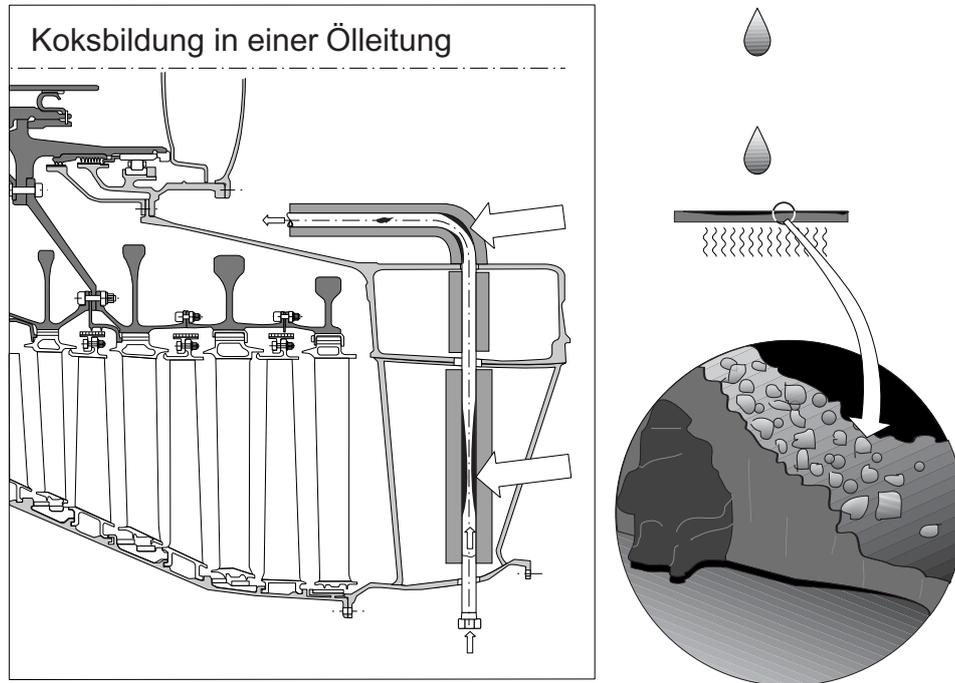


7.1.2 Ölverkokung



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 heißteilstenigen 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.

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 **angelangertem 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-**

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

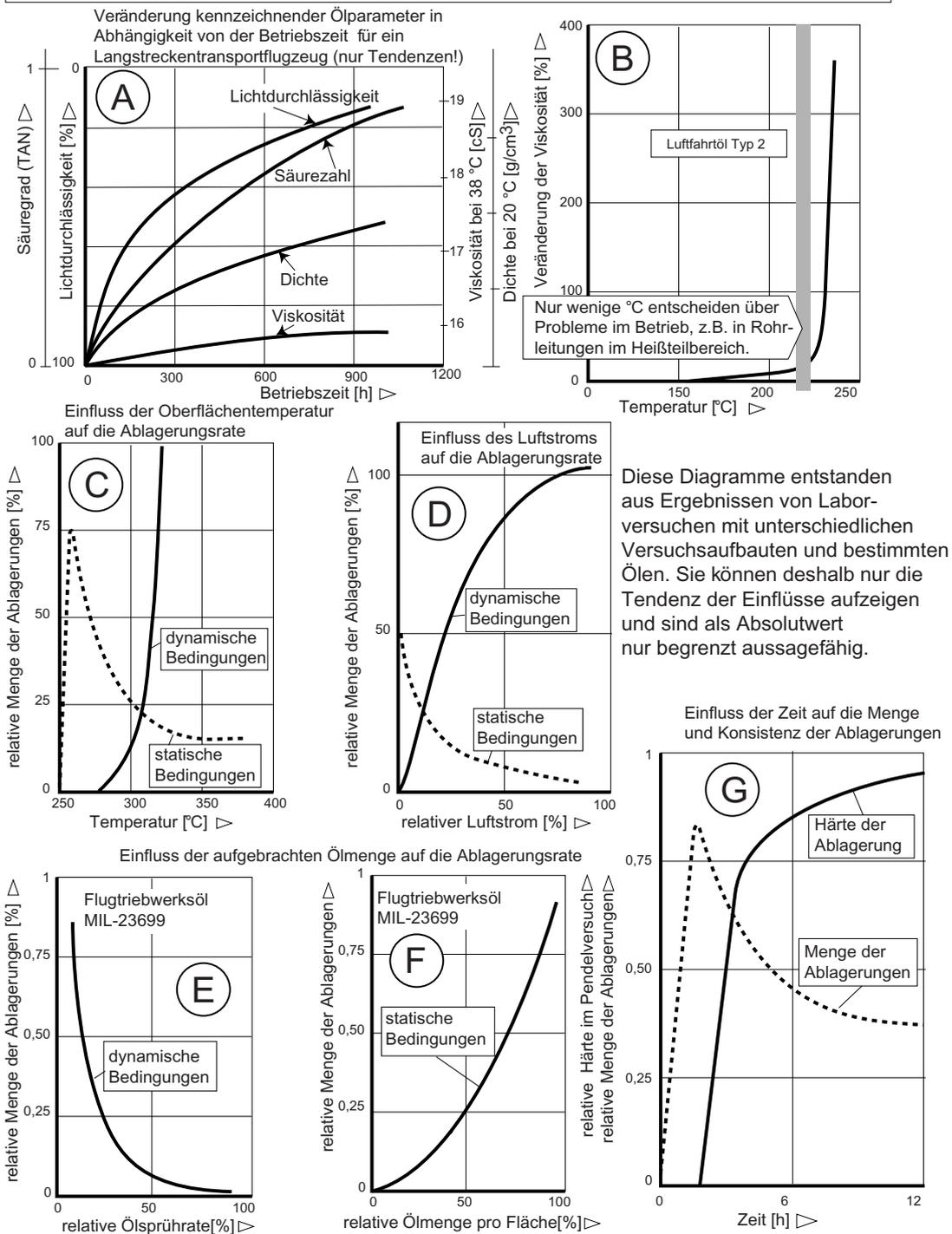


Bild 7.1.2-1

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

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

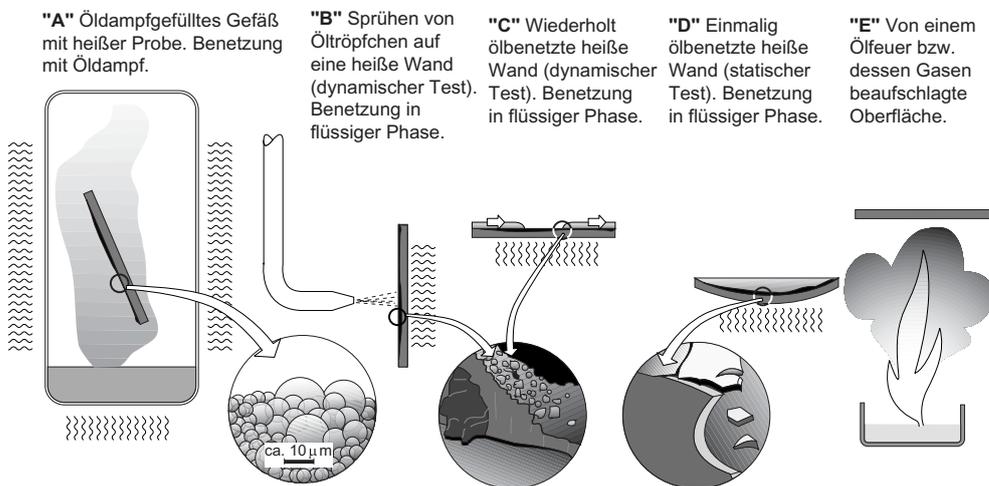


Bild 7.1.2-2.1

Erscheinungsformen ölbedingter Ablagerungen ("Ölkoks")	A	B	C	D	E
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gleichmäßige glatte dünne Schicht, lackartig. Zuerst braun und klebrig, dann hart, spröde und glasartig. Nach längerer Zeit matt und rissig. Splittet ab. 	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Matte, rußartige Schicht unterschiedlicher Dicke 					(?)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Körnige dichte Schichten. Häufig mit Kügelchenstruktur. Oft auf einer glatten homogenen Unterschicht. 	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Matte oder glänzende Krusten unregelmäßiger Dicke Lagenaufbau 	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		

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

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 Abfließen 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).

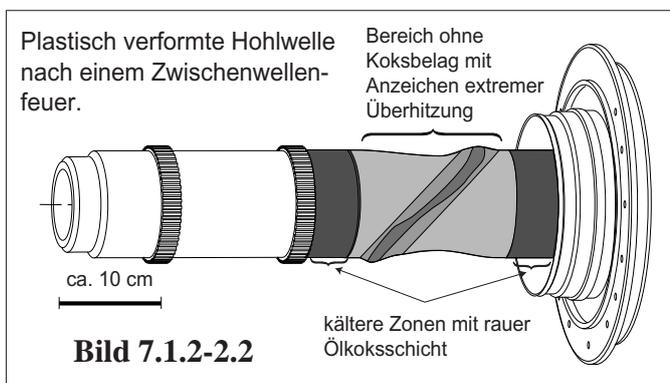
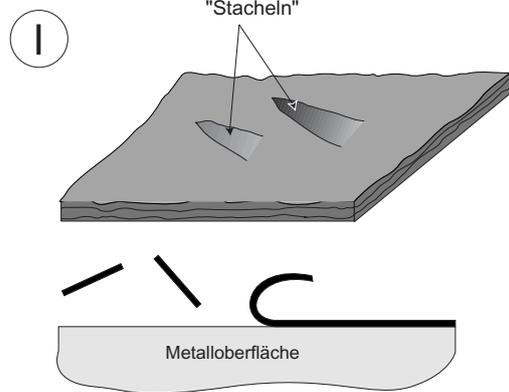


Bild 7.1.2-2.2

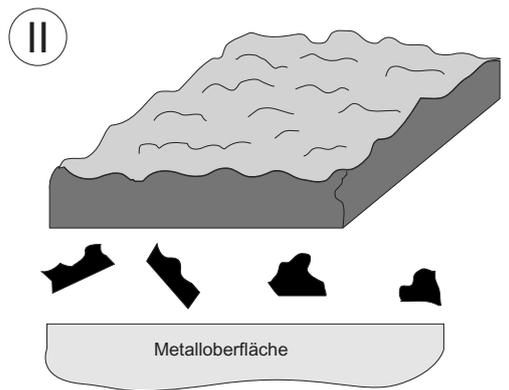
Bild 7.1.2-2.2 (Lit 7.1.2-2): Schaden an einer Turbinenwelle nach einem Ölfeuer. Diese Welle eines Mehrwellentriebwerks läuft mit **engem Abstand in einer äußeren Welle**. Die extrem hohe Temperatur im Bereich des Ölfeuers hat Koksablagerungen verbrannt und die **Welle bis zur plastischen Verformung 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).

Erscheinungsformen von Ölkoks weisen auf Entstehungsbedingungen hin.



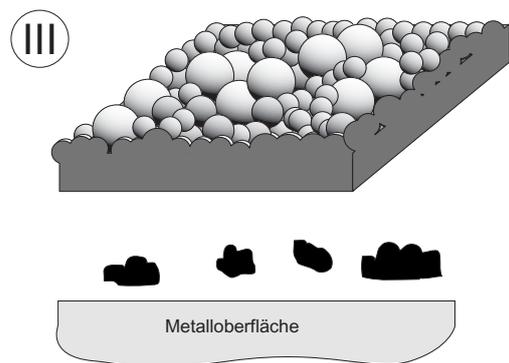
Wiederkehrende oder einmalige Benetzung heißer Metallflächen durch Öl bzw. einen Ölfilm bei kleinem Ölvolumen im Verhältnis zur Metalloberfläche.

- Kurze Verweilzeit für die Verkokung
- Ablagerungen mit Lagen die den Betriebszyklen zuordenbar sind
- Glänzende glatte Oberfläche. Bei einwirkendem Fliehkraftfeld bilden sich "Stacheln" aus.
- Belag kann abplatzen oder aufrollen



Auftreffen feiner Öltröpfchen auf eine heiße Metallfläche.

- Entsteht bei größeren Ölmengen pro Fläche
- Lange Verweilzeit für die Verkokung
- Unterschiedliches Oberflächen-aussehen von matt bis glänzend
- Ablagerungen in dicken Schichten und Klumpen
- Erzeugt Klumpen oder größere Partikel. Hinterläßt saubere Metalloberflächen



Kontakt von Öldampf mit einer heißen Metallfläche

- Entsteht durch einen ungenügenden Wascheffekt bzw. Kühleffekt
- Kurze Verweilzeit für die Verkokung
- Matte Oberfläche
- Kann Partikel unterschiedlicher Größe erzeugen

Bild 7.1.2-3.1

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 Labyrinth 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 ermög-

licht Rückschlüsse auf die Häufigkeit des Benetzungsereignisses.

„II“: Raue Schichten entstehen durch **aufgesprühte Tröpfchen** (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.

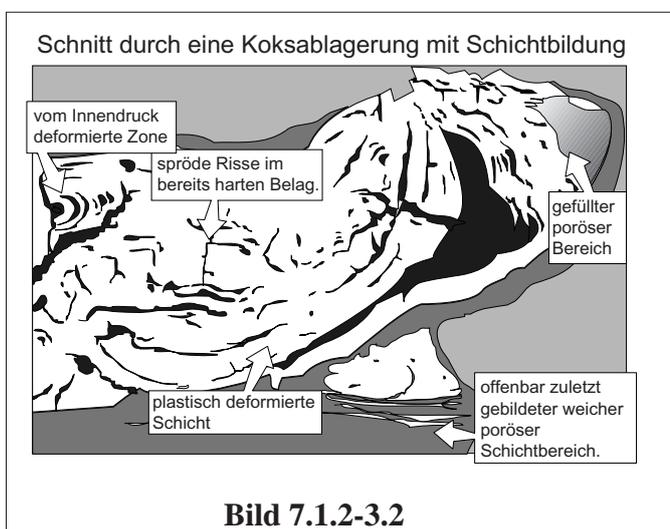


Bild 7.1.2-3.2 (Lit. 7.1.2-3): Das Bild zeigt die mikroskopische Aufnahme eines **Schliffs durch eine Ölkoksablagerung**. Deutlich ist eine **Schichtenstruktur** zu erkennen. Neben der

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.

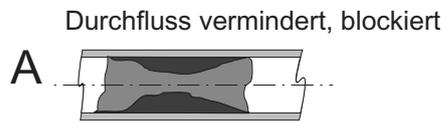
„A“: Das wohl häufigste Problem ist das ganze oder teilweise **Zusetzen von Ölrohren**. Gewöhnlich handelt es sich um **Rückölleitungen** (scavenge) die das heiße **Öl mit Luft vermengt (Schaum)** abtransportieren. Sie werden nicht wie eine Frischölleitung kühlend von Drucköl durchströmt. In der Frischölzufuhr 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 Heißeilen 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 Rohrzonon (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“: **Ablätternder 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.

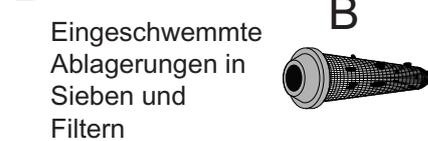
Fortsetzung auf Seite 7.1.2-10

Schädigende Wirkungen einer Ölverkokung

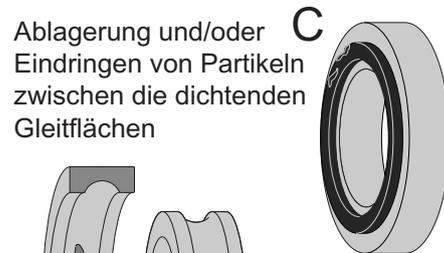
Verengung oder Blockierung von
Frisch- und Rückölleitungen
Entlüftungsrohren
Entlüftern (Breathern) **A**
Folgen: Funktionsausfall, Ölmangel,
Lagerschaden



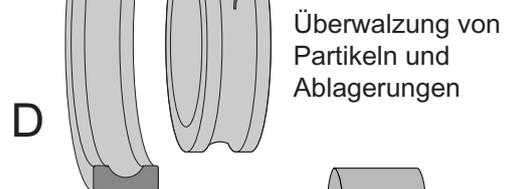
Verlegen durch ausbrechende Partikel von
Filtern und Sieben
Öldüsen
Wärmetauschern/Kühlern **B**
Folgen: Lagerschäden, Funktionsausfall



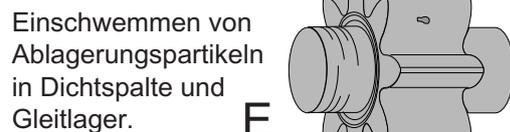
Erhöhte Leckraten in Öl- oder Luftströmungen
durch die Beeinträchtigung von Dichtungen
Folgen:
Gleitring-, Labyrinthschäden **C**
Lagerschäden,
Ölfeuer mit Überhitzung von Rotorteilen



Schädigung und Lebensdauerverkürzung von
Wälzlagern beim Überrollen harter Partikel
direkt abgelagert
eingeschwemmt **D**
Folgen: Lagerschäden

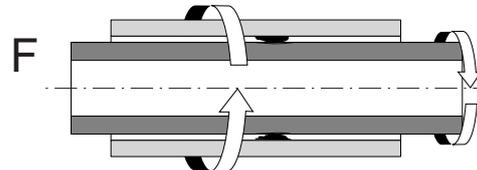


Schädigung von Ölpumpen (Zahnradpumpen)
Verschleiß
Blockieren
Ermüdung der Zahnflanken **E**
Folgen:
Pumpenschaden mit Spänebildung
Lagerschaden

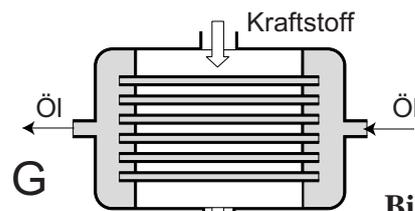


Überbrückung des Spalts
bei konzentrischen Wellen

Schädigung von Wellen durch Anstreifen
an aufgebauten dickeren Ablagerungen **F**
Folgen:
Unwuchten
Kerben
Wellenbruch, Bersten von Scheiben



Beeinträchtigung des Wärmeaustauschs
durch die isolierende Wirkung im Rohrinne
Folgen:
zu heißes Öl, schnelle Alterung **G**
zu kalter Kraftstoff, Vereisungsgefahr



Kraftstoff
Öl
Kraftstoff
Schlechte Wirkung eines
Öl/Kraftstoff-Wärmetauschers

Bild 7.1.2-4.1

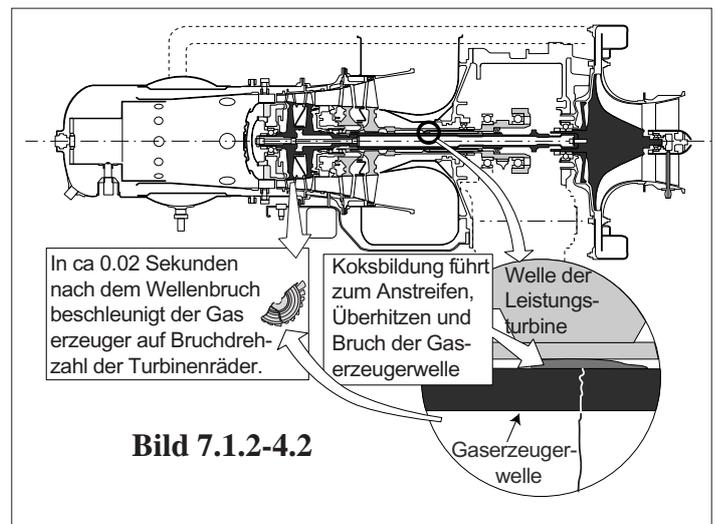
Fortsetzung von Seite 7.1.2-8

„C“: Werden **Gleitring-** oder **Labyrinthdichtungen** durch Partikel im Leckstrom verschliffen, 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). Verkocht 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 **Verkockung 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 verschleifen** 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.

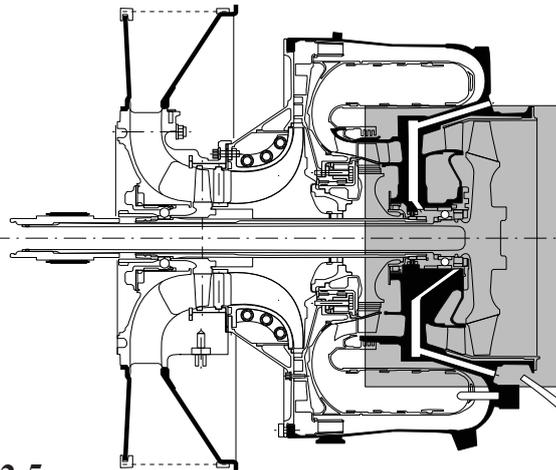
„F“: Zu dickeren Lagen aufgebaute Ölkohle kann gefährliche selbstverstärkende Anstreifschäden auslösen. Ein Beispiel ist die **Ölkohlebildung zwischen konzentrischen Wellen** (Bild 7.1.2-4.2, Beschreibung Bild 7.1.2-6.2). Der Anstreifvorgang führte über Aufheizung und Verschleiß zum Wellenbruch. In diesem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



„G“: **Ölkoks wirkt wärmeisolierend**. Das beeinträchtigt die Kühlung des Öls in den Rückölröhen. 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.

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

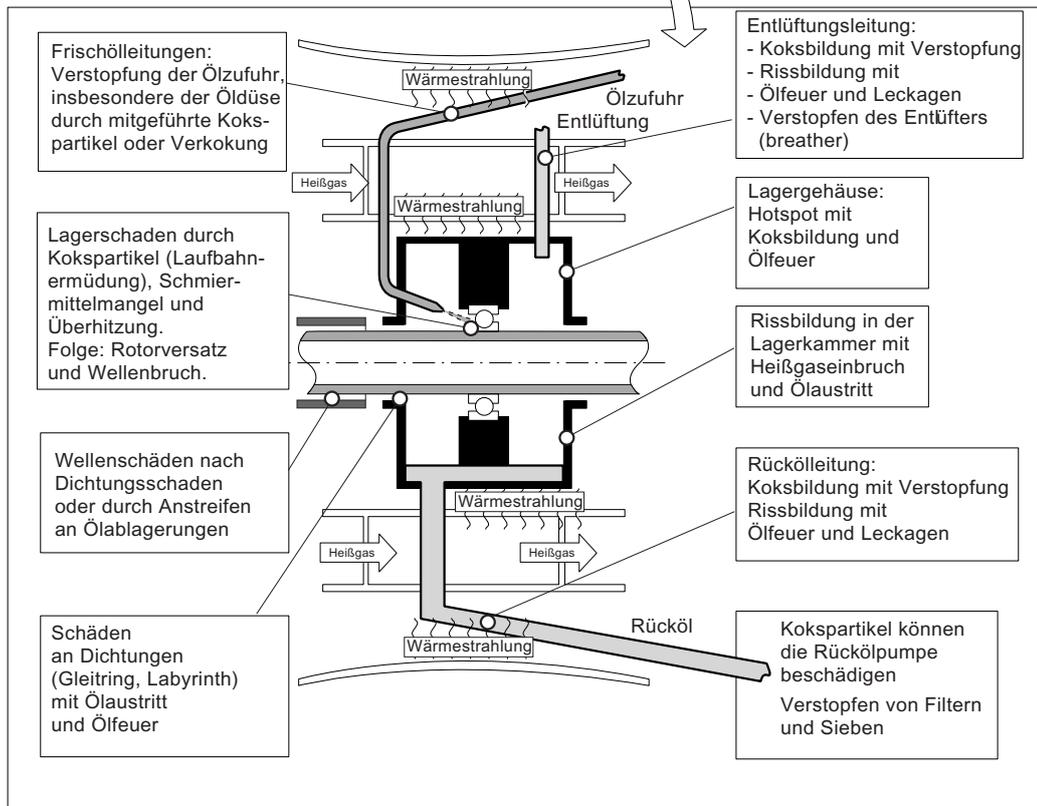


Bild 7.1.2-5 (Lit. 7.1.2-2, Lit. 7.1.2-8 und Lit. 7.1.2-9): Das in der oberen Skizze dargestellte Hubschraubertriebwerk hatte nach seiner Einführung in den 80er-Jahren große Probleme. Sie waren auf **Verkokung von Leitungen im Ölsystem** zurückzuführen (Beispiel 7.1.2-1).

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 entsprechend 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 Labyrinthdichtungen (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 abblättrender 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.



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 Ölmenge 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 Telefongespräche.

Der OEM entwickelte **neue Dichtungen** und führte einen **0,003mm-Ölfiter** ein, der Koks-partikel zurückhält. Damit ist eine Ölanalyse der **Filterrückstände** nach dem **Ferrografie-**

verfahren möglich. Diese ist deutlich aussagefähiger als die bisher angewandte **spektrometrische 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 verkokungs-empfindliches **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.

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

Die Triebwerke eines Verkehrsflugzeugs haben für eine Abkühlung der um das Ölsystem liegenden Bauteile während der Anfahrt zum Passagierausstieg ausreichend Zeit. Die Verkokungsgefahr ist relativ gering.



Die Triebwerke eines Hubschraubers sind gerade im Schwebeflug bis zum Aufsetzen hoch belastet. Sie müssen nach dem Landen bei Leerlauf abkühlen, um die Verkokungsgefahr zu minimieren.

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 Ge-

genteil, 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

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

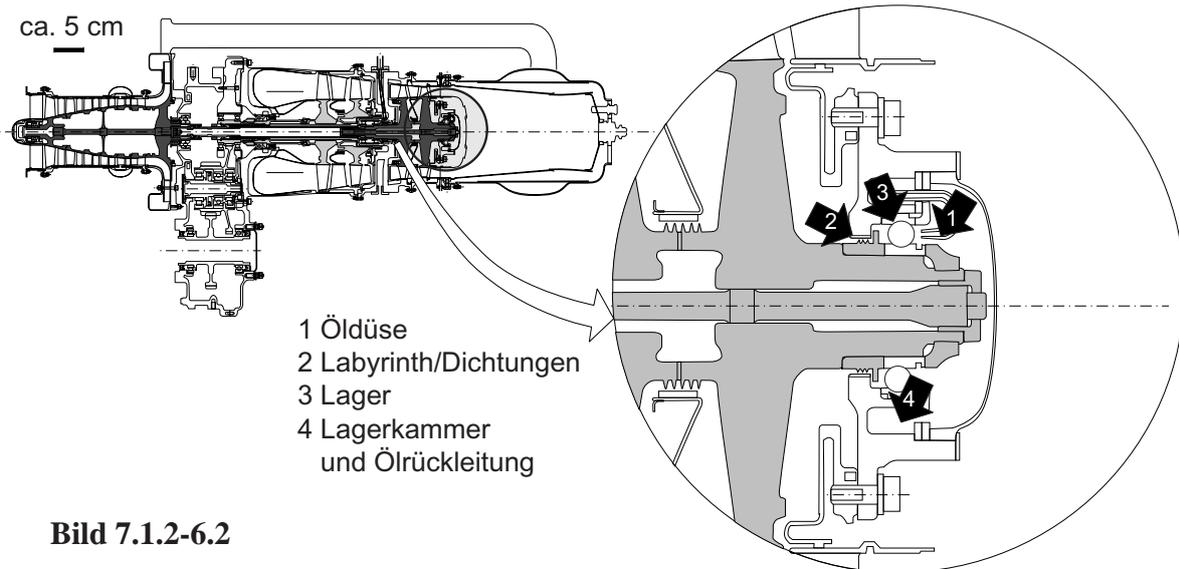


Bild 7.1.2-6.2

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 **Ölumbstellung** 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 Frischölaufuhr** (!) zurückführen ließen. Aber auch Rückölrückleitungen zeigten starke Verkokung. Die Probleme waren einem speziellen Öltyp nicht zurechenbar. 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 Koks-schicht** aus der Frischölrückleitung verlegt wurde.

Leider geht aus der vorliegenden Literatur nicht hervor, ob sich der Ölkoks im Stillstand

Ölverkokung kann die Hauptlager gefährden und ist damit sicherheitsrelevant.

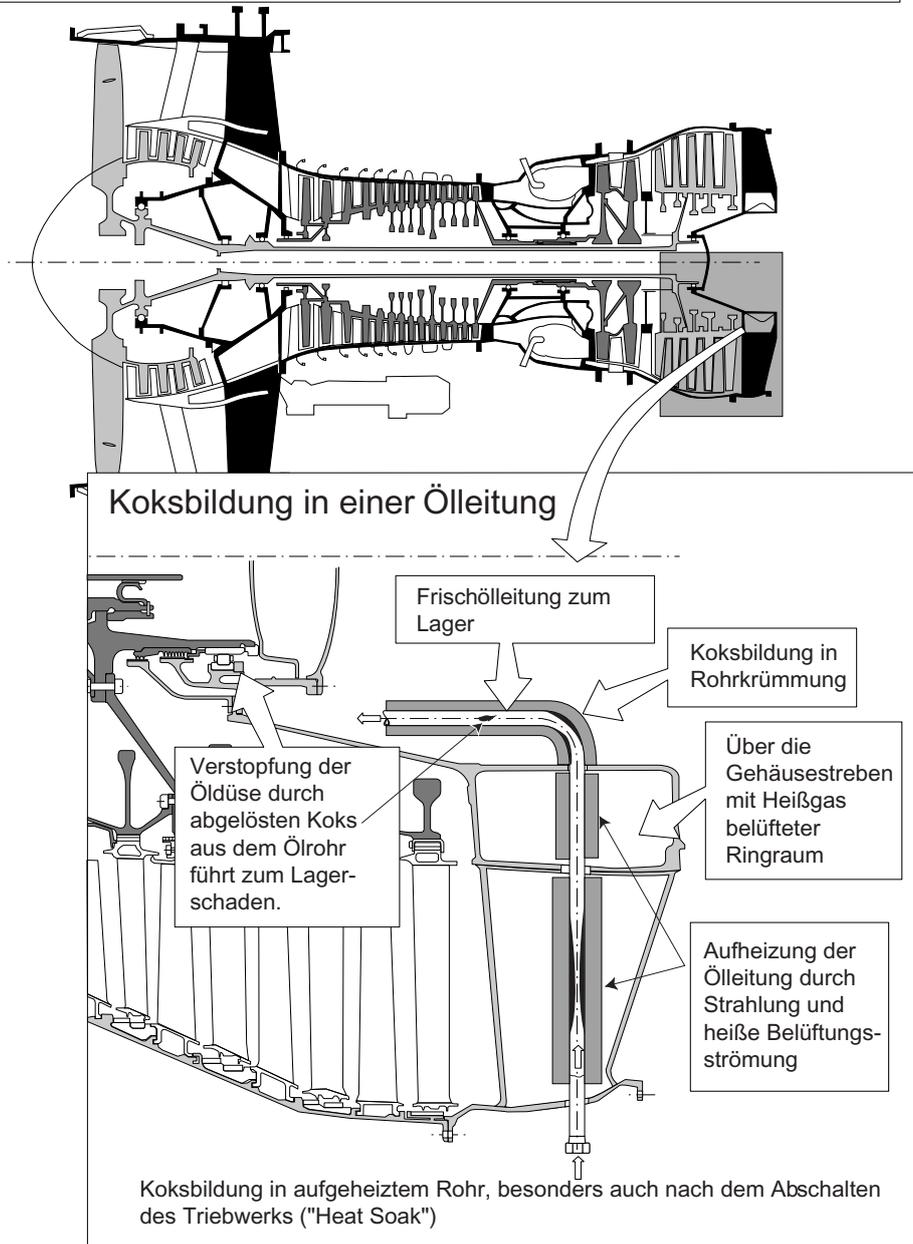


Bild 7.1.2-7

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 **Frischölaufuhr 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 Ölart 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 Ölsystems 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 **Haftfestigkeit verbliebener Koks-schichten** 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 über-

prüften 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.

Ölkoks in Entlüfungs- und Rückölleitung des Lagergehäuses war die Ursache für diesen schweren Triebwerksschaden.

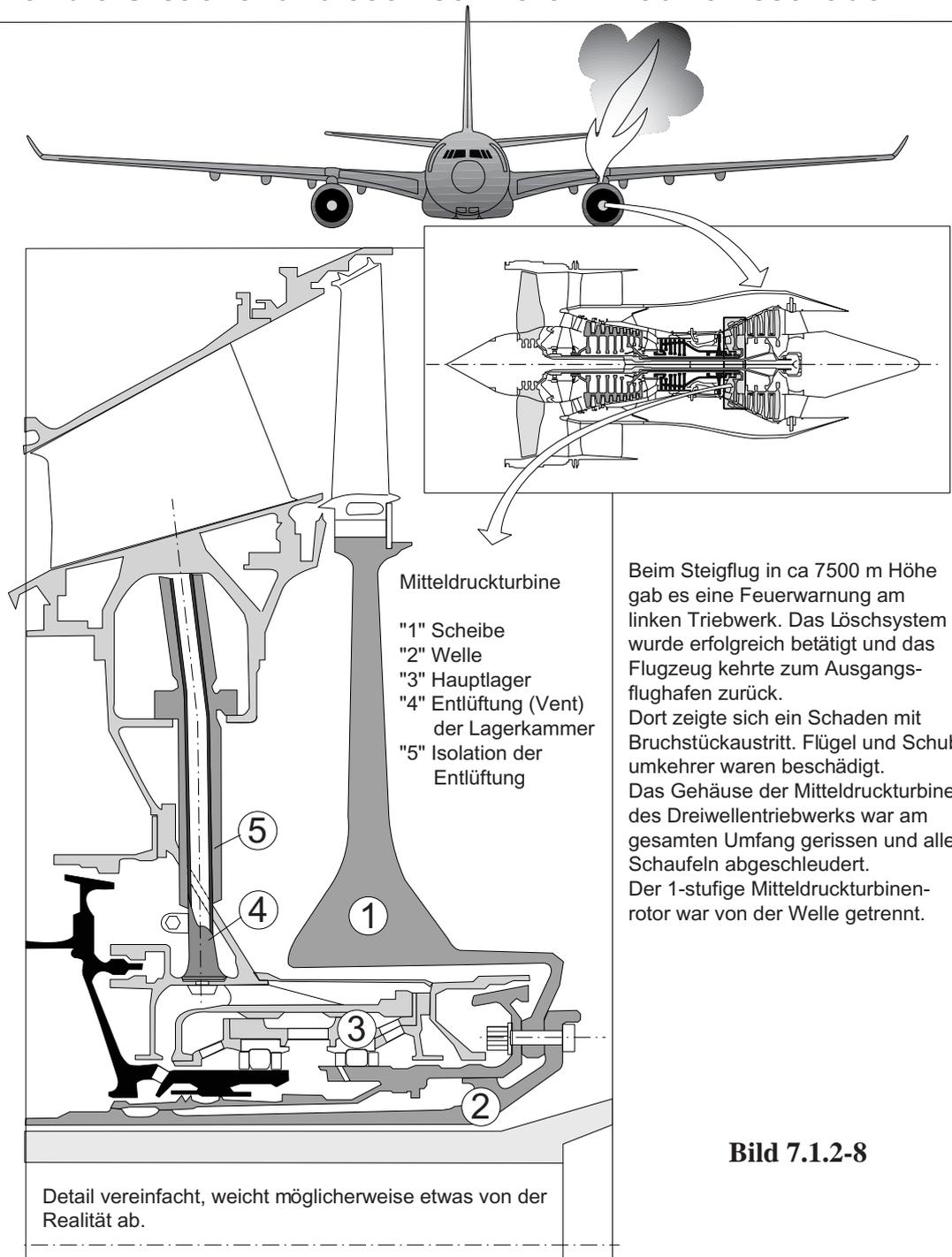


Bild 7.1.2-8

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 **Schadens**triebwerks 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 Entlüftungsleitung (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. auto-ignition, 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 Beschauung mit Bruchstückaustritt**.

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.

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-Dieseeffekts (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 Analyseverfahren 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, insbesondere 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' ($< 1 \mu$) auftritt. Dies gilt nicht für viele Schmier-systeme (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).

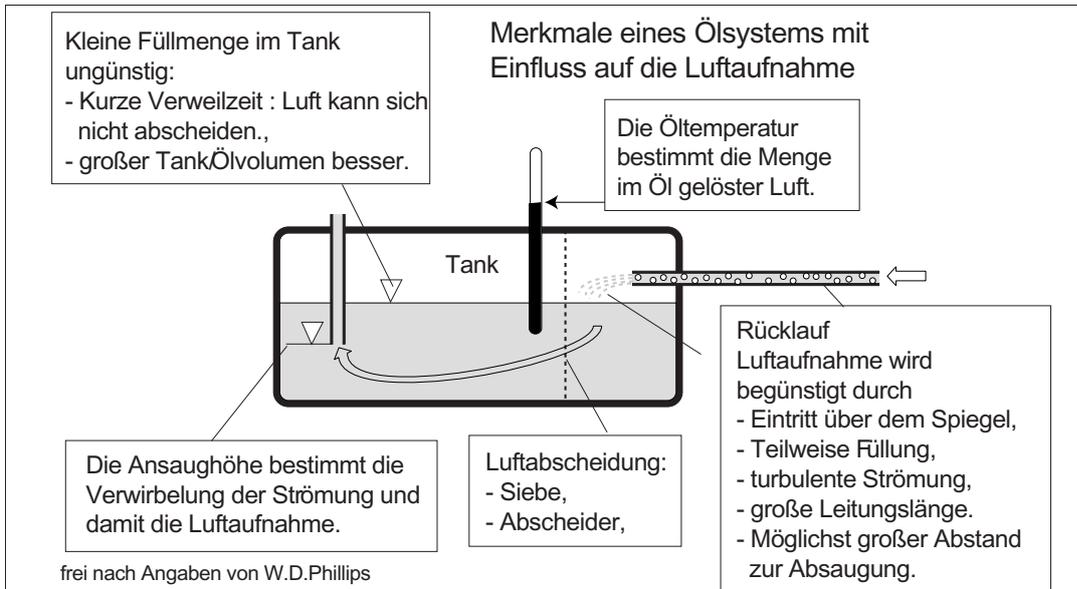
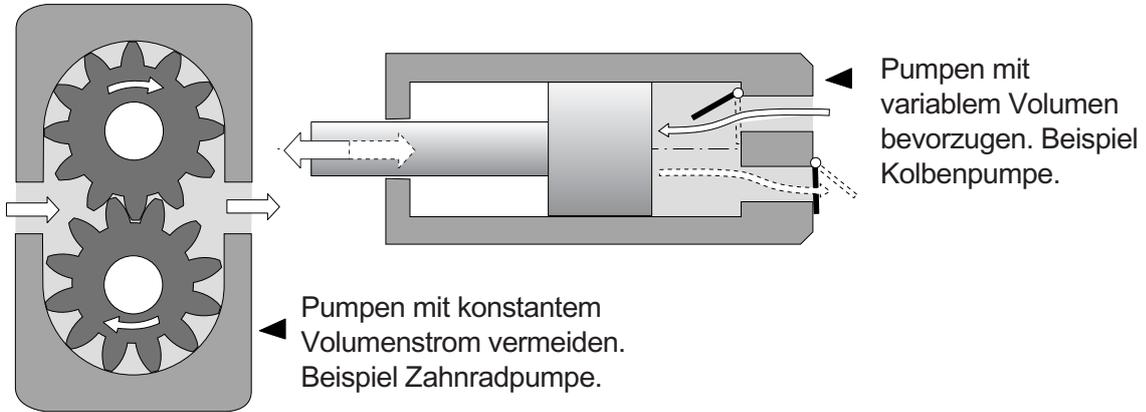
- Der **Öldruck**, insbesondere die **Anstiegsgeschwindigkeit** (Diagramm unten links) in der Pumpe beeinflusst die Luftaufnahme der Flüssigkeit. Diese ist von der Auflösung der Luftblasen durch Lösung in die Flüssigkeit bestimmt.

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

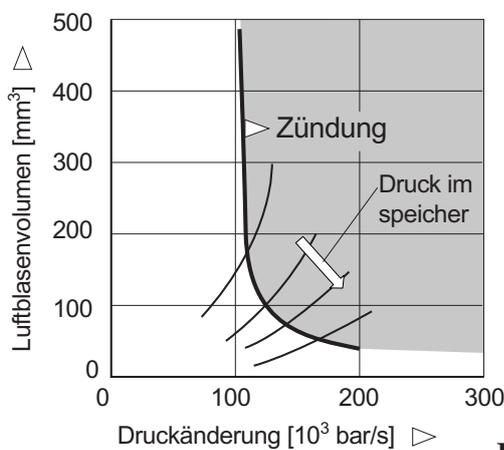
Je größer das **Tankvolumen**, umso länger hat die Flüssigkeit Zeit für die Entlüftung. **Ansaugstutzen** der Pumpe (Ansaughöhe) und **Anordnung eines möglichst turbulenzarmen Rücköleintritts** ohne Verspritzen. **D.h. nicht oberhalb des Flüssigkeitsspiegels**.

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

Komponenten und Bedingungen die eine Fluidalterung durch Deseffekte beeinflussen.



Zündung von Luftblasen in Öl bei Deseffekt



Tendenzen der Luftabgabe von Ölen

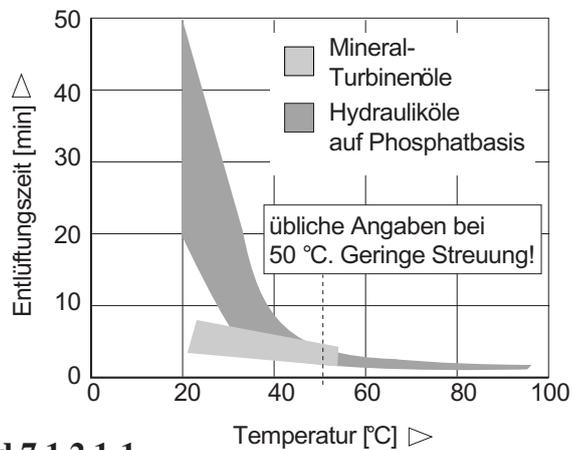


Bild 7.1.2.1-1

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.

- 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.