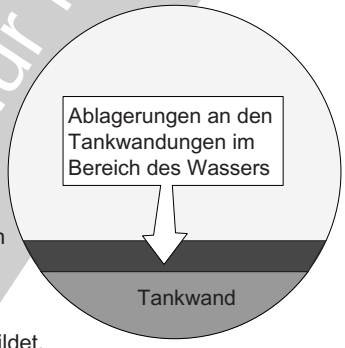
Partikel und Schmutz:

- Verstopfen von Filtern und Strömungsquerschnitten
- Verschleiß an Gleitflächen in Pumpen, Ventilen und Reglern

Wasser:

- Flüssig: Beeinträchtigung der Verbrennung in der Brennkammer
- Als Eis: Blockieren von Strömungsquerschnitten, Filtern und Sieben (Bild 8.3-7 und Beispiel 8.3-3)
- Auslösen von Korrosion
- Begünstigung von Kavitation (Bild 8.1-9).
- Verschleiß als Folge schlechter Schmierwirkung (Bild 8.1-19 und Bild 8.3-4).

Wachstum von Mikroorganismen:
Der Kraftstoff kommt steril aus der Raffinerie. Er kann aber schnell von Mikroorganismen wie Bakterien und Pilzen aus der Umgebung befallen werden. Besonders anfällig ist die Trennfläche abgesetzten Wassers zum Kraftstoff und zur Tankwand (Bild 8.3-5). Die hier entstehenden Ablagerungen verstopfen Filter und können mit sauren Nebenprodukten korrosiv wirken. Diese Verunreinigungen lassen sich mit einem niedrigen Gehalt an freiem Wasser vermeiden. Zusätze als "Biozide" (Vorsicht toxisch!) können Abhilfe bringen. Haben sich bereits Schichten gebildet, hilft nur die mechanische Reinigung des Tanks.



Sicherheitseigenschaften:

Kraftstoff ist leicht zündbar und brennt schnell fortschreitend. Dem Datenblatt des Lieferanten (Material Safety Data Sheet = MSDS) ist zu folgen. Nur der Dampf in einem geeigneten Luftgemisch brennt. Der brennbare Bereich liegt zwischen 0,6 und 4,7 Volumenprozent für Kerosin, für "Wide-cut" zwischen 1,3 und 8,0 Volumenprozent. Interessant ist, dass **'Biodiesel'** (Diesel Kraftstoff mit bis 10% Rapsölmethylester) nicht als brennbare Flüssigkeit und damit nicht als Gefahrengut eingestuft ist.

Zündpunkt (Flash Point):

Es ist die niedrigste Temperatur bei der sich ein geeignetes Dampf-Luftgemisch über der Flüssigkeit zünden lässt. Der Zündpunkt hängt von den (Versuchs-) Bedingungen ab. Dieselkraftstoff, Rapsöl und 'Biodiesel' siehe Bild 8.2-1.1 und Bild 8.2-2.1. Er liegt bei Kerosin bei 38°C, für "Wide-cut" bei 0°C.

Elektrische Leitfähigkeit :

Die elektrische Leitfähigkeit von Kraftstoffen liegt relativ niedrig, beispielsweise weit unter der von entionisiertem Wasser. Deshalb kann eine Kraftstoffströmung in Rohren, Filtern oder Ventilen zur elektrostatischen Aufladung führen. Dies führt bei der Entladung zur Funkenbildung und Zündung. Dem Kraftstoff Jet A-1 für militärische Anwendung werden Additive (Bild 8.2-1.2, Anti Static oder Static Dissipator) zugemischt, um die Leitfähigkeit zu erhöhen.

Bild 8.2-5

© Axel Hessmann - Turbocomult
als Schulungsunterlage nur mit

Systeme und Betriebsstoffe: Kraftstoffeigenschaften

Einige Begriffe zu den Kraftstoffeigenschaften und wie diese bestimmt werden.

Rauchpunkt (engl. **Smoke Point**) entspricht der Höhe einer Kraftstoffflamme in Millimetern einer speziellen Lampe, bevor diese zu rauchen beginnt.

Gum (klebrige Verunreinigungen):
- Vorhandenes Gum (**Existent Gum**) ist der Anteil nichtflüchtigen Materials im Kraftstoff.
- Beschleunigte Gumbildung (**Accelerated Gum**) wird bei hohen Temperaturen, in reinem Sauerstoff unter hohem Druck geprüft.

Saure Reaktion des Kraftstoffs (**Total Acidity**)

Viskosität (engl. Viscosity) kennzeichnet die Fließfähigkeit des Kraftstoffs bei bestimmten Temperaturen.

Dampfdruck nach Reid (**Reid Vapor Pressure** = RVP) wird bei einer Prüftemperatur von 37,8°C bestimmt. Er ist ein wichtiges Kennzeichen für die Neigung eines Kraftstoffs zur Dampfblasenbildung in Rohrleitungen ("Vapor Lock").

Spezifisches Gewicht des Kraftstoffs in A.P.I. (**API Gravity**) gibt die Dichte bei 15,6°C im Verhältnis zu Wasser (A.P.I. Gravity = 100) an. Steigende A.P.I.-Grade bedeuten sinkende Kraftstoffdichte.

Zündtemperatur (**Flash Point**) ist die Dampftemperatur über dem Kraftstoff, bei der Dampf mit einer Flamme unter eng kontrollierten Bedingungen entzündet werden kann.

Erstarrungstemperatur (**Freezing Temperature**) ist die Temperatur, bei der sich während der Abkühlung des Kraftstoffs fest erstarrte Wachskristalle abscheiden.

Tropfpunkt (**Pour Point**) ist die niedrigste Temperatur, bei der ein Kraftstoff noch während der Abkühlung aus einem definierten Rohr tropft.

Die **Farbe** (**Color**) eines Kraftstoffs wird anhand einer nummerierten Farbtafel bestimmt. Bei Triebwerkskraftstoffen liegt die Farbe zwischen weiß und gelb.

Siedebereich ist der Temperaturbereich in dem die einzelnen Komponenten des Kraftstoffs unter definierten Bedingungen sieden. Er entspricht weitgehend dem Begriff **Destillation Range.**

Der **Untere Heizwert** ist die Mindestwärme (MJ), die von einer bestimmten Kraftstoffmenge (Kg) bei vollständiger Verbrennung abgegeben wird. Der **Net Heating Value** ist um die Wärmemenge kleiner, die zur Kondensation des bei der Oxidation entstandenen Wasserdampfs notwendig ist und so dem Heißgas entzogen wird. Der Net Heating Value sollte volumenbezogen möglichst hoch sein wenn das erforderliche Tankvolumen zu minimieren ist.

Bild 8.2-6

Schwefelgehalt im Kraftstoff:
- Gesamter Schwefelgehalt (**Total Sulfur**)
- Bestimmte korrosiv wirkende Schwefelverbindungen (**Mercaptan Sulfur**)

Aromate (**Aromatics**) sind Ringkohlenwasserstoffe und haben Doppelbindungen. Ihr Kohlenstoffanteil ist relativ hoch..

Olefine / Alkene (Olefins) entstehen beim Crackprozess und sind Bruchstücke längerer Kettenmoleküle.

Alkane (**Naphtene**) sind Ringkohlenwasserstoffe ohne Doppelbindung mit sehr schlechten Verbrennungseigenschaften, ähnlich Paraffinen.

Thermische Stabilität (**Thermal Stability**) ist die Neigung an einer heißen Metallwand Ablagerungen zu bilden. Sie wird in einer Prüfapparatur mit einem aufgeheizten Rohr und einem Filter bestimmt.

Bild 8.2-6 *(Lit. 8.2-10): Diese Zusammenstellung soll lediglich der* ***Information*** *dienen. Sie enthält* ***für den Triebwerksbetrieb relevante Kraftstoffeigenschaften*** *(Bild 8.2-3 bis Bild 8.2-7). Auf eine detaillierte Definition wird hier verzichtet und auf Fachliteratur (Normen, Spezifikationen) verwiesen.*

© Axel Russmann - Turbomaschinen
alle Vervielfältigungsunterlagen nur mit Lizenz

Einflüsse auf die Qualität und das schadensrelevante Verhalten von Kraftstoffen, insbesondere Flugkraftstoffen.

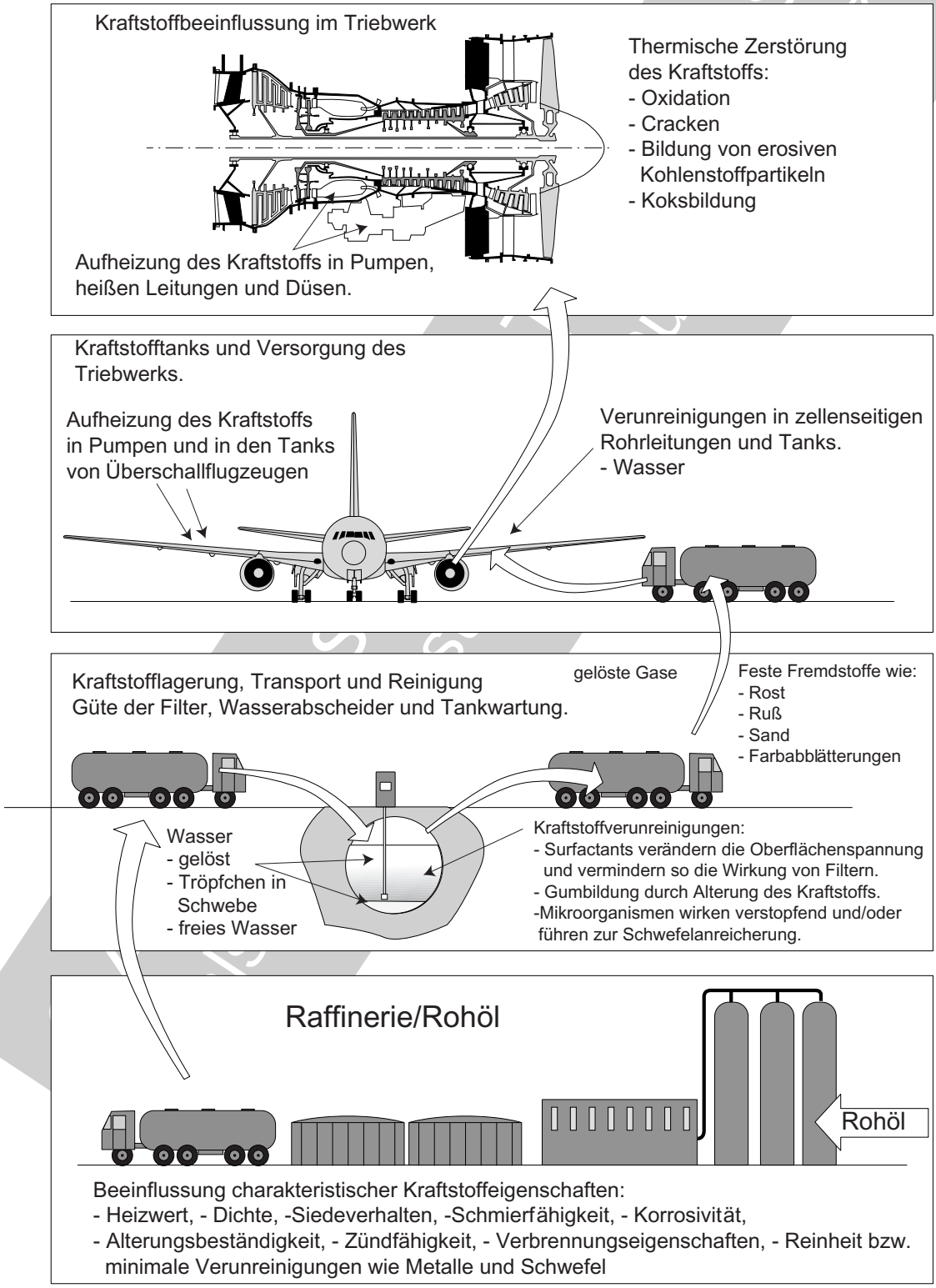


Bild 8.2-7

Bild 8.2-7 *(Lit. 8.2-2 und Lit. 8.2-9): Auf dem Weg vom Ausgangsprodukt/Rohöl bis zum Betriebseinsatz kann die* ***Qualität des Kraftstoffs auf viele Weise beeinflusst*** *werden (Bild 8.2-1).*

- In der ***Raffinerie*** *(Destillation und chemische Behandlung) werden physikalische und chemische Kraftstoffeigenschaften (Bild 8.2-6) eingestellt. Dazu dienen auch Additive (Bild 8.2-2.2).*

Auch Spuren von ***unerwünschten Beimengungen*** *wie* ***Schwefel****,* ***Metalle*** *(z.B. Kupfer) und* ***Stickstoffverbindungen*** *können von der Raffinerie maßgeblich beeinflusst werden.*

- Zwischen ***Transport*** *des Kraftstoffs zum Tanklager und/oder zur Betankung des Flugzeugs geschaltete Reinigungen (Filter, Wasserabscheider) können bereits eingebrachte* ***Verunreinigungen entfernen****. Von nicht ausreichend gewarteten Transporttanks können Verunreinigungen oder Korrosionsprodukte in den Kraftstoff gelangen. Dazu gehören Verunreinigungen welche die Oberflächenspannung extrem herabsetzen. Es handelt sich um ungeeignete* ***Reinigungsmittel*** *oder Hilfsstoffe. Sie können die* ***Wirksamkeit der Filter beeinträchtigen****.*

Ein weiterer Effekt sind ***schleimige Ablagerungen****.*

Besonders die ***Lagerung in Tanks über lange Zeiten*** *kann durchaus problematisch sein.* ***Korrosion derTankwände****,* ***Mikroorganismen*** *(Schwefelanreicherungen), ungeeignete* ***Dichtungsmittel*** *(Lit. 8.2-7) können in den Kraftstoff gelangen.*

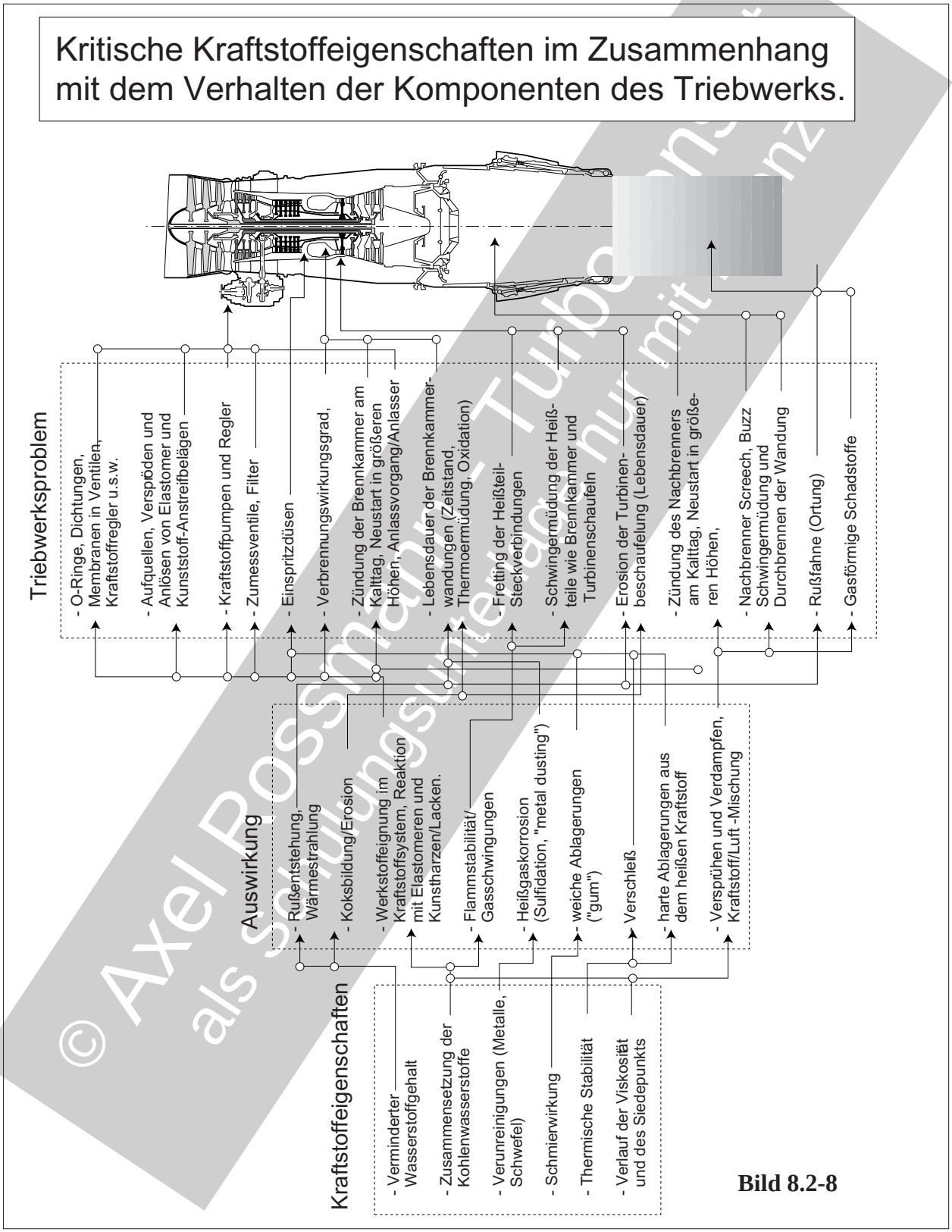
Vor dem Betanken kann ***Enteisungsmittel*** *zugemischt werden.*

Bei langen Lagerungszeiten mit ***Luftzutritt*** *führt eine Reaktion des Kraftstoffs mit der Luft zu* ***klebrigen Ablagerungen*** *(Gum).*

- Auch in den ***Flugzeugtanks*** *sind bei Unachtsamkeit Verunreinigungen oder Reaktionen mit nicht ausreichend beständigen Werkstoffen möglich.*

- In der Maschine *(Motor, Gasturbine/Triebwerk) selbst kann sich der Kraftstoff bis zur Einspritzdüse unter Betriebseinflüssen verändern. Dafür ist in erster Linie eine hohe Betriebstemperatur verantwortlich (Bild 8.1-14 und Bild 8.1-15)*

© Dr. Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz



© Axel Rossmann - Turbomaschinen
als Schulungsunterlage nur mit Genehmigung

Bild 8.2-8 *(Lit. 8.2-6, Lit. 8.2-7 und Lit.8.2-8): Dieses Schaubild zeigt* ***problematische bzw. schädigende Auswirkungen*** *von* ***Kraftstoff-eigenschaften*** *(Bild 8.2-3 bis Bild 8.2-5) auf ein Triebwerk. Zusammenhänge und Effekte werden an anderer Stelle eingehender behandelt. Eine Zusammenstellung der Quer-verweise enthält Seite 8.1-3.*

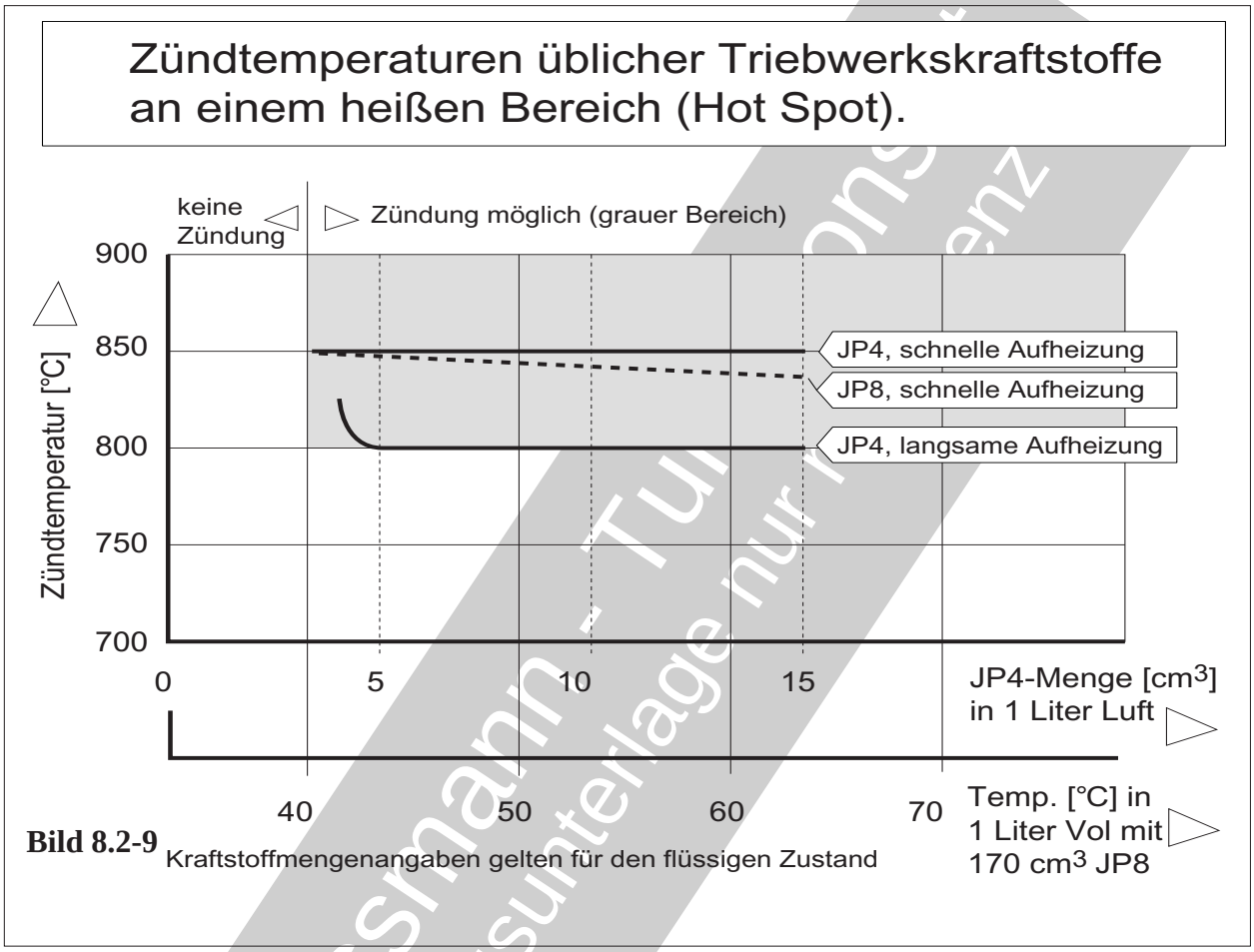


Bild 8.2-9

Bild 8.2-9 *(Lit. 22.2.1-4 und Lit. 22.2.1-7): Die* ***Zündtemperatur*** *(Zündpunkt, Flash Point) ist nicht nur für die Zündung des Triebwerks und die Verbrennung von Bedeutung. Sie ist auch eine sicherheitsrelevante Größe.* ***Zünd- bzw. Explosionsgefahr*** *besteht bei nicht gefülltem Tank. Der Dampf über dem Kraftstoff bildet mit Luft ein gut zündfähiges Gemisch mit einer Zündtemperatur von* ***35-40 °C*** *(Bild 7.1.4-3 und Bild 7.1.4-4). Diese Temperaturen können bereits in Flügeltanks durch die* ***Luftreibung bei Überschallflug*** *auftreten (Lit. 8.2-12). Kommen aus Verfügbarkeitsgründen sog. „****Wide-cut****" -Treibstoffe zum Einsatz, kann die Zündtemperatur noch deutlich niedriger liegen. Vom Sicherheitsstandpunkt aus ist eine hohe Zündtemperatur (Lit. 8.2-12) anzustreben. Eine gefährliche Zündung kann bei einer Reihe von Ereignissen auftreten:*

- ***Flugunfällen***

- ***Kraftstofflecks****, mit Zündung an heißen Oberflächen.*

- Explosionen und Feuer in Tanks durch ***Blitzschlag*** *(Lit. 8.2-13).*

- ***Elektrische Funken*** *bei Kurzschlüssen.*

Das Thema gewinnt bei der Einführung leichter verdampfender Kraftstoffe an Aktualität. Um die ***Entzündlichkeit zu minimieren,*** *haben Kraftstoffe wie JP-8 (AVTUR, F-34, Bild 8.2.1-1.1) weniger flüchtige Bestandteile und damit eine relativ hohe Zündtemperatur von ca. 40°C.*

Eine ***Zündung flüssigen Kraftstoffs*** *bzw. eines sehr fetten oder sehr mageren Kraftstoff/Luftgemischs erfordert weit höhere Temperaturen (>800°C). Sie sind an* ***überhitzten Gehäusewandungen,*** *und bei* ***elektrischen Funken*** *zu erwarten. Im Diagramm ist zu erkennen, dass bei* ***schneller Aufheizung die Zündtemperatur ansteigt****. Das dürfte mit einer verzögerten Dampfbildung in Zusammenhang stehen.*

© Prof. Rossmann - Tu Ilmenau
Arbeitsunterlage nur für Studenten

Literatur zu Kapitel 8.2

8.2-1 I.E.Traeger, „Aircraft Gas Turbine Engine Technology, Second Edition“, Verlag : Glencoe/McGraw-Hill 1994, ISBN 0-07-065158-2, Seite 200-210.

8.2-2 K.Bauerfeind, „Steuerung und Regelung der Turboflugtriebwerke“, Birkhäuser Verlag, 1999, ISBN 3-7643-6021-6, Seite 136-139.

8.2-3 „Aviation Jet Fuel Information“, www.csgnetwork.com/jetfuel.html, 25.08.2006, Seite 1-4.

8.2-4 S.J.Haigh, „Lightning Ignition Hazards to Heated Aviation Fuel“, „Proceedings of the 1994 International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity“, May 24-27, 1994, Bundesakademie für Wehrverwaltung und Wehrtechnik, Mannheim, Germany, Seite 169-177.

8.2-5 L.H.Hansen, G.D.Kucera, J.S.Clemons, J.Lee, „ Aircraft Gas Turbine Engine Fuel Pumping Systems in the 21st Century“, Paper No. ASME 96-GT-148 des „International Gas Turbine and Aeroengine Congress & Exhibition“, Birmingham, UK, June 10-13, 1996, Seite 1-9.

8.2-6 „Aviation fuels“, Chapter 2 Aviation Turbine Fuel Performance, Fa. Chevron, 5.11.2005, Seite 1-8.

8.2-7 C.A.Moses, „U.S. Army Alternative Gas-Turbine Fuels Research: MERADCOM“, Proceedings No. AGARD-CP-353 der AGARD Conference on „Combustion Problems in Turbine Engines“, Cesme, Türkei, 3-6 Oktober 1983, Seite 7-1 bis 7-5.

8.2-8 R.Hill, W.J.Huges, „A Review of the Flammability Hazard of Jet Fuel Vapor in Civil Transport Aircraft Fuel Tanks“, Report No. DOT/FAA/AR-98/26, June 1988, Seite 1-46.

8.2-9 M.Taupp, „Biodiesel“, Vortrag 11.05.2001, www.pharmazie.uni-wuerzburg.de/Studium/Lmc/.../Biodiesel.pdf, Seite 1-42.

8.2-10 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik - Band 5“, ISBN 978-3-00-025780-3, Kapitel 22.2 und 22.3.

8.2-11 R.Thiele, „Probleme bei der Lagerung von Biodiesel“, http://www.uni-oldenburg.de/uni/drucken/, Seite 1 und 2.

8.2-12 A. Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 2“, 2001, ISBN 3-00-008429-0, Kapitel 9.2 und 9.3.

8.2-13 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 1“, 2000, ISBN 3-00-005842-7, Kapitel 5.1.3.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

8.3 Verschmutzung des Kraftstoffs

Kraftstoff wirkt unter Temperaturwechseln für Luftfeuchtigkeit wie eine Pumpe. Deshalb möglichst keine offenen Behälter zur Lagerung von Kraftstoff verwenden.

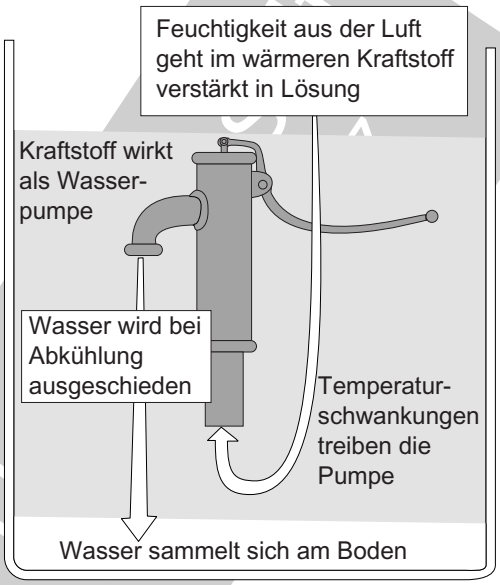


Bild 8.3-0

Verschmutzungen in Kraftstoffen können fest (Bild 8.3-1), flüssig oder gasförmig (Bild 8.3-3) sein. Ihre **Ursachen** sind sehr **unterschiedlich**. Sie liegen gewöhnlich **vor dem Eintritt in das Kraftstoffsystem**. Verunreinigungsmöglichkeiten bestehen bei Herstellung, Transport (Bild 8.3-8.1) und Lagerung (Bild 8.3-7 und Bild 8.3-9) sowie beim Betanken (Bild 8.3-4 und Bild 8.3-8.1) und in den Tanks (Bild 8.3-7 und Bild 8.3-8.1) der Maschine. Auch **innerhalb des Triebwerks** bzw. des Kraftstoffsystems kann es zu Verunreinigungen kommen. Dabei spielen Veränderungen des Kraftstoffs durch Betriebseinflüsse (z.B. Verkokung) eine wichtige Rolle (Bild 8.1-16).

Probleme durch **Wasseraufnahme** sind besonders häufig. Kommt Kraftstoff mit **Luft** in Kontakt, kann deren Feuchtigkeit in den Kraftstoff 'gefördert' werden (Bild oben). Als Antrieb dieser „**Pumpwirkung**" dienen Temperaturänderungen. In warmem Kraftstoff geht mehr Wasser als in kaltem in Lösung. Ein Luftaustausch durch sog. **'Atmen' des Tanks** (Bild 8.3-0 und Bld 8.3-6) sorgt für die 'Versorgung' mit feuchter Luft. Bei Abkühlung scheidet sich Wasser aus und setzt sich am Tankboden ab (Bild 8.3-4 und 8.3-5). Zu einem beträchtlichen Teil wird es jedoch im Kraftstoff verbleiben (Bild 8.3-3) und bei **Vereisungsbedingungen** eine Gefahr darstellen. In solchen Fällen kann es zur Unterbrechung der Kraftstoffzufuhr mit Triebwerksausfall kommen (Bild 8.1-21, Beispiel 8.3-3).

Bakterien und Pilze können in Kontakt mit Wasser Schwefelverbindungen im Kraftstoff anreichern (Bild 8.3-5). Erhöht sich so zeitweise die **Schwefelkonzentration** im Kraftstoff, können schwere **Schäden ausgelöst** werden. Sie treten im **Kraftstoffsystem** (Bild 8.3-4 und Bild 8.3-5) und/oder bei **Heißgaskorrosion** (Sulfidation, Bild 8.1-7) an den Heißteilen, besonders von Turbinenbeschaufelungen auf.

Auch **freies, feinverteiltes Wasser** (Bild 8.3-3) kann die **Funktion von Kraftstoffreglern** schädigend beeinflussen oder wässrige **Korrosion** auslösen (Band 1 Kapitel 5.6.1.1).

Gegen gefährliche Wassermengen im Kraftstoff gibt es effektive **Maßnahmen**:

- Vermeidung der Wasseraufnahme (Bild 8.3-8.2 und Bild 8.3-9).
- Abtrennen des Wassers vor dem Betanken (Bild 8.3-9).
- Wasserabscheidung zwischen Fahrzeugtank (Flugzeug) und Motor (Triebwerk, Bild 8.3-8.2 und Bild 8.3-9).

Die Effektivität dieser Maßnahmen hängt verständlicherweise vom vorschriftsmäßigen Einsatz ab.

© Axel Poppen - Technische Universität Berlin
Fachgebiet Maschinenelemente

Systeme und Betriebsstoffe: Verschmutzung des Kraftstoffs

Bild 8.3-1 *(Lit. 8.3-4 und 8.3-23, -24, -25):* ***Verunreinigungen*** *treten in Kraftstoffen für Flugtriebwerke in* ***unterschiedlicher Form*** *auf (Rahmen unten). Je höher die Viskosität des Kraftstoffs (Bild 8.2-1.1 und Bild 8.2-4), umso eher ist er in der Lage, eine Verunreinigung in Schwebe zu halten und mitzuführen.*

Flüssige Verunreinigungen*:*
Wasser *(Bild 8.3-3) ist eine der häufigsten Verunreinigungen und kann mit* ***Eisbildung*** *die* ***Kraftstoffzufuhr blockieren*** *(Lit. 8.3-28).*
Weitere Gefahren sind die biologische Anreicherung schwefelhaltiger Verbindungen (Bild 8.3-4 und Bild 8.3-5).
Produkte ***wässriger Korrosion*** *wie Rost und Oxide von Leichtmetallen in Rohrleitungen, Gehäusen (Lit. 8.3-28) und Tanks.*
Auch die Vermischung mit anderen ***Petroleumprodukten*** *kann das Betriebsverhalten schädigend beeinflussen. Dazu gehören* ***andere Kraftstoffe****,* ***Öle*** *oder* ***Fette.*** *Der Extremfall ist ein Ausfall der Maschine / des Triebwerks (Bild 8.2-8).*
Offenbar können besondere Situationen dazu zwingen, ***Flugbenzin mit Turbotriebwerkskraftstoff*** *zu mischen.* ***Blei aus dem Additiv,*** *das die Klopffestigkeit des Benzins erhöht (Bleitetraethyl, engl. Tetra-Ethyl Lead = TEL), kann vom Heißgas auf die Turbinenbeschaufelung transportiert werden und diese über längere Zeit schädigen.*
Auch Verunreinigungen aus Rückständen von ***Wasch-*** *und* ***Lösungsmitteln*** *in Tanks und Rohrleitungen sind problematisch.*

Fremdpartikel *können die Funktion der Komponenten (Bild 8.1-1) des Kraftstoffsystems eines Triebwerks beeinträchtigen. Es handelt sich um Pumpen, Zumessventile, Filter, Siebe und Düsen. Es handelt sich um Blockieren/Fressen beweglicher Teile, Verschleiß und Zusetzen von Öffnungen.*
Dabei treten Verunreinigungen häufig als Sediment auf (Skizzen oben). Es kann sich um jedes Material handeln, das mit dem Kraftstoff in Kontakt kam.

- ***Sand oder Staub*** *zeigt sich im Kraftstoff in kristalliner, körniger oder glasähnlicher Struktur. Er wird durch „Atmen“ entweder in den Flugzeugtank aufgenommen, (Bild 8.3-0) oder ist eine Folge unzureichender Sorgfalt bei Lagerung, Herstellung und Transport(Bild 8.3-8.1).*
- Verbindungen von ***Aluminium und Magnesium*** *durch Angriff von Mkroorganismen. Diese Korrosionsprodukte (Bild 8.3-5, Lit. 8.3-28) bilden ein* ***hellgraues Pulver.*** *Mit Wasser entsteht eine sehr* ***klebrige gelatineartige Masse*** *(Hydroxide?).*
- ***Eisen als Oxid/Rost*** *(z.B. Korrosionsprodukte aus Tanks, Bild 8.3-5) stammt typischerweise von Verschleißpartikeln (z.B. aus Zahnradpumpen oder Keilverzahnungen). Rost kann je nach Oxid magnetisch (roter Rost) oder unmagnetisch (schwarzer Rost) sein. Seine Form ist feinverteilt oder körnig.*
- Bei ***Messingabrieb*** *handelt es sich wahrscheinlich um Material aus Gleitlagern und Dichtflächen von Pumpen (ähnlich Ölsystem Bild 7.1-8 und Bild 72-4.2). Es liegt in Form golden glänzenden Abriebpulvers oder Spänen vor.*
- ***Elastomere*** *wie Gummi treten als unregelmäßige Partikel, auch in angelöstem Zustand auf (ähnlich Ölsystem Bild 7.1.3.1-2). In diesem Fall ist ihre Form vom* ***Quellen oder Schrumpfen*** *beeinflusst (Bild 6.10.1.2-4 und Bild 6.10.1.2-12).*

Die ***Sedimentation*** *(Ablagerung, Bild 8.3-9) von Kraftstoffverunreinigungen gibt Hinweise auf Art und Ursachen. So hilft sie Risiken zu erkennen.*
Sedimente können sowohl aus ***anorganischem*** *wie aus* ***organischem Material*** *bestehen.*
Man unterscheidet Sedimente nach ihrer Größe (Detail oben):
Grobes Sediment *(engl. Course Sediment) wird von Partikeln größer als 0,001 mm gebildet. Es ist im Kraftstoff erkennbar und setzt sich leicht ab. Solche Partikel können in Reglern* ***Zumessöffnungen verstopfen*** *und* ***Messkanten*** *sowie eng tolerierte* ***Gleitführungen verschlei-***

© Axel Essmann - Turbocondit
ausschließlich unterrichtsunterstützend

Systeme und Betriebsstoffe: Verschmutzung des Kraftstoffs

Auf die Verschmutzung eines Kraftstoffs durch Partikel weist eine Sedimentierung hin. Diese ist vom Kraftstofftyp abhängig.

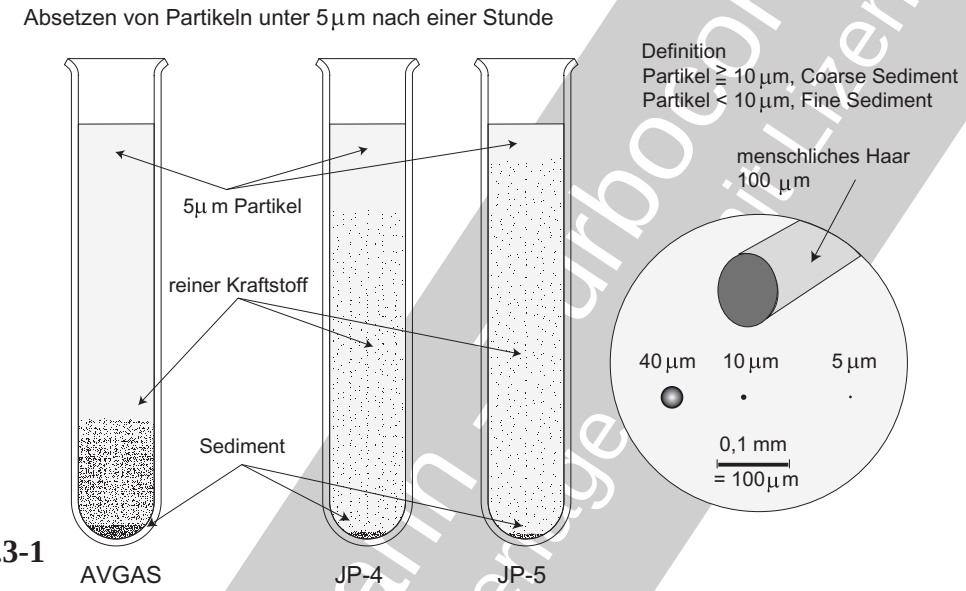
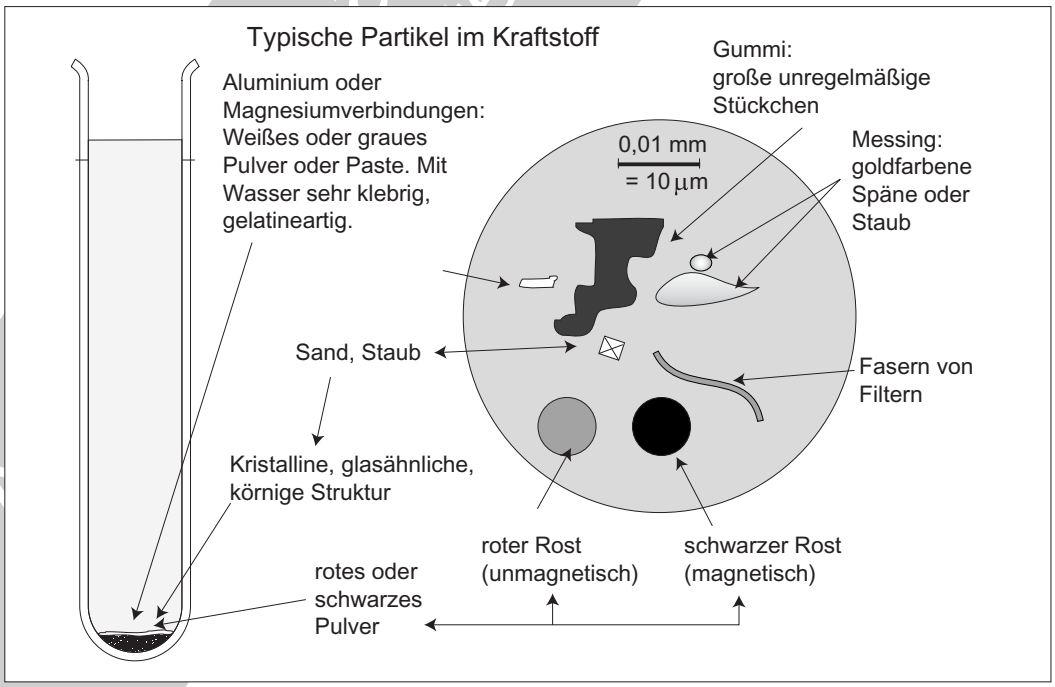


Bild 8.3-1



***ßen**. Das wirkt sich direkt auf die Triebwerksfunktion aus. Die Partikel sind in der Lage, feine Siebe (z.B. vor Düsen) zu verengen (Bild 8.1-20).*

***Feine Sedimente** (engl. fine sediment) haben eine Größe unter 0,001 mm. Diese Partikel sind mit bloßem Auge nicht einzeln erkennbar. Sie zeigen sich lediglich als winzige Lichtreflexionen oder Schlieren. Davon können 98 % durch Filtrierung, Absetzen und Abscheidung entfernt werden. Deshalb sollen **Mindestabsetzzeiten nach dem Füllen von Tanks** bis zur Entnahme eingehalten werden. Verbliebene Partikel scheiden sich als dunkler, lackartiger*

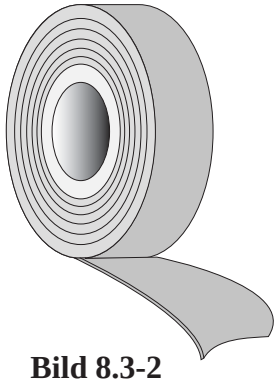
Belag auf Gleitflächen von Ventilen und Reglerteilen ab. Unter Zentrifugalkräften können sie ***schlammartig*** *auftreten und eine* ***träge Kraftstoffzumessung*** *verursachen.*
Die Sedimente treten in Form von Staub, Pulver, Fasern, Körnern, Flocken oder Verfärbungen auf. Sichtbar sind Partikel mit einer Größe von mehr als 0,04 mm. Sie zeigen in merklichen Mengen (nicht wenige Partikel) die ***Fehlfunktion eines Filter- oder Abscheidersystems*** *oder eine nachfolgende Verunreinigungsquelle an. Gebräuchliche* ***Filter sind nicht in der Lage, sehr feine Partikel aufzufangen****. Sie können den Filter durchwandern und sich als* ***Farbstoff, feinstes Pulver oder Schlamm*** *ablagern. Dabei handelt es sich gewöhnlich um* ***Rost oder Staub****.*
Merkliche Mengen von ***Fasermaterial*** *lassen auf das* ***Versagen eines Filters*** *oder bestimmter* ***Wasserabscheider*** *(Lit. 8.3-28) schließen.*
Größere metallische Partikel, insbesondere als Späne oder Ermüdungsplättchen weisen auf mechanisches Versagen einer Komponente des Kraftstoffsystems hin. Wahrscheinlich handelt es sich um eine (Zahnrad-) Pumpe (Lit. 8.3-28 und Bild 6.4.1-19). ***Wiederkehrende Ablagerungen sind ein Alarmzeichen****. Das erfordert eine eingehendere Untersuchung des Kraftstoffsystems auf Herkunft und Ursache der Partikel.*
Kraftstoffe können im ***Langzeitkontakt mit Luft*** *bei Umgebungstemperatur* ***oxidieren****. Es handelt sich um chemische Reaktionen des Luftsauerstoffs mit Bestandteilen des Kraftstoffs. Der Vorgang wird von* ***Metalloberflächen unterstützt*** *(Lit. 8.3-18). Solche Bedingungen bestehen in* ***Lagertanks****. Dabei entsteht sog.* ***Gum (Existent Gum****, Lit. 8.3-17).*
Es handelt sich um einen schwerflüchtigen Rückstand aus ***klebrigem, oder lackartigem Material****. Ist die klebrige unlösliche Variante im Kraftstoff des Tanks fein verteilt, kann sie in größeren Mengen Komponenten des Kraftstoffsystems wie* ***Filter und Siebe zusetzen****. Tritt* ***Gum in löslicher Form*** *auf (****soluble gum)*** *kann er diese* ***Filter passieren*** *und* ***harte Ablagerungen auf heißen Flächen*** *bilden (Lit. 8.3-19). Diese sind in der Lage,* ***Düsenöffnungen zu verkleinern oder Gleitführungen zu blockieren****.*
In der Fachliteratur kennt man noch den Begriff ***Potential Gum (accelerated Gum****). Es handelt sich um ein* ***Prüfmerkmal für die Oxidationsstabilität*** *eines Kraftstoffs. Es kennzeichnet die Neigung des Kraftstoffs über lange Lagerzeiten Gum zu bilden. Die Unempfindlichkeit dagegen wird als* ***Stabilität des Kraftstoffs*** *(fuel stability) bezeichnet. Es gibt chemische* ***Inhibitoren*** *die zwar die* ***Bildung von Gum verzögern****,* ***nicht aber bereits entstandenes Gum auflösen*** *können.*

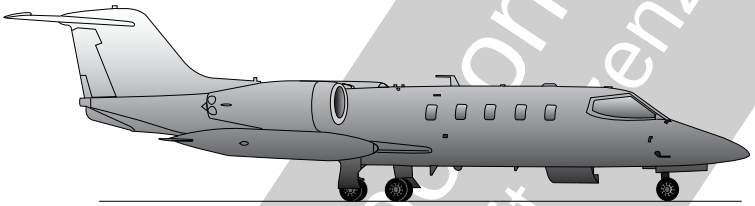
Bild 8.3-2 *(Lit. 8.3-14):* ***Arbeiten im offenen Kraftstoffsystem*** *sind in ihrer potenziellen Gefährlichkeit durchaus dem Umgang mit Blutkonserven und ärztlichen Eingriffen in den Blutkreislauf zu vergleichen.*
Egal ob bei Transport und Lagerung, in Flugzeugtanks oder am Triebwerk, immer besteht die Möglichkeit der ***Verschmutzungsgefahr*** *bei Unaufmerksamkeit oder unsachgemäßem Verhalten. Deshalb ist unbedingt darauf zu achten, dass nur für die jeweilige Anwendung von den zuständigen Stellen* ***zugelassene Verfahren, Hilfsmittel und Hilfsstoffe*** *verwendet werden.*

© Axel Rossmann - Turbopolis
Lehrmittelunterlage nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Verschmutzung des Kraftstoffs

Die Verwendung nicht ausdrücklich für die jeweilige Anwendung zugelassener Hilfsstoffe kann im Kraftstoffsystem zu gefährlichen Verunreinigungen führen.





Im Flügeltank eines Business Jets wurden Klebebandreste gefunden. Diese können als Band und/oder in aufgelöster Form Kraftstofffilter verstopfen, Kraftstoffpumpen, Regler sowie Füllstandsanzeigen beeinträchtigen und damit zum Triebwerksausfall führen.

Bild 8.3-2

Im dargestellten Fall wurde ***im Flügeltank*** *eines Business-Jets ein* ***Klebeband*** *gefunden. Damit bestand Verstopfungsgefahr für* ***zellenseitige, kraftstoffführende Querschnitte und Filtersiebe****. Wird ein Umpumpen zwischen den Tanks im Flug verhindert, ist die mögliche Folge der* ***Ausfall eines Triebwerks****. Eine weitere Gefahr wurde darin gesehen, dass sich* ***nicht kraftstoffbeständige Materialien*** *des* ***Klebebands*** *auflösen und in das Triebwerkssystem gelangen. Damit wäre die Funktion von* ***Sieben, Reglern und Kraftstoffdüsen sowie die Anzeige der Durchflussmenge gefährdet****.*
Als Abhilfe wurde eine AD-Note (Lufttüchtigkeitsanweisung) herausgegeben. Sie fordert umfangreiche Kontrollarbeiten an allen Flugzeugen des betroffenen Typs. Es ist anzunehmen, dass dies hohe Kosten und merklichen Nutzungsausfall bedeutet.

Bild 8.3-3 *(Lit. 8.3-4, Lit. 8.3-9 und Lit. 8.3-16): Eine möglichst* ***frühzeitige Feststellung von Verunreinigungen im Kraftstoff*** *ist sicherheitsrelevant.*
Grobes Sediment lässt sich im Kraftstoff visuell erkennen. Voraussetzung ist ein klarer Kraftstoff ohne freies Wasser. Solches Wasser zeigt sich an ***Wolken, Schlieren oder einer Absetzung****. Trotzdem kann scheinbar vollkommen reiner Kraftstoff über die dreifache Menge des zulässigen Wassers enthalten.*

Wasser ist auf zwei Arten im Kraftstoff *möglich:*
- ***Gelöste Form:*** *In Flugkraftstoffen hängt die Menge vom Kraftstoff absorbierten und gehaltenen Wassers von der Temperatur (je höher umso mehr gelöstes Wasser) und den enthaltenen Kohlenwasserstoffen ab. Bei 16°C liegt der Wassergehalt zwischen 0,003 und 0,010 Gewichts %. Bei Abkühlung bildet sich freies Wasser.*
- ***Freies Wasser*** *als* ***fein verteilte kleine Tröpfchen*** *(Suspension). Sie können sich aus aufgenommener Luftfeuchtigkeit bei der Abkühlung des Kraftstoffs (engl.* ***entrained water****, Bild 8.3-8) bilden. Es kann sich auch um, während des Abpumpens, verquirltes abgesetztes Wasser*

© Vogelsang - Turbotechnic
Vorlesungsunterlage mit Lizenz

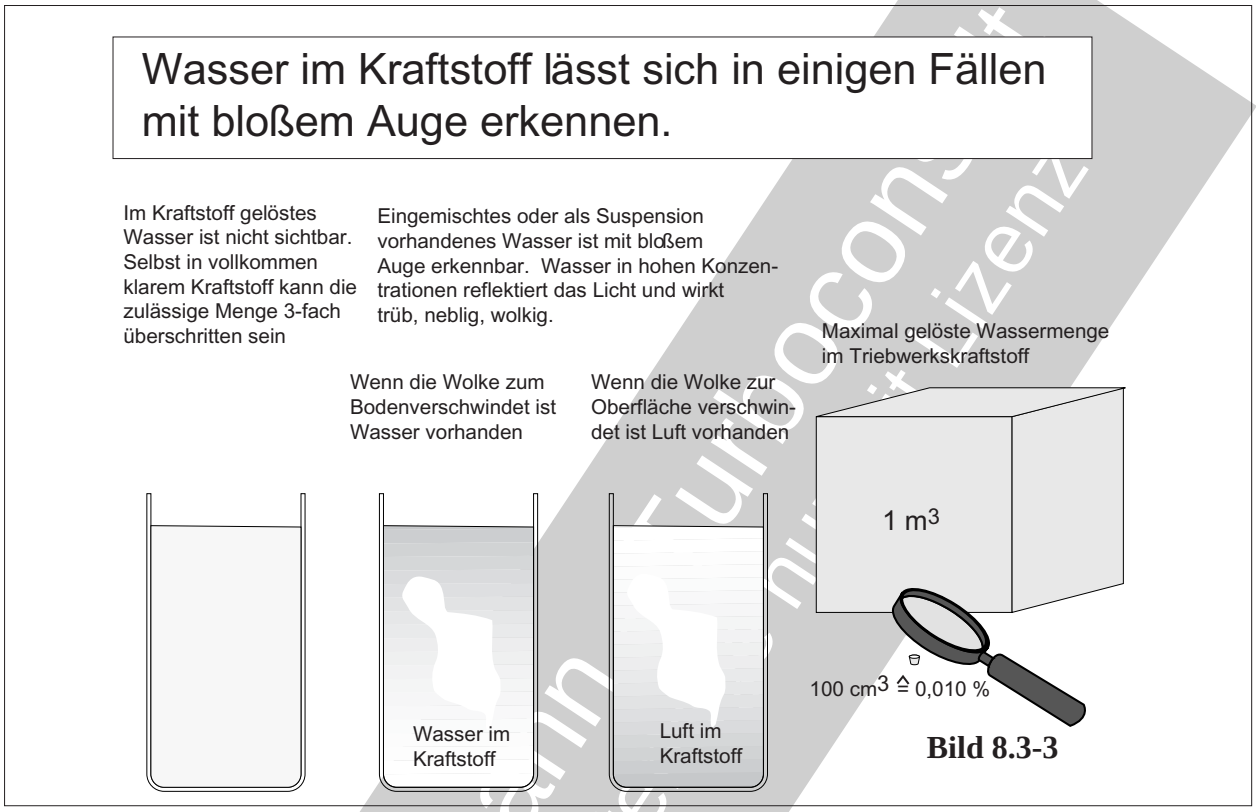


Bild 8.3-3

*handeln (Bild 8.3-4). In höherer Konzentration wird der Kraftstoff trüb oder wolkig (**sludge**). Wolken im Kraftstoff können auch von Luft beeinflusst sein. Wolken in Nähe der Oberfläche sind dafür ein Zeichen.*

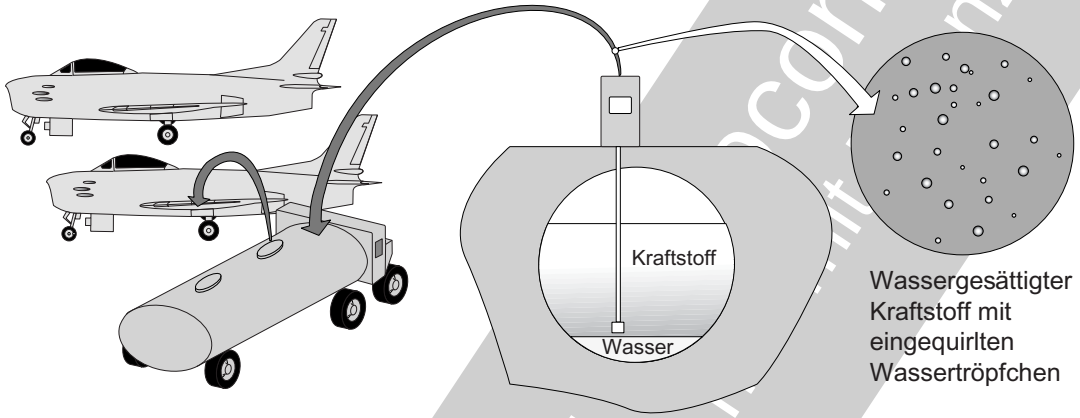
***Flüssiges Wasser kann sich schädigend** auswirken:*
*- Beeinträchtigung der Kraftstoffregelung indem es den **elektrischen Sensor** für die Durchflussmenge **kurzschließt**.*
*- Große Wassermengen können zum **Ausfall (Verlöschen) des Triebwerks** führen (Beispiel 8.3-3).*
*Enthält das freie Wasser Salz (z.B. Meersalz, Bild 8.1-20), wirkt es **korrosiv.** Das gilt für **Stähle** und **Leichtmetalle** (Al-, Mg-Legierungen), wie sie in Tanks und Gehäusen angewendet werden (Bild 8.3-1) Im Zusammenwirken mit Wasser und Mikroorganismen wirkt Kraftstoff ebenfalls korrosiv. (Bild 8.3-5).*
*Es gibt mehrere **Methoden den Wasseranteil zu überprüfen**. In einem Fall verwendet man eine nur in Wasser lösliche Nahrungsmittelfarbe. In einer chemischen Reaktion verfärbt sich bei über 30 ppm Wasser das zugegebene Pulver. Ähnlich sensibel ist eine besondere chemisch aktivierte Methode. Hier verfärbt sich ein Probenfilter.*
*Liegt die **Kraftstofftemperatur** unter 0 °C (Nach einem Flug in großen Höhen oder nach einer kalten Nacht am Boden) können Eiskristalle die **Wasserbestimmung verfälschen**.*
Hat sich Eis an anderen Stellen des Tanks als am Boden gebildet und wurde nicht entdeckt, bleibt es bis zum Auftauen nicht nachweisbar. Deshalb muss gewartet werden, bis das Eis aufgetaut ist. Dann ist das Wasser über die Drainage abzulassen, bevor es beim Abpumpen wieder zur Verwirbelung kommt.

***Bild 8.3-4** (Lit. 8.3-5, Lit. 8.3-6 und Lit. 8.3-7): Wasser kann sich bei längerer **Lagerung in Kraftstofftanks am Boden sammeln**. Beim Abpumpen bildet dieses Wasser feine Tröpfchen mit Verunreinigungen, die von den Pumpen in den Kraftstoff gequirlt werden (Detail oben rechts, Bild 8.2-3).*
*An der **Grenze zwischen abgesetztem Wasser und Kraftstoff werden Bakterien wirksam,** die*

© Axel Rosemann Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Verschmutzung des Kraftstoffs

Erhöhter Wassergehalt im Kraftstoff kann auf vielfältige Weise Schäden auslösen.



Pumpen und Regler des Kraftstoffsystems können von Wasser im Kraftstoff besonders beeinflusst werden.

A Kaltverschweißen ("Fressen")
B Verschleiß
C Korrosion
D Klemmen infolge thermischer Dehnungen
E Angriff der Silbergleitschicht

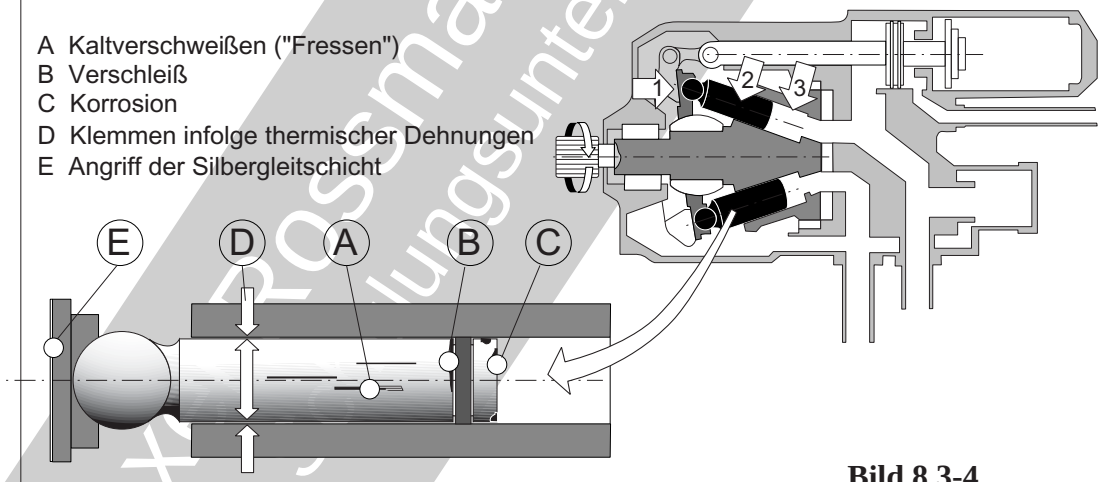


Bild 8.3-4

bereits aus den geringen Schwefelmengen des Kraftstoffs Verbindungen mit Schwefelanreicherungen erzeugen. Werden diese beim Abpumpen des Kraftstoffs mitgerissen und gelangen in das Triebwerk, sind dort gravierende Schäden möglich:

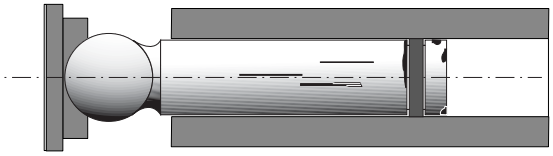
*- Spontanes Versagen („**Fressen**“, Band 1 Kapitel 5.9.2, mechanisches Blockieren, Beispiel 8.3-1) versilberter Gleitflächen. Diese sind in Axialkolbenpumpen mit Taumelscheiben üblich (Bild 8.1-11, Beispiel 8.3-1 und Rahmen unten).*

*- **Verstopfen** von Zumessöffnungen, Düsen, Filtern **und Festsitzen** von Reglerkolben durch Ablagerungen (Lit. 8.3-6 und Lit. 8.3-11).*

*- Über längere Betriebszeiten entsteht **Heißgaskorrosion** (Sulfidation) an Heißteilen, besonders der Turbinenbeschaufelung (Bild 8.1-7). Für den **Nachweis von Wasser im Kraftstoff** sind in regelmäßigen Abständen und/oder bei Bedenken Prüfungen (Bild 8.3-3) vorzunehmen.*

© AXA Rossmann - Beraterconsult
Als Schulungsunterlage mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Verschmutzung des Kraftstoffs

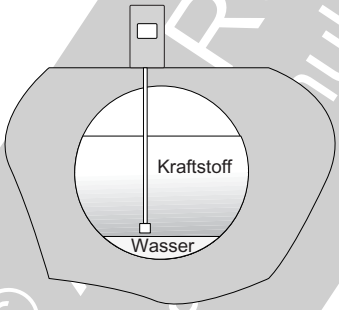


Beispiel 8.3-1 (Bild 8.3-4): An den **Kraftstoffpumpen vom Axialkolbentyp** (Bild 8.1-11) eines älteren militärischen Triebwerksmusters traten schwere Schäden mit einer **totalen Zerstörung** auf. Untersuchungen ergaben, dass offenbar plötzlich auftretende extreme Kräfte im Bereich der Axialkolben **Überlastungsschäden** auslösten. Unklar war wegen der großen Folgeschäden, ob primär die **versilberten Gleitschuhe der Kolben** auf der Taumelscheibe extrem hohe Reibungskräfte entwickeln oder die Kolben zu klemmen begannen (Bild 8.3-4).

Die Schäden traten nur bei Triebwerken auf, deren Kraftstoff aus einem bestimmten Tank stammte. In diesem war der **Kraftstoff über lange Zeit gelagert** (Lit. 8.3-6). So lag ein schadensursächlicher Zusammenhang mit diesem Kraftstoff nahe. Um eine Klärung herbeizuführen, wurde ein Triebwerk auf den Prüfstand genommen und der verdächtige Kraftstoff in Tankwagen angefahren. Es traten Pumpenschäden wie im Triebwerk auf. Das bestätigte den Verdacht, die eigentliche Ursache blieb jedoch unklar. Für weitere Versuche war der Kraftstoffvorrat des Tanks erschöpft.

Erst später zeigten Veröffentlichungen anderer Stellen (Australien, siehe auch Beispiel 8.3-2), dass die Ursache in einer **biologisch bedingten** (Bakterien, Pilze) **Schwefelanreicherung** im Kraftstoff zu suchen ist (Bild 8.3-5). Dieser Schwefel reagiert offenbar mit den Silbergleitschichten, wobei der **Reibbeiwert deutlich ansteigt**. Die erhöhten Reibkräfte steigern die **Wärmeentwicklung des Gleitvorgangs.** Damit dürften sich die Gleitbedingungen auf den Kolbenflächen ebenfalls verschlechtert haben (Wärmedehnung, Dampfbildung). Mit diesem selbstverstärkenden Vorgang lässt sich das spontane Versagen der Pumpen zwanglos erklären.

Nachträglich wurde klar, dass im vorliegenden Fall bei der langen Lagerung in dem nicht vollen Tank offenbar Wasser aus der Luft vom Kraftstoff aufgenommmen wurde (Bild 8.3-8). Dies setzte sich am Tankboden ab. Damit wären die Voraussetzungen für eine Schwefelanreicherung gegeben.



Beispiel 8.3-2 (Lit. 8.3-5): Beim üblichen Ziehen von Kraftstoffproben vor dem ersten Flug eines australischen Verkehrsflugzeugs fiel dem Wartungspersonal eine **rotbraune Flüssigkeit** in der Probe auf. Die Überprüfung des Kraftstoffsystems (z.B. Filter) ergab keinen bedenklichen Befund. Auch eine Laboruntersuchung konnte Pilzbefall ausschließen. Es wurden jedoch große Mengen **Bakterien in einem Film zwischen abgesetztem Wasser und Kraftstoff** gefunden. Diese Verunreinigung wurde nicht dem Flugzeug sondern der Kraftstoffversorgung zugeordnet. Eine Recherche mit dem Kraftstofflieferanten (Raffinerie) ergab keine erklärenden Besonderheiten.

Ähnliche Vorfälle in Australien, die bereits bis 1962 zurückgingen und offenbar auch bis heute immer wieder auftreten, zeigten einen Zusammenhang mit **Schwefelverbindungen** im Kraftstoff und **Spuren von Metallen**. Beteiligt sind Verbindungen (Komplexe) von **Naphta** (Bild 8.1-1), **schwefliger Säure und Übergangsmetallen** (engl. transition metals) sowie Eisen (Bild 8.3-6). Auch in diesem Fall konnte, wie so oft, die eigentliche **Quelle der Verunreinigung nicht gefunden** werden.

© Rossmann - Turbosoft Ausbildungsunterlagen mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Verschmutzung des Kraftstoffs

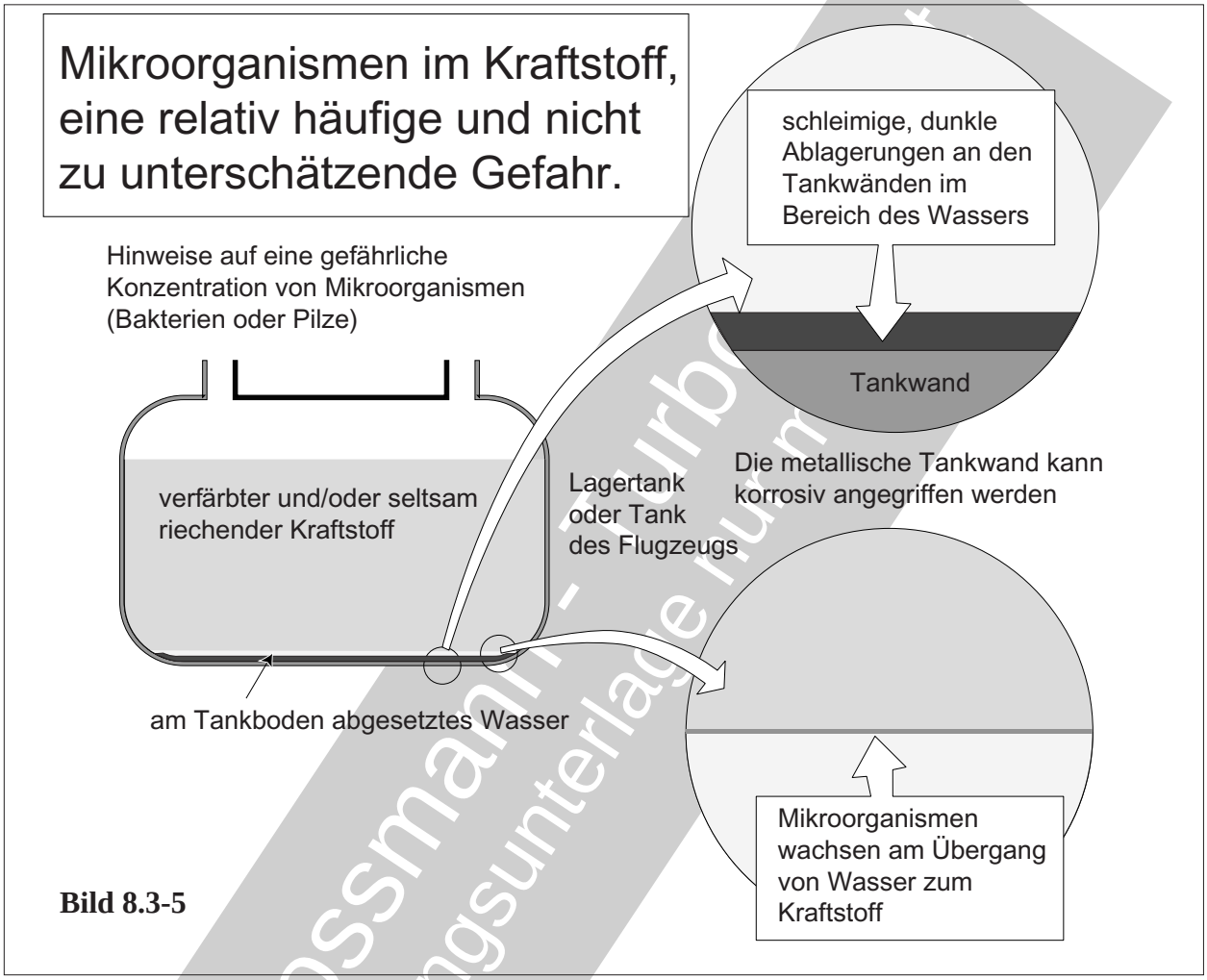


Bild 8.3-5

Bild 8.3-5 *(Lit. 8.3-4, Lit. 8.3-5 und Lit. 8.3-16): In Tanks können* ***unterschiedliche Mikroorganismen*** *(Bakterien, Pilze) auftreten. Sie werden zwar von* ***häufigem Umwälzen gestört****, treten sie jedoch auf, entstehen* ***korrosive Verbindungen****. Diese greifen Wände der Kraftstofftanks an. Das kann in* ***Flügeltanks zur gefährlichen Schwächung der Struktur*** *führen. Dagegen werden Tankwände mit einer Korrosionsschutzschicht versehen. Manche Organismen sind jedoch in der Lage, früher angewendete Beschichtungssysteme in gefährlicher Weise zu durchdringen. Die* ***Korrosionsprodukte*** *im Tank (****Al****-und* ***Mg-Verbindungen****) können in das Kraftstoffsystem der Maschine/des Triebwerks gelangen (Bild 8.3-1) und dieses beeinträchtigen. Befindet sich der Tank (Lagerung oder im Flugzeug) über längere Zeit in Ruhe, ist eine Voraussetzung für ein Wachstum der Organismen geben. Es entstehen* ***schleimige rote bis braune Ablagerungen*** *(Detail oben rechts, Lit. 8.3-6). Dazu bedarf es jedoch* ***Wasser*** *an dessen* ***Übergang zum Kraftstoff*** *die Mikroorganismen wachsen (Detail unten rechts). Dieses Wasser wird über längere Zeit vom Kraftstoff aus der Luft aufgenommen und kann sich dann am Tankboden sammeln (Bild 8.3-0).*

Man erkennt einen „befallenen“ Tank an der ***ungewöhnlichen Farbe und/oder dem ungewöhnlichen Geruch*** *des Kraftstoffs.*

Um diese Verunreinigungen zu vermeiden, müssen die einschlägigen ***Vorschriften zum Umgang mit Kraftstoff*** *strikt vom Wartungspersonal beachtet werden.*

© Axel Bossmann - Turbo
Abschnittungsunterlage nur

Ungenügende Lagerung des Kraftstoffs führte zu dessen Verunreinigung und einem Triebwerksausfall.

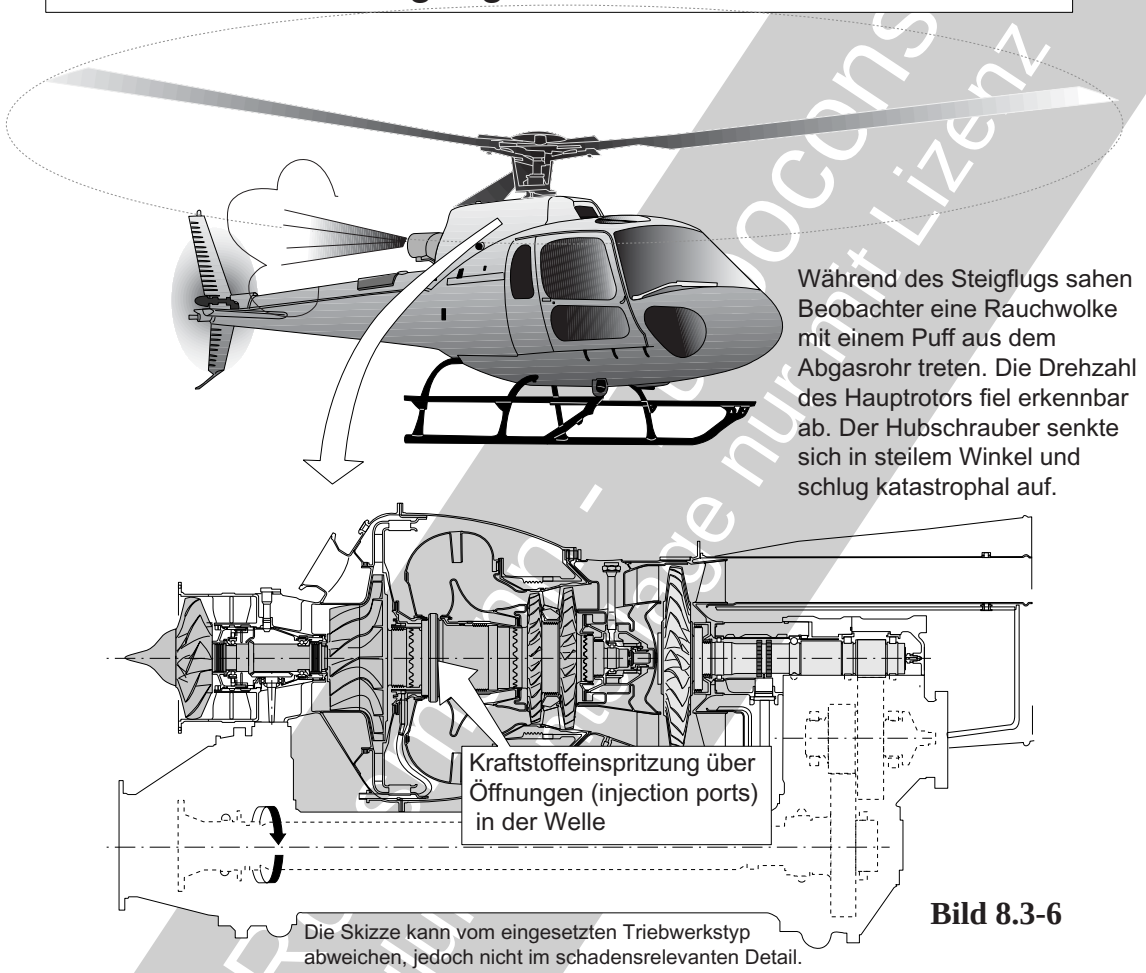


Bild 8.3-6

Bild 8.3-6 *(Lit. 8.3-6): Bei diesem Triebwerkstyp wird der Kraftstoff über die Hohlwelle der Brennkammer zugeführt. Die Zentrifugalkräfte sorgen für die Verteilung durch abschleudern/verdüsen. Die Nachuntersuchung des Unfalltriebwerks ergab, dass* ***5 der 6 Kraftstoffeinspritzöffnungen in der Welle verstopft*** *und eine verengt war. Im davorliegenden* ***Verteilerraum und den zugehörigen Labyrinthdichtungen hatte sich eine rotbraune Masse*** *gesammelt (Bild 8.3-5). Das führte zum Leistungsverlust des Triebwerks.* ***Proben aus dem Kraftstoffsystem des Hubschraubers enthielten zwei Phasen****. Oben befand sich* ***klarer, leicht verfärbter Kraftstoff mit einem Wassergehalt von ca. 90 ppm*** *(Bild 8.3-14). Die dunkle schwere Substanz darunter bestand aus einer* ***eisenhaltigen Verbindung*** *(wahrscheinlich Rost) und ebenfalls ca. 90 ppm Wasser. Der OEM des Triebwerks lässt* ***maximal 10 ppm Wasser*** *im Kraftstoff zu.*

Nach dem Trocknen verfärbte sich die Substanz in helles Grau mit rotbraunen Einschlüssen. Entsprechende Ablagerungen wurden auch in ***Kraftstofffiltern, Kraftstoffregler und dessen Eintrittsleitung*** *gefunden. Verdampft das Wasser, entsteht ein* ***dunkelbrauner, spröder und transparenter Film*** *entsprechend den Ablagerungen der Proben.*

Der Betreiber des Hubschraubers verfügte über einen ***Erdtank*** *mit ca. 25 m³ Volumen. Dieser wurde nachweislich seit* ***14 Jahren außer einem Filterwechsel vor 10 Jahren nicht gewartet****. Kraftstoffproben aus diesem Tank*

© Axel Rolfs - Aerocons
Nur zur Ansicht - Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Verschmutzung des Kraftstoffs

Vereiste Kraftstoffsysteme sind bis heute eine Absturzursache.

Bild 8.3-7

wiesen einen hohen Grad an ***Rost und Wasser*** *auf. Laborversuche ergaben, dass die* ***thermischen Eigenschaften*** *(thermische Stabilität, Bild 8.1-16 und Bild8.2-8) sich verschlechtert hatten.*

Weitere Recherchen ließen den Schluss auf eine ***mangelhafte Aufsicht in der Organisation des Betreibers zu. Schulungen des Personals in Kraftstoffmanagement oder Sicherheit erfolgten nicht****.*

Der Pilot hatte in den letzten 5 Jahren nur eine Schulung von zwei Tagen mit einem Trainingsflug erhalten. Das kann erklären, warum nach dem Triebwerksausfall eine erfolgreiche Autorotation unterblieb.

Bild 8.3-7 *(Lit. 8.3-8): Befindet sich Wasser im Kraftstoff, ist Eisbildung im Kraftstoffsystem eine besondere Gefahr. In den späten 50er-Jahren wurden über 10% aller Flugunfälle militärischer Flugzeuge auf* ***Kraftstoffvereisung*** *zurückgeführt (Lit. 8.3-7).*

Bereits 1958 kam es zum Absturz eines großen militärischen Flugzeugs (Skizze links oben) nachdem drei der vier Triebwerke wegen Eis ausgefallen waren. Eine Untersuchung ergab Hinweise auf eine vereisungsbedingte ***Blockierung der zellenseitigen Filter****. Typisch sind* ***kollabierte Filter*** *(Skizze rechts).*

Auch heute noch können Fehlleistungen zu katastrophaler Kraftstoffvereisung führen (Beispiel 8.3-3) .

© Axel Rossmann - als Studienunterlage

Beispiel 8.3-3 (Bild 8.3-7, Lit. 8.3-8): Nach dem Ausfall mehrerer Triebwerke kam es ca. 10 Sekunden nach dem Abheben eines großen Transportflugzeugs zum Absturz. Triebwerk Nr. 3, Nr. 2 und Nr. 1 gingen nacheinander aus. Auch die Leistung von Triebwerk Nr. 4 war betroffen, erholte sich aber kurzzeitig.
Ein ursächlicher Einfluss wird in der **Vermischung von Sommer- und Winterkraftstoff** vermutet. Das Flugzeug kam vorher aus einer wärmeren Gegend und war mit einer größeren Menge dieses Kraftstoffgemischs gelandet.
Die Außentemperatur lag beim Start unter -20°C. In diesem Fall muss ein geeigneter Kraftstoff getankt werden, um die Vereisung von Wasser im Kraftstoff zu vermeiden. Ein **Kraftstoffmix ist dafür ungeeignet**.
Es liegt nahe, dass die **Filter schnell von Eis blockiert** wurden (Lit. 22.2.2-7 und Lit. 22.2.2-9) und so den Kraftstofffluss zu den Triebwerken verhinderten. Dabei kann auch die **Triebwerksregelung** eine Rolle gespielt haben.

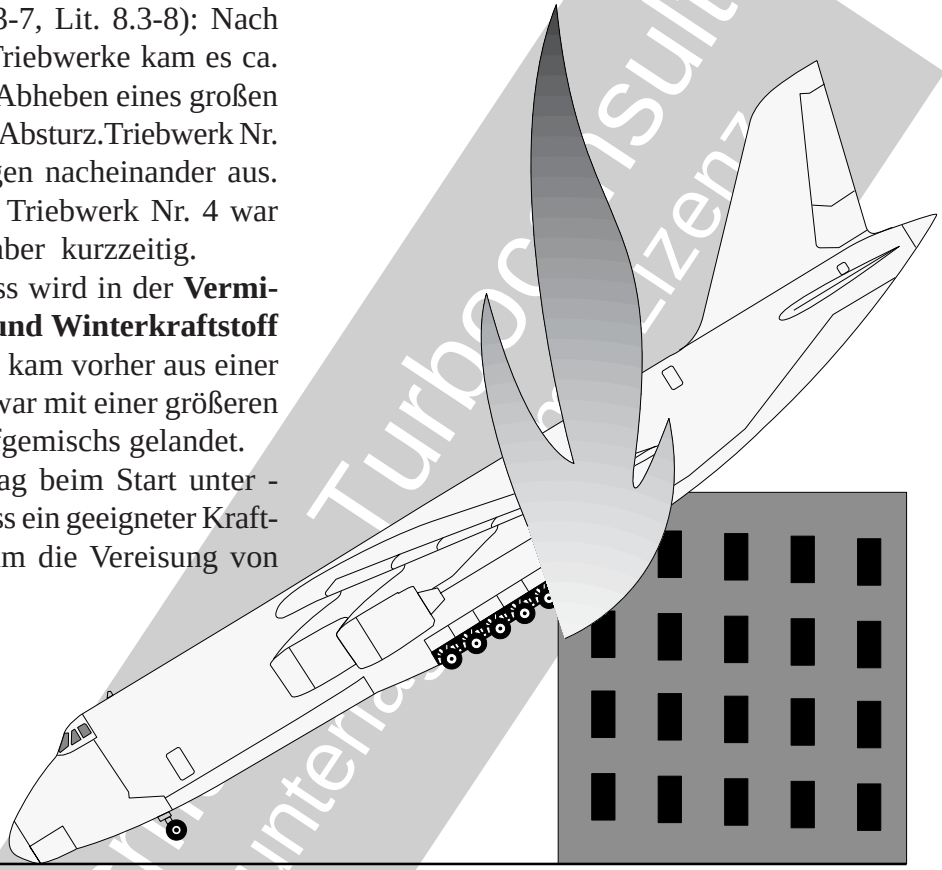


Bild 8.3-8 *(Lit. 8.3-9): Der Nachweis des ausreichend sicheren Verhaltens eines Triebwerks-Kraftstoffsystems ist Aufgabe des Triebwerksherstellers (OEM, 8.3-9). Dies gilt sowohl für zivile als auch für militärische Anwendung. Trotzdem ist natürlich das Vereisungsverhalten des* ***zellenseitigen Kraftstoffsystems*** *auch für die Triebwerke sicherheitsrelevant (Beispiel 8.3-3). Für die Kontrolle des zellenseitigen Kraftstoffsystems gibt es eigene Vorschriften und Empfehlungen.*

Wasser kann auf unterschiedliche Weise in den Kraftstoff gelangen*:*
*- **Während des Flugs** durch Absorption der Luftfeuchtigkeit (Bild 8.3-0).*
*- **Ansaugen von freiem Wasser** aus dem Tanksumpf.*
*- **In Filtern abgesetztes Wasser** wird vom Kraftstoff gefördert.*
*- **Nicht drainierbares Wasser** (z.B. bei zu viel Wasser).*
Für das Kraftstoffsystem besteht eine besondere Gefahr der Eisbildung durch Wasser im Kraftstoff bei einem ***flugbedingten Druck- und Temperaturwechsel*** *(Lit. 8.3-9).*
Besonders in den Flügeltanks kühlt sich beim Steigflug mit den fallenden Außentemperaturen der Kraftstoff ab. Gleichzeitig fällt der Außendruck und der ***Druckausgleich*** *führt zu einem Ausblasen von Luft in den Tanks. Während des Abstiegs steigt der Außendruck an. Nun wird wärmere Außenluft beim Druckaus-*

© Axel Rossmann
Lizenz
Turbocasult
Ausbildungsunterlagen

Systeme und Betriebsstoffe: Verschmutzung des Kraftstoffs

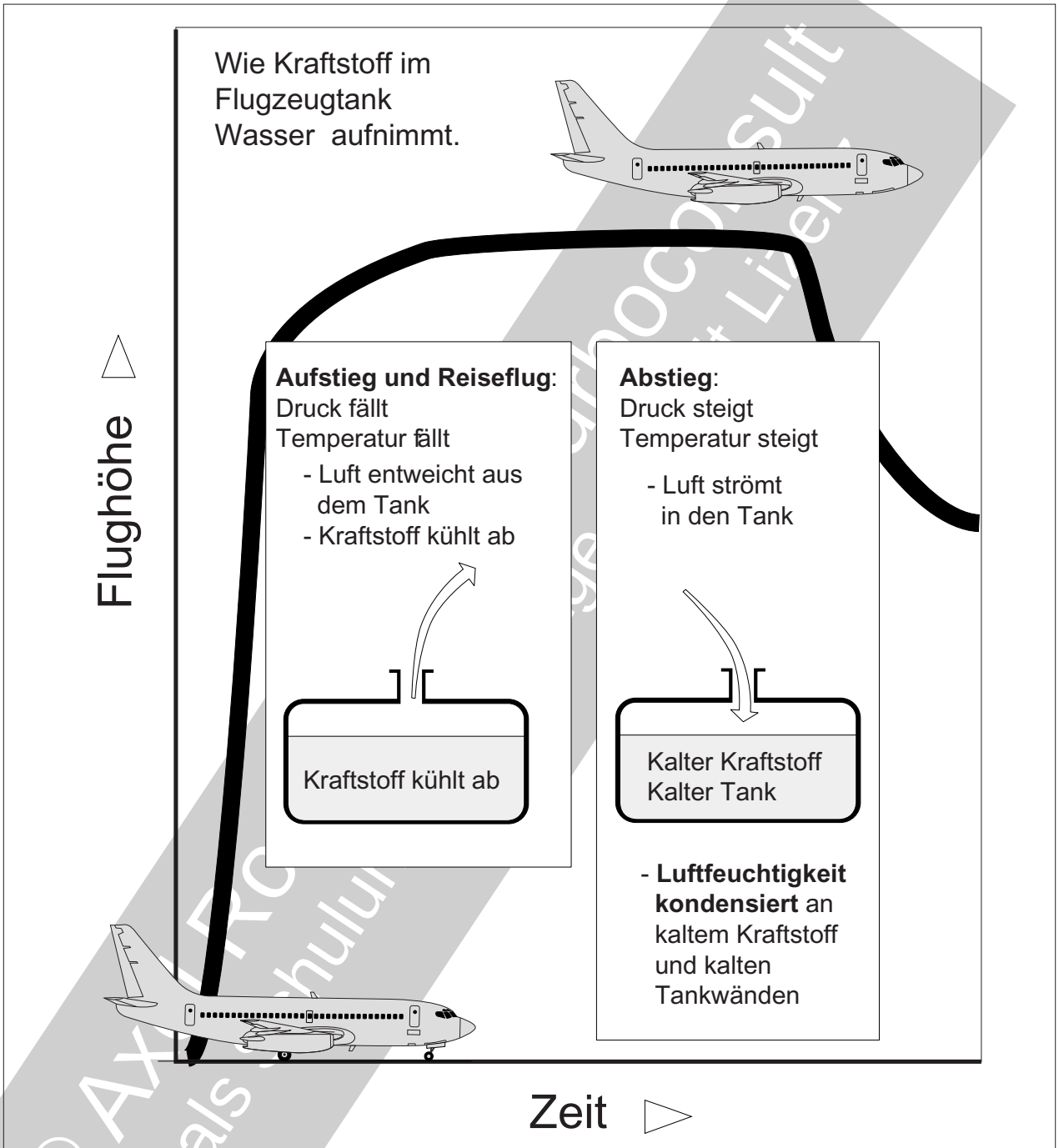


Bild 8.3-8

gleich angesaugt. ***Die Tanks „atmen“****. Über dem kalten Kraftstoff und an kalten Tankwänden kommt es zur* ***Schwitzwasserbildung*** *(Kondensation). Dies kann sich mit der* ***Pumpwirkung des Kraftstoffs*** *(Bild 8.3-0) kombinieren. Damit steigt der Wassergehalt des Kraftstoffs.*

Eine weitere Möglichkeit für den Luftaustausch in Kraftstofftanks sind ***Temperaturzyklen am Boden****.* ***Kalte Nächte und heiße Tage*** *bzw.* ***Aufheizung durch Sonneneinstrahlung*** *führen zu Volumenänderungen der Luft in den Tanks und so ebenfalls zum „Atmen“.*

Systeme und Betriebsstoffe: Verschmutzung des Kraftstoffs

Bild 8.3-9.1

Bild 8.3-9.1 und 8.3-9.2 *(Lit. 8.3-10): Der Hubschrauber sollte Transportflüge vornehmen. Er wurde am Abend vorher auf einer geeigneten Wiese in der Nähe des Einsatzorts abgestellt. Dann erfolgte eine Betankung mit Jet A1* ***aus einem 200 l-Fass*** *bevor der Hubschrauber abgedeckt über Nacht vor Ort stehen blieb. Nach dem Unfall wies die Kraftstoffprobe aus diesem Fass kein gelöstes Wasser auf. Nach dem Unfall konnte Wasser im Kraftstoff des Hubschraubers nicht mehr nachgewiesen werden. Trotzdem ergab die Untersuchung des abgestürzten Hubschraubers folgende bemerkenswerte Befunde:*

- Die zellenseitigen ***Schläuche der Kraftstofftankpumpe und das Filtergehäuse waren weitgehend leer****.*

- Im zugehörigen ***Filtergehäuse*** *befand sich eine* ***Wasserblase*** *von ca. 1 cm³ und* ***dunkle Ablagerungen*** *sowie ein Kraftstoffrest von wenigen cm³. Dieser wurde als Probe untersucht und zeigte neben freiem Wasser ca.* ***120 ppm Wassergehalt*** *(=,0,012 %, Bild 22.2.2-14). Das übersteigt die Löslichkeit für Wasser im Kraftstoff (Bild 8.3-3) deutlich.*

- Eine Kraftstoffprobe aus dem triebwerksseitigen Filter zeigte einen Wasseranteil von ***über 140 ppm (!). Auch das übersteigt die Löslichkeit im Kraftstoff weit****.*

- In der Kraftstoffleitung (9,5 mm Durchmesser) zum Triebwerk befand sich ein 2 x 3 mm großes Sandkorn. Es dürfte den Durchfluss beeinträchtigt haben. Das ist jedoch keine befriedigende Erklärung für den Triebwerksausfall, wirft jedoch ein Licht auf Wartungsmängel.

- Die ***O-Ring-Dichtung des Tankdeckels*** *(Gummi) war* ***wellig und rissig*** *(Kapitel 6.10.1). Das lässt eine Undichtigkeit erwarten. Damit ist eine* ***Wasseraufnahme des Kraftstoffs*** *(„Atmen“, Bild 8.3-8) oder* ***eindringender Niederschlag*** *zusammen mit früherem, verbliebenem, abgesetztem Wasser durchaus denkbar.*

- Der Tank besteht aus zwei Zellen (Skizzen unten). Sie sind mit einem Rohr verbunden. Die Rohröffnungen im rechten Tank befinden sich ca. 15 mm oberhalb des Tankbodens. So war in horizontaler Lage ca. 30 cm³ Kraftstoff nicht abpumpbar. Im linken Tank betrug das „Restvolumen“ ca. 90 cm³. Bei Schräglage vergrößert sich dieses Volumen deutlich. Das ermöglicht die Ansammlung von ausreichend ***freiem Wasser am Boden des Tanks. Bei einem Manöver kann es plötzlich angesaugt*** *werden.*

- Eine Untersuchung der Cockpitanzeigen (Warnlampenbefund durch den Aufschlag) ließ auf eine zu niedrige Triebwerksdrehzahl schließen.

- Dieses relativ ***kleine Triebwerk*** *(Skizze oben) besitzt eine zentrale Brennkammer mit nur* ***einer Kraftstoffdüse****. Eine solche Konfiguration lässt besondere* ***Sensibilität gegenüber Kraftstoffverunreinigungen*** *erwarten.* ***Wenige cm³ freien Wassers dürften bereits zum Verlöschen*** *führen.*

Als ***wahrscheinliche Unfallursache*** *ergab sich aus diesen Befunden:*

© Andreas Hahn - Turbomasch
als Schulungsunterlage zur Verfügung

Systeme und Betriebsstoffe: Verschmutzung des Kraftstoffs

Absturz eines Hubschraubers als Folge von Wasser im Kraftstoff und einer unglücklichen Tankkonfiguration.

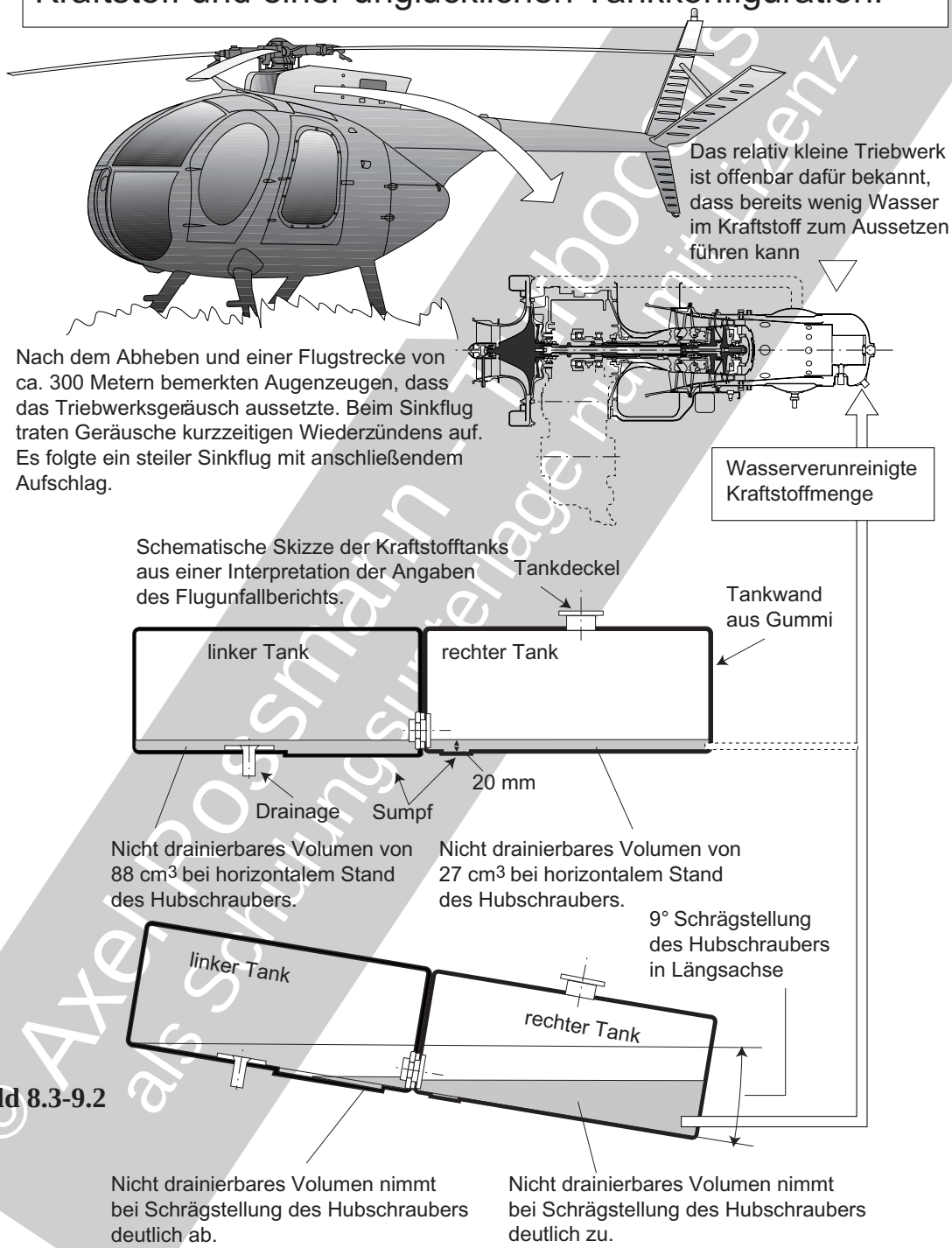
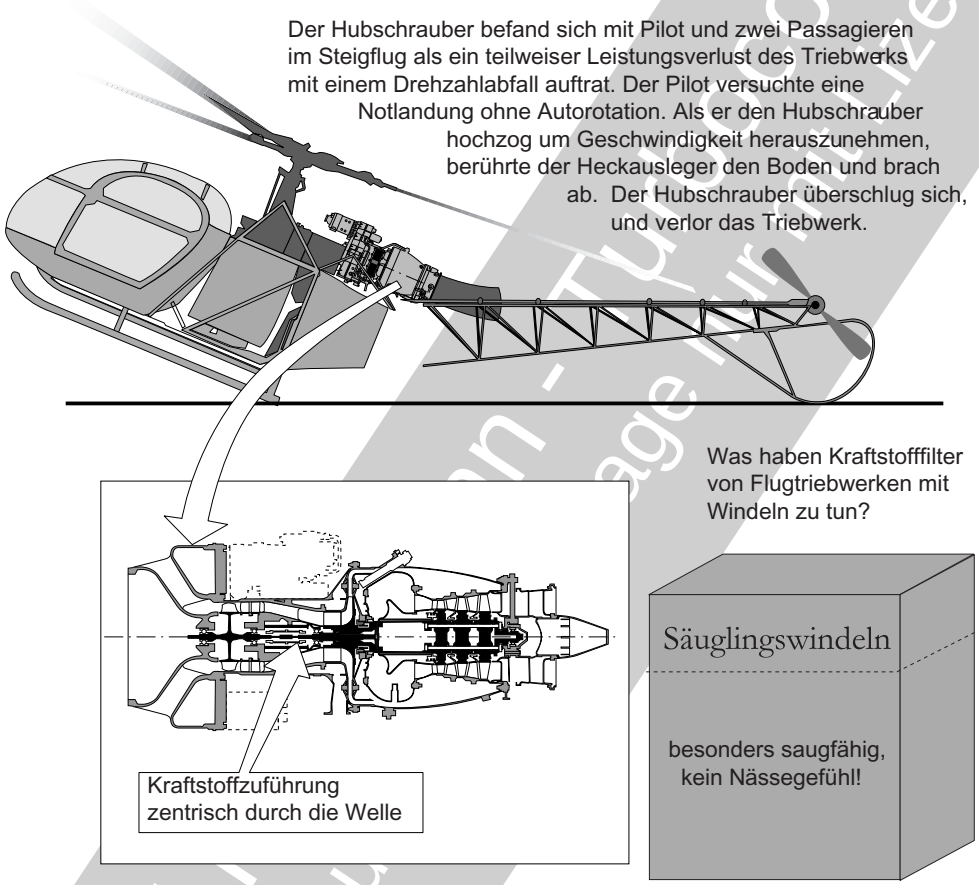


Bild 8.3-9.2

© Axel Poßmann - Turbocats
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Die besondere Tankkonfiguration ermöglichte bei einem Manöver das ***plötzliche Ansaugen im Tank abgesetzten Wassers****. Das* ***Verlöschen*** *(„Flame Out“) der Brennkammer bzw. des Triebwerks war die Folge.*

Freies Wasser im Kraftstoff in Kombination mit besonderen Filtereinsätzen um gelöstes Wasser zu binden, kann das Kraftstoffsystem verstopfen.



In den Filtern befinden sich ähnliche Medien wie in Säuglingswindeln. Diese nehmen das freie Wasser auf und binden es als gallertige Masse.

Bild 8.3-10

Bild 8.3-10 *(Lit. 8.3-11): Aus dem Unfallhubschrauber und an anderen Orten wurden Kraftstoffproben entnommen:*
- vom Einfüllbereich,
- dem zellenseitigen Filtergehäuse,
- dem Tankwagen und
- einem anderen Hubschrauber der mit der gleichen Anlage betankt wurde.

Die ***Proben des Einfüllbereichs waren mit Wasser nahezu gesättigt*** *(Bild 8.3-3). Vom Kraftstofflieferanten war ein* ***Enteisungsadditiv*** *zugegeben worden.*

Das Triebwerk wurde beim OEM unter Aufsicht der zuständigen Luftfahrtbehörde mit den folgenden Befunden untersucht.

Es arbeitete beim Hochfahren auf dem Prüfstand unregelmäßig*. Darauf wurde das Triebwerk zerlegt und verdächtige Bereiche untersucht.*

Bei diesem Triebwerkstyp wird der Kraftstoff durch ein zentrales Einspritzrohr in der Welle zugeführt (siehe auch Bild 8.3-6). Von dort wird der Kraftstoff mit einem Verteilerrad radial in die Brennkammer versprüht. Röntgenaufnahmen ließen in Rohr und Verteilerrad ***umfang-***

Systeme und Betriebsstoffe: Verschmutzung des Kraftstoffs

reiche Ablagerungen *erkennen. Aus dem triebwerksseitigen Kraftstoffsystem konnten insgesamt 0,4 Gramm* ***unmagnetische, braungefärbte*** *Ablagerungen entnommen werden. Konsistenz und Verteilung ließen darauf schließen, dass sie sich unter den Fliehkräften bildeten.*

Während der Untersuchung wurde bekannt, dass beim gleichen Betreiber wieder ein Triebwerksausfall im gleichen Hubschraubertyp auftrat. Ein Flugunfall konnte diesmal vermieden werden. Auch hier waren die gleichen Ablagerungen vorhanden. Eine Kraftstoffprobe aus dem Tank ließ eine ***gelatineartige Substanz*** *erkennen.*

Ein solches Gel konnte gezielt erzeugt werden, indem man die braunen Ablagerungen des Kraftstoffrohrs auflöste.

Die Analyse ergab, dass es sich um ***zellulosehaltiges Kunstharz*** *handelt. Weitere Analysen ließen das Material als* ***Carbooximethylzellulose*** *(CMC) identifizieren. Dies ist ein häufig angewendetes* ***wasserlösliches Pulver****. Es beeinflusst Feuchtigkeit als Stabilisator und erhöht so die Viskosität wässriger Medien.*

Dieses Produkt wurde in einem bestimmten Typ von ***Kraftstofffiltern*** *verwendet. Aus Sicherheitsgründen hatten Luftfahrtbehörden ca. drei Monate vor dem Unfall in einem Warnschreiben (Aviation Maintenance Alert) auf die Rücknahme dieses Produkts gedrängt.*

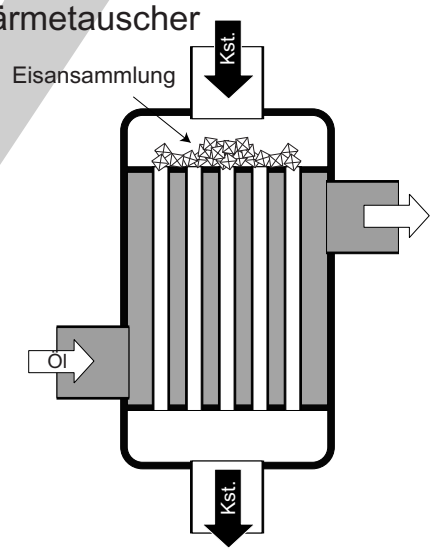
Solche Filter bestehen aus einem ***Polymer*** *das* ***freies Wasser ähnlich Babywindeln aufsaugt*** *(Bild 8.3-14). Damit sinkt der Anteil freien Wassers im Kraftstoff unter 2 ppm. Sammelt sich in diesem Stoff Wasser,* ***steigt der Strömungswiderstand in der Filterkartusche****. Ab einem bestimmten Widerstand ist die Kartusche zu wechseln.*

Ungewöhnlich viel freies Wasser im Kraftstoff (engl. slugs) führt zum schnellen Druckanstieg und unterbricht die Durchströmung. Der Filterhersteller gab an, dass eine ungenannte Zahl Filterkartuschen unter normalen Betriebsbedingungen so blockierten. Das ***Wasser aufnehmende Material wird dann durch den Filter gedrückt und vom Kraftstoff in das Triebwerkssystem transportiert****. Im Filter des Unfallhubschraubers befand sich solches,* ***in Wasser aufquellendes Material (Polyacrylat). Es entsprach offenbar nicht dem vorgesehenen Produkt****.*

Damit ergab sich als ***Unfallursache****:*

Das Triebwerk des Hubschraubers verlor Leistung, weil ***„unvorschriftsmäßiges“ Filtermaterial*** *aus dem Filter trat und Kraftstoffführung sowie* ***Einspritzung verlegte****. Die Blockierung des Filters wurde offenbar von einem* ***ungewöhnlich hohen Wassergehalt des Kraftstoffs*** *begünstigt.*

Eisansammlungen im Kraftstoff/Öl-Wärmetauscher

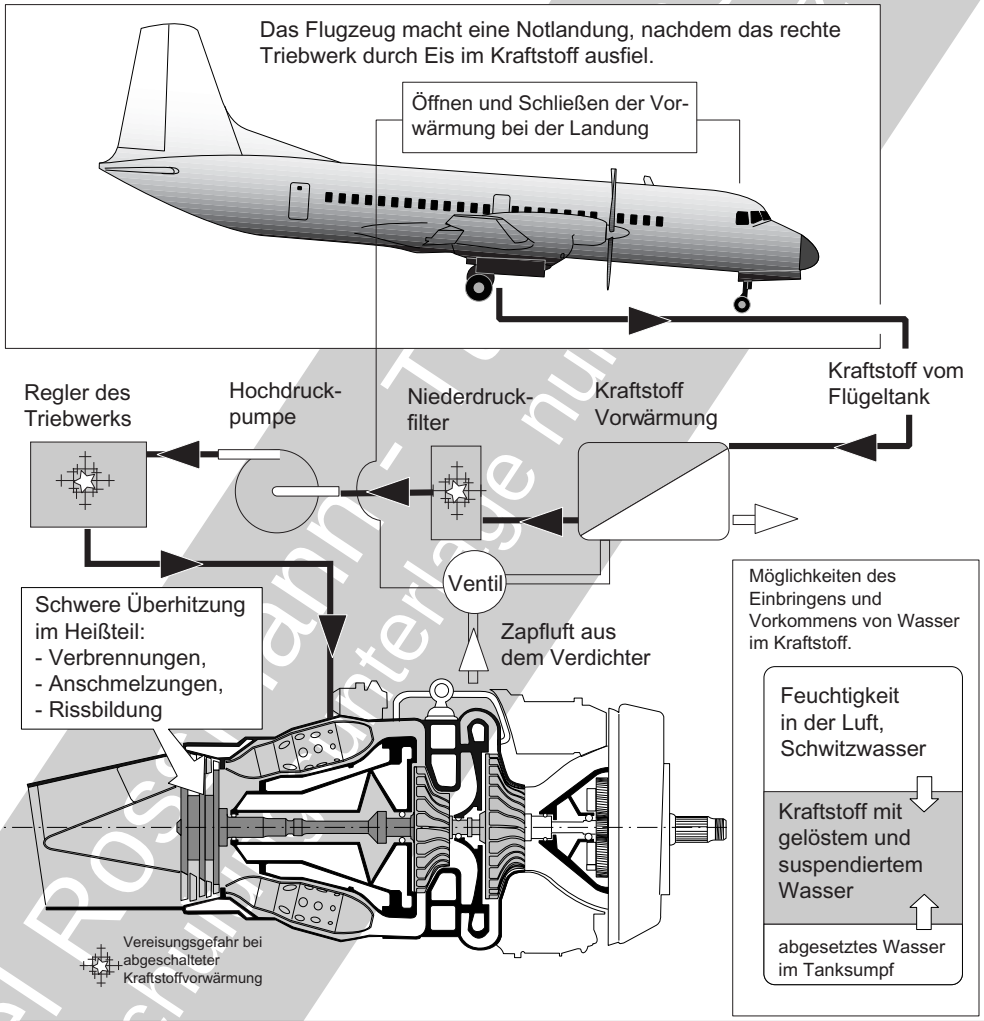


Beispiel 8.3-4 (Lit. 8.3-21und Lit. 8.3-26):
Es kam zum Ausfall beider Triebwerk eines großen Verkehrsflugzeugs mit ETOPS Zulassung. Der Kraftstoffmangel wird mit einer **Blockierung des Öl/Kraftstoffwärmetauschers** durch Eis erklärt. Dies stammt offenbar aus dem Leitungssystem und wurde vom Kraftstoff abgelagert.
Ein Hinweis auf diesen Schadensbalauf geben **Kavitationsspuren** in der Hochdruckpumpe dahinter. Der Pumpentyp geht aus der Literatur nicht hervor. Kavitation in Zahnradpumpen behandelt Bild 8.3.1-1 und Bild 8.3-18).

© Verlagsgruppe Jungcomplex - Tuppcomplex
Alle Schulmaterialien mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Verschmutzung des Kraftstoffs

Bei ausreichend niedrigen Kraftstofftemperaturen kann auch das üblicherweise gelöste oder fein verteilte Wasser die Kraftstoffzufuhr beeinträchtigen.



Folgen einer Vereisung des Kraftstoffsystems in Bereichen wie Filter, Zumessquerschnitten und dem Regler:

- Ausfall der Triebwerksleistung
- Fluktuation der Triebwerksleistung
- Wiederstartprobleme
- "Hang up": Überhitzung bei vergeblichem Beschleunigungsversuch aus niedrigen Drehzahlen.

Bild 8.3-11

Bild 8.3-11 *(Lit. 8.3-12): Der Flug fand in* ***Alaska*** *statt. Vor (-15°C) und während (ca. -40°C) des Flugs herrschte* ***extreme Kälte.*** *Der* ***Kraftstoff kühlte*** *entsprechend ab. Bei der* ***Drainage des Sumpfs der Flugzeugtanks*** *vor und nach dem Betanken wurde kein freies Wasser beobachtet. Eine solche* ***visuelle Kontrolle kann zwar freies Wasser, nicht aber gelöstes Wasser erkennen*** *(Bild 8.3-3). Trotzdem besteht Vereisungsgefahr. Der Pilot schaltete beim Abstieg aus ca. 800 Metern Höhe vorschriftsgemäß die Kraftstoffheizung ab. In diesem Moment zeigte das* ***rechte Triebwerk eine ungewöhnlich niedrige Drehzahl*** *und ein kleines Moment zum Propeller. Entsprechend zog das Flugzeug nach rechts. Das Triebwerk reagierte nicht auf den Leistungshebel und wurde mit dem Propeller auf Segelstellung* ***abgeschaltet.***

© Axel Rossmann - Tu Chemnitz
Skriptunterlage nur

Systeme und Betriebsstoffe: Verschmutzung des Kraftstoffs

Kurz darauf beobachtete der Pilot im ***Landeanflug*** *ähnliche* ***Symptome am anderen Triebwerk****. Nach dem Ausfahren des Fahrgestells hörte er* ***einige Mal ein Knallen*** *und bemerkte* ***Rauchgeruch.*** *Das Flugzeug begann nun nach links zu schwenken. Das Instrument für den Kraftstoffdurchfluss des linken Triebwerks schlug stark aus. Das Triebwerk verlor Leistung und der Pilot ließ das rechte Triebwerk wieder an. Er erkannte, dass er den Flugplatz nicht mehr erreichen würde. So entschied er sich zur Notlandung auf einer nahen Eisfläche. Mit eingezogenem Fahrwerk rutschte das Flugzeug ca 1 km auf dem Eis. Gefährlich Verletzte gab es dabei nicht.*

Beide Triebwerke wurden ausgebaut und beim OEM unter Aufsicht der zuständigen Behörde untersucht.

Im linken Triebwerk waren ***Leit- und Laufschaufeln aller 3 Turbinenstufen geschmolzen und „verbrannt“*** *(Lit. 8.3-27). Einspritzdüsen und Brennkammer wiesen Merkmale für Übertemperatur auf. Kraftstoffpumpe und Regler arbeiteten zufriedenstellend. Im Regler befand sich einiges freies Wasser. Das* ***Magnesiumgehäuse war korrodiert****.*

Das ***rechte Triebwerk*** *wies keine Schäden auf. Am Prüfstand verhielt es sich normal.*

Bei einer Umgebungstemperatur von -15°C wurden den Filtern beider Triebwerke und dem Sumpf aller Zellentanks Kraftstoffproben entnommen. Auch aus dem Tankstutzen vom Ausgangsflugplatz lagen Proben (Jet A) vor. ***Alle Proben wiesen*** *in unterschiedlichen Mengen* ***Wasser*** *auf. Den höchsten Wert mit* ***150 ppm*** *(= 0,015%) ergab die Wasserprobe aus dem Kraftstofffilter (Bild 8.3-14). Die Werte der anderen Proben lagen unter 40 ppm. In allen Proben wurden merkliche Mengen fester* ***Verunreinigungen wie Fasern und Kristalle*** *gefunden (Bild 8.3-1).*

Der OEM zog und untersuchte weitere Kraftstoffproben aus Pumpe und Regler des linken Triebwerks. Sie wiesen ***extreme 30 Prozent*** *(!)* ***Wasservolumen*** *auf. Das Wasser enthielt* ***10-15 Prozent Chloride*** *und war damit als* ***äußerst korrosiv*** *einzustufen.*

Aus früheren Triebwerksversuchen des OEM war bekannt, dass ***bei 100 ppm Wassergehalt das Kraftstoffsystem in Intervallen blockiert****. Jedes Triebwerk wird aus dem Kraftstofftank des zugehörigen Flügels versorgt (Skizze oben). Mit eingeschalteter* ***Kraftstoffheizung strömt Zapfluft des Triebwerks*** *ein (mittlere Schemaskizze). Beim Landeanflug ist* ***nach Handbuch 5 Minuten vor der Landung die Kraftstoffenteisung lediglich 2 Minuten zu betätigen****.*

Entsprechend dem Untersuchungsbericht ist die wahrscheinliche Unfallursache *: Während des Flugs schied sich* ***im kalten Kraftstoff gelöstes Wasser als freies Wasser*** *ab (Rahmen rechts). Dieses freie Wasser war als Tröpfchen oder Eiskristalle im Kraftstoff fein verteilt. Die Kraftstoffheizung dürfte den* ***sehr kalten Kraftstoff nur wenig über den Gefrierpunkt erwärmt*** *haben. Nach dem, für den Landevorgang* ***vorschriftsgerechten Abschalten des Erhitzers, kann das Wasser in Sieben, engen Öffnungen und dem Filter schnell Eis bilden.*** *Der behinderte Durchfluss führte zu Leistungsverlust und dem Abschalten des rechten Triebwerks. Die* ***Überhitzung des verbliebenen linken Triebwerks*** *lässt sich mit* ***vereisungsbedingten Kraftstoffpulsationen*** *bei niedriger Drehzahl und damit zu wenig Verdichterluft erklären.*

Kommentar*: Das mehrmalige Knallen beim Landeanflug könnte von einem* ***Verdichterpumpen*** *des linken Triebwerks herrühren. Die Ursache dürfte der drehzahlbedingte niedrige Verdichteraustrittsdruck sein. Ein solches Pumpen führt bei den mechanischen Kraftstoffregelungen älterer Triebwerkstypen (Skizze unten, Entwicklung in den 50er-Jahren) häufig zu* ***extremen Übertemperaturen*** *mit dem beschriebenen Schadensbild (Lit. 8.3-27). Insbesondere wenn beim Pumpen versucht wird die* ***Leistung/Drehzahl mit erhöhter Kraftstoffzufuhr anzuheben****.*

© Aero Research - Turbocopter
ausbildungsunterlagen - nur zur Information

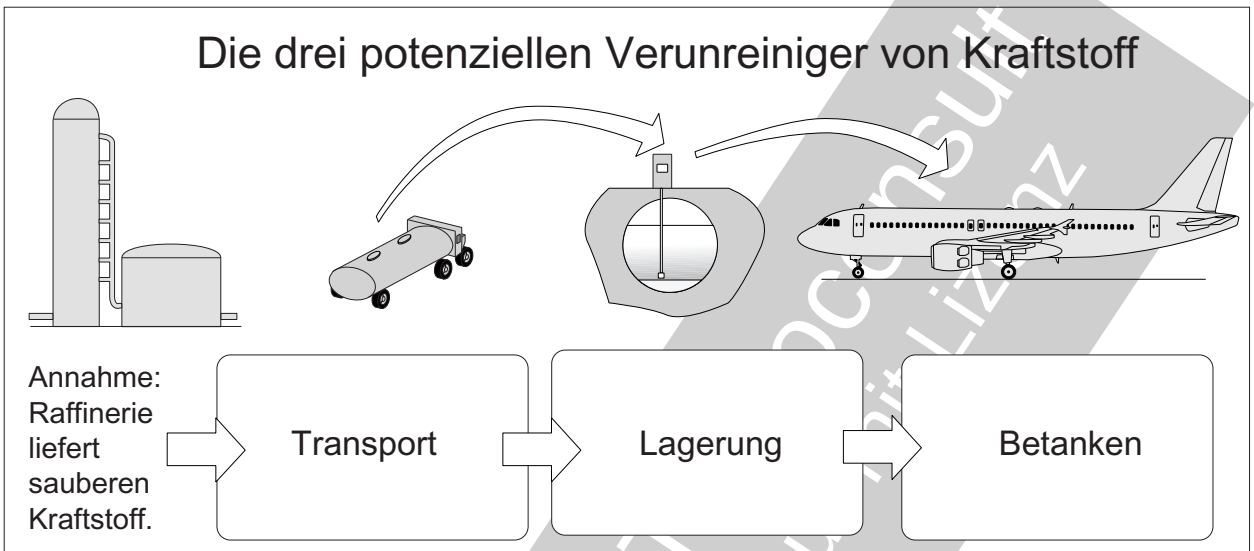


Bild 8.3-12.1

Bild 8.3-12.1 *und* ***-12.2*** *(Lit. 8.3-2 und Lit. 8.3-4): Fraglich ist, ob es richtig ist davon* ***auszugehen, dass der Hersteller immer sauberen Kraftstoff liefert****. So wird zumindest Aufmerksamkeit empfohlen. Dabei sind die* ***Maßnahmen des Herstellers gegen Verunreinigungen*** *von großer Bedeutung. Hierzu gehört auch Modernität und* ***Zustand seiner Anlagen****. Ein weiterer Aspekt ist der* ***Rat des Herstellers,*** *bei Kraftstoffproblemen besonders auf Verunreinigungen zu achten.*

Nach der Produktion des Kraftstoffs gibt es erfahrungsgemäß ***drei potenzielle Bereiche*** *in denen Flugkraftstoffe verunreinigt werden können:*

- Transport
- Lagerung
- Umfüllen und Betankung.

Um diese Risiken zu minimieren bieten sich ***geeignete Vorgehensweisen*** *(Bild 8.3-8.2) an (Lit. 8.3-4).*

Kommentare und Empfehlungen*:*

*- Grundsätzlich gilt das Prinzip des „****Good Housekeeping****“ (Bild 8.3-13). Es ist entscheidend von der* ***Fachkenntnis/Ausbildung, Erfahrung*** *und nicht zuletzt von der* ***Motivation des Personals*** *bestimmt.*

- Dazu gehört bei ***Montage und Demontage*** *von Kraftstoffsystemen Öffnungen sofort mit geeigneten* ***Abschlusskappen*** *gegen eindringende Verunreinigungen wie Staub und Insekten zu verschließen.*

- Werden Flugzeugtanks für die ***Wartung*** *geöffnet, entstehen vielfältige Möglichkeiten für Verschmutzung. Besonders auf zurückgelassene Putzlappen und Papiertücher ist zu achten. Deshalb ist der Tank* ***vor dem Verschließen, am besten von einer weiteren Person****, zu kontrollieren.*

- Um ***Wasseraufnahme aus der Luft zu minimieren*** *(Bild 8.3-0), werden Tanks möglichst gefüllt bzw. aufgefüllt (****top off****). So lässt sich das Luftpolster minimieren.*

- Filter und Siebe *sind entsprechend den Vorschriften regelmäßig zu* ***inspizieren und zu reinigen****.*

- Wird bei Verstopfung ein ***Bypass*** *geöffnet, können* ***Verunreinigungen ungehindert durchtreten****. Damit besteht die Gefahr weiterer* ***Schäden im nachfolgenden System****. Es handelt sich also um keine geeignete Abhilfemaßnahme.*

- Darüber hinaus gilt es, Verunreinigungsmöglichkeiten die als ***Folgeschäden*** *auftreten zu vermeiden. Dazu gehören Probleme durch* ***Bakterienwachstum und Korrosion*** *(Bild 8.3-1 und Bild 8.3-5). Das erfordert Kenntnisse der* ***Verunreinigungsmechanismen*** *und Ursachen.*

- Eine wichtige Rolle bei der Vermeidung von Verunreinigungen spielt die ***Überprüfung des***

© Axel Rossmann - Tecconsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Verschmutzung des Kraftstoffs

Regeln zur Vermeidung von Verunreinigungen im Kraftstoff bis zum Betanken.

Merke: Immer wenn Kraftstoff transportiert wird besteht die potenzielle Gefahr einer Verunreinigung. Grundsätzlich sind die vorgeschriebenen Verfahren für den Umgang bei Transport und Lagerung von Kraftstoff anzuwenden. Die Betreiber müssen beim Tanken folgende Vorgehensweisen einhalten:

"A" Wird Kraftstoff **in Lagertanks** am Flugplatz gepumpt, muss er einen **Trennfilter** (filter separator) entsprechend MIL-F-8508 durchströmen.

"B" Turbinenkraftstoffe sollten sich vor der Entnahme ca 1 Stunde pro 30 cm Spiegelhöhe **absetzen.** Entsprechende Tankkapazität ist bereitzuhalten.

"C" Nach jeder neuen Befüllung des Tanks muss im Anschluss an die Absetzzeit der Kraftstoff mit einem Lackmuspapier, das mindestens 15 Sekunden einzutauchen ist, **überprüft** werden. Bei starken Regenfällen sind bei Erdtanks häufigere **Lackmustests** durchzuführen.

"D" Die **Ansaugöffnung** muss sich mindestens 15 cm über dem Tankboden befinden. Die Vorteile einer schwimmenden Ansaugöffnung sind nicht zu unterschätzen. Sie vermeidet das Ansaugen nicht vollkommen abgesetzter Verunreinigungen bzw. das Aufwirbeln von Verunreinigungen am Tankboden.

"E" **Aus Lagertanks** entnommener Kraftstoff muss einen **Trennfilter** (filter separator) entsprechend MIL-F-8508 A durchströmen.

"F" Besondere Vorsicht ist beim **Füllen mobiler Tankanlagen** erforderlich, um das Eindringen von Staub, Schmutz, Regen oder anderen Fremdmaterials zu vermeiden.

"G" Mobile Tankanlagen sind aus **korrosionsfestem Werkstoff** wie rostfreiem Stahl herzustellen, um Rost oder Abblätterungen zu verhindern. Bei nicht korrosionsfestem Stahl ist eine geeignete **Beschichtung** aus nicht reagierendem Material vorzusehen.

"H" Turbinenkraftstoff sollte vor dem Füllen der Flugzeugtanks so **gefiltert** werden, dass feste Partikel mit einer Größe von 5µm zurückgehalten werden und der Gehalt an freiem Wasser unter 0,0015 % (15 ppm) liegt. Die Filter dürfen **keine Bypassventile** aufweisen.

"I" Anwendung aller **Qualitätssicherungsmaßnahmen** bei der Handhabung des Kraftstoffs: Regelmäßige **Kontrolle der Filter**, häufige **visuelle Kraftstoffprüfungen** und besondere **Aufmerksamkeit** gegenüber möglichen Verunreinigungsquellen. Beispiele: Vermeiden des Ansaugens der Fasern eines Reinigungstuchs für die Ansaugöffnung. Außer Gebrauch ist die **Ansaugöffnung** immer mit einer **Staubkappe** zu verschließen.

Bild 8.3-12.2

Kraftstoffs. Ausführliche Angaben zur Probenentnahme und Prüfung *sind in dem* ***Aerospace Recommended Practice ARP 1401*** *(Lit. 8.3-9) zusammengestellt. Es ist wichtig, sich über die* ***Grenzen der Prüfungen und deren Aussagefähigkeit*** *klar zu sein (Bild 8.3-3 und Bild 8.3-11).*

*- Als Abhilfemaßnahmen ist nicht zuletzt auch eine „**verunreinigungsrobuste**" (z.B. gegen Vereisung)* ***konstruktive Gestaltung*** *des Kraftstoffsystems und seiner Komponenten anzusehen (Bild 8.3-14).*

© AVIPOSMAN - Turbocons
alle Rechte vorbehalten, nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Verschmutzung des Kraftstoffs

Zum "Good Housekeeping" gehört:
Die Aufbewahrung, Verteilung und das Tanken von Kraftstoff sollte nicht in Tonnen oder Kanistern erfolgen, um das Einschleppen von Verunreinigungen in das Kraftstoffsystem zu vermeiden.

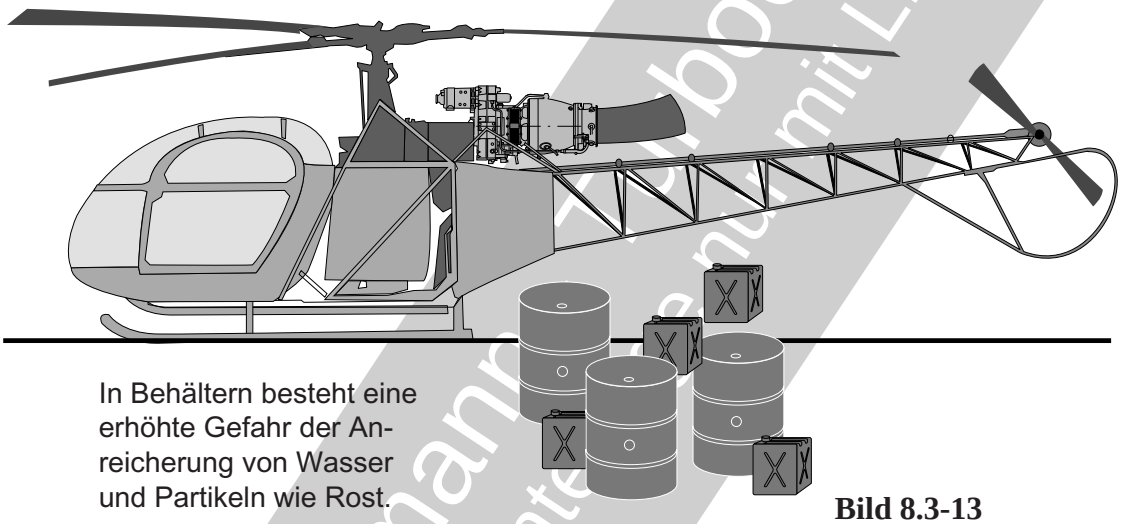


Bild 8.3-13

Bild 8.3-13 *(Lit. 8.3-2): Gerade bei kleineren Fluggeräten wie* ***Privatflugzeugen*** *und* ***Hubschraubern*** *wird oft der Kraftstoff in* ***Tonnen und/oder Kanistern*** *gelagert.*
*Damit ergeben sich vielfältige Gelegenheiten der Kraftstoffverschmutzung. Sie stehen eng mit dem „****House Keeping****", bzw. mit dem* ***Verhalten des Personals,*** *in enger Verbindung.*
Unordnung, Schmutz und herumliegender Abfall *sind bedenkliche Anzeichen.*
Sie sollten beispielsweise dazu auffordern, die ***Verschlüsse der Tankgefäße auf Dichtheit zu prüfen.*** *Auch der* ***Füllstand*** *sollte genauer inspiziert werden (Bild 8.3-9.1).* ***Luftzutritt*** *ist immer eine Möglichkeit, dass Kraftstoff unzulässig viel Wasser aufnimmt. Diese Möglichkeit wird von* ***großen Temperaturwechseln*** *frei stehender dünnwandiger Behälter bzw. des darin befindlichen Kraftstoffs begünstigt (Bild 8.3-0).*
Stehen die Behälter ohne Abdeckung im Freien, kann Wasser eindringen. Beispielsweise wenn es sich auf der Tonne gesammelt hat.

Problematisch ist auch die Möglichkeit, dass Kraftstoffe, mit unterschiedlichen Additiven, ***unkontrolliert gemischt*** *werden.*
Ist der Korrosionsschutz der Tonnen auf der ***Innenseite beschädigt,*** *ist mit* ***Rost*** *zu rechnen. Von außen sichtbare* ***Dellen*** *weisen auf eine Beschädigung mit Rissbildung in der Beschichtung der Innenseite hin. Gerät der so entstehende Rost in das Triebwerk, kann das gefährliche Folgen haben (Bild 8.3-1).*
Bei ***unzureichender Kennzeichnung*** *kann es im Extremfall zur Verwechslung mit anderen Medien kommen. Das kann katastrophale Folgen haben. So wurde ein Fall bekannt, bei dem es zum Absturz einer vollbesetzten Passagiermaschine kam. Kanister eines drainierten Wasser-Kraftstoffgemischs wurden mit Wasser-Methanol-Kanistern, die zur Einspritzung in den Verdichter bei Heißtagsbedingungen bereit standen, verwechselt. Beim Start führte der zusätzlich eingespritzte Kraftstoff zur Zerstörung der Heißteile beider Triebwerke (Lit. 8.3-26).*

© Aktiv Bessmann Textbook Bessmann nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Verschmutzung des Kraftstoffs

Zur Abscheidung von Wasser und festen Partikeln aus dem Kraftstoff wird erheblicher Aufwand betrieben.

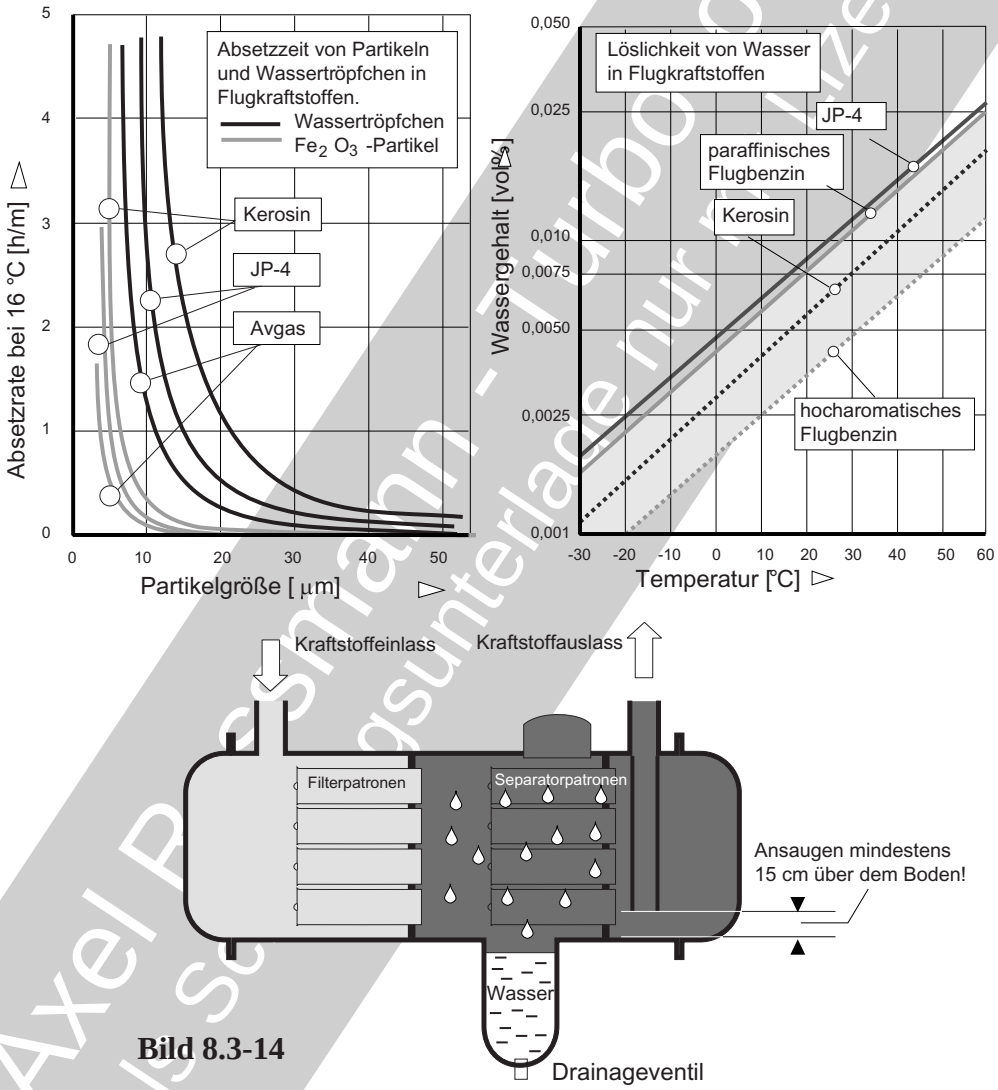


Bild 8.3-14

Bild 8.3-14 *(Lit. 8.3-1, Lit. 8.3-4 und Lit. 8.3-9):*
Dass gefährliche Kraftstoffverunreinigungen bis in ein Triebwerk gelangen, sollte sich mit geeigneten ***Reinigungsmaßnahmen*** *vermeiden lassen.*
Wichtig ist die Einhaltung ***ausreichender Zeiten für das Absetzen von Verunreinigungen*** *(Diagramm oben links, Bild 8.3-12.2). Diese hängen sowohl von Kraftstoffeigenschaften wie Viskosität, d.h. Zusammensetzung und Temperatur, als auch von Art und Größe der Partikel ab. Die* ***Absetzzeit ist in Abhängigkeit von der Absetzrate auf die Absetztiefe abzustimmen****.*
Es gibt Tanks die ***faseriges Material wie Zellulose*** *enthalten (Skizze unten, siehe auch Bild 8.3-10). Das überführt in kleine Tröpfchen fein verteiltes Wasser (entrained water) in* ***größere Tröpfchen****. Diese setzen sich dann schneller ab. Das so entstandene „freie Wasser“ kann vom Sumpf abgelassen werden.*

© Axel Rossmann - Turbomotorenschulung
als Schulungsunterlage nur in Verbindung

Systeme und Betriebsstoffe: Verschmutzung des Kraftstoffs

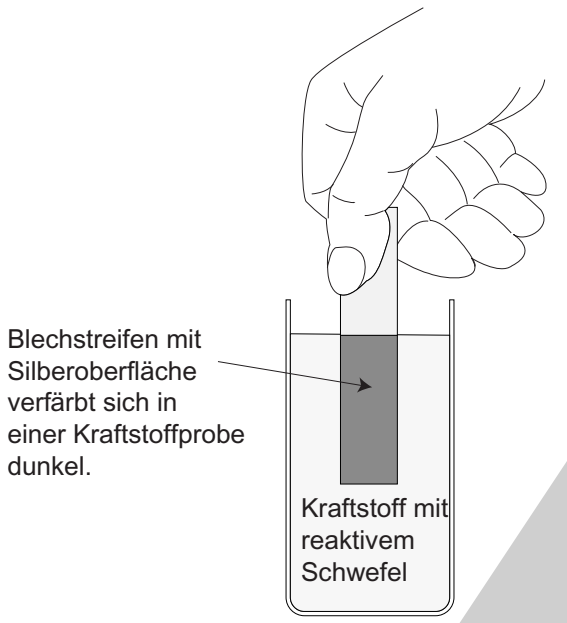


Bild 8.3-15

Der ***Gehalt an löslichem Wasser*** *ist außer vom Kraftstofftyp in erster Linie von der Kraftstofftemperatur abhängig (Diagramm oben rechts). Er lässt sich nicht visuell, aber an Proben nachweisen (Bild 8.3-3). Dies ist eine Voraussetzung, um gezielte Gegenmaßnahmen einzuleiten.*

Auch ***eine günstige konstruktive Gestaltung kann ein Kraftstoffsystem*** *gegen Verunreinigungen* ***robust*** *machen. Das trägt zur Sicherheit bei. Dazu gehören auch triebwerksseitige und zellenseitige* ***Maßnahmen*** *wie:*

- Vergrößerte Siebe,
- zusätzliche Bypassventile,
- gröbere Filter,
- Erwärmen des Kraftstoffs (Wärmetauscher) vor dem Triebwerk
- Eis verhindernde Additive (anti icing additives).

Ähnliche Maßnahmen können auch für das ***Kraftstoffsystem*** *gelten.*

Bild 8.3-15 *(Lit. 8.3-20): Ältere Triebwerkstypen verwenden* ***Kraftstoffpumpen*** *vom* ***Axialkolbentyp*** *(Bild 8.3-4). Die Gleitflächen der* ***Kolbenschuhe*** *sind zur Verbesserung des Gleitverhaltens (Notlaufeigenschaften) versilbert. Höhere Gehalte an* ***reaktivem Schwefel*** *im Kraftstoff (Bild 8.3-5) reagieren mit der Silberschicht („****Sulphidization****") und* ***erhöhen den Reibbeiwert*** *deutlich. Dies führt zur mechanischen und thermischen Überlastung der Silberschicht. Die Folge sind* ***Abblätterungen und Abrieb****. Diese Partikel beschleunigen den Schadensablauf bis zum katastrophalen Ausfall der Pumpe durch Fressen (engl. seize). Darüber hinaus verunreinigen sie das Kraftstoffsystem und schädigen dessen Komponenten.*

*Aus diesem Grund forderten Luftfahrtbehörden einen „****Silver Strip-Test****" bei den Kraftstofflieferanten. Jeder Lieferung wurde eine Probe entnommen. In sie wurde ein Metallstreifen mit einer Silberoberfläche (Silberfolie) getaucht. Eine dunkle Verfärbung des benetzten Streifens zeigt eine gefährliche Konzentration reaktiven Schwefels. Dieser Test wurde wegen der Ausmusterung betroffener Triebwerkstypen ausgesetzt, sofern die Pumpenhersteller dies nicht weiter fordern.*

Als weitere Abhilfe wurde die ***Beschichtung der Pumpen modifiziert****.*

© Axel Rossmann - Tutorest
als Schulungsunterlage nutzbar

Literatur zu Kapitel 8.3

8.3-1 I.E.Traeger, „Aircraft Gas Turbine Engine Technology, Second Edition“, Verlag : Glencoe/McGraw-Hill 1994, ISBN 0-07-065158-2, Seite 208, 248.

8.3-2 J.Escobar, „Fuel Contamination: Increasing awareness on factors that lead to jet fuel contamination“, Zeitschrift „Aircraft Maintenance Technology“,April 2002, www.amtonlone.com, Seite 1-5.

8.3-3 K.Bauerfeind, „Steuerung und Regelung der Turboflugtriebwerke“, Birkhäuser Verlag : 1999, ISBN 3-7643-6021-6, Seite 136-139.

8.3-4 „Fuel System Contamination“, http://avstop.com, 5. 11. 2005, Seite 1-4.

8.3-5 Commonwealth of Australia , ATSB aircraft accidents and incidents, Occurrence Brief: 200003034, 21.July 2000, Seite 1-4.

8.3-6 NTSB Identification: NYC95GA060, Accident Feb-22-95, Aircraft: Eurocopter AS-350-B, http://www.ntsb.gov/aviation/, Seite 1-12.

8.3-7 „Fuel System Icing Described As Major Hazard to Jet Planes“, Zeitschrift „Aviation Week“, December 8, 1958, Seite 27 und 28.

8.3-8 A.Velovich, „Multiple engine failure blamed for An-124 Irkutsk accident“, Zeitschrift „Flight International“, 17 December 1997, Seite 435.

8.3-9 Society of Automotive Engineers,Inc. (SAE), Aerospace Recommended Practice ARP 1401, „Aircraft Fuel System and Component Icing“, March 15 1979,Seite 1-8.

8.3-10 Flugunfallkommission (Büro Wien), GZ. 84.341/2-FUK/99, Gutachten und Vorschläge vom 29. März 1999 zum „Flugunfall mit Hubschrauber Typ Hughes 500 D, am 21.April 1992“, Seite 1-31.

8.3-11 Transportation Safety Board of Canada, Aviation Investigation Report A00P0010, „Turbowest Helicopters Limited, Eurocopter Lama SA 315B, ...20 January 2000“, Seite 1-5.

8.3-12 National Transportation Safety Board, Aircraft Accident Report NTSB-AAR-82-14, „Reeve Aleutian Airways, ...Alaska, February 16, 1982“, Seite 1-28.

8.3-13 „Aviation Fuels“, Chapter 2 Aviation Turbine Fuel Performance, Fa. Chevron, 5.11.2005, Seite 1-8.

8.3-14 Commonwealth of Australia, Civil Aviation Safety Authority, Airworthiness Directive AD/LJ45/9 „Fuel System Contamination“, Seite 1-3.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

8.3-15 R.A.Rudey, J.S.Grobman, „Impact of Future Fuel Properties on Aircraft Engines and Fuel Systems“, Proceedings No. AGARD-LS-96 der AGARD Lecture Series on „Aircraft Engine Future Fuels and Energy Conservation“, Cesme, Türkei, 16-17 Oktober 1978, Seite 6-1 bis 6-29.

8.3-16 M.J.Kroes, T.W.Wild, „Aircraft Powerplants, Seventh Edition“, Verlag : Glencoe/ McGraw-Hill 1990, ISBN 0-02-801874-5, Seite 310.

8.3-17 „Military, Appendix E, Significance of Tests“, www.GlobalSecurity.org, 27.04, 2005, Seite 1-4.

8.3-18 F.R.Mayo,„Oxidation and Gum Formation in Jet Fuels“,Interim Report No. 1, Defense Technical Information Center, 16. Nov 1984, Seite 1.

8.3-19 F.R.Mayo, T.Mill,„Gum and Deposit Formation in Diesel Fuels“, Final Report 1984-1988, Defense Technical Information Center, 15. May1988, Seite 1.

8.3-20 Transport Canada, „Rolls-Royce Dart & Spey, Silver Plating - Fuel Pumps“, Service Difficulty Advisory AV 1999-01 vom / July 1999, Seite 1.

8.3-21 Air Accidents Investigation Branch (AAIB), Interim Report „Accident to Boeing 777-236ER, G-YMMM at London Heathrow Airport on 17 January 2008“, Seite 1-21.

8.3-23 „Contamination Management in der Praxis - Von der Bearbeitung bis zur Auslieferung“, Hydac Filtertechnik GmbH, Prospekt D 7.604 0/0403, www.hydac.com/de-de/ produkte/...schmierölfilter/.../index.html, Seite 1-49.

8.3-24 „Filterfibel“, Hydac International, Prospekt D 7.011.1/04.11, www.hydac.com/de-de/ produkte/...schmierölfilter/.../index.html, Seite 1-52.

8.3-25 „Fluidcontrolling Kontaminationsfibel“, Hydac Filter Systems GmbH, Prospekt DEF 7.603.5/04.09, www.hydac.com/de-de/produkte/...schmierölfilter/.../index.html, Seite 1-52.

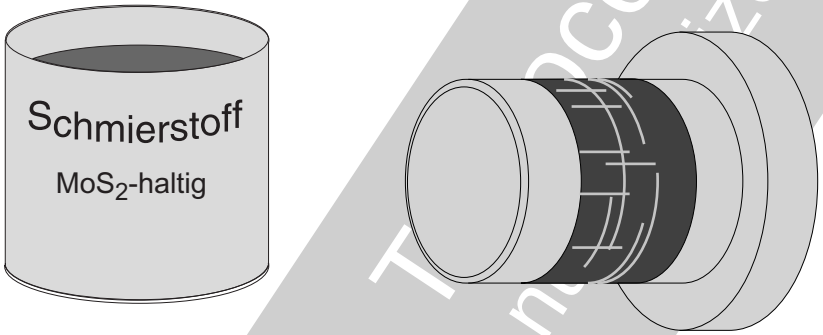
8.3-26 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 1“, 2000, ISBN 3-00-005842-7, Kapitel 5.1.4 und Kapitel 5.5.

8.3-27 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 3“, 2000, ISBN 3-00-017733-7, Kapitel 11.2.1.2 und Kapitel 11.2.3.1.

8.3-28 A. Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik - Band 5“, ISBN 978-3-00-025780-3 Kapitel 19.2, Kapitel 22.2, Kapitel 22.2.1 und 22.3.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlagen nur mit Lizenz

9. Hilfsstoffe



© Axel Rossmann - Transconsult
als Schulungsunterlage nur Lizenz

Unter **Hilfsstoffen** werden in diesem Kapitel Medien verstanden, die **keinem kontinuierlich fördernden** System zuordenbar sind. Hierzu gehören in erster Linie **Schmierfette für Wälzlager** (Kapitel 9.1.1), **Gleitmittel** und **Gleitpasten** (Kapitel 9.1.2), **Dichtmittel** (Kapitel 9.2) sowie **Reinigungs- und Lösungsmittel** (Kapitel 9.3, Bild 6.1.1.1-13 und Lit.9.1.1-11).

Hilfsstoffe spielen für die Funktion eines Triebwerks eine bedeutende Rolle. Sie werden üblicherweise **vom OEM erprobt und zugelassen**. In Vorschriften wie MIL-Spezifikationen (Lit. 9.1.1-11) sind die Grenzen ihrer **Anwendungen und Eigenschaften** festgelegt. Diese lassen aber dem Hersteller durchaus Spielräume für seine Produkte. Das macht es möglich, dass bei einem Produktwechsel überraschend unerwünschte Effekte auftreten.

Die **Erprobung und Zulassung** von Hilfsstoffen muss viele Einflüsse berücksichtigen. Dazu gehören

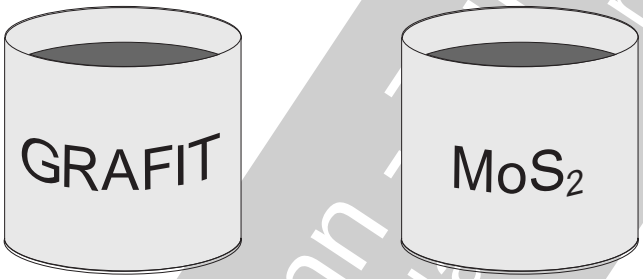
- **Verarbeitbarkeit**, Entfernung, Entsorgung (Lit. 9.1.1-11) und Toxizität.
- Mögliche schädigende **Wirkungen** auf unterschiedliche Werkstoffe, mit denen das Medium in Kontakt geraten kann.
- **Betriebseinflüsse** wie Zeit, Temperatur, Feuchtigkeit, Korrosion, andere Hilfsstoffe (z.B.Lösungsmittel) auf Funktion und Alterung des Hilfsstoffs.
- **Verfügbarkeit**.

Verwechslungen oder **eigenmächtige Anwendung** können zu umfangreichen Schäden und Sicherheitsrisiken führen. Gefährlich sind auch nicht vom OEM anwendungsspezifisch vorgesehene und in Vorschriften bzw. Handbüchern vorgeschriebene Medien. Hierzu gehören besonders Schmierfette für Schraubverbindungen (Bild 6.1.1.1-6).

9.1 Schmierstoffe

Ein falsches Schmiermittel kann verheerende Folgen haben.

Vorsicht! Verwechslungsgefahr!



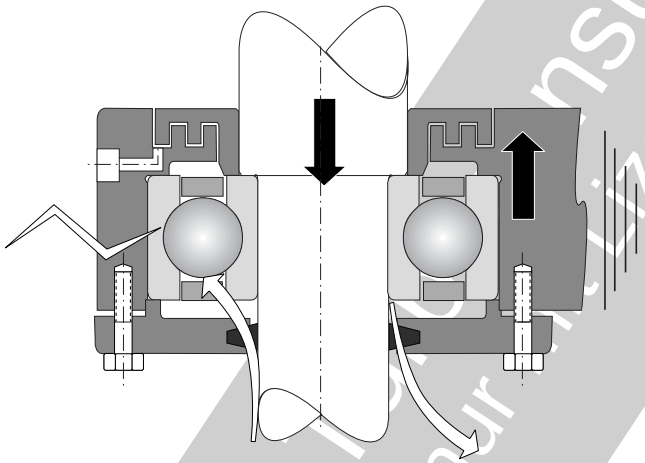
© Axel Bossmann - Turbocconsult
Ausschnittsunterlage mit Lizenz

Schmierstoffe in Form von **Fetten/Pasten, Ölen, Trockenschmierfilm**, auch als **Sprays** mit Lösungsmitteln sind Voraussetzung für die Funktion vieler Triebwerksbauteile. Das gilt sowohl für eine kurzfristige Anwendung wie beim Anziehen von Schrauben und Muttern als auch für Dauerfunktionen. Typisch sind Betätigungsgelenke oder die Lagerung von Achsen verstellbarer Verdichterleitschaufeln. Grundsätzlich sind **nur zugelassene Produkte** zu verwenden. Als nicht zugelassen können auch **abgelaufene Produkte** gelten. Bei der Anwendung ist darauf zu achten, dass die Medien nicht versehentlich in Kontakt mit unverträglichen Bauteilen bzw. Werkstoffen geraten.

Eine Mischung verschiedener Schmierfettsorten vor oder nach der Anwendung bedarf im Zweifelsfall immer der Zustimmung der verantwortlichen Aufsicht bzw. des OEM. Die **eigenmächtige Anwendung,** nicht ausdrücklich in Vorschriften bzw. Handbüchern vorgesehener Medien, ist grundsätzlich **unzulässig**.

Ein Problem sind **Schmiermittel für Heißteile**. Hier ist besonders auf die Schmierung von Schraubengewinden zu achten. So soll ein „Fressen“ der dazu neigenden austenitischen Werkstoffe vermieden werden und das vorgeschriebene Drehmoment die vorgesehene Vorspannung gewährleisten (Bild 6.1.1.1-2, Bild 6.1.1.1-3 und Bild 6.1.1.1-4). Bei der Demontage soll die Verbindung nach langen Betriebszeiten ohne Schädigung der Schraube lösbar sein. Dabei darf die Schraubenverbindung und andere, mit dem Fett in Kontakt kommende Bauteile (z.B. Rotorscheiben) im Betrieb nicht durch Einwirkung des Schmierfetts (z.B. MoS_2-haltig, Bild 9.1.2-8) geschädigt werden.

9.1.1 Schmierfette für Wälzlager



© Axel Bossmann - Technicsult
abschnittsweise nur mit Lizenz

Die weitaus meisten **Wälzlager** (ca.90%) sind fettgeschmiert. Trotzdem wird dieses Thema, was Probleme und Besonderheiten betrifft, vergleichsweise wenig behandelt. Es gewinnt jedoch bei anspruchsvollen Anwendungen wie Elektromotoren zum Antrieb von Kraftfahrzeugen an Bedeutung. Deshalb soll sich dieses Kapitel tiefer mit der Problematik einer Fettschmierung von Wälzlagern beschäftigen.

Der Einsatz einer Schmierung mit Fett beruht auf **Vorteilen** gegenüber Öl (Lit. 9.1.1-5, Lit. 9.1.1-8 und Lit. 9.1.1-9):

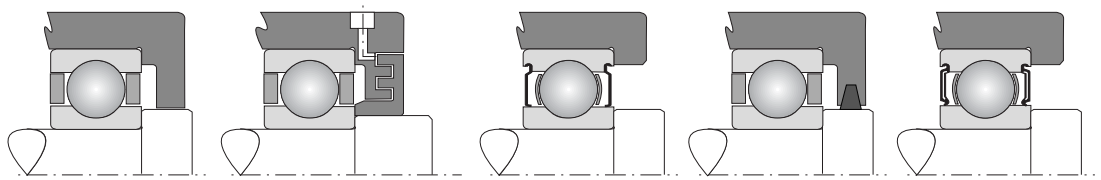
- **Niedriger Konstruktionsaufwand**, kein (Öl-) System erforderlich.
- **Keine Verschmutzung** der Maschine.
- Vergleichsweise **einfache Abdichtung**. Unterstützt die Wirkung der **Lagerdichtung**.
- **Schutz** des Wälzlagers. Im Stillstand vor Oxidation und Feuchtigkeit/Korrosion.
- **Schmierung** erfordert für hohe Drehzahlen einen **Fettverteilungslauf** (z.B. bei Werkzeugmaschinen). Sie ist dann beim Anlauf sofort vorhanden, ihre Wirksamkeit muss nicht abgewartet werden.
- Einfache **Montage**, insbesondere bei einer Dauerschmierung.
- Geringer **Wartungsaufwand** über lange **Gebrauchsdauer**. **Lebensdauerschmierung** ('for-life-lubrication') möglich. Gegebenenfalls Nachschmierung in längeren **Intervallen**.
- Unproblematische **Handhabung** und **Lagerung**, gerade bei **Vorbefettung**.
- **Zusatzschmierung unnötig** oder vereinfacht.

Es gibt aber auch deutliche **Nachteile** gegenüber einer Ölschmierung. Diese sind vom Konstrukteur zu berücksichtigen und zu minimieren. Dazu gehören:

- Relativ hohe **Reibung**.
- Geringe Wärmeableitung.
- Wird ein **Fettwechsel** notwendig, ist dieser durch Demontage und Reinigung **relativ aufwändig**.
- Mindest-Schmierfettmenge nicht überprüfbar. Deshalb kann eine **Nachschmierung** zum Ausgleich von **Leckverlusten**, Austrag von **Verunreinigungen** oder **gealtertem Fett** notwendig werden (Lit. 9.1.1-8, Lit. 9.1.1-9 und Bild 9.1.1-1.1). Hat das Fett funktionsbedingt alles Öl zur Schm,ierung abgegeben ('**ausgeölt**') muss es erneuert werden.

Schadensrelevante Schmierungseinflüsse auf fettgeschmierte Lager müssen vom Konstrukteur berücksichtigt und minimiert werden.

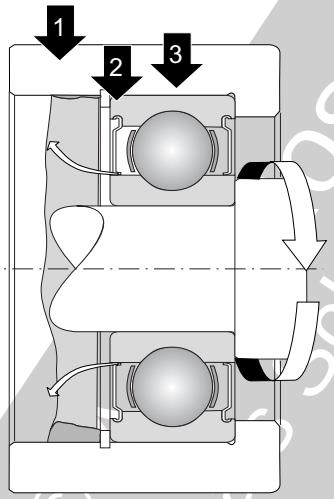
Dichtungsvarianten für Wälzlager mit Fettschmierung



Spaltdichtung | Labyrinthdichtung | **Deck**scheibe | Filzring | **Dicht**scheibe

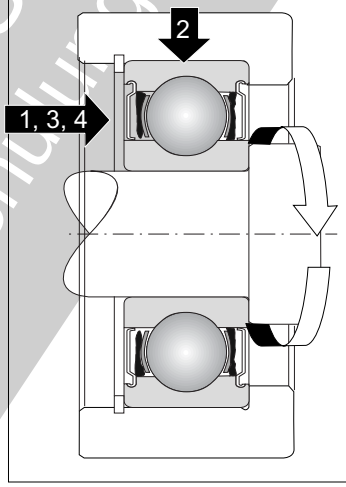
Überschmierung

- "1" Abgeschleudertes Fett,
- "2" Fettqualität im Lager gut,
- "3" Heißlauf des Lagers (verstärkte Walkarbeit) Verfärbungen der Laufbahn.



Mangelschmierung

- Fettreste
  "1" intensiv verfärbt,
  "2" mit Laufbahnen fest verklebt,
  "3" nicht schmierfähig, trocken,
  "4" enthalten Partikel.
- "5" Laufbahn verändert (z.B.poliert) Ausbrüche.
- "6" Lager gegebenenfalls nicht nachschmierbar.



Ungeeignetes Fett

- "1" Lager nicht nachschmierbar
- "2" Fettreste mit Laufbahnen fest verklebt.

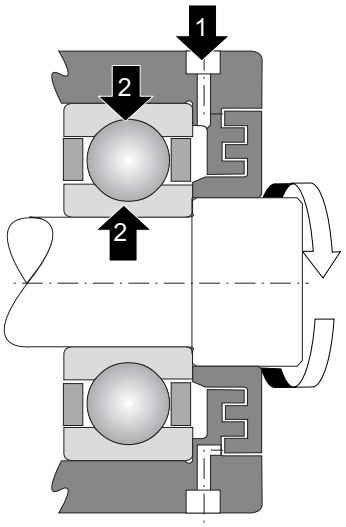


Bild 9.1.1-1.1

© Bossmann - Verlag
Schulungsunterlage nur

Bild 9.1.1-1.1 *(Lit. 9.1.1-9, siehe auch Bild 6.3.1.2-7.3):* ***Fettschmierung*** *wird insbesondere bei Wälzlagern angewendet. Typisch ist der Einsatz in* ***Elektromotoren*** *und* ***Radlagern*** *von Kraftfahrzeugen. Dazu kommen vielfältige Nutzungen in '****autarken****'* ***Maschinen*** *wie Pumpen, Aufzügen, größeren niedertourigen (z.B. in Hebezeugen) und kleineren hochtourigen Getrieben. Beispiele sind* ***handgeführte Werkzeugmaschinen*** *wie Bohrmaschinen und Kreissägen. Dazu gehören auch Haushaltsmaschinen (z.B. Küchengeräte).* ***Stromdurchgang*** *hat eine* ***beschleunigende Wirkung auf die Alterung*** *und damit eine Abnahme der nutzbaren Betriebszeit von Schmierfett (Bild 9.1.1-1.2, Band 1 Bild 5.12.1-4 und Bild 5.12.1-5)).*

Systeme und Betriebsstoffe: Hilfsstoffe: Schmierfette

Bei weitem die meisten Lagerschäden lassen sich auf ***Schmierungsprobleme*** *zurückführen (>80 %). Dabei spielen Schmierfettdosierung (Bild 9.1.1-2) und -auswahl die entscheidende Rolle.*

Überschmierung*:(Bld 9.1.1-2) ist genauso riskant zu bewerten wie Schmiermittelmangel. Bei Überschmierung kommt es durch Verdrängung und Stau des Fetts zu erhöhter* ***Walkarbeit****. Dabei steigt die Lagertemperatur über den Auslegungswert (****Heißlauf****). Dies kann mehrere Effekte auslösen. An diesen kann die Situation auch identifiziert werden.*

Das Fett wird sehr dünnflüssig, tritt aus dem Lager und verschmutzt die Umgebung.

In vielen Fällen ist das Lager noch fettgefüllt und die Fettqualität nicht zu beanstanden.

Weil das Fett bei erhöhter Temperatur schneller altert (Bild 9.1.1-3 und Bild 9.1.1-4) kann es sich nach längeren Betriebszeiten merklich verändert haben. Dies zusammen mit einer erhöhten Lagertemperatur verkürzt die Lagerlebensdauer mit entsprechenden Schadensmerkmalen auf den Laufbahnen (Ermüdungsausbrüche, Bild 6.3.1.1-4).

Mangelschmierung *(Bild 9.1.1-2): In diesen Fällen ist die verbliebene Fettmenge im Lager deutlich nicht ausreichend. Aus diesem Grund sind die Laufbahnen fettfrei und wirken poliert. Nach längeren Laufzeiten ist hier mit Ermüdungsausbrüchen zu rechnen. Diese Partikel findet man in den verbliebenen Fettresten. Das Fett ist trocken und erkennbar nicht mehr schmierfähig. Verhärtete Fettreste sind mit den Laufbahnen so verklebt, dass sie nur noch schwer entfernbar sind.*

Ist das Lager nicht mehr nachschmierbar, z.B. mit einer Fettpresse wegen Verstopfung der Zuführung, ist dies ein Hinweis auf die Gefahr einer Mangelschmierung. Ein solcher Befund kann auch nachträglich bei der Schadensuntersuchung die Ursache der Mangelschmierung zeigen.

Ungeeignetes Fett *ist in nicht zu vernachlässigender Häufigkeit Ursache für Lagerausfälle. Dies ist auch nicht verwunderlich, wenn man die vielen auf spezifische Betriebserfordernisse abgestimmte Fettvarianten betrachtet (Bild 9.1.1-4). Symptomatische Befunde sind ähnlich der Mangelschmierung, jedoch kann die Fettmenge noch ausreichend sein.*

Bild 9.1.1-1.2 *(Lit. 9.1.1-9):Besonders elektronische Drehzahlregler von Elektromotoren in Fahrzeugantrieben erhöhen das Risiko von Wälzlagerschäden infolge Stromdurchgang. Dabei wirkt sich besonders die hohe Stromfrequenz auf die* ***Fettlebensdauer*** *aus. In diesen Fällen wird eine* ***kontinuierliche Nachschmierung*** *empfohlen.*

Die Alterung des Schmierfetts beruht auf einer ***Wechselwirkung*** *der* ***Lagerschädigung*** *mit dem* ***Schmierfett****. Dabei wirken* ***Verschleiß-*** *bzw.* ***Ermüdungspartikel verdickend*** *und* ***katalytisch*** *für Alterungsreaktionen (z.B. Oxidation). Letztendlich wird Verteilung und Tragfähigkeit des Schmierstoffs verschlechtert. Das führt zur* ***Mischreibung*** *bis zum* ***Ausfall des Lagers****.*

Alterung von Schmierfett durch Stromdurchgang:

Hohe thermische Belastung

⇩

Verkokung und Verseifung

⇩

Vermischung beschleunigt Alterung

⇩

Verdicken durch katalytisch wirkende Partikel aus Verschleiß und Reaktionen.

⇩

Verschlechterte Schmierung führt zu Mischreibung

⇩

Folge:
Frühzeitiger Ausfall des Wälzlagers

Bild 9.1.1-1.2 nach P. Stephan

© Wolfgang Turbanski
Lasstunterlagen

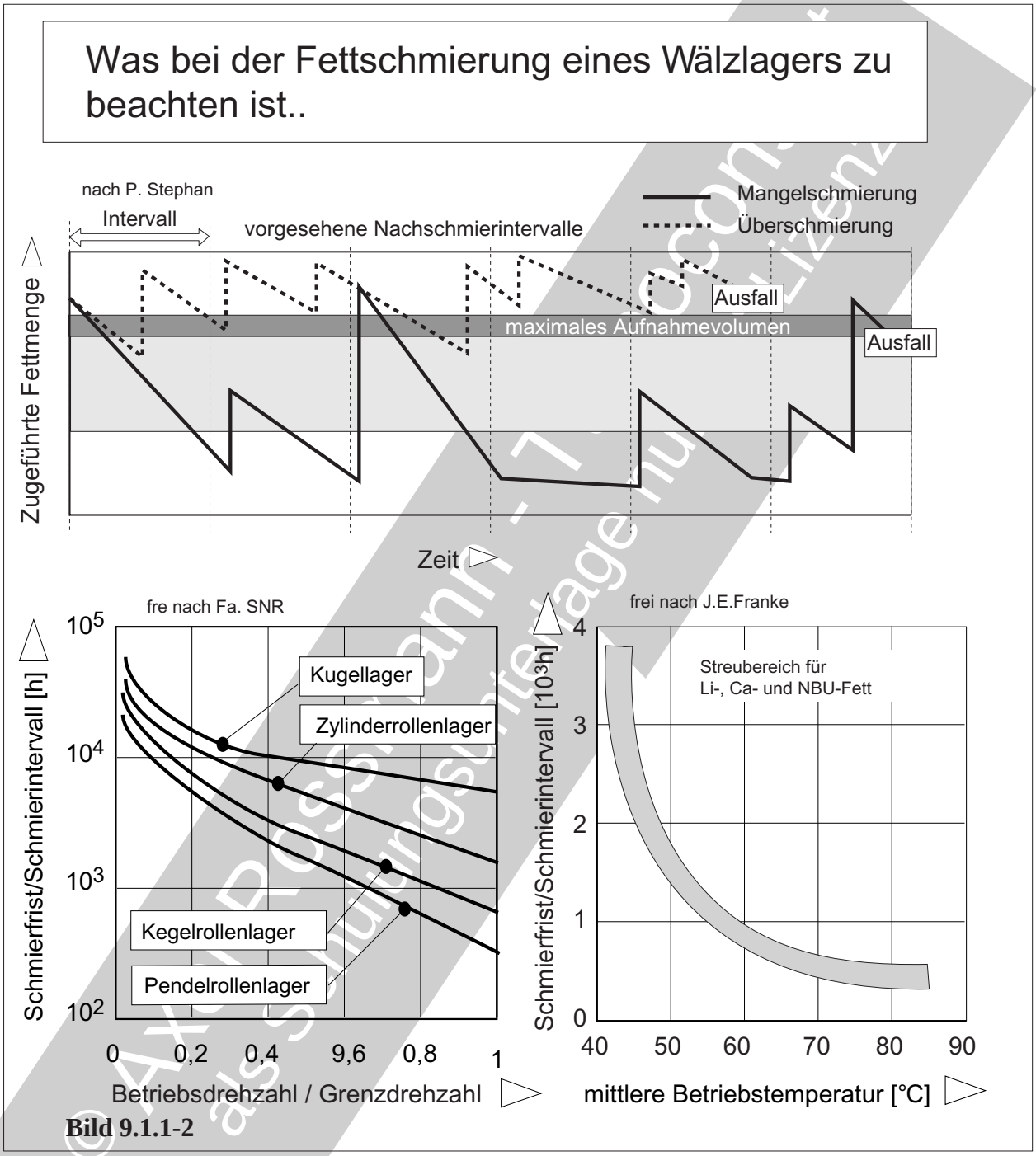


Bild 9.1.1-2

Bild 9.1.1-2 *(Lit. 9.1.1-8): Für das Erreichen der auslegungsgemäßen Lagerlebensdauer ist die anwendungsspezifische* ***Schmierfettmenge*** *mit den* ***Nachschmierintervallen*** *zu optimieren. Dabei ist neben den Lagerbelastungen die damit zusammenhängende* ***Betriebstemperatur*** *wichtig (Diagramm unten rechts). Auch die* ***Art des Wälzlagers*** *ist zu berücksichtigen (Diagramm unten links). Eine Überschmierung kann dabei sogar kritischer sein (Diagramm oben). Nachschmierung birgt die zusätzliche Gefahr des Eintrags von* ***Schmutzpartikeln****. Zusätzlich hat der Konstrukteur für eine gute* ***Zugänglichkeit*** *des Nippels zu sorgen. Optimal wäre in kritischen Fällen eine* ***automatische Nachschmierung****.*

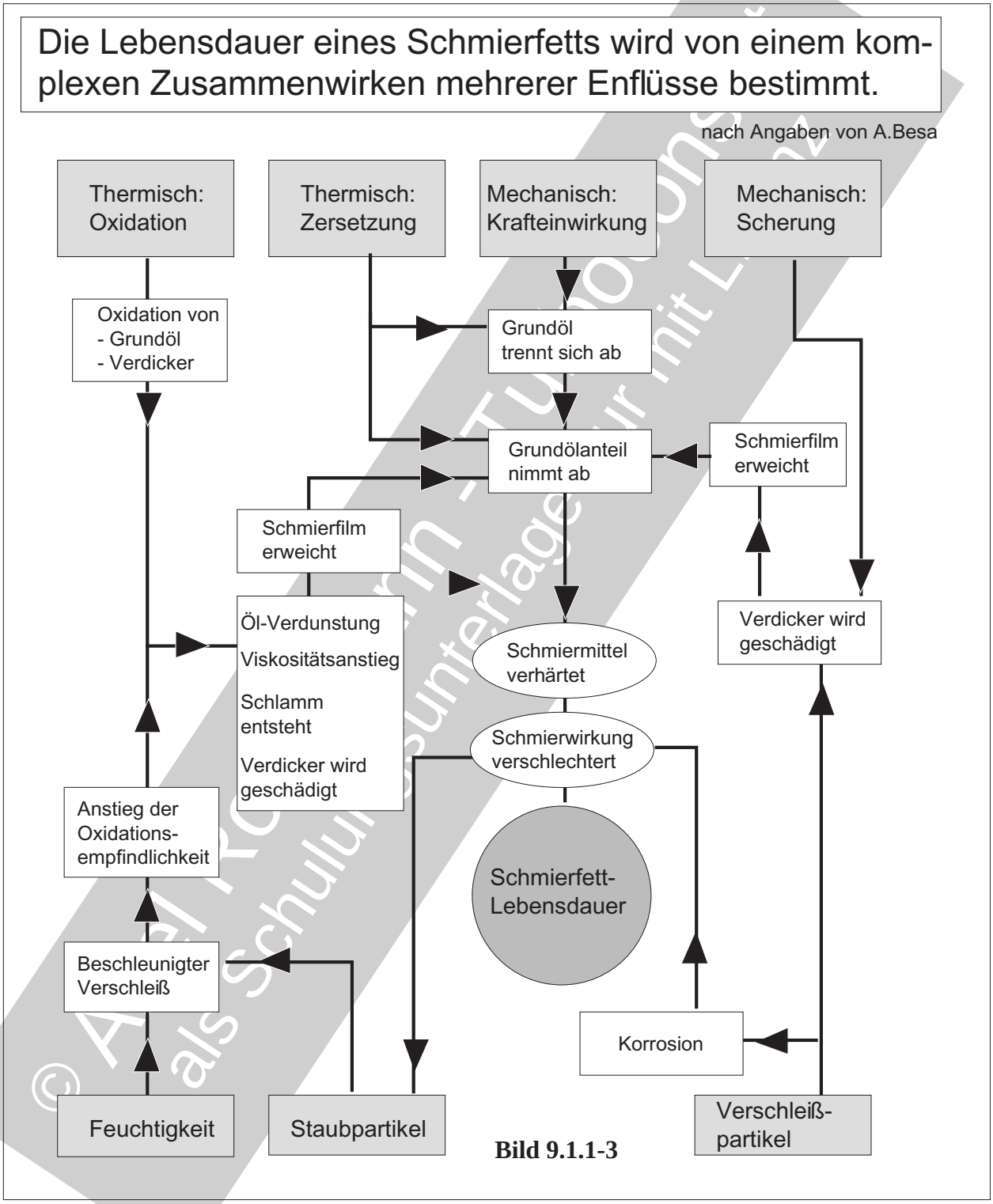
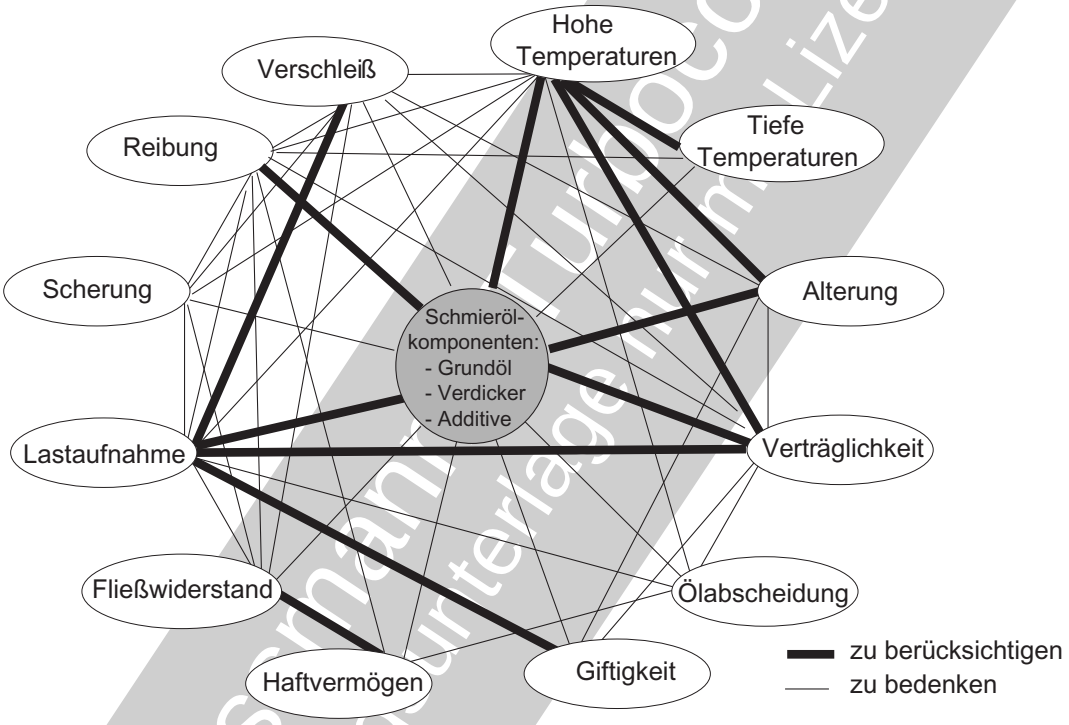


Bild 9.1.1-3 *(Lit. 9.1.1-9): Die Lebensdauer eines fettgeschmierten Wälzlagers hängt von der* ***Alterung des Schmierfetts*** *ab. Hier spielen viele zusammenwirkende Einflüsse eine Rolle. So bleibt dem Konstrukteur nur die* ***anwendungsspezifische Erfahrung*** *oder eine realistische* ***Erprobung*** *bzw.* ***Verifizierung****. Um gegebenenfalls eine Optimierung vorzunehmen ist die* ***Identifizierung und Quantifizierung der Effektursachen Voraussetzung****. Dazu bietet sich eine systematische Problemanalyse an (Band 1 Bild 2.2.1-2). Eine Maßnahme ist die Auswahl eines auf die Anforderungen besser eingestellten Schmierfetts (Bild 9.1.1-4).*

Die Anforderungen an einen Schmierstoff bzw. ein Schmierfett definiert der Konstrukteur. Damit bestimmt er die Zusammensetzung.

nach Angaben von W.H.Dresel



frei nach W.J.Bartz

Additivtyp	Verhütung von	Wirkungsmechanismus
Oxidationsschutz (Antioxidantien)	Harz, Lack, Schlamm, Säure und polymerartigen Verbindungen	Verhindert Oxidationsreaktionen zu Peroxiden und Säuren
Fressschutz (EP-Zusätze)	Mikroverschweißungen an Kontaktflächen (Band1 Kapitel 5.9.2)	Reaktionsprodukte
Verschleißschutz (Anti-Wear)	Verschleiß an Metallen	Reaktionsschichten
Korrosionsschutz	Korrosion an Metalloberflächen	Antikatalysator, Filmbildung
Metalldesaktivator	katalytischen Oxidations- und Korrosionseinflüssen	Schutzfilmbildung
Reibungsänderung (Friction Modifier)	zu hoher Reibung an Metallen	Absorption und Filmbildung
Viskositätsoptimierung	zu hoherTemperaturabhängigkeit	Knäuelbildung der Polymere
Steigerung elektrischer Leitfähigkeit	Mikrolichtbögen auf Laufflächen (Kraterbildung. Bild 6.3.1.1-24)	Leitfähige Nanoteilchen

Bild 9.1.1-4

© Axel Rossmann, Turbocomputt
als Schulungsunterlage im Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Hilfsstoffe: Schmierfette

Bild 9.1.1-4 *(Lit. 9.1.1-9): Die bedarfsgerechte* ***Optimierung eines Schmierfetts*** *ist eine größere Herausforderung. Das gilt für die Eigenschaften der drei variantenreichen* ***Hauptkomponenten*** *Grundöl, Verdicker und Additive in ihrem* ***Zusammenwirken*** *(Schema oben). Die Tabelle unten gibt einen Eindruck was allein die Auswahl der* ***Additive*** *für eine Herausforderung darstellt. So ist einsichtig, dass* ***Erfolg nur bei ausreichend Erfahrung und Erprobung*** *zu erwarten ist.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 9.1.1

9.1.1-1 W.-R.Zabel, „Einfluss von Oxidationsinhibitoren auf das Betriebsverhalten fettgeschmierter Lager“, Promotionsarbeit, 2005, Seite 1-150.

9.1.1-2 P.Stephan, „Tribosysteme in der Fahrzeugtechnik, Wälzlagerschäden in Fahrmotoren - Ursachen und Abstellmaßnahmen“, Proceedings des ÖTG-Symposium 2005, FH Joanneum GmbH, Graz, Seite 1-23.

9.1.1-3 „Wälzlagerschäden - Schadenserkennung und Begutachtung gelaufener Wälzlager“, Firma FAG, (Schaeffler Gruppe), Publ.-Nr. WL. 82 102/2 DA, Stand 2000, Seite 1-71.

9.1.12-4 „FAG Wälzlager - Grundlagen . Bauarten . Ausführungen“, Firma FAG, (Schaeffler Gruppe), Technische Information, TI Nr WL 43-1190 D, Stand April 2002, Seite 17-23.

9.1.1-5 „Schmierung - Fettschmierung“, Technische Publikation der Firma SNR, NTN-SNR 2011, www.snr-bearings.com, Seite 123-128.

9.1.1-6 G.Niemann, H.Winter, B.-R.Höhn, „Maschinenelemente - Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen“, 4. Auflage, ISBN 3-540-251256-1 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York; Seite 569-630.

9.1.1-7 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken- problemorientierte Triebwerkstechnik“, ISBN 978-3-00-025780-3, 2008, Kapitel 22.3 und Kapitel 23.1.

9.1.1-.8 P.Stephan, „Tribosysteme in der Fahrzeugtechnik, Wälzlagerschäden in Fahrmotoren - Ursachen und Abstellmaßnahmen“, Proceeding des ÖTG-Symposium 2005, FH Joanneum GmbH, Graz, www.lubcon.com/uploads/.../LUBCON-Vortrag-Graz-2005_01.pdf, Seite 1-23.

9.1.1-9 W.-R.Zabel, „Einfluss von Oxidationsinhibitoren auf das Betriebsverhalten fettgeschmierter Lager“, Promotionsarbeit, 2005, deposit.ddb.de/cgi-bin/doksen/?idn=975065564&dok..., Seite 1-150.

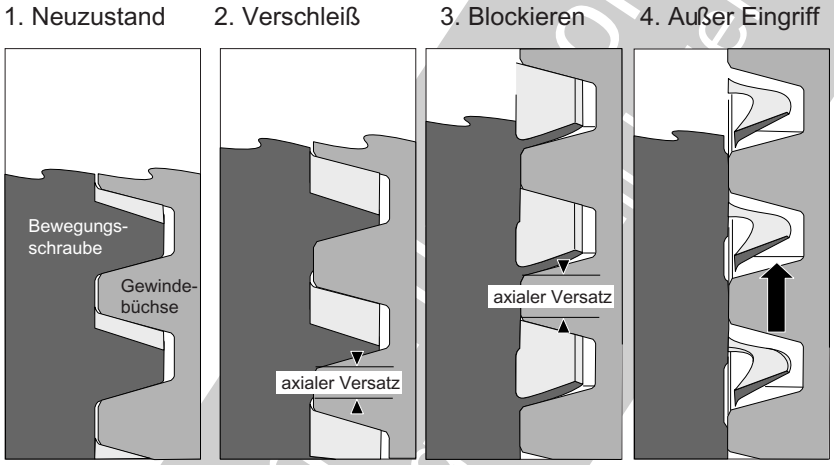
9.1.1-10 „Zustandsüberwachung - eine Grundvoraussetzung für mehr Zuverlässigkeit“, Aus „SKF-Produkte für Wartung und Schmierung“, Stand 2011, Seite 78-90

9.1.1-11 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 5“, 2008, ISBN 978-3-00-025780-3, Kapitel 19.2.3..

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Begleitunterlage nur mit Lizenz

9.1.2 Gleitmittel und Gleitpasten

Die typischen schmierungsbedingten Versagensphasen eines Gleitsystems am Beispiel einer Bewegungsspindel.



Gleitmittel in **fester Form** (Beschichtungen) oder als **Pasten** sind im Maschinenbau unverzichtbar. Man denke nur an die wichtige Rolle für die dynamische Belastungsfähigkeit von **Schraubenverbindungen** (Kapitel 6.1.1.1). Bei **Schraubenspindeln** gewährleisten sie die Funktion (Bild 9.1.2-9). Das gilt auch für **Schwenk-/ Gelenklager** (Bild 9.1.2-1 und Bild 9.1.2-4 sowie Kapitel 6.3.4). Oft wird gerade von Gleitbeschichtungen eine Langzeitwirksamkeit erwartet. Dem Konstrukteur obliegt in Zusammenarbeit mit der Bezugsquelle die Auswahl. Grundlage ist die betriebsnahe Definition der anwendungsspezifischen Einflüsse/Belastungen sowie die Bewertung des Verhaltens in der Praxis..

Bild 9.1.2-1 *(Lit. 9.1.2-19): Die angestrebten* ***Betriebseigenschaften*** *von Gleitmedien können* ***Spezifikationen und Firmenprospekten*** *entnommen werden.* ***Potenzielle Probleme und Gefahren werden dagegen meist unbefriedigend behandelt****. Deshalb wird im Folgenden besonders auf spezifische Gefahren bei der Anwendung eingegangen. Neben Schmierfetten stehen Trockenschmiermittel im Vordergrund. Die Erfahrung zeigt, dass Metalle und Metallverbindungen (z.B. Sulfide) für die Gleitwirkung genutzt werden. Gerade sie sind es aber auch, die ein hohes Schadenspotenzial aufweisen. Dabei sind* ***Betriebseinflüsse*** *wie hohe Temperatur, Wasser, korrosive Medien und Zugspannungen von Bedeutung.*

Molybdändisulfid- *(MoS_2) haltig: Die Partikelgröße des MoS_2 ist, abhängig von* ***Schmierfilmdicke*** *und* ***Gleitflächenrauigkeit,*** *von großer Bedeutung für die Gleitwirkung. Für glatte/polierte Flächen wie von Lagern sind deutlich feinere Partikel notwendig.* ***Zu grobe Partikel führen zum extremen Verschleiß****. Dies lässt verstehen, warum der* ***Übergang auf andere Produkte,*** *allein mit der Begründung gleicher Zusammensetzung, gefährlich ist.*

Die Temperatur-Einsatzgrenze für MoS_2 haltige Produkte liegt unter 400 °C. Sie ist abhängig von potenziellen Schädigungsmechanismen an den zu schmierenden Werkstoffen. In diesem Bereich kommt es bereits zur merklichen Oxidation in MoO_3 und SO_2. Ist ***MoS_3*** *vorhanden, das sich stark hygroskopisch verhält, können* ***gravierende Reibprobleme*** *auftreten. Mit der Aufnahme von Feuchtigkeit steigt der Reibbeiwert deutlich von 0,02 auf bis über 1 an.*

© A. Fossmann Consult Schulungsinstitut Essen

Nur vorgeschriebene und bewährte Schmierstoffe verwenden. Oft ist, falls vorgeschrieben, Triebwerksöl besser geeignet als "Hochleistungsschmierstoffe".

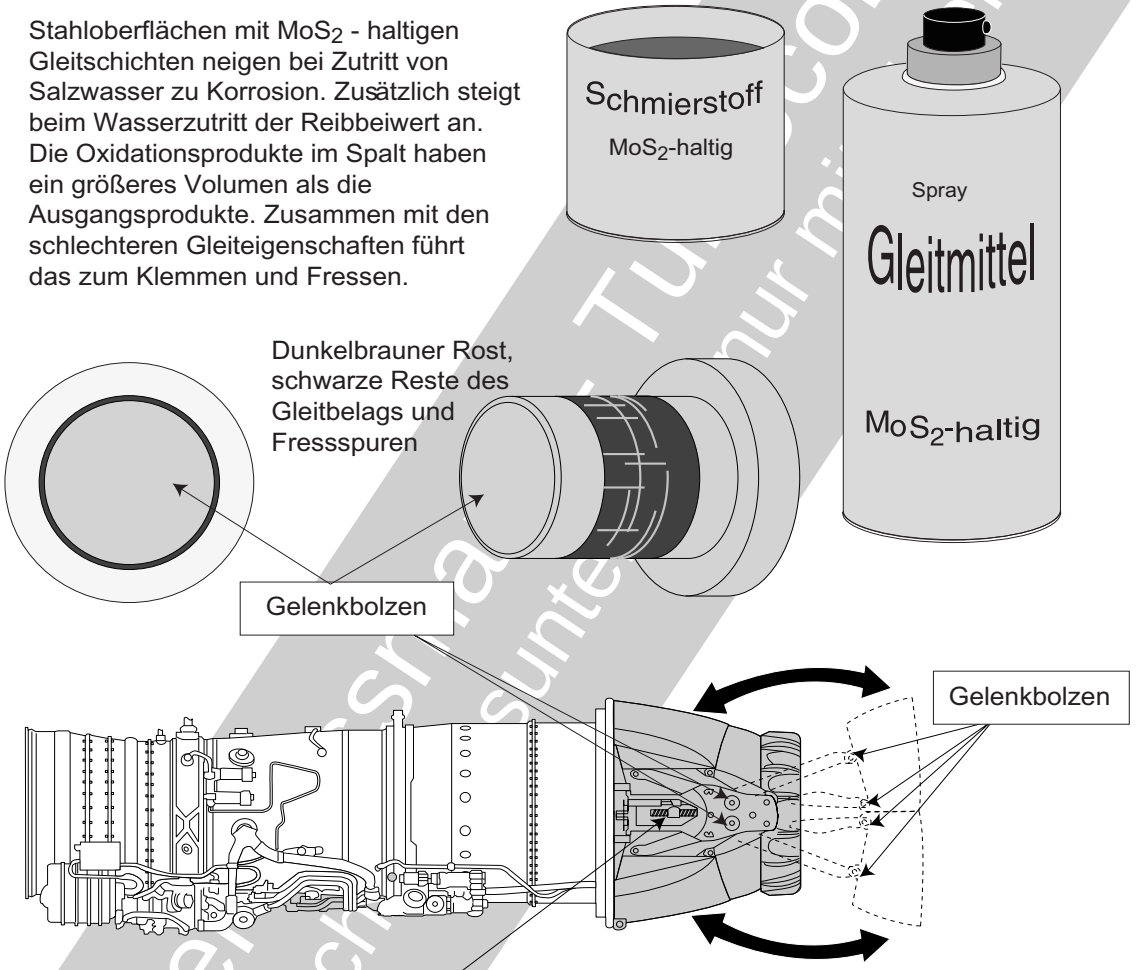


Bild 9.1.2-1

Diese Verbindung ist ***bei Zutritt von Feuchtigkeit das Gegenteil von einem Gleitmittel!*** *Das ist der Grund für viele negative Erfahrungen mit diesen Gleitmitteln in üblich feuchter Atmosphäre (mittlere und untere Skizzen, Bild 6.3.4-3).*

Kommt MoS_2 haltiges Schmiermittel bei Temperaturen wie sie für Heißteile typisch sind, zum Einsatz, kann Schwefel freigesetzt werden. Besonders an Ni-Legierungen kann das gravierende ***Sulfidationsschäden*** *(Bild 6.1.1.1-14 und Band 1 Bild 5.6.1.4.1-4) mit Bauteilversagen auslösen (Lit 9.1.2-26). Stehen Querschnitte bei Kontakt mit MoS_2 unter ausreichend* ***hohen Zugspannungen*** *ist mit spontaner* ***Rissbildung und Bruch*** *zu rechnen (Bild 9.1.2-8).*

Auch bei ***Sprayauftrag*** *(z.B. eines Gleitmittels) ist darauf zu achten, dass keine Heißteile mit MoS_2 kontaminiert werden.*

Systeme und Betriebsstoffe: Hilfsstoffe: Gleitfette, Pasten, Schichten

Polytetrafluorethylen *(PTFE, „Teflon ®“): Werden bei hohen Temperaturen* ***Fluor oder Fluorverbindungen*** *frei, besteht, ähnlich wie bei Chlor, bei metallischen Werkstoffen Korrosionsgefahr. Besonders gefährlich ist* ***Spannungsrisskorrosion*** *an Bauteilen unter ausreichend hohen Zugspannungen. Zu den potenziell gefährdeten Werkstoffen gehören* ***Titanlegierungen*** *und* ***hochfeste Stähle****. Es ist deshalb darauf zu achten, dass auch keine versehentlichen Ablagerungen, z.B. beim Einsatz von Sprays wie Trenn- oder Gleitmittel auf hochbeanspruchte Bauteile mit ausreichend hohen Betriebstemperaturen gelangen.*

Grafit *wird in Schmiermitteln verwendet und schützt Metallflächen vor dem Fressen. Es oxidiert jedoch bereits bei relativ niedrigen Temperaturen merklich (ab ca. 300°C). Ohne Sauerstoffzutritt ist Grafit bis ca. 1300°C beständig. In dichten Gewindegängen kann es so über lange Betriebszeiten auch bei typischen Heißteiltemperaturen in Triebwerken verbleiben. Damit wäre es auch beim schädigungsfreien Lösen der Verbindung hilfreich. Seine* ***Schmierfähigkeit*** *benötigt den* ***Zutritt von Feuchtigkeit*** *(Dampf, Luftfeuchtigkeit). Gerät Grafit versehentlich oder durch Abrieb in Bereiche elektrischer Isolation, kann es zu* ***Kurzschluss bzw. Kriechströmen*** *kommen.*

Vorsicht! *Grafithaltige Schmierpasten sind in Farbe und Konsistenz mit MoS_2-haltigen leicht zu* ***verwechseln*** *Darin besteht erfahrungsgemäß eine große Gefahr, weil, wie bereits erwähnt, MoS_2 an Heißteilen gefährliche Schäden auslösen kann.*

Hexagonales Bornitrid *ist ein inertes Trockenschmiermittel das bis Betriebstemperaturen von ca 600°C in* ***oxidierender Atmosphäre*** *seine Schmierwirkung behält.*

Metalloxidbildende Hochtemperaturschmiermittel *(„Neverseez ®“) enthalten* ***Metalle wie Nickel, Kupfer und Zink*** *in einer Petroleumverbindung als Trägeröl. Dies verdampft bei Betriebstemperatur und lässt Oxide von Nickel, Kupfer und Zink zurück. Diese verhindern ein Fressen. Dies erlaubt es, die Verbindung auch nach längeren Betriebszeiten bei hohen Temperaturen ohne Schädigung zu lösen. Hier ist jedoch Vorsicht geboten. Treten trotzdem hohe Losbrechmomente auf, ist eine* ***nicht zerstörungsfreie nachweisbare Schädigung*** *möglich. Das kann eine Weiterverwendung der Schrauben verhindern.*
Weiter sind bei einer Zulassung die Metallanteile des Schmierfetts auf ein Schädigungspotenzial zu prüfen.
Die Gefahr einer Elementbildung verbietet die Anwendung in Kontakt mit korrosionsempfindlichen Legierungen. Das gilt für niedrige Betriebstemperaturen bei denen sich keine schützenden Oxide bilden und zumindest zeitweise Feuchtigkeit vorhanden ist (z.B. Schwitzwasser im Stillstand).

Silberhaltige Pasten *lassen eine Schmierwirkung (z.B. auf Gewinden) erwarten. Es dürfte sich um ähnliche Pasten handeln, wie sie auch zur Wärmeabfuhr an Elektronikbauteilen angewendet werden. An Heißteilen aus Nickellegierungen kann Silber auf unterschiedliche Weise* ***gefährlich schädigend*** *wirken (Band 3 Bild 12.2.2.3-10.1 und Bild 12.2.2.3-11). Das geht von der Unterstützung einer* ***Sulfidation****, Schädigung durch* ***Diffusion*** *(Festigkeitsverlust), bis zu einer* ***spontanen Rissbildung*** *bei Zugspannungen und Einwirkung* ***geschmolzenen Silbers*** *(LME Band 1 Bild 5.3-7, Band 3 Bild 12.2.2.3-10.1, Lit. 9.1.2-27). Ähnlich gefährlich sind* ***Pasten mit metallischem Blei*** *einzuschätzen. Auch hier ist bei hohen Temperaturen an Stählen, Ni-und Ti-Legierungen mit Anschmelzungen und* ***LME*** *zu rechnen (Band 1 Bild 5.3-7, Lit. 9.1.2-27).*
Bei ***Titanlegierungen*** *wirkt sich der direkte* ***Kontakt mit Silber*** *bereits oberhalb von 200 °C versprödend aus (SMIE, Band 1 Bild 5.3-6). Grundsätzlich ist die Anwendung bei* ***Al- und Mg-Legierungen*** *wegen wässriger* ***Korrosion infolge Elementbildung*** *zu unterlassen.*

Rosemann - Tutorenskript
Nur für den internen Gebrauch

Bild 9.1.2-2

Wichtige Schmierfette, Gleit- und Schutzöle die an Triebwerken und in deren Umgebung angewendet werden

Schmierfett-bezeichnungen (Normen)	Firmen-Bezeichnungen	Hersteller- Beschreibung/Eigenschaften
MIL-C-11796C	Castrol: Braycote 202	präventiver Korrosionsschutz, braun, wachsartig
MIL-C-16173	Valvoline:Tectyl 502C Classl, Grade II	präventiver Korrosionsschutz, Petroleumbasis
MIL-C-16173E	Castrol: Braycote 137	präventiver Korrosionsschutz, schwarz, ölig
MIL-G-21164D und G	Aeroshell Grease 17, D-5817NS	Vielzweckfett, synthetisch (Diester Öl + Mikrogel) mit **MoS_2** bis 149°C, für hochbelastete Gleitflächen, Korrosionsverhindernd.
MIL-G-24139A	Aeroshell Grease 6	Vielzweckfett, Mineralbasis
MIL-G-25760A	Aeroshell Grease 16, D-5916NS	Gleitfett für Lager, synthetisch (Polyester+Mineralöl+Mikrogel), Einsatz bis 204°C.
MIL-G-81322E, GradeA	Mobilgrease 28	Synthetischer Kohlenwasserstoff mit Verdickung
MIL-L-4600	Castrol: Braycote 646	Synthetisches Fett, halbflüssig, Lithiumstearat verdickt. Für kleine Anbaugeräte
MIL-PRF-23827C	Aeroshell Grease 7, D-5907NS Aerosol	Vielzweckfett, synthetisch (Diester + mikrogelverdickt) Als Aerosol, Korrosionsschutz, resistent gegen Reiben und Wischen
	Aeroshell Grease 33 D-5933NS Aerosol	Vielzweckfett, synthetisch (auf Lithiumbasis verdickt) Als Aerosol, Korrosionsschutz, druckstabil, (73 - 121°C)
MIL-PRF-81322F, Grade 2	Aeroshell Grease 22	Vielzweckfett, synthetisch (mikrogelverdickt)
NSN 9150-00-159-5012	Turbo 10	Acryl Copolymer, kompatibel mit O-Ringen und werkstoffähnlichen Komponenten
NSN 9150-01-253-9619	WC 393	Für Abblasventile und Schubumkehrer
MIL-A-907 D&E	Dag 243	Verhindert "Fressen" aller Metalle, Mineralölbasis mit **MoS_2**
MIL-T-5544	GP-460	Für **hohe Temperaturen** (bis 538°C), Petroleum mit **Grafit**
MIL-S-21568A	D-5100N S Aerosol ZC-100 Bulk	Gleitmittel auf Silikonbasis für Systeme mit unterschiedlichen Metallen oder Metall/Plastik, verhindert Anfrieren von Gummi
MIL-G-26548	D-5480N S Aerosol ZC-480 Bulk	Trockenfilm Gleitmittel für Kleinteile, Einsatz bis 204°C, mit Grafit,
MIL-PRF-7870C	D-5261N S Aerosol ZC-261 Bulk	Eindringmittel (Schmieren und Lösen) für Bewegungskabel und Passteile (z.B. Bolzenverbindungen), Kurzzeitiger Korrosionsschutz
MIL-PRF-7870C	D-5261N S Aerosol ZC-261 Bulk	Eindringmittel (Schmieren und Lösen) für Bewegungskabel und Passteile (z.B. Bolzenverbindungen), Kurzzeitiger Korrosionsschutz

Korrosionsschutz ■ Trockenschmiermittel ■ Rostlöser + Schmieren □ Schmierfette

© Axel Ossmann
Schulungsunterlagen.com

Bild 9.1.2-2 *(Lit. 9.1.2-2, Lit. 9.1.2-9 und Lit. 9.1.2-10): Diese Tabelle enthält eine Auswahl häufig verwendeter* ***Schmiermittel mit Anmerkungen zu Eigenschaften und Anwendungsbereich****. Auf einige dieser Hilfsstoffe wird in diesem Kapitel auch an anderer Stelle hingewiesen.*

Systeme und Betriebsstoffe: Hilfsstoffe: Gleitfette, Pasten, Schichten

Bild 9.1.2-3

Bild 9.1.2-3 *(Lit. 8-16): Das* ***Verhalten von Schmiermitteln*** *kann sich* ***unter Umwelteinflüssen*** *vollkommen verändern. Dies ist bei Erprobung und Zulassung zu berücksichtigen. So spielen die folgenden Faktoren eine Rolle:*

- Zutritt von ***Umgebungsmedien*** *(Bild 9.1.2-1 und Bild 9.1.2-4).*
- Kontakt mit ***Hilfsstoffen****.*
- Bauteilspezifische ***Betriebsparameter****,*
- ***Werkstoffe/Tribosystem****.*

Auch beim Wechsel bzw. der ***Einführung neuer Hilfsstoffe oder neuer Produkte*** *(auch* ***Wechsel des Herstellers****) wie Wasch- und Lösungsmittel, Enteisungsflüssigkeit oder Kontaktsprays ist auf Auswirkungen auf bereits verwendete Hilfsstoffe zu achten.Gegebenenfalls ist ein* ***Unbedenklichkeitsnachweis*** *beim OEM erforderlich. Im Zweifelsfall ist grundsätzlich die Zustimmung der verantwortlichen Stellen einzuholen. Typische,* ***potenziell schädigende Mechanismen*** *sind:*

Eindringen von Fremdpartikeln *in den Schmierspalt: Eine Leckströmung durch die Gleitlagerung verstellbarer Verdichterleitschaufeln (mittlere Skizze) kann korrosive Staubpartikel mitführen und zwischen den Gleitflächen ablagern. So besteht bei Verwendung MoS_2 - haltiger Schmierstoffe (auch als Infiltration und in Gleitbüchsen) die Gefahr von Korrosion und Klemmen des Systems (Bild 9.1.2-1).*

Ungeeignete Schmiermittel können an wichtigen Bauteilen nach kurzer Zeit zum Funktionsausfall führen.

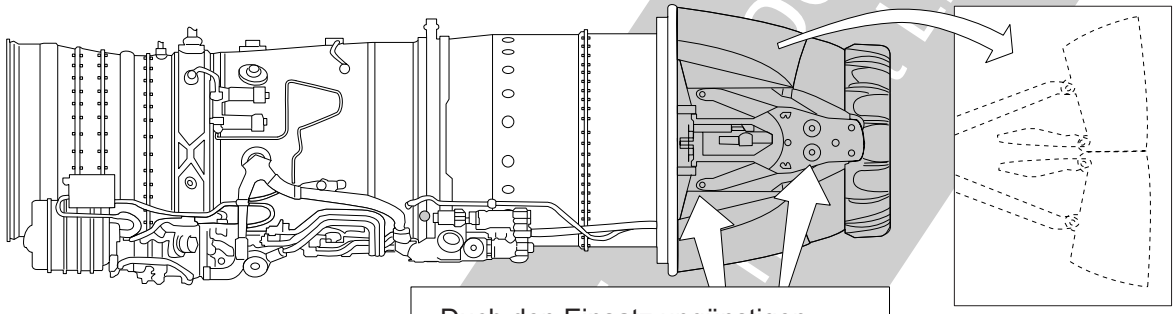


Bild 9.1.2-4

Eindringen flüssiger Medien*: Diese können mit Schmierstoff verstärkt korrosiv wirken. In größeren Mengen und mit einer lösenden Wirkung kann es zum Auswaschen und zum metallischen Kontakt der Gleitflächen kommen (Verschleiß).*

Eindringen von Dämpfen*: Das gilt bereits für* ***Luftfeuchtigkeit****, wenn sich damit die Schmiereigenschaften des Hilfsstoffs unter den Betriebsbedingungen verändern. Auch* ***Lösungsmitteldämpfe*** *oder* ***Öldampf*** *kann auf nicht ausreichend erprobte Hilfsstoffe bedenklich wirken.*

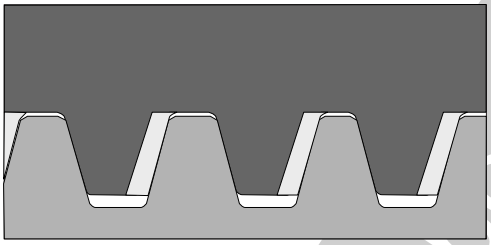
Bild 9.1.2-4*: Bei der Erprobung des* ***Schubumkehrers*** *wurde die Funktion des Schwenkmechanismus in mehreren Testzyklen überprüft. Dabei wurden nach einem kurzen Triebwerkslauf die Schwenklager mit* ***Salzwasserspray*** *behandelt, das dann über Nacht einwirkte. Bereits nach wenigen Prüfzyklen kam es zum* ***Festsitzen der Lager und katastrophalen Überlastungsschäden*** *am Betätigungsmechanismus. Untersuchungen ergaben, dass offenbar der verwendete* ***MoS_2-haltige Trockenschmierfilm*** *auf den Gleitflächen zusammen mit dem korrosiven Wasser zu Korrosionsprodukten mit Volumenvergrößerung führte (Bild 9.1.2-1). Dabei waren sicher die verschlechterten Gleiteigenschaften des MoS_2 bei Wasserzutritt von besonderer Bedeutung. Nach einer Umstellung auf das* ***synthetische Triebwerksöl*** *mit dem in regelmäßigen Abständen geschmiert wird, traten keine Schäden mehr auf. Das hat sich im langjährigen Betrieb bewährt.*

Bild 9.1.2-5 *(Lit. 8-16): Verständlicherweise hat die* ***Wartung*** *einen entscheidenden Einfluss auf die* ***Sicherheit eines geschmierten Systems****. Dabei spielt die* ***Nachschmierung*** *eine ausschlaggebende Rolle. Werden hier Fehler begangen bzw. von den Vorschriften/Handbuchangaben abgewichen, können katastrophale Schäden auftreten (Bild 9.1.2-9). Auch Medien von* ***Reinigungsarbeiten*** *im Umfeld von trockengeschmierten (Gleitbelag) oder mit Fett geschmierten Komponenten können sich auf deren Funktion auswirken (Bild 9.1.2-3). Das gilt auch für abrasive Reinigungspartikel (z.B. von Reinigungsfilzen) und Staub (z.B. Verdichterwaschen, Lit. 9.1.2-23).*

© Axel Bossmann, Dipl.-Ing. Ult
als Schulungsunterlage

Systeme und Betriebsstoffe: Hilfsstoffe: Gleitfette, Pasten, Schichten

Schädigende Einflüsse auf ein geschmiertes System



- Nachschmierintervall zu lange oder Schmierung entfiel ganz.
- Nachschmierung
  - Keine ausreichende Schmierstoffmenge
  - Abrieb verbleibt im Schmierspalt
  - Verteilung ungleichmäßig, Bereiche bleiben ungeschmiert
  - Ungeeigneter Ablauf (z.B. Reihenfolge der Schmierpunkte)
  - Ungeeignetes Schmierfett (z.B. inkompatibel mit Schmierstoffresten)
- Auswaschen von Schmierstoff bei einer Reinigung
  - Ungeeignete Reinigungsmittel
  - Reinigung wo nicht erlaubt
- Einbringen von schädigenden Partikeln
  - Einschwemmen von Abrieb
  - Verbliebene abrasive Reinigungsmittel (z.B. Strahlgut oder Schleifpartikel)
- Ungeeignetes bzw. problematisches Schmiermittel
  - Nicht explizit zugelassen
    - nicht zugelassenes Produkt oder Hersteller
    - Verwechslung
  - Chemische Reaktionen mit Werkstoffen (korrosiv) und/oder vorhandenen Schmierstoffresten (Verharzung, Freisetzen schädlicher Bestandteile).
  - Nicht ausreichend beständig (Alterung, Zersetzung) gegen
    - erhöhte Temperaturen
    - Wasser (Meerwasser)
    - Flächenpressung
    - lange Nachschmierintervalle
    - zugelassene Reinigungsmittel und Hilfsstoffe (z.B. Kraftstoff, Öl)

Bild 9.1.2-5

Selbstverständlich sind nur die von den verantwortlichen Stellen ***explizit für den jeweiligen Anwendungsfall zugelassenen Hilfsstoffe bzw. Schmierstoffe zu verwenden****. Ein Hilfsstoff der für eine Anwendung vorgesehen ist, kann an einem anderen Bauteil mit anderen Betriebsbedingungen versagen. Eigenmächtiges Abweichen ist deshalb potenziell gefährlich und muss unterbleiben.*

© Axel Bosmann - Turboconsult
alle Seiten nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Hilfsstoffe: Gleitfette, Pasten, Schichten

- Hohe Bewegungs- und/oder Losbrechkräfte.

- "Stick-Slip-Effekte":
  Rattern, schrittweise Bewegungen, "Wobbling"
  Quietschen, Knarren
  Vibrationen

- Ungewöhnliche Erscheinungsform des Schmiermittels:
  Aussehen,
  Konsistenz (z.B. eingetrocknet, verharzt)

- Verfärbungen und Ablagerungen der Gleit- / Lauf- / Kontaktflächen.

Bild 9.1.2-6

- Kein Schmiermittel erkennbar.

- Verschleiß- bzw. Ermüdungsmerkmale an Gleit- und Wälzflächen:
  Vibrationen,
  erhöhte Bewegungskräfte,
  Abriebpartikel im Schmierstoff,
  vergrößertes Spiel (wackeln, Schiefstand)

- Anlauffarben am Gehäuse oder an Lagerringen:
  Zu hohe Betriebstemperatur,
  fortgeschrittene Lagerschädigung mit Anstieg der Reibkräfte.

- Austretende Verschleißprodukte:
  Reibrost (braun, schwarz, siehe Bild 6.6.1-5).

Bild 9.1.2-6 *(Lit. 8-3): Etliche Bauteile senden* ***vor einem katastrophalen Versagen Warnzeichen*** *aus. Man muss diese nur registrieren, erkennen und zu deuten wissen. Versteht der erfahrene Wart die „Sprache“ des Bauteils, kann er gefährliche Auswirkungen von Funktionsabweichungen rechtzeitig abfangen. Dazu gehört Abhilfe bzw. die Einleitung der richtigen Maßnahmen. Typische „****Warnsignale****“ sind:*

Hohe Bewegungs- und Losbrechkräfte *können sich in entsprechend hoher* ***Leistungsaufnahme*** *bzw. dem Anstieg von Kräften und Hydraulikdrücken im Betätigungsmechanismus anzeigen. Beispiele sind Aktuatoren von Schubumkehrern oder die Schubdüsenverstellung bei Kampfflugzeugtriebwerken. Auch eine unsymmetrische Bewegung, Ruheposition oder Überlastungsmerkmale an Kraftübertragungssystemen (z.B. Spindeln, Hebeln) sind* ***Symptome****. Treten sie auf, ist natürlich nicht nur der geschädigte Bereich zu reparieren bzw. auszutauschen.* ***Entscheidend ist es, die Ursache****, d.h. gegebenenfalls das schwergängige Gelenk/Lager, zu finden und den* ***Schadensmechanismus zu klären****.*

Ungewöhnlich ausgeprägte ***„Stick-Slip-Effekte“*** *(Band 1 Bild 5.9.1-8 und Bild 5.9.1-9) beruhen auf verschlechterten Gleiteigenschaften. Sie machen sich oft mit Geräuschentwicklung bemerkbar. Typisch ist* ***Quietschen*** *(hochfrequent, Beispiel Bremsenquietschen im Auto) oder* ***Knarren*** *(niederfrequent, Beispiel alte Tür),* ***Rattern*** *und „Wobbling“. Die Folge können auch* ***Vibrationen*** *bei einer Bewegung sein. Sie können in Regelungs- und Zumesssystemen Instabilitäten hervorrufen, die sich im Triebwerksverhalten oder an Instrumenten anzeigen.*

Äußere Erscheinung *des geschmierten Bereichs und* ***Aussehen des Schmiermittels****: Bereits ungewöhnlich viel* ***austretendes Schmiermittel*** *kann als Hinweis auf Abwei-*

© Axel Rossmann - Turbocoach
aus Schulungsunterlagen mit Lizenz

chungen im Tribosystem gelten. Ursächlich sind ungeeigneter Schmierstoff und/oder ungewöhnliche Betriebseinflüsse (z.B. hohe Temperatur). Das gilt umgekehrt auch für unerwartete **Verharzung oder spröde Ablagerungen** *(Bild 9.1.2-9).*
*Besonders alarmierend ist ein sog. „***Ausbluten***" des Schmierspalts. Ein Indiz sind rotbraune bis nahezu schwarze Fließspuren (Bild 6.6.1-5). Gewöhnlich treten sie bei* **Reibkorrosion an Stählen** *auf (Reibrost, Band 1 Bild 5.9.3-2). In einem solchen Tribosystem oxidieren feine Verschleißprodukte. Das Ausschwemmen dieser Verschleißpartikel lässt eine unzulässige* **Spielvergrößerung** *erwarten, falls diese nicht schon eingetreten ist.*
Ungewöhnlich verfärbte Schmierfettrückstände können auch auf die Reaktion mit anderen Medien wie Lösungsmitteln oder Waschmitteln hinweisen.

Ablagerungen auf den Gleit-/Kontaktflächen *zeigen in Farbe, Struktur und Konsistenz Probleme an und lassen auf die Ursachen rückschließen (Band 1 Bild 5.9.3-2). Auch hier weisen rotbraune Verfärbungen auf Reibrost bzw. Reibkorrosion hin. Natürlich ist dabei die Eigenfarbe des Schmiermittels (häufig schwarz bei MoS_2 oder Grafit) zu berücksichtigen.*

Besonders bedenklich ist es, wenn **keine Schmiermittelreste** *vorhanden sind (Bild 9.1.2-9). Das gilt gerade, wenn sie bei ordnungsgemäßer Wartung bzw. Montage zu erwarten sind. Da liegt der Schluss auf* **Mängel** *bei vorgeschriebenen* **Schmiervorgängen und Nachschmierungen** *nah.*

Verschleiß- bzw. Ermüdungsmerkmale an Gleit- und Wälzflächen*: Bei Wälzlagern kann sich äußerlich eine derartige Schädigung in* **Vibrationen** *bemerkbar machen. Im fettgeschmierten Lager lassen sich oft Abrieb und Ermüdungspartikel finden. Bei Gleitlagern zeigt sich fortgeschrittener Verschleiß gewöhnlich in merklich größerem Spiel.*

Äußere Verfärbung von Gleit-/Wälzlagern bzw. deren Gehäuse*: Handelt es sich um* **Anlauffarben,** *ist dies ein deutliches Zeichen einer zu hohen Betriebstemperatur. Ursache dürfte ein Anstieg der Reibungskräfte und damit der Reibungswärme sein. Das weist wiederum auf einen bereits gefährlich fortgeschrittenen Lagerschaden hin. Unterstützt wird ein solcher Befund bei fettgeschmierten Lagern auch durch* **auslaufendes Fett,** *das sich bei hohen Betriebstemperaturen zu stark verflüssigt. Gleichzeitig kann die Dichtung des Lagers von Übertemperaturen geschädigt sein.*

Bild 9.1.2-7*: Es handelt sich um das Triebwerk eines Kampfflugzeugs (Skizze oben). Bei der Montage des Turbinenmoduls wollte man es „besonders gut" machen. Um den* **Schraubenwirkungsgrad** *(Bild 6.1.1.1-3 und Bild 6.1.1.1-4) zu erhöhen, d.h. beim vorgeschriebenen Anzugsmoment die erforderliche Vorspannung zu gewährleisten, wurden die Schrauben der Zahnkupplung (Curvic Kupplung, Detail Mitte) mit MoS_2-haltigem Schmierfett behandelt. Vorgeschrieben war das synthetische Triebwerksöl. Versehentlich wurde die Verzahnung mit Schmiermittelresten verunreinigt. Bauteiltemperaturen im Bereich von 500 °C zersetzten das MoS_2 und es kam zu einem Sulfidationsangriff (Detail unten links, Lit. 9.1.2-19). Diese, wenn auch kleinen Kerben der Anfressungen (im Zehntel-Millimeterbereich) lagen leider an einer für die Lebensdauer des Bauteils relevanten, d.h. höchstbeanspruchten Stelle. Eine bruchmechanische Abschätzung ließ ein gefährliches zyklisches Risswachstum nicht genügend sicher ausschließen. Deshalb mussten mehrere suspekte Turbinenmodule* **rückmontiert** *werden. Diese sehr wertvollen Bauteile (Turbinenscheibe Skizze rechts) mussten verschrottet werden.*

© Axel Rossmann - Turbocast
Lehrschulmaterialien nur für Unterrichtszwecke

Systeme und Betriebsstoffe: Hilfsstoffe: Gleitfette, Pasten, Schichten

Bei Heißteilen ist besonders auf die Verwendung der zugelassenen und bewährten Schmiermittel zu achten.

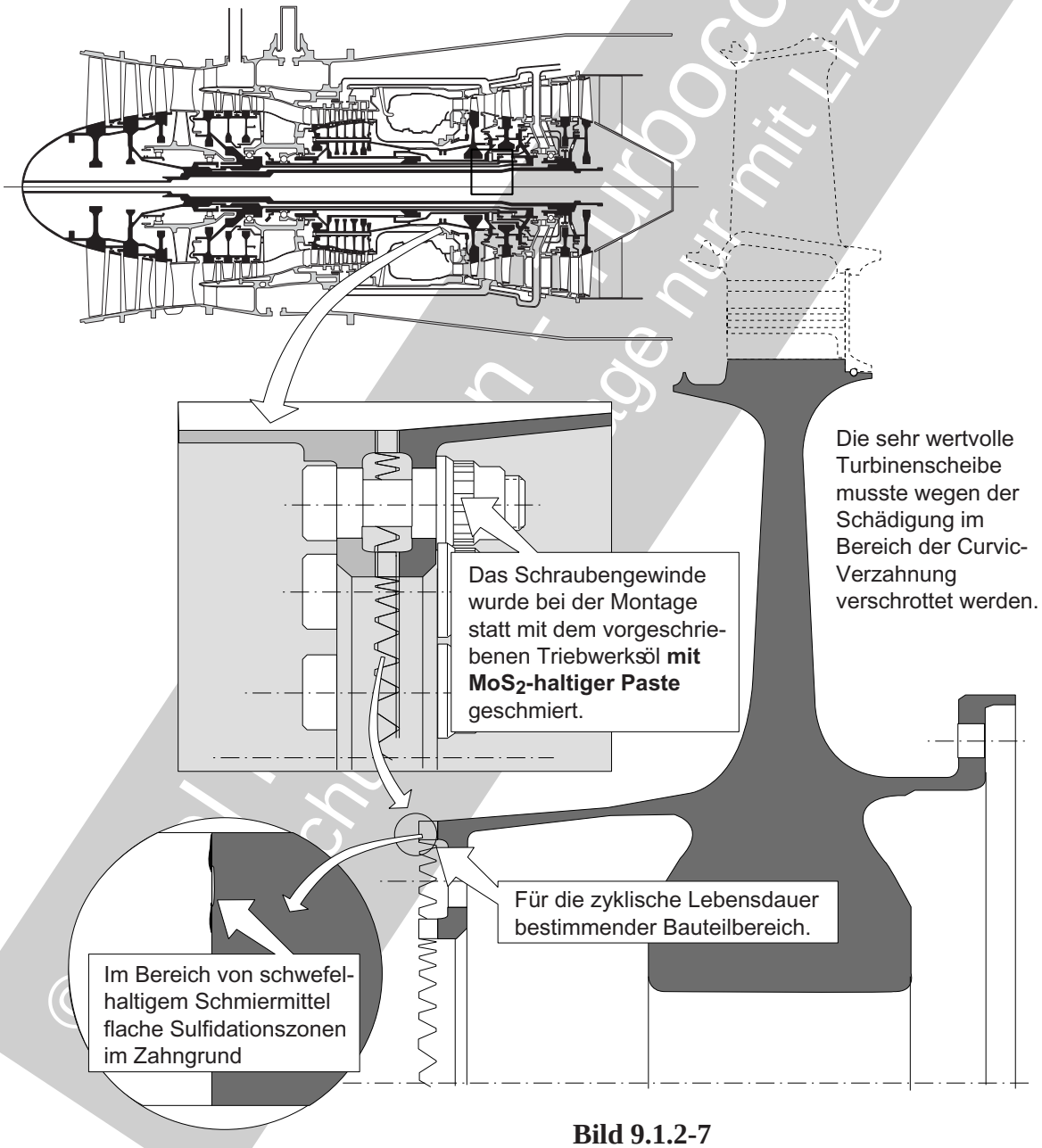


Bild 9.1.2-7

© Schubert - Turbocom
Kopie nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Hilfsstoffe: Gleitfette, Pasten, Schichten

Turbinenradbruch nach dem Einsatz eines ungeeigneten Schmiermittels.

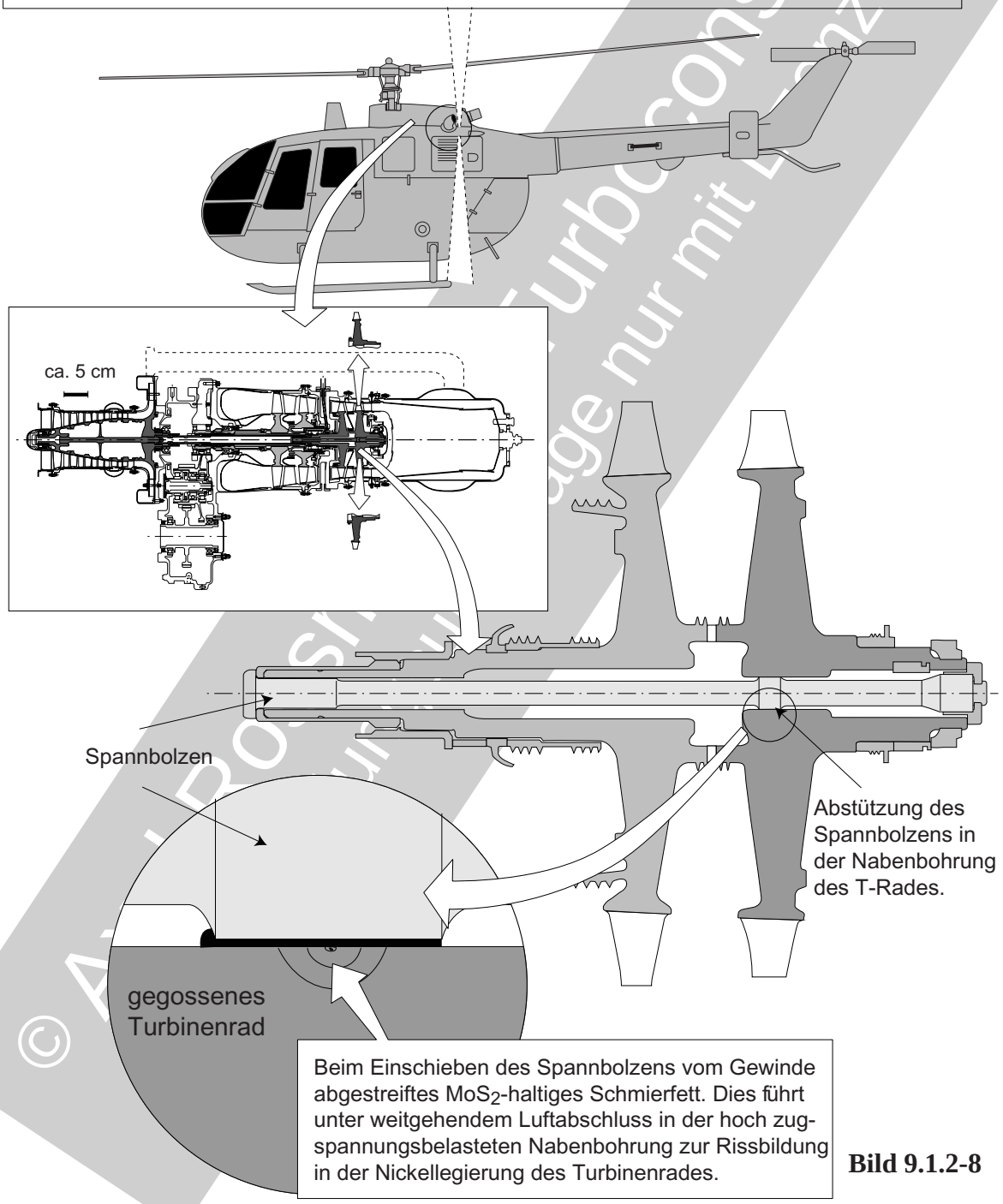


Bild 9.1.2-8

© AVL Dossi Turbo consult
Kopie nur mit Lizenz

Bild 9.1.2-8 *: In diesem Fall wurde* ***versucht, einen Montagevorgang zu verbessern****. Wie in Bild 9.1.2-7 sollte die erforderliche Vorspannung mit einem* ***'besseren' Schmiermittel*** *des Gewindes gewährleistet werden. Das Gewinde befindet sich in der mittleren Skizze am rechten Ende des zentrischen Spannbolzens. Dieser verspannt über verzahnte Kupplungen (Curvic Kupplung) die Turbinenräder des Gaserzeugers.*

Das mit einem MoS_2-haltigen Schmierfett behandelte Gewinde wird durch die Nabenbohrungen der Turbinenräder geschoben. Diese bestehen aus Ni-Basis-Guss. Die Bohrung des Rads der 1. Turbinenstufe ist so eng, dass sich am Gewinde überstehendes Schmiermittel in der Nabenbohrung abstreifte. Diese ist im Betrieb extrem hoch zugbelastet. Die Position des Zentrierbunds vom Spannbolzen lag genau in dieser Zone. So war es möglich, dass bei einer Bauteiltemperatur von über 500 °C das zersetzte Fett Schwefel freigab. Wegen Behinderung des Zutritts von Luftsauerstoff erfolgte kein Verbrennen. In die bei diesen Gusswerkstoffen unvermeidlichen und zulässigen, von der Bohrungsbearbeitung angeschnittenen Mikroporen, drang der aggressive Schwefel ein. Das führte zu einer Art ***Spannungsrisskorrosion*** *mit sehr schnellem, beschleunigtem Rissfortschritt. Bereits bei einer axialen Länge von wenigen Millimetern wird der Riss instabil (Band 1 Bild 5.2.1-1 und 5.2.1-2). Es kommt zum* ***Radbruch*** *mit Bruchstückaustritt. Eine umfangreiche und unverzügliche Rückrüstaktion an ca. 100 bereits ausgelieferten, nach dem suspekten Verfahren montierten Triebwerken wurde so erforderlich.*

Bild 9.1.2-9.1 und Bild 9.1.2-9.2 *(Lit. 9.1.2-3): Dieser Absturz eines Verkehrsflugzeugs in das Meer ist auf Versagen der* ***Verstellung des Höhenruders*** *zurückzuführen. Teile des Flugzeugs konnten geborgen werden. Die Untersuchung ergab als* ***Ursache für den Absturz einen Schaden an der Verstellspindel*** *des Höhenruders. Es handelte sich um keinen Triebwerksschaden. Die zum Unfall führenden Vorgänge stehen jedoch in ursächlichem Zusammenhang mit* ***Wartungsmängeln****. Sie sind auch für den Triebwerksbereich interessant.*

Der Ablauf des Flugunfalls und Befunde der Wrackteile wiesen auf das Versagen der Verstellung des Höhenruders hin (linke Seite, Rahmen oben rechts). Dieses wird von einer meterlangen ***Gewindespindel*** *mit ca. 10 cm Durchmesser über eine* ***Bewegungsmutter*** *betätigt (linke Seite, Rahmen unten rechts). Den Antrieb übernehmen Elektromotoren.*

Teile der Höhenruderverstellung mit Spindel und Bewegungsmutter konnten geborgen werden. Die ***Gewindehülse*** *in der Bewegungsmutter (linke Seite, unten links) war gebrochen und wies ausgeprägte* ***Verschleißschäden*** *auf. Gewindegänge waren bis zum Grund verschwunden und so die Mutter außer Eingriff. Der Restgewaltbruch geht von einem umlaufenden* ***LCF-Anriss*** *(niedrigzyklische Schwingermüdung) mit entsprechenden Rissfortschrittsmerkmalen (striations) aus. Im Inneren der Mutter wurden* ***keine Reste eines Schmiermittels*** *gefunden. Im benachbarten Außenbereich befanden sich jedoch rotbraune und schwarze Rückstände des Schmierfetts (Bild 9.1.2-6). Die* ***Bohrung für eine Nachschmierung war von einer harten schwarzen Ablagerung verlegt****. Diese Ablagerung enthielt Verschleißpartikel aus der Mutter.*

Etwa ***20 cm lange kupferfarbene Verschleißspäne*** *aus der Mutter hatten sich um die Spindel gewickelt (rechte Seite oben). Auffälligerweise wies die Spindel im Arbeitsbereich bis auf winzige Reste keine Spuren von altem oder frischem Schmiermittel auf. Außerhalb des Arbeitsbereichs wurden Schmiermittelreste im Gewindegrund gefunden.*

© Axel Rossmann - Turbocosult
Gesamtunterlagen unentgeltlich

Systeme und Betriebsstoffe: Hilfsstoffe: Gleitfette, Pasten, Schichten

Obwohl kein Triebwerksschaden, ist dieser Fall doch ein Musterbeispiel für die Folgen vom Schmierstoffmangel.

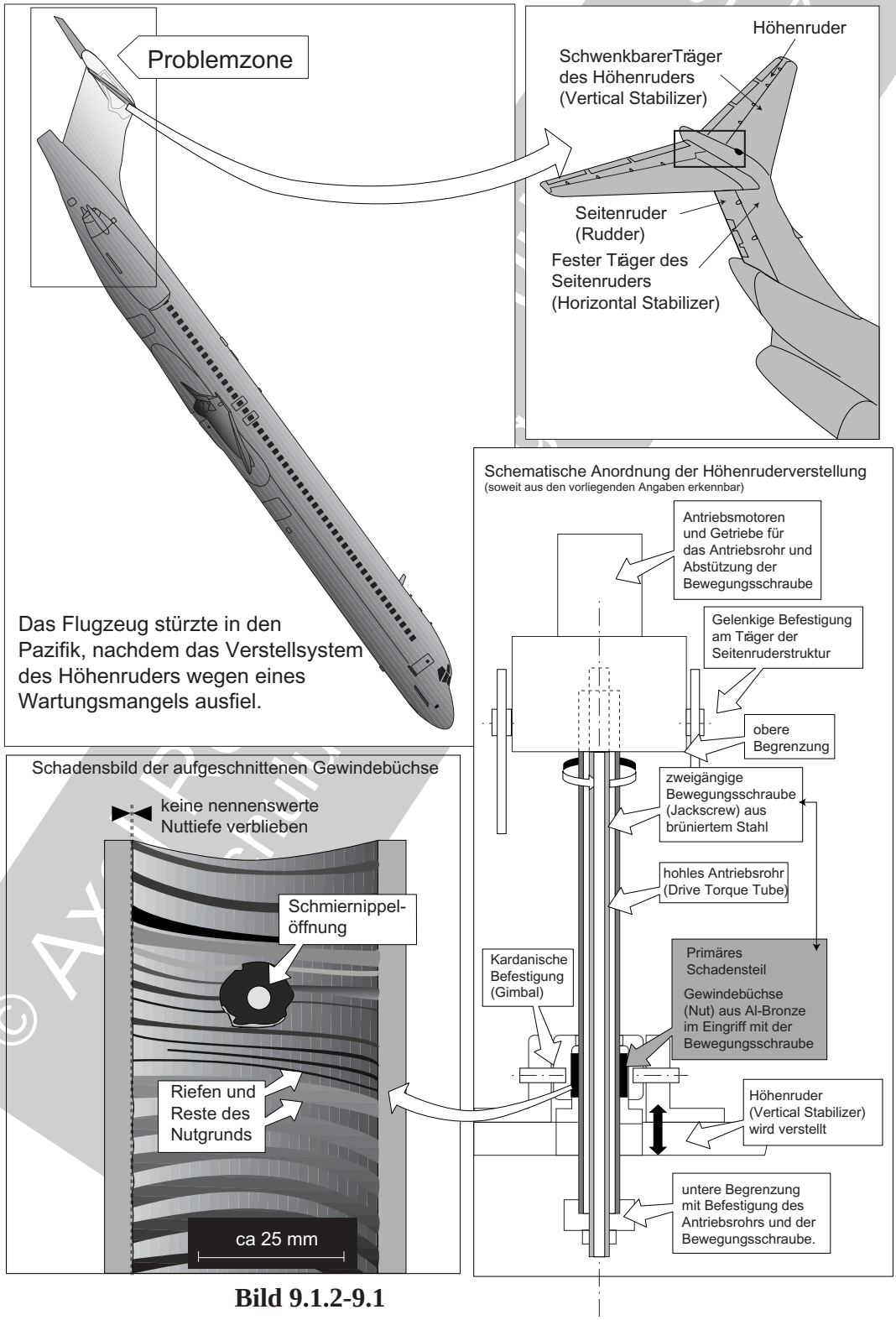


Bild 9.1.2-9.1

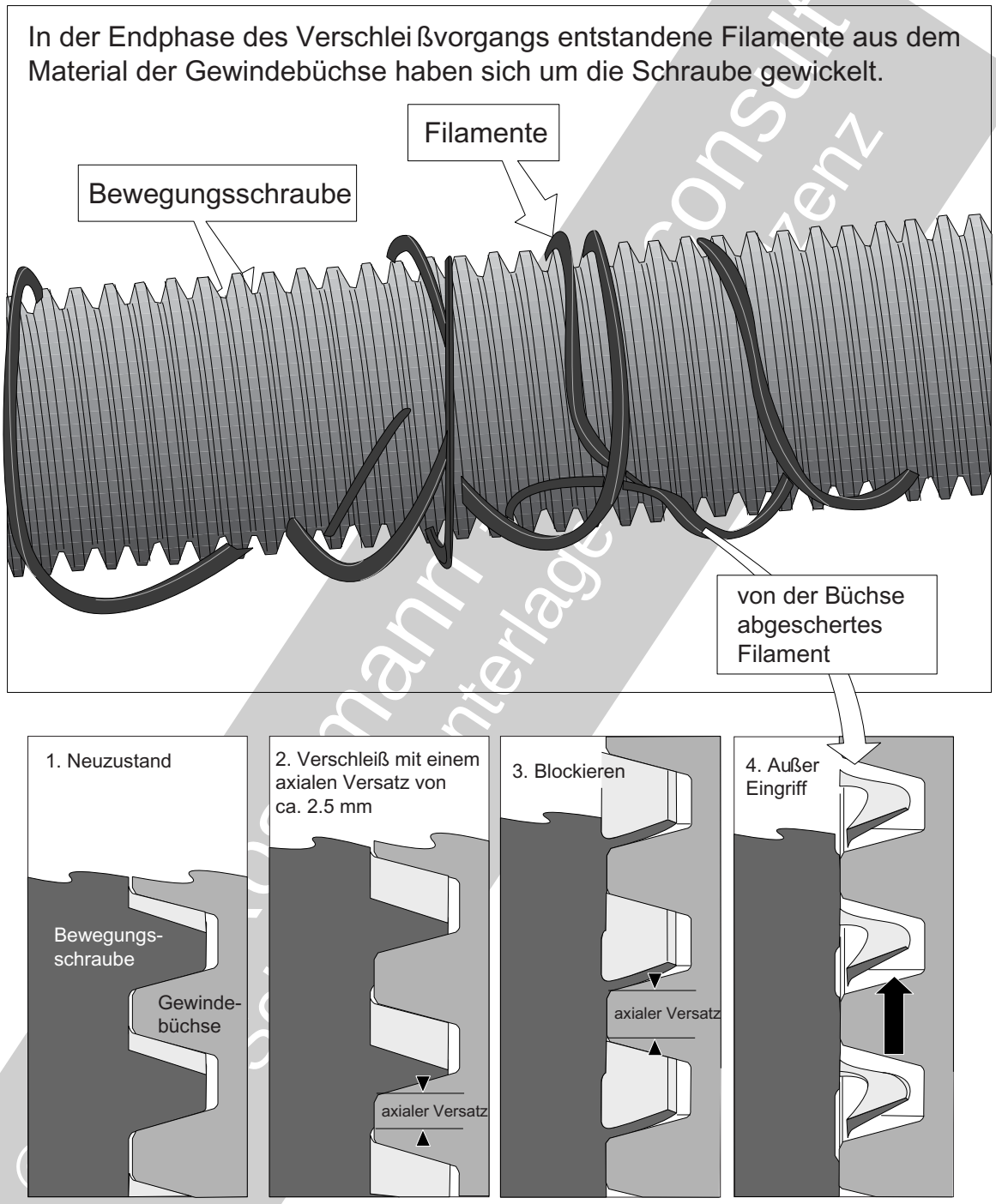


Bild 9.1.2-9.2

Die Untersuchung weiterer entsprechender ***Bewegungsmuttern anderer Flugzeuge*** *des Betreibers ließen in der Art ähnliche Verschleißschäden in unterschiedlichen Stadien erkennen.*

Untersuchungen der Schmiermittelreste ergaben, dass diese zu ***keinem der beiden zugelassenen Produkte passten****. Das wies auf eine* ***Mischung der Fette*** *hin. Bei Versuchen wurde eine dunkle rotbraune Verfärbung im Zusammenhang mit einem der Fette (Aeroshell Grease 33, Bild 9.1.2-2) beobachtet. Es handelt sich offenbar um eine erwünschte, d.h. unbedenkliche* ***Reaktion der Additive****. Umfangreiche Verschleißversuche zeigten, dass eine Mischung der zugelassenen Fette (Aeroshell 33 und Mobilgrease 28) sich nicht nennenswert von den Einzelfetten unterschied. Auch 5 %*

Wasser oder Enteisungsflüssigkeit änderten dieses günstige Verhalten nicht. ***Lediglich bei Fettmangel wurde dem Unfall vergleichbarer Verschleiß*** *beobachtet.* ***Die Mischung der Fette schied deshalb als Ursache für den extremen Verschleiß aus****.*

Der ***Schadensablauf im Spindelbereich*** *ergibt sich aus den Untersuchungen wie folgt (rechte Seite unten):*

Anfangs führte der ***Verschleiß in der Bewegungsmutter*** *zum* ***Blockieren der Verstellung****. Dann erfolgte bei den häufigen Betätigungsversuchen ein* ***Abscheren des verbliebenen Mutterngewindes.*** *Die Mutter wurde axial über die Spindel bis zum Anschlag gerissen. Es kam zu extremer, aerodynamisch bedingter Schwellbelastung auf das Höhenruder. Das führte zur* ***zyklischen Überlastung der Gewindebüchse*** *mit Rissbildung und anschließendem* ***Gewaltbruch****. Damit wurde das Höhenruder über die Anschläge hinaus frei und leitete den endgültigen Absturzvorgang ein.*

Die Ursache für den extremen Verschleiß der Bewegungsmutter ist in einer ungenügenden, wartungsbedingten Schmierung zu suchen*.*

Dabei wirkten sich möglicherweise beitragend aus:

- ***Fehlende Schmierung bzw. Nachschmierung****.*

- ***Der Wart war nicht über die richtige Vorgehensweise beim Nachschmieren informiert****. Beispielsweise wusste er nicht, dass beim Schmieren* ***Fett sichtbar aus dem im Eingriff befindlichen Gewinde dringen muss****.*

- ***Verlängerung des Schmierintervalls*** *durch den Betreiber von 1600 Flugstunden auf 8 Monate (ca. 2250 h). Dabei wurde* ***ohne ausreichende Erfahrung und Absicherung*** *davon ausgegangen, dass eine Änderung bei der Schmierfettsorte dies rechtfertigt.*

Eine nachträgliche ***Überprüfung*** *durch die zuständige Aufsichtsbehörde (FAA) ergab im Wartungsbereich des Betreibers eine* ***Vielzahl Mängel****:*

Management*:*

- Die ***Position*** *des Wartungsdirektors war zwei Jahre* ***nicht besetzt*** *und wird seit kurzem* ***von zwei Personen wahrgenommen****.*

- Die ***Position*** *des Betriebsdirektors ist* ***vakant****.*

- Der Direktor für die Sicherheit ist gleichzeitig der Direktor für Qualitätskontrolle und Ausbildung. Er hat ***kein direktes Vortragsrecht an höchster Managementebene****.*

Wartungsschulung*:*

- Das Handbuch des Betreibers ***beschreibt keine Schulungsunterlagen*** *oder die* ***praktische Schulung****.*

- Das ***Schulungsprogramm*** *ist lediglich* ***informell*** *im* ***Ermessen der Instruktoren****. Ein* ***strukturierter Plan, die Festlegung des Stoffs und Erfolgskriterien sind nicht vorhanden****.*

Wartungsprogramm*:*

- Das ***Wartungshandbuch*** *(General Maintenance Manual) gibt nicht die tatsächlich beim Betreiber* ***angewendeten Verfahrensweisen*** *wieder.*

- Das Wartungshandbuch enthält ***keine Handlungsanweisungen*** *für umfangreichere* ***Planung*** *und* ***Kontrolle*** *(Heavy Check).*

- Das Wartungshandbuch enthält keine vollständige Vorgehensweise für die Probleme eines Flugzeugs nach einem Heavy Check (airworthiness release).

- In Einzelfällen war die ***Dokumentation der Wartung unvollständig****.*

- Mängel in der ***Kennzeichnung und Nachverfolgbarkeit von Ersatzteilen****.*

- ***Schichtübergaben*** *erfolgen nicht immer nach Wartungshandbuch.* ***Abweichung bei der Dokumentation*** *(abweichende Formblätter, fehlende Abzeichnungen).*

- ***Arbeitskarten*** *für Sonderarbeiten sind lediglich mit einem* ***Stempel****, nicht aber mit einer* ***Unterschrift*** *des Ausstellers versehen.*

© Axel Rossmann - Turbopsulte
Schulungsunterlagen nur zur

- Obwohl Vermerke eines ***nicht abgeschlossenen Arbeitsvorgangs*** *vorhanden sind, fehlen solche für den Abschluss.*
- ***Veränderungen an Arbeitskarten ohne Gegenzeichnung*** *des Engineering oder der Qualitätskontrolle.*
- Das Wartungshandbuch enthält keine Anweisungen, wie ***Arbeitskarten*** *bei der Wartung zu* ***verteilen*** *und* ***überwachen*** *sind.*

Laufende Problemanalyse und Überwachung*:*
- Handbücher weisen keine ***Beispielkopien von Prüflisten*** *für ein solches Programm auf.*
- Die ***Überwachung ist nicht kontinuierlich****. Prüfintervalle in Ein- und Zwei-Jahresrhythmus mit einer Überziehungszeit von einem halben Jahr.*
- ***Prüfmethoden und -techniken*** *mit dem beim Betreiber angewendeten Programm entsprechen nicht den vorgeschriebenen Sicherheitsstandards.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 9.1.2

9.1.2-1 “Military Specification Lubrication Products“, www.mtpinc-exporter.com, Seite 1-8. (4512/

9.1.2-2 “Military Specifications & Other Approvals“, www.fsptbm.com, Seite 1 und 2.

9.1.2-3 NTSB Aircraft Accident Report AAR-02/01,PB2002-910402 Notation 7263E, “Loss of Control and Impact with Pacific Ocean- Alaska Airlines Flight 261, January 31, 2000“, Bericht 30. December 2002, Seite 1-189.

9.1.2-4 T.Harless, W.Stelk, “Helicopter Engines and Desert Environments- Who Wins?“, Naval Safety Center, Mech Magazine, Mech Summer 2005, www.safetycenter.navy.mil, Seite 1und 2.

9.1.2-5 “Besser als Vaseline - Schmier- und Montagepasten“, Zeitschrift „Konstruktionspraxis“ Nr 8-August 1997, 8.Jg.,Seite 84.

9.1.2-6 “Premium military approved greases for the aviation industry“, www.shell-lubricants.com, SOC: 140-09/04, Seite 1-4.

9.1.2-7 “Angaben zu Spezifikationen von US, NATO, UK, FR, NSN“, www.silco-tec.com.com, SOC: 140-09/04, Seite 1-4.

9.1.2-8 “Mil-Spec Chemicals: Lubricants“, www.chemsol.com, 02.03.2006, Seite 1-6.

9.1.2-9 “Greases and Anti-Seizure/Lubricant Compounds Selection Guide“, Fa. Acheson, 2006, Seite 1.

9.1.2-10 “Lubricants & Lubricating Compounds“, www.zipchem.com, 2006, Seite 1-3.

9.1.2-11 “Military Lubricants & Oils“, www.globaltradelink.com, 2006, Seite 1-3.

9.1.2-12 “Anti-Seize Compounds“, www.jetlube.com, 2006, Seite 1-7.

9.1.2-13 NTSB Identification DCA89MA034, microfiche Number 41269A, “Continental Airlines Inc., Accident occurred Mar-17-89 at Oakland,CA“, Seite 1.

9.1.2-14 D.A.Lombardo, „Controlling Foreign Object Damage“, Zeitschrift „Aviation Maintenance (AM)“ , April 1977, Seite 27-31.

9.1.2-15 S.Broderick, “FAA to Warn Against Mixing Greases“, Zeitschrift „Overhaul & Maintenance“, May 2001, Seite 35 und 36.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

9.1.2-16 R.L.McAlpin, P.L.Talley, H.L.Bernstein, R.E.Holm, , "Failure Analysis of Inlet Guide Vanes", Paper 2001-GT-0428, ASME Turbo Expo 2001, June 4-7, 2001, New Orleans, Louisiana, Seite 1-5.

9.1.2-17 R.Martin, R.Campion, "Aging of Composites", Zeitschrift „Materials World", Vol.4 no. 4 pp. 200-02, April 1996, www.azom.com, Seite 1-6.

9.1.2-18 Australian Transport Safety Bureau, Technical Analysis Report 17/03, "Bolt Fracture, High Pressure Turbine Disk Assembly", Dr. A.Romeyn, Pratt & Whitney Canada PW 118A, 24-3-2004, Seite 1-20.

9.1.2-19 M.Johnson, "Solid Film Lubricants: A Practical Guide", Zeitschrift „Machinery Lubrication Magazine", March 2006, 4 Seiten.

9.1.2-20 "Solid Lubricants", www.tribology-abc.com, 2007, Seite 1-4.

9.1.2-21 "Solid and Dry Film Lubricants Specifications", www.GlobalSpec.com, 2007, Seite 1-3.

9.1.2-22 "Fuel storage system contaminated", Ref. 510003474, Flight Safety Australia November-December 2006,"Selected Service Difficulty Reports " , Seite 52.

9.1.2-23 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 5", 2008, ISBN 978-3-00-025780-3, Kapitelm 19.1.3 und Kapitel 19.2.3.

9.1.2-24 P.Stephan, „Tribosysteme in der Fahrzeugtechnik, Wälzlagerschäden in Fahrmotoren - Ursachen und Abstellmaßnahmen", Proceedings des ÖTG-Symposium 2005, FH Joanneum GmbH, Graz, Seite 1-23.

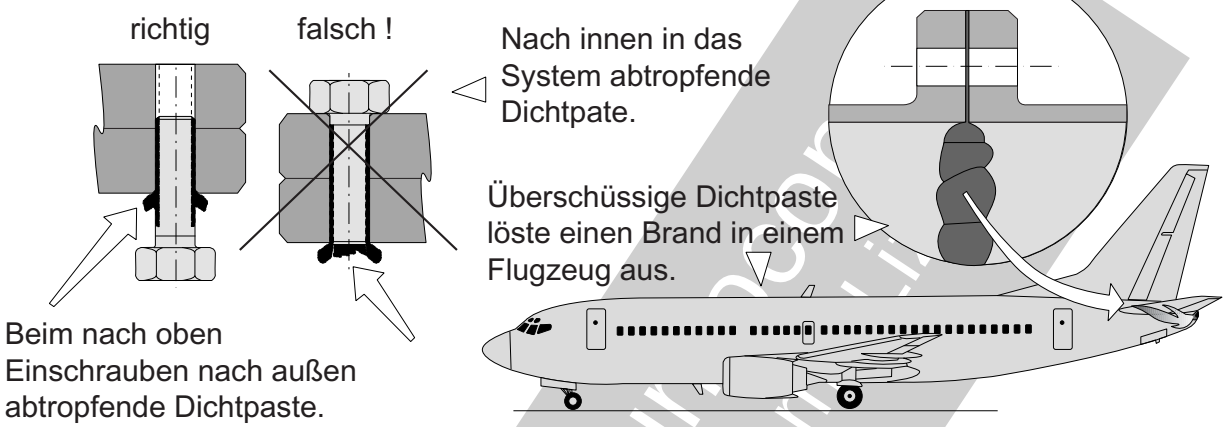
9.1.2-25 W.-R.Zabel, „Einfluss von Oxidationbsinhibitoren auf das Betriebsverhalten fettgeschmierter Lager", Promotionsarbeit, 2005, Seite 1-150.

9.1.2-26 A. Rossmann, „Die Sicherheit von Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 1", 2000, ISBN 3-00-005842-7, Kapitel 5.4.3 und Kapitel 5.4.5

9.1.2-27 A. Rossmann „Die Sicherheit von Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 4", 2000, ISBN 3-00-017734-5, Kapitel 16.2.2.3

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

9.2 Dichtmittel



Dichtmittel in Form **aushärtender Pasten oder Flüssigkeiten** kommen besonders zur **Flanschdichtung** bei Getrieben und Gehäusen wie im vorderen Verdichterbereich zum Einsatz. Bei bestimmungsgerechter **Verarbeit ung und Verwendung,** entsprechend den Angaben in Vorschriften und Handbüchern, sollte eine ausreichende Betriebssicherheit gewährleistet sein. Problematisch sind eher **die kleinen, scheinbar harmlosen Abweichungen.** Dazu gehört der Übergang auf ein als **vergleichbar eingeschätztes Produkt**

- Die Anwendung einer Dichtpaste im Bereich von **Medien für die sie nicht explizit zugelassen** ist, kann zum Ausfall der Dichtwirkung führen. Eine ungeeignete Anwendung ist nicht immer offensichtlich. Orientiert man sich an **Prospektmaterial,** werden gewöhnlich eine Vielzahl von Medien angegeben gegenüber denen das Dichtmittel resistent ist. Man sucht dagegen häufig vergebens nach Angaben zu Medien welche die **Dichtmasse schädigen**. Beispielsweise zeichnet sich eine **anaerobe** (Aushärten unter Luftabschluss) Dichtmasse, die im Triebwerksbau häufig zur Anwendung kommt (Hylomar®. Vorsicht! Unter diesem Label gibt es mehrere Produkte mit unterschiedlichen Eigenschaften) durch eine hervorragende Beständigkeit gegen synthetische Schmieröle, Wasser, Frostschutzmittel (Glykole) und Kerosin aus. Dagegen könnnen **Hydrauliköle und Flugbenzin** auf diese Dichtmasse schädigend wirken. Diese Wahrscheinlichkeit mag zwar bei bestimmungsgemäßer Anwendung vergleichsweise gering sein, ist jedoch z.B. bei Triebwerken nicht auszuschließen.

In der **Hydraulik** werden Pasten und Kleber generell als problematisch gesehen. Falls eine Anwendung unvermeidbar ist, darf die Paste keinesfalls in den Hydraulikkreislauf gelangen. Deshalb ist gegebenenfalls bei Schrauben die Paste auf das Außengewinde aufzutragen und die Schraube **von unten nach oben einzuschrauben**. Damit tropft überschüssige Dichtpaste nach außen ab..

Ungeeignete **Silikongummidichtungen** können in Kontakt mit **Flugbenzin** gefährlich quellen und große Blasen werfen, die auch größere Querschnitte merklich verengen (Bild 6.10.1.2-12, Lit. 9.2-3).

- Mit einer Unverträglichkeit (**Korrosion**) mancher Dichtpasten beim Kontakt mit Metallen ist zu rechnen. Dies gilt für einige an Luft aushärtbare **Einkomponenten Slikongummi** (Room Temperature Vulcanizing = RTV). Beim Aushärten mit Luftfeuchtigkeit entsteht **Essigsäure** (Merkmal: Geruch!). Die Essigsäure verflüchtigt sich zwar nach einiger Zeit weitgehend, ein kleiner Rest (ca. 0,5 %) bleibt jedoch zurück. Er kann auf einige Metalle korrosiv wirken. Dazu gehören **Kupfer, Messing, Zink, Kohlenstoffstähle, galvanisch beschichtete Eisenlegierungen und Magnesiumlegierungen**. Aluminiumlegierungen erscheinen dagegen resistent. In jedem Fall dürfte eingeschlossene Essigsäure zwischen zwei ungleichen Metallen (Elementbildung) Korrosion be-

© Axel Pesenhofer, Tutorenpool
Abschnittsdatei nur für Mitglieder

RoBoconsult
Vervielfältigungsgenehmigung mit Lizenz

Auch bei Dichtpasten gilt: Viel hilft nicht unbedingt viel, sondern kann schädlich sein.

Dichtungspaste wird auf den Gehäuseflansch aufgebracht

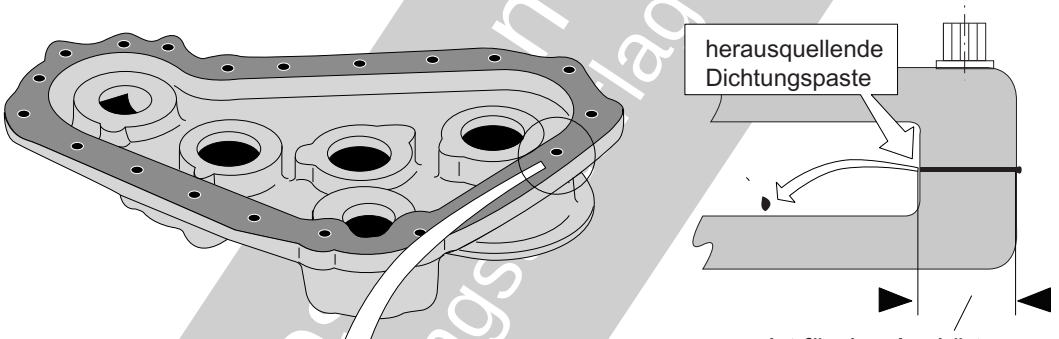


Bild 9.2-1

Beim Verschrauben der Flansche dringen Dichtungspastenreste in das Gehäuse und können Ölfilter/-siebe und Leitungen zusetzen.

Ist für den Aushärtungsprozess Luftsauerstoff notwendig (aerobes Verhalten), muss der Flansch ausreichend schmal sein.

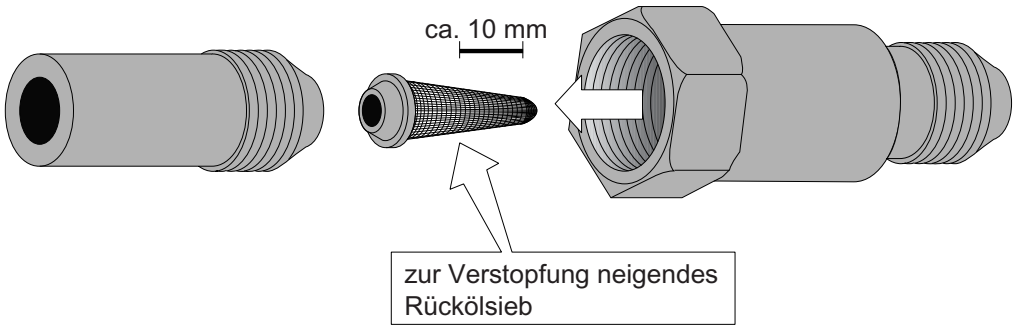
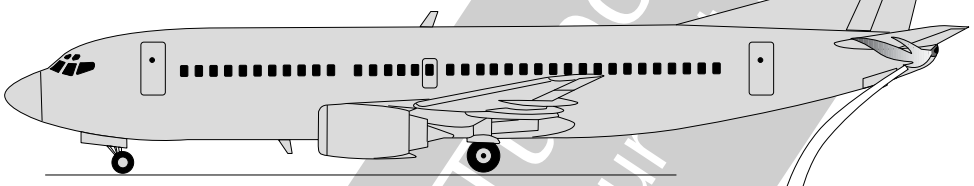


Bild 9.2-1 *(Lit.9.2-1): Für die Flanschabdichtung von Gehäusen im Temperaturbereich von -50 bis +250°C haben sich* ***anaerobe Dichtmittel*** *(Typ Hylomar®) seit langem hervorragend bewährt. Dies gilt besonders für Flansche ölführender/-benetzter Gehäuse (Skizze oben).* ***Überschüssiges Dichtmittel*** *wird beim Zusammendrücken der Flansche* ***aus dem Dichtspalt gepresst*** *(Detail oben rechts). Dieses Material kann sich ablösen und wichtige* ***Strömungsquerschnitte verstopfen****. An der zugänglichen Außenseite ist es kein Problem diese*

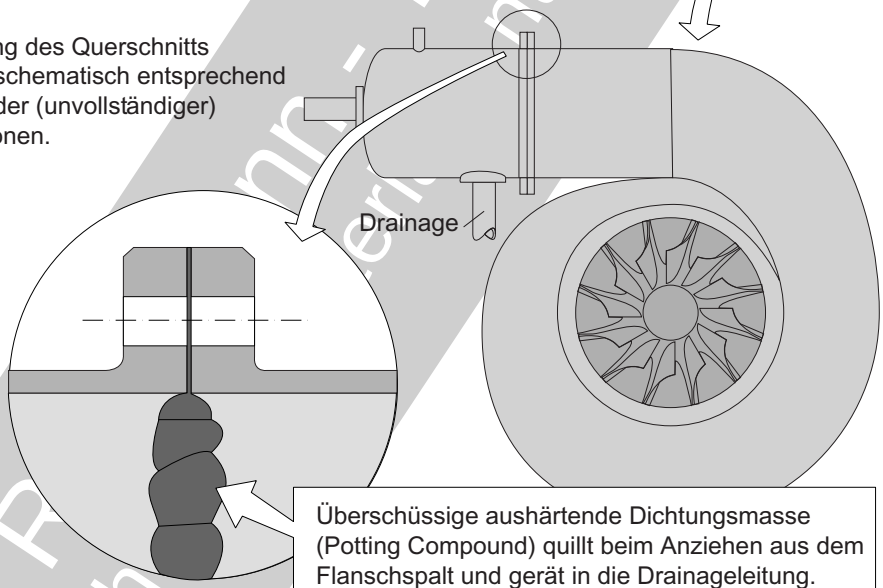
Systeme und Betriebsstoffe: Hilfsstoffe: Dichtmittel

Überschüssige Dichtungsmasse im Brennkammerbereich einer APU führt zu einem gefährlichen Feuer.

Im Bereich der APU entstand bei deren Start im Stand ein Feuer. Dieses wurde vom Rückenwind nach vorne am Rumpf entlang geblasen. Nach dem Abheben des Flugzeugs traten schwere Vibrationen auf und eine Notlandung erfolgte. Die Klappen des Höhenruders zeigten starke Feuereinwirkung. Der Heckkonus der Zelle war auf einer Fläche von ca. 1x1 Meter verbrannt mit Blasenbildung.



Darstellung des Querschnitts der APU schematisch entsprechend vorliegender (unvollständiger) Informationen.



Überschüssige aushärtende Dichtungsmasse (Potting Compound) quillt beim Anziehen aus dem Flanschspalt und gerät in die Drainageleitung. Diese verstopft, sodass Kraftstoff im Abgasrohr verbleiben kann, der dann beim Start zündet.

Bild 9.2-2

Reste, insbesondere im noch nicht ausgehärteten Zustand, zu entfernen. Nach innen austretendes Dichtmittel ist dagegen, beispielsweise bei einem Getriebegehäuse, oft nicht mehr entfernbar. Es härtet aus und kann vom Ölstrom mitgenommen werden. Größere Mengen dieser Partikel verstopfen ***Filtersiebe*** *(Skizze unten),* ***Kraftstoffdrainageleitungen*** *und* ***Öldüsen****. Eine Gefahr, auf die üblicherweise in den* ***Handbüchern*** *bzw.* ***Verarbeitungsangaben*** *hingewiesen wird. Im Ölkreislauf sind besonders die relativ kleinen Querschnitte der* ***Siebe*** *betroffen (Rahmen unten). In Bild 9.2-2 ist ein Fall beschrieben, bei dem es zum* ***Brand einer APU*** *kam, weil die Drainageleitung nach einem Fehlstart verstopft wurde. So konnte sich der Kraftstoff ansammeln.*

Bild 9.2-2 *(Lit. 9.2-2): Eine nachträgliche Untersuchung der bei diesem Vorfall betroffenen* ***Hilfsgasturbine*** *(APU) ergab, dass deren* ***Kraftstoff-Drainageleitung*** *(Skizze unten rechts) von mehreren Stückchen eines* ***Elastomers verstopft*** *war. Es handelte sich um ein bei Raumtemperatur aushärtbares Material, das beim Zusammenbau der APU* ***als Dicht-***

masse zwischen Flanschen *verwendet wird. Der Betreiber bestätigte diese Vorgehensweise. Das* ***Überholhandbuch*** *des APU-Herstellers weist den Betreiber besonders darauf hin, die* ***Dichtmasse sparsam anzuwenden****. So ist jede überschüssige Dichtmasse vor dem Anbau des Gasführungsrohrs zu entfernen, um das Verstopfen von Drainageanschlüssen zu vermeiden. Bei einer blockierten Drainageleitung ist nach Handbuch mit Stichflammen zu rechnen.*

Ursache für die Überhitzung des Zellenendes im Bereich der APU war die verstopfte Drainageleitung an der Brennkammer. Bei einem ungünstigen Startvorgang wurde verbliebener Kraftstoff vernebelt und aus dem Abgasrohr geblasen. Heckwind blies den Kraftstoff bei stehendem Flugzeug nach vorne und benetzte die Heckpartie des Rumpfs. Dieser Kraftstoff wurde von den heißen Abgasen beim Start der APU gezündet.

Literatur zu Kapitel 9.2

9.2-1 NTSB Identification DCA89MA034, microfiche Number 41269A, “Continental Airlines Inc., Accident occurred Mar-17-89 at Oakland,CA“, Seite 1.

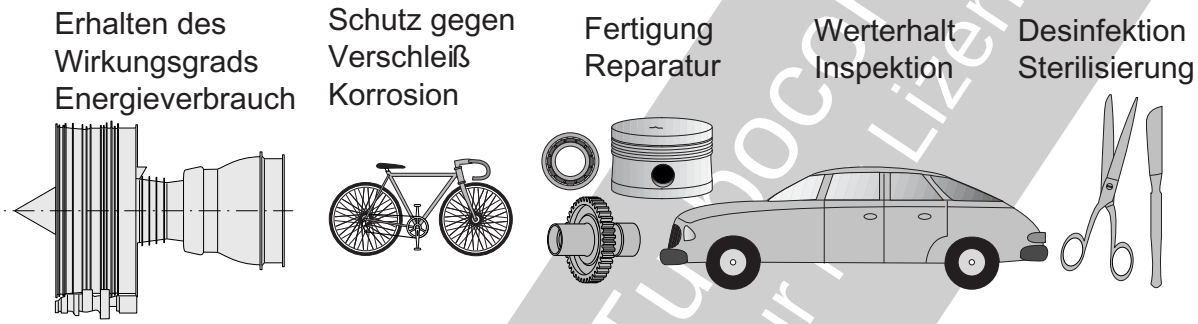
9.2-2 D.A.Lombardo, „Controlling Foreign Object Damage“, Zeitschrift Aviation Maintenance (AM) , April 1977, Seite 27-31.

9.2-3 „Fuel storage system contaminated“, Ref. 510003474, Flight Safety ustralia November-December 2006, „Selected Service Difficulty Reports“, Seite 52.

© Axel Rossmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

9.3 Reinigungsmittel

Für die Reinigung sind Konstruktion, Verfahren und Mittel abzustimmen



© Axel Bossmann - Tubocomsult
Abschnittsweise nur mit Lizenz

Auch die optimale Reinigungsmöglichkeit einer Maschine und deren Komponenten ist entscheidend vom **Konstrukteur** beeinflusst. Neben anwendungsspezifischen **Verfahren** stehen Hoch- und Niederdruckreinigung mit niedriger Temperatur (Kaltreinigung) und hoher Temperatur (Heißreinigung, Dampfreinigung) zur Verfügung. Dabei kommen unterschiedlichste, angepasste **Reinigungsmittel** in fester und flüssiger Form zur Anwendung. Für die Auswahl sind viele Aspekte und potenzielle Schädigungen zu beachten:

- **Wassereinbruch** in Komponenten wie **Radlager**.
- Beeinflussung von **Elektrik** und **Elektronik**.
- **Korrosionsgefahr**, z.B. bei **Elementbildung** zwischen Käfig und Laufbahn in Wälzlagern..
- **Funktionsbeeinflussung** von **Reibkomponenten** wie Bremsen und Kupplungen.
- **Erosion**, insbesondere in **Strömungsmaschinen** (Beschaufelung von Turbomaschinen).
- **Mechanische Beschädigung** filigraner Konstruktionen wie Kühler und Wärmetauscher.
- **Chemische Reaktionen** mit Klebstoffen und Dichtungsmaterialien (z.B. Elastomere).
- Eindringen von **Wasser in den Ölkreislauf** mit der Gefahr von Schäden an Gleitlagern.

Die **Problematik der Maschinenreinigung und Reinigungsmittel** soll im Folgenden am Beispiel von Flugtriebwerken aufgezeigt werden.

Hier kommen Reinigungsmittel zu unterschiedlichen Zwecken zum Einsatz.

Sind diese vom OEM für die jeweilige Anwendung **zugelassen** und ist die Anwendung ausreichend **spezifiziert,** lassen sich mit ausreichender Sicherheit Probleme vermeiden. Von besonderer Bedeutung ist das **Waschen des Verdichters**.

Reinigungsmittel und ähnliche Medien kommen auch örtlich sehr begrenzt, insbesondere extern zum Einsatz. Sie dienen

- der Entfettung,
- der Entrostung,
- dem Korrosionsschutz und
- dem Entfernen von Koks und Ruß.

Auch der Kontakt mit Medien, die nicht direkt für die Anwendung am Triebwerk gedacht sind, ist möglich. Solche Mittel werden für die Zelle verwendet. Es handelt sich um

- Enteisungsflüssigkeiten,
- Reinigungsmittel,

- Lösungsmittel und
- Entlackungsmittel.

Die **Zulassung neuer Medien** erfolgt nach Vorschriften der zuständigen Behörden und des OEM. Sie gilt sowohl in Bezug auf die **Schädigung von Werkstoffen** (Bild 9.3-1) und **Bauteilfunktionen** als auch **Gesundheitsrisiken und Umweltaspekten**.

Ablagerungen auf einer **Verdichterbeschaufelung** können das Schaufelprofil verändern sowie Rauigkeit und Korrosion auslösen (engl. **fouling**). Gewöhnlich handelt es sich um angesaugten **Staub** mineralischer oder biologischer Natur (z.B. **Blütenpollen**). Dieser verbindet sich mit **Öldampf** aus einer vorderen Lagerkammer oder ebenfalls angesaugten klebrigen Stoffen (feuchtes **Meersalz,** unverbrannter **Kraftstoff**) auf dem Schaufelblatt. Es ist verständlich, dass Anordnung und Konstruktion (Dichtung) der Lagerkammer und damit konstruktive Besonderheiten des Triebwerkstyps dabei von Einfluss sind. Die Verschmutzungsneigung wird stark vom Betrieb beeinflusst. Niedrige Flughöhen über Land (Staub) und/oder Meer (feuchte salzhaltige Luft), wie sie für Hubschrauber und militärische Flugzeuge zu erwarten sind, begünstigen die Verschmutzung. Verdichter der Triebwerke von Verkehrsflugzeugen, die häufig längere Zeit in einer **Warteschlange** am Start stehen und Abgase der vorherigen Flugzeuge (unverbrannter Kraftstoff, Ruß) ansaugen, können ebenfalls verstärkt Ablagerungen aufweisen. So wird die Verschmutzungsempfindlichkeit typen- und anwendungsabhängig (z.B. Kurzstrecken, APU) sehr unterschiedlich. Die Motive für das **Waschen von Verdichtern und Turbinen** können betreiberspezifisch sein. In der Zivilluftfahrt steht eine Minimierung des **Kraftstoffverbrauchs** im Vordergrund. Bei Flugzeug- bzw. Triebwerkstypen die zu Pumpvorgängen neigen, kann das **Betriebsverhalten** bzw. der Pumpgrenzenabstand Vorrang haben (Lit. 9.3-30). In diesem Zusammenhang stößt man in der Literatur besonders auf Wellenleistungs- und Turboproptriebwerke (Lit. 9.3-30). Triebwerke älterer Bauart verwenden im Verdichter häufig korrosionsempfindliche Stähle (Bild 9.3-3). Entstehen daran werkstofftypische **Korrosionsgrübchen,** kann deren Kerbwirkung Schwingbrüche auslösen (Lit. 9.3-30). An Triebwerken mit einer Empfindlichkeit für **Heißgaskorrosion**/ **Sulfidation** (Band 1 Kapitel 5.6.1.4, Lit. 9.3-30) wird man verstärkt die Heißteile/Turbine waschen.

Folgende **Veränderungen der Beschaufelung** (Profil, Rauigkeit) sind in der Lage, das Betriebsverhalten des **Verdichters** zu verschlechtern:

- Absenken der Pumpgrenze (Lit. 9.3-30)
- Abfall von Wirkungsgrad/Leistung des Verdichters und damit des Triebwerks. Das führt zu erhöhtem Kraftstoffverbrauch (Bild 9.3-1) und einem Anstieg der Heißteiltemperaturen mit hohen Folge-/Reparaturkosten.
- Strömungsabriss an einzelnen Schaufeln (Rotating Stall, Lit. 9.3-30) mit Gefahr eines Ermüdungsbruchs.
- Korrosion/Aufrauen an Schaufelwerkstoffen wie Stählen und Leichtmetalllegierungen (Al, Mg) älterer Triebwerkstypen.

Auch in der **Turbine** können sich schädliche Ablagerungen bilden. Hierbei handelt es sich in erster Linie um Staubablagerungen (Lit. 9.3-29 und Lit. 9.3-31) mit potenziell gefährlichen Auswirkungen:

- **Erosion oder Abplatzungen an Beschichtungen** wie Diffusionsschichten und Wärmedämmschichten.
- **Überhitzung** von Heißteilen mit deutlicher Lebensdauerverkürzung durch äußere und innere Verstopfung der Kühlluftführung.
- Im Extremfall bei hohem Staubanfall (Sandsturm, Vulkanasche) merkliche Verkleinerung von Strömungsquerschnitten im Gaskanal. Die Folge ist ein Leistungsabfall und/oder Pumpen des Verdichters.

© Akademie für Luftfahrtsicherheit
das Schulungsunternehmen

Als **Abhilfen** gegen die Verschmutzungen/Ablagerungen dienen spezifisch **angepasste Reinigungsverfahren** (Bild 9.3-1). Diese können auf unterschiedliche Weise wirken. An älteren Triebwerkstypen, die noch nicht potenziell gefährdete Technologien wie weiche Einlaufschichten in den Verdichtergehäusen aufweisen, kommen **abrasiv wirkende Medien,** die im Heißgasstrom verbrennen, zum Einsatz (Bild 9.3-2). Müssen in der Turbine glasartig angeschmolzene Beläge auf der Beschaufelung entfernt werden, sind härtere Partikel notwendig (Lit. 9.3-29). Gravierende Nachteile (Bild 9.3-2 und Bild 9.3-5) abrasiver Reinigungsverfahren lassen harte Partikel gewöhnlich nur bei älteren Triebwerkstypen zu, wenn sie explizit vom OEM für diese freigegeben wurden.

Üblicherweise werden heute **Waschflüssigkeiten** in den Verdichter gesprüht. Man spricht vom **Waschen** des Verdichters. Unterschieden wird zwischen **Kaltwaschen** („**Cold Wash**“, Lit. 9.3-29) und **Heißwaschen** am laufenden Triebwerk („**Hot Wash**“, Lit. 9.3-29). Bei Waschvorgängen besteht grundsätzlich die Gefahr schädlicher Verunreinigungen wie z.B. Salze, die aus dem Verdichter in die Heißteile, insbesondere auf die Turbinenbeschaufelung, transportiert werden. Diese Ablagerungen können im späteren Betrieb verstärkt Heißgaskorrosion auslösen.

Nicht nur Verdichter werden gewaschen. In Sonderfällen werden auch **Heißteile gewaschen** (Lit. 9.3-29). Hier handelt es sich um das Entfernen wasserlöslicher Verunreinigungen wie Salzen (z.B. Meersalz, Feuerlöschmittel, Lit. 9.3-29). Diese Ablagerungen können für stark Lebensdauer verkürzende Heißgaskorrosion, insbesondere Sulfidation (Lit. 9.3-31) verantwortlich sein.

Moderne Triebwerkstypen enthalten eine Vielzahl neuer **Technologien, die auf Reinigungs- bzw. Waschvorgänge sehr sensibel reagieren** können (Bild 9.3-2 und Lit. 9.3-29). Es ist deshalb wichtig, sich an die für den jeweiligen Triebwerkstyp und das Anwendungsspektrum gültigen Vorschriften zu halten. Oft geben Vorschriften Entscheidungsspielraum, was Häufigkeit bzw. Intervalle des Waschvorgangs betrifft (Lit. 9.3-29). Problematisch sind empfohlene (nicht vorgeschriebene!) **Waschintervalle,** die sich nach „**schwammigen**“ **Begriffen** wie leichte oder schwere Bedingungen richten.

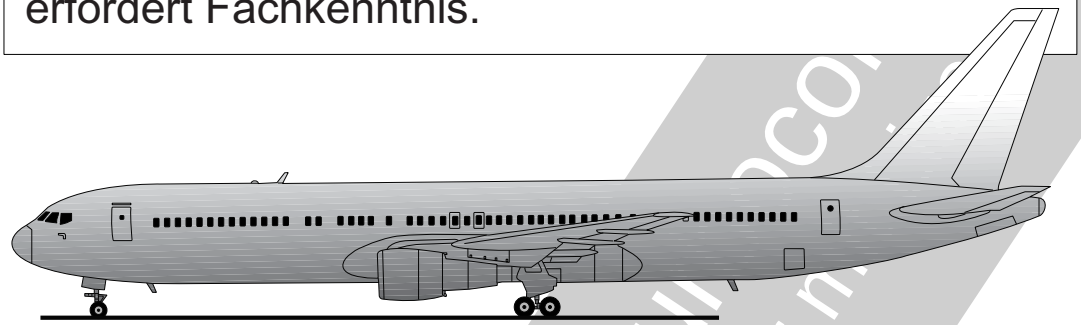
Bemerkenswert ist, dass ein **Waschvorgang Heißteile**, insbesondere die Turbinenbeschaufelung, schädigen kann. Dies ist der Fall, wenn sich im Verdichter abgewaschene **Verschmutzungen bzw. Korrosionsprodukte auf den Heißteilen ablagern** (Bild 9.3-2). Denkbar ist die Schädigung der Heißteile in Form verstärkter Sulfidation, geschädigte Diffusionsschichten (z.B. Al-Diffusionschicht) oder **Lötrissigkeit** (Liquid Metal Embrittlement = LME, Band 1 Bild 5.3-6).Gefährliche Metallverbindungen (Kadmium, Lotbestandteile wie Silber und Kupfer) können aus Korrosionsprodukten anderer Bauteile stammen.

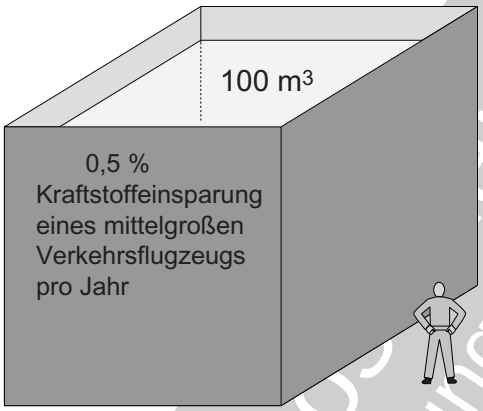
Mit steigendem Umweltbewusstsein trat die **Entsorgung gefährlich verunreinigter Waschflüssigkeit** beim Kaltwaschen in den Vordergrund. Insbesondere mit Cadmium verunreinigte Waschflüssigkeit (Bild 9.3-4), wie sie bei älteren Triebwerkstypen mit Ni-Cd-Korrosionsschutz zu erwarten sind, darf nicht in die Umwelt gelangen und muss (aufwändig) entsorgt werden. Offenbar gilt dies weniger für eine Umweltbelastung durch verdampfte Waschflüssigkeit im Triebwerksabgas beim Heißwaschen, was fragwürdig erscheint.

© MTU Aero Engines AG, München
Weitergabe und Vervielfältigung
ausschließlich zu internen Zwecken

Systeme und Betriebsstoffe: Hilfsstoffe: Reinigungsmittel

Es gibt verschiedene Methoden für das Reinigen von Verdichterschaufeln. Ihre Auswahl und Anwendung erfordert Fachkenntnis.





Optionen für das Reinigen von Verdichterschaufeln

Reinigungs-Medium	Vorteile und Probleme					
	Ungiftig	Biologisch abbaubar	Erosion	Organische Ablagerungen	Anorganische Ablagerungen	Spülung erforderlich
Fest, z.B. Reisschalen oder Fruchtkerne	Ja	?	Ja	Ja	Ja	Nein
Wasser entmineralisiert	Ja	Ja	Ja	Ja		Nein
Lösungsmittel		?	Ja	Ja	?	Ja
Oberflächen-aktives Agens ("Surfactant")	Ja	Ja		Ja	Ja	Nein

Die Größe der Reinigungspartikel oder Tropfen ist von großer Bedeutung für die Effektivität des Waschvorgangs.

Zu große Partikel werden zu schnell auszentrifugiert
- zu reinigende Flächen werden nicht erfasst.
- Erosionsgefahr an Belägen und Lackierungen im Blattspitzenbereich.

Zu kleine Tropfen verdampfen zu schnell und sind im hinteren Verdichterbereich unwirksam.

Zu kleine Partikel oder Tropfen können die Grenzschicht nicht durchdringen oder werden von der Luftströmung so mitgeführt, dass kein ausreichender Kontakt mit der zu reinigenden Oberfläche erfolgt und sind deshalb ineffektiv.

Zu kleine Partikel und Tropfen im hinteren Verdichterbereich können durch Zerkleinern beim Auftreffen entstehen

Optimale Partikelgröße ist verfahrens- und triebwerksabhängig

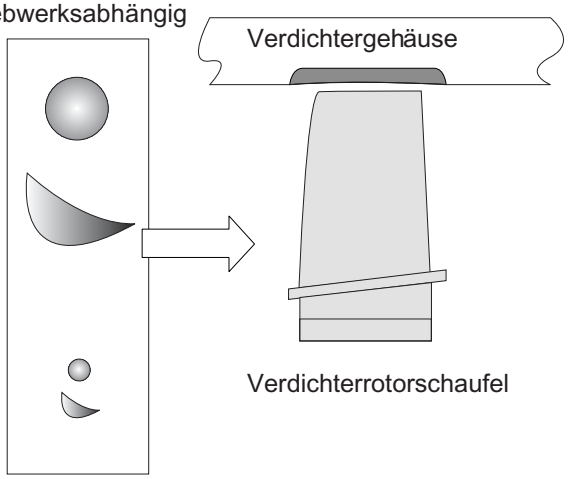


Bild 9.3-1

© Axel Rossmann Fachschulungsunterlage nur für den Unterricht

Bild 9.3-1 *(Lit. 9.3-1, Lit. 9.3-3 bis Lit. 9.3-5): Das Schaubild oben links gibt eine beeindruckende Vorstellung von der im Zusammenhang mit dem* ***Waschen der Verdichter eines Triebwerks einzusparenden Kraftstoffmenge****.*
Um die spezifischen Vorteile der Reinigungs-/Waschverfahren optimal zu nutzen, bedarf es einer gezielten, auf den jeweiligen ***Anwendungsfall angepassten Auswahl*** *der Reinigungsmedien. Die Tabelle oben rechts kann Hilfestellung geben.*
Die ***Auswahl des Reinigungsverfahrens*** *ist nur ein erster, wenn auch wichtiger Schritt. Auch die* ***Verfahrensparameter*** *sind zu optimieren und in verbindlichen* ***Vorschriften*** *festzuschreiben. Die* ***Partikelgröße*** *(Rahmen unten) ist für die Wirksamkeit des Reinigungsvorgangs von besonderer Bedeutung. Das gilt sowohl für* ***Tropfen*** *einer Waschflüssigkeit als auch für abrasiv wirkende* ***feste Partikel*** *beim Trockenreinigen. Die optimale Partikelgröße wird ein Kompromiss sein. Die* ***Reinigungswirkung*** *wird von Effekten wie Ablenkung/Auftreffwinkel, Aufprallenergie, abrasive Wirkung und Transport der Verunreinigung bestimmt. Dabei spielen Partikeleigenschaften wie Größe, Dichte und Geschwindigkeit eine Rolle. Eine besondere Herausforderung ist die Entwicklung optimaler Düsen für die* ***Waschmitteleinbringung****. Die Tröpfchen müssen ausreichend klein sein, um Erosiongefahr auszuschließen. Trotzdem muss für die Strömungsbedingungen moderner Verdichter eine befriedigende* ***Benetzung der gesamten zu reinigenden Beschaufelung*** *gewährleistet sein. Dies gilt gerade auch für große Fantriebwerke, bei denen der Sprühkegel durch den Fan in den Verdichter gelangen muss. Unerwünscht ist ein* ***Erosionsabtrag*** *(Beschichtung, Grundmaterial) und die* ***Aufrauung*** *der Bauteiloberfläche. Es muss also ein akzeptabler Kompromiss gefunden werden. Dieser ist mit* ***praxisnahen Versuchen am Triebwerk*** *zu ermitteln bzw. nachzuweisen. Für den jeweiligen Triebwerkstyp bzw. dem Betriebseinsatz ist die Unbedenklichkeit des Reinigungsverfahrens zu demonstrieren.* ***Triebwerksspezifische Besonderheiten*** *können Werkstoffe im Gasstrom sein. Typische Beispiele sind* ***Einlaufschichten*** *im Gehäuse oder eine* ***Beschichtung*** *(z.B. Lackierung bei älteren Typen) der Beschaufelung. Auch Konstruktionsmerkmale wie eine für das Betriebsverhalten des Verdichters notwendige besonders hohe Glätte der Schaufeloberflächen oder dünne Kantenradien bestimmen die Parameterwahl. Der* ***Eignungsnachweis*** *des Verfahrens wird wohl gewöhnlich gemeinsam mit dem OEM erfolgen. Letztendlich bedarf der Reinigungsvorgang der Zulassung durch den OEM und/oder der zuständigen Behörden.*

© Vorlesungen - Turbomaschinen
Lehrunterlage nur für Lehrzwecke

Gefahr der Ölverunreinigung und Ölfilterverstopfung beim Kaltwaschen eines Verdichters.

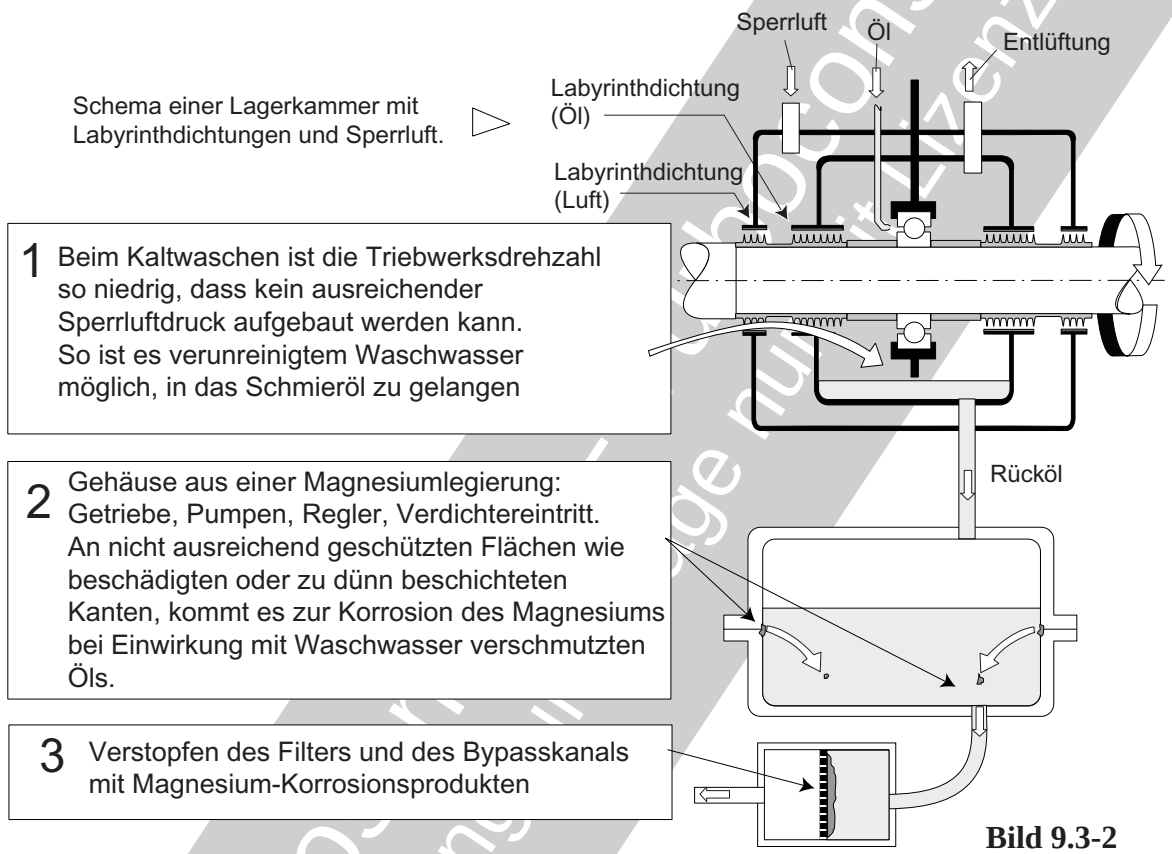


Bild 9.3-2

Bild 9.3-2 *(Lit 9.3-27): In den letzten Jahren wurden etliche Fälle bekannt, bei denen es an einem einstrahligen Kampfflugzeugtyp zur* ***plötzlichen Behinderung des Ölflusses*** *im Triebwerk kam. Diese Situation wurde häufig unter 100 Betriebsstunden nach der Wartung bei der Filterreinigung entdeckt. Es handelte sich um eine* ***dunkelrote klebrige Ablagerung,*** *die ca. 80% des* ***Filterquerschnitts*** *verlegte. Die Ablagerungen enthielten* ***Magnesium und Phosphor****. Das verwendete Öl entsprach der Vorschrift (Def.Stan 91-100, siehe Lit. 9.3-29). Eine Untersuchung zur Ursache ergab:*
Magnesiumgehäuse im Ölkreislauf *waren mit folgendem typischen Korrosionsschutz ausgerüstet:*
- Chromatschicht auf dem Grundwerkstoff,
- Epoxidbeschichtung,
- (Deck-) Lack.

Trotzdem wiesen die ölbenetzten Oberflächen ***ohne Decklack*** *Korrosionsanfressungen an Ecken und Kanten der Flansche auf (Lit. 9.3-31). Die phosphorhaltigen Additive im Öl konnten so, unter besonderen Bedingungen, diese ungenügend geschützten Stellen angreifen. Korrosionstests an lediglich chromatgeschützten oder gänzlich ungeschützten Magnesiumflächen zeigten keinen Korrosionsangriff in reiner Waschflüssigkeit oder reinem Öl. In* ***mit Waschflüssigkeit verunreinigtem Öl*** *kam es dagegen zu starker* ***Korrosion****. Die Reaktionsprodukte entsprachen den Ablagerungen in den Filtern.*
Offenbar führte der verstärkte Ölfluss bei hoher Triebwerksleistung (z.B. Start) zur Ablösung der Korrosionsprodukte und beschleunigter Ablagerung in den Filtern.

© Axel Poss Publications
Abbildungen nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Hilfsstoffe: Reinigungsmittel

Nur zugelassene Wasch- und Reinigungsmittel verwenden, sie müssen viele Forderungen erfüllen!

A Keine unzulässige Auswirkung auf die Kabinenluft
B Nicht korrosiv für Triebwerksbauteile
C Nicht schädigend für Kunststoffe und Elastomere
D Nicht schädigend für Anstreifschichten
E Keine Funktionsbeeinträchtigung von Triebwerksbauteilen
F Nicht unzulässig abrasiv
G Verträglich mit anderen Hilfsstoffen
H Verträglich mit Tribosystemen

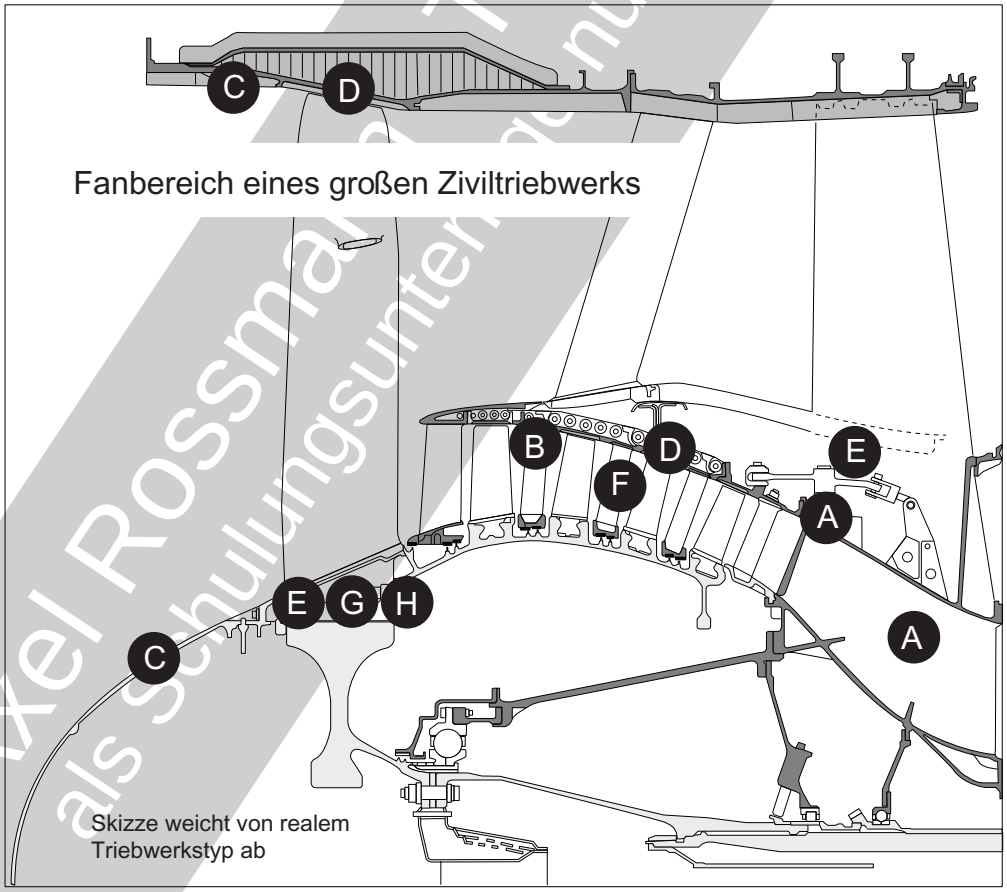


Bild 9.3-3

***Bild 9.3-3**: Diese Zusammenstellung soll den Praktiker sensibilisieren. Sie zeigt mögliche Probleme der Anwendung von Reinigungsmitteln.*

***„A“ Kabinenluftverunreinigung** (Lit. 9.3-29): Es sind Medien die über Zapfluft transportiert werden. Geruchsbelästigung und natürlich Beeinträchtigungen des Befindens der Besatzung und der Passagiere müssen vermieden werden.*

***„B“ Korrosion** an Triebwerksteilen kann **direkt** von einem ungeeigneten Medium ausgelöst werden. Das Medium kann aber auch über die Schädigung von Schutzbeschichtungen (z.B. Lacke) oder Entfernung eines schützenden Ölfilms indirekt korrosionsbegünstigend wirken.*

© Axel Rossmann Turbocom
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

„C, D“ Schädigung oder vorübergehende Veränderung der Eigenschaften von Kunststoffen*. Besonders im Fanbereich kommen bei modernen Triebwerken unterschiedlichste Kunststoffe wie Harze und Elastomere zum Einsatz. Hier sind besonders* **Anstreifschichten** *und* **Schalldämpfung** *zu nennen. Zu den bleibenden Schädigungen zählen* **Festigkeitsabfall, Versprödung, Rissbildung und Ablösung***. Eine vorübergehende Veränderung ist Quellen. Es hat Maßveränderungen, Festigkeitsverlust und Ablösung zur Folge. Dies gilt besonders für Elastomere als Anstreifschichten für Schaufelspitzen und Labyrinthe (Bild 6.10.3.1.1-9).*

„E“ Funktionsbeeinträchtigung von Triebwerksbauteilen*: Sicherheitsrelevante Funktionen beruhen z.B. auf Gleitschichten. Werden deren Eigenschaften beeinträchtigt oder die Schichten angelöst und ausgewaschen, kann das bis zum Triebwerksausfall führen. Hierzu zwei Beispiele:*
Die **Gleitbeschichtung auf Schaufelfüßen** *im Fan- und Verdichterbereich soll nicht nur Verschleiß verhindern. Die Beanspruchung der Schaufelfußauflage wird besonders bei Titanlegierungen der Fanschaufeln mit einem Anstieg der Reibung vergrößert. Gleichzeitig senkt Fretting die Ermüdungsfestigkeit gefährlich ab (Lit. 9.3-32).*
Potenziell gefährlich ist es, wenn Schmiermittel an Gelenken mit sphärischen Lagern (gehärtete Stähle) von Verstellsystemen, wie sie an **Verstellleitschaufeln** *(Bild 9.1.2-3 und Bild 9.3-5) und* **Schubumkehrerbetätigungen** *(Bild 9.1.2-4) zum Einsatz kommen,* **ausgewaschen oder verändert** *werden. Die Folge kann* **Korrosion mit Schwergängigkeit** *bis zum Blockieren sein (Bild 9.1.2-1). Tritt Verschleiß mit merklicher Spielvergrößerung auf, kann dies zu Fehlfunktionen (z.B. Verdichterpumpen bei Verstellleitschaufeln) und/oder Überlastung geschwächter tragender Querschnitte führen (Lit. 9.1.2-16).*

„F“ Abrasive Schädigung *ist eher von* **trockenen Reinigungsmitteln** *(Lit. 9.3-29) wie Reisschalen oder Fruchtkerne zu erwarten. Diese werden für die Reinigung der Verdichterschaufeln von hartnäckigen Belägen verwendet. Gefährdet sind Kunststoffoberflächen, Lacke und Leichtmetalllegierungen. Dazu gehören Leitschaufeln im Boosterbereich hinter dem Fan.*

„G, H“ Reaktionen mit anderen Hilfsstoffen *können die Funktionalität der Bauteile verändern. So können* **MoS_2 -haltige Schmiermittel** *bei Einwirkung* **wasserbasierter Waschmittel** *(Bild 9.1.2-1) zu* **Korrosion und zum Klemmen** *von Gleitlagern aus Vergütungsstählen führen.*
Bild 9.3-4 *(Lit. 9.3-23, Lit. 9.3-26 und Lit. 9.3-28): Beim Waschen eines Triebwerks (Verdichter und/oder Turbine) werden nicht nur die Verunreinigungen entfernt. Waschmittel und Spülung lösen auch etwaige* **Korrosionsprodukte** *und bei leicht erosiver Wirkung auch geringe Mengen der Grundwerkstoffe. So kann es zu vielen unterschiedlichen, auch umweltproblematischen Verunreinigungen (***hazardous waste***) in der gebrauchten Waschflüssigkeit kommen. Dabei spielt natürlich der* **Einsatz** *bzw. die* **Mission** *eine wichtige Rolle. Hubschraubertriebwerke dürften sich deshalb deutlich von Verkehrsflugzeugen unterscheiden. Auch Kampfflugzeuge lassen spezifische Verunreinigungen erwarten. Ein Einsatz in* **Meeresatmosphäre** *unterscheidet sich deutlich von Landeinsätzen (z.B. in einer* **Wüste***). Angesaugte Verunreinigungen sind hier als Meersalz (NaCl) und Staub (z.B. Schwefel in Gipsstaub) erwarten. Bei Kampfflugzeugen ist an angesaugte* **Schießrückstände** *und* **Raketenabgase** *zu denken (Lit. 9.3-30).*
Organische Verbindungen dürften vornehmlich aus dem triebwerkseigenen **Ölkreislauf** *und aus* **Schmierstoffen** *im Verdichterbereich (z.B. Lagerung von Verstellleitschaufeln) stammen. Bei Flugzeugen, die häufig oder über längere Zeit im Abgas anderer Flugzeuge stehen (z.B.*

© Axel Bossmann - Turbocontact
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Systeme und Betriebsstoffe: Hilfsstoffe: Reinigungsmittel

Die Entsorgung des gebrauchten Waschmittels bzw. Wassers ist ein nicht zu unterschätzendes Problem. Besonders bei älteren Triebwerkstypen ist mit giftigen Kadmiumverunreinigungen zu rechnen.

Bild 9.3-4

in einer ***Wartereihe*** *vor dem Start) oder militärischen Triebwerken bei* ***Prüfläufen*** *sind ebenfalls organische Ablagerungen wie Ruß oder Kraftstoffrückstände keine Seltenheit.*

Rückstände der im Gaskanal verwendeten ***triebwerksspezifischen Werkstoffe*** *können in der Waschflüssigkeit gefunden werden. Gewöhnlich dürfte es sich um* ***Korrosionsprodukte*** *aus dem Betrieb handeln. Die Waschflüssigkeit ist in der Lage, diese in Form leicht wasserlöslicher Salze oder feinverteilter Oxide aufzunehmen. Dazu zählt das* ***Umweltgift Kadmium*** *bzw. seine Verbindungen. Es stammt bei* ***älteren Triebwerkstypen*** *aus einer Korrosionsschutzbeschichtung (Nickel/Kadmium). Sie wird für Gehäuse, Rotorteile und Beschaufelungen aus nicht ausreichend korrosionsfesten Stählen (z.B. vom Typ 13% Cr-Stahl und niedrig legierte Stähle/"Kesselstähle", Bild 9.3-3) verwendet. Diese Schicht bietet einen kathodischen Schutz der funktionsbedingt auf einer schnelleren Auflösung als das Grundmaterial beruht. Diese toxischen Reaktionsprodukte werden vom Waschwasser mitgenommen. Deshalb wird nach einem alternativen Korrosionsschutz gesucht.*

Weitere triebwerkseigene Verunreinigungen sind ***Farbpartikel***, ***Cr-Rückstände***, ***Ni-Rückstände***, *Blei, Barium und Kupfer. Ni-Rückstände sind in Triebwerken mit dem erwähnten Nickel-Kadmium-Korrosionsschutz zu erwarten. Nickel wie Chrom kann als* ***Oxid der Heißteile*** *auftreten oder als* ***Abrieb von Nickel-Graphit-Einlaufschichten*** *stammen. Chromverunreinigungen lassen sich auch auf Korrosion von Cr-Stählen zurückführen (Lit. 9.3-29).*

© Aero Turboconsult Nur zur Nutzung

Diese Schaufelwerkstoffe sind für ältere Verdichterkonstruktionen typisch. ***Blei*** *kann durchaus seinen Ursprung in der Waschwasserversorgung selbst haben. Bei Kupfer und Zink steht beispielsweise* ***Hartlot*** *(Kupfer, Messing) in Verdacht. Es kommt in gebauten Verdichterleitschaufeln älterer Triebwerkstypen zum Einsatz. Wird Kadmium als Korrosionsschutz durch* ***Zink*** *ersetzt, ist wegen dessen ebenfalls kathodischer Schutzwirkung mit Zinkverunreinigungen zu rechnen.*
Eine eigene Problematik haben erfahrungsgemäß Silberrückstände. ***Silber*** *findet man besonders an* ***Schrauben und Muttern****. Wasserlösliche* ***Silbersalze*** *können sich erfahrungsgemäß beim Angriff aggressiver Feuchtigkeit (z.B. mit Schwefeloxiden aus Industrieatmosphäre) bilden. Diese dürften zwar kaum umweltbedenklich sein. Werden sie jedoch* ***auf Heißteile verschleppt,*** *können sie im späteren Betrieb* ***Lochfraß (Sulfidation****) auslösen (Lit. 9.3-30). An zyklisch belasteten Bauteilen wie Turbinenscheiben kann so die Lebensdauer gefährlich abgesenkt werden (Lit. 9.3-30). Um zu verhindern, dass diese bedenklichen Stoffe im Triebwerk verschleppt und/oder in die Umwelt gelangen, kommen sowohl im militärischen als auch im zivilen Bereich* ***Einrichtungen zum Sammeln*** *(siehe Bild) und Nachbehandeln des Waschwassers zum Einsatz. Sie unterliegen amtlichen* ***Vorschriften*** *und sind nicht dem Belieben der Betreiber überlassen.*

Bild 9.3-5 *(Lit. 9.3-1 und Lit. 9.3-8): Es ist voranzustellen, dass für den Anwendungsfall* ***nur ausreichend erprobte, festgeschriebene, zugelassene und befolgte Verfahren*** *die Gewähr bilden, Probleme und Schäden zu vermeiden. Dass dies offenbar nicht immer der Fall ist, zeigen Bilder dieses Kapitels. Im Folgenden werden solche potenziellen Probleme und Risiken in einer Übersicht ohne Anspruch auf Vollständigkeit, dargestellt:*

Verdichterbeschaufelung: *Der Spitzenspaltminimierung kommt in modernen Verdichtern große Bedeutung zu. Um dies zu gewährleisten, befinden sich weiche, oft* ***poröse Einlaufschichten im Gehäuse****. Diese können auch bei scheinbar kaum erosiv wirkenden Partikeln und Tröpfchen des Reinigungsmittels unzulässig abgetragen werden. Auch die Spitzen der Rotorschaufeln moderner Verdichter, mit typisch dünnen Profilen und extrem dünnen Kanten können abrasiv verändert werden und so das Betriebsverhalten des Verdichters leiden. An korrosionsempfindlichen Einlaufbelägen wie* ***Al-Pulver gefüllten Kunstharzen kann Schichtkorrosion zu Aufwerfungen und Ablösungen*** *führen (Lit. 9.3-31). Einlaufschichten wie gefüllte Elastomere (Silikongummi) können durch Quellen oder Verspröden funktionsunfähig werden.*
Korrosionsempfindliche Gehäuse, Schaufel- und Scheibenwerkstoffe wie martensitische Stähle, Aluminiumlegierungen und Mg-Legierungen in älteren Triebwerkstypen können beim Verbleib von Feuchtigkeit in einer anschließenden Stillstandszeit (z.B. bei militärischen Triebwerken) korrodieren.

Werden an ***verstellbaren Verdichterleitschaufeln*** *Gleitmittel (Öle, Fette, infiltrierte Gleitmittel) ausgewaschen, beeinträchtigt* ***Schwergängigkeit*** *oder* ***verschleißbedingt*** *vergrößertes Spiel die Funktion. Auf solche Veränderungen reagiert das Betriebsverhalten des Verdichters sensibel.*

Die Lebensdauer ***gekühlter Heißteile,*** *besonders* ***Turbinenschaufeln*** *reagiert auf scheinbar kleine Temperaturerhöhungen des Werkstoffs äußerst empfindlich.* ***Querschnittsverengungen der Kühlluftführungen*** *sind deshalb sehr ernst zu nehmen. Eine Verschleppung der Verunreinigungen des Verdichters kann die Bohrungen von außen und im Inneren zusetzen. Werden Verunreinigungen wie* ***Staub*** *und/oder* ***niedrig schmelzende Metalle*** *in* ***die Auflagen des Schaufelfußes gewaschen****, können*

© Axel Rossmann - Turbocoach
als Schulungsunterlage verwendbar

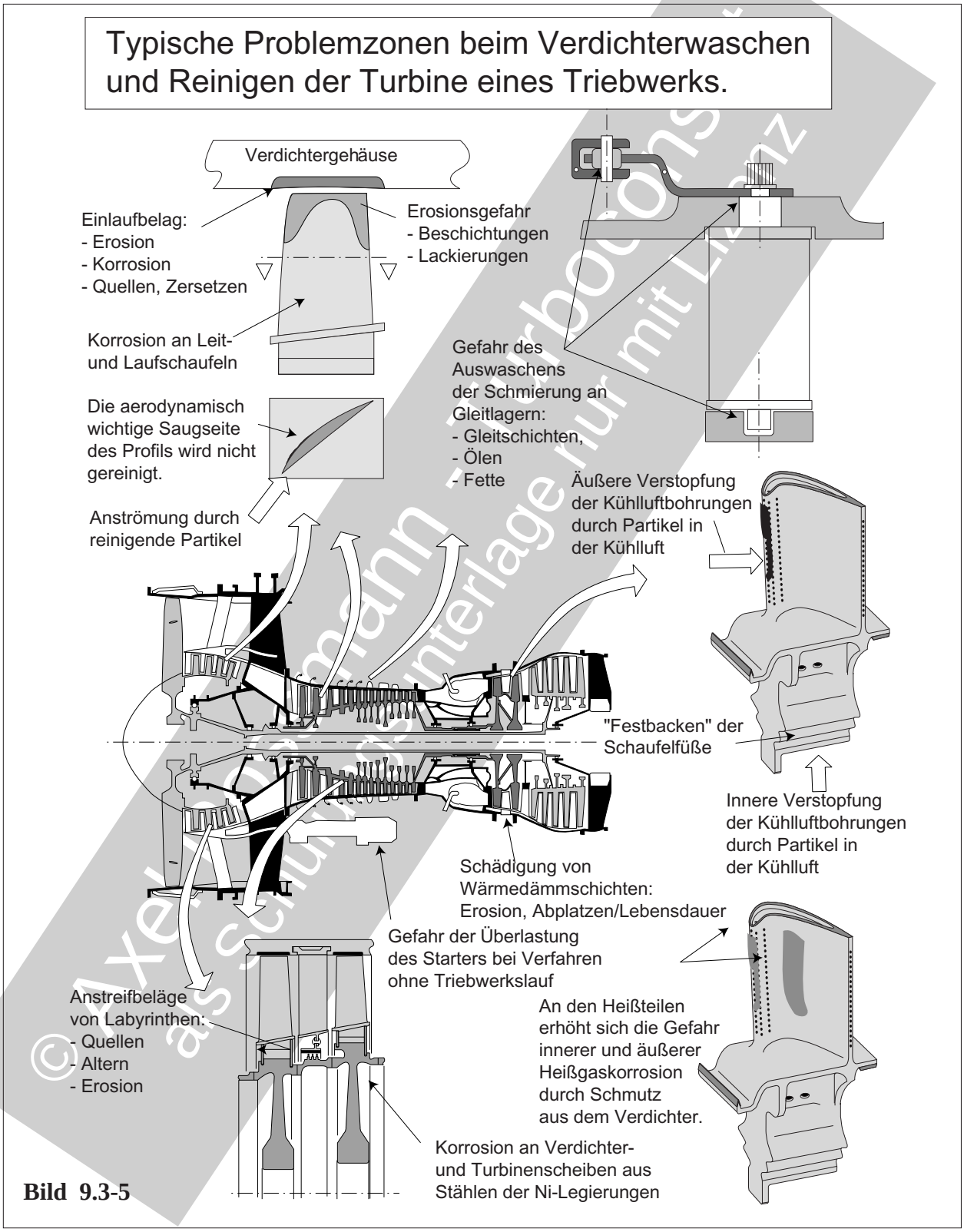


Bild 9.3-5

© Axel Bergmann - Turbotechnik
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

die hohen Betriebstemperaturen die Schaufeln ***lotähnlich fixieren****. Wird damit beispielsweise die* ***Schwingungsdämpfung gemindert,*** *begünstigt das Schwingbrüche. Auch ein Abfall der Festigkeit infolge Diffusion oder Heißgaskorrosion ist in der hochbelasteten Fußzone gefährlich. Werden aus verunreinigtem Waschmittel Metalle, Metallverbindungen, Schwefel- (z.B. Stäube) und Chlorverbindungen (Meersalze) auf Heißteiloberflächen abgelagert, ist*

mit einer beschleunigten Heißgaskorrosion/ Sulfidation zu rechnen. Diese kann in den Kühlluftbohrungen innen und an der Außenfläche der Schaufel auftreten.

Auch scheinbar korrosionssichere Bauteile wie ***Turbinen- und Verdichterscheiben*** *aus Ni-Schmiedelegierungen wie Waspalloy sind durch grübchenartigen Korrosionsangriff gefährdet. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn aggressive Verunreinigungen in Waschmittelresten im* ***Stillstand*** *einwirken. Eine solche Situation entsteht, wenn* ***Silber von Schrauben abgelöst und im Betrieb an anderer Stelle abgelagert*** *wird (Lit. 9.3-30). Bei Betriebstemperatur trocknen diese Ablagerungen und lösen Sulfidation aus.*

© Axel Rossmann - Turbocadet
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 9.3

9.3-1 Zeitschrift „Aircraft Technology Engineering Maintenance - Engine Yearbook 1999“, „Compressor washing for results“, Seite 44 - 47.

9.3-2 Firma Hydraulic Technology Inc. „Universal Wash Unit, Turbine Engine“, 1.11.2005.

9.3-3 Firma Turbotect Ltd.. „Gas Turbine Compressor Washing System“, 2006, Seite 1 und 2.

9.3-4 Fyrewash Gas Turbine Compressor Cleaner. „The Case for On-line Cleaning“, 3.09.2006,

9.3-5 Firma Henkel Surface Technologies. „Technical process Bulletin No. 238805, 238822, 238824“, 01.01.2001.

9.3-6 T.Harless, W. Stelk, Naval Safety Center. „Copter Engines and Desert Environments-Who Wins?“, Mech Summer 2005, Seite 1 und 2.

9.3-7 Aviation Maintenance and MiscManuals „Compressor Cleaning to Restore Lost Performance“, TM-55-2840-231-23, 05.01.2007.

9.3-8 Firma ZOK International Group, „Why Wash Compressors?“, 05.01.2007, Seite 1-5.

9.3-9 SAIB ANE-98-31, „Special airworthiness Information Bulletin“, May 15, 1998, Seite 1.

9.3-10 Swedish Accident Investigation Board, Report RL 2006:23e (ISSN 1400-5719, Case L-37/05), „Aircraft accident to helicopter SE-HVY, south-west of Lundsbrunn, O county, on 4 October 2005“, Seite 1-13..

9.3-11 C.Gosenick, „Sulfidation“, Zeitschrift: „Aircraft Maintenance Technology“, May 2006 Seite 1 und 2.

9.3-12 T.J.Grindle, F.W.Burcham Jr., „Engine Damage to NASA DC-8-72 Airplane From a High-Altitude Encounter With a Diffuse Volcanic Ash Cloud“, NASA/TM-2003-212030, August 2003, Seite 1 - 22.

9.3-13 C.Gosenick, „Volcanic Ash: Effects & Mitigation Strategies“, http://volcanoes.usgs.gov/ash/trans/index.html, 8.01.2007. Seite 1 -15.

9.3-14 Australian Civil Aviation Safety Authority, Airworthiness Bulletin AWB 72-002, Issue 1 vom 29. September 2006 „Engines Operating in a Fire Fighting Environment“, Seite 1 -3.

9.3-15 „Compressor Cleaning to Restore Lost Performance“, TM-55-2840-231-23, http://tpub.com/content/aviationmaintandmisc/, 5. 01. 2007.

9.3-16 Australian Transport Safety Bureau , Aviation Safety Investigation Report-Final, „Cessna Aircraft Company 208B, VH-URT“, Occurrence Number 199803389, Release 27. Aug. 1999, Update 1.November 2006, Seite 1 und 2.

9.3-17 B.Torkelson, „Feeding a Harrier“, U.S.Navy Safety Center / Gale Group, 2003.

9.3-18 ANA, Environmental Report, Chapter 2, Global Warming, „Reduction of CO_2 emissions from aviation fuel, Fuel reduction measures“, CSR/Environment, Seite 1-4.

9.3-19 R.Wall, „Woes Encumber Helo Opts, Old engines plus sand equal big maintenance headaches for the marine corps in Iraq with hot weather to add more problems“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, April 14, 2003. Seite 75.

9.3-20 S.Marshall „Pouring Water on Troubled Oils“, Firma Juniper Aircraft Service Equipment, „Juniper News“ Autumn 2004, Seite 1-8.

9.3-21 Aircraft Accident/Incident Summary Report, NTSB/AAR-88/03/SUM, “Travis Air Force Base, California...April 8, 1987“, Seite 1-11.

9.3-22 I.E.Traeger, „Aircraft Gas Turbine Engine Technology“, Second Edition, Glencoe Verlag, ISBN 0-07-065158-2, 1979, Seite 436-461.

9.3-23 U.S.Environmental Protection Agency „Environmental Technology Verification Program For Metal Finishing Pollution Prevention Technologies, Verification Test Plan for the Evaluation of the MART Corporation’s EQ-1™ Wastewater Processing System“, January 2, 2001, Seite 1-33.

9.3-24 L.V. Wake, B.S.Smith, “Investigation of Coating Performance and Corrosion of Compressor Components in the TF30-P-3 Engine of F111C Aircraft“, Defense Technical Information Center (DTIC), Accession Number ADA 168802, Jan. 1986, Seite 1.

9.3-25 Transportation Safety Board of Canada, Aviation Investigation Report A03P0136, “Engine Power Loss - Hard Landing and Rollover“, Accident 06 June 20036, Seite 1-7.

© Axel Rossmann - Turbomaschinen
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

9.3-26 “The Pollution Prevention Equipment Program (PPEP)“, Seite 1und 2.

9.3-27 Fa. Quinetiq, „Case Studies- Aviation“, http://www.quinetiq.com/home/case_studies/aviation/engine_corrosion, 08.Jan.2007, Seite 1und 2.

9.3-28 Department of the Air Force, “Engineering Technical Letter (ETL) 99-1 (Change 1): Treatment and Disposal of Aircraft Washwater Effluent“, 07. January 1999, 26 Seiten.

9.3-29 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 5“, 2008, ISBN 978-3-00-025780-3, Kapitel 19.2, Kapitel 19.2.2, Kapitel 19.2.3, Kapitel 19.2.4, Kapitel 21.2.2 und Kapitel 22.2.

9.3-30 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 3“, 2000, ISBN 3-00-017733-7, Kapitel 11.2.1.1, Kapitel 11.2.1.2 und Kapitel 12.4.

9.3-31 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 1“, 2000, ISBN 3-00-005842-7, Kapitel 5.3.2, Kapitel 5.4.1.2 und Kapitel 5.4.5.

9.3-32 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 2“, 2001, ISBN 3-00-008429-0, Kapitel 6.1.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Sachregister

A

Abblätterungen
Zahnflanken 6.4.1-15
Abbremsen des Rotors bei Wälzlagerschaden 6.3.1.2-3
Abdichtungsprobleme Getriebe 6.4.2-2
Abgewinkelte Wellen 6.4.1-24
Abhilfen bei Schäden
an Radial-Wellendichtringen 6.10.2.1-10
Ablagerung/-en
auf Gleit- und Kontaktflächen 9.1.2-9
im Ölkreislauf
Magnetstopfen 6.3.1.2-10 7.2-18
Mg-Korrosion 9.3-6
aus Elastomeren 8.1--12
braun unmagnetisch im Kraftstoff 8.3-17
dunkle im Kraftstoff 8.3-14
Einfluss auf Keilriemen 6.8.1-8
im Ölsystem, Schichten 6.3.1.2-9
in Heizungsanlagen 6.11.1.4-10
in Öldüsen 6.3.1.2-9
in Ölsieben 6.3.1.2-10
in Rückölleitungen 6.3.1.2-10
klebrige im Kraftstoff 8.2-11
Ruß 8.1-16
schleimige im Kraftstoff 8.2-11
Rückschlüsse Wälzlagerschäden 6.3.1.2-9
Ablege-Drahtbruchzahl Seil 6.9-14
Ablösung geklebter Schichten 6.10.3.1.2-63
Anstreifschicht 6.10.3.1.2-64
Elastomer/Metall 6.6.3-5
Abnahme Getriebe 6.4.2-6
Abplatzer von Labyrinthpanzerung 6.10.3.1.2-10
Abrasionsverschleiß/Abrasiver Verschleiß
Kolbendichtung 6.10.2.4-1, 6.10.2.4-5
Abrieb Labyrinthe 6.10.3.1.1-4
Partikel von Spitzen 6.10.3.1.1-22
Abriebfestigkeit PTFE 6.3.4-9
Abriebverhalten von Bürstenhaaren 6.10.3.2.1-11
Abschaltwarnungen Wälzlager 6.3.1.2-6
Absetzgeschwindigkeit Partikel im Öl 7.1.3.1-2
Abstellen eines Triebwerks 6.5-20
Ölverkokungals Folge 7.1.2-14
Abweichung Schraubensicherung 6.1.1.2-21
Anstreifbelag Labyrinthe 6.10.3.1.1-33
Partikelerosion 6.10.3.1.2-11
Accelerated Gum 8.3-4
Achsen 6.5-1
Belastung 6.5-17
Betriebsbeanspruchungen 6.5-1
Achsschub
Aufnahme durch Luftlager 6.3.3-9
Ausgleich durch Labyrinthdichtungen 6.10.3.1.1-1, 6.10.3.1.1-4
Acid Number *Siehe* Säurezahl
Acidity *Siehe* Säurebildung: Öl
Adapter
Rohrleitung 6.11.1.1-4
Additive
Kraftstoff 8.1--24
Schmierfett 9.1.1-9
Verschleißmindernd 6.4.1-13
im Öl
Wirkung 7.1.3.1-3
Einfluss auf Grübchenbildung 6.4.1-13
Metalle als Warnindikatoren 7.2-10
Adhäsiver Verschleiß Wälzlager 6.3.1.1-10
Aerodynamische Lager 6.3.3-1
Luftlager 6.3.3-4
Aeroelastische Anregung
Labyrinthdichtung 6.10.3.1.3-2
Labyrinth 6.10.3.1.2-34, 6.10.3.1.3-12, 6.10.3.1.3-13
Aeroelastische Instabilität
Labyrinthdichtung 6.10.3.1.3-9
Aerostatische Lager 6.3.3-1
Aerostatische Systeme Luftlager 6.3.3-4
AES (Atom-Emissions-Spektroskopie) 7.2-7
Air-Hammereffekt Luftlager 6.3.3-7
Alkohole als Kraftstoff 8.2-1
Alternativwerkstoffe für Schrauben 6.1.1.1-2
Alterung
Elastomere 6.2.22, 6.2.25
Gummifeder 6.2.26
Keilriemen 6.8.1-6
Kunststoffe in Öl 7.1.1-8
O-Ringe 6.10.1.2-5
Schmieröl 7.1.2-20, 7.1.2-21
Zahnriemen 6.8.2-3
Aluminium/-Legierung
Korrosion
durch Kontakt mit Silber 9.1.2-3
durch Kraftstoff 8.3-2
Flansche 6.10.1-10
Schrauben aus 6.1.1.3-7
Aluminiumoxid
im Öl 7.1.3.1-5
Lagerschäden 6.10.3.1.2-10
Anaerobe Dichtmittel 9.2-2
Anbaugeräte
Dichtigkeitsprobleme 6.11.1.2-19
Probleme beim Tausch 6.6.1-2
Anbaugetriebe,
Betriebsschäden 6.4.2-10
Brand eines Magnesiumgehäuses 6.1.1.2-21
Probleme mit Zugänglichkeit 6.4.1-31
Schäden 6.4.2-8
Anfahren eines Triebwerks 6.5-20
Angle controlled tightening. *Siehe* Drehwinkelgesteuertes Anziehen
Ankerkette 6.7.2-1, 6.7.2-10
Verschmutzungen 6.7.2-4
Anlageflächen
Ablagerungen 9.1.2-9
Anlagenüberwachung, Fachbegriffe 7.2-2
Anlasserleistung, Öleinfluss 7.1.1-2
Anlauffarbe
an Ölrohren 6.3.1.2-10
Hinweis auf Stromdurchgang 6.6.1-8
Lager 9.1.2-9

© Axel Rossmann - Tulbocomsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Anlauffläche 6.10.3.2.2-1
Bürstendichtung 6.10.3.2.1-2, 6.10.3.2.2-1
Schäden durch Fertigung 6.10.3.2.2-3
Anregung einer Schwingung
Mechanismen bei Labyrinthen 6.10.3.1.2-59
von Rohrleitungen 6.11.1.2-11
Anrissbereich Elastomer-Metall-Verbindung 6.2.210
Anrisse unter der Oberfläche. Welle 6.5-4
Anrissursache
Schluss aus Bruchbild 6.1.1.2-6
Schrauben 6.1.1.2-6
Ansaugschnorchel, Schädigung durch Öl 7.1.1-9
Anschlagketten 6.7.2-1
Lebensdauer 6.7.2-2
Anschlagmittel 6.9-16
Anschlagseil, 6.9-16, geeigneter Seiltyp 6.9-17
Seilbruchkraft 6.9-16
Sicherheit 6.9-16
Beilagen 6.9-17
Beschädigungsgefahren 6.9-17
Schlaufen 6.9-17
Spleißungen 6.9-17
Anschmelzungen
Rohrleitungen 6.11.1.2-2
Rundstahlkette 6.7.2-5
Schrauben 6.1.1.3-2
Seile 6.9-5
Anstreifbelag
Labyrinthdichtung 6.10.3.1.1-33
Kraftstoffeinfluss 8.1-12,
aus gefüllten Elastomeren Veränderung in Triebwerksöl 7.1.1-7
Anstreifen durch Koksbildung 7.1.2-1
Anstreiffläche, Bürstendichtung 6.10.3.2.1-3
Anstreifkräfte, Labyrinthspitzen 6.10.3.1.1-22
Anstreifschicht, geklebt 6.10.3.1.2-64
Anstreifsystem 6.10.3.1.1-2, 6.10.3.1.1-3
Betriebstauglichkeitsnachweis 6.10.3.1.1-3
Dichtwirkung 6.10.3.1.1-3
Entwicklung 6.10.3.1.1-3
Anstreifverhalten
von Labyrinthen 6.10.3.1.1-3
Anstreifvorgang
Auslösung von Ölfeuer 7.1.4-5
selbstverstärkend 6.10.3.1.2-2
Zündung von Metallen 6.12.1.2-4
unbeherrschbar 6.10.3.1.1-24
Anstrengung, *Belastungsform 6.6.2.1-16*
Feder 6.2.16
Anströmung, Bürstendichtung 6.10.3.2.3-10
Anti-Wear-Additive 6.4.1-13
Antioxidantien
im Kraftstoff 8.1--24
Schädigung von Elastomeren 8.1--12
Antriebsstrang Kfz, Schwingungen 6.6.2.2-5
Anwendungsfaktor, Getriebe 6.4.2-12
Anziehen von Schrauben 6.1.1.1-14, 6.1.1.3-5
Drehmomentgesteuert 6.1.1.1-14
Drehwinkelgesteuert 6.1.1.1-16
Fließgrenzengesteuertes 6.1.1.1-16
Impulsgesteuertes von Schrauben 6.1.1.1-16
nach Längenänderung 6.1.1.1-16
Werkzeug 6.1.1.2-18
Anziehfaktor 6.1.1.1-15
APU (Auxilary Power Unit)
Brand durch verstopfte Drainage 9.2-3
Armaturen, Wassersysteme 6.11.1.4-.6
Asbesthaltige Beilagen, Probleme bei Ersatz 6.11.1.2-24
Atom-Emissions-Spektroskopie (AES) 7.2-7
Aufbewahrung,
Wälzlager 6.3.1.2-25, 6.3.1.2-26
Aufgeschmiertes Silber, Schraubenbruch 6.1.1.2-11
aufgeschmolzene Schicht, Bremsscheibe 6.6.2.1-6
Aufheizung
Bürstendichtung 6.10.3.2.3-5
dämpfender Ölfilm 6.3.1.1-6
Aufladung
elektrische von Kunststoffbauteilen 6.3.1.1-40
Triboelektrische 7.1.2-20
Aufquellen, Flachdichtung 6.10.1-14
Aufreißungen, Federdraht 6.2.18
Aufschmierungen, auf der Anstreiffläche einer Bürstendichtung 6.10.3.2.2-14
Aufschrumpfen 6.6.4-19
Flansch 6.6.4-4
Probleme 6.6.4-19
Vorgang, Folgen eines fehlerhaften 6.6.4-19
Aufsprengen, Kolbendichtung 6.10.2.4-1
Aufstülpeffekt, Bremsscheibe 6.6.2.1-6
Aufweitung, Hydraulikzylinder 6.10.2.4-10
Ausbau, O-Ringe 6.10.1.2-2
Ausblenden, geschädigter Labyrinth-Anstreifzonen 6.10.3.1.3-4
Ausbluten des Schmierspalts 9.1.2-9
Ausbrechen, Schichten in Gleitringdichtungen 6.10.2.2-4
Ausbrüche durch Schalenschwingung 6.10.3.1.2-53
Ausfallmechanismen
Zahnriemen 6.8.2-5
Ausfallsymptome
Wälzlager 6.3.1.2-27
Ausfallwahrscheinlichkeit
Windenergieanlage 6.4.2-12
Ausgleich
Wellenversatz 6.6.1-6
Ausglühen von Zahnflanken 6.4.1-17
Auslegung
Druckrohrleitungen 6.11.1.1-2
einer Bürstendichtung 6.10.3.2.3-3
Elastomere für Federn 6.2.22
Flanschdichtung 6.10.1-12
Nabenverbindung 6.6.4-3
Auslegungshilfen
Zahnriemen 6.8.2-2
Auslegungsparameter
Keilriemen 6.8.1-2
Ausreißen, Schraubengewinde 6.11.1.2-20, 6.1.1.2-21, 6.1.1.2-23
Ausrichten
Fehler, Kupplungslebensdauer 6.6.3-5
Getriebe 6.4.2-6
Methode bei Kupplungen 6.6.3-7
Wellen 6.5-4, 6.5-14

©Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Außenbordführung
Wälzlagerkäfig 6.3.1.1-28
Reibung 6.3.1.1-33
Austauschintervall, Keilriemen 6.8.1-1
Austenitische Stähle für Rundstahlketten 6.7.2-7
Auswahl
Elastomere für Federn 6.2.22
O-Ring 6.10.1.2-14
Autooxidation, Kraftstofftröpfchen 8.1-18
AW-Additive, *siehe* Anti-Wear-Additive
Axial-Gleitringdichtung 6.10.2.2-4
Axiale Lagerkraft 6.10.3.1.1-7
Axiallager, Gleitlager 6.3.2-6
Axialschiebegleitlager 6.10.2.4-3

B

Babbitt. *Siehe* Weißmetall
Backing plate 6.10.3.2.1-14
Kontakt mit Rotor 6.10.3.2.2-15
Bandage
An Rohrleitungen 6.11.1.2-21
Labyrinthdämpfung 6.10.3.1.3-19, 6.10.3.1.3-24
Bauformen von Luftlagern 6.3.3-4
Baustellenfahrzeuge 6.2.29
Bauteilversuche, Bürstendichtung 6.10.3.2.3-13
BEA. *Siehe* Blue Etch Anodizing
Beanspruchung, Rohrleitung, dynamische 6.11.1.1-7
Rundstahlkette 6.7.2-9
Bearbeitungsriefen, Feder 6.2.12
Befestigung von Lasten 6.9-16
mit Ketten 6.7.2-2
Beilagen, für Schrauben 6.1.1.3-2, 6.1.1.3-5
Belag
Alterung, Labyrinthdichtung 6.10.3.1.2-13
Ausbrüche, Labyrinthe 6.10.3.1.2-8
Steifigkeit
Bremse 6.6.2.1-16
Verschleiß, 6.6.2.1-1
Belastete Gewindegänge 6.1.1.2-8
Belastung, Achsen 6.5-17
Bürstendichtung 6.10.3.2.3-13
Rückschlüsse auf 6.5-5
Belüftung
Turbine 6.10.3.1.1-4
von Rotorscheiben, Labyrintheinfluss 6.10.3.1.1-5
Belüftungselement 6.11.1.4-.8
Berührungsdichtung, 6.10.1-3, 6.10.2.1-1
Definitionen 6.10.1-3
Beschädigung
an Rohrleitungen 6.11.1.2-4
Flanschauflagen 6.6.4-12
Gleitringdichtungen 6.10.2.2-6
O-Ring 6.10.1.2-1
durch Nut 6.10.1.2-3
Schrauben 6.1.1.2-26Flanschauflagen 6.6.4-12
Beschichtung
Federn 6.2.14
Schrauben 6.1.1.3-1, 6.1.1.3-6
Seil 6.9-2, 6.9-8
Welle 6.5-4, 6.5-13
Beschleunigungsaufnehmer
an Getrieben 6.4.2-2
Positionierung 6.3.1.1-6
Besorgniswerte 7.2-2
Beta x -Wert (Filter) 7.1.3.1-4
Betätigungskabel 6.11.1.2-7
Betriebsbeanspruchung
Achsen 6.5-1
Rohrleitung 6.11.1.1-2
Schrauben 6.1.1.2-2
Wellen 6.5-1
Windenergieanlage 6.4.2-12
Betriebsbedingungen wasserführende Rohre 6.11.1.4-.1
Betriebseigenschaften, Labyrinthdichtung 6.10.3.1.1-33
Betriebseinflüsse
auf Schrauben 6.1.1.1-3, 6.1.1.1-4
schadensrelevante für Getriebe 6.4.3-8
Wassersystem 6.11.1.4-.4
Betriebsfehler an Getrieben 6.4.1-18, 6.4.2-4
Betriebslebensdauer, Elastomerfedern 6.2.22
Betriebstauglichkeitsnachweis
Anstreifsystem 6.10.3.1.1-3
Betriebstemperatur
Flachdichtung 6.10.1-14
Hydraulikanlagen 6.12-11
Rundstahlkette 6.7.2-4
Schrauben 6.1.1.3-2, 6.1.1.3-3
Wälzlager 6.3.1.1-2
Zahnriemen 6.8.2-3
Betriebsverhalten
Bürstendichtung 6.10.3.2.1-1
von Labyrinthen 6.10.3.1.1-18
Beulgefahr, Labyrinthring 6.10.3.1.1-22
Bewegungsseile 6.9-7
Biegebeanspruchung, Gummifedern 6.2.24
Biegeradien, Schlauchleitung 6.12-14
Bimetallkorrosion 6.11.1.1-4
Bindefehler, Schweißung eines Kettenglieds 6.7.2-10
Bindung Elaystomer/Metall 6.2.210
Biodiesel 8.2-1, 8.2-5
Biofilm 6.11.1.4-.4
an Rundstahlketten in Wasser 6.7.2-5
Bildung durch Weichmacher 6.12-2
Schlauchleitung 6.12-2
Biofouling 6.11.1.4-4
Biogasanlage
Korrosion 6.12.1.2-7
Erosionskorrosion 6.12.1.2-7
Probleme 6.12.1.2-7
Wasserstoffversprödung 6.12.1.2-7
Biokorrosion6.11.1.4-4, 6.4.1.4-5
an Kunststoffen 6.11.1.4-.5
Black oil 7.1.1-10
Bladewalking, Nietbelastung 6.1.23
Blasen
im O-Ring 6.10.1.2-5, 6.10.1.2-7
Bildung durch Wirbel 6.11.1.2-14
Elastomer, Kolbendichtung 6.10.2.4-1
Gleitringdichtung 6.10.2.2-9
Entstehungsmechanismus 6.10.2.2-9
im Fluid 6.11.1.2-9, 6.11.1.2-14
in Strömung 6.11.1.2-13
Blattfeder für Fahrzeug 6.2.16
Blechmantelbildung bei Grauguss 6.10.2.5-4
Blisk, Schwingungsempfindlichkeit 6.10.3.1.2-55, 6.10.3.1.2-57
Blitz, Blitzschlag
Einfluss auf
Gleitlager 6.3.1.1-35
Seile 6.9-5
Zahnrad 6.3.1.1-35
Wälzlager 6.3.1.1-11
Magnetisierung 6.3.1.1-38
Schädigung 6.3.1.1-1,

© Prof. Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

6.3.1.1-33, 6.3.1.1-35
Zahnradbeschädigung 6.4.1-27, 6.4.2-4
Blockieren
Gelenklager 6.3.4-5
Wälzlager bei Stoßbelastung 6.3.1.1-27
Blow down-Effekt bei Bürstendichtungen 6.10.3.2.1-7, 6.10.3.2.1-9, 6.10.3.2.1-14, 6.10.3.2.3-8
Blow out-Effekt bei Bürstendichtungen 6.10.3.2.1-14, 6.10.3.2.2-15
Bohrungskanten, scharfkantige 6.1.1.3-1
Bolzen-/Elastomerkupplung 6.6.3-5
Bolzenbohrungen, Rissbildung 6.6.4-10
Bornitrid, Hexagonales 9.1.2-3
Boroskop 6.3.1.2-27
Bowdenzüge 6.9-18, 6.9-19
anwendungsspezifische Einflüsse 6.9-18, 6.9-19
Endanschlüsse 6.9-19
Schwachstelle 6.9-19
Boys-Resonator 6.10.3.1.2-41
Brand
durch heiße Leckluft 6.12.1.2-3
Spuren durch elektrische Entladungen 7.1.2-21
Breather. *Siehe* Luftabscheider
Bremsbelag 6.6.2.1-14
dynamischer Reibwert 6.6.2.1-16
Bremse 6.6.2.1-2
Belag
Steifigkeit 6.6.2.1-16
Verschleiß 6.6.2.1-1
Feinstaub 6.6.2.1-4
Konstruktion 6.6.2.1-17
Korrosion 6.6.2.1-2, 6.6.2.1-6
Lebensdauer 6.6.2.1-2
Materialübertrag 6.6.2.1-6
Quietschen 6.6.2.1-1
Reibtemperaturen 6.6.2.1-8
Reibwert 6.6.2.1-16
Rubbeln 6.6.2.1-6
6.6.2.1-1, 6.6.2.1-2, 6.6.2.1-8
Entstehungsmechanismus 6.6.2.1-10
Heißrubbeln 6.6.2.1-12
Kaltrubbeln 6.6.2.1-10
Thermisches 6.6.2.1-8
Schadensmechanismen6.6.2.1-1
Scheibenschirmung 6.6.2.1-6
Schwingungen 6.6.2.1-10
Temperatur 6.6.2.1-2
Tribosystem 6.6.2.1-1, 6.6.2.1-4
Verschleiß 6.6.2.1-4
Wartung 6.6.2.1-4
Wirkung von Enteisungsmittel 6.6.2.1-2Verschleiß 6.6.2.1-2
Bremsdruck
Fluktuation 6.6.2.1-12
Bremsenquietschen 6.6.2.1-2, 6.6.2.1-6, 6.6.2.1-8, 6.6.2.1-16
Bremsflüssigkeit 6.12-11
Siedepunktabsenkung 6.12-10
Bremssattel, Aufweitung 6.6.2.1-16
Bremsscheibe
aufgeschmolzene Schicht 6.6.2.1-6
Aufstülpeffekt 6.6.2.1-6
Faserverstärkte Keramik (CMC) 6.6.2.1-14
Hot-Spots 6.6.2.1-12
innenbelüftete 6.6.2.1-12
Keramik 6.6.2.1-12
Kohlefaserverstärkter Kohlenstoff (C/C) 6.6.2.1-14, 6.6.2.1-18
Laufspur 6.6.2.1-6
Schäden 6.6.2.1-4
Riefen 6.6.2.1-5
Risse 6.6.2.1-6
Schirmung 6.6.2.1-14
Schlag, Taumeln 6.6.2.1-10
Schwingungsform 6.6.2.1-8
Thermoermüdung 6.6.2.1-6
Werkstoffe 6.6.2.1-12, 6.6.2.1-14
Bremsschläuche 6.12-9, 6.12-11
Bremswirkung 6.6.2.1-2
Brennbare Stäube 6.12.1.2-3
Brennends Öl, Gasentwicklung 7.1.1-4
Brenngeschwindigkeit 7.1.4-7
Brennkammer
Anregung von Rohrleitungsschwingungen 6.11.1.2.1-4
Low-NOx 8.1-6
Probleme durch Kraftstoffsystem 8.1-3
Brinelling 6.3.1.1-11, 6.3.1.1-21
an Wälzlagern 6.3.1.1-1
Echtes 6.3.1.1-23
Gelenklager 6.3.4-5
Bristle flutter 6.10.3.2.2-8, 6.10.3.2.3-10
Bristle height. *Siehe* Bürstendichtung: freien Bürstenhöhe
Bruch
im Schraubenkopf 6.1.1.2-8
Bild
Schluss auf Anrissursache von Schrauben 6.1.1.2-6
Welle 6.5-4
Rohrleitungen 6.11.1.2-2
Rollenkette 6.7-9
Schrauben 6.1.1.2-1
Merkmale 0-5, 6.1.1.2-4
Kolbenring 6.10.2.5-7
Brünierrisse
in Keilverzahnung 6.4.1-29
Zahnräder 6.4.1-8, 6.4.1-29, 6.4.2-10
Buffered-face seal 6.10.2.2-1
Bürstendichtung 6.10.1-4, 6.10.3.2.1-1
Abhilfen bei Schäden 6.10.3.2.3-1
Abriebverhalten der Haare 6.10.3.2.1-11
als Labyrinthersatz 6.10.3.2.3-3
als Spitzendichtung 6.10.3.2.1-28
als Tribosystem 6.10.3.2.1-11
als Wirbelbremse 6.10.3.2.1-23
als Zwischenstufendichtung 6.10.3.2.1-31
am Verdichteraustritt 6.10.3.2.1-25
Anlauffläche am Rotor 6.10.3.2.1-2, 6.10.3.2.1-3, 6.10.3.2.2-1
Anströmung 6.10.3.2.2-12, 6.10.3.2.3-10
Anwendungen 6.10.3.2.1-28, 6.10.3.2.1-30, 6.10.3.2.1-31
Aufheizung 6.10.3.2.3-5
Auslegung 6.10.3.2.3-3
Auslenkung der Haare 6.10.3.2.2-9
Bauteilversuche 6.10.3.2.3-13
bei hohen Betriebstemperaturen 6.10.3.2.2-12
Belastung 6.10.3.2.3-13
Betrieb
Tauglichkeitsnachweis 6.10.3.2.3-1
Verhalten 6.10.3.2.1-1
Bildung eines Resonators 6.10.3.2.3-3
Haare
Verschleiß 6.10.3.2.1-28
verwirbelt 6.10.3.2.2-8
Dichtungsverhalten/-wirkung 6.10.3.2.1-1, 6.10.3.2.1-4,

Bürstendichtung

© Axel Rossmann - Turbocomplet
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

6.10.3.2.1-9
Dicke der Bürstenhaare 6.10.3.2.1-3
Druckabbau 6.10.3.2.1-4
Duplexbauweise 6.10.3.2.1-27
dynamische Stabilität 6.10.3.2.1-23
Eigenschaften 6.10.3.2.1-3
Ein- und Ausbauwerkzeug 6.10.3.2.3-10
Einfluss
der Betriebsbedingungen 6.10.3.2.1-11
der Drahtdicke 6.10.3.2.1-9
der Haar Dichte 6.10.3.2.1-9
der wirksamen Spalthöhe 6.10.3.2.1-9
einmalige Auslenkung 6.10.3.2.1-16
Einsatz
im Triebwerk 6.10.3.2.1-25
Grenzen 6.10.3.2.1-7
Spektrum 6.10.3.2.1-25
Fachbegriffe 6.10.3.2.1-7
Fertigung 6.10.3.2.1-12
Flow deflector/Verwirbelungsschutz 6.10.3.2.3-9
Folgeschäden 6.10.3.2.2-2 6.10.3.2.2-17
Freien Bürstenhöhe 6.10.3.2.1-9
Freie Bürstenlänge 6.10.3.2.1-9
Fretting an den Haaren 6.10.3.2.2-10
Funktion 6.10.3.2.1-3
Hysterese der Leckrate 6.10.3.2.1-20
Verhalten 6.10.3.2.1-16
in der Turbine 6.10.3.2.1-28
in Kombination mit Labyrinth 6.10.3.2.1-31
in Lagerkammern 6.10.3.2.1-31
vordere Lagerkammer 6.10.3.2.1-25
innere Reibung 6.10.3.2.3-8
Käfte 6.10.3.2.1-19
Konstruktion 6.10.3.2.1-11, 6.10.3.2.3-3
gestalten. 6.10.3.2.1-3
Kontakt der backing plate 6.10.3.2.2-15
Kräfte auf die Haare 6.10.3.2.1-20
Langzeitverhalten 6.10.3.2.1-16
Versuche 6.10.3.2.3-2
Laufbahnaussehen 6.10.3.2.3-1
max. Druckdifferenz 6.10.3.2.1-1
Montage und Demontage 6.10.3.2.3-1, 6.10.3.2.1-4, 6.10.3.2.3-10
Ölkoks 7.1.2-10
Oxidation 6.10.3.2.2-10
Verhalten 6.10.3.2.3-7
Prinzip 6.10.3.2.1-3
Probleme durch Anströmung 6.10.3.2.2-8
Radialspaltänderung 6.10.3.2.1-19
Reibungsbeiwerte 6.10.3.2.3-3, 6.10.3.2.3-5
Reibungswärme 6.10.3.2.3-3
Schäden 6.10.3.2.2-1
durch backing plate 6.10.3.2.2-6
durch Fertigung 6.10.3.2.2-3
durch Konstruktion 6.10.3.2.2-4
durch Werkstoff 6.10.3.2.2-4
Schadensanalyse 6.10.3.2.2-6
Schadensbilder der Anstreiffläche 6.10.3.2.2-14
schadensrelevante Einflüsse 6.10.3.2.2-3
Schädigung der Haare 6.10.3.2.2-10
Schwingermüdung 6.10.3.2.3-3
Schwingungen des Rotors 6.10.3.2.2-16
Schwingungsanregung 6.10.3.2.1-4
schwingungsdämpfende Wirkung 6.10.3.2.1-23
Sicherheitsvorteil 6.10.3.2.1-2, 6.10.3.2.2-5
Spitzendichtung 6.10.3.2.1-30
statt Labyrinthdichtung 6.10.3.2.1-27
Steifigkeit 6.10.3.2.1-13
Tandemanordnung 6.10.3.2.1-3, 6.10.3.2.1-25
Überdeckung 6.10.3.2.1-20, 6.10.3.2.3-2
Verbiegung der Haare 6.10.3.2.2-8
Verschleiß
durch Start/Abstellzyklen 6.10.3.2.1-20
Daten 6.10.3.2.3-3, 6.10.3.2.3-6
verschmelzen der Haare 6.10.3.2.2-10
Versprödung durch Katalysatoreffekt 6.10.3.2.3-2
Verwirbelung
der Haare 6.10.3.2.2-10
Verluste 6.10.3.2.1-4
Vorteile 6.10.3.1.3-15
Werkstoff
der Haare 6.10.3.2.2-12
Einfluss 6.10.3.2.1-14
wirksame Spalthöhe6.10.3.2.1-7
Zustand nach langen Laufzeiten 6.10.3.2.1-27
Büschelentladung 7.1.2-21
Butterflies, Wälzlager 6.3.1.1-9, 6.3.1.2-19
Bypass, Ölfilter 6.4.2-3

C

C/C (Kohlefaser vrestärkter Kohlenstoff, Carbon/Carbon) 6.6.2.1-12, 6.6.2.1-14
Cadmium, Schädigungen durch 6.1.1.1-6
Campbell Diagramm 6.4.1-24
Carbon black 7.1.1-11
carbon blistering. *Siehe* Blasenbildung: Gleitringdichtung
Carbon erosion 8.1-20
Carbon/Carbon siehe C/C, Kupplungsscheibe 6.6.2.2-6
Cartridge seals. *Siehe* Kassettendichtungen: Gleitringdichtungen
Cetanzahl 8.2-3
Chatter marks. *Siehe* Rattermarken
Chemische Schädigungen, Kolbendichtung 6.10.2.4-1
Chipdetektoren, Befund 6.3.1.2-4
Chlor
Schädigung von Rohrleitungen 6.11.1.2-2
Rückstände in Sacklöchern 6.1.1.2-9
Chloride im Kraftstoff 8.3-19
Chrom, Rückstände 9.3-9
CMC (faserverstärkte Keramik) 6.6.2.1-12, 6.6.2.1-14
Cold Soak 7.1.1-4
Commonrail Prinzip 8.1-1
Computergestützte Simulationen, Zahnriemen 6.8.2-6
Containmentfall, Schraubenbelastung 6.1.1.2-2
Counter Jet - Druckstoß siehe Kavitation
CPB (= Konstante prozentuale Bandbreite auf der Frequenzachse) 6.3.1.2-32

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Cracken 8.2-1
Crackle Test 7.1.3.2-9
Crest-Faktor 6.3.1.2-31

D

D x n (Wälzlager) 6.3.1.1-33, 6.3.1.2-22
Dampfblasenbildung durch Kraftstoff im Öl 7.1.3.2.2-1
Einspritzsystem 8.1-22
Dämpfer
Elastomere 6.2.22
Hysterese 6.2.22
Labyrinthdichtung 6.10.3.1.2-6
Bandage 6.10.3.1.2-18, 6.10.3.1.2-21, 6.10.3.1.2-33, 6.10.3.1.2-48, 6.10.3.1.3-13, 6.10.3.1.3-19, 6.10.3.1.3-24
Ring 6.10.3.1.3-19
Positionierung 6.10.3.1.3-21
Viskose- 6.2.22, 6.2.25
von Rohrleitungen 6.11.1.2-11
von Spannbolzen 6.4.1-26
Dark Etching Areas 6.3.1.2-19
DEA. ***Siehe*** **Dark Etching Areas**
Deckbänder von Schaufeln 6.10.3.1.1-4, 6.10.3.1.1-32
Deckplatte (backing Plate) 6.10.3.2.2-6
DEF-STAN 7.1.1-2
Definition Berührungsdichtung 6.10.1-3
Dehngrenze 6.1.1.1-16
Dehnschrauben 6.1.1.3-1
Delaminationsbereiche der Anstreiffläche einer Bürstendichtung 6.10.3.2.2-14
Demontage, Schraube 6.1.1.3-2
Diagnose von Getriebeschäden 6.4.3-8
Dichtcheck bei Leerlauf 6.11.1.2-26
Dichtfläche
elastische Nachgiebigkeit 6.10.1-5
Festkleben 6.10.1-6
für O-Ringe 6.10.1.2-4
mit Gleitschicht 6.10.1-5
Rauigkeit 6.10.1-6
Dichtigkeit, Probleme an Anbaugeräten 6.11.1.2-19
Dichtlippe von Wellendichtring 6.10.2.1-1
Dichtmittel 9.2-1
Dichtmassen 6.10.1-6
Pasten 6.10.1-14
Rückstände im Öl 7.1.3.1-6
überschüssiges, Schäden 9.2-2
Verstopfen
von Filtersieben 9.2-3
einer Rohrleitung 9.2-3
Dichtspalt, Erweiterung zur Schadensverhütung 6.10.3.1.2-31
Dichtsysteme, Langzeitverhalten 6.10.3.1.1-12
Dichtung
Einfluß auf Lagerkräfte 6.10.3.1.1-7
Erosion 6.10.1-10
faserverstärktes Elastomer 6.10.1-5
Flüssigkeitsstrahl 6.10.2.4-6
konstruktive Gestaltung 6.10.2.4-10
Labyrinth 6.10.3.1.1-2, 6.10.3.1.2-13
Ölverkokung 7.1.2-12
Panzerung 6.10.1-10
Statische 6.10.1-3
Stützring 6.10.2.4-11
Verhalten einer Bürstendichtung 6.10.3.2.1-9
Weichstoffdichtung 6.10.1-9
Dichtungsdruck, Rückschlüsse 6.10.1-12
Dichtwirkung
Anstreifsystem 6.10.3.1.1-3
Bürstendichtung 6.10.3.2.1-1
Labyrinth 6.10.3.1.1-2
Radial-Wellendichtring 6.10.2.1-2
Dieseleffekt (Lohrentzeffekt) 6.10.2.4-6 6.11.1.1-9, 6.11.1.2-12, 6.11.1.2-13, 8.1-12
Kolbendichtung 6.10.2.4-1, 6.10.2.4-3
Ölsystem 7.1.2-21
Dieselkraftstoff 8.2-3
Diffusion
an Schrauben 6.1.1.3-2
in das Schlauchinnere 6.12-2
von Fremdmetallen in Schrauben 0-5, 6.1.1.2-4
von Medien in einen O-Ring 6.10.1.2-7
Diffusionsschichten auf Welle 6.5-12
Dimensionierung von Druckrohrleitungen 6.11.1.1-2
Dokumentation von Magnetstopfenbefund 7.2-17
Doppelt wirkende Kolben 6.10.2.4-8
Drahtdämpfungsring an einem Labyrinth 6.10.3.1.2-33
Drahtsicherung
Versagen durch Verschleiß 6.12.1.2-11
eingeschränkte Verwendung 6.1.1.2-21
Drain and flush 7.1.2-17
Drainage, Verstopfung durch Dichtmittelreste 9.2-3
Drehmoment
gesteuertes Anziehen 6.1.1.1-14
Schlüssel 6.1.1.1-14
Drehwinkelgesteuertes Anziehen 6.1.1.1-16
Drehzahl
Abfall bei Wälzlagerschaden 6.3.1.2-6
Einfluss bei Gleitlager 6.3.2-8
Wälzlager 6.3.1.1-2
Drehzahlmesser für Wälzlager 6.3.1.2-27
Dreikörper-Abrasionsverschleiß 6.7.2-7
Druck
in Hydraulikleitungen 6.11.1.2-11
Abfall
Gasleitung 6.12.1.2-3
ursächlich für Kavitation 6.11.1.2-14
Druckdifferenz
Bürstendichtung 6.10.3.2.1-1
Gleitringdichtungen 6.10.2.2-6
Druckeigenspannungen in Federoberfläche 6.2.18
Druckluft, Feuchtigkeit 6.12.1.2-3
Druckplatte einer Kupplung 6.6.2.2-3
Druckrohre/-leitung 6.11.1.1-2
Auslegung 6.11.1.1-2
dynamische Belastbarkeit 6.11.1.1-7
Fertigung 6.11.1.1-5
Korrosion 6.11.1.1-4
Kriechen, Zeitstandüberlastung 6.12.1.2-9
Nachweise 6.11.1.1-5
Oberflächenqualität 6.11.1.1-5
Schäden 6.11.1.1-2
Sicherheitsanforderungen 6.11.1.1-2

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Unrundheit 6.11.1.1-7
Ovalität 6.11.1.1-5, 6.11.1.1-7
Wanddicke 6.11.1.1-5
Welligkeit 6.11.1.1-5, 6.11.1.1-7
Druckrost. *Siehe* Fretting
Druckschlauch, Schädigungen 6.12-9
Druckstöße
Wirkung auf Gleitringdichtungen 6.10.2.2-6
im Kraftstoff, Schwingungsanregung einer Rohrleitung 6.11.1.2.1-6
Druckwasserhydraulik6.10.2.4-8
Druckwelle, rotierende 6.10.3.1.2-51
Dry Whip 6.3.2-3
Duplexbauweise. *Siehe* Bürstendichtung: Tandemanordnung 6.10.3.2.1-27
Durchblastest, Prüfung auf Ölkohle in Rohren 7.1.2-17
Durchscheuern
Kraftstoffleitung aus CrNi-Stahl 6.11.1.2.1-2
Rohrleitung aus Titan 6.11.1.1-10
Sicherungsdrähte 6.11.1.2.1-5
Durchschlagen
Federung 6.2.29
Dynamische Beanspruchung
Rohrleitung 6.11.1.1-7
Druckrohrleitung 6.11.1.1-7
Rundstahlkette 6.7.2-9
Schlauchleitung 6.12-14
Federn 6.2.13
Labyrinthschäden 6.10.3.1.3-1
Wälzlager, Anzeichen 6.3.1.1-9
Dynamische Stabilität einer Dichtung 6.10.3.2.1-23
dynamische Zahnkräfte 6.4.3-6
Dynamischen Verhärtung von Elastomeren 6.2.22
Dynamischer Reibwert eines Bremsbelags 6.6.2.1-16

E

E-Modul, Abfall bei Schraubenverbindungen 6.1.1.1-11
Echtes Brinelling 6.3.1.1-23
Eckenausbrüche, Zahnräder 6.4.2-4
Eckenträger, Zahnräder 6.4.3-3
ECM. *Siehe* Elektrochemische Bearbeitung: Schwingermüdung
Edelrost. *Siehe* Fretting
Effective clearance. *Siehe* Bürstendichtung: wirksame Spalthöhe
EHD-Schmierung (Elastohydrodynamische Schmierung) 6.3.1.1-15
Eigenschaften, Gummifedern 6.2.2-1
Eigenschwingungen, Rundstahlkette 6.7.2-3
Eigenspannungen
in Rohrleitungen 6.11.1.2-5
Wälzlagerlauffläche 6.3.1.2-19
Eignungsnachweis von Reinigungsmittel 9.3-5
Einbau
O-Ringe 6.10.1.2-2
Wälzlager 6.3.1.2-25
Schaden an O-Ring 6.10.1.2-5
Eindruck in Wälzlagerlaufspur 6.3.1.1-16
Einflüsse auf
Rundstahlketten 6.7.2-3
Versuchsergebnis 6.1.212
Eingemottete Triebwerke, O-Ring-Alterung 6.10.1.2-10
Eingriffsstoß bei Zahnrad 6.4.3-6
Einlauf
Bedingungen für Radial-Wellendichtring 6.10.2.1-4
Belag von Labyrinthdichtung 6.10.3.1.1-33
Grübchen an Wälzlagern 6.3.1.1-13, 6.3.1.1-14
Pittings 6.3.1.1-14
Verhalten Labyrinth 6.10.3.1.2-13
Einmottung von Triebwerken, O-Ring Alterung 6.10.1.2-1
Einsatzbedingungen, Rundstahlketten 6.7.2-3
Einsatzgrenze einer Bürstendichtung 6.10.3.2.1-7
Einsatzhärten
Wälzlager 6.3.1.1-11
Zahnflanken 6.4.1-13
Wasserstoffversprödung 6.4.1-28
Zahnräder 6.4.1-12
Einsatzschicht
mit Rissen, Welle 6.5-8
Rundstahlkette 6.7.2-8
Einschlüsse in Federwerkstoff 6.2.18
Einspannstelle einer Spiralfeder 6.2.16
Einspritzdüsen 8.1-3
Einspritzsystem, Dampfblasenbildung 8.1-22
Eisbildung,
Kraftstoff ohne Enteisungszusatz 8.1-30
Volumenzunahme 6.11.1.4-.13
Elastische Kupplung 6.6.3-1
Elastomereigenschaften 6.6.3-3
Elastomerelement 6.6.3-5
Elastische Nachgiebigkeit einer Dichtfläche 6.10.1-5
Elastische Verformungen
Getriebe 6.4.2-12
Zahnrad 6.4.1-4
Elastische Zentrierung
Lager 6.3.1.1-4
Elastisches Verhalten einer Flachdichtung 6.10.1-6
Elastizität von Kupplungsteilen 6.6.1-4
Elastohydrodynamic lubrication. ***Siehe EHD***
Wälzlager 6.3.1.1-12
Zahnräder 6.4.1-4
Elastomer
Ablagerungen bei Reaktion mit Kraftstoff 8.1-12
Alterung 6.2-22, 6.2-25, 6.6.3-5
Zahnriemen 6.8.2-6
Angriff in Öl 7.1.1-8
Auswahl 6.2-25
Dämpfung 6.2-22
Dichtung
an Rohrleitungen 6.11.1.2-4
Quellen in Öl 7.1.1-9
Dynamische Verhärtung 6.2-22
Eigenschaften 6.6.3-3
Federn, auslegungsrelevante 6.2.22
Einfluss von Ozon 6.2-26
Einwirkung von Kraftstoff 8.1--11
Erweichung 6.2-22, 6.2-25,
Faserverstärkung 6.2-26
Federkennlinie 6.2-24
Haftfestigkeit an Metall 6.2-25
Härteabfall 6.10.2.4-6
Identifikation durch Rücksprunghärte 6.10.1.2-14
Quellen 6.2-.25, 6.2.2-2
in Kraftstoff 8.3-2
Schädigung durch Antioxidantien 8.1-12
Verspröden 6.2.2-2
Volumenvregrößerung

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

6.10.2.4-6
Schädigung
durch Dämpfung 6.2-25
durch Medien 6.10.1.2-12
Schrumpfen 6.2.2-2, 6.2.2-5, 8.1-11
Sprödigkeit 8.1-11
Verstärkung durch Stahldrähte 6.2-26
Zündung im Betrieb 6.12.1.2-4
Elastomer-Metall-Verbindung
Ablösung 6.6.3-5
Anrissbereich 6.2.2-10
Elastomerfedern 6.2.21
Elastomere für Federn 6.2.22
auslegungsrelevante Eigenschaften
Betriebslebensdauer 6.2.22
Elastomerkupplung 6.6.3-1
Abweichungen 6.6.3-1
Fluchtung
Ausgleich 6.6.3-5
Steifigkeit 6.6.3-1
Elektrische Aufladung
Kunststoffbauteile 6.3.1.1-40
Wälzlager 6.3.1.1-33
Elektrische Entladung
Brandspuren an Komponenten des Ölsystems 7.1.2-21
Flammeneffekt 7.1.2-21
in Schmieröl 7.1.2-20
Erkennungsmerkmale 7.1.2-21
Funken, Anzeichen im Öl 7.1.3.1-10
Schädigung von Seilen 6.9-5
Elektrische Leitfähigkeit von Öl 7.1.3.1-8
Elektrische Leitungen,
Überhitzung durch Heißluftleck 6.12.1.2-10
Elektrische Ströme in Wälzlagern 6.3.1.1-33
Elektrischer Funke, Zündung von Kraftstoff 8.2-13
Elektroerosion an Wälzlagern 6.3.1.1-40
Elektromotoren, Wälzlagerschäden 6.3.1.2-16
Elektronenstrahl-Schweißung an Zahnradwellen 6.4.1-30
Elektrostatische Aufladun
Elmsfeuer 7.1.2-21
Emission/-en
Kraftstoffeinfluss 8.1-8
von NOx 8.1-8
Endanschlüsse von Hochdruckschläuchen 6.12-5
Endoskop 6.3.1.2-27
Energieträger, gasförmige 6.12.1.2-7
Enteisung
Additiv **8.3-16**
Mittel, Wirkung auf Bremse 6.6.2.1-2
Zusatz 8.1--30
Entfettungsmittel
Verwendung bei Wartung 6.11.1.2-22
Wirkung auf Elastomere 6.10.1.2-12
Entflammbarkeit 7.1.4-7
Kraftstoff 8.2-3
Entlüftungsleitung
Ölfeuer 7.1.4-3, 7.1.4-5, 7.1.4-12
Ölverkokung 7.1.2-5, 7.1.2-12
Entscheidungsbaum 7.2-16
bei Magnetstopfenbefund 7.2-18
Entscheidungsdiagramm für Flachdichtungen, Flanschdichtungen 6.10.1-6
Entsprödung, Schraube 6.1.1.3-1, 6.1.1.3-5
Entstehungsmechanismus, Ölverunreinigungen 7.1.3.1-1
Entstehungsort von Ölverunreinigungen 7.1.3.1-1
Entwicklung eines Anstreifsystems 6.10.3.1.1-3
Entzündlichkeit von Kraftstoff 8.2-13
EP-Additive/Zusätze 7.2-8. *Siehe auch* Extreme-Pressure-Additive
im Öl 7.1.1-2
Erdgas, Rohrleitung 6.12.1.2-1
Erfahrung, Montage von O-Ringen 6.10.1.2-1
erkennen von
Erkennen von Wälzlagerbeschädigungen bei Montage 6.3.1.2-1
Ermüdung
Brüche von Zahnflanken6.4.1-8
Lebensdauer, Seil 6.9-5
Nadellager 6.3.4-5
Pittings 6.3.1.1-14
Rissbildung in Getriebe 6.4.2-2
Zahnräder 6.4.1-1
Erosion
an Rohrkrümmer 6.12.1.2-3
durch Abplatzen von Staubablagerungen 8.1-10
durch Kokspartikel 8.1-20, 8.1-26
durch Luftbläschen an Kolbendichtung 6.10.2.4-3
durch Ruß/Koks 8.1-16
durch Tropfenschlag 6.12.1.2-9
Flachdichtung 6.10.1-10
Gleitlager 6.3.2-6
Heißteile, Kraftstoffeinfluss 8.1-6
in Gleitringdichtungen 6.10.2.2-6
in Labyrinthen 6.10.3.1.2-18
Rohrleitung 6.11.1.4-4
innen 6.11.1.1-4
Erosionskorrosion an Biogasanlage 6.12.1.2-7
Erprobung
Verfahren zur Sicherung der Schraubenvorspannung 6.1.1.1-16
von Hilfsstoffen 9.1.1-1
von Schmierfett 9.1.1-7
Erstarrungspunkt von Kraftstoff 8.1-7
Erweichung von Elastomeren 6.2.2-2, 6.2.2-5
ETOPS-Betrieb
Ölverkokung 7.1.2-15
Zulassung von Kraftstoffsystem 8.1--3
Existent Gum 8.3-4
Explosion
Kraftstoff im Öl 7.1.4-5
Gefahr durch Permeation eines Schlauchs 6.12-3
Explosiver Druckabfall an O-Ring Dichtung 6.10.1.2-5
Extension controlled tightening. *Siehe* Anziehen von Schraubverbindungen
Extreme Pressure Additive
Siehe EP-Zusätze: Öl 6.4.1-13

F

F x v Kennwert 6.3.4-9
'Face Type' Gleitringdichtung 6.10.2.2-2
Fächerscheiben 6.1.1.1-8
Fachkenntnis für Montage von O-Ringen 6.10.1.2-1
FADEC. *Siehe* Full Authority Digital Engine Control
Fahrzeug
Blattfeder 6.2.16
Reifen als Gummifeder 6.2.26

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fail Safe - Verhalten/Eigenschaft
fehlt bei Rundstahlkette 6.7.2-1
Labyrinthspitzen 6.10.3.1.1-22
Seil 6.9-1, 6.9-14
'Falsches' Brinelling (False Brinelling) 6.3.1.1-21
Farbe/Farben
Anwendung im im Ölsystem 7.1.1-6
Partikel 9.3-9
ungewöhnliche von Kraftstoff 8.3-9
Faserverlauf, Schraube 6.1.1.2-6, 6.1.1.2-8
Faserverstärkte Keramik (CMC)
Bremsscheibe 6.6.2.1-14
Faserverstärkte Kunststoffe
Schraubenwerkstoff 6.1.1.1-2
Elastomer 6.2.2-6
Fatigue Fretting Damage Parameter (FFDP) 6.5-9, 6.6.4-7, 6.6.4-10
FCOC. Siehe Öl/Kraftstoff-Wärmetauscher
Feder
Anstrengung 6.2.1-6
aus Elastomeren 6.2.2-1
Auswahl 6.2.2-2
aus Gummi 6.2.2-1
aus Titanlegierungen 6.2.1-3
Bearbeitungsriefen 6.2.1-2
Belastung im plastischen Bereich 6.2.1-7
Beschichtungen 6.2.1-4
Dynamische Belastung 6.2.1-3
Fertigungsfehler 6.2.1-2
kalt gezogener Drähte 6.2.1-8
Kennlinie
Gummi/Elastomere 6.2.2-4
nichtlineare bei elastomeren 6.2.25
Kerbempfindlichkeit 6.2.1-2
konstruktive Formkerben 6.2.1-9
Korrosionsempfindlichkeit 6.2.1-8
Kraftfahrzeug 6.2.11
Kugelstrahlen 6.2.1-8, 6.2.13
Längsriefen 6.2.1-8
metallische 6.2.11
Mindestfestigkeit 6.2.1-1
Oberflächenfehler 6.2.1-2
problematische Werkstoffeigenschaften 6.2.18
Probleme 6.2.13
Qualitätssicherung 6.2.12
Relaxation 6.2.1-2
Schadensbilder 6.2.1-8
Schädigung durch Fremdmetalle 6.2.1-8
Schwingfestigkeit 6.2.1-2
Setzen 6.2.1-2
Statische Belastungen 6.2.13
Versprödung 6.2.1-2
Vorstauchen 6.2.1-8
Werkzeugeindrücke 6.2.1-2
Federdraht
Aufreißungen vom Ziehen 6.2.1-8
Patentieren 6.2.1-8
Schleifschädigung 6.2.18
Fremdmetallversprödung6.2.1-4
Kerben 6.2.13
Korrosionsschäden 6.2.13
Schädigung durch Herstellung 6.2.16
Wasserstoffversprödung 6.2-14
zerstörungsfreie Prüfung 6.2-12
Werkstoff
Einschlüsse 6.2-18
Probleme 6.2-11
Oberfläche, Druckeigenspannungen 6.2-18
Federringe 6.1.1.1-8
Federung, Durchschlagen 6.2.2-9
Fehler 6.2.1-3
Früherkennung bei WEA-Getriebe 6.4.3-2
Größe 6.2-14
Größe 6.2.1-4
Feinstaub von Bremse 6.6.2.1-4
Fence height. *Siehe* Bürstendichtung: freie Bürstenlänge
Fensterbruch bei Wasserstoffversprödung 6.12.1.2-7
Ferro Index 7.2-7
Ferrografie 7.2-6
Fertigung
Bürstendichtung 6.10.3.2.1-12
Druckrohrleitung 6.11.1.1-5
Einfluss auf Getriebe 6.4.2-6
Fehler bei Feder 6.2-12
Toleranzen, Einfluss auf Zahnriementrieb 6.8.2-3
Verspannung einer Rohrleitung 6.11.1.2.1-6
Zahnrad 6.4.3-6
Festbrennen von Gewinden 6.1.1.1-20
Festgelenk 6.3.4-3
Festigkeit von Schrauben 6.1.1.2-1
Festrosten von Gewinden 6.1.1.1-20
Festsitzen
Gewinde, Abhilfen 6.1.1.1-20
Schrauben und Muttern 6.1.1.1-20
von Gleitringdichtungen 6.10.2.2-3
Fettschmierung 9.1.1-4
katalytischer Effekt 9.1.1-5
Nachschmierung 9.1.1-5
Schmierfett 9.1.1-2
Ungeeignetes 9.1.1-5
Stromdurchgang 9.1.1-4
Vor- und Nachteile 9.1.1-3
Wälzlager 6.3.1.1-35, 6.3.1.1-39, 6.3.1.2-16
Feuchtigkeit
Aufnahme von Polyamid 6.3.4-7, 6.3.4-10
Diffusion durch Schlauch 6.12.1.2-4, 6.12-11
in Druckluft 6.12.1.2-3
in Schutzgasen 6.12-3
in Wärmeübertragungsöl 6.12-3
Feuer
durch Kraftstoff im Öl 7.1.3.2.2-4
Zündung durch Labyrinthdichtung 6.10.3.1.3-2
FFDP (Fatigue Fretting Damage Parameter) 6.5-9
Filter
Ablagerungen 7.1.3.1-1
aus Zellulose für Kraftstoff 8.3-17
Blockieren durch Mg-Korrosion 9.3-6
Firmenangaben bzw Prospekte
„Fisch" (längliches Schmutzpartikel) 7.1.3.1-4
Problematik 6.1.1.1-2
Partikel im Öl 6.3.1.2-6
Öl 6.3.1.2-9
Rückstände aus Öl 7.1.3.1-9, 7.2-1
Siebe, Verstopfen durch Dichtmittel 9.2-3
Wechsel 6.3.1.2-9
Fischaugen Wasserstoffversprödung) 6.12.1.2-4
Fixierung von Turbinenrotorschaufeln mit Niet 6.1.2-3
Flachdichtung 6.10.1-3, 6.10.1-5
Anforderungen 6.10.1-13
Betriebstemperatur 6.10.1-14
Dichtigkeitsverhaltens 6.10.1-9
Entscheidungsdiagramm für Auswahl 6.10.1-6
Flächenpressung 6.10.1-10
Mindestwert 6.10.1-6
Fremdpartikel 6.10.1-14

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Flachdichtung
Kühlwasserführung 6.10.1-14
Medienbeständigkeit 6.10.1-6
Pulsierender Druck. 6.10.1-9
Quellen 6.10.1-14
Reinigungsmittel 6.10.1-14
Schadensbilder 6.10.1-13, 6.10.1-12, 6.10.1-14
Verfärbungen 6.10.1-14
Schwarzfärbung 6.10.1-14
Versagensdruck 6.10.1-10
Verspröden 6.10.1-14
Gefahr der 6.10.1-7
Weichstofflage 6.10.1-14
Flachriemen 6.8.3-1
als Transportmittel 6.8.3-3
Anwendungen 6.8.3-1
spezifische Eigenschaften 6.8.3-1
Ausfransungen der Riemenkanten 6.8.3-2
auslegungsrelevante Einflüssen 6.8.3-2
Betriebsbedingungen 6.8.3-2
Bildung eines Luftkeils 6.8.3-2
Eigenschaften 6.8.3-3
notwedige Vorspannung 6.8.3-2
Oberflächenprofilierung 6.8.3-1
Schäden 6.8.3-1
Umgebungseinfluss 6.8.3-2
Verbindung von Riemenenden 6.8.3-3
Verschleiß 6.8.3-3
Flame Out. *Siehe* Verlöschen: Triebwerk durch Wasser im Kraftstoff
Flamminstabilität, Kraftstoffeinfluss 8.1-6
Flanken
Ausbrüche an Zahnrad 6.4.2-12
Verschleiß
Welligkeit an Zahnrädern 6.4.1-16
Flansch
Aluminiumlegierung 6.10.1-10
Anlageflächen/Auflagen
Beschädigung durch Verschmutzung 6.6.4-12
Aufschrumpfen 6.6.4-4
Auslegung 6.10.1-12
Fretting 6.6.4-10
Leichtbau 6.10.1-5
Pressungsverteilung 6.10.1-8
Steifigkeit 6.10.1-8
Schadensfälle 6.10.1-12
Flanschdichtungen 6.10.1-5
Entscheidungsdiagramm 6.10.1-6
von Rohrleitungen 6.11.1.2-4
Flanschkupplung 6.6.4-1
Nabenverbindung 6.6.4-1
Problem 6.11.1.2-26
Schaden durch Stromdurchgang 6.6.4-4
Schrauben
Ermüdungsbruch 6.6.4-14
Fretting/Reibrost 6.6.4-3
Klemmlänge 6.10.1-10
Schäden 6.6.4-3
Schwingermüdung 6.6.4-3
Schwingverschleiß 6.6.4-6
Werkstoffauswahl 6.6.4-14
Flanschverbindung
Montage 6.6.4-16
Schraubenkraftwirklinie 6.10.1-8
Temperaturgradienten 6.6.4-14
Versagen der Verschraubung 6.11.1.2-20
Verschraubung
selbstverstärkender Schadensablauf 6.1.1.2-11
Probleme 6.1.1.1-6
Schadensmechanismus 6.1.1.2-11
Versagensrisiko 6.1.1.2-1
Flash Point. *Siehe* Zündtemperatur: Kraftstoff
Flattern, Wälzlagerrollen 6.3.1.1-25, 6.3.1.1-31
Flexible Wellen 6.9-18
Fliehkraftbetätigten Kupplungen 6.6.2.2-1
Fließgrenzengesteuertes Anziehen 6.1.1.1-16
Flight envelope, Einfluss auf Ölfeuer 7.1.4-5
Flow deflector 6.10.3.2.3-8
Bürstendichtung 6.10.3.2.3-9
Fluchtung
Abweichungen, Elastomerkupplung 6.6.3-1
Ausgleich 6.6.3-5
Getriebe 6.4.2-6
Gleitringdichtungen 6.10.2.2-6
Flugbenzin, Mischung mit Triebwerkskraftstoff 8.3-2
Fluglager 6.3.1.1-2
Flugrost 6.6.2.1-6
Flugunfall
durch Koksablagerungen 7.1.2-19
Untersuchung, auf Ursachen schließen 6.3.1.2-33, 6.4.1-34
Flugzeugtank
Entstehung von Wasser 8.3-12
Korrosionsprodukte 8.3-9
Verunreinigungen 8.2-11
Fluor, schädigende Wirkung 9.1.2-3
Flüssigdichtungen 6.10.1-5
Flüssigkeitsstrahl auf Dichtung 6.10.2.4-6
Fluting 6.3.1.1-40
FOD (siehe Fremdkörperschaden), Folge: Versagen der Flanschverbindung einer Niederdruckturbine 6.1.1.2-24
Folgeschäden
Bürstendichtungen 6.10.3.2.2-17
als Auslöser 6.10.3.2.2-2
Folienlager 6.3.3-1, 6.3.3-2, 6.3.3-4
'Footprint' Schmieröl 7.2-13
Förderwirkung einers Wellendichtrings 6.10.2.1-2
Formschlüssige Sicherungen 6.1.1.1-9
Fortschreitende Welle 6.10.3.1.2-38
Freezing point 8.1-8
Freie Bürstenlänge 6.10.3.2.3-7
Fremdeinwirkung, Getriebeschaden 6.4.2-5
Fremdkörper
Eintrittszeitpunkt bei Wälzlager 6.3.1.2-33
erkennen durch Vibrationen 6.6.4-18
im Getriebeöl 6.4.2-1
im Labyrinthspalt 6.10.3.1.2-14
in Kolbendichtung 6.10.2.4-5
Partikel von Labyrinthen 6.10.3.1.1-30
Schraubenbruchstücke 6.1.1.2-26
Werkzeug 6.6.4-18
Fremdkörperschaden
durch Schraubenbrüche 6.1.1.1-9
Fremdmetallschmelze
Eindringen in Schrauben 0-5, 6.1.1.2-4
Versprödung von Federn 6.2.14
Fremdpartikel, Flachdichtung 6.10.1-14
Fremdströme aus elektrischen Maschinen 6.3.1.1-40
Fressen 6.3.1.1-10, 6.3.2-8, 8.1--14. *Siehe auch* Kaltver-

© Axel Rossmann - Turbocomponents
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

schweißen
Nabe 6.6.4-4
Schrauben 6.1.1.1-6
Fressgrenze bei Zahnrädern 6.4.1-8
Fresspuren an Zahnrad 6.4.2-12
Fressriefen am Schraubenschaft 6.1.1.2-2
Fretting (Reibrost)
an Bürstenhaaren 6.10.3.2.2-10
Flansch
Anlageflächen 6.6.4-10
Schrauben 6.6.4-3
Gelenklager 6.3.4-1
Parameter 6.6.4-7
Rohrleitung 6.11.1.2-1
Schrauben 6.1.1.1-2
Schwingbruch an Kraftstoffleitung 6.11.1.2.1-5
Schwingfestigkeitsabffall 6.1.1.1-2
Spacer 6.10.3.1.3-9
Titanlegierungen 6.11.1.2-18
Versagen von Viel
Verschleiß an
gedämpften Wälzlagern 6.3.1.1-Veilkupplungen 6.6.1-2
Wellen 6.5-6
Frischölfilter, Maschenweite 6.3.1.2-21
Frischölleitung
Ablagerungen 6.3.1.2-9
Verstopfung bei Gleitlager 6.3.2-8
Frosting 6.3.1.1-40
Frostschaden
bei Lufttransport 6.11.1.4-.13
Klimaanlagen 6.11.1.4-.12
Kühler 6.11.1.4-.12
Kunststoffrohre 6.11.1.4-.13
Motor wassergekühlt 6.11.1.4-.12
Wärmetauscher 6.11.1.4-.12
Wasserleitung 6.11.1.4-.12
Früherkennung
Getriebe WEA 6.4.3-7
Getriebeschaden 6.4.2-12
Kupplungsschaden 6.6.1-11
Schaden 7.2-17
Frühwarnung, Getriebeschaden 6.4.3-2
FT-IR) (Infra-Rot-Spektroskopie) 7.2-8
Fuel Cooled Oil Cooler. *Siehe* Öl/Kraftstoff-Wärmetauscher
Fuel lacquering, varnishes 8.1-24
Fuel stability 8.3-4
Fugendruck
Nabe 6.6.4-1
in der Nabenbohrung 6.6.4-3
in Pressverband 6.6.4-8
Reibrosteinfluss 6.6.4-8
Führungsband (Kolbenstange) 6.10.2.1-8, 6.10.2.4-5
Full Authority Digital Engine Control 7.1.2-15
Funken, Schädigung von Rohrleitung 6.11.1.2-2, 6.11.1.2-7
Funktionsbeeinträchtigung durch Reinigungsmittel 9.3-8
Funktionsprinzipien Luftlager 6.3.3-4
Fußbodenheizungen 6.11.1.4-.10
Fußplattform mit Labyrinthspitzen 6.10.3.1.1-32
Fußträger, Zahnrad 6.4.3-3

G

Galling. *Siehe* Fressen
Galvanische Beschichtungen
Gas-/Luftlager 6.3.3-1, 6.3.3-5
Verzinkung von Schraube 6.1.1.3-5
Welle 6.5-14
Galvanische Partikel 7.1.3.1-10
Gasdurchlässigkeit
von Schläuchen 6.12-2
Pseudokavitation durch Gase von Druckflüssigkeit 6.11.1.2-14
Gasförmige Energieträger 6.12.1.2-7
Gaslager, Folienlager 6.3.3-1
Gasleitung
kryogene Temperaturen 6.12.1.2-3
Metallbrandgefahr 6.12.1.2-4
plötzlicher Druckabfall 6.12.1.2-3
Gasnitrierschicht
Welle 6.5-8
Zahnräder 6.4.1-15
Gedämpfte Wälzlagerung 6.3.1.1-1, 6.3.1.1-4
Gefährdung durch Schlauchbruch 6.12-14
Gefahrenwerte 7.2-2
Gefüge
Wälzlager 6.3.1.1-12
Inhomogenitäten 6.3.1.1-18
Veränderungen Laufbahn 6.3.1.2-20
Zustand, Niet 6.1.29
Gehäusestrebe, Ölverkokung 7.1.2-16
Gehäuseverzug im Stillstand 6.5-21
Geklebte Schichten, Ablösung 6.10.3.1.2-63
Gelenk
Homokinetisches 6.3.4-3
Kopf 6.3.4-1, 6.3.4-3
Spannungsrisskorrosion 6.3.4-3
Wasserstoffversprödung 6.3.4-3
Gelenklager 6.3.4-1, 6.3.4-3
Blockieren 6.3.4-5
Brinelling 6.3.4-5
Fretting 6.3.4-1
Gleitmittel 9.1.2-1
Klemmen 6.3.4-5
Kunststoffbüchsen 6.3.4-7
Reibrostbildung 6.3.4-1
Schäden 6.3.4-4
Mechanismen 6.3.4-1
Schwenkbewegungen 6.3.4-1
Schwergängigkeit 6.3.4-6
Verschleiß 6.3.4-4
Gelockerte Schrauben in Sackloch 6.1.1.2-21
Gelöste Luft in Hydraulikfluid 6.10.2.4-6
Gelötete Labyrinthe 6.10.3.1.3-17
Geräusch
Steuerkette 6.7-6
Wälzlagerschaden 6.3.1.2-3
Beurteilung
an Rotoren bei Wartung 6.1.1.2-26
Keilriemen 6.8.1-8
Ungewöhnliche Rotor 6.1.1.2-15
Rollenkette 6.7-3
Gerolltes Gewinde 6.1.1.1-4
Geruch, ungewöhnlich von Kraftstoff 8.3-9
Gesamtschwingpegel Wälzlager 6.3.1.2-30
Geschlossene Seile 6.9-7
Gestaltung
Dichtung 6.10.2.4-10
Labyrinth 6.10.3.1.1-28
schadensursächlich bei Rohrleitung 6.11.1.1-5
Schraubenverbindung 6.1.1.3-1
Verlegung von Schlauchleitung

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

6.12-1
Richtlinien 6.12-12
wasserführende Rohre 6.11.1.4-1
Gesundheitlich bedenkliche Verunreinigungen durch Korrosion 6.11.1.4-.2
Getriebe 6.4.1-1, 6.4.2-1
Abdichtungsprobleme 6.4.2-2
Abnahme 6.4.2-6
Anforderungen 6.4.1-3
Anwendungen 6.4.1-3
Anwendungsfaktor 6.4.2-12
Ausrichtung 6.4.2-6
Auswirkung von Stillstandszeiten 6.4.2-10
Beschleunigungsaufnehmer 6.4.2-2
Betriebsfehler 6.4.1-18, 6.4.2-4
Blitzschlag 6.4.2-4
Elastische Verformungen 6.4.2-12
Ermüdungsrissbildung 6.4.2-2
Fertigungseinfluss 6.4.2-6
Fluchtungsfehler 6.4.2-6
Gehäuse, Undichtigkeiten 6.4.2-8
Gleitlager 6.4.2-1
Inbetriebnahme 6.4.2-6
Komponenten, Schleuderversuche 6.4.2-2
kontinuierliche Ölanalyse 6.4.3-2
Körperschall 6.4.3-6
Korrosionsschutz 6.4.2-6
Kupplungen als Schadensursache 6.4.2-6
Lastkollektive 6.4.2-12
Momentenstöße 6.4.1-4
Montage 6.4.2-6
Öl
Eigenschaften 6.4.2-4
Mangel 6.4.2-1
System 6.4.2-3
Versorgung 6.4.2-1
Produktfehler 6.4.1-18, 6.4.2-4
Rasselschwingungen 6.4.3-6
Schaden
Diagnose 6.4.3-8
durch Fremdeinwirkung 6.4.2-5
durch Konstruktion 6.4.2-5
durch Planung 6.4.2-5
durch Topfsicherung 6.1.1.2-16
durch Überdrehzahlen 6.4.2-6
durch Umgebungseinflüsse 6.4.2-6
Früherkennung 6.4.2-12
Frühwarnung 6.4.3-2
Stöße 6.4.2-6
Überlastungen 6.4.2-6
Ursachen Statistik 6.4.2-4
Warnsysteme 6.4.3-2
durch Wellenverlagerungen 6.4.2-6
Früherkennung bei WEA 6.4.3-7
Merkmale 6.4.1-18
Folgen 6.4.1-1
Mechanismen 6.4.1-1
relevante Betriebseinflüsse 6.4.3-8
Verhütung 6.4.3-1
Schallabstrahlung 6.4.2-6
Schmierung 6.4.2-12
Schwingungen 6.4.2-6
Anregung 6.4.1-27
im Wellensystem 6.4.2-8
Torsion 6.4.2-6
Stationäre 6.4.1-18
Stromdurchgang 6.4.2-4
Tragbilder 6.4.3-2
Typ Windenergieanlage 7.2-9
Überholung 6.4.2-8
Überwachung 6.4.2-12
von Schwingungen 6.4.3-1
Position von Sensoren 6.4.3-8
Unwucht 6.4.2-6
Verwirbelungsverluste 6.4.2-2
Verzahnungsfehler 6.4.3-6
Vibrationen 6.4.2-6
Messungen 6.4.1-33
von Haushaltsgeräten 6.4.1-3
von Kraftfahrzeug 6.4.1-3
von Windenergieanlagen (WEA, Windkraftanlagen) 6.4.1-3, 6.4.2-12
Wartungsintervalle 6.4.2-13
Werksabnahme 6.4.3-3
Wirkungsgrad 6.4.2-1
Zustand,
Symptome 6.4.1-33
Erfassung 6.4.3-5
Zulassung 6.4.2-6
Gewaltbruch
Identifizieren 6.1.1.2-2
Welle 6.5-11
Zahnrad 6.4.1-10, 6.4.1-15
an Schrauben 6.1.1.2-2
Gewalteinwirkung auf Schrauben 6.1.1.1-6
Gewinde
Ausreißen 6.11.1.2-20
in Magnesiumguss 6.1.1.2-23
belastete Gänge 6.1.1.2-8
in Leichtmetallen, 6.1.1.2-24
Mg, Beschädigung 6.1.1.2-22
Korrosion 6.1.1.1-20
Losbrechen 6.1.1.1-20
Schädigung an Schraube 6.1.1.1-5
Gewindeeinsatz
in Leichtmetall 6.1.1.2-24
selbstsichernd 6.1.1.2-21
Gewindegrund Rollen 6.1.1.1-4
Gewindewirkungsgrad 6.1.1.1-12
Gewitterblitze, Wälzlagerschädigung 6.3.1.1-35
Glasfasern in Zahnriemen 6.8.2-4
Glasübergangstemperatur6.12-9
Glasuren auf Kunststoffbasis, Öleinwirkung 7.1.1-6
Gleichlauf-Festgelenk 6.3.4-3
Gleitbeschichtung,, Schraube 6.1.1.3-3
Gleitdichtungen 6.10.1-4
Leckage 6.11.1.2-20
Gleitflächen
Ablagerungen 9.1.2-9
Strukturierung (Laser) 6.10.2.5-2
Gleitlager 6.3.2-1
Anschmelzungen der Gleitschicht 6.3.2-10
Axiallager 6.3.2-6
Drehzahleinfluss 6.3.2-8
Dynamische Beanspruchung der Gleitschicht 6.3.2-10
Einfluss von Blitzschlag 6.3.1.1-35
Erosion 6.3.2-6
Halbfrequenzwirbel 6.3.2-1, 6.3.2-5
Schmierfilmaufbau
Hydrodynamischer 6.3.2-1
Hydrostatischer 6.3.2-1
im Getriebe 6.4.2-1
Kavitation 6.3.2-1, 6.3.2-6, 6.3.2-11
identifizieren 6.3.2-11
Ursachen 6.3.2-11
Korrosion 6.3.2-6
der Gleitschicht 6.3.2-9
durch Öl 6.3.2-9
mechanische Belastungen 6.10.2.2-6
mechanischer Verschleiß 6.3.2-8
mehrphasige Gleitschichten 6.3.2-11
Mischreibung 6.3.2-1, 6.3.2-8

© Axel Rossmann - turbocorsit
als Schulungsanlage nur mit Lizenz

Montage 6.10.2.2-6
Nachteile 6.3.2-1
Notlaufeigenschaft 6.3.2-6, 6.3.2-8
Ölfeuer 6.10.2.2-6
Pflastersteinausbrüche 6.3.2-10
Planschlag 6.10.2.2-6
Plastische Verformung der Gleitschicht 6.3.2-8
Quietschton 6.3.2-3
Radiallager 6.3.2-6
Riefen 6.3.2-9
Schäden 6.3.2-6
Schwingermüdung 6.3.2-6
Schwingrisse in Schicht 6.3.2-10
Segmentlager 6.3.2-6
selbsterregender Schwingungen 6.3.2-1
Stromdurchgang 6.3.2-6, 6.3.2-9, 6.3.2-10
Tragfähigkeit 6.3.2-8
Trockenlauf 6.3.2-8
Überlastung 6.3.2-8
Verfärbung 6.3.2-9
Verschleiß 6.3.2-6
Verstopfung der Frischölleitung 6.3.2-8
Vorteile 6.3.2-1
Gleitmittel 9.1.2-1
Gleitpasten 9.1.2-1
Gelenklager 9.1.2-1
Schraubenspindel 9.1.2-1
Schwenklager 9.1.2-1
Gleitringdichtung 6.10.2.1-1, 6.10.2.2-1, 6.10.2.2-5
Andrucksystem/-feder 6.10.2.2-3
Material 6.10.2.2-3
Anpressdruck 6.10.2.2-6
Ausbrüche
an den Rändern der Laufspur 6.10.2.2-9
in der Laufspur 6.10.2.2-9
WC-Schicht 6.10.2.2-4
Beschädigung 6.10.2.2-6
Bewegungen der Wellen 6.10.2.2-6
Blasenbildung 6.10.2.2-9
Chemische Reaktionen 6.10.2.2-4
Dichtelement 6.10.2.2-1
Drücke/Druckdifferenzen 6.10.2.2-6
Druckstöße 6.10.2.2-6
Erosion 6.10.2.2-6
Festsitzen 6.10.2.2-3
Fluchtung 6.10.2.2-6
Gleitverschleiß 6.10.2.2-5
Kassettendichtungen 6.10.2.2-4
Kavitation 6.10.2.2-6
Koksbildung 6.10.2.2-8
Korrosion 6.10.2.2-4
Kontakt mit elementbildenden Metallen 6.10.2.2-3
Laufspur/Lauffläche 6.10.2.2-8
Probleme und Schadensursachen 6.10.2.2-2, 6.10.2.2-6,
riefige 6.10.2.2-8
ungleichmäßige 6.10.2.2-8
Schäden 6.10.2.2-1
Laufbahnschäden 6.10.2.2-6
Schaden durch Undichtigkeit 6.10.2.2-11
Schadensbilder 6.10.2.2-4
Schwingverschleiß 6.10.2.2-5
Thermische Rissbildung 6.10.2.2-8
Sinterschichten 6.10.2.2-4
Stick-Slip-Effekte 6.10.2.2-3
Tragbild 6.10.2.2-6
Trockenlauf 6.10.2.2-5
Übertragung der Kohle-Gleitschicht 6.10.2.2-3
Umgebungstemperaturen 6.10.2.2-1
Verkokung im Dichtspalt 6.10.2.2-3
Verunreinigungen 6.10.2.2-6
Wirkung von Ölverunreinigungen 6.10.2.2-4
Gleitschicht
auf Dichtfläche 6.10.1-5
mehrphasige 6.3.2-11
Verschleiß 6.9-11
Seil 6.9-11
Gliederketten 6.7.2-1
Good Housekeeping 7.2-13
Gough-Effekt 6.10.2.1-13
Grafit
als Schmiermittel 9.1.2-3
auslösen von Kriechströmen, Kurzschluss 9.1.2-3
Gratbildung 6.3.1.2-33, 6.4.1-34
Labyrinthspitzen 6.10.3.1.2-9
Graufleckigkeit 6.4.1-10, 6.4.2-12
Zahnrad 6.4.1-10
Grauguss
Blechmantelbildung 6.10.2.5-4
Grenzschlupf 6.6.4-7
Grenzwert
Definition 7.2-2
Windenergieanlagen 7.2-9
Grübchen
Einfluss der Additive im Öl 6.4.1-13
Grenze 6.4.1-8
Zahnräder 6.4.1-10
Zahnflanken 6.4.1-15
Bildung 6.4.3-6
Gum 8.1--24, 8.2-11, 8.3-4
Gummi
Federkennlinie 6.2.24
Schädigung
durch Sauerstoff 6.12-2
durch Streusalz 6.2.29
Zersetzung in Öl 7.1.1-10
UV-Strahlung 6.2.26
Gummibelag Kleben 6.10.3.1.2-63
Gummifeder
Alterung 6.2.2-6
Einfluss
von Medien 6.2.2-6
von Wärmestrahlung 6.2.2-6
Fahrzeugreifen 6.2.2-6
Umgebungseinfluss 6.2.2-6
Gummifeder 6.2.2-1
Biegebeanspruchung 6.2.2-4
Eigenschaften 6.2.2-1
Potenziell schädigende Einflüsse 6.2.2-6
Gyration, Wälzlager 6.3.1.1-31

H

Haftfestigkeit
eines Elastomers an Metall 6.2.2-5, 6.2.2-10
Probleme bei Labyrinthbelägen 6.10.3.1.1-20
Halbfrequenzwirbel 6.3.2-2, 6.3.3-7
Gleitlager 6.3.2-1, 6.3.2-5
Mechanismus 6.3.2-2
Halbzeugherstellung, Zahnrad 6.4.1-4
Handbuch, nicht genutzt 6.11.1.2-26
Handling, Wälzlager 6.3.1.2-25
Handschweiß, Korrosion an Wälzlager 6.3.1.1-43, 6.3.1.2-26
Hanfdichtungen 6.11.1.4-.7
Härte
Abfall bei Elastomeren 6.10.2.4-6
Fehler an Zahnrädern 6.4.1-8
von Schrauben 6.1.1.2-1
Wälzlager 6.3.1.1-9

©Axel Rossmann - Turbocomsult
nur mit Lizenz
als Schulungsunterlage

Hartpartikel, Einbringen im Gießprozess 6.10.2.5-4
Hauptgetriebe, WEA 6.4.2-12
Hauptlager 6.3.1.2-32
Gleitlager 6.3.2-1
Schaden 6.3.1.2-32
Haushaltsgeräte, Getriebe6.4.1-3
Haustechnik
Rohrleitungen 6.11.1.1-1
Wasserrohre 6.11.1.4-.1
Heat Soaking 7.1.2-1, 7.1.2-5, 7.1.2-14
O-Ring Schädigung 6.10.1.2-8
Hebezeugkette, 6.7.2-2
Aufbau und Montage: 6.7.2-2
Betrieb 6.7.2-2
Prüfung 6.7.2-2
Wartung 6.7.2-2
Heißgaseinbruch in Turbine 6.10.3.1.1-4
Heißlauf und Alterung
Radial-Wellendichtring 6.10.2.1-4
Heißlufteinbruch erzeugt Ölfeuer 7.1.4-3
Heißluftleck, Überhitzung elektrischer Leitungen 6.12.1.2-10
Heißriss
an Labyrinthspitze 6.10.3.1.1-23, 6.10.3.1.2-22, 6.10.3.1.2-23
Heißrubbeln, Bremse 6.6.2.1-8, 6.6.2.1-12
Heißstart, Kraftstoffeinfluss 8.1-27
Heißteil
Radbruch durch MoS2 -Schmiermittel 9.1.2-12
Heißteile
Erosion, Kraftstoffeinfluss 8.1-6
Lebensdauer, Kraftstoffeinfluss 8.1-16
Oberflächen, Reaktionen 6.10.3.1.2-3
Problem beim Verdichterwaschen 9.3-3
Schmiermittel 9.1.1-2
Verstopfung 6.10.3.1.2-3
Verunreiningung, Lötrissigkeit 9.3-3
Heißwaschen 9.3-3
Heizungsanlage
Ablagerungen 6.11.1.4-10
Sauerstoffkorrosion 6.12-3
Einfluss
auf die Wasserqualität 6.11.1.4-.10
der Wasserqualität 6.11.1.4-10
Korrosion 6.11.1.4-.10
Probleme 6.11.1.4-.10
Wasser, Sauerstoffanreicherung 6.12-3
Helmholtz-Resonator 6.10.3.1.2-41
Herstellung
Federn, Schädigung 6.2.-16
Rundstahlkette 6.7.2-5
Schraube, Kopf und Gewinde 6.1.1.1-4
Hilfsstoffe 9.1.1-1
Betriebseinflüsse 9.1.1-1
Dichtmittel 9.2-1
Einführung neuer Produkte 9.1.2-5
Enfluss auf Schmiermittel 9.1.2-5
Fette, Reinigung, Dichtung 9.1.1-1
Firmenangaben, Prospekte 9.1.2-1
Reaktionen mit 9.3-8
schädigende Wirkungen 9.1.1-1
Verarbeitbarkeit 9.1.1-1
Verwechslung 9.1.1-1
HMU. *Siehe* Hydromechanical Metering Unit
Hochdruckeinspritzung 8.1-1, 8.1-14
Hochdruckschlauch/Schlauchleitungen 6.12-5
Anwendungen 6.12-5
Endanschlüsse 6.12-5
Korrosion 6.12-9
Lagenaufbau 6.12-16
Peitschen bei Bruch 6.12-5
Reaktionskräfte 6.12-7
Schaden, Verletzungsrisiken 6.12-1
Schädigungen 6.12-9
Sicherheitsmaßnahmen 6.12-1
Versprödung 6.12-9
Werkstoffauswahl 6.12-9
Hochdruckturbine
Kraftstoffeinfluss 8.1-3
Rissbildung 6.12-9
an Verschraubung 6.1.1.2-15
Höchstwert, Definition 7.2-2
Hochtemperaturkorrosion 6.12.1.2-7
Hochtemperaturschmiermittel 9.1.2-3
Hohlniet zur Schaufelfixierung 6.1.2-6
Hohlraumresonator 6.10.3.1.3-11
Homokinetische Gelenke 6.3.4-3
Honeycomb (Wabendichtung) 6.10.3.1.1-12
Einfluss der Zellentiefe 6.10.3.1.1-15
Wabeneinfluss 6.10.3.1.1-16
gefüllt 6.10.3.1.1-12
Schaden 6.10.3.1.1-12
Hot Judder 6.6.2.1-8
Hot strut. *Siehe* Gehäusestreben: heiße
Hot-Spot, an Bremsscheibe 6.6.2.1-12
House Keeping, Kraftstoff 8.3-22
Hüllkurvenanalyse 6.3.1.2-29
Human Factors 6.11.1.2-26
O-Ring Montage 6.10.1.2-3
Hydraulikanlagen
Betriebstemperatur 6.12-11
Schlauchleitungen 6.12-5
Flüssigkeit/Öl/Fluid
Gelöste Luft 6.10.2.4-6
Luftblasen 6.10.2.4-6
Wasser im 6.10.2.4-8
auslösen von Wasserstoffversprödung 6.11.1.1-13
Schädigende Wirkung 6.11.1.1-13
Schädigung von Rohrleitungen 6.11.1.2-2, 6.11.1.2-22
Siedepunktabsenkung 6.12-10
Hydraulikleitung, 6.11.1.1-1
aus Titanlegierung, Schwingermüdung 6.11.1.1-11
Riss 6.11.1.1-10
Druckbelastung 6.11.1.2-11
Isolation 6.11.1.1-13
Hydraulikzylinder, elastische Aufweitung 6.10.2.4-10
Hydrodynamische Schmierung 6.3.1.1-6, 6.3.1.1-12
Schmierfilmaufbau bei Gleitlager 6.3.2-1
Hydrogen Embrittlemen. *Siehe* Wasserstoffversprödung: durch Wasser im Öl
Hydrolyse 7.1.1-6
Hydrostatischer Schmierfilmaufbau bei Gleitlager 6.3.2-**1**
Hylomar® 9.2-1, 9.2-2
Hysterese Dämpfung 6.2.2-2

I

© Axel Rossmann - Turbocomp
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Identifizieren eines Gewaltbruchs 6.1.1.2-2
Impulse beim Zahneingriff 6.4.3-6
Impulsgesteuertes Anziehen von Schrauben 6.1.1.1-16
Inbetriebnahme von Getrieben 6.4.2-6
Indikatorwert (Warnwert) Definition 7.2-2
Industrieatmosphäre 6.12.1.2-3
Infra-Rot-Spektroskopie (FT-IR) 7.2-8
Inhibitoren im Kraftstoff 8.3-4
Inhomogenitäten, Wälzlagerstahl 6.3.1.1-20
Innenbelüftete Bremsscheiben 6.6.2.1-12
Innenbordführung von Wälzlagerkäfig 6.3.1.1-28
Innendruck, Belastung von Rohrleitungen 6.11.1.2-5
Innenliegende Anrisse bei Verzahnung 6.4.1-14
Innere Oxidation. *Siehe* Oxidnester: durch mechanische Beanspruchung
Innere Reibung einer Bürstendichtung 6.10.3.2.3-8
Inspektionsintervalle von Labyrinthdichtung 6.10.3.1.1-27
Instabilität, Labyrinth6.10.3.1.3-4
Isolation von Hydraulikleitungen 6.11.1.1-13
thermische an Rohrleitungen 6.11.1.2-21

J

Joule-Effekt 6.10.2.1-13
Kolbendichtung 6.10.2.4-1
JP-(Flug-) **Kraftstoffe** 8.2-3
Jet-A 8.2-3
Jet-B 8.2-3

K

Kabel, Verschleiß 6.11.1.2-6
Kabelschlagseile 6.9-17
Kabinenluft Verunreinigung
Öleinfluss 7.1.1-4
Reinigungsmittel 9.3-7
Kadmium 9.3-9
Angriff in Öl 7.1.1-6
Probleme an Schrauben 6.1.1.1-12
Käfig von Wälzlager 6.3.1.1-28
Beanspruchung 6.3.1.2-21
Einflüsse 6.3.1.1-25
Führung 6.3.1.1-12, 6.3.1.1-28
Schlupf 6.3.1.1-24
Schäden 6.3.1.1-26
Kaftstoff, freies Wasser im 8.3-1
Kalt gezogener Draht
von Federn 6.2.1-8
von Seilen 6.9-2
Kälteversuch bei Kraftstoff 8.1-8
Kaltfluss
an Schlauch 6.12-16
Schlauchfassung 6.12-7
PTFE 6.3.4-9
Kaltnietungen, Herstellung 6.1.26
Kaltrubbeln, Bremse 6.6.2.1-10
Kaltverfestigen 6.1.1.2-7
Kaltverschweißen. *Siehe* Fressen; Schrauben
Ni-Leg., Ti-Leg 6.1.1.1-20
Titanprothese 6.1.1.2-28
Kaltwaschen 9.3-3
Kantenträger,
Luftlager 6.3.3-9
Überlastung 6.3.3-7
Zahnrad 6.4.2-6
Kardangelenk, Winkelbeschleunigungen 6.4.1-24
Kassettendichtung, Gleitringdichtung 6.10.2.2-4
katalytische Dissoziation, Entstehung von Wasserstoff 6.12.1.2-4
Katalytische Wirkung, Wasserspaltung 6.12.1.2-3
Katalytischer Effekt
an Bürstendichtung 6.10.3.2.3-2
Wasserstoffentstehung 6.12.1.2-7
Katastrophales Versagen von Labyrinthen 6.10.3.1.2-8
Kavitation 6.10.2.4-6
an gedämpften Wälzlagern 6.3.1.1-4
„Counter Jet“ - Druckstoß durch Kraftstoff im Öl 7.1.3.2.2-1
durch Wasser im Öl 6.3.2-11, 7.1.3.2-4
Durch Wellenschwingungen 6.3.2-11
Einfluss der Ölviskosität 6.3.2-11
in Gleitlagern 6.3.2-1, 6.3.2-6, 6.3.2-11
Identifizieren 6.3.2-11
in Gleitringdichtungen 6.10.2.2-6
in Rohrleitungen 6.11.1.2-12
Kolbendichtung 6.10.2.4-1
Kraftstoff 8.1-16, 8.1-22
Kraftstoffpumpe 8.1-12
Pseudokavitation durch Luftansammlungen 6.11.1.2-14
Gasen von Druckflüssigkeit 6.11.1.2-14
Rohrleitung 6.11.1.1-5, 6.11.1.1-9
Schäden an Zahnradpumpen 6.4.1-32
Schmieröl 7.1.2-20
Schwingungserregung 8.1-16
eines Reglers 8.1-22
Ursachen
Gleitlager 6.3.2-11
Druckabfall 6.11.1.2-14
Vermeidung
durch Betrieb 6.11.1.2-14
durch Konstruktion 6.11.1.2-14
Zahnräder 6.4.1-17
Kegelrad-Hohlwellen 6.4.1-24
Kegelstift, Fixierung Wellennabe 6.5-6
Keilnuten, Welle 6.5-8
Keilriemen 6.8.1-1
Alterung 6.8.1-6
Anstreifen an Schutzvorrichtungen 6.8.1-8
Aufbau 6.8.1-2
Auflegen 6.8.1-3
Auslegungsparameter 6.8.1-2
Austauschintervall 6.8.1-1
Einfluss
beschädigter Scheiben6.8.1-6
der Peripherie 6.8.1-3
des Nutgrunds 6.8.1-6
des Riemenbodens 6.8.1-6
Scheiben-Nutflanken 6.8.1-6
von Ablagerungen 6.8.1-8
Fluchtung der Scheiben 6.8.1-6
Geräuschbeurteilung 6.8.1-8
Lebensdauer 6.8.1-1
Leistungsübertragung 6.8.1-8
Mehrriemenantrieb 6.8.1-4
Montage
Fehler 6.8.1-2
Probleme 6.8.1-6
Quellen 6.8.1-4
Riemenspannung 6.8.1-6
Schadensbilder 6.8.1-3
Schallmessung 6.8.1-8
Temperaturmessung 6.8.1-8
Überdehnung 6.8.1-4

© Axel Rossmann - Turbocomsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Überhitzung 6.8.1-4
Geruch 6.8.1-8
Umfeldeinfluss 6.8.1-8
Untergurtrisse 6.8.1-4
Verschleiß 6.8.1-3
Verstärkungsgurt Schaden 6.8.1-3
Vibrationsmessungen 6.8.1-8
Zustandsbewertung 6.8.1-6
Wartungsfehler 6.8.1-2
Keilverzahnung
Brünierrisse 6.4.1-29
Verschleiß 6.4.1-8
Kennwerte von Öl 7.2-6
Kennzeichnung von Kraftstoffbehälter 8.3-22
Kepstrum 6.3.1.2-30
Keramik
Bremsscheibe 6.6.2.1-12
faserverstärkt C-SiC
Kupplungsscheibe 6.6.2.2-7
Luftlager 6.3.3-2, 6.3.3-8
Kupplung 6.6.2.2-7
Reibkupplung 6.6.2.2-1
Kerben, Kerbempfindlichkeit, Kerbfaktor, Kerbwirkung
bei Schrauben 6.1.1.1-4
Feder 6.2.12, 6.2.13
Krafteinleitung 6.1.1.2-7
Schraube 6.1.1.2-7
Titanlegierungen 6.11.1.2-18
Wirkungszahl 6.1.1.2-7,6.6.4-7
Kerbschlagzähigkeit
Rundstahlketten 6.7.2-7
Schraube 6.1.1.3-3
Kette, siehe auch Rollebnkette 6.7-9, 6.7-1, Kettentrieb
Geräusche 6.7-6
Knarren 6.7-6
Längsschwingungen 6.7-7
Längung 6.7-13
Leistungsübertragung 6.7-8
Resonanzfall 6.7-6
Schmierung 6.7-6
Nachschmierintervalle 6.7-6
Quietschen 6.7-6
Schadensursachen 6.7-9
Schwingermüdung 6.7-8
Stoßbelastung 6.7-8
Trockenlauf 6.7-6
Überspringen 6.7-14
Verschleiß 6.7-5
Kettenrad 6.7-5
Schmierstoff 6.7-5
Spannung, Einfluss auf Schwingungen 6.7-7
Stoßbelastungen 6.7-8
Wirkungsgradverlust 6.7-6
Kippsegmentlager, Schaden infloge Stromdurchgang 6.3.2-10
Klebeband, Verunreinigung von Kraftstoff 8.3-5
Kleben
von Anstreifschichten 6.10.3.1.2-63
Probleme bei Metallfilz 6.10.3.1.2-63
Klebestelle (metallisch), Fehlstelle an Rundstahl-Kettenglied 6.7.2-10, 6.7.2-1
Klemmen
Gelenllager 6.3.4-5
Polyamid - Lagerbuchse 6.3.4-10
Wälzlager 6.3.1.2-3
Zahnradpumpen 6.4.1-33
Klemmlänge, Flanschschrauben 6.10.1-10
Klimaanlagen
Frostschaden 6.11.1.4-.12
wasserführend 6.11.1.4-.1
Knarren einer Kette 6.7-6
Knoten (Schwingungs-)
Durchmesserzahl einer Labyrinthschwingung 6.10.3.1.1-9
Kreise von Labyrinthschwingungern 6.10.3.1.1-9
Linien aeroelastischer Anregung 6.10.3.1.3-15
Kohlefaserpartikel, Kurzschluss durch 6.3.1.1-40
Kohlefaserverstärkter Kohlenstoff (C/C), Bremsscheibe 6.6.2.1-14, 6.6.2.1-18
Kohlenstoff im Öl, Verfärbung 7.1.1-11
Koks (aus (Kohlenwasserstoffen)
Ablagerungen, Ursache für Flugunfall 7.1.2-19
Anstreifen durrch 7.1.2-1
Gleitringdichtung 6.10.2.2-8
Heißteilerosion 8.1--26
in Wälzlagern 6.3.1.1-43, 7.1.2-1
Kraftstoffeinfluss 8.1-8
Kolberingdichtung 6.10.2.5-4
Kraftstoffdüse 8.1-18
Kraftstoffeinfluss 8.1-24
Labyrinth 7.1.2-1
Partikel im Öl 7.1.3.1-6
Unterdrückung 7.1.1-4
Kolben
doppelt wirkende 6.10.2.4-8
Dichtung
Abrasionsverschleiß 6.10.2.4-1, 6.10.2.4-5
Aufsprengen 6.10.2.4-1
Blasenbildung im Elastomer 6.10.2.4-1
Chemische Schädigungen 6.10.2.4-1
Dieseleffekt 6.10.2.4-1, 6.10.2.4-3
Elastomer 6.10.2.4-1
Erosion durch Luftbläschen 6.10.2.4-3
Fremdkörper 6.10.2.4-5
Joule-Effekt 6.10.2.4-1
Kavitation 6.10.2.4-1
Rauigkeit im Spalt 6.10.2.4-5
Schaden
durch Luft im Öl 6.10.2.4-5
Luftblasenerosion 6.10.2.4- 1
durch Fluidstrahl 6.10.2.4-5
Schadenbilder 6.10.2.4-1, 6.10.2.4-3
Schleppdruck 6.10.2.4-1
Spaltextrusion 6.10.2.4-1
Stick-Slip-Bewegung 6.10.2.4-8
Strömungserosion 6.10.2.4-1, 6.10.2.4-3
Thermische Schädigung 6.10.2.4-1
Tribosystem 6.10.2.4-3
Verstärkungslagen 6.10.2.4-5
Kolbenfresser 7.1.3.2.2-5
Kolbenkompressoren 6.10.2.5-1
Kolbenmotor, Kraftstoff im Öl 7.1.3.2.2-4
Kolbenring/-dichtung 6.10.2.5-1
als Schwingungsdämpfer 6.10.2.5-2
Bewegung 6.10.2.5-2
Bruchfläche 6.10.2.5-7
Koksablagerungen 6.10.2.5-4
Kontur 6.10.2.5-1
Merkmale für Schadensursachen 6.10.2.5-7
Minutenring 6.10.2.5-2
Quetschdruck 6.10.2.5-4
Rauigkeit 6.10.2.5-4
Schäden 6.10.2.5-1
Schadenbilder 6.10.2.5-7
Schmierung 6.10.2.5-4
Schmierstofftransport 6.10.2.5-4
Trapezring 6.10.2.5-4
Tribosystem 6.10.2.5-1
Überlastungsmerkmale 6.10.2.5-7
Wärmeableitung 6.10.2.5-4
Verbrennungsmotor 6.10.2.5-2

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Kondensationsrost an Rollenkette 6.7-13
Konischen Gewinde, Risbildung 6.11.1.4-.7
Konservierung
Öl auf Schraubengewinden 6.1.1.1-11
Wälzlager 6.3.1.2-26
Konstruktion
Bremse 6.6.2.1-17
Bürstendichtung 6.10.3.2.1-11 6.10.3.2.3-3
Gestaltung, Dichtung 6.10.2.4-10
Getriebe, schadensursächlich 6.4.2-5
Kupplung# 6.6.2.2-6
Labyrinthe 6.10.3.1.3-1
Rohrleitungen 6.11.1.2-11
Vermeidung von Kavitation 6.11.1.2-14
Kolbenstange (Wassereinzug) 7.1.3.2-6
Kerben
Feder 6.2.19
Nuten 6.5-3
Mangel, Ursache für Wartungsfehler 6.11.1.2-26
Zahnräder, Merkmale 6.4.1-4
Kontaktflächen, Ablagerungen 9.1.2-9
Kontur, Kolbenring 6.10.2.5-1
Konischer (kegeliger) **Labyrinthanschluss** 6.10.3.1.2-51
Kopfauflage, Schraube 6.1.1.3-6
Kopfträger, Zahnrad 6.4.3-3
Korbbildung, Seil 6.9-11
Kornausbrüche der Anstreiffläche einer Bürstendichtung 6.10.3.2.2-14
Koronaentladung 7.1.2-21
Körperschall, Getriebe 6.4.3-6
Korrosion
an Zahnrädern 6.4.1-17
Anfressungen an Schrauben 6.1.1.2-2
Biogasanlage 6.12.1.2-7
Bremse 6.6.2.1-2, 6.6.2.1-6
Druckrohrleitung 6.11.1.1-4
durch Kraftstoff 6.2.13, 8.1-14
durch Raketenabgase 9.3-8
durch Reinigungsmittel 6.2.1-3, 9.3-7
durch Schießrückstände 9.3-8
durch Schwitzwasser 6.1.2-19
durch Slikongummi 9.2-1
durch Wasser im Kraftstoff 8.3-2
Einfluss auf Lösbarkeit einer Schraube 6.1.1.3-6
Empfindlichkeit, Feder 6.2.18
fettgeschmiertes Wälzlager 6.3.1.2-16
gesunheitsbedenkliche Verunreinigungen 6.11.1.4-2
Gewinde 6.1.1.1-20
Gleitlager 6.3.2-6, 6.3.2-9
Gleitringdichtung 6.10.2.2-4
Heizungsanlagen 6.11.1.4-10
Hochdruckschlauch 6.12-9
in Wassersystemen 6.11.1.4-2
Kraftstofftankwände 8.2-11
Magnesium im Ölkreislauf 9.3-6
Mikrobiell beeinflusst 6.11.1.4-.4
Nadellager 6.3.4-5
Popniete 6.1.210
Rundstahlkette 6.7.2-4
Schäden
Federn 6.2.1-3
Schlauchfassung 6.12-7
Wälzlager 6.3.1.1-9
Schrauben 6.1.1.1-4
Seile 6.9-4
Drähte 6.9-2
Wälzlager 6.3.1.1-9, 6.3.1.1-43
'Korrosionsfeste' Bauteile
Rundstahlketten 6.7.2-12
Wälzlagerwerkstoffe 6.3.1.1-21
Korrosionsprodukte im Flugzeugtank 8.3-9
Korrosionsschutz
Getriebe 6.4.2-6
Öl 7.1.1-3
Wirkung auf O-Ringe 6.10.1.2-12
Schraube 6.1.1.3-5
Wälzlager 6.3.1.2-25
Krafftstoffsystem, Rohrleitungen 6.11.1.2.1-1
Kräfte
an Rohrleitung 6.11.1.1-2
Einleitung, Kerbwirkung 6.1.1.2-7
Einwirkung Wälzlagermontage 6.3.1.2-33, 6.4.1-34
Kraftfahrzeug
Federn 6.2.11
Getriebe 6.4.1-3
Hybridantrieb, Wälzlagerschaden , Stromdurchgang 6.3.1.1-40
Kraftstoff 8.1-1, 8.2-1
Ablagerungen von Elastomeren 8.1-12
Abweichungen von Spezifikation 8.1-27
Additive 8.1--24
Alkohole 8.2-1
Antioxidantien 8.1-24
Arten von Wasser im 8.3-5
Bakterien 8.3-6
Begriffe zu Eigenschaften 8.2-6
Beimengungen 8.2-11
Bildung von Mikroorganismen 8.2-5
Braunfärbung, unmagnetische Ablagerungen 8.3-17
Chloride als Verunreinigung 8.3-19
dunkelbrauner spröder Belag 8.3-10
dunkle Ablagerungen 8.3-14
Eigenschaften 8.1-3, 8.2-1, 8.2-9
Einfluss
auf das Startverhalten 8.1-6
auf das Zündverhalten 8.1-6
auf den Nachbrenner 8.1-3
auf die Heißteillebensdauer 8.1-16
auf die Hochdruckturbine 8.1-3
auf die Koksbildung 8.1-8
auf die Lebensdauer von Heißteilen 8.1-6
auf die Niederdruckturbine 8.13
auf die Rauchbildung 8.1-8
auf die Thermoermüdung 8.1-16
auf die Verbrennungsstabilität 8.1-16
auf die Wärmestrahlung 8.1-6
auf die Zündfähigkeit 8.1-8
auf Eisbildung, fehlernder Enteisungszusatz 8.1-30
auf Elastomere 8.1-11
auf Elastomeranstreifbelag 8.1-12
auf Emissionen 8.1-8
uf Heißstart 8.1-27
auf Koksablagerungen 8.1-24
auf Low NOx 8.1-16
auf O-Ringe 8.1-11
auf Startprobleme 8.1-22
auf Überhitzungsschäden

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

8.1-6
auf Verdichterpumpen 8.1-27
auf Wellendichtringe 8.1-11
der Ausgangsstoffee 8.2-1
der Herkunft 8.1-6, 8.2-1
der Herstellung 8.2-1
des Siedepunkts 8.1-8
von Stickstoff 8.1-8
elektrische Funken 8.2-13
Entflammbarkeit 8.2-3
Entzündlichkeit 8.2-13
Erstarrungspunkt 8.1-7
Erweiterung der Spezifikation 8.1-7
Fasermaterial als Filter 8.3-4
Flamminstabilität 8.1-6
Flugunfall durch Wasser im 8.3-19
gelatineartige Substanz 8.3-17
Gum-Bildung 8.1-24
House Keeping 8.3-22
Inhibitoren 8.3-4
Kavitation 8.1-16, 8.1-22
klebrige Ablagerungen 8.2-11
Kokskügelchen 8.1-24
kollabierter Filter 8.3-11
Korrosion 6.2.1-3; 8.1-14
durch Wasser 8.3-2
von Aluminium 8.3-2
von Magnesium 8.3-2
Kupfer im 8.2-11
Kupferhaltige Verunreinigung im 8.1-27
Lagerung/Aufbewahrung 8.2-1
Mechanismus der Wasseransammlung 8.3-13
Mikroorganismen 8.3-9
Mindestabsetzzeiten in Tanks 8.3-3
mischen mit Flugbenzin 8.3-2
Oxidationsstabilität 8.3-4
Partikel 8.3-2
Pilzbefall 8.2-3
Planzenöle 8.2-3
Probleme im Betrieb 8.1-5
Qualität 8.2-11
Quellen von Elastomeren 8.3-2
Rapsöl 8.2-3
Reaktion mit Silber 8.1-14
Schäden durch Bakterien 8.3-6
schädigende Auswirkungen 8.2-12
Schwefel im Kst 8.3-24
schleimige Ablagerungen 8.2-11
Schmierfähigkeit/-wirkung 8.1-14, 8.1-27
Schwefelgehalt 8.1-27
von Vielkeilkupplungen 6.6.1-1
Schwefel 8.1-9
Konzentration 8.3-1
Sieb 8.1-29
Siedeverlauf 8.1-22
Spezifikation 8.1-5; 8.1-18
Spurenmetalle 8.1--24
Stabilität, chemische 8.3-4
Stickstoff
Gehalt 8.1-24
Verbindungen 8.2-11
Streuung der Eigenschaften 8.1-6
Temperaturen 8.1-24
Thermische Stabilität 8.1-24
überhitzt 8.1-24
Überprüfung des Wasseranteils 8.3-6
ungewöhnlich
Farbe 8.3-9
Geruch 8.3-9
Vanadium 8.1-9
Veränderung im System 8.2-11
Verdampfungsverhalten 8.1-6, 8.1-16, 8.1-22
Verfärbung 8.3-10
Verlöschen des Triebwerks durch Wasser 8.3-14
Verschmutzung 8.3-1
Verstopfen von Reglern 8.3-2
Verunreinigung 8.1-1, 8.3-2
durch Klebeband 8.3-5
Vielkeilkupplung in 8.1-27
Viskosität 8.2-3
Einfluss auf das Sprühbild 8.1-22
Vorwärmung 8.1-8
Wasser im 8.3-2
Aufnahme 8.3-1
Wasserstoffanteil 8.1--6
Wide-cut 8.2-13
Zerstäubung 8.2-3
Kraftstoff im Schmieröl 7.1.3.2.2-1, 7.1.3.2.2-4, 7.1.4-5
Dampfblasenbildung 7.1.3.2.2-1
Feuer 7.1.3.2.2-4
Kavitation 7.1.3.2.2-1
Schäden 7.1.3.2.2-1
Ursachen 7.1.3.2.2-4
Wärmetauscherleck 7.1.3.2.2-2
Kraftstoffbehälter, Kennzeichnung 8.3-22
Kraftstoffdrainage, verstopfen durch Dichtmittel 9.2-3
Kraftstoffdüse
Koksablagerungen 8.1-18
Schwingungen 6.11.1.2-11
Kraftstoffeinsparung durch Waschen der Verdichter 9.3-5
Kraftstoffeinspritzung
intermittierende 8.1-14
verstopft 8.3-10
Kraftstoffenteisung 8.1-27
Kraftstofffilter 8.1-3
Schleimstoffe 8.2-3
Zellulose 8.3-17
Kraftstoffleck 8.2-13
gebrochene Rohrleitung 6.11.1.2.1-4
Öl/Kst-Wärmetauscher 6.11.1.2-25
Sprühfahne 6.11.1.2-26
Kraftstoffleitung
Durchgescheuert 6.11.1.2.1-2
Schwingbruch ausgehend von Fretting 6.11.1.2.1-5
Kraftstoffmanagement 8.3-11
Kraftstoffpumpe 8.1-3
Kavitation 8.1-12
Schädigungen 8.1-2
MTBF 8.1-3
MTBUR 8.1-3
Kraftstoffregler
Kraftstoffrohrleitung, Rissbildung 6.11.1.2-27
Kraftstoffschmierung einer Pumpe 8.1-14
Kraftstoffsystem 8.1-1
Arbeiten am 8.3-4
Auswirkung auf Komponenten 8.1--3
Brennkammerprobleme 8.1-3
ETOPS-Zulassung 8.1-3
Gestaltung gegen Verunreinigungen 8.3-24
einer Turbomaschine 8.1-1
Kraftstofftank
Schwitzwasserbildung 8.3-13
Reinigung 8.3-23
Wasseransammlung 8.3-6
Kraftstofftröpfchen, Autooxidation 8.1-18
Kraftstoffverbrauch, spezifischer (SFC) 8.1-9
Einfluss von Verdichterwaschen 9.3-2
Kraftstoffvereisung, Merkmal kollabierter Filter 8.3-11
Kraftstoffversorgung, Verunreinigungen 8.3-20
Kraftübertragung im Schraubengewinde 6.1.1.1-8
Kraftwerkstechnik, Rohrleitungen 6.11.1.1-1
Kranseile 6.9-17

© Axel Rossmann, Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Nutzungsrechten

Kreiselkräfte, versteifendeWirkung bei Wellen 6.6.4-16
Kreisverschiebegelenk 6.3.4-3
Kreuzgelenk 6.3.4-3
Kreuzschliff, Zylindergleitfläche 6.10.2.5-4
Kriechen
Bildung von Mikrorissen 6.12.1.2-9
Brüche an Schrauben 6.1.1.2-2
Druckrohre 6.12.1.2-9
in Schraubenverbindungen 6.1.1.1-11, 6.1.1.3-3
Kriechfestigkeit, PTFE 6.3.4-9
Kriechporen 6.12.1.2-9
Kriechströme
durch Grafitschmiermittel 9.1.2-3
Schaden an Schlauchgummi 6.12-2
Kryogene Temperaturen, Gasleitung 6.12.1.2-3
Kügelchen
im Kraftstoff 8.1--24
im Öl 6.4.1-12, 7.1.3.1-6
Kügelcheneffekt 6.10.3.1.2-65
Kugelstrahlen
Federn 6.2-13, 6.2-18
von Zahnrädern 6.4.1-30
Kühler
Frostschaden 6.11.1.4-.12
wasserführend 6.11.1.4-.1
Kühlschmierstoffe, Auslösen von Schäden 6.1.1.2-9
Kühlwasser
Einbruch 7.1.3.2-6
Führung, Flachdichtung 6.10.1-14
Schläuche 6.12-2
Kunstharzschichten in Labyrinthen 6.10.3.1.1-20
Kunststoffbauteile, elektrische Aufladung 6.3.1.1-40
Kunststoffbeilage 6.11.1.2-23
Kunststoffe
Biokorrosion 6.11.1.4-.5
für Gelenklaqger 6.3.4-7
Quellen in Öl 7.1.1-6
Schädigung durch Reinigungsmittel 9.3-8
Schweißungen 6.11.1.4-.5
Kunststoffkäfige für Wälzlager. Eignung 6.3.1.2-22
Kunststoffrohre
Frostschaden 6.11.1.4-.13
sauerstoffdiffusibel 6.11.1.4-.10
Kunststoffschläuche
Feuchtigkeitsdiffusion 6.12.1.2-4
Gasdurchlässigkeit 6.12-2
Kupfer
im Kraftstoff 8.2-11
als Verunreinigung 8.1-27
in Hochtemperaturschmiermittel 9.1.2-3
Reaktion mit Öl 7.1.1-6
Kupferrohre, Anordnung zur Strömung 6.11.1.4-.2
Kupplung 6.6.2.1-2
als Überlastungsschutz 6.6.3-5
Ausrichtung mit Messuhren 6.6.3-7
Belagträger 6.6.2.2-3
Druckplatte 6.6.2.2-3
Einfluss des Schwungrads 6.6.2.2-3
Einflüsse auf 6.6.2.2-2
Elastizität 6.6.1-4
Flansche, Verdrehsicherungen 6.6.4-10
Früherkennung von Schäden 6.6.1-11
keramische Werkstoffe 6.6.2.2-1
Konstruktion 6.6.2.2-6
Lebensdauer, Einfluss eines Ausrichtungsfehlers 6.6.3-5
Optische Vermessung 6.6.3-7
Vorgaben 6.6.3-7
Reibbeläge 6.6.2.2-3
Reibverschleiß 6.6.1-2
Reibwert 6.6.2.2-5
Rupfen 6.6.2.1-1, 6.6.2.2-5
Schäden
Risikominimierung 6.6.1-11
Ursachen 6.6.2.2-2
Scheibe aus keramischen faserverstärkten Werkstoff C-SiC 6.6.2.2-7
Carbon/Carbon (C/C) 6.6.2.2-6
'Schleifen' im Betrieb6.6.2.2-2
Steifigkeit, Elastomerkupplung 6.6.3-1
Stick-Slip-Effekt 6.6.2.2-5
Torsionsdämpfer 6.6.2.2-5
fliehkraftbetätigt 6.6.2.2-1
mit einem flexiblen Zwischenelement 6.4.1-24
Ursaxhe für Getriebeschäden 6.4.2-6
Werkstoffe 6.6.2.2-1
Kurzschluss
durch Grafitschmiermittel 9.1.2-3
durch Kohlefaserpartikel 6.3.1.1-40
Kurzzeitüberlastung, Welle 6.5-11

L

Labrinth (-dichtung) 6.10.1-4, 6.10.3.1.1-1, 6.10.3.1.1-24
Abrieb 6.10.3.1.1-4
Achsschubausgleich6.10.3.1.1-1
aeroelastische Anregung 6.10.3.1.2-34, 6.10.3.1.3-2, 6.10.3.1.3-13
Aeroelastische Instabilität 6.10.3.1.3-9
Alterung 6.10.3.1.1-4
Anlaufbelag, /-einlaufbelagb 6.10.3.1.1-2, 6.10.3.1.1-33
Alterung 6.10.3.1.2-13
Betriebseigenschaften 6.10.3.1.1-33
Tribologische Betriebseigenschaften 6.10.3.1.1-33
Anordnung , 6.10.3.1.1-46.10.3.1.1-7, 6.10.3.1.3-29
Anregungsmechanismen 6.10.3.1.2-59
Anstreifverhalten 6.10.3.1.1-3
artspezifische Eigenschaften 6.10.3.1.1-17
auf Deckbändern 6.10.3.1.1-4
Aufheizung 6.10.3.1.1-24
aus einer Titanlegierung 6.10.3.1.2-24
Ausbeulen 6.10.3.1.2-17
Auslegung 6.10.3.1.3-1
Aussage von Verschleißmustern 6.10.3.1.2-47
Auswahl des Tribosystems 6.10.3.1.1-19
Auswirkung des Verschleißzustands 6.10.3.1.1-6
Bedingung für eine Schwingung 6.10.3.1.2-48
Belagausbrüche 6.10.3.1.2-8
belastungsspezifische Schadensbilder 6.10.3.1.2-9
Belüftung von Scheiben 6.10.3.1.1-5
Betriebsparameter 6.10.3.1.1-3
Betriebsverhalten, Spaltgröße 6.10.3.1.1-18, 6.10.3.1.2-18
Beulempfindlichkeit 6.10.3.1.2-17
Dämpfung 6.10.3.1.2-6, 6.10.3.1.2-48, 6.10.3.1.3-13
Dämpfungsbandage

© Axel Rossmann - Turboconsult
Nur zum Schulungseinsatz mit Lizenz

6.10.3.1.2-18, 6.10.3.1.2-21, 6.10.3.1.3-19, 6.10.3.1.3-24
Dichtwirkung 6.10.3.1.1-2
Druckdifferenz, notwendige 6.10.3.1.2-27
dynamisches Verhalten 6.10.3.1.1-4
Einfluss
auf Achsschub 6.10.3.1.1-4, 6.10.3.1.1-6
auf das Gesamttriebwerk 6.10.3.1.1-4
auf Lagerkräfte 6.10.3.1.1-6
auf Modultausch 6.10.3.1.1-18
der Kammerbreite 6.10.3.1.1-10
der Kammerform 6.10.3.1.1-11
der Labyrinthringe 6.10.3.1.2-4
der Labyrinthspitzen 6.10.3.1.2-4
der Leckluftströmung 6.10.3.1.2-4
der Spalthöhe 6.10.3.1.1-11
der Spaltlänge 6.10.3.1.1-10
der Spitzenform 6.10.3.1.1-1, 6.10.3.1.2-4
der Spitzenneigung 6.10.3.1.1-11
des Anstreifbelags 6.10.3.1.2-6
des Spitzenwerkstoffs 6.10.3.1.2-4
Einlaufverhalten 6.10.3.1.2-13
Erosion 6.10.3.1.2-18
erweiterter Dichtspalt 6.10.3.1.2-31
Ersatz durch Bürstendichtung 6.10.3.2.3-3
Fail safe Position an einer Scheibe 6.10.3.1.2-27
Fertigungs- und Prüfverfahren 6.10.3.1.2-6
Formstabilität 6.10.3.1.3-2
Fremdkörpereinwirkung 6.10.3.1.2-14
Fremdpartikel aus 6.10.3.1.1-30
Funktion 6.10.3.1.1-4
gekerbte Spitzen 6.10.3.1.3-4
gelötet 6.10.3.1.3-17
Gestaltung 6.10.3.1.1-2, 6.10.3.1.1-28
Geometrie, bestimmende Faktoren 6.10.3.1.1-2
Einfluss auf die Dichtwirkung 6.10.3.1.1-10
Haftfestigkeitsprobleme der Anstreifschicht 6.10.3.1.1-20
Heißrisse 6.10.3.1.2-22, 6.10.3.1.2-23
hochfrequente Schwingungen 6.10.3.1.2-2
in Turbinen 6.10.3.1.1-28
in Verdichtern 6.10.3.1.1-28
Inspektionsintervalle 6.10.3.1.1-27
katastrophales Versagen 6.10.3.1.2-8
Knotenlinie bei aeroelastischer Anregung 6.10.3.1.3-15
Kolbenkräfte 6.10.3.1.1-6
Konfigurationen 6.10.3.1.1-17
Kriterium für Schwingungsgefährdung 6.10.3.1.3-12
Lagerkammerdichtungen 6.10.3.1.1-30
Leckströmung 6.10.3.1.1-2
notwendige 6.10.3.1.2-27
Lotschichten als Anstreifschicht 6.10.3.1.1-19
Luftschwingungen 6.10.3.1.1-15, 6.10.3.1.3-22
Vermeidung 6.10.3.1.3-32
Mängel und Versagensursachen 6.10.3.1.2-1
Materialaufschmieren 6.10.3.1.2-8
mechanische Beanspruchung 6.10.3.1.1-2
mechanischen Dämpfer 6.10.3.1.3-12
mit Drahtdämpfungsring 6.10.3.1.2-33
mit Honigwaben
gefüllte 6.10.3.1.1-19
ungefüllte 6.10.3.1.1-19
mit geringer Spitzenhöhe 6.10.3.1.3-29
mit Grammophonrillen-Struktur 6.10.3.1.1-19
mit Kunstharzschichten 6.10.3.1.1-20
mit Silikongummi 6.10.3.1.1-19
mit Versteifungssteg 6.10.3.1.2-18
mit Wasserglas als Anstreifschicht 6.10.3.1.1-20
Modulbauweise, Problem 6.10.3.1.2-3
Montage 6.10.3.1.1-18
Schäden 6.10.3.1.2-3
Ölkoks 6.10.3.1.1-30, 7.1.2-10,
Position, günstige an einer Scheibe 6.10.3.1.2-27
Problem, Modulbauweise 6.10.3.1.2-3
Radialverdichterrad 6.10.3.1.2-55
Reibungsdämpfung 6.10.3.1.3-10
Reparatur 6.10.3.1.1-19
Tauglichkeit 6.10.3.1.1-4, 6.10.3.1.1-22
Resonanzbedingung 6.10.3.1.3-8, 6.10.3.1.2-45
Riss
Bildung 6.10.3.1.2-8, 6.10.3.1.1-21
in den Spitzen 6.10.3.1.2-22
Stoppeffekt einer abgestuften Spitze 6.10.3.1.1-24
Wachstum 6.10.3.1.1-22
Rundheit 6.10.3.1.3-8
Schaden 6.10.3.1.2-1, 6.10.3.1.2-8
Abhilfen 6.10.3.1.3-1
Anfälligkeit 6.10.3.1.2-4
an Spitzenpanzerungen 6.10.3.1.2-8
axiale Lagerlast 6.3.1.2-3
Bruchfläche, 6.10.3.1.1-1
durch dynamische Belastung 6.10.3.1.3-1
durch thermische Gradienten 6.10.3.1.2-2
Konstruktive Abhilfen 6.10.3.1.3-10
ursächliche Betriebseinflüsse 6.10.3.1.2-1
Verhütung 6.10.3.1.3-11
schädigendere Einflüsse 6.10.3.1.2-4
Schwingermüdung 6.10.3.1.2-8
Schwingung 6.10.3.1.1-8, , 6.10.3.1.1-9, 6.10.3.1.2-18, 6.10.3.1.3-17
Dämpfer 6.10.3.1.2-6, 6.10.3.1.3-9
Gefährdung 6.10.3.1.3-12
Knotenkreise 6.10.3.1.1-9
Strömungsanregung 6.10.3.1.3-2
Ursachen 6.10.3.1.1-8
vermeiden 6.10.3.1.3-8, 6.10.3.1.3-34
Segmentierter Labyrinthring 6.10.3.1.3-8
selbstverstärkenden Schadensmechanismus 6.10.3.1.2-15
Anstreifvorgang 6.10.3.1.2-2

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Spalt
Änderung 6.10.3.1.1-2
Größe 6.10.3.1.2-18
Vergrößerung 6.10.3.1.2-8
Verluste 6.10.3.1.1-2
Spitzen
Abriebpartikel 6.10.3.1.1-22
Anstreifen
vermeiden 6.10.3.1.3-7
Kräfte 6.10.3.1.1-22
Fail safe-Verhalten 6.10.3.1.1-22
Geometrie 6.10.3.1.1-20, 6.10.3.1.3-3
kammartig 6.10.3.1.3-4
kleine 6.10.3.1.3-31
Gratbildung 6.10.3.1.2-9
Heißrissbildung 6.10.3.1.1-23
Panzerung 6.10.3.1.1-18
schneidfähige 6.10.3.1.3-28
Abplatzer, Al-Oxid 6.10.3.1.2-10
Wälzlagerschädigung durch Partikel 6.3.1.1-43
Verschleiß 6.10.3.1.1-22
Wärme
Entwicklung 6.10.3.1.1-20
Stau 6.10.3.1.1-20
Spiralrillen 6.10.3.1.1-23
Steg, tragender an Rotorscheiben 6.10.3.1.2-26
Anbringungsort 6.10.3.1.3-26
integraler 6.10.3.1.3-16
Stützkegel 6.10.3.1.2-43, 6.10.3.1.3-8
Schaden 6.10.3.1.2-51
Stützring 6.10.3.1.3-22
Temperaturgradienten 6.10.3.1.3-1
thermischer Verzug 6.10.3.1.3-7
Überhitzung 6.10.3.1.2-8
Gefahr 6.10.3.1.3-3
Schäden 6.10.3.1.2-2
unbeherrschbarer Anstreifvorgang 6.10.3.1.1-24
ungünstige
Gestaltung 6.10.3.1.3-16
Materialpaarung 6.10.3.1.2-61
Versagensmechanismus 6.10.3.1.2-13
Verschleiß, 6.10.3.1.1-7,
Versteifungsringe 6.10.3.1.3-21
Verzug 6.10.3.1.2-8
durch Aufheizen 6.10.3.1.3-25
Wabendichtung (Honeycomb) 6.10.3.1.3-2
Wärmehaushalt 6.10.3.1.3-3
Zähne mit Kerben 6.10.3.1.3-7
Zündung eines Feuers 6.10.3.1.3-2
zwischen zwei Wellen
Ölfeuerzündung 6.10.3.1.1-30schädigende Wirkung auf andere Komponenten 6.10.3.1.2-3
Labyrinthring
als integral er Bestandteil einer Rotorscheibe 6.10.3.1.2-24
Aufgeschrumpfte, aufgepresst 6.10.3.1.3-35
Beulgefahr 6.10.3.1.1-22
Bruch 6.10.3.1.2-23
mit Axialrissbildung 6.10.3.1.2-34
mit Steckverbindung 6.10.3.1.3-31
Risswachstum 6.10.3.1.1-27
Versteifung 6.10.3.1.2-43
Lager
Einfluß auf Lager 6.3.1.2-32, 6.3.1.2-33
Anlauffarben 9.1.2-9
Elastische Zentrierung 6.3.1.1-4
Koks/Ölkoks 7.1.2-1, 7.1.2-5
Prinzip, gedämpfte 6.3.1.1-4
Permanentschmierung 6.3.4-1
Buchse/Büchse 6.3.4-7
aus Kunststoff 6.3.4-7
aus Polyamid 6.3.4-7
Klemmen 6.3.4-10
PTFE 6.3.4-7
Quellen in Öl 7.1.1-7
Lagergehäuse, Ölverkokung 7.1.2-12
Lagerkammer 6.10.3.1.1-4
Abdichtung 6.10.3.1.1-4
Aufbau 6.10.3.1.1-30
Ölfeuer 7.1.4-2, 7.1.4-3, 7.1.4-13
Ölkoks/-verkokung 7.1.2-5, 7.1.2-14
Dichtungen, Labyrinthe 6.10.3.1.1-30
Lagerkraft
Dichtungszustand 6.10.3.1.1-7
Labyrintheinfluss6.10.3.1.1-6
Lagerlebensdauer
bei Wasser im Öl 7.1.3.2-4
Einfluss von Partikeln im Öl 6.3.1.2-20
Lagermetall, Oxidation durch Wasser im Öl 7.1.3.2-4
Lagerreinigung, Schädigung durch Ultraschall 6.3.1.1-22
Lagerschaden
Ablaufphasen 6.3.1.2-4
Al-Oxid Panzerung 6.10.3.1.2-10
Ölaustritt als Folgre 6.3.1.2-4
Ölverkokung 7.1.2-12
Lagerschmierung, Überwachung 6.3.2-3
Lagertemperatur
äußere Messung 6.3.2-3
Schadenssymptom 6.3.1.2-2
Lagerung (Aufbewahrung)
Rundstahlketten 6.7.2-2
von Kraftstoff 8.2-1
Längsriefen an Feder 6.2.18
Längsrisse, in Rohrleitungen 6.11.1.2-9
Längsschwingungen einer RollenkKette 6.7-7
Längung, Rollenkette 6.7-13
Langzeitverhalten, Bürstendichtung 6.10.3.2.1-16
Laschennbruch, Nutmutter 6.1.1.2-18
Laser Strukturierung von Oberflächen 6.10.2.5-2
Lastkollektive von Getrieben 6.4.2-12
Lasttrum, Antriebskette 6.7-3
Laufbahnschäden
Gleitringdichtungen 6.10.2.2-6
Rückschlüsse bei Wälzlagern 6.3.1.2-30
Laufende Seile 6.9-1
Laufflächenbeschädigungen
bei Wälzlagern 6.3.1.1-6
Laufrille in der Anstreiffläche einer Bürstendichtung 6.10.3.2.2-14
Laufspur
Bremsscheibe 6.6.2.1-6
Wälzlager 6.3.1.2-10
Lebensdauer
Anschlagketten 6.7.2-2
Begrenzung bei Wälzlager 6.3.1.1-8
Bewertung, Seil 6.9-14
Bremsen 6.6.2.1-2
Keilriemen 6.8.1-1
Seile 6.9-1
Bewertung, Seil 6.9-14
Verkürzung durch Rost im Öl 7.1.3.2-2
von Heißteilen, Kraftstoffein-

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

fluss 8.1-6
Wälzlager 6.3.1.1-15
Zahnräder 6.4.1-8
Zahnriemen 6.8.2-2, 6.8.2-5
Leck
an Gleitdichtungen 6.11.1.2-20
Erkennen 6.11.1.2-26
fettgeschmiertes Wälzlager 6.3.1.2-16
Inspektion, Wellendichtring 6.10.2.1-13
Probleme beim Nachweis 6.11.1.2-4
Rohrleitungen 6.11.1.2-2
Leckluft
Brand 6.12.1.2-3
erforderliche für Labyrinthe 6.10.3.1.2-27
Lecköl
Schmierung von Vielkeilkupplungen 6.6.1-1, 6.6.1-9
Leckrate, hohe bei Radial-Wellendichtringen 6.10.2.1-10
Leckströmung 6.5-20
Reynoldzahl 6.10.3.1.1-22
Labyrinthdichtung 6.10.3.1.1-2
ungleichmäßige am Umfang 6.5-20
Leerlauf, als Dichtlauf ungenügend 6.11.1.2-26
Leichtbau
Gehäuseflansche 6.10.1-5
medizinische Anwendung 6.1.1.2-28
Schrauben 6.1.1.1-1
Leichtmetall
Gehäuse, Überholung 6.1.1.3-5
Gewindebohrungen 6.1.1.2-24
Gewindeeinsatz in 6.1.1.2-24
Legierungen, Schwingfestigkeit 6.4.2-11
Schrauben 6.10.1-10
Stehbolzen in 6.1.1.2-22
Leistungsaufnahme, ungewöhnliche als Warnzeichen 9.1.2-8
Leistungsgetriebe 6.4.1-3
Leistungsübertragung
Keilriemen 6.8.1-8
Kettentrieb 6.7-8
Leitungen
Verschleiß 6.11.1.2-6
Verschraubungen
O-Ring-Leck 6.10.1.2-12
LHS 6.10.3.2.3-8. *Siehe auch* Low Hysteresis Seal
Lichtogen, Schädigung von Rohrleitungen 6.11.1.2-2
Litzenseil 6.9-17
LME (Lötrissigkeit) 6.1.1.1-1, 9.1.2-3
Lochfraß 9.3-10
Schraube 6.1.1.3-7
Wassersystem 6.11.1.4-.2
Lockern/Lockerung
Popniet 6.1.210
Verschraubung 6.1.1.1-9
von Rohrleitungen 6.11.1.2-4
von Rohrschellen 6.11.1.2-23
Lohrentzeffekt (Dieseleffekt, Pseudokavitation) 6.10.2.4-6, 6.11.1.1-9, 6.11.1.2-12, 6.11.1.2-13, 8.1-12
Longitudinalwellen 6.10.3.1.2-38
Losbrechen von Gewinden 6.1.1.1-20
*Kräfte **9.1.2-8***
Lösen
festsitzender Schrauben 6.1.1.1-21, 6.1.1.3-6
unter Einfluss von Korrosion 6.1.1.3-6
von Verschraubungen 6.1.1.1-16
Turbinenrotor 6.1.1.2-26
Lostrum bei Übertragungskette 6.7-3
Lösungsmittel, Wirkung auf Elastomere 6.10.1.2-12
Lötrissigkeit. *Siehe* LME, an Schrauben 6.1.1.1-6
Heißteilverunreiningung 9.3-3
Low Hysteresis Seal (Bürstendichtung) 6.10.3.2.1-14
Low NOx
Kraftstoffeinfluss 8.1--16
Brennkammern 8.1-6
Luft
Rohrleitung 6.12.1.2-1
im Öl, Schaden an Kolbendichtung 6.10.2.4-5
Luft-/Gaslager 6.3.3-1
Luft-/Sauerstoffzutritt bei Rohrmontage 6.12.1.2-7
Luftabscheider für Schmieröl 7.1.2-21
Luftansammlungen, Pseudokavitation 6.11.1.2-14
Luftausscheidung (Fluid) 6.10.2.4-6
Luftbläschen
Erosion an Kolbendichtung 6.10.2.4-3
Luftblasen in Hydraulikfluid 6.10.2.4-6
Luftblasenerosion an Kolbendichtung 6.10.2.4-1
Luftblasenkavitation (Pseudokavittion) 6.10.2.4-6
Lufteinschlüsse im Wassersystem 6.11.1.4-.4
Lüfterrad, Schwingbruch 6.4.1-27
Luftfeder 6.2.28
Quellen 6.2.28
Rissfelder 6.2.28
Versprödung 6.2.28
Luftfeuchtigkeit, semipermeable Membranen 6.12.1.2-4
Luftkeil, Bildung bei Flachriemen 6.8.3-2
Luftlager
Abhebedrehzahl 6.3.3-9
aerodynamisches Lager 6.3.3-4
aerostatische Systeme 6.3.3-4
Air-Hammereffekt 6.3.3-7
Aufnahme von Achsschub 6.3.3-9
aus Keramiken 6.3.3-2, 6.3.3-8
Bautypen/Bauformen 6.3.3-2, 6.3.3-4
Funktionsprinzipien 6.3.3-4
in Turbomaschinen 6.3.3-9
Kantenträger 6.3.3-9
Kantenüberlastung 6.3.3-7
Massveränderungen 6.3.3-8
Probleme 6.3.3-6
Schwingverhalten 6.3.3-7
Luftleitungen, Gefahr bei Versagen 6.12.1.2-10
Luftsackbildung in Rohrleitung 6.11.1.2-14
Luftschwingung 6.10.3.1.2-38
in Labyrinthen 6.10.3.1.1-15, 6.10.3.1.3-22
Vermeidung 6.10.3.1.3-32
in Ringkanälen 6.10.3.1.2-45
Lufttransport (im Flugzeug), Frostschaden 6.11.1.4-.13

M

Magnesium/-legierungen
Korrosion
durch Kraftstoff 8.3-2
Wasser im 8.3-19
durch Silber 9.1.2-3
im Ölkreislauf 9.3-6
Wasser im Öl 7.1.1-6
Gehäuse, Brand eines Anbaugetriebes 6.1.1.2-21

© Axel Rossmann - Turbocomm
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Guss, Beschädigung von Gewinden 6.1.1.2-22
Magnet
Detektoren 6.3.1.2-6
Späne-/Chipdetektor, 6.3.1.2-10, 7.2-20
Magnetfeld, Einfluss auf Wälzlager 6.3.1.1-33
Magnetinduktive Streufeldprüfung, Seilprüfung 6.9-14
Magnetische Partikel, im Öl 7.1.3.1-8
Magnetische Rissprüfung,
Magnetisierte Wälzlager 6.3.1.1-38
Magnetit-Deckschicht 6.11.1.4-10
Magnetsensor
Inspektion 7.2-23
7.2-1
Magnetstopfen (Magnetplugs, Magnetsonde) 6.3.1.2-6, 7.1.3.1-8, 7.2-1, 7.2-16
Ablagerungen 7.1.3.1-1, 7.1.3.1-9, 7.2-18, 6.3.1.2-10
Befund 6.3.1.2-4
Dokumentation 7.2-17
Entscheidungsbaum 7.2-18
Position des Sensors 7.2-16
Probleme 7.1.3.1-8
Zuverlässigkeit 7.2-19
Makroschadensbefund, Zahnriemen 6.8.2-6
Mangelschmierung 6.3.1.2-19, 9.1.1-5
Manschetten an Rohrleitungen 6.11.1.2-21
Marderbiss, Schlauch 6.12-16
Maschenweite, Frischölfilter 6.3.1.2-21
Maschinenüberwachung
Fachbegriffe 7.2-2
Getriebe 6.4.3-1
Maßnahmewert, Definition7.2-2
Maße
Ungenauigkeiten, Rohrleitungen 6.11.1.2-4
Veränderungen, Luftlager 6.3.3-8
Material
Aufbau, Labyrinthe 6.10.3.1.2-8
Kombination bei Labyrinthen 6.10.3.1.2-61
Probleme bei O-Ringen 6.10.1.2-2
Materialübertrag, Bremse 6.6.2.1-6
MCD. *Siehe* Magnetic Chip Detector
Mechanical seal face type. *Siehe* Axial-Gleitringdichtung
Mechanischen Dämpfer für Labyrinthdichtung 6.10.3.1.3-12
Medien
verschüttete, Schädigung durch 6.11.1.2-22
Beständigkeit gegen, Flachdichtung 6.10.1-6
Medizininsche Anwendung
Titanlegierungen 6.1.1.2-28
Leichtbau 6.1.1.2-28
Meeresatmosphäre, Verhalten MoS2-haltiger Gleitlacke 6.3.4-6
Merkmale von Schadensursachen, Kolbenringdichtung 6.10.2.5-7
Messing
Wasserarmaturen 6.11.1.4-.8
Späne 6.1.1.2-16
Messuhren zur Kupplungsausrichtung 6.6.3-7
Metallbrand/Metallfeuer
Gasleitung 6.12.1.2-4
Zündtemperatur 6.12.1.2-4
Zündung durch Anstreifvorgänge 6.12.1.2-4
Sauerstoff 6.12.1.2-4
Metallfilz, Probleme der Verklebung 6.10.3.1.2-63, 6.10.3.1.2-64
Metallische Federn 6.2.11
Metallografische Untersuchungen an Schrauben 6.1.1.2-6
Metallschmelzen. *Siehe* LME, Schädigungsmechanismus 6.1.1.1-6
Metallsickendichtungen 6.10.1-5, 6.10.1-9
Metallspäne
im Öl 7.1.3.1-4
zwischen Flanschen 6.6.4-12
Mkrobiell beeinflusste Korrosion 6.11.1.4-.4
Mikrogrübchen (Micropittings, Microspalls) 6.4.1-10
6.3.1.1-14
Zahnrad 6.4.1-10
Mikrolöcher in Schlauchwerkstoff 6.12-3
Mikroorganismen im Kraftstoff 8.2-5
Mikrorisse/-rissigkeit
durch Kriechen 6.12.1.2-9
der Anstreiffläche einer Bürstendichtung 6.10.3.2.2-14
Mikroskopische Untersuchungen 6.8.2-6
Mikrostruktur einer Zylinderwand 6.10.2.5-1
MIL- 7808 (Schmieröl) 7.1.1-2
Mindestabsetzzeiten in Kraftstoff in Tanks 8.3-3
Mindestfestigkeit; Feder 6.2-11
Mindestflächenpressung; Flachdichtung 6.10.1-6
Mindestunwucht bei Wälzlagern 6.3.1.2-24
Mineralöl, inkompatibel mit synthetischem Öl 7.1.1-6
Minutenring 6.10.2.5-2
Misaligned Skewing 6.3.1.1-31
Mischreibung
Gleitlager 6.3.2-1, 6.3.2-8
in Wälzlagern 6.3.1.1-6, 6.3.1.1-35
Zahnrad 6.4.1-10
Mittelspannungserhöhung durch Verspannung 6.11.1.2-4
Modul (Bauweise)
Kombination alt-neu 6.10.3.1.2-3
Labyrinthprobleme 6.10.3.1.2-3
Modultausch, 6.10.3.1.1-18
Wälzlagermontage 6.3.1.1-2
Wuchten 6.6.4-14
Molybdändisulfid 9.1.2-1
Momentenstöße, Getriebe 6.4.1-4
Montage
Beschädigung von Radial-Wellendichtringen 6.10.2.1-8
Bürstendichtung 6.10.3.2.1-4, 6.10.3.2.3-1
Enrtstehung von Messigspänen 6.1.1.2-16
Erfahrung und Fachkenntnis 6.10.1.2-1
Flanschverbindungen 6.6.4-16
Getriebe 6.4.2-6
Gleitringdichtungen 6.10.2.2-6
Keilriemen 6.8.1-2, 6.8.1-6
Labyrinthe 6.10.3.1.1-18
O-Ring 6.10.1.2-2, 6.10.1.2-3
Radial-Wellendichtringe, Methode, 6.10.2.1-8
Rohrleitung für Zugänglichkeit 6.11.1.1-7
wassrerührende 6.11.1.4-.1
Rohrschellen 6.11.1.2.1-1
Probleme 6.11.1.2-24

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Montage

Rundstahlketten 6.7.2-2
Schäden, Labyrinth 6.10.3.1.2-3
Schraube 6.1.1.3-2
Seil 6.9-10
Ursache für Schwingungen 6.4.1-26
Vielkeilkupplung 6.6.1-9
Vorrichtung für Radial-Wellendichtringe 6.10.2.1-9
Welle 6.5-4
Werkzeug, als Fremdkörper 6.6.4-18
Zahnriemen, Hilfsstoffe 6.8.2-4
More Electric Engine 6.3.1.1-40
Morsekabel 6.9-18
MoS2. *Siehe* Molybdändisulfid 9.1.2-1
Gleitlacke in Meeresatmosphäre 6.3.4-6
Schmierfett, falsche Anwendung 9.1.2-9
Trockenschmierfilm, Problem bei Wasserzutritt 9.1.2-6
Motor wassergekühlt, Frostschaden 6.11.1.4-.12
MTBF von Kraftstoffpumpen 8.1-3
MTBUR von Kraftstoffpumpen 8.1-3
Muttern
Silber 9.3-10
Ablösung 9.3-12
festsitzende 6.1.1.1-20
Sicherungen 6.1.1.1-16
Voroxidieren 6.1.1.1-21

N

Nabe
Fressen 6.6.4-4
Fugendruck 6.6.4-1
Sprengwirkung 6.6.1-4
Titanlegierungen 6.6.4-3
Nabenbohrung, Fugendruck 6.6.4-3
Nabensitz, Verschleiß durch Schlupfamplitude 6.6.4-8
Nabenverbindung
Auslegung 6.6.4-3
Flanschkupplung 6.6.4-1
Nacharbeit, Laufbahn von Wälzlagern 6.3.1.1-16
Nachbrenner
Kraftstoffeinfluss 8.1--3
Zündung 8.1--22
Nachfüllen
Einfluss auf Ölverkokung 7.1.2-17
von Öl 7.1.2-2
Nachpolieren
gelaufene Wälzlager 6.3.1.1-16, 6.3.1.1-43
Kette 6.7-6
Nachschmierung 9.1.1-5
bei Wartung 9.1.2-6
Intervalle 9.1.1-6
Wälzlager 6.3.1.2-16
Nachweise, Druckrohrleitung 6.11.1.1-5
Nadellager 6.3.4-1, 6.3.4-3
Ermüdung 6.3.4-5
Korrosion 6.3.4-5
Nasenconus, Bruch der Stehbolzen 6.1.1.2-22
Nasssiedepunkt 6.12-11
Naturkautschuk 6.2.22
NBR. *Siehe* Nitril Butadien Rubber
Nebenabtriebe, Wellenverbindungen 6.6.1-1
Nebengetriebe, Schäden 6.4.2-8
Nebenwellen, Sollbruchstelle 6.6.1-2
Negativer Schlupf, Zahnrad 6.4.1-10
Neutralisationszahl NZ oder TAN (Total Acid Number 7.2-8
Neverseez ® 9.1.2-3
Nichtlineare Federkennlinie 6.22-5
Ni-Legierungen, Kaltverschweißen 6.1.1.1-20
Nickel (Ni)
Dispersionsschichten 6.10.2.5-4
in Hochtemperaturschmiermittel 9.1.2-3
NiCrAlY, als Bürstenhaare 6.10.3.2.2-13
Niederdruck
Leitapparat, rotieren nach Schraubenbruch 6.1.1.2-11
Schlauchleitungen 6.12-2
Turbine
Kraftstoffeinfluss 8.1-3
Ölfeuer 7.1.4-14, 7.1.4-15
Versagen der Flanschverbindung durch FOD 6.1.1.2-24
Niet 6.1.2-1
Abdichten von Bohrungen 6.1.2-4
Als Befestigung von Hebeln 6.1.2-4
als Verdrehsicherung 6.1.2-4
Anwendungen in Triebwerken 6.1.2-2
Belastung durch Bladewalking 6.1.2-3
Fixierung von Turbinenrotorschaufeln 6.1.2-3
Gefügezustand 6.1.2-9
Hohlniet 6.1.2-6
Nachteile 6.1.2-2
Schaden an Wälzlagerkäfig 6.3.1.1-31
Vorteile 6.1.22
Wuchten von Rotoren 6.1.24
zur Schwingungsdämpfung 6.1.2-4
Nieten/Nietung (Herstellung), mit Punktschweißmaschine 6.1.29
Probleme 6.1.2-9
bei Popnieten 6.1.2-8
Wälzlagerkäfig 6.3.1.2-22
Rissbildung 6.1.2-9
Nietungen / Nietverbindungen
Versagensarten 6.1.2-6
Nietvorgang 6.1.2-9
Nitrierschicht
mit Rissen
Vielkeilkupplung 6.6.1-6
Welle 6.5-8
Nitril Butadien Rubber 7.1.1-10
Notlauf
Eigenschaft, Gleitlager 6.3.2-6, 6.3.2-8
Wälzlagerkäfig 6.3.1.1-37
TCP (Öladditiv) 7.1.1-11
NOx - Emission 8.1-8
Nuten in Wellen als Konstruktionskerben 6.5-3
Nutmuttern
Laschenbruch 6.1.1.2-18
Sichern 6.1.1.1-18

O

O-Ring (Dichtung)
Alterung, 6.3.1.2-29
bei der Einmottung von Triebwerken 6.10.1.2-1, 6.10.1.2-10
Blasenbildung 6.10.1.2-5
Bleibende Verformung 6.10.1.2-5
Festigkeitsabfall 6.10.1.2-5
Koksbildung 7.1.2-2
Oxidation 6.4.2-2
Rissbildung 6.10.1.2-5
Werkstoffveränderung

© Axel Rossmann - turbocomp
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

6.10.1.2-5
Ausgasen 6.10.1.2-7
Auswahl 6.10.1.2-14
Belastung durch Druckdifferenz 6.10.1.2-9
Beschädigung
bei Montage (Einbau) 6.10.1.2-1; 6.10.1.2-3
abgeschert 6.10.1.2-5
Schnitte 6.10.1.2-5
Spiralschäden 6.10.1.2-7
Verdrillung 6.10.1.2-7
im Betreib 6.10.1.2-1
Bestimmnung der Lage mit Röntgen 6.10.1.2-10
Bewegung beim Einschieben 6.10.1.2-4
Blasenbildung 6.10.1.2-7
Dehnung bei Montage 6.10.1.2-4
Diffusion von Medien 6.10.1.2-7
durch Wasserdampf überhitzt 6.10.1.2-7
Elastomere schädigende Medien 6.10.1.2-12
Explosiver Druckabfall: 6.10.1.2-5
Extrusion 6.10.1.2-5
Gestaltung der Nut 6.10.1.2-14
Human Factors bei Montage 6.10.1.2-3
Kantenschutz bei Montage 6.10.1.2-4
Kompatibilität mit Medien 6.10.1.2-1
Kompressionsverformung 6.10.1.2-5
Leck an Leitungsverschraubungen 6.10.1.2-12
Methode zur Identifizierung des Materials 6.10.1.2-14
Montage 6.10.1.2-3
Probleme/Schaden 6.10.1-3, 6.10.1.2-1
als OOD im Ölsystem 6.10.1.2-2
als SUPs 6.10.1.2-1
Alterung 6.10.1.2-5
Ausbau 6.10.1.2-2
Auswirkungen 6.10.1.2-2
Dichtflächen 6.10.1.2-4
Einbau 6.10.1.2-2
Einfluss von Stillstandszeiten 6.10.1.2-1
Kraftstoffeinfluss 8.1--11
Materialprobleme 6.10.1.2-2
Montagebedingungen 6.10.1.2-2
Ölzersetzungsprodukte 6.10.1.2-2
Schadensursachen 6.10.1.2-5
Schmiermittel von Dichtflächen 6.10.1.2-4
Wirkung von Korrosionsschutzöl 6.10.1.2-12
Rückfederung 6.10.1.2-9
Schadensbilder 6.10.1.2-5
Schädigung durch ‘heat soaking’ 6.10.1.2-8
Rissbildung 6.10.1.2-7, 6.10.1.2-9
Scherung durch Druckdifferenz 6.10.1.2-9
Schrumpfen 6.10.1.2-7
schwammartige Struktur 6.10.1.2-7
thermische 6.10.1.2-5
undichter Tankverschluss 8.3-14
Vergessen er O-Ring 6.10.1.2-3
Verrutschen 6.10.1.2-3
Wärmedehnungsunterschiede 6.10.1.2-12
O-Ring Nut, Beschädigung des O-Rings 6.10.1.2-3
Oberflächenfehler, Feder 6.2.1-2
Oberflächenhärte/-härtung
Seile 6.9-2
Zahnräder 6.4.1-13
Oberflächenqualität, Druckrohrleitung 6.11.1.1-5
Oberflächenstrukturierung, 6.10.2.5-2
Offene Porosität, Zylindergleitfläche 6.10.2.5-4
ODM (On-Line Diagnostic Sensor) 7.2-16
Off-brake (unbetätigte Bremse) 6.6.2.1-10
Oil Whirl 6.3.2-2
Oilhiding 6.3.1.1-37
Öl 7.1.3.2-6
Abführung der Verlustleistung 6.4.2-1
Abhilfen gegen Wasser 7.1.3.2-9
Absetzgeschwindigkeit von Partikeln 7.1.3.1-2
Alterung 7.1.2-20
von Kunststoffen in 7.1.1-8
Aluminiumoxid im 7.1.3.1-5
Angriff von
Bleilegierungen 7.1.1-6
von Elastomeren 7.1.1-8
Anzeichen für
elektrische Funken 7.1.3.1-10
für Heißlauf im Ölsystem 7.1.3.1-10
für Wälzlagerschaden 6.3.1.2-1
betriebsbedingte Eigenschaftsveränderungen 7.1.1-1
Brennen,Gasentwicklung 7.1.1-4
Chemische Analysen von Partikeln 6.3.1.2-6
Dampfpolster durch Wasser 7.1.3.2-4
Dichte von Partikeln 7.1.3.1-7
Dichtpastenrückstände 7.1.3.1-6
dunkle Verfärbung 7.1.2-2
eigenschaften
Einfluss
auf Anlasserleistung 7.1.1-2
auf Betrieb 7.1.1-2
Getriebe 6.4.2-4
auf Glasuren auf Kunststoffbasis 7.1.1-6
PVC 7.1.1-6
auf Kabinenluft 7.1.1-4
von Partikeln auf die Lagerlebensdauer 6.3.1.2-20
Elektrische Entladungen 7.1.2-20
Elektrische Leitfähigkeit 7.1.3.1-8
Emulgierender Effekt 7.1.3.1-3
EP-Zusätze (Extreme Pressure) 7.1.1-2
Erkennbarkeit von Wasser 7.1.3.2-8
Ermüdungspartikel 7.1.3.1-8
falsche Bewertung von Späneanzeige 7.2-22
Filterablagerungen /-rückstände 7.1.3.1-1, 7.1.3.1-9, 7.2-1
freies Wasser 7.1.3.2-1
Fremdkörper im Getriebe 6.4.2-1
Galvanische Partikel 7.1.3.1-10
gelöstes Wasser 7.1.3.2-1
Größenverteilung von Partikeln 7.2-6
Härte von Partikeln 7.1.3.1-6
Identifikation von Verunreinigungen 7.1.3.1-1
Katalytischer Effekt 7.1.3.1-3
Kavitation durch Wasser 6.3.2-11, 7.1.3.2-4
Kennwerte 7.2-6
Kokspartikel im 7.1.3.1-6
kontinuierliche Überwachung 7.2-1
Korrosion durch mit Wasch-

© Ass. Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

flüssigkeit verunreingtes 9.3-6
Korrosion in Gleitlagern 6.3.2-9
Kraftstoff im 7.1.3.2.2-1,7.1.4-5
Kügelchen im 6.4.1-12,. 7.1.3.1-6, 7.1.3.1-10
Lagerlebensdauer bei Wasser 7.1.3.2-4
Luftabscheider 7.1.2-21
Magnesiumlegierungen, Reaktion mit Wasser 7.1.1-6
Magnetische Partikel 7.1.3.1-8
Magnetstopfenablagerungen 7.1.3.1-9
Metallspäne 7.1.3.1-4
Mischen 7.1.1-4
Möglichkeiten der Wasser-aufnahme 7.1.3.2-5
Nachfüllen von 7.1.2-2
Nachweis von Wasser 7.1.3.2-1
Oxidation von Lagermetall durch Wasser 7.1.3.2-4
Partikel im 6.3.1.1-16, 6.3.1.2-6
Form im 7.1.3.1-6
Göße von Verunreinigungen 7.1.3.1-2
Menge 7.2-6
Zahl Schädigungswirkung 7.1.3.1-3
Zählung 7.2-8
Polarität von Verunreinigungen 7.1.3.1-8
Probenentnahme 7.1.3.1-1, 7.2-13
Probleme, Wälzlager 6.3.1.1-12
problemtische Eigenschaften 7.1.1-1
Quellen von
Elastomerdichtungen 7.1.1-9
Kunststoffen 7.1.1-6
von PTFE 7.1.1-6
Reaktion mit
Kupfer 7.1.1-6
Silberlegierungen 7.1.1-6
Zink 7.1.1-6
Reinheitsklassen 7.2-11
Reizung durch 7.1.1-4
Risikoabschätzung für Schaden bei Partikeln 7.1.3.1-1
Rückschlüsse
auf zeitliche Abläufe 7.2-3
aus Partikeln 7.2-3
Schäden durch Kraftstoff 7.1.3.2.2-1
Schädigende Partikel 7.1.3.1-1
Schädigung eines Ansaug-schnorchels 7.1.1-9
Schäumen von 7.1.3.1-3
Schichtpartikel im 7.1.3.1-4
Schwitzwasser im 7.1.3.2-6
Sensor 7.2-16
Systeme zum Nachweis von Wasser 7.1.3.2-1
Siebrückstände 7.2-1
Sprührate 7.1.2-2
Stabilisatoren/Additive 7.1.1-2
Strahlpartikel im 7.1.3.1-5
synthetische 7.1.1-2
Test auf Wasser im 7.1.3.2-9
thermische Stabilität 7.1.1-2
Tricresylphosphat (TCP) 7.1.1-11
Tropfenschlag durch Wasser 7.1.3.2-2
Überwachung 7.2-17
Untersuchungsmethoden 7.2-6
Ursachen für Kraftstoff im 7.1.3.2.2-4
Veränderungen 7.1.3.2-2
Verfärbungen 7.1.1-10
Verharzen 7.1.2-6
Vermischen, Warnung 7.1.2-17
Verschleiß
durch Staub 7.1.3.2-2
durch Wasser 7.1.3.2-2
Wirkung von Partikeln 7.1.3.1-3
Viskosität
Bestimmung 7.2-8
Veränderung 7.1.2-2
bei Druck 6.3.1.1-12
Wasseraufnahme 7.1.3.2-6
Wasserstoffversprödung durch Wasser 7.1.3.2-2
Wirkung
von Additiven 7.1.3.1-3
von Wasser 7.1.3.1-8
Wolframkarbid 7.1.3.1-5
Zersetzung von Gummi 7.1.1-10
Zinkoxide im 7.1.1-11
Zugießen von 7.1.1-4
Zündgrenze 7.1.4-1
Zusammensetzung von Parti-keln im 7.1.3.1-8
Öl/Ölsystem, Überwachung 7.2-1
Öl/Kraftstoff-Wärmetauscher 7.1.3.2.2-2
Kraftstoffleck 6.11.1.2-25
Ölanalyse
Erkennen eines Lagerschadens 6.3.1.2-4
kontinuierliche bei Getriebe 6.4.3-2
Ölansammlung. *Siehe* Oil Hiding
Ölaustritt bei Lagerschaden 6.3.1.2-4
Öldampf, Koksbildung 7.1.2-4
Öldruck
Hinweis auf Ölkohle 7.1.2-17
Öldruckabfall bei Lagerschaden 6.3.1.2-4
Öldüse
Ablagerungen 6.3.1.2-9
Schwingungen 6.11.1.2-1
Verlegung/Verstopfen durch Ölkoks 7.1.2-151
Dichtmittel 9.2-3
Ölfeuer 6.3.1.2-4, 6.3.1.2-10, 6.5-18, 7.1.2-1, 7.1.4-1, 7.1.4-3, 7.1.4-10
Abhilfen 7.1.4-16
bei Überschallflug 7.1.4-6
durch
Anstreifvorgang 7.1.4-5
Heißlaufen eines Lagers 7.1.4-5
Heißlufteinbruch 7.1.4-3
Leck in Druckleitungen 7.1.4-13
Einfluss
des 'flight envelope' 7.1.4-5
des Öldurchflusses 7.1.4-8
Entstehungsorte 7.1.4-13
erkennen 7.1.4-9
Flammhalterwirkung 6.5-18, 7.1.4-11
Gefahr von Scheibenplatzern 7.1.4-15
Gleitringdichtungen 6.10.2.2-6
in einer
Niederdruckturbine 7.1.4-14, 7.1.4-15
Entlüftungsleitung 7.1.4-5, 7.1.4-12
Rückölleitung 7.1.4-5
Lagerkammer 7.1.4-2, 7.1.4-13
Nachweis 7.1.4-9
Ölkohleablagerungen 6.5-18, 7.1.4-10
Selbstzündung 7.1.4-2
Turbinenwelle 7.1.2-5
Zündung 6.3.1.1.2
Zwischenwellenfeuer 6.5-18
Risiko 7.1.4-1
Ölfilm
Einfluss auf Stromdurchgang 6.3.1.1-35
Dicke, Lebensdauer von Wälzlagern 6.3.1.1-13

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Ölfilter 6.4.2-3, 7.1.3.1-4
Bypass 6.4.2-3
Durchfluss, Korrosion an Magnesium 9.3-6
kupferfarbige Späne 6.1.1.2-16
Partikel 6.3.1.2-6
Ölgedämpfte Lager 6.3.1.1-3, 6.3.1.1-4
Absinken des Rotors 6.3.1.1-6
Ölkohle/ Ölkoks 7.1.1-10, 7.1.2-1, 7.1.2-2, 7.1.2-8
Anzeichen für Ölfeuer 6.5-18, 7.1.4-10
Abblättern 7.1.2-8
Abhilfen 7.1.2-20
Ablösung durch Additivkonzentration 7.1.2-17
Abplatzen beim Nachfüllen 7.1.2-17
Abstelllen des Triebwerks 7.1.2-14
Anstreifen von Wellen 7.1.2-10
aus der Dampfphase 7.1.2-4, 7.1.2-7
Aussehen 7.1.2-2
begünstigt durch Salz 7.1.2-2
Beseitigung durch Ausbrennen 7.1.2-17
Bildung
durch Staubpartikel 7.1.2-2
durch metallischen Abrieb 7.1.2-6
in Labyrinth 6.10.3.1.1-30
statische Bedingungen 7.1.2-2
Bürstendichtungen 7.1.2-10
Dichtungen 7.1.2-12
Druck des Öls als Hinweis 7.1.2-17
durch
Alterung 7.1.2-2
aufgesprühteTröpfchen 7.1.2-7
Verbrennen 7.1.2-5
dynamische Bedingungen 7.1.2-2
Einfluss
auf Triebwerkskomponenten 7.1.2-8
des Luftstroms 7.1.2-7
von Nachfüllen 7.1.2-17
Entstehung
in Wälzlagern 7.1.2-5
Mechanismen 7.1.2-2
ETOPS-Betrieb 7.1.2-15
Härte 7.1.2-2
im Gasstrom 6.3.1.2-4
im Ölsumpf 7.1.2-5
Lagergehäuse/-kammer 7.1.2-5,. 7.1.2-12, 7.1.2-14
Lagerschäden 7.1.2-12
Gehäusestrebe 7.1.2-16
in Rohren/Leitungen 7.1.2-8
Entlüftung7.1.2-5
Rücköl 7.1.2-8
in Wärmetauschern 7.1.2-10
Kondensation um Partikel 7.1.2-6
Labyrinthdichtungen 7.1.2-10
lackartige Schichten 7.1.2-7
manöverabhängige Entstehung 7.1.2-5
Mikrostruktur 7.1.2-2
Parameter bei Entstehung 7.1.2-4
Prüfung mit Durchblastest 7.1.2-17
Querschnittsverringerung durch Ablagerung 7.1.2-7
Schädigung von
Wälzlagern 7.1.2-10
Zahnradpumpen 7.1.2-10
Schichtstruktur 7.1.2-7
Aussagen 7.1.2-5
Verstopfen einer Öldüse 7.1.2-15
Wärmeisoliationswirkung 7.1.2-10
Ölkühler 6.4.2-1
Wärmetauscher 6.4.2-3
Ölleitungen/Ölrohre 7.1.2-11
Ablagerungen 6.3.1.2-9
Anlauffarben 6.3.1.2-10
Entlüftung 7.1.2-12
Rückölleitungen 7.1.2-12
Ölmangel
im Getriebe 6.4.2-1
durch behinderte Ansaugung Wälzlager 6.3.1.1-37
Ölpolster, gedämpftes Lager 6.3.1.1-4
Ölproben, Untersuchung 7.2-1
Ölprüfer 6.3.1.2-29
Ölpulsation, 6.4.2-8
Ölpumpe 6.4.2-8
Ölreste, Aussagen 6.3.1.2-10
Ölsieb, Ablagerungen 6.3.1.2-10
Ölsumpf
Feuer durch Kraftstoff im Öl 7.1.3.2.2-4
Koksbildung 7.1.2-5
Ölsystem
Ablagerungen 6.3.1.2-9
Anzeichen für Heißlauf im Öl 7.1.3.1-10
Dieseleffekte 7.1.2-21
Ermüdungsschaden, Anzeichen im Öl 7.1.3.1-10
geeignete Farben 7.1.1-6
Getriebe 6.4.2-3
OOD durch O-Ringe 6.10.1.2-2
Rückschlüsse auf Schdensteile 7.2-3
Identifikation von Schadenskomponenten 7.2-12
Überwachung 7.2-1
Werkstoffe 7.1.1-5
von Komponenten 7.2-12
Öltank, Einfluss auf Öltemperatur 7.1.2-21
Öltemperatur, Einfluss des Öltanks 7.1.2-21
Ölüberwachung
kontinuierlich auf magnetische Partikel 7.2-14
Versagen der 7.2-20
Ölversorgung
Getriebe 6.4.2-1
ungenügend bei Wälzlager 6.3.1.2-3
Wälzlager 6.3.1.2-1
Olverunreinigungen
Aussagen 7.2-2
Entstehungsmechanismus 7.1.3.1-1
Entstehungsort 7.1.3.1-1
Rückschlüsse 7.2-2
Schadensmechanismen 7.2-3
Schädigungspotenzial 7.1.3.1-1
Wirkung auf Gleitringdichtungen 6.10.2.2-4
Untersuchungen
Ölviskosität, Einfluss auf Kavitation 6.3.2-11
Ölwechsel 6.3.1.2-9, 7.1.2-2, 7.2-1
Abplatzen von Ölkoks 7.1.2-17
Intervalle 8.2-5
Ölzersetzungsprodukte aus Oringschaden 6.10.1.2-2
Onlineüberwachung
On-Line Diagnostic Sensor (ODM) 7.2-16
Wälzlager 6.3.1.2-29
Optische Partikelanalyse (OPA) 7.2-8
Optische Vermessung, Kupplungsausrichtung 6.6.3-7
Optischen Partikelanalyse, Windenergieanlage 7.2-9
Ösen (Seil) 6.9-16

Ölkohle ⇧ ⇩

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsmaterial nur mit Lizenz

Osmose/Hydrolyse, Zahnriemen 6.8.2-4
Ovalität, Druckrohrleitung 6.11.1.1-5, 6.11.1.1-7
Oxidation
Bürstendichtung 6.10.3.2.3-7, 6.10.3.2.2-10
Schrauben 6.1.1.1-4
von Gewinden 6.1.1.1-20
Oxid
Filme 6.10.3.2.3-7
Nester durch mechanische Beanspruchung 6.4.1-12
Schichten, Dichte 6.10.3.2.3-7
Ozon, Einfluss auf Elastomer 6.2.26

P

P-Klemmen (P-clamps). *Siehe* Rohrschellen, Positionierung bei Schwingungen 6.11.1.2.1-4
PA, *siehe Polyamid 6.3.4-9*
Packung (Stopfbuchse) 6.10.2.3-1
ungeeignete 6.10.2.3-1, 6.10.2.3-2
Packungsschmur 6.10.2.3-1
Panzerung
Flachdichtungskanten 6.10.1-10
Labyrinth 6.10.3.1.3-3, 6.10.3.1.3-28
Lagerschäden durch Abplatzer 6.10.3.1.2-10
Schneidfähige 6.10.3.1.3-28
Particle Count. *Siehe* Öl: Partikelmenge
Particle Quantifier (PQ-Index) 7.2-7
Partikel
als Schadensursache 6.3.1.2-6
Bildbeispiele 7.1.3.1-4
Chemische Analysen 6.3.1.2-6
Form 6.3.1.2-6, 7.1.3.1-6
im Gleitlager 6.3.2-9
im Wälzlager
aus dem Frischöl 6.3.1.1-43
aus der Belüftung 6.3.1.1-43
aus der Lagerkammer 6.3.1.1-43
im Kraftstoff 8.3-2
im Öl 6.3.1.1-16, 6.3.1.2-6
Schädigung von Wälzlagern 6.3.1.1-43
Rückschlüsse aus 7.2-3
auf zeitliche Abläufe 7.2-3
Schädigung durch 7.1.3.1-1
Partikelerosion
der Anstreiffläche einer Bürstendichtung 6.10.3.2.2-14
in Labyrinthen 6.10.3.1.2-11
Partikelzählung (siehe Particle Count) im Öl 7.2-8
Passfedernuten
Reibkorrosion 6.5-9
Schwingermüdung 6.5-9
Welle 6.5-8, 6.5-9
Passflächenkorrosion. *Siehe* Fretting
Passgenauigkeit, Rohrleitung 6.11.1.2-27
Passungsrost. *Siehe* Fretting
Pasten als Hilfsstoffe 9.1.1-2
Patentieren, Federdraht 6.2.18
Peitschen
Schlauch 6.12-14
loser Hochdruckschlauch 6.12-5
Pendeln, Wälzlagerrollen 6.3.1.1-25, 6.3.1.1-31
Peppering 6.10.3.1.2-11
Per (Entfettung) Probleme 6.11.1.2-22
Permanentschmierung, Lager 6.3.4-1
Permeabilität, Permeation
Schlauch 6.12-9
durch Schlauchwand 6.12-3
Pfeilmuster, Wälzlagerlaufspur bei Käfigschlupf 6.3.1.1-25
Pfeilverzahnung 6.4.1-3
Pflastersteinausbrüche. *Siehe* Schwingermüdung: Gleitlager 6.3.2-10
Phosphat-Ester, Schädigung von Titanlegierungen 6.11.1.1-13
Phosphor in synthetischem Triebwerksöl 6.1.1.2-15
Phosphorester, Ursache für Wasserstoffversprödung 6.11.1.1-13
Pilzwachstum in Kraftstoff 8.2-3
Planetengetriebe 6.4.2-3
Schaden 6.1.1.2-16
Schraubenbrüche 6.1.1.2-18
Planschlag, Gleitringdichtungen 6.10.2.2-6
Planung
Getriebeschaden 6.4.2-5
von Rohrleitungen 6.11.1.2-2
Planzenöle, Kraftstoff 8.2-3
Plastische Verformungen
bei Federbelastung 6.2.17
Welle 6.5-8
Zahnflanken 6.4.1-17
Polyamid (PA) 6.3.4-9
Feuchtigkeitsaufnahme 6.3.4-7, 6.3.4-10
Lagerbuchse 6.3.4-7
Quellen 6.3.4-7
Schlagzähigkeit 6.3.4-10
Wasseraufnahme 6.3.4-10
Polygoneffekt bei Rollenkette 6.7-2
Polymerdichtungen, thermische Zerstörung 6.10.2.4-6
Polytetrafluorethylen 7.1.1-6, 9.1.2-3
Popniet 6.1.21, 6.1.28
Lockern 6.1.210
Werkstoff 6.1.210
Klemmlänge 6.1.28
Korrosionsprobleme 6.1.210
Nietung 6.1.28
Poren in Kohlegleitring 6.10.2.2-9
Pressungsverteilung im Flansch 6.10.1-8
Pressure closure 6.10.3.2.1-13. *Siehe auch* blow down bei Bürstendichtung
Pressverband
Einfluss von Reibrost 6.6.4-8
Fugendruck 6.6.4-8
Probenentnahme von Öl 7.1.3.1-1, 7.2-13
Probleme
bei Modul (Bauelement) Wechsel 6.10.3.1.2-15
Eigenschaften von Gummifedern 6.2.21
Federn 6.2.13
Werkstoff 6.2.11
Produktfehler, Getriebe 6.4.1-18, 6.4.2-4
Prospekte bzw. Firmenangaben, Problematik 6.1.1.1-2
Prüfung
Hebezeugkette 6.7.2-2
Thermische Stabilität 8.1--24
Pseudo-Spaltbruch bei Wassderstoffeinwirkung 6.12.1.2-5
Pseudokavitation (Dieseleffekt, Lohrentzeffekt) 6.10.2.4-6, 6.11.1.2-13, 8.1-12
PTFE 6.3.4-9. *Siehe auch* Polytetrafluorethylen, Polytetrafluorethylene
Abriebfestigkeit 6.3.4-9
Buchse, Wandern 6.3.4-9
Kaltfluss 6.3.4-9

©Axel Rossmann - Turbocontent
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Kriechfestigkeit 6.3.4-9
Lagerbuchse 6.3.4-7
Quellen in Öl 7.1.1-6
statische Dichtungspackung 6.10.2.2-12
Wärmedehnung 6.3.4-9
Wärmeleitfähigkeit 6.3.4-9
PTFE-
Puddle Coking 7.1.2-5
Pulsierender Druck, auf Flachdichtung 6.10.1-9
Pumpe
Kavitation 8.1--12
Kraftstoffgeschmiert 8.1--14
Tropfenschlag 6.12.1.2-9
Pumpwirkung
oszillierende durch Nabenbelastung 6.6.4-1
Stopfbuchse 6.10.2.3-2
PVC, Öleinwirkung 7.1.1-6
Pyrometer 6.8.1-8

Q

QDM. *(*Quantitative Debris Monitor) 7.2-14
Qualität
Rundstahlkette 6.7.2-1, 6.7.2-5
Schraube 6.1.1.3-5
Sicherung bei Federn 6.2.12
Quellen/Volumenvregrößerun
Elastomere 6.2.22, 6.2.25, 6.10.2.4-6
Flachdichtung 6.10.1-14
Keilriemen 6.8.1-4
Kunststoffe im Öl 7.1.1-6
Luftfeder 6.2.28
Polyamid 6.3.4-7
Schlauch 6.12-9
Querbohrungen an Welle 6.5-6, 6.5-8
Querschwingung von Rollenkette 6.7-2
Quetschdruck, Kolbenring 6.10.2.5-4
Quietschen
Bremse 6.6.2.1-1, 6.6.2.1-6
Gleitlager 6.3.2-3
Kette 6.7-6
Quirlverluste, Zahnrad 6.4.1-4

R

Radial-Gleitringdichtung 6.10.2.2-4
Radial-Wellendichtring 6.10.2.1-1, 6.10.1-4
Abhilfen bei Schäden 6.10.2.1-10
Abweichungen der Wellenposition/-lage 6.10.2.1-3, 6.10.2.1-4
Alterung der Dichtlippe 6.10.2.1-6
Anpressfeder 6.10.2.1-8
Anpresskraft 6.10.2.1-3
der Oberfläche 6.10.2.1-2
Beschädigung bei Montage 6.10.2.1-8
Dichtmechanismus 6.10.2.1-1
Dichtwirkung 6.10.2.1-2
Druckverteilung 6.10.2.1-2
Einfluss der Welle
der Axialbewegung 6.10.2.1-4
der Drehzahl 6.10.2.1-2
der Oberfläche 6.10.2.1-2
der Rundlaufabweichung 6.10.2.1-4
der Topografie der Oberfläche 6.10.2.1-5
des radialen Versatzes 6.10.2.1-4
einer Schiefstellung 6.10.2.1-4
von Schleifriefen 6.10.2.1-5
Einlauf 6.10.2.1-1
Bedingungen 6.10.2.1-4
Förderwirkung 6.10.2.1-3
große Reibung 6.10.2.1-10
Heißlauf und Alterung 6.10.2.1-4
hohe Leckrate 6.10.2.1-10
Mediumtemperatur 6.10.2.1-2
Montagemethode 6.10.2.1-8
Probleme 6.10.2.1-2
Schadensmechanismen 6.10.2.1-6
Schmierfilmdicke 6.10.2.1-2
Schmierung beim Einbau 6.10.2.1-8
Schwergängigkeit der Welle 6.10.2.1-10
Steifigkeit des Elastomers 6.10.2.1-4
Spannfeder bei Montage 6.10.2.1-9
Überhitzung der Dichtlippe 6.10.2.1-6
Verschleiß durch Verschmutzung 6.10.2.1-8
Verschleißbild der Dichtkante 6.10.2.1-2, 6.10.2.1-3
Wellenoberfläche 6.10.2.1-7
Radialdichtring. *Siehe* Radial-Wellendichtring
Radiallager, Gleitlager 6.3.2-6
Radiallast, zu geringe bei Wälzlager 6.3.1.1-25
Radialspaltänderung bei Bürstendichtung 6.10.3.2.1-19
Radialverdichterrad, Labyrinthschwingung 6.10.3.1.2-55
Raketenabgase, korrosiv 9.3-8
Rapsöl als Kraftstoff 8.2-3
Rapsölmethylester (RME) 8.2-5
Rasselschwingungen., Getriebe 6.4.3-6
Rasterelektronenmikroskop (REM), Untersuchung an Schrauben 6.1.1.2-6
Rattern einer Bewegung 9.1.2-8
Rauch, Kraftstoffeinfluss 8.1-8
Rauer Betrieb, Rundstahlkette 6.7.2-3
Rauigkeit
Dichtfläche 6.10.1-6
im Spalt von Kolbendichtungen 6.10.2.4-5
Kolbenringdichtung 6.10.2.5-4
Rohrinnenwand 6.12.1.2-3
Wälzlagerlaufbahn 6.3.1.1-11, 6.3.1.1-12, 6.3.1.1-13
Reaktionskräfte, Hochdruckschlauch 6.12-7
Rohrleitung 6.11.1.1-4,6.11.1.1-7
Regler
Irritierung 6.11.1.1-9
Schwingungen durch Kavitation 8.1-22
Verunreinigter Kraftstoff 8.3-2
Reibbeiwert
in Schraubenverbindungen 6.1.1.1-12
Silbersulfid 8.1-16
Reibbeläge, Kupplung 6.6.2.2-3
Reibbremsen 6.6.2.1-1, 6.6.2.1-2
Reibdauerbeanspruchung (RBD) 6.6.4-7
Reibkorrosion. *Siehe* Fretting
Passfedernuten 6.5-9
Reibkupplungen 6.6.2.1-1, 6.6.2.2-1
Schäden 6.6.2.2-1
Reibrost. *Siehe* Fretting
Einfluss
auf Fugendruck 6.6.4-8
auf Pressverband 6.6.4-8
Sprengwirkung an einer Nabe 6.6.4-1

© Axel Rossmann, turboconsult
als Schulungsunterlagen nur mit NEHS

Transport im Spalt 6.6.4-8
Gelenklager 6.3.4-1
Mikrovorgänge 6.6.4-8
Nabensitz Welle 6.5-8
Wellen 6.5-3
Entstehung, Wellen 6.5-3, 6.5-6
Reibschlussverbindungen 6.5-3
Reibschutz an Rohrleitungen 6.11.1.2-21
Reibtemperaturen, Bremse 6.6.2.1-8
Reibung
im Gewinde einer Schraube 6.1.1.1-9
in Wälzlagern 6.3.1.1-6
Reibungsbeiwert (Reibwert)
Bremse 6.6.2.1-16
Bürstendichtung 6.10.3.2.3-3
Kupplung 6.6.2.2-5
Reibungsdämpfung
Labyrinthdichtung 6.10.3.1.3-10
Wälzlager 6.3.1.1-5
Zahnräder 6.4.1-24
Reibungskräfte im Seil 6.9-14
Reibungswärme, Bürstendichtung 6.10.3.2.3-3
Reibverschleiß. *Siehe* Fretting
Kupplung 6.6.1-2
Rohrleitung 6.11.1.2-1
Prothese aus Titan 6.1.1.2-28
Versagen von Vielkeilkupplungen 6.6.1-2
Reibwert, siehe Reibungsbeiwert
Reinigen, Reinigung
Verdichterbeschaufelung 9.3-2
Kraftstofftanks 8.3-23
Rundstahlkette 6.7.2-2
Reinigungsmittel 9.3-1
Abrasion durch trockene 9.3-8
Eignungsnachweis 9.3-5
Einflüsse auf Maschinenelemente 9.3-1
Funktionsbeeinträchtigung von Bauteilen 9.3-8
Korrosiv 6.2.13
Potenzielle Probleme 9.3-7
Verdichterwaschen 9.3-1
Verwendung bei Wartung 6.11.1.2-22
Wirkung auf Dichtung 6.10.1-14
Reißverschlusseffekt 6.1.1.2-26
an Flanschverbindungen 6.1.1.2-11
Reizung durch Öl 7.1.1-4
Relaxation, Feder 6.2.12
Rene 41,. Hochtemperaturwerkst.
Rissbildung mit Silbereinfluss 6.1.1.2-12
Reparatur, Labyrinthe 6.10.3.1.1-19
Rundstahlkette 6.7.2-2
Reparaturtauglichkeit, Reparierbarkeit
Labyrinthe (Spitzen) 6.10.3.1.1-4, 6.10.3.1.1-22
Resonanz/-schwingungen
eines Labyrinths 6.10.3.1.2-45, 6.10.3.1.3-8
Kettentrieb 6.7-6
Rohrleitung 6.11.1.1-4; 6.11.1.1-7
Resonator 6.10.3.1.2-41, 6.10.3.1.3-34
durch Bürstendichtung 6.10.3.2.3-3
Reynoldzahl, Leckstrom 6.10.3.1.1-22
Richten /Richtvorgangvon Rohrleitungen 6.11.1.2-5, 6.11.1.2-9, 6.11.1.2-10
Richtungeiner Belastung, Rückschluss 6.1.1.2-2
Riefen
in Bremsscheibe 6.6.2.1-5
in Gleitlager 6.3.2-9
Riemenspannung von Keilriemen 6.8.1-6
Riementrieb 6.8.1-1
Trumkraft 6.8.2-2
Riffelbildung 6.3.1.1-40
Wälzlager Stromdurchgang 6.3.1.1-35
Ringkanal, Luftschwingungen 6.10.3.1.2-45
Risikoabschätzung
bei Partikeln im Öl 7.1.3.1-1
Wälzlager 6.3.1.2-19
Risikominimierung, Kupplungsschäden 6.6.1-11
Riss/Rissbildung
an Verschraubung der Hochdruckturbine 6.1.1.2-15
beim Nieten 6.1.29
Bolzenbohrungen 6.6.4-10
Bremsscheibe 6.6.2.1-6
Getriebe 6.4.2-2
Hochdruckschlaich 6.12-9
im O-Ring durch ‘heat soaking’ 6.10.1.2-9
in Hydraulikleitung 6.11.1.1-10
in konischen Gewinde 6.11.1.4-.7
in Kraftstoffrohrleitungen 6.11.1.2-27
in Labyrinthen 6.10.3.1.2-8
Spitzen 6.10.3.1.1-21
in Luftfeder 6.2.28
in O-Ring 6.10.1.2-5,6.10.1.2-7
in Rohrleitungen 6.11.1.2-2
in Schrauben 6.1.1.1-10
Köpfe 6.1.1.2-8
in Warmnieten 6.1.26
Rissfortschritt/-geschwindigkeit
bei Wasserstoffeinwirkung 6.12.1.2-5
in Labyrinthstegen 6.10.3.1.2-24
Verlangsamung 6.6.4-16
Risslage
typische an Rohrleitungen 6.11.1.2-4
bevorzugte an Rohrleitungen 6.11.1.2-15
Rissverlauf, in Zahnflanken 6.4.1-12
Risswachstum
an Verzahnung durch Luft und Schmierstoff 6.4.1-12
Labyrinth
Ring 6.10.3.1.1-27
Spitzen 6.10.3.1.1-22
Risszähigkeit von Titanlegierungen 6.11.1.2-18
RME (Rapsölmethylester) 8.2-5
Rohre, Rohrleitung 6.11.1.1-1, 6.11.1.2-1
Adapter 6.11.1.1-4
aggressive Verunreinigungen 6.11.1.2-2, 6.11.1.2-21
Anziehen der Verschraubung 6.11.1.2-4
Bandagen 6.11.1.2-21
Befestigung 6.11.1.2-2
Belastung durch Innendruck 6.11.1.2-5
Berührungsverschleiß/Fretting 6.11.1.2-1, 6.11.1.1-7
durchgescheuert 6.11.1.1-10
Beschädigungen 6.11.1.2-4
Betriebskräfte 6.11.1.1-2
Bruch 6.11.1.2-2
CrNi-Stahl 6.11.1.1-11
Dämpfung 6.11.1.2-11
Druckpulsationen 6.11.1.2-9
Eigenspannungen 6.11.1.2-5
Einfluss
der Temperatur 6.11.1.1-4
von Richtvorgängen 6.11.1.2-9
Elastomerdichtung 6.11.1.2-4
Erosion 6.11.1.4-.4

© Axel Poss mail@Turbocoach
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

innen 6.11.1.1-4
Frostschäden 6.11.1.4-.12
für Energieträger 6.12.1.2-1
Gase 6.12.1.2-1
Erdgas 6.12.1.2-1
Gefahr bei Versagen von Luftleitungen 6.12.1.2-10
Gestaltung 6.11.1.1-5
Herstellung 6.11.1.2-5
in Haustechnik 6.11.1.4-.1
in Hydraulik 6.11.1.1-1
in Krafftstoffsystem 6.11.1.2.1-1
in Kraftwerken/Kraftwerkstechnik 6.11.1.1-1
Schadensbilder 6.12.1.2-9
Innenwand, Rauigkeit 6.12.1.2-3
Kavitation 6.11.1.1-5, 6.11.1.1-9, 6.11.1.2-12
Krümmer,Erosion 6.12.1.2-3
Kavitation bei Durchströmung 6.11.1.1-7
Konstruktion 6.11.1.2-11
Kraftstoffleck nach Bruch 6.11.1.2.1-4
lose Flansche 6.11.1.2-4
Luft 6.12.1.2-1
Sackbildung 6.11.1.2-14
Manschetten 6.11.1.2-21
Maßungenauigkeit 6.11.1.2-4
Nachweis von Leck 6.11.1.2-4
Ölvertkokung 7.1.2-11
Passgenauigkeit 6.11.1.2-27
Planung der Verlegung 6.11.1.2-2
Reaktionskräfte 6.11.1.1-4, 6.11.1.1-7
Resonanzschwingungen 6.11.1.1-4, 6.11.1.1-7
Richten 6.11.1.2-5, 6.11.1.2-10
Riss, Rissbildung 6.11.1.2-2, 6.11.1.2-27
durch Fretting 6.11.1.1-10
durch Verspannung 6.11.1.1-10
durch Vibrationen 6.11.1.2-22
Längsrisse 6.11.1.2-9
Risslagen, bevorzugte 6.11.1.2-4, 6.11.1.2-15
Schaden 6.11.1.2-2
Mechanismen 6.11.1.1-1
Schadenverhütung 6.11.1.1-
Schaden 6.11.1.2-2
Mechanismen 6.11.1.1-1
Schadenverhütung 6.11.1.1-1
schadensursächliche Gestaltung 6.11.1.1-5
Schädigung durch
Chlor 6.11.1.2-2
Funken 6.11.1.2-7
Hydrauliköl 6.11.1.2-2, 6.11.1.2-22
Zersetzungsprodukte 6.11.1.2-2
Schelle 6.11.1.2-1. 6.11.1.2-23
Anordnung 6.11.1.1-7
Beilage für 6.11.1.2-23
Ersatz asbesthaltiger Beilagen 6.11.1.2-24
Lockerung 6.11.1.2-23
Probleme bei Montage 6.11.1.2-24
Schaden 6.11.1.2.1-1
an Kunststoffbeilage 6.11.1.2-23
Scheuerstellen 6.11.1.2-2
Schutzkappen bei Montage 6.11.1.2-20
Schweißnähte
als Schwachstellen 6.11.1.2.1-6
Wurzel 6.11.1.1-9
Schwingbeanspruchung 6.11.1.1-7
Schwingermüdung einer Titanlegierung 6.11.1.1-11
Riss 6.11.1.2-26
Innenseite 6.11.1.2-9
Überlastung 6.11.1.1-9
Schwingungen 6.11.1.2-1
Dämpfung 6.11.1.2-21
Anregung 6.11.1.2-11, 6.11.1.2-15
Silikongummi als Beilage für Schelle 6.11.1.2-23
Steifigkeit 6.11.1.2-11
Streuströme 6.11.1.4-.4
Strömungsstörung 6.11.1.1-9
thermischen Isolierung 6.11.1.2-21
Titanlegierungen 6.11.1.2-1
Probleme 6.11.1.2.1-1, 6.11.1.2-16
schädigende Reaktionen 6.11.1.2-22
verbeult 6.11.1.2-4
Vereisungsschäden 6.11.1.4-.13
durch Wärmedehnung 6.11.1.1-7
Verfahrensabweichungen bei Herstellung 6.11.1.2-5
Verlegung 6.11.1.1-7
Verschraubung 6.11.1.2-2
Verspannung 6.11.1.2-26, 6.11.1.2-4, 6.11.1.2-15
Verstopfung durch Dichtmittel 9.2-3
Vibrationen 6.11.1.1-2
Wandbelastung 6.11.1.1-2
Wartung 6.11.1.2-1
geeignet 6.11.1.1-5
Wasserdampf 6.12.1.2-1
wasserführend 6.11.1.4-.1
Wirbelbildung bei Durchströmung 6.11.1.1-7
Zugänglichkeit 6.11.1.2-1
Zwischenbefestigungen 6.11.1.1-7Anschmelzungen 6.11.1.2-2 Schwingrisse 6.11.1.2-4
Rollen (Verfestigungsvfahren), Gewindegrund 6.1.1.1-4
Rollenkette, 6.7-1
Brüche 6.7-9
Eintrittskontakt 6.7-3
Geräuschentwicklung 6.7-3
Längung 6.7-13
Kondensationsrost 6.7-13
lebensdaurebestimmender Verschleiß 6.7-3
mechanische Beschädigungen 6.7-14
offnen gewickelter Rollen (6.7-13
Polygoneffekt 6.7-2
Querschwingung 6.7-2
Rost 6.7-13
Schaden
Bilder 6.7-9
Ursachen 6.7-9
Schwergängigkeit 6.7-9
Schwingrisse 6.7-9
Ungleichförmigkeitsgrad 6.7-3
Verschleiß 6.7-5, 6.7-9
Wasserstoffversprödung 6.7-14
Rollenlager, Zusammenschieben 6.3.1.2-26
Rollenpendeln 6.3.1.1-33
Roller Gyration Skewing 6.3.1.1-31
Roller Skewing 6.3.1.1-31
Rollerweaving 6.3.1.1-31
Röntgen, Bestimmung der O-Ring-Lage 6.10.1.2-10
Room Temperature Vulcanizing 9.2-1
Rost
Rollenkette 6.7-13
Bildung im Öl 7.1.3.2-2
Rostlöser

© Axel Rossmann - Turbocourse
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Probleme an Schrauben 6.1.1.1-21
Verwendung bei Wartung 6.11.1.2-22
Wirkung auf Elastomere 6.10.1.2-12
Rostreie Stahldrähte, Seile 6.9-2
Rotary shaft seal. *Siehe* Radial-Wellendichtring
Rotierende Schraubenköpfe 6.10.3.2.2-12
Rotor
Absinken bei ölgedämpften Lagern 6.3.1.1-6
Bruch nach Beschädigung der Verschraubung 6.1.1.2-24
Rotorbow, (Rotorverkrümmung) 6.5-20
Rotorbruch, durch zurückgelassenes Werkzeug 6.6.4-18
Rotorschaufel, Spitzenspaltdichtung 6.10.1-4
Rotorscheiben mit integralem Labyrinthsteg 6.10.3.1.2-26
Rotorunwucht, Vibrationen 6.5-18, 7.1.4-10
Rotorverkrümmung 6.5-20
Rotrost 6.11.1.1-4
RTV. *Siehe* Room Temperature Vulcanizing
Rubbeln, Bremse 6.6.2.1-1, 6.6.2.1-6
Rückmeldekabel 6.11.1.2-7
Rückölleitung
Ablagerungen 6.3.1.2-10
Ölkoks /Ölverkokung 7.1.2-8
7.1.2-12
Ölfeuer 7.1.4-5
Minimierung der Gefahr 7.1.4-17
Rückpraller beim thermischen Spritzen 6.10.3.1.2-65
Rückschluss auf Belastung, Richtung 6.1.1.2-2
Rücksprunghärte von Elastomeren 6.10.1.2-14
Rückströmung in Pumpe, Wellenschädigung 6.5-4
Rundlaufabweichung, Einfluss auf Radial-Wellendichtring 6.10.2.1-4
Rundstahlkette 6.7.2-1
Anschmelzungen 6.7.2-5
aus austenitischen Stählen 6.7.2-7
Befestigung von Lasten 6.7.2-2
Betriebstemperatur 6.7.2-4
Bindefehler in Schweißung eines Kettenglieds 6.7.2-10
Biofilme bei BetrIEb in Wasser 6.7.2-5
dynamische Beanspruchung 6.7.2-9
Eigenschwingungen 6.7.2-3
Einflüsse auf 6.7.2-3
Einsatzbedingungen 6.7.2-3
Einsatzschicht 6.7.2-8
fehlendes Fail Safe - Verhalten 6.7.2-1
Handhabung 6.7.2-2
Herstellung 6.7.2-5
Hub- und Absenkvorgang 6.7.2-10
Kerbschlagzähigkeit 6.7.2-7
Klebestelle, Fehlstelle an Kettenglied 6.7.2-1, 6.7.2-10
Korrosion 6.7.2-4
resistente Ketten 6.7.2-12
Lagerung (Aufbewahrung) 6.7.2-2
Montage 6.7.2-2
niedrige Temperaturen 6.7.2-5
Qualität 6.7.2-5
querwirkende Krafteinleitung 6.7.2-3
Rauer Betrieb 6.7.2-3
Reinigung 6.7.2-2
Reparatur 6.7.2-2
Schweißung Kettenglied 6.7.2-10
Schwingbruch 6.7.2-10
Schwingverschleiß 6.7.2-7
Stromdurchgang 6.7.2-5
Temperaturgrenze 6.7.2-7
Überlastung 6.7.2-3
Verklemmen von Kettengliedern 6.7.2-10
Verschleiß 6.7.2-4, 6.7.2-6
Verschmutzungen 6.7.2-4
Versprödung 6.7.2-4
Versteifung 6.7.2-10
Wartung 6.7.2-2
Widerstandsschweißung als Schwachstelle 6.7.2-7
Wintereinsatz 6.7.2-7Qualitätssicherung 6.7.2-1
Rupfen, Kupplung 6.6.2.1-1, 6.6.2.2-5
Ruß
Ablagerung 8.1--16
Bildung, Einflüsse
Sprühkegel 8.1-18
Tröpfchengröße 8.1-18

S

Sacklöcher, Probleme bei Schrauben 6.1.1.2-9
SpRk (Spannungsrisskorrosion) bei Schrauben 6.1.1.3-7
Salz, Einfluss auf Ölkoksbildung 7.1.2-2
Sauerstoff
Metallbrand (-feuer) gefahr 6.12.1.2-4
Schädigung von Gummi 6.12-2
Sauerstoff
Anreicherung in Heizungswasser 6.12-3
diffusibele Kunststoffrohre 6.11.1.4-.10
im Wassersystem 6.11.1.4-.2
Sauerstoffkorrosion in Heizungsanlage 6.12-3
Scavenge Oil System. *Siehe* Rückölsystem
Scavenge-Leitungen. *Siehe* Rückölleitungen: Ölkoks
Schaden
Ablauf selbstverstärkender einer Flanschverschraubung 6.1.1.2-11
Achsen 6.5-1
Anbaugetriebe 6.4.2-8
an Bürstendichtungen 6.10.3.2.2-1
an Flanschschrauben 6.6.4-3
an Hauptlager 6.3.1.2-32
an Labyrinthdichtungen 6.10.3.1.2-1
Abhilfen 6.10.3.1.3-1
an Radial-Wellendichtringen
an Rohrschellen 6.11.1.2.1-1
an Schrauben 6.1.1.2-1, 6.1.1.3-3
an Verzahnung von Zahnrädern 6.4.1-7
Arten, Zahnräder 6.4.1-15
Bilder von/Schadensbilder
Anstreifflächen von Bürstendichtungen 6.10.3.2.2-14
Federn 6.2.18
Flachdichtung 6.10.1-13, 6.10.1-14
Gleitringdichtungen 6.10.2.2-4
Keilriemen 6.8.1-3
Kolbendichtung 6.10.2.4-1, 6.10.2.4-3
Kolbenringdichtung

©Axel Rossmann - Turbocorsult
als Schulungsunterlage nur mit Genehmigung

6.10.2.5-7
Labyrinth 6.10.3.1.2-9
O-Ring 6.10.1.2-5
Rohre in Kraftwerken 6.12.1.2-9
Rollenketten 6.7-9
Stromdurchgang bei Wälzlagern 6.3.1.1-40
Verzahnungsschäden 6.4.1-19
von Laufringspuren an Gleitringdichtungen 6.10.2.2-8
Wälzlager 6.3.1.1-1, 6.3.1.2-12
Zahnräder 6.4.1-12
Zahnriemen 6.8.2-2
Bremsscheibe 6.6.2.1-4
Druckrohrleitungen 6.11.1.1-2
durch Kraftstoff im Öl 7.1.3.2.2-1
Einflüsse, Kombination bei Schraube 6.1.1.2-9
fertigungsbedingt an Schrauben 6.1.1.2-8
Flachdichtung 6.10.1-12
Flachriemen 6.8.3-1
Früherkennung 7.2-17
Gelenklager 6.3.4-4
Getriebe
Folgen 6.4.1-1
Neben- 6.4.2-8
Planeten- 6.1.1.2-16
Gleitlager 6.3.2-6
Gleitrinddichtung 6.10.2.2-1, 6.10.2.2-2
Hochdruckschlauch 6.12-16
Honigwabendichtung 6.10.3.1.1-12
Kolbenringdichtung 6.10.2.5-1
Kupplung,
Früherkennung 6.6.1-11
Reib- 6.6.2.2-1
Risikominimierung6.6.1-11
Labyrinthdichtungen 6.10.3.1.1-1, 6.10.3.1.2-8
Merkmale, Getriebe 6.4.1-18
Rohrleitungen 6.11.1.2-2
aus Titanlegierungen 6.11.1.2-17
Seile 6.9-1
Stromdurchgang bei Wälzlager 6.3.1.1-39
Symptome bei Wälzlagern 6.3.1.2-1
V-Bänder 6.11.1.2.1-1
Verzahnungskupplungen 6.6.1-8
Vorgehen bei Wälzlagern 6.3.1.2-26
Zahnräder 6.4.1-1, 6.4.1-8
Zahnradpumpen 6.4.1-31
Zahnriemen 6.8.2-2
Wellen 6.5-1, 6.5-3
Schadensanalyse, Bürstendichtung 6.10.3.2.2-6
Schadensanfälligkeit, Labyrinth 6.10.3.1.2-4
Schadensfortschritt, Wälzlager 6.3.1.2-1, 6.3.1.2-4
Schadensfrüherkennung, 7.2-6
WEA 6.4.2-12
Schadensmechanismen
Bremsen 6.6.2.1-1
Gelenklager 6.3.4-1
Getriebe 6.4.1-1
Radial-Wellendichtringe 6.10.2.1-6
Rohrleitungen 6.11.1.1-1
Schrauben 6.1.1.1-1, 6.1.1.1-22, 6.1.1.2-1
Flanschverschraubungen 6.1.1.2-11
Wälzlager 6.3.1.1-1, 6.3.1.2-6
Zahnräder 6.4.1-8
Zahnriemen 6.8.2-6
Schadensmechanismus
Schadensmerkmale
Radial-Wellendichtringe 6.10.2.1-10
Vielkeilkupplungen 6.6.1-10
Wälzlager 6.3.1.2-15, 6.3.1.2-16
Schadensursache
O-Ringe 6.10.1.2-5
Partikel im Öl 6.3.1.2-6
Rollenketten 6.7-9
Schrauben 6.1.1.3-6
Vielkeilkupplungen 6.6.1-2
Schadensverhütung
Getriebe 6.4.3-1
Labyrinthe 6.10.3.1.3-11
Rohrleitungen 6.11.1.1-1
Vielkeilkupplungen 6.6.1-9
Schädigende Einflüsse
Gummifeder 6.2.26
Schädigendere Einflüsse 6.10.3.1.2-4
auf Druckschlauch 6.12-9
auf Schraube, Schmiermittel 6.1.1.1-2
auf Seile 6.9-3
elektrische Funken 6.9-5
auf Welle 6.5-12
Fremdmetalle
Feder 6.2.18
Cadmium 6.1.1.1-6
Medien, Zahnriemen 6.8.2-3
Metallschmelzen 6.1.1.1-6
Silber 6.1.1.1-6
verschüttete Medien 6.11.1.2-22
Gedämpfter Elastomer 6.2.25
Kraftstoffpumpe 8.1--2
Schmutzpartikel auf den Flanschflächen 6.6.4-1
Schädigungsnachweis, Wälzlager 6.3.1.2-19
Schallabstrahlung
bei Wälzlagerschaden 6.3.1.2-5
Getriebe 6.4.2-6
Messung, Keilriemen 6.8.1-8
Scharfe Kanten, Probleme
Bohrungskanten für Schrauben 6.1.1.3-1
Schaufelfixierung mit Hohlniet 6.1.26
Schäumen von Öl 7.1.3.1-3
Scheibe/Rotor-, Platzer bei Ölfeuer 7.1.4-15
Scheibenschirmung, Bremse 6.6.2.1-6
Scheibenschwingungen höherer Ordnung 6.4.1-24
Scheitelfaktor 6.3.1.2-31
Schelle
für Rohre 6.11.1.2-23
Montage 6.11.1.2.1-1
von Rohrleitungen 6.11.1.2-11
Scheuerstellen an Rohrleitungen 6.11.1.2-2
Schwingbruch 6.12.1.2-11
Verschmutzte Auflage 6.11.1.1-10
Schicht
Ablösungdurch ungünstige Materialkombination 6.10.3.1.2-61
Partikel im Öl 7.1.3.1-4
Struktur von Ölkoks 7.1.2-7
Schichtkorrosion gefüllter Kunstharze 9.3-10
Schiefstellung der Welle, Einfluss auf Radial-Wellendichtring 6.10.2.1-4
Schießrückstände, Korrosion durch 9.3-8
Schirmung von Bremsscheibe 6.6.2.1-14
Schlag einer Bremsscheibe 6.6.2.1-10
Schlagschrauber 6.1.1.1-21
Schlagzähigkeit von Polyamid

©Axel Rossmann Turboconsult
nur als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

6.3.4-10
Schlauch/Schlauchleitung 6.12-1
Biegeradien 6.12-14
Biofilme 6.12-2
Bruch, Gefährdungspotenzial 6.12-14
Diffusion siehe Permeabilität) von Feuchtigkeit 6.12-11
nach Außen 6.12-3
Dynamische Beanspruchung 6.12-14
Endanschlüsse 6.12-5
Entstehen von Mikrolöchern 6.12-3
Erwärmung durch Wärmestrahlung 6.12-14
Explosionsgefahr durch Permeation 6.12-3
Gasdurchlässigkeit 6.12-2
Gestaltungsrichtlinien 6.12-12
Kaltfluss 6.12-16
Marderbiss 6.12-16
Peitschen bei Bruch 6.12-5, 6.12-14
Permeabilität 6.12-9
nach Außen 6.12-3
Quellen 6.12-9
Reaktionskräfte 6.12-7
Schaden, Feuer durch Sprühnebels 6.12-14
Schädigung durch
Sauerstoff 6.12-2
UV-Strahlung 6.12-2
Sicherheitsmaßnahmen 6.12-1
Überhitzung durch Heißluftleck 6.12.1.2-10
Verdrillen 6.12-13
Verlegung 6.12-1
von Hydraulikanlagen 6.12-5
Werkstoffbesonderheit 6.12-3
Schlauchfassung 6.12-7
Kaltfluss 6.12-7
Korrosionsschäden 6.12-7
Verpressung 6.12-7
Schlauchgummi, Schaden durch Kriechströme 6.12-2
Schlauchverbindung, Überwurfmutter 6.12-7
Schlauchwand, Permeation nach Außen 6.12-3
Schleifen (Betriebsvorgang)
Kupplung 6.6.2.2-2
Schleifen (Fertigungsverfahren)
Schädigung, Federdraht 6.2.18
Schleifverschleiß an Zahnflanken 6.4.1-16
Schleppdruck, Kolbendichtung 6.10.2.4-1
Schleppströmung 6.10.2.4-2, 6.10.2.4-8
Stopfbuchse 6.10.2.3-2
Schleuderversuche
Getriebekomponenten 6.4.2-2
Schließkopfs eines Niets, Herstellung 6.1.26
Schlingen in Seil 6.9-16
Schlupf
Grenzschlupf, Kupplung 6.6.4-7
Amplitude, Verschleiß
Nabensitz 6.6.4-8
Wälzlagerkäfig 6.3.1.1-14, 6.3.1.1-16
Zahnrad 6.4.1-10
Schmalkeilriemen 6.8.1-1
Schmelzkrater auf Wälzlagerlaufbahn 6.3.1.1-34
Schmelzperlen bei Wälzlagerschaden 6.3.1.2-33
Schmierfähigkeit
Kraftstoff 8.1--27
Silberschicht 8.1--14
Schmierfett
Additive 9.1.1-9
Alterung 9.1.1-4, 9.1.1-7
Erprobung 9.1.1-7
Filmdicke 6.3.1.2-19
Menge 9.1.1-6
MoS_2-haltig, falsche Anwendung 9.1.2-9
Probleme 6.3.4-6
Optimierung 9.1.1-9
Radial-Welendichtring 6.10.2.1-2
Wälzlager 6.3.1.1-35, 9.1.1-3
Schmiermittel/-stoff 9.1.1-2
Anwendungsbereich 9.1.2-4
Ausfallursache bei Wälzlagern 6.3.1.2-16
Aussehen als Warnzeichen 9.1.2-8
beeinflusst durch Hilfsstoffe 9.1.2-5
Dichtflächen von O-Ringen 6.10.1.2-4
Eigenschaften 9.1.2-4
Einfluss von Umwelt 9.1.2-5
für Heißteile 9.1.1-2
Grafit 9.1.2-3
für Ketten 6.7-5
für Schrauben 6.1.1.3-6
Mangel 9.1.2-12
MoS_2 Heißteilproblem 9.1.2-12
Schädigung einer Schraube 6.1.1.1-2
Schädigung mit Silber 9.1.2-3
Reste, Aussage 9.1.2-9
Schraube 6.1.1.3-3
Seil 6.9-8
Silberhaltiges 6.1.1.2-15
Transport am Kolbenring 6.10.2.5-4
Verharzung 9.1.2-9
Wirkung auf Elastomere 6.10.1.2-12
Schmieröl (*siehe* Öl)
Alterung 7.1.2-21
Elektrische Entladungen 7.1.2-20
Kavitation 7.1.2-20
Kennwerte 7.2-6
Kraftstoff im 7.1.3.2.2-4
Luftabscheider 7.1.2-21
Partikelzählung 7.2-8
Probenentnahmeort 7.2-13
Tricresylphosphat) (TCP) 7.1.1-11
Viskositätsbestimmung 7.2-8
Zündgrenze 7.1.4-1
Zustand, Bewertung 7.2-2
Schmierspalt Wälzlager
Einfluss auf Lebensdauer 6.3.1.1-16
Schmierung
Getriebe 6.4.2-12
hydrodynamische 6.3.1.1-6, 6.3.1.1-12
Kette 6.7-6
Kolbenring 6.10.2.5-4
Probleme am Schubumkehrer 9.1.2-6
Schraubenbelastung , Abhängigkeit 6.1.1.1-7
Ungenügend, Flugunfall 9.1.2-15
Wälzlager 6.3.1.1-2
Zahnkupplung 6.6.1-2
Schmutzpartikel auf Flanschflächen, Schädigung 6.6.4-1
Schnürspannung, Seil 6.9-11
Schrägverzahnung 6.4.1-3
Schraube/-en 6.1.1.1-22
Ablösung von Silber im Betrieb 9.3-12
Abweichungen an SUPs 6.1.1.1-3
Alternativwerkstoffe 6.1.1.1-2
Anrissursache aus Bruchbild 6.1.1.2-6
Anschmelzungen 6.1.1.3-2
Anziehen 6.1.1.1-14
Anziehfaktor 6.1.1.1-15
Anzugsmoment 6.1.1.3-5
aus Aluminiumlegierungen 6.1.1.3-7

© Axel Rossmann - turbocomsoft
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

aus faserverstärkten Kunststoffen 6.1.1.1-2
ausgerissen, gelockert 6.1.1.2-21
Beilagen 6.1.1.3-2, 6.1.1.3-5
belastete Gewindegänge 6.1.1.2-8
Belastung
im Betrieb 6.1.1.2-2
im Containmentfall 6.1.1.2-2
Beschädigung 6.1.1.2-26
Beschichtungen 6.1.1.3-1, 6.1.1.3-6
Betriebseinflüsse 6.1.1.1-3, 6.1.1.1-4
Temperatur 6.1.1.3-2, 6.1.1.3-3
Bruch 6.1.1.2-1
durch aufgeschmiertes Silber 6.1.1.2-11
Fremdkörperschäden als Ursache 6.1.1.1-9
im Planetengetriebe 6.1.1.2-18
rotieren des Niederdruckturbinenleit apparats 6.1.1.2-11
Silberbeschichtung der Mutter 6.1.1.2-15
Bruchstück als Fremdkörper 6.1.1.2-26
Demontage 6.1.1.3-2
Diffusion 6.1.1.3-2
von Fremdmetallen 0-5, 6.1.1.2-4
Eindringen von Fremdmetallschmelze 0-5, 6.1.1.2-4
Einfluss
der Krafteinleitung auf Schwingfestigkeit 6.1.1.2-7
der Schmierung auf die Belastung 6.1.1.1-7
der Wärmeausdehnung 6.1.1.1-11
des Faserverlaufs 6.1.1.2-6
fertigungsbedingter Schäden 6.1.1.2-8
von Konservierungsöl 6.1.1.1-11
von Korrosion auf Lösbarkeit 6.1.1.3-6
Entsprödung 6.1.1.3-1, 6.1.1.3-5
Ermüdungsbruch an Flanschen 6.6.4-14
Faserverlauf 6.1.1.2-8
Festigkeit 6.1.1.2-1
festsitzende 6.1.1.1-20
lösen 6.1.1.1-21
Fressen 6.1.1.1-6
Fressriefen am Schaft 6.1.1.2-2
Frettingschädigung 6.1.1.1-2
galvanische Verzinkung 6.1.1.3-5
Gewaltbrüche 6.1.1.2-2
Gewalteinwirkung 6.1.1.1-6
Gewindeschädigung 6.1.1.1-5
Gleitbeschichtungen 6.1.1.3-3
Härte 6.1.1.2-1
Herstellung von Kopf und Gewinde 6.1.1.1-4
Kadmiert 6.1.1.1-12
Kerbfaktor 6.1.1.2-7
Kerbwirkung 6.1.1.1-4
Kerbschlagzähigkeit 6.1.1.3-3
Kombination von Schadenseinflüssen 6.1.1.2-9
Kopfauflage 6.1.1.3-6
Schräg 6.1.1.3-6
Kopfradius 6.1.1.2-8
Korrosion 6.1.1.1-4
Anfressungen 6.1.1.2-2
Schutz 6.1.1.3-5
Kraftübertragung im Gewinde 6.1.1.1-8
Kriechen 6.1.1.1-11, 6.1.1.3-3
Brüche 6.1.1.2-2
Lage von Schwingbrüchen 6.1.1.2-8
Längenbestimmung mit Ultraschall 6.1.1.1-16
Lastverteilung 6.1.1.2-8
Leichtbau 6.1.1.1-1
Lochfraß 6.1.1.3-7
Lockerung 6.1.1.1-9
durch Vibration 6.1.1.1-9
Lösen
bei Temperatureinfluss 6.1.1.3-6
im Betrieb 6.1.1.1-9
mehrfach 6.1.1.3-6
Lötrissigkeit 6.1.1.1-6
Merkmale von Brüchen 0-5, 6.1.1.2-4
Metallografische Untersuchungen 6.1.1.2-6
Mikrorisse im Gewindegrund durch Silber 6.1.1.2-15
Montage 6.1.1.3-2
Nachweis von Wasserstoffversprödung 6.1.1.3-7
Oxidation 6.1.1.1-4
Probleme
mit mehreren Sicherungen 6.1.1.2-21
mit Rostlöser 6.1.1.1-21
mit Sacklöchern 6.1.1.2-9
Qualitätssicherung 6.1.1.3-5
Reaktion von Silber mit Schwitzwassers 6.1.1.1-23
Reibung im Gewinde 6.1.1.1-9
Rissbildung, Ursachen für 6.1.1.1-10
Schmiedefehler 6.1.1.2-8
Schmiermittel/-stoffe 6.1.1.3-3, 6.1.1.3-6
Schäden 6.1.1.2-1, 6.1.1.3-3
Bilder von Brüchen 6.1.1.2-1
durch Kühlschmierstoffe 6.1.1.2-9
Mechanismen 6.1.1.1-1, 6.1.1.2-1
Ursachen klären 6.1.1.3-6
wasserführender Rohre 6.11.1.4-.1
Schädigung durch 6.1.1.1-2
Kadmium 6.1.1.1-22
Schrägauflage, Schraubenkopf 6.1.1.3-6
Schwefel aus Schmiermittel 6.1.1.2-15
Schwingfestigkeit 6.1.1.1-6
Sicherungen 6.1.1.1-9,6.1.1.3-2
Drähte für Muttern 6.1.1.1-9
Silber 9.3-10
Silberbeschichtung 6.1.1.1-4
am Heißteil 6.1.1.2-11
Spannungen 6.1.1.1-6
Verteilung 6.1.1.2-8
Spannungsrisskorrosion 6.1.1.1-1, 6.1.1.2-1, 6.1.1.3-3
Sprödbrüche 6.1.1.2-2
Sulfidation 6.1.1.1-4
Titanlegierungen 6.1.1.1-2
Tragfähigkeit 6.1.1.3-5
Überlastung bei Anziehen 6.1.1.3-6
Ultraschallprüfung 6.1.1.2-12
Verfärbung einr Bruchfläche 0-5, 6.1.1.2-4
Versprödungsproblem 6.1.1.3-1
Voroxidieren 6.1.1.1-21
Vorspannung 6.1.1.1-6
im Betreib 6.1.1.3-5
nicht ausreichend 6.1.1.2-18
Wasserstoffversprödung
Wasserstoffversprödung 6.1.1.1-1, 6.1.1.2-1, 6.1.1.2-4, 6.1.1.3-3, 6.1.1.3-7
Werkstoff
auswahl 6.1.1.3-3
Veränderungen im Betrieb 6.1.1.1-6

Schrauben

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Wiederverwendung 6.1.1.1-16
Verwendbarkeit 6.1.1.3-5, 6.1.1.3-6
Zustand bei Entnahme aus dem Lager 6.1.1.1-11
Schraubengewinde Ausreißen 6.1.1.2-21
Schraubenkopf
Brüche im 6.1.1.2-8
Rissbildung 6.1.1.2-8
Schrägauflage 6.1.1.3-6
Schraubenkraftwirklinie6.10.1-8
Schraubenmessgerät 6.1.1.3-1, 6.1.1.3-6
Schraubensicherung 6.1.1.1-8, 6.1.1.1-16, 6.1.1.3-5
Abweichung 6.1.1.2-21
Heftschweißung 6.1.1.2-24
mit 2 Drähten 6.1.1.2-24
Schraubenspindel, Gleitmittel 9.1.2-1
Schraubenverbindung 6.1.1.1-1
Abfall des E-Moduls 6.1.1.1-11
Gestaltung 6.1.1.3-1
Lösen 6.1.1.1-16
Wärmedehnung 6.1.1.3-3
Schraubenvorspannung6.1.1.3-2
Ursachen für den Abfall 6.1.1.1-9
Verfahren zur Erprobung der Kontrollverfahren 6.1.1.1-16
Schraubenwerkstoff, Faserverstärkte Kunststoffe 6.1.1.1-2
Schraubenwirkungsgrad 6.1.1.3-5
betriebsnah 6.1.1.3-6
Schrumpfen
Elastomer 6.2.2-2,6.2.2-5 8.1-11
O-Ring 6.10.1.2-7
Schrumpfpassungen nach dem Abstellen 6.5-20
Schubumkehrer
Schmierungsprobleme 9.1.2-6
Einwirkung von Reinigungsmitteln 9.3-8
Fretting an der Verriegelung 6.3.4-6
Schutzgas, Eindringen von Feuchtigkeit 6.12-3
Schutzkappen für Rohrleitungen bei Montage 6.11.1.2-20
Schwachstellen
Kenntnisse bei Wälzlagerschäden 6.3.1.2-1
Wellen 6.5-4
Identifikation6.5-7
Schwefel
im Kraftstoff 8.1-9, 8.3-1
Nachweis mit Silver Strip-Test 8.3-24
im Schmiermittel, Schraubenbruch am Rotor 6.1.1.2-15
Schädigung von Kraftstoffpumpen 8.3-24
Schmierfähigkeit des Kraftstoffs 8.1--27
Schweißen
Einfluss auf Wälzlager 6.3.1.1-33
in der Nähe von Seilen 6.9-5
Schweißfehler, Zahnräder EB-geschweißt 6.4.1-8
Schweißnaht, Schwachstelle an Rohrleitungen 6.11.1.2.1-6
Schwingfestigkeit 6.11.1.2.1-7
Schweißnahtwurzel, Rohrleitung 6.11.1.1-9
Schweißung
an Zahnradwellen 6.4.1-30
Kettenglied 6.7.2-10
von Kunststoffen 6.11.1.4-.5
Schwellenwerte für elektrische Spannung in Wälzlagern 6.3.1.1-33
Schwenkbewegungen
Gelenklager 6.3.4-1
Schwenklager 6.3.4-3, 6.3.4-6
Gleitmittel 9.1.2-1
Schwergängigkeit
einer Welle mit Radial-Wellendichtringe 6.10.2.1-10
Gelenklager 6.3.4-6
Rollenkette 6.7-9
vestellbare Verdichterleitschaufeln 9.3-10
Schwermetalle in Wasser 6.11.1.4-.2
Schwingbeanspruchung
Rohrleitung 6.11.1.1-7
Sicherungslasche **6.1.1.2-18**
Bruch/Brüche
einer Rohrschelle 6.12.1.2-11
Lage an Schrauben 6.1.1.2-8
Lüfterrad 6.4.1-27
Rundstahlkette 6.7.2-10
Zahnräder 6.4.1-15
Schwingermüdung
an Passfedernuten 6.5-9
Bürstendichtung 6.10.3.2.3-3
Flanschkupplung 6.6.4-3
Gleitlager 6.3.2-6
Kette 6.7-8
Labyrinthe 6.10.3.1.2-8, 6.10.3.1.2-37, 6.10.3.1.2-52, 6.10.3.1.2-55
Rohrleitung 6.11.1.1-9
Seile 6.9-3
Drähte 6.9-3
Verdichterleitapparat 6.10.3.1.2-55
Zahnriemen 6.8.2-3
Faserstränge 6.8.2-5
Schwingfestigkeit
Abfalldurch Fretting 6.1.1.1-2
an Titanlegierungen 6.11.1.2-18
Feder 6.2.12
Krafteinleitung an Schrauben 6.1.1.2-7
Leichtmetalllegierungen 6.4.2-11
Schrauben 6.1.1.1-6
Schweißnaht 6.11.1.2.1-7
Wellenbeschichtung 6.5-14
Schwingriss
an Rohrleitung 6.11.1.2-4, 6.11.1.2-26
auf Innenseite 6.11.1.2-9
an Rollenkette 6.7-9
an Welle
Anordnung 6.10.3.1.2-57
in Gleitlagerschicht 6.3.2-10
unter der Oberfläche 6.5-8
Schwingung
Anregung
Bürstendichtung 6.10.3.2.1-4
Druckstöße in einer Rohrleitung 6.11.1.2.1-6
durch Strömung in Rohrleitungen 6.11.1.2-15
Getriebe 6.4.1-27
von Rohrleitungen durch Brennkammer 6.11.1.2.1-4
Zahnräder 6.4.1-1
Antriebsstrang Kfz 6.6.2.2-5
Bedingung für Labyrinthschwingung 6.10.3.1.2-48
Blisk 6.10.3.1.2-55
einer konischen Welle 6.10.3.1.3-17
Bremse 6.6.2.1-10
Bürstendichtung 6.10.3.2.2-16
durch Kavitation 8.1-16
Einfluss der Kettenspannung 6.7-7
Getriebe 6.4.2-6
Überwachung 6.4.3-1
hochfrequente durch fehlerhafte Tragbilder 6.4.1-23
im System/Fluid. 6.10.2.4-10
im Wellensystem eines Getriebes 6.4.2-8

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsmaterial nur mit NZZ

Kraftstoffdüsen 6.11.1.2-11
Montagebeeinflusst 6.4.1-26
Öldüsen 6.11.1.2-11
Positionierung von P-Klemmen 6.11.1.2.1-4
Rohrleitung 6.11.1.2-1
Spannbolzen 6.4.1-26
von Labyrinthen 6.10.3.1.2-2, 6.10.3.1.2-45, 6.10.3.1.2-47
Zahnräder 6.4.1-24
Schwingungsdämpfer/-ung
an Rohrleitungen 6.11.1.2-21
Kolbenring 6.10.2.5-2
Labyrinthdichtung 6.10.3.1.3-9
mit Bandage 6.10.3.1.3-24
mit einer Wirbelbremse 6.10.3.2.1-23
Niet als 6.1.24
Schwingungsform an Bremsscheibe 6.6.2.1-8
Schwingungskavitation 6.10.2.4-10
Schwingungsmessgerät 6.3.1.2-29
Schwingungssensor 6.3.1.2-30
Wälzlager-Zustandsmessung 6.3.1.2-30
Schwingungsrisskorrosion, Welle 6.5-3
Schwingungsursachen an Labyrinthen 6.10.3.1.1-8
Schwingverhalten, Luftlager 6.3.3-7
Schwingverschleiß. *Siehe* Fretting
an Flanschkupplung 6.6.4-6
an Rundstahlketten 6.7.2-7
an Seildrähten 6.9-2
an Titanlegierungen 6.11.1.2-18
an Vielkeilkupplungen 6.6.1-1
an Wälzlagern 6.3.1.1-1
Sitzen 6.3.1.1-3, 6.3.1.2-4
in Dämpfungsnuten von Zahnrädern 6.4.1-7
in Gleitringdichtungen 6.10.2.2-5
Schwitzwasser
im Öl 7.1.3.2-6
im Kraftstofftank 8.3-13
Korrosion 6.1.219
Reaktion mit Silber 6.1.1.1-23
Seil 6.9-16
Wälzlager 6.3.1.1-2, 6.3.1.2-26
Wasser im Öl 7.1.3.2-5
Schwungrad
Einfluss auf Kupplung 6.6.2.2-3
Zweimassen 6.6.2.2-6
Screen. *Siehe* Sieb: Kraftstoff
Segmentlager 6.3.2-6
Seil 6.9-1
Ablege-Drahtbruchzahl 6.9-14
Ablegewinkels 6.9-11
Ablenkwinkel 6.9-12
Abplattungen 6.9-16
Abwickeln 6.9-10
Aufbewahrung 6.9-10
Aufdrehen 6.9-8
Beschichtung 6.9-8
Biegebeanspruchung 6.9-7
Drahtbruchstellen Überbrückung 6.9-14
Einfluss
der Rillenform der Seilscheiben 6.9-5
des Scheibendurchmessers 6.9-5
Ermüdungslebensdauer 6.9-5
Ersatz 6.9-17
Fail Safe Eigenschaft 6.9-14
Fasereinlagen 6.9-7
Zwischenlage 6.9-5
Gegenbiegung 6.9-8
Gleitverschleiß 6.9-11
Handhabung 6.9-10
Innere Reibungskräfte 6.9-14
Knick 6.9-16
Kontaktfläche zur Scheibenrille 6.9-12
Korbbildung 6.9-11
Lebensdauerbewertung 6.9-14
Lokale Drahtbrüche 6.9-12
Montage 6.9-10
Ovalisierung 6.9-11
Pressung 6.9-12, 6.9-11, 6.9-14
Pressmarken 6.9-8, 6.9-12
schädigende Belastungen 6.9-8
Schmiermittel 6.9-8
Schnürspannung 6.9-11
Schräger Einlauf 6.9-8
Schwingermüdung 6.9-8
Schwitzwasserbildung 6.9-16
Setzvorgänge 6.9-7
stacheliges Aussehen 6.9-12
Steifigkeit 6.9-7
Temperatur 6.9-16
Verdichtung der Oberfläche 6.9-12
Verdrillung 6.9-11
Verschleiß 6.9-8
Vorstrecken 6.9-7
Seilbruchkraft, Anschlagseil 6.9-16
Seildraht, Festigkeitspotenzial 6.9-5
Eigenspannungsverteilung 6.9-3
Härte-/Festigkeitsverläufe 6.9-3
Korrosion 6.9-2
Plastische Verformungen 6.9-2
Schwingermüdung 6.9-3
Schwingverschleiß 6.9-2
Verschleißbewegung 6.9-2

Anschmelzungen 6.9-5
aus kaltgezogenen Drähten 6.9-2
aus 'rostreien Stahldrähten' 6.9-2
Beschichtung 6.9-2
Betriebsbedingungen 6.9-7
Blitzschlag 6.9-5
Druckspannungen an der Drahtoberfläche 6.9-2
Eignung als Anschlagseil 6.9-17
'Fail Safe' Verhalten 6.9-1
geschlossene 6.9-7
Korrosion 6.9-4
Laufende 6.9-1
Lebensdauer 6.9-1, 6.9-11
Litzenlockerung 6.9-11
Mechanische Beschädigungen 6.9-5
Oberflächenhärte 6.9-2
Plastische Verformungen 6.9-4
Prüfung, Magnetinduktive Streufeldprüfung 6.9-14
Schaden 6.9-1
Zopf 6.9-11
Schädigung 6.9-3
durch funken bei Trennarbeiten 6.9-5
Schweißarbeiten in der Nähe 6.9-5
Schwingermüdung 6.9-3
Spannungsrisskorrosion 6.9-2
Stehende 6.9-1
Überprüfung 6.9-1
Untersuchungen 6.9-2
Versagensmechanismen 6.9-1
Verschleiß 6.9-3
verzinkt 6.9-2
Wasserstoffversprödung 6.9-2
Zustand, Bewertung 6.9-14
Seilzüge 6.9-1
System Bowden 6.9-18
Seizure. *Siehe* Fressen
Selbsterregender Schwingungen, Gleitlager 6.3.2-1
Selbstsichernd

© Axel Rossmann Turboconsult
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Gewindeeinsätze 6.1.1.2-21
Muttern 6.1.1.1-9, 6.1.1.1-16
Selbstverstärkender Schadensablauf
Flanschverschraubung 6.1.1.2-11
Selbstzündung, eines Ölfeuers 7.1.4-2
Semipermeable Membranen
für Luftfeuchtigkeit 6.12.1.2-4
Sensoren
für Nachweis von Wasser in Öl 7.1.3.2-1
zur Getriebeüberwachung 6.4.3-8
Position 6.4.3-8
Setzen, Feder 6.2.12
SFC. *Siehe* Spezifischer Kraftstoffverbrauch
Shore A-Härte 6.2.22, 6.2.24
Sicherheit
Anforderungen, Druckrohrleitungen 6.11.1.1-2
Anschlagseil 6.9-16
Sicherheitsmaßnahmen,
Anschlagseil 6.9-16
Hochdruckschlauch 6.12-1
Sicherheitsvorschriften, Technische Gase 6.12.1.2-4
Sicherung
formschlüssige 6.1.1.1-9
Schrauben und Muttern 6.1.1.1-8, , 6.1.1.1-16, 6.1.1.3-2
Sicherungsdrähte
Durchscheuern 6.11.1.2.1-5
problematische Anordnung 6.12.1.2-11
Verlegung 6.1.1.1-17
von Muttern 6.1.1.1-9
Sicherungslasche 6.1.1.1-18
Bruch an Topfsicherung 6.1.1.2-17
Schwingbeanspruchung 6.1.1.2-18
Sieb
Kraftstoff 8.1--29
Rückstände vom Öl 7.2-1
Siedepunkt
Kraftstoff 8.1--8
Absenkung
Bremsflüssigkeit 6.12-10
Hydrauliköl 6.12-10
Silber
Ablösung von Schrauben und Muttern 9.3-12
Beschichtung
Schraube im Heißteil 6.1.1.2-11
der Mutter, Schraubenbruch 6.1.1.2-15
Gleitschicht, Wälzlagerkäfig 6.3.1.1-25
Kontakt mit Titanlegierung 9.1.2-3
Korrosion von
Aluminiumlegierung 9.1.2-3
Magnesiumlegierung 9.1.2-3
Mikrorisse im Gewindegrund von Schrauben 6.1.1.2-15
Probleme 9.3-10
an Schrauben 6.1.1.1-23
Reaktion mit Kraftstoff 8.1-14
Schädigungen durch 6.1.1.1-6
Schmierfähigkeit 8.1--4
Schrauben 6.1.1.1-4
Wälzlagerkäfig 6.3.1.1-37
Silberhaltige Schmiermittel 6.1.1.2-15
Schädigung durch 9.1.2-3
Silberlegierungen
Reaktion mit Öl 7.1.1-6
Silbersulfid 8.1-14
Reibbeiwert 8.1-16
Silikongummi
als Beilage für Rohrschelle 6.11.1.2-23
Dichtungen, Schädigung durch Flugbenzin 9.2-1
Einkomponentenversion 9.2-2
in Labyrinthen 6.10.3.1.1-19
kleben von 6.10.3.1.2-63
korrosive Wirkung 9.2-1
Zweikomponentenversion 9.2-2
Silver Strip-Test, Nachweis von Schwefel im Kraftstoff 8.3-24
Simmerring. *Siehe* Radial-Wellendichtring
Sinterschichten von Gleitringdichtungen 6.10.2.2-4
Sitzflächen
Wälzlager 6.3.1.2-1
Wellennabe 6.5-8
Skidding 6.3.1.1-14, 6.3.1.1-33. *Siehe auch* Käfigschlupf
Abhilfen 6.3.1.1-25
Gegenmaßnahmen 6.3.1.2-23
Wälzlager 6.3.1.1-24
sludge. *Siehe* Schlamm: im Öl
SMIE (Solid Metal Induced Embrittlement) 6.1.1.1-1
SOAP 7.2-13. *Siehe auch* Spectrometric Oil Analysis Program
Beispiele 7.2-13
Sollbruchstelle an Nebenwellen 6.6.1-2
Soluble gum 8.3-4
Spacer (Rotor-Abstandsring)
Fretting 6.10.3.1.3-9
Schwingbruch 6.10.3.1.3-9
Spaltänderung Labyrinthdichtung 6.10.3.1.1-2
Vergrößerung 6.10.3.1.2-8
Spaltdichtung, statische 6.10.2.5-1
Spaltextrusion, O-Ring 6.10.2.4-8, 6.10.2.4-11
Kolbendichtung 6.10.2.4-1
Spalthöhe, Labyrinth 6.10.3.1.1-11
Spaltverluste, Labyrinthdichtung 6.10.3.1.1-2
Späne
Entstehung 6.3.1.2-33
kupferfarbige im Ölfilter 6.1.1.2-16
Späneanfall
im Öl übersehen 7.2-20
Wälzlagerschaden 6.3.1.2-2
Spannbolzen
Dämpfung 6.4.1-26
Probleme bei zentrischen 6.1.1.1-13
Schwingungen 6.4.1-26
Verspannung 6.1.1.1-13
Spannschrauben, Herstellungsmängel 6.11.1.2-19
Spannungen in Schrauben 6.1.1.1-6
Spannungsrisskorrosion
an Schrauben 6.1.1.1-1, 6.1.1.2-1, 6.1.1.3-3
in luftabgeschlossenen Räumen 6.1.1.2-16
in Sacklöchern 6.1.1.3-7, 6.1.1.2-9
durch Schwefel
Gelenkkopf 6.3.4-3
in Wassersystemen 6.11.1.4-.7
interkristalline 6.11.1.4-.8
Seile 6.9-2
transkristalline 6.11.1.4-.8 6.1.2-19
Spannungsverteilung
in Schrauben 6.1.1.2-8
in Wälzlagerlaufbahn 6.3.1.1-6
Spektrometrische Ölanalyse 7.2-6
Grenzen, Versagen 7.2-22
SOAP (Spectrometric Oil

© Axel Rossmann - Turkoconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Analysis Program) 7.2-6
Sperrluft, Verunreinigung 6.3.1.1-43
Spezifikation
Kraftstoff 8.1-5
Abweichungen de 8.1--27
Erweiterung 8.1-7
von Kraftstoffen 8.1-18
Spezifischer Kraftstoff-verbrauch (Specific Fuel Consumption = SFC) 8.1-9
Spindellager 6.3.1.2-22
Spinning modes. *Siehe* Druckwelle: rotierend
Spiralfeder, Einspannstelle 6.2.16
Spiralförmiges Rissbild, Welle 6.5-8
Spiralseil 6.9-1, 6.9-17
Spitzenpanzerung, Labyrinthe 6.10.3.1.1-18, 6.10.3.1.2-8
Spitzenspaltdichtung, Rotorschaufel 6.10.1-4
Spleißung von Anschlagseil 6.9-17
Split ring type. ***Siehe*** **Radial-Gleitringdichtung**
Split Ring Type Gleitringdichtung 6.10.2.2-2
Sprays 9.1.1-2
Sprengen, Sprengwirkung
Wellennabe 6.6.1-4, 6.5-6
durch Reibrost 6.6.4-1
Sprödbrüche an Schrauben 6.1.1.2-2
Sprödigkeit, Elastomer 8.1-11
Sprühkegel
Einfluss auf Rußbildung 8.1-18
Veränderung 8.1-16
Sprührate Öl 7.1.2-2
Spurenmetalle im Kraftstoff 8.1--24
Stabilisatoren im Öl 7.1.1-2
Stahl-/Drahtseile 6.9-1
Stahldrähte als Elastomer Verstärkung 6.2.26
Standing Contact Fatigue 6.3.1.1-22
Stangendichtung, Elastomer 6.10.2.4-1
Start
Kraftstoffeinfluss
Probleme 8.1-22
Verhalten 8.1-6
Wartezeit bis Neustart 9.3-9
Starter. *Siehe* Anlasser: Getriebe
Stationäre Getriebe 6.4.1-18
Statische Belastung, Federn 6.2.13
'Statische' Spaltdichtung 6.10.2.5-1
Statische Zahnkräfte 6.4.3-6
Statischen Dichtungen 6.10.1-3
Statistik, Ursachen von Getriebeschäden 6.4.2-4
Staub/Stäube
Ablagerungen, Erosion durch Abplatzen 8.1-10
brennbare 6.12.1.2-3
im Öl 7.1.3.2-2
Ölkoksbildung durch 7.1.2-2
Stauchen, Feder 6.2.18
Steckschlüssel als Fremdkörper 6.6.4-18
Stehbolzen 6.1.1.2-12
Bruch an Nasenconus 6.1.1.2-22
in Leichtmetall 6.1.1.2-22
Stehende Seile 6.9-1
Stehende Welle 6.10.3.1.2-38
Steifigkeit
einer Bürstendichtung 6.10.3.2.1-13
Flansch 6.10.1-8
von Rohrleitungen 6.11.1.2-11
Wälzlager 6.3.1.2-24
Welle/Nabe 6.5-3
Stethoskop, Schallüberwachung 6.3.1.2-27
Steuerkette
Belastung im Verbrennungsmotor 6.7-8
Geräusch 6.7-6
Stick-Slip-Bewegung (-Effekt) 6.3.2-3, 9.1.2-8
Bremse 6.6.2.1-8
Gleitringdichtung 6.10.2.2-3
Kolbendichtung 6.10.2.4-8
Kupplung 6.6.2.2-5
Stickstoff im Kraftstoff 8.1-8
Stillstand
Korrosion, Wälzlager 6.3.1.1-43
Schaden an Bremse 6.6.2.1-2
Wirkung von Waschmittelresten 9.3-12
Zeiten
Auswirkung auf Getriebe 6.4.2-10
Einfluss auf O-Ringe 6.10.1.2-1
Wasser im Öl 7.1.3.2-6
Wasserführende Rohre 6.11.1.4-1
Stopfbuchse (Packung) 6.10.2.3-1
abzudichtenden Medium 6.10.2.3-1
Packungsschnur 6.10.2.3-1
Pumpwirkung 6.10.2.3-2
Schleppströmung 6.10.2.3-2
ungeeignete 6.10.2.3-2
Wellendichtung 6.10.2.3-1
Wellenverschleiß 6.10.2.3-2
Stopfen, Undichtigkeit 6.11.1.2-20
Stoßbelastung, Stöße
Getriebeschaden durch 6.4.2-6
Kette/Kettentrieb 6.7-8
Strahlgut, Strahlpartikel
im Öl 7.1.3.1-5
Wälzlagerverunreinigung 6.3.1.1-11
zwischen Flanschen 6.6.4-12
strain controlled Tightening *siehe* fließgrenzengesteuertes Anziehen
Streamers, Schädigung von Wälzlagerlaufflächen 6.3.1.1-26
Streckgrenze 6.1.1.1-16
Streusalz, Gummischädigung 6.2.2-9
Streuströme, Rohrleitung 6.11.1.4-.4
Stroboskop 6.3.1.2-27
Stromdurchgang
Anlauffarbe als Indiz 6.6.1-8
bei Fettschmierung 9.1.1-4
Wälzlager 6.3.1.2-16
Flanschkupplung 6.6.4-4
Getriebe 6.4.2-4
Gleitlager 6.3.2-6, 6.3.2-9, 6.3.2-10
Rundstahlkette 6.7.2-5
Schaden
an Kippsegmentlager 6.3.2-10
Bilder bei Wälzlagern 6.3.1.1-11, 6.3.1.1-34, 6.3.1.1-40
Verzahnungskupplung 6.6.1-8
Zahnrad 6.4.1-17, 6.4.1-27
Strömung
Anregung von Labyrinthschwingungen 6.10.3.1.3-2
Blasenbildung 6.11.1.2-13
durch Wirbel 6.11.1.2-14
Strömungserosion 6.10.2.4-6
Kolbendichtung 6.10.2.4-1, 6.10.2.4-3
Strömungsgeschwindigkeit, Einfluss auf Wassersystem 6.11.1.4-.4

©Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Strömungsstörungen, Rohrleitung 6.11.1.1-9
Stützkegel, Labyrinthdichtung 6.10.3.1.2-43, 6.10.3.1.3-8
Stützring für Dichtung 6.10.2.4-11
Sulfidation (engl. Sulphidization)
bei Schrauben 6.1.1.1-4
Reaktion mit Schwefel in Kst. 8.3-24
Schäden 9.1.2-2
SUP (Suspect Unapproved Parts), O-Ringe 6.10.1.2-1
Symptome
Getriebezustand 6.4.1-33
Wälzlagerschäden 6.3.1.2-1, 6.3.1.2-2
Synchronriemen 6.8.2-1
Synthetische Öle 7.1.1-2
inkompatibel mit Mineralöl 7.1.1-6
Phosphor 6.1.1.2-15

T

TAN (Total Acid Number), Neutralisationszahl NZ 7.2-8
Tankverschluss
Kraftstoff, Dichtigkeit 8.3-22
undichter O-Ring 8.3-14
Tankwände, Korrosion 8.2-11
Taumelfehler, Zahnrad 6.4.3-3
Tausch von Öl 6.3.1.2-9
TCP (Tricresylphosphat) 7.1.1-11
Notlaufeigenschaften 7.1.1-11
'Technische Gase' 6.12.1.2-1, 6.12.1.2-4
Sicherheitsvorschriften 6.12.1.2-4
'Technische Wässer' 6.11.1.4-.13
Teflon ® . *Siehe* Polytetrafluorethylene 9.1.2-3
Temperatur
Einfluss
auf Rohrleitung 6.11.1.1-4
auf Lösbarkeit einer Schraube 6.1.1.3-6
Gradienten in Flanschverbindung 6.6.4-14
Grenze von Rundstahlketten 6.7.2-7
Kraftstoff 8.1-24
Messung, Keilriemen 6.8.1-8
Thermal Oxidation Stability. *Siehe* Thermische Stabilität: Kraftstoff
Thermal Stability Rig 8.1-24
Thermische Rissbildung, Gleitringdichtung 6.10.2.2-8
Thermische Schädigung
Kolbendichtung 6.10.2.4-1
O-Ring 6.10.1.2-5
Thermische Stabilität, Kraftstoff 8.1-24
Prüfung 8.1-24
Thermische Zerstörung, Polymerdichtungen 6.10.2.4-6
Thermischer Dissoziation von Wasser, Wasserstoffentstehung 6.12.1.2-7
Thermische Verformung, Zahnrad 6.4.1-4
Thermisches (Bremsen-) **Rubbeln** 6.6.2.1-8, 6.6.2.1-10
Thermoermüdung 6.10.3.1.3-8
Bremsscheibe 6.6.2.1-6
Kraftstoffeinfluss auf 8.1-16
Thermografie 6.8.1-8
Thermometer, Wälzlager 6.3.1.2-27
Thin-lip Bruch 6.12.1.2-9
TiN.(Titannitrid) *Siehe* Beschichtung: an Vielkeilkupplung 6.6.1-4, 6.6.1-6
Titan (-legierung)
als Labyrinthspitze 6.10.3.1.2-24
als Nabe 6.6.4-3
Einfluss der Risszähigkeit 6.11.1.2-18
Federn aus 6.2.13
für Rohrleitungen 6.11.1.2-16
Probleme 6.11.1.2.1-1
Kaltverschweißen 6.1.1.1-20
Kontakt mit Silber 9.1.2-3
Prothese
Kaltverschweißen 6.1.1.2-28
Reibverschleiß 6.1.1.2-28
Riss in einer Rohrleitung durch Fretting 6.11.1.1-10
Rohre, schädigende Reaktionen 6.11.1.2-22
medizininsche Anwendung 6.1.1.2-28
Schadensfälle 6.11.1.2-17
Schädigung durch Phosphat-Ester 6.11.1.1-13
Schrauben aus 6.1.1.1-2
Schwingverschleiß (Fretting) 6.11.1.2-18
Verfestigungsverhalten 6.11.1.2-18
Wasserstoffversprödung 6.11.1.1-13
Titanfeuer, Schädigung von Rohrleitungen 6.11.1.2-2
Toleranzen, Wälzlager 6.3.1.1-11
Tonnenbildung
hochtourige Welle 6.3.3-7
Tonraum 6.10.3.1.2-41
Top-off mixing 7.1.1-4
Topfsicherung 6.1.1.1-19
Bruch einer Sicherungslasche 6.1.1.1-19, 6.1.1.2-17
Getriebeschaden **6.1.1.2-16**
Torsion
Schwingbruch,
Kegelstift Wellennabe 6.5-6
Schwingung
Dämpfer, Kupplung 6.6.2.2-5
Getriebe 6.4.2-6
Kardangelenk 6.4.1-24
Welle 6.5-3, 6.5-8
Welle 6.5-6
Total Acidity Number (TAN) 7.1.2-2
Tragbild
Auswirkung fehlerhaftes 6.4.1-23
Einflüsse auf 6.4.1-23
Gleitringdichtungen 6.10.2.2-6
Zahnrad 6.4.1-23, 6.4.2-12, 6.4.3-2, 6.4.3-3
Tragfähigkeit
Gleitlager 6.3.2-8
Schraube 6.1.1.3-5
Tragseile 6.9-1
Tragspur, Zahnflanke 6.4.1-23
Traktor, Federbalg 6.2.2-9
Transport
Wälzlagerschaden/-schädigung durch 6.3.1.1-11, 6.3.1.1-21, 6.3.1.1-23
Transportketten 6.7.2-1
Transversalwelle 6.10.3.1.2-38
Trapezring,Kolbenring 6.10.2.5-4
Treibriemen 6.8.3-1
Trennarbeiten mit Funken in der Nähe von Seilen 6.9-5
Tri (Trichlorethylen)
Probleme 6.11.1.2-22
Triboelektrische Aufladung 7.1.2-20
Tribokorrosion. *Siehe* Fretting
Tribopolymere 7.2-8
Tribosystem
Bremse 6.6.2.1-1, 6.6.2.1-4
Kolbendichtung 6.10.2.4-3
Kolbenringdichtung 6.10.2.5-1
Trikresylphosphat (TCP)
in synthetischem Öl 6.1.1.2-15 7.1.1-11, 7.1.1-12
Trinkwasserschläuche 6.12-2

© Axel Kossmann - abocomplete
als Schulungsmedium nur mit Lizenz

Tripode Gelenk 6.3.4-3
Trockenlauf
Gleitlager 6.3.2-8
Gleitringdichtungen 6.10.2.2-5
Kette 6.7-6
Trockenschmierfilm 9.1.1-2
Problem bei Wasserzutritt zu MoS2 9.1.2-6
Tröpfchengröße, Einfluss auf Rußbildung 8.1-18
Tropfenschlag
an Ventilen 6.12.1.2-9
durch Wasser im Öl 7.1.3.2-2
Erosion 6.12.1.2-9
in Pumpen 6.12.1.2-9
Trumkraft bei Riementrieb 6.8.2-2
TSR. ***Siehe*** **Thermal Stability Rig**
Turbine
Belüftung 6.10.3.1.1-4
Heißgaseinbruch 6.10.3.1.1-4
Turbine Midframe 6.1.1.2-24
Turbinenradbruch durch MoS_2-Schmiermittel 9.1.2-12
Turbinenrotor, Lösen einer Verschraubung 6.1.1.2-26
Turbinenschaufeln, lötähnliches Festbacken 9.3-11
Turbinenwelle, Ölfeuer 7.1.2-5
Turbogetriebe 6.4.2-8
Turbomaschine
Kraftstoffsystem 8.1-1
Luftlager 6.3.3-9

U

Überdeckung, Bürstendichtung 6.10.3.2.1-20
Überdrehzahlen, Getriebeschaden 6.4.2-6
Übergangsradien, Welle 6.5-7
Überhitzung
Keilriemen 6.8.1-4
Kraftstoffeinfluss 8.1-6
Labyrinthe 6.10.3.1.2-8, 6.10.3.1.3-3
Schäden 6.10.3.1.2-2
von Kraftstoff 8.1-24
von Schläuchen durch Heißluftleck 6.12.1.2-10
Welle 6.5-18, 7.1.4-10

Überholung
Getriebe 6.4.2-8
Intervalle, Gleitringdichtungen 6.10.2.2-1
Leichtmetallgehäuse 6.1.1.3-
Zahl begrenzen 6.4.2-10
Überlastung
beim Anziehen einer Schraube 6.1.1.3-6
fettgeschmiertes Wälzlager 6.3.1.2-16
Getriebeschaden 6.4.2-6
Gleitlager 6.3.2-8
Merkmale, Kolbenringdichtung 6.10.2.5-7
Rundstahlkette 6.7.2-3
Schäden, Zahnräder 6.4.2-4
Wälzlager 6.3.1.2-6
Überlastungsschutz, Kupplung als 6.6.3-5
Übermaßkontur, Welle 6.5-16
Überprüfung von Seilen 6.9-1
Überschallflug, Ölfeuer 7.1.4-6
Überschmierung (Fett) 9.1.1-5
Überspringen einer Kette 6.7-14
Überwachung
einer Anlage, Fachbegriffe 7.2-2
Getriebe 6.4.2-12
Lagerschmierung 6.3.2-3
Öl und Ölsystem 7.2-1
Öl 7.2-17
Ölsystem 7.2-1
Überwurfmutter, Schlauchverbindung 6.12-7
Ultraschallmessgerät 6.3.1.2-29
Bestimmung einer Schraubenlängung 6.1.1.1-16
Ultraschallprüfung
von Schrauben 6.1.1.2-12
von Zahnrad 6.4.1-28
Ultraschallreinigung, Wälzlagerschädigung 6.3.1.1-22
Umbiegen einer Sicherungslasche 6.1.1.2-18
Umgebungseinfluss
auf Gummifeder 6.2.26
auf Wälzlager 6.3.1.1-2
Getriebeschaden 6.4.2-6
Umlaufbiegung, Welle 6.5-6
Umwelteinflüsse, Windenergieanlage 7.2-9
Umweltproblematische Verunreinigungen 9.3-8
Undichtigkeit
an Stopfen 6.11.1.2-20
Getriebegehäuse 6.4.2-8
Ungleichförmigkeitsgrad, Rollenkette 6.7-3
Unrundheit, Druckrohrleitung 6.11.1.1-7
Unterdrückung von Koksbildung 7.1.1-4
Untersuchungen
Seile 6.9-2
Zahnriemen 6.8.2-3
Unwucht
durch Verschmutzung einer Flanschauflage 6.6.4-12
Getriebe 6.4.2-6
Wälzkörper 6.3.1.1-11, 6.3.1.1-18
nach dem Abstellen 6.5-20
Wälzlagerschaden
Wälzkörper 6.3.1.1-27
Welle 6.5-6
UV-Strahlung
Gummi Schädigung 6.2.26
Schädigung von Schläuchen 6.12-2

V

V-Bänder
Probleme 6.11.1.2-19
Schäden 6.11.1.2.1-1
Vanadium im Kraftstoff 8.1--9
Vapor locking. *Siehe* Blasenbildung: im Öl
Varnishes. *Siehe* Glasuren auf Kunststoffbasis:Öleinwirkung
Ventile, Tropfenschlag 6.12.1.2-9
Ventleitungen. *Siehe* Entlüftungsleitungen: Verkokung
Verbeulte Rohrleitungen 6.11.1.2-15
Verbindungselemente 6.1.1.1-1
Verbrennungsmotor
Kolbenringdichtung 6.10.2.5-2
Steuerkette Belastung 6.7-8
Verbrennungsstabilität, Kraftstoffeinfluss 8.1-16
Verbundlager mit abstützender Stahlbuchse 6.3.4-9
Verchromen, Dichtflächen von Zahnradwellen 6.4.1-30
Verdampfungsverhalten, Kraftstoff 8.1-6, 8.1-16
Verdichter
Austrittslabyrinth 6.10.3.1.2-37
Beschaufelung
Reinigen 9.3-2
Waschen 9.3-2
Waschflüssigkeiten 9.3-3
Enddichtung 6.10.3.1.1-7
Leitapparat, Schwingermüdung 6.10.3.1.2-55
Pumpen (Strömungsabriss),

© Axel Rossmann Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Kraftstoffeinfluss 8.1-27
Verdichterwaschen 9.3-1
Kraftstoffverbrauch 9.3-2
Problem an Heißteilen 9.3-3
Reinigungsmittel 9.3-1
Verfahrensparameter 9.3-5
Waschmitteleinbringung 9.3-5
Wasser im Öl 7.1.3.2-6
Zulassung neuer Medien 9.3-2
Verdrehsicherung
Kupplungsflansche 6.6.4-10
vorgeschriebene 6.1.1.2-21
zusätzliche , Problematik 6.1.1.2-12
Verdrillen, Schlauchleitung 6.12-13
Vereisung
Möglichkeit bei wasserführenden Rohren 6.11.1.4-2
Schäden an Rohrleitungen, Ablauf 6.11.1.4-.13
Verfahren
Abweichungen der Rohrleitungsherstellung 6.11.1.2-5
Parameter von Verdichterwaschen 9.3-5
Verfärbung
durch Kohlenstoff im Öl 7.1.1-11
Flachdichtung 6.10.1-14
Gleitlager 6.3.2-9
Öl 7.1.1-10
Schraubenbruchfläche 0-5, 6.1.1.2-4
Verfestigungsverhalten, Titanlegierungen 6.11.1.2-18
Vergessenes Werkzeug 6.1.1.1-6
Verharzen
Schmiermittel 9.1.2-9
Öl 7.1.2-6
Verklebung von Metallfilz 6.10.3.1.2-64
Verklemmen von Kettengliedern, Rundstahlkette 6.7.2-10
Verkokung
Öl 7.1.2-1
im Gasstrom 6.3.1.2-4
Wälzlagerbereich 6.3.1.2-1
Verkrümmung (Rotorbow), Welle 6.5-4
Verkürzungseffekt bei Gummi (Joule Effekt) 6.10.2.1-13
Verlegung von Schlauchleitung 6.12-1
Verletzungsrisiken, Hochdruckschlauchschaden 6.12-1
Verlöschen, Triebwerk durch Wasser im Kraftstoff 8.3-6, 8.3-14
Verlustleistung
Abführung durch Öl 6.4.2-1
Zahnrad 6.4.1-4
Verpackung, Wälzlager 6.3.1.2-26
Versagensbilder, Wellenkupplung 6.5-6
Versagensdruck, Flachdichtung 6.10.1-10
Versagensmechanismen
Seile 6.9-1
Wellen 6.5-4
Versagensursachen bei Labyrinthen 6.10.3.1.2-1
Verschiebegelenk 6.3.4-3
Verschleiß
abrasiver an Wälzlagern 6.3.1.1-10
adhäsiver an Wälzlagern 6.3.1.1-10
an Radial-Wellendichtringen durch Verschmutzung 6.10.2.1-8
an Zahnflanken 6.4.1-16
Bremse 6.6.2.1-1, 6.6.2.1-2, 6.6.2.1-4
Bürstendichtung 6.10.3.2.1-20
durch Wasser im Öl 7.1.3.2-2
Flachriemen 6.8.3-3
Gelenklager 6.3.4-4
Gleitlager 6.3.2-6
Kabel und Leitungen 6.11.1.2-6
Keilriemen 6.8.1-3
Keilverzahnung in Zahnradwellen 6.4.1-8
Kettenrad 6.7-5
Labyrinthspitzen 6.10.3.1.1-22
mechanischer an Gleitlager 6.3.2-8
Rollenkette 6.7-3, 6.7-5, 6.7-9
Rundstahlkette 6.7.2-4
Seil 6.9-3, 6.9-8
Versagen einer Drahtsicherung 6.12.1.2-11
Wellenlauffläche von Radial-Wellendichtringen 6.10.2.1-8
Verschleißbeanspruchte Rundstahlketten 6.7.2-6
Verschleißbewegung, Seildrähte 6.9-2
Verschleißdaten, Bürstendichtung 6.10.3.2.3-3
Verschleißgrenze, Zahnräder 6.4.1-8
Verschleißprodukte
Verschleißspäne
Wälzlager 6.3.1.2-33
Vielkeilkupplung 6.6.1-10, 6.6.1-11
Zahnkupplung 6.6.1-4
Verschleißverhalten, TiN-Schicht auf Vielkeilkupplung 6.6.1-6
Verschleißwirkung, Partikel im Öl 7.1.3.1-3
Verschlimmbesserung 6.10.3.1.2-33
statische Dichtungspackung aus PTFE 6.10.2.2-12
Verschmutzung
Kraftstoff 8.3-1
Rundstahlkette/Ankerkette 6.7.2-4
Wälzlager 6.3.1.1-1
fettgeschmiert 6.3.1.2-16
Verschraubung
an Rohrleitungen 6.11.1.2-2
Anziehen Rohrleitungen 6.11.1.2-4
Versagen an Flanschverbindungen 6.11.1.2-20
Versorgungswerte 7.2-2
Verspannung
Rohrleitung 6.11.1.2-4, 6.11.1.2-15, 6.11.1.2-26
Rissbildung 6.11.1.1-10
durch
Fertigungsfehler 6.11.1.2.1-6
Wärmedehnung 6.11.1.1-7
von Wälzlagern durch Außenringverformung 6.3.1.2-24
Versprödenl-ung
Elastomere 6.2.22
Flachdichtung 6.10.1-14
Feder 6.2.12
Hochdruckschlauch 6.12-9
Luftfeder 6.2.28
Rundstahlkette 6.7.2-4
Werkstoffalterung 6.1.1.2-4
Versprödungsgefahr, Flachdichtung 6.10.1-7
Versprödungsproblemen, Risiko bei Schrauben 6.1.1.3-1
Versteifende Wirkung durch Kreiselkräfte 6.6.4-16
Versteifung
von Labyrinthringen 6.10.3.1.2-43
einer Rundstahlkette 6.7.2-10
Versteifungsringe an Labyrinthen 6.10.3.1.3-21, 6.10.3.1.3-25
Verstellleitschaufeln

© Axel Rossmann - Turbocomm
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Einwirkung von Reinigungsmitteln 9.3-8
Korrosion 6.1.219
Verstopfung
Kraftstoffeinspritzöffnung 8.3-10
von Heißteilen 6.10.3.1.2-3
Versuch
Ergebnis, relevante Einflüsse 6.1.2-12
Nachweis, Klärung durch 6.1.2-12
Verunreinigtes Öl, Korrosion in Gleitlager 6.3.2-9
Verunreinigung/-en
von Sperrluft, Einfluss auf Wälzlager 6.3.1.1-43
aggressive an Rohrleitungen 6.11.1.2-2, 6.11.1.2-21
bei Kraftstoffversorgung 8.3-20
Gestaltung des Kraftstoffsystems 8.3-24
Gleitringdichtungen 6.10.2.2-6
im Flugzeugtank 8.2-11
im Kraftstoff 8.1-1, 8.3-2
im Öl, Identifikation 7.1.3.1-1
umweltproblematische in Waschflüssigkeit 9.3-8
Wassersystem 6.11.1.4-.4
Verwechslung von Hilfsstoffen 9.1.1-1
Verwirbelung der Anströmung einer Bürstendichtung 6.10.3.2.2-12
Schutz vor 6.10.3.2.3-9
Verwirbelungsverluste
Bürstendichtung 6.10.3.2.1-4
im Getriebe 6.4.2-2
Verzahnung
Innenliegende Anrisse 6.4.1-14
Eigenschaften 6.4.1-13
Fehler 6.4.3-6
Schäden 6.4.1-7
Verzahnungskupplung 6.6.1-6
Schäden 6.6.1-8
Stromdurchgang 6.6.1-8
Verzahnungsschäden, Schadensbilder 6.4.1-19
Verzinken
galvanisch, Schraube 6.1.1.3-5
Seile 6.9-2
Rohrleitung aus Stahl, Anordnung zur Strömung 6.11.1.4-2
Verzug
Labyrinthe 6.10.3.1.2-8
Zahnrad 6.4.1-4
Vestellbare Verdichterleitschaufeln
Schwergängigkeit 9.3-10
Vibration 6.5-18, 7.1.4-10
Lockern von Schrauben 6.1.1.1-9

durch
Fremdkörper 6.6.4-18
Verschmutzung einer Flanschauflage 6.6.4-12
Rotorunwucht 6.5-18, 7.1.4-10
Getriebe 6.4.2-6
Indiz für Wälzlagerschaden 6.3.1.2-3
Rohrleitung 6.11.1.1-2
Rissbildung 6.11.1.2-22
Wirkung auf Wälzlager 6.3.1.1-21
Vibrationsmessungen
Getriebe 6.4.1-33
Keilriemen 6.8.1-8
Vielkeilkupplung (Vielkeilverzahnungen) 6.6.1-1, 6.6.3-1
Auswechseln der Welle 6.6.1-2
geschmiert von
Kraftstoff 6.6.1-1, 8.1-27
Lecköl 6.6.1-1, 6.6.1-9
makroskopische Schadensmerkmale 6.6.1-10
Montage 6.6.1-9
Nitrierschicht 6.6.1-6
Titannitrid (TiN)-Beschichtung 6.6.1-4, 6.6.1-6
Schadensursachen 6.6.1-2
Schadenverhütung 6.6.1-9
Schwingverschleiß 6.6.1-1
Versagen durch Reibverschleiß 6.6.1-2
Verschleißprodukte 6.6.1-10, 6.6.1-11
Wellen 6.5-6
Viskose Dämpfung 6.2.22, 6.2.25
Viskosität
eines Öls unter Druck 6.3.1.1-12
Kraftstoff 8.2-3
Sprühbild 8.1--22
Öltyp 7.1.1-2
Viskositätsbestimmung,Öl 7.2-8
Viskositätspumpe 6.10.2.4-3, 6.10.2.4-8
Viskositätswert 7.1.1-2
Volumenzunahme bei Eisbildung 6.11.1.4-.13
Voroxidieren von Schrauben und Muttern 6.1.1.1-21
Vorschrift für Tragbilderbewertung an Zahnrädern 6.4.3-3
Vorsorge-Maßnahmewert, Definition 7.2-2
Vorspannung, Schraube 6.1.1.1-6, 6.1.1.3-2, 6.1.1.3-5
nicht ausreichend 6.1.1.2-18
Weichstoffdichtung 6.10.1-10
Vorstauchen einer Feder 6.2.18
Vorwärmung von Kraftstoff 8.1-8
Vulkanisierungs- bzw. Aushärtungszustand 6.2.2-2

W

Wabendichtungen (Honeycomb) 6.10.3.1.3-2
Walktemperatur, Zahnriemen 6.8.2-5
Wälzflächenschäden, Hauptursache 6.3.1.1-16
Wälzkörper, Fliehkräfte 6.3.1.1-2
Wälzkreisimpuls,Zahnrad 6.4.3-6
Wälzlager
Abbremsen des Rotors 6.3.1.2-3
abrasiver Verschleiß 6.3.1.1-10
Abschaltwarnungen 6.3.1.2-6
Adhäsiver Verschleiß 6.3.1.1-10
Anzeichen dynamische Überlastung 6.3.1.1-9
Auf- oder Einschrumpfen 6.3.1.2-26
Aufbewahrung 6.3.1.2-25
Raum 6.3.1.2-26
Aufheizung einesm dämpfenden Ölfilms 6.3.1.1-6
Ausbau 6.3.1.2-25
Ausfall
Symptome 6.3.1.2-27
Ursache Schmiermittel 6.3.1.2-16
äußere Lasten 6.3.1.1-2
Axiallast bei Labyrinthschaden 6.3.1.2-3
beim Schaden entstandene Partikel, Schichten 6.3.1.2-33
Betriebskräfte auf Käfig 6.3.1.1-29
Betriebstemperatur 6.3.1.1-2
Blitzschlag 6.3.1.1-11
Blockiereffekt bei Stoßbelastung 6.3.1.1-27
Bremskräfte am Käfig 6.3.1.1-19
Bruch
von Haltenasen 6.3.1.1-6, 6.3.1.1-27

© Axel Rossmann - Tulboconsul
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

von Käfigstegen 6.3.1.1-27
Butterflies 6.3.1.1-9, 6.3.1.2-19
charakteristische Partikel eines Schadens 6.3.1.2-4
D x n Wert 6.3.1.1-33
Drehzahlen 6.3.1.1-2
Drehzahlmesser 6.3.1.2-27
Dynamische Unwuchten der Kugeln 6.3.1.1-19
eigene Partikel 6.3.1.1-43
Eigenspannungen in Lauffläche 6.3.1.2-19
Eignung von Kunststoffkäfigen 6.3.1.2-22
Einbau 6.3.1.2-25
Eindruck in laufspur 6.3.1.1-16
Einfluss/-üsse
der Modulbauweise 6.3.1.1-2
verunreinigter Sperrluft 6.3.1.1-43
von Blitzschlag 6.3.1.1-33, 6.3.1.1-35
von Magnetfeldern 6.3.1.1-33
von Partikeln im Öl auf die Lagerlebensda 6.3.1.2-20
vom Schweißen 6.3.1.1-33
von Start und dem Abstellen 6.3.1.1-12
von Überrollungen auf Eigenspannugen 6.3.1.2-20
auf Käfigschlupf 6.3.1.1-25
auf Laufflächenermüdung 6.3.1.1-9
Einlaufgrübchen 6.3.1.1-14
Einlaufpittings 6.3.1.1-13, 6.3.1.1-14
Einsatzgehärtete 6.3.1.1-11, 6.3.1.1-20
Eintrittszeitpunkt eines Fremdkörpers 6.3.1.2-33
elastische Aufhängung, , Stegbrüche 6.3.1.1-6
elastische Verformung 6.3.1.1-11
elastohydrodynamische
Kräfte 6.3.1.1-29
Schmierung 6.3.1.1-12
elektrische Ströme 6.3.1.1-33
Elektroerosion 6.3.1.1-40
elektrostatische Aufladung 6.3.1.1-33
Ermüdungspittings 6.3.1.1-14
Ermüdungsversagen einzelner Kugeln 6.3.1.1-19
Faserverlauf in Kugeln 6.3.1.1-19
fettgeschmiert 6.3.1.1-35, 6.3.1.1-39, 6.3.1.2-16
Flatterbewegungen der Rollen 6.3.1.1-18
Fremdströme aus elektrischen Maschinen 6.3.1.1-40
Frettingverschleiß bei gedämpfter Aufhängung 6.3.1.1-4
Gedämpfte 6.3.1.1-1
Gefüge
Einfluss 6.3.1.1-12
Inhomogenitäten 6.3.1.1-18
Veränderungen in Laufbahn 6.3.1.2-20
genieteter Käfig 6.3.1.1-31, 6.3.1.2-22
Geräusch bei Schaden 6.3.1.2-3
Gesamtschwingpegel 6.3.1.2-30
Grenzbetriebstemperatur 6.3.1.1-21
Gyration 6.3.1.1-31
Handling 6.3.1.2-25
Handschweiß 6.3.1.2-26
Härte 6.3.1.1-9
Hauptursache für Laufbahnschäden 6.3.1.1-16
hochaufgestickte Stähle 6.3.1.1-10
hochtourig 6.3.1.1-9
Käfig
Beanspruchung 6.3.1.2-21
Führung 6.3.1.1-12, 6.3.1.1-28
Schlupf 6.3.1.1-24, 6.3.1.1-28
Kavitation bei Öldämpfung 6.3.1.1-4
Kenntnisse von Schwachstellen 6.3.1.2-1
Klemmen 6.3.1.2-3
des Käfigs 6.3.1.1-28
Kokspartikel 6.3.1.1-43
Konservierung 6.3.1.2-26
Korrosion 6.3.1.1-9, 6.3.1.1-43
durch Handschweiß 6.3.1.1-43
fettgeschmiertes 6.3.1.2-16
unempfindlichere Lagerwerkstoffe 6.3.1.1-21
Schäden 6.3.1.1-9
Schutzöl 6.3.1.2-25
Laufbahn/-fläche
Beschädigungen 6.3.1.1-6
Rauigkeit 6.3.1.1-11, 6.3.1.1-13, 6.3.1.1-15
Verschleiß 6.3.1.1-14
Laufspuren 6.3.1.2-10
Lebensdauer 6.3.1.1-15
Begrenzung 6.3.1.1-8
bei Wasser im Öl 7.1.3.2-4
Leckage fettgeschmiertes 6.3.1.2-16
magnetisierte 6.3.1.1-38
makroskopische Schadensbilder 6.3.1.2-12
Maßnahmen gegen Skidding 6.3.1.2-23
Maßtoleranzen 6.3.1.1-11
Mindesthärte 6.3.1.1-20
Mindestreibung 6.3.1.1-16
Mindestunwucht 6.3.1.1-16, 6.3.1.2-24
Mischreibung 6.3.1.1-6, 6.3.1.1-35
Nacharbeit der Laufbahn 6.3.1.1-16
Nachpolieren 6.3.1.1-16
gelaufener 6.3.1.1-43
Nachschmierung 6.3.1.2-16
Ölaustritt bei Schaden 6.3.1.2-4
Öldruckabfall bei Schaden 6.3.1.2-4
Ölfeuer 6.3.1.1-2
Ölfilmdicke und Lebensdauer 6.3.1.1-13
ölgedämpft 6.3.1.1-4
Ölkoks 7.1.2-10
Ölmangel durch behinderte Ansaugung 6.3.1.1-37
Ölprobleme 6.3.1.1-12
Ölversorgung 6.3.1.2-1
Onlineüberwachung 6.3.1.2-29
Partikel
aus dem Frischöl 6.3.1.1-43
aus der Belüftung 6.3.1.1-43
aus der Lagerkammer 6.3.1.1-43
Eindrücke 6.3.1.1-9
Phasen eines Schadens 6.3.1.2-4
Plastische Deformation 6.3.1.1-11
Radiallast, zu geringe 6.3.1.1-25
Rauigkeit der Laufbahnen 6.3.1.1-12
Reibung 6.3.1.1-6
außenbordgeführter Käfige 6.3.1.1-33
Reibungsdämpfung 6.3.1.1-5
Riffelbildung bei Stromdurchgang 6.3.1.1-35
Risikoabschätzung 6.3.1.2-19

© Axel Rossmann - Turbocomputer
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Rollenunwucht 6.3.1.1-18
Roller Skewing 6.3.1.1-31
Rollerweaving 6.3.1.1-31
Rückschluss
auf betroffenes Lagerelement 6.3.1.2-29
Laufbahnschäden 6.3.1.2-30
auf Schadensablauf aus Ablagerungen 6.3.1.2-9
Schäden/Schaden 6.3.1.1-1
beim Schadensablauf entstandene Partikel 6.3.1.2-33
an Sitzflächen 6.3.1.2-1
durch Blitzschlag 6.3.1.1-1
durch Käfigschlupf 6.3.1.1-26
durch Stromdurchgang, Kraftfahrzeug mit Hybridantrieb 6.3.1.1-40
durch Transport 6.3.1.1-21
durch Unwuchten 6.3.1.1-27
Elektromotoren 6.3.1.2-16
frühzeitige Erkenneung 6.3.1.1-1
Schmelzperlen bei 6.3.1.2-33
Überwachung 6.3.1.1-1
Schadensablauf
bei Stromdurchgang 6.3.1.1-39
Rekonstruktion 6.3.1.1-1
Schadensanzeichen im Öl 6.3.1.2-1
Schadensbilder 6.3.1.1-1
Schadenserkennung mit Ölanalyse 6.3.1.2-4
Schadensfortschritt 6.3.1.2-1, 6.3.1.2-4
Schadensmechanismen 6.3.1.1-1, 6.3.1.2-6
Schadensmerkmale 6.3.1.2-15, 6.3.1.2-16
Schadenssymptome 6.3.1.2-1, 6.3.1.2-2
schädigende Partikel auf 6.3.1.1-43
Schädigung bei Montage 6.3.1.1-11
Schädigung
bei Reparatur 6.3.1.1-11
beim Transport 6.3.1.1-11
durch Blitz 6.3.1.1-35
durch Ultraschallreinigung 6.3.1.1-22
Nachweis 6.3.1.2-19
Schallabstrahlung bei Schaden 6.3.1.2-5
Schlupf 6.3.1.1-14
Schmelzkrater auf Laufbahn 6.3.1.1-34
Schmierfette 9.1.1-3
Schmierfilmdicke 6.3.1.2-19
Schmierspalt- Einfluss auf Lebensdauer 6.3.1.1-16
Schmierung 6.3.1.1-2
Schwellenwerte für elektrische Spannung 6.3.1.1-33
Schwingverschleiß 6.3.1.1-1
an Sitzen 6.3.1.1-3
der Sitze 6.3.1.2-4
Schwitzwasser 6.3.1.2-26
Bildung 6.3.1.1-2
Silbergleitschichten auf Käfig 6.3.1.1-25
Skewing 6.3.1.1-18
Skidding 6.3.1.1-24
Späneanfall bei Schaden 6.3.1.2-2
Spannungsverteilung in der Laufbahn 6.3.1.1-6
Stegbrüche am Käfig 6.3.1.1-25
Steifigkeiten 6.3.1.2-24
Stillstandskorrosion 6.3.1.1-43
stoßartigen Belastungen 6.3.1.1-27
Streamer 6.3.1.1-26
Stromdurchgang 6.3.1.1-11, 6.3.1.1-34, 6.3.1.1-40
fettgeschmiertes 6.3.1.2-16
Temperatur 6.3.1.2-2
Messung mit Wärmebildkamera 6.3.1.2-27
Thermometer 6.3.1.2-27
Transportschäden 6.3.1.1-23
Überlastung 6.3.1.2-6
fettgeschmiertes 6.3.1.2-16
Umgebungseinflüsse 6.3.1.1-2
Unerwartete Belastungen 6.3.1.1-11
ungenügende Ölversorgung 6.3.1.2-3
unrunde Geometrien 6.3.1.2-24
Unwucht
Unwuchten der Wälzkörper 6.3.1.1-11
von Rollen 6.3.1.1-18
Ursachen einer Magnetisierung 6.3.1.1-38
Verkokung 6.3.1.2-1
vernietete Käfige 6.3.1.1-12
Verpackung 6.3.1.2-26
Verschleiß der Rollenstirnseiten 6.3.1.1-31
Verschleißspäne 6.3.1.2-33
Verschmutzung 6.3.1.1-1
fettgeschmiert 6.3.1.2-16
Verspannung durch Außenringverformung 6.3.1.2-24
Verunreinigung durch Strahlgut 6.3.1.1-11
Vibrationen als Indiz 6.3.1.2-3
Vorgehen im Schadensfall 6.3.1.2-26
Wartungsphilosophie 6.3.1.2-27
WC (Wolframkarbid)-Beschichtung auf Sitz 6.3.1.1-3
Weiße Bänder 6.3.1.2-19
Werkstoffreinheit 6.3.1.1-20
Wiederverwendung 6.3.1.2-26
Wirkung von Vibrationen 6.3.1.1-21
Zusammenschieben von Rollenlagern 6.3.1.2-26
Zustandsmessung mit Schwingungssensor 6.3.1.2-30
Wälzlagerkäfig
Nietschaden 6.3.1.1-31
Notlaufbedingungen 6.3.1.1-37
versilbert 6.3.1.1-37
Wälzlagerkugeln
Wollknäuel-Effekt 6.3.1.1-19
Wälzlagerlaufspur
Pfeilmuster 6.3.1.1-25
Wälzlagermagnetisierung
bei Blitzschlag 6.3.1.1-38
Magnetische Rissprüfung 6.3.1.1-38
durch Transportfahrzeuge 6.3.1.1-38
Wälzlagerrollen
Flattern 6.3.1.1-25
Pendeln 6.3.1.1-25
Wälzlagerstahl, Inhomogenitäten 6.3.1.1-20
Wanddicke, Druckrohrleitung 6.11.1.1-5
Wandern, PTFE-Buchse 6.3.4-9
Wandrauigkeiten, Einfluss auf Wasserstoffentstehung 6.12.1.2-4
Wärmeableitung, Kolbenring 6.10.2.5-4
Wärmebildkamera, Temperaturmessung Wälzlager 6.3.1.2-27
Wärmedehnung/ -ausdehnung
Einfluss in Schraubenverbindungen 6.1.1.1-11, 6.1.1.3-3
PTFE 6.3.4-9
Unterschiede, O-Ring Dichtungen 6.10.1.2-12
Verkürzungseffekt bei Gummi

© Axel Rossmann - Turbocomsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

6.10.2.1-13
Wärmehaushalt eines Labyrinths 6.10.3.1.3-3
Wärmeisoliation durch Ölkoks 7.1.2-10
Wärmeleitfähigkeit von PTFE 6.3.4-9
Wärmestau in Labyrinthspitzen 6.10.3.1.1-20
Wärmestrahlung
Einfluss auf Gummifeder 6.2.26
Flamme 8.1-16
Kraftstoffeinfluss 8.1-6
Schlaucherwärmung durch 6.12-14
Wärmetauscher
Kraftstoff im Öl wegen Leck 6.11.1.2-25, 7.1.3.2.2-2
Ölkoks 7.1.2-10
Ölkühler 6.4.2-3
wasserführend 6.11.1.4-.1
Frostschaden 6.11.1.4-.12
Wärmeübertragungsöl, Feuchtigkeit 6.12-3
Warmnieten/-ung, Probleme 6.1.29
Warnsysteme für Getriebeschäden 6.4.3-2
Warnwert (Indikatorwert) 7.2-2
für Windenergieanlagen 7.2-9
Warnzeichen, Aussehen von Schmiermittel 9.1.2-8
ungewöhnliche Leistungsaufnahme 9.1.2-8
vor Bauteilversagen 9.1.2-8
Wartung
Bremse 6.6.2.1-4
Geräusch bei Wälzlagerschaden 6.3.1.2-3
Getriebe, Intervalle 6.4.2-13
Hebezeugkette 6.7.2-2
Nachschmierung 9.1.2-6
Reinigungsmittel 6.11.1.2-22
Rohrleitungen 6.11.1.2-1
Rundstahlketten 6.7.2-2
Schädigungen durch verschüttete Medien 6.11.1.2-22
Verwendung
von Entfettungsmittel 6.11.1.2-22
von Rostlöser 6.11.1.2-22
Wartungsfehler
durch konstruktiven Mangel 6.11.1.2-26
Keilriemen 6.8.1-2
Wartungsgerechte Rohrleitung 6.11.1.1-5
Wartungshandbuch, nicht genutzt 6.11.1.2-26
Wartungsphilosophie, Wälzlager 6.3.1.2-27
Waschen
Intervalle 9.3-3
Kraftstoffeinsparung 9.3-5
Verdichter 9.3-1
Beschaufelung 9.3-2
Verfahren 9.3-10
Auswahl 9.3-5
Waschflüssigkeit
Entsorgung 9.3-3
für Verdichter 9.3-3
Korrosion durch verunreingtes Öl 9.3-6
Reste, Wirkung im Stillstand 9.3-12
Waspalloy, Rissbildung mit silbereinfluss 6.1.1.2-12
Wasserstoffeinwirkung, Pseudo-Spaltbruch 6.12.1.2-5
Wasser
Ansammlung in Kraftstofftanks 8.3-6
Arten im Kraftstoff 8.3-5
Entstehung im Flugzeugtank 8.3-12
freies
im Kaftstoff 8.3-1
im Öl 7.1.3.2-1
im Kraftstoff 8.3-2
Flugunfall 8.3-19
Korrosion eines Magnesiumgehäuses 8.3-19
Mechanismus der Entstehung 8.3-13
Überprüfung des Anteils 8.3-6
in Hydraulikfluid 6.10.2.4-8
Schwermetalle im 6.11.1.4-2
Verlöschen eines Triebwerks durch 8.3-6
Wasser im Öl
Abhilfen 7.1.3.2-9
auslösen von Verschleiß 7.1.3.2-2
Dampfpolster 7.1.3.2-4
durch Schwitzwasserbildung 7.1.3.2-5
Stillstandzeiten 7.1.3.2-6
Verdichterwaschen 7.1.3.2-6
Erkennbarkeit 7.1.3.2-8
gelöst 7.1.3.2-1
Kavitation 6.3.2-11,7.1.3.2-4
Kolbenmotor 7.1.3.2-6
Lagerlebensdauer 7.1.3.2-4
Möglichkeiten der Aufnahme 7.1.3.2-5
Nachweis 7.1.3.2-1
Oxidation von Lagermetall 7.1.3.2-4
Sensorsysteme zum Nachweis 7.1.3.2-1
Test 7.1.3.2-9
Tropfenschlag 7.1.3.2-2
Wasserstoffversprödung durch 7.1.3.2-2
Wasseranomalie 6.11.1.4-13
Wasserarmaturen aus Messing 6.11.1.4-8
Wasseraufnahme
Kraftstoff 8.3-1
Polyamid 6.3.4-10
Wasserdampf 6.12.1.2-7
Rohrleitung 6.12.1.2-1
Wasserstoffversprödung durch Dissoziation 6.12.1.2-7
Wassereinflüsse auf Leitungssystem 6.11.1.4-2
Wassereinzug (Kolbenstange) **7.1.3.2-6**
Wasserführende Rohrleitungen / Rohre, Wasserleitung 6.11.1.4-1
Betriebsbedingungen 6.11.1.4-1
Einfluss der Wasserqualität 6.11.1.4-1
Fertigung 6.11.1.4-1
Frostschäden 6.11.1.4-12
Gestaltung 6.11.1.4-1
Haustechnik 6.11.1.4-1
Luftzugang 6.11.1.4-1
Montage 6.11.1.4-1
Stillstandszeiten 6.11.1.4-1
Vereisung 6.11.1.4-2
Werkstoffe 6.11.1.4-1
Wasserglas in Labyrinthbelag 6.10.3.1.1-20
Wasserqualität, Einfluss
auf Heizungsanlage 6.11.1.4-10
auf wasserführende Rohre 6.11.1.4-1
der Heizungsanlage 6.11.1.4-10
Wasserglas in Labyrinthbelag 6.10.3.1.1-20
Wasserspaltung, katalytische Wirkung bei 6.12.1.2-3
Wasserstoff
Entstehung durch katalytische Dissoziation 6.12.1.2-4
induzierte Risse in Zahnradzähnen 6.4.1-14
Wasserstoff-Kohlenstoff-

© Axel Rossmann - Turboconsult
Das Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Gewichtsverhältnis (Wasserstoffanteil) In Kraftstoff 8.1-6
Wasserstoffeinwirkung
Anzeichen Fischaugen 6.12.1.2-4
Einfluss auf die Rissfortschrittsgeschwindigkeit 6.12.1.2-5
Wasserstoffentstehung
durch katalytischen Effekt 6.12.1.2-7
durch thermische Dissoziation 6.12.1.2-7
Einfluss von Wandrauigkeit 6.12.1.2-4
Wasserstoffermüdung 6.12.1.2-4
Wasserstoffversprödung
durch
Dissoziation von Wasserdampf 6.12.1.2-7
Einsatzhärtung 6.4.1-28
Hydraulikflüssigkeit 6.11.1.1-13
Wasser im Öl 7.1.3.2-2
Federn 6.2.14
Fensterbruch, Merkmal 6.12.1.2-7
Gelenkkopf 6.3.4-3
in Biogasanlage 6.12.1.2-7
Rollenkette 6.7-14
Schrauben 6.1.1.1-1, 6.1.1.3-3, 6.1.1.3-7, 6.1.1.2-1, 6.1.1.2-4
Nachweis 6.1.1.3-7
Seile 6.9-2
von Titan (-legierungen) 6.11.1.1-13
Zahnräder 6.4.1-8, 6.4.2-8
Zahnbrüche 6.4.1-27
Wasser(führendes)**system** 6.11.1.4-2
Armaturen 6.11.1.4-6
Betriebseinflüsse 6.11.1.4-4
Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit 6.11.1.4-4
Korrosion 6.11.1.4-2
Lochfraß 6.11.1.4-2
Spannungsrisskorrosion 6.11.1.4-7
Lufteinschlüsse im 6.11.1.4-4
Sauerstoffgehalt im 6.11.1.4-2
Verunreinigungen im 6.11.1.4-4
Werkstoffeinflüsse 6.11.1.4-4
Water Etching 7.1.3.2-2, *Siehe* Erosion: durch Wasser im Öl
WB. *Siehe* Weiße Bänder
WC (Wolframkarbid)-Beschichtung, auf Wälzlagersitz 6.3.1.1-3
WEA (Windenergieanlage, Windkraftanlawge) 7.2-6
Ausfallwahrscheinlichkeit 6.4.2-12
Betriebsbeanspruchung 6.4.2-12
Hauptgetriebe 6.4.2-12
Getriebe, Fehlerfrüherkennung 6.4.3-2
Schadensfrüherkennung 6.4.2-126.4.1-4
Weaving, Wälzlagerrollen 6.3.1.1-18
Wechselwirkung Zahnriemen/Baugruppen 6.8.2-2
Weicher Kunststoff, Einbetten harter Partikel 6.10.2.4-5
Weichmacher, Biofilmbildung 6.12-2
Weichstoffdichtung 6.10.1-5, 6.10.1-9, 6.10.1-10
Vorspannung 6.10.1-10
Weichstofflage, Flachdichtung 6.10.1-14
Weiße Bänder (Gefüge) 6.3.1.2-19
Weißrost 6.11.1.1-4
Welle 6.5-1
Abgewinkelte 6.4.1-24
Anrisse unter der Oberfläche 6.5-4
Anstreifen durch Ölkoks 7.1.2-10
aus spröden Werkstoffen 6.5-16
Ausrichten/-ung 6.5-4, 6.5-14
Beschichtungen 6.5-4, 6.5-13
galvanische 6.5-14
Gasnitrierschicht 6.5-8
mit Rissen 6.5-8
Schwingfestigkeit 6.5-14
Bestimmung wahrscheinlicher Anrissorte 6.5-9
Betriebsbeanspruchung 6.5-1
Bruchflächenmerkmale 6.5-4
Diffusionsschichten 6.5-12
Einsatzschicht mit Rissen 6.5-8
Fretting 6.5-6
Gewaltbruch 6.5-11
Gleitflächen für Wellendichtringe 6.4.1-8
Keilnuten 6.5-8
konische 6.10.3.1.3-16
Kurzzeitüberlastung 6.5-11
Montage 6.5-4
Nuten als Konstruktionskerben 6.5-3
Passfedernuten 6.5-8, 6.5-9
plastische Verformungen 6.5-8
Querbohrungen 6.5-6, 6.5-8
Reibrost 6.5-6
Bildung 6.5-3
Nabensitz 6.5-8
Reibschlussverbindungen 6.5-3
Schädigung/Schaden, 6.5-3, 6.5-12, 6.5-18, 7.1.4-10
durch Rückströmung 6.5-4
Schwachstellen 6.5-4
Iidentifikation 6.5-7
Schwingermüdung an Passfedernuten 6.5-9
Risse unter der Oberfläche 6.5-8
Schwingung 6.10.3.1.3-17
Torsionsschwingung 6.5-3
nach Stoßbeanspruchung 6.5-8
Schwingungsrisskorrosion 6.5-3
spiralförmiges Rissbild 6.5-8
sprengen der Nabe 6.5-6
Tonnenbildung bei hoher Drehzahl 6.3.3-7
Torsion 6.5-6
Übergangsradien 6.5-7
Überhitzung 6.5-18, 7.1.4-10
Übermaßkontur 6.5-16
Umlaufbiegung 6.5-6
Unwuchten 6.5-6
Versagensmechanismen 6.5-4
Vielkeilkupplungen 6.5-6
Werkstoffauswahl 6.5-3
Wuchtung 6.5-4
Welle-Nabenverbindung, Steifigkeit 6.5-3
Wellenausrichtung, Abweichungen, zulässige 6.5-14
Wellendichtring. *Siehe* Radial-Wellendichtring
Dichtlippe 6.10.2.1-1
vorgespannte 6.10.2.1-13
Einpressvorgang 6.10.2.1-9
Förderwirkung 6.10.2.1-2
Gleitflächen auf der Welle 6.4.1-8
Joule-Effekt 6.10.2.1-13
Kraftstoffeinfluss 8.1-11
Leckinspektion 6.10.2.1-13
Wellendichtung, Stopfbuchse 6.10.2.3-1
Wellenkupplung, Versagensbilder 6.5-6
Wellenmutter, Blechsicherung 6.1.1.1-9
Wellennabe
Fixierung mit Kegelstift 6.5-6
Sitzflächen 6.5-8
Wellenoberfläche

© Axel Rossmann Kunststoffconsulting
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Einfluss auf
Radial-Wellendichtring 6.10.2.1-5
Radial-Wellendichtringe 6.10.2.1-7
Radial-Wellendichtring 6.10.2.1-2
Wellenschutzhülse 6.10.2.1-8
Wellenschwingung, siehe Welle Schwingung
Auslösen von Kavitation 6.3.2-11
rückwärtslaufende 6.10.3.1.1-9
Wellenverbindungen 6.5-6, 6.6.1-1
Nebenabtriebe 6.6.1-1
Wellenverkrümmung 6.5-4, 6.5-20
Wellenversatz, Ausgleich 6.6.1-6
Wellenverschleiß durch Stopfbuchse 6.10.2.3-2
Welligkeit, Wellungen
einer Druckrohrleitung 6.11.1.1-5, 6.11.1.1-7
Zahnflanke 6.4.3-3
Werksabnahme, Tragbild Getreibezahbräder 6.4.3-3
Werkstoff
Popniet 6.1.210
Zahnräder 6.4.1-7
Werkstoffalterung, Versprödung 6.1.1.2-4
Werkstoffauswahl
Besonderheiten bei Schläuchen 6.12-3
Hochdruckschlauch 6.12-9
Bremsscheiben 6.6.2.1-12, 6.6.2.1-14
Flanschkupplung 6.6.4-14
geeignete im Ölsystem 7.1.1-5
Kupplungen 6.6.2.2-1
Schraube 6.1.1.3-3
wasserführender Rohre 6.11.1.4-1
Welle 6.5-3
Werkstoffeigenschaften, Feder 6.2.18
Werkstoffeinfluss
Zahnbrüche 6.4.2-4
Korrosion wasserführender Rohre 6.11.1.4-.4
Werkstoffkombination
Bremsscheibe/Belag 6.6.2.1-4
Zahnkupplung 6.6.1-4
Werkstoffreinheit, Wälzlager 6.3.1.1-20
Werkstoffveränderungen an Schrauben 6.1.1.1-6
Werkzeug
als FOD 6.6.4-18
Anziehen von Schrauben 6.1.1.2-18
vergessen im Rotor 6.1.1.1-6
Werkzeugeindrücke an Feder 6.2.12
Whip 6.3.2-2
Whirl 6.3.2-2, 6.5-20
Wide-cut Kraftstoff 8.2-13
Widerstandsschweißung
Schwachstelle bei Rundstahlketten 6.7.2-7
Wiederverwendbarkeit
Schraube 6.1.1.1-16, 6.1.1.3-5, 6.1.1.3-6
Wälzlager 6.3.1.2-26
Windenergieanlage (WEA, Windkraftanlage) 7.2-6
Getriebe 6.4.1-3, 6.4.1-4, 6.4.2-12
Typ 7.2-9
Grenzwerte 7.2-9
Optische Partikelanalyse 7.2-9
Umwelteinflüsse 7.2-9
Warnwerte 7.2-9
Winkelbeschleunigungen, Kardangelenk 6.4.1-24
Wintereinsatz, Rundstahlkette 6.7.2-7
Wirbel, Blasenbildung in Strömung 6.11.1.2-14
Wirbelbremse. *Siehe* flow deflector
zur Schwingungsdämpfung 6.10.3.2.1-23
Wirkungsgrad
eines Gewindes 6.1.1.1-12
Verlust bei Kettentrieb 6.7-6
Witterungsbeständigkeit, Zahnriemen 6.8.2-4
Wobbling 9.1.2-8
Wolframkarbid (WC)
im Öl 7.1.3.1-5
Schaden in Gleitringdichtungen 6.10.2.2-4
Wollknäuel-Effekt an Wälzlagerkugeln 6.3.1.1-19
Wuchten
bei Modulbauweise 6.6.4-14
von Rotoren
Niet 6.1.24
zur Wuchtung einer Welle 6.5-4

Z

Zahn (Zahnrad)
Bruch
Grenze 6.4.1-10
Schäden 6.4.1-15
wasserstoff induzierte Risse 6.4.1-14
Wasserstoffversprödung 6.4.1-27, 6.4.2-8
Werkstoffeinfluss 6.4.2-4
Eingriff, Impulse 6.4.3-6
Zahnflanke
Abblätterungen 6.4.1-15
Ausglühen 6.4.1-17
Einsatzhärten 6.4.1-13
dreieckige Ausbrüche 6.4.2-12
Eckenausbrüche 6.4.2-4
Eckenträger 6.4.3-3
Einsatzhärtung 6.4.1-12
Ermüdungs 6.4.1-1
Ermüdungsausbrüche 6.4.1-8
Festigkeit 6.4.1-8
Fressen 6.4.1-16
Geometrieabweichungen 6.4.1-4
Grübchen 6.4.1-15
Kantenträger 6.4.2-6
Kopfträger 6.4.3-3
Plastische Verformungen 6.4.1-17
Risse
unter der Oberfläche 6.4.1-13
Verlauf 6.4.1-12
Schwingungsanregung durch Beschädigung 6.4.1-27
Tragbild 6.4.1-23, 6.4.3-2, 6.4.3-3
Spur 6.4.1-23
Bewertung, Vorschrift 6.4.3-3
Verschleiß 6.4.1-16
Grenze 6.4.1-8
Schleifverschleiß 6.4.1-16
welliger Verschleiß 6.4.1-16
Welligkeit 6.4.3-3
Zahnkräfte
statische 6.4.3-6
dynamische 6.4.3-6
Zahnkupplung 6.6.1-1
Schmierung 6.6.1-2
Verschleißprodukte 6.6.1-4
Werkstoffkombination 6.6.1-4
Zahnrad
Beschädigung
bei Getriebemontage 6.4.1-31
durch Blitzschlag 6.4.1-27
Einfluss 6.3.1.1-35
Blitzschlag 6.4.2-4

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Erlaubnis

Bohrungen der Ölversorgung 6.4.2-4
Brünierrisse 6.4.1-8, 6.4.1-29
Eingriffsstoß 6.4.3-6
elastische Verformungen 6.4.1-4
elastohydrodynamischer Zustand 6.4.1-4
Fertigungsfehler 6.4.3-6
Fehlstellen 6.4.1-7
Fressgrenze 6.4.1-8
Fresspuren 6.4.2-12
Fußträger 6.4.3-3
gasnitriert 6.4.1-15
Gewaltbruch 6.4.1-10, 6.4.1-15
Graufleckigkeit 6.4.1-10
Grübchen 6.4.1-12
Bildung 6.4.1-10
Grenze 6.4.1-8
Halbzeugherstellung 6.4.1-4
Härtefehler 6.4.1-8
Kantenträger 6.4.2-6
Kavitation 6.4.1-17
Konstruktionsmerkmale 6.4.1-4
Kopfträger 6.4.3-3
Korrosion 6.4.1-17
Kugelstrahlen 6.4.1-30
Lebensdauer 6.4.1-8
Mikrogrübchen 6.4.1-10
Mischreibung 6.4.1-10
Oberflächenhärtung 6.4.1-13
Quirlverluste 6.4.1-4
Reibungsdämpfung 6.4.1-24
Riefen an der Zahnspitze 6.4.1-9
Schäden 6.4.1-8, 6.4.1-19
an Verzahnung 6.4.1-7
Bilder 6.4.1-12
im Kranzbereich 6.4.1-7
Mechanismen 6.4.1-8
Schlupf 6.4.1-10
Schwingermüdung
Brüche 6.4.1-15
Risse in Membrane 6.4.1-7
Schwingungen 6.4.1-24
Auswirkungen 6.4.1-24
Schwingverschleiß (Fretting) in Dämpfungsnuten 6.4.1-7
Stromdurchgang 6.4.1-17, 6.4.2-4
Taumelfehler 6.4.3-3
thermische Verformung 6.4.1-4
Tragbild 6.4.2-12
Überlastungsschäden 6.4.2-4
Ultraschallprüfung 6.4.1-28
Verchromen von Dichtungsgleitflächen 6.4.1-30
Verlustleistung 6.4.1-4
Verschleißgrenze 6.4.1-8
Verzahnungseigenschaften 6.4.1-13
Zahnbruchgrenze 6.4.1-10
Schwingungen 6.4.1-24
Werkstoffanfordrungen 6.4.1-7
Zahnbruch 6.4.1-15
Zahnrädern
Probleme und Schäden 6.4.1-1
Schäden durch Brünierung 6.4.2-10
Zahnradpumpen
Kavitation 6.4.1-32
Klemmen 6.4.1-33
Schäden 6.4.1-31
Schädigung durch Ölkoks 7.1.2-10
Zahnradwellen 6.4.1-6
EB-geschweißte 6.4.1-30
Zahnriemen 6.8.2-1
Ablösung des Elastomers 6.8.2-5
Alterung 6.8.2-3
Armierungsgewebe, Verschleiß 6.8.2-6
Ausfallmechanismen 6.8.2-5
Auslegungshilfen 6.8.2-2
Beständigkeit gegenüber äußeren Einflüssen 6.8.2-4
Betriebstemperatur 6.8.2-3
computergestützte Simulationen 6.8.2-6
Drahtbrüche 6.8.2-3
Elastomeralterung 6.8.2-6
Flankenwechsel 6.8.2-5
Glasfasern als Verstärkung 6.8.2-4
Hilfsstoffe für Montage 6.8.2-4
Lebensdauer 6.8.2-2, 6.8.2-5
Osmose/Hydrolyse 6.8.2-4
Qualitätsmerkmal 6.8.2-3
Riementemperaturen 6.8.2-4
Schäden 6.8.2-2
Schadensbilder 6.8.2-2
Makrobefund 6.8.2-6
Mikrobefund 6.8.2-6
Schadensmechanismen 6.8.2-6
Schädigung durch Medien 6.8.2-3
Schwingermüdung 6.8.2-3
der Faserstränge 6.8.2-5
Untersuchungen 6.8.2-3
Walktemperaturen 6.8.2-5
Wechselwirkung mit Baugruppen 6.8.2-2
Witterungsbeständigkeit 6.8.2-4
Zahnauflagen 6.8.2-3
Zahnriementrieb, Einfluss von Fertigungstoleranzen 6.8.2-3
Zeitstandüberlastung von Druckrohren 6.12.1.2-9
Zentrische Spannbolzen, Probleme 6.1.1.1-13
Zersetzungsprodukte, Schädigung von Rohrleitungen 6.11.1.2-22
Zerstäubung, Kraftstoff 8.2-3
zerstörungsfreie Prüfung, Federn 6.2.12
Ziehnieten 6.1.28
Zink
in Hochtemperaturschmiermittel 9.1.2-3
Reaktion mit Ölen 7.1.1-6
Zinkoxid im Öl 7.1.1-11
Zopf, Seilschaden 6.9-11
Zugänglichkeit
Probleme bei Anbaugetrieben 6.4.1-31
Rohrleitung 6.11.1.2-1
für Montage 6.11.1.1-7
Zulassung
Getriebe 6.4.2-6
von Hilfsstoffen 9.1.1-1
Medien für Verdichterwaschen 9.3-2
Zündbedingungen eines Ölfeuers 7.1.4-7, 7.1.4-8
Zündfähigkeit von Kraftstoff 8.1-8
Zündgrenze von Schmieröl 7.1.4-1
Zündtemperatur
Kraftstoff 8.2-13
Metalle 6.12.1.2-4
Zündung
eines Feuers durch Labyrinthdichtung 6.10.3.1.3-2
im Betrieb, Elastomere 6.12.1.2-4
Nachbrenner 8.1-22
verzögerte 8.1-22
Ölfeuer 6.3.1.1-2
von Metallen durch Anstreifvorgänge 6.12.1.2-4
Zündverhalten, Kraftstoffeinfluss 8.1-6
Zurrkette 6.7.2-10
Beschädigungsgefahr 6.7.2-2
zusätzliche Verdrehsicherung, Problematik 6.1.1.2-12
Zweimassenschwungrad 6.6.2.2-6
Zwischenstufendichtung 6.10.3.1.1-28

Zanrad

© Prof. Rossmann - Fulboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

als Bürstendichtung 6.10.3.2.1-31
Labyrinth 6.10.3.1.1-27
Schaden 6.10.3.1.2-18
Zwischenwellenfeuer 6.5-18
Zwischenwellenlager 6.3.1.1-2
Zwischenwellenölfeuer 7.1.4-10
Zylindergleitfläche, offene Porosität 6.10.2.5-4
Zylinderkopfdichtung 6.10.1-13
Zylinderschale, Schwingung 6.10.3.1.1-8

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz