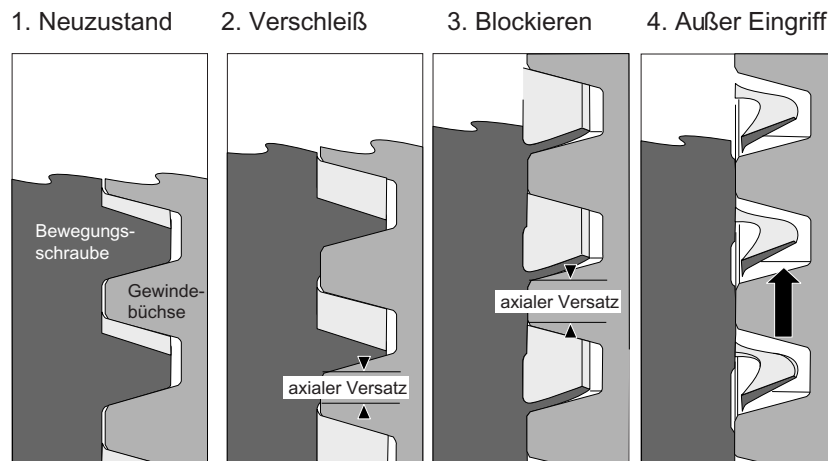


9.1.2 Gleitmittel und Gleitpasten

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 **Schraubverbindungen** (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/polierete 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.

Nur vorgeschriebene und bewährte Schmierstoffe verwenden. Oft ist, falls vorgeschrieben, Triebwerksöl besser geeignet als "Hochleistungsschmierstoffe".

Stahloberflächen mit MoS₂-haltigen Gleitschichten neigen bei Zutritt von Salzwasser zu Korrosion. Zusätzlich steigt beim Wasserzutritt der Reibbeiwert an. Die Oxidationsprodukte im Spalt haben ein größeres Volumen als die Ausgangsprodukte. Zusammen mit den schlechteren Gleiteigenschaften führt das zum Klemmen und Fressen.

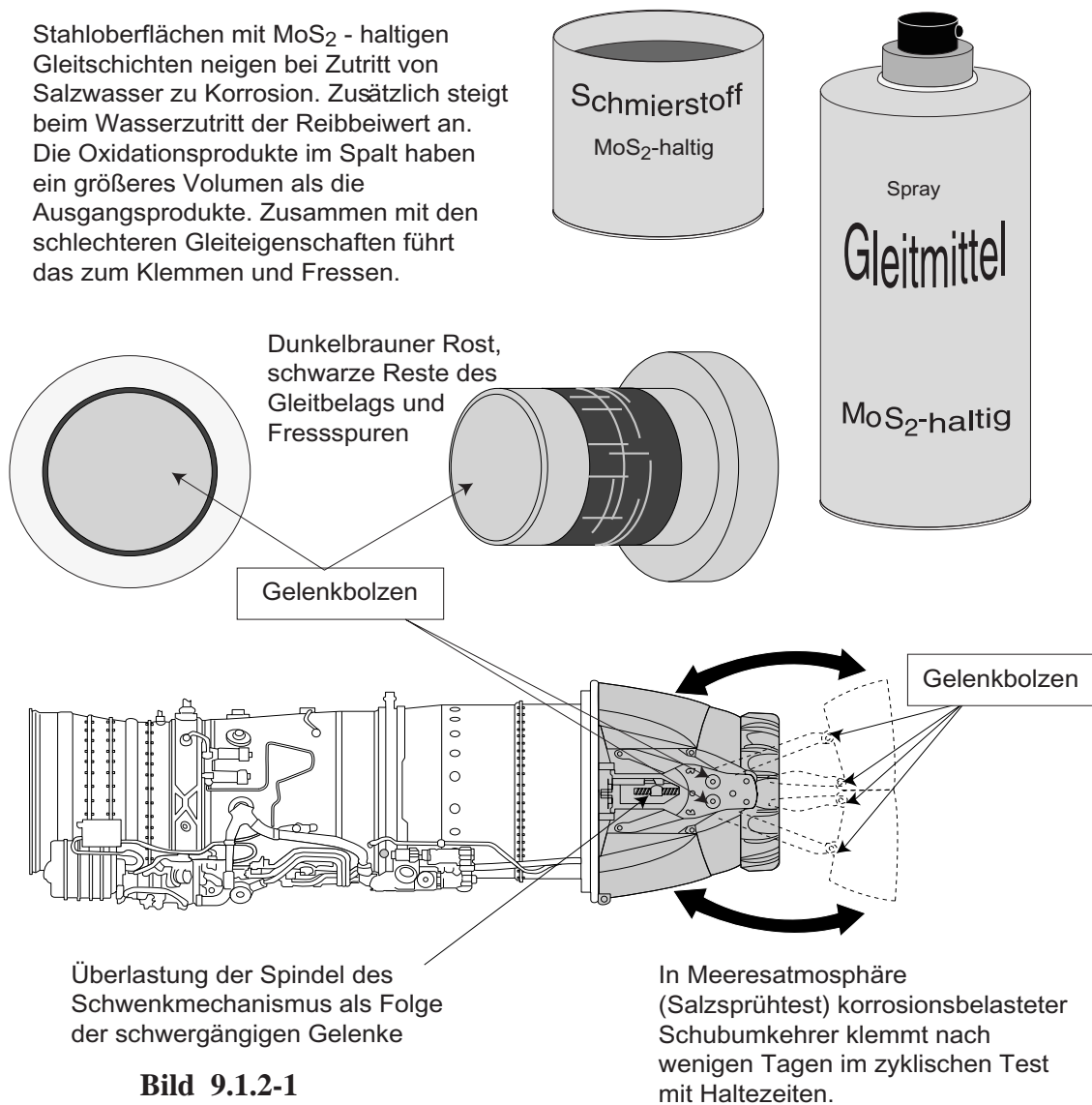


Bild 9.1.2-1

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 MoS₂ haltiges Schmiermittel bei Temperaturen wie sie für Heißeile 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 MoS₂ 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 Heißeile mit MoS₂ 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 **Spannungsrissskorrosion** 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 Heißeiltemperaturen 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! Grafit-haltige Schmierpasten sind in Farbe und Konsistenz mit MoS₂-haltigen leicht zu **verwechseln**. Darin besteht erfahrungsgemäß eine große Gefahr, weil, wie bereits erwähnt, MoS₂ an Heißeilen 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 Heißeilen 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 verspröden aus (SMIE, Band 1 Bild 5.3-6). Grundsätzlich ist die Anwendung bei **Al- und Mg-Legierungen** wegen wässriger **Korrosion infolge Elementbildung** zu unterlassen.

Wichtige Schmierfette, Gleit- und Schutzöle die an Triebwerken und in deren Umgebung angewendet werden

Bild 9.1.2-2

Schmierfett-bezeichnungen (Normen)	Firmen-Bezeichnungen	Hersteller- Beschreibung/Eigenschaften
MIL-C-11796C	Castrol: Braycote 202	präventiver Korrosionsschutz, braun, wachsfartig
MIL-C-16173	Valvoline:Tectyl 502C ClassI, 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 MoS₂ 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+Minerabi+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)
	Aeroshell Grease 33	Als Aerosol, Korrosionsschutz, resistent gegen Reiben und Wischen
	D-5933NS Aerosol	Vielzweckfett, synthetisch (auf Lithiumbasis verdickt)
MIL-PRF-81322F, Grade 2	Aeroshell Grease 22	Als Aerosol, Korrosionsschutz, druckstabil, (73 - 121°C)
NSN 9150-00-159-5012	Turbo 10	Vielzweckfett, synthetisch (mikrogelverdickt)
NSN 9150-01-253-9619	WC 393	Acryl Copolymer, kompatibel mit O-Ringen und werkstoffähnlichen Komponenten
MIL-A-907 D&E	Dag 243	Für Abblasventile und Schubumkehrer
MIL-T-5544	GP-460	Verhindert "Fressen" aller Metalle, Minerabibasis mit MoS₂
MIL-S-21568A	D-5100N S Aerosol ZC-100 Bulk	Für hohe Temperaturen (bis 538°C), Petroleum mit Grafit
MIL-G-26548	D-5480N S Aerosol ZC-480 Bulk	Gleitmittel auf Silikonbasis für Systeme mit unterschiedlichen Metallen oder Metall/Plastik, verhindert Anfrieren von Gummi
MIL-PRF-7870C	D-5261N S Aerosol ZC-261 Bulk	Trockenfilm Gleitmittel für Kleinteile, Einsatz bis 204°C, mit Grafit, 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

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.

Auf das Betriebsverhalten eines Schmiermittels wirken sich auch Umwelteinflüsse und der Kontakt mit anderen Hilfsstoffen aus.

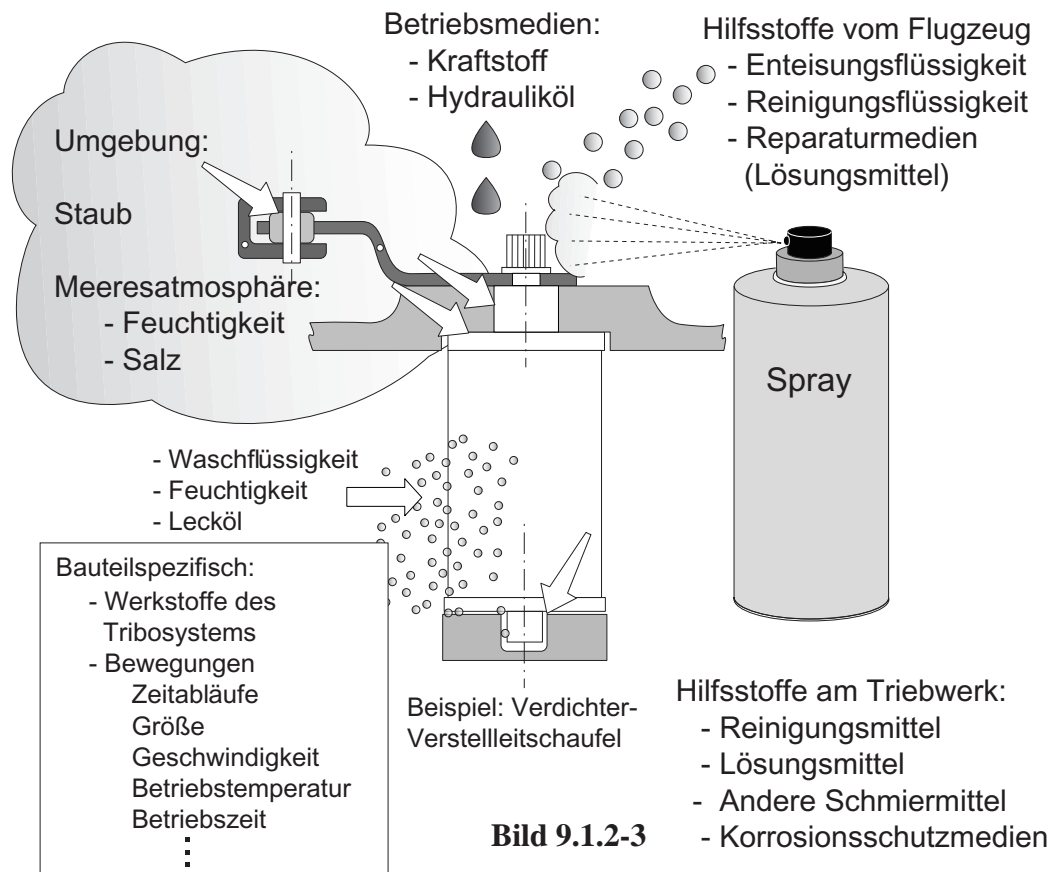


Bild 9.1.2-3

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:

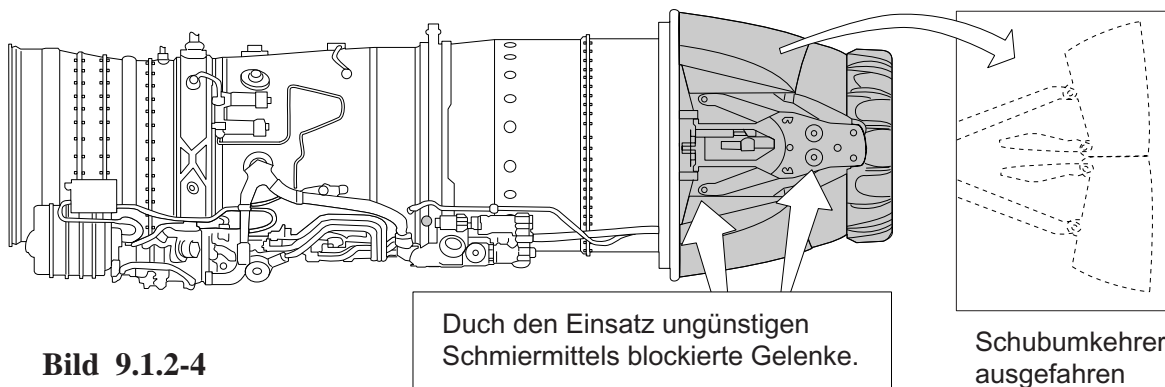
- Zutritt von Umgebungsmedien (Bild 9.1.2-1 und Bild 9.1.2-4).
- Kontakt mit Hilfsstoffen.
- Bauteilspezifische Betriebsparameter,
- Werkstoffe/Tribosystem.

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 ver-

wendete 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 MoS₂-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.



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).

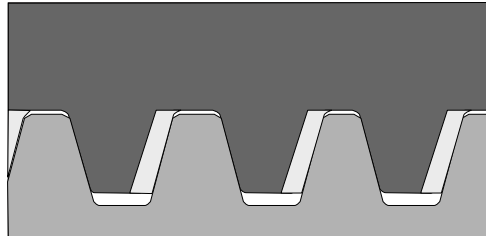
Eindringen von Dämpfen: Das gilt bereits für **Luftfeuchtigkeit**, wenn sich damit die Schmierseigenschaften des Hilfsstoffs unter den Betriebsbedingungen verändern. Auch **Lösungsmitteldämpfe** oder **Öldampf** kann auf nicht ausreichend erprobte Hilfsstoffe bedenklich wirken.

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 **MoS₂-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 MoS₂ 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).

Schädigende Einflüsse auf ein geschmiertes System



- Nachschmierintervall zu lange oder Schmierung entfiel ganz.
- Nachschmierung
 - Keine ausreichende Schmierstoffmenge
 - Abrieb verbleibt im Schmierespalt
 - 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.*



- 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 Messsystemen 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-

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 Schmierpalts. 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 Schmierfetrückstände 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 **Schraubewirkungsgrad** (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 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 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 suspekten Turbinenmodule **rückmontiert** werden. Diese sehr wertvollen Bauteile (Turbinenscheibe Skizze rechts) mussten verschrottet werden.

Bei Heiteilen ist besonders auf die Verwendung der zugelassenen und bewährten Schmiermittel zu achten.

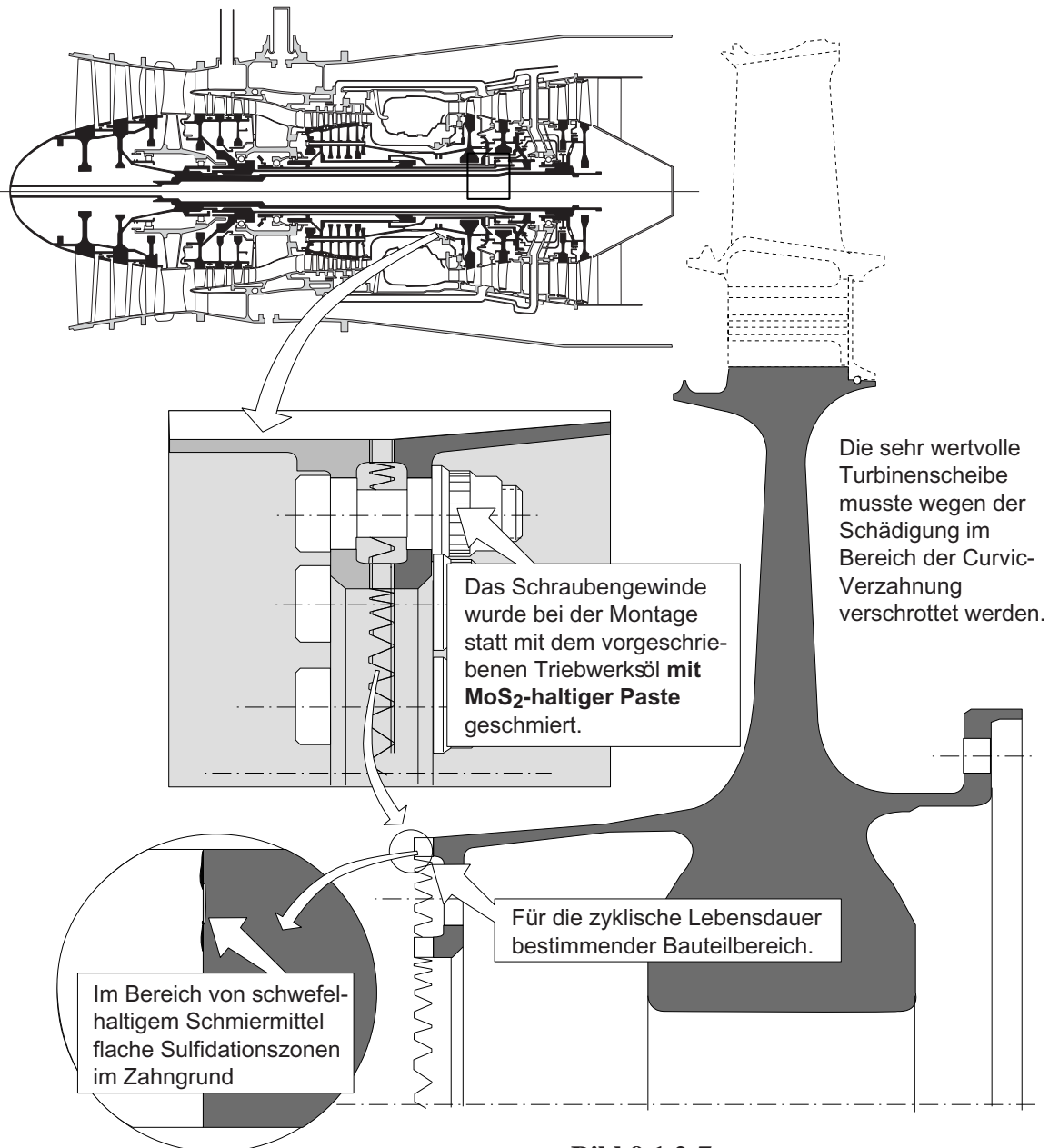


Bild 9.1.2-7

Turbinenradbruch nach dem Einsatz eines ungeeigneten Schmiermittels.

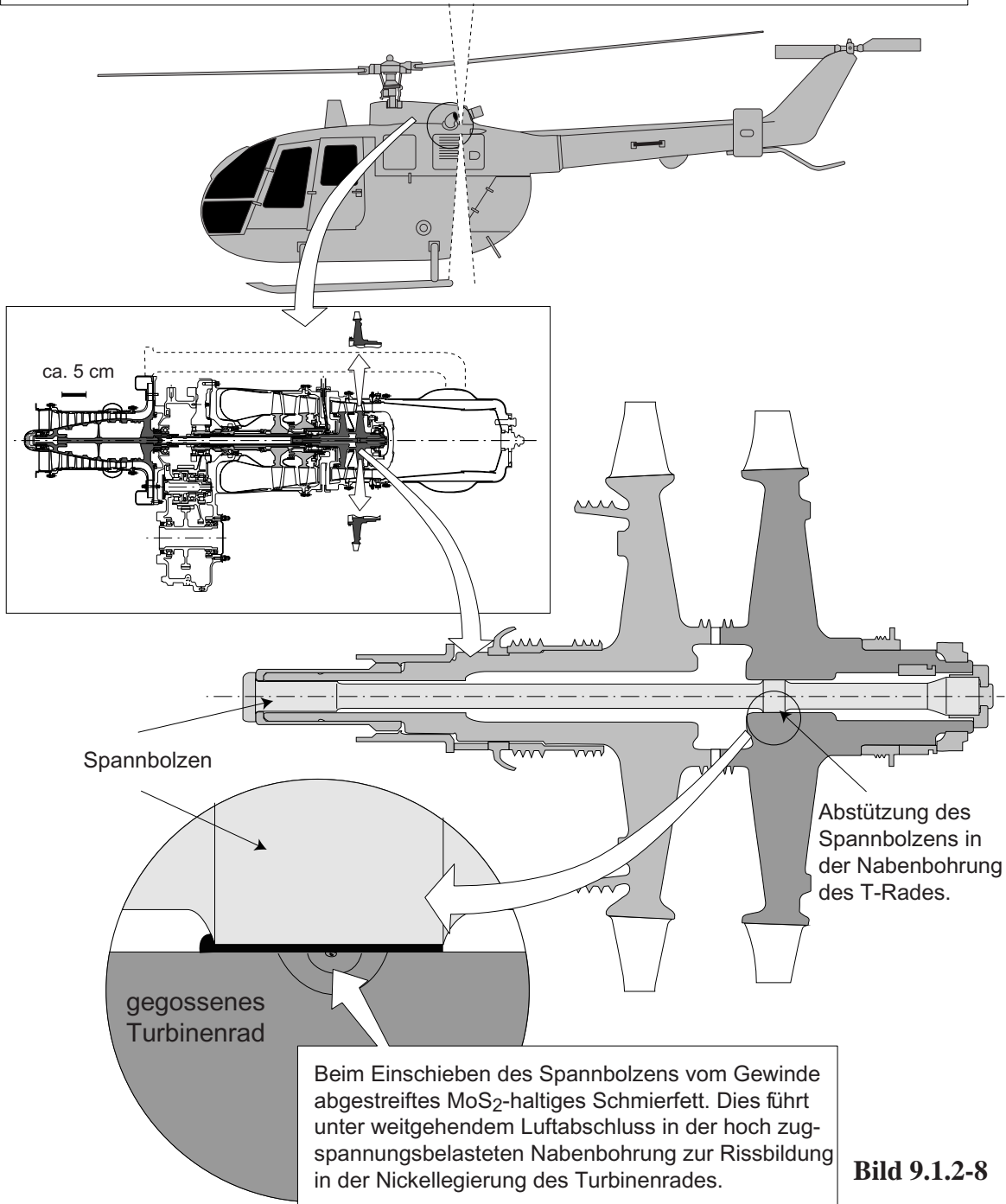


Bild 9.1.2-8 : In diesem Fall wurde versucht, einen Montagevorgang zu verbessern. Wie in Bild 9.1.2-7 sollte die erforderliche Vorspannung mit einem 'besseren' Schmiermittel des Gewindes gewährleistet werden. Das Gewinde befindet sich in der mittleren Skizze am rechten Ende des zentrischen Spannbolzens. 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 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 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 **Spannungsrissskorrosion** 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. Gewindgänge 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.

Obwohl kein Triebwerksschaden, ist dieser Fall doch ein Musterbeispiel für die Folgen vom Schmierstoffmangel.

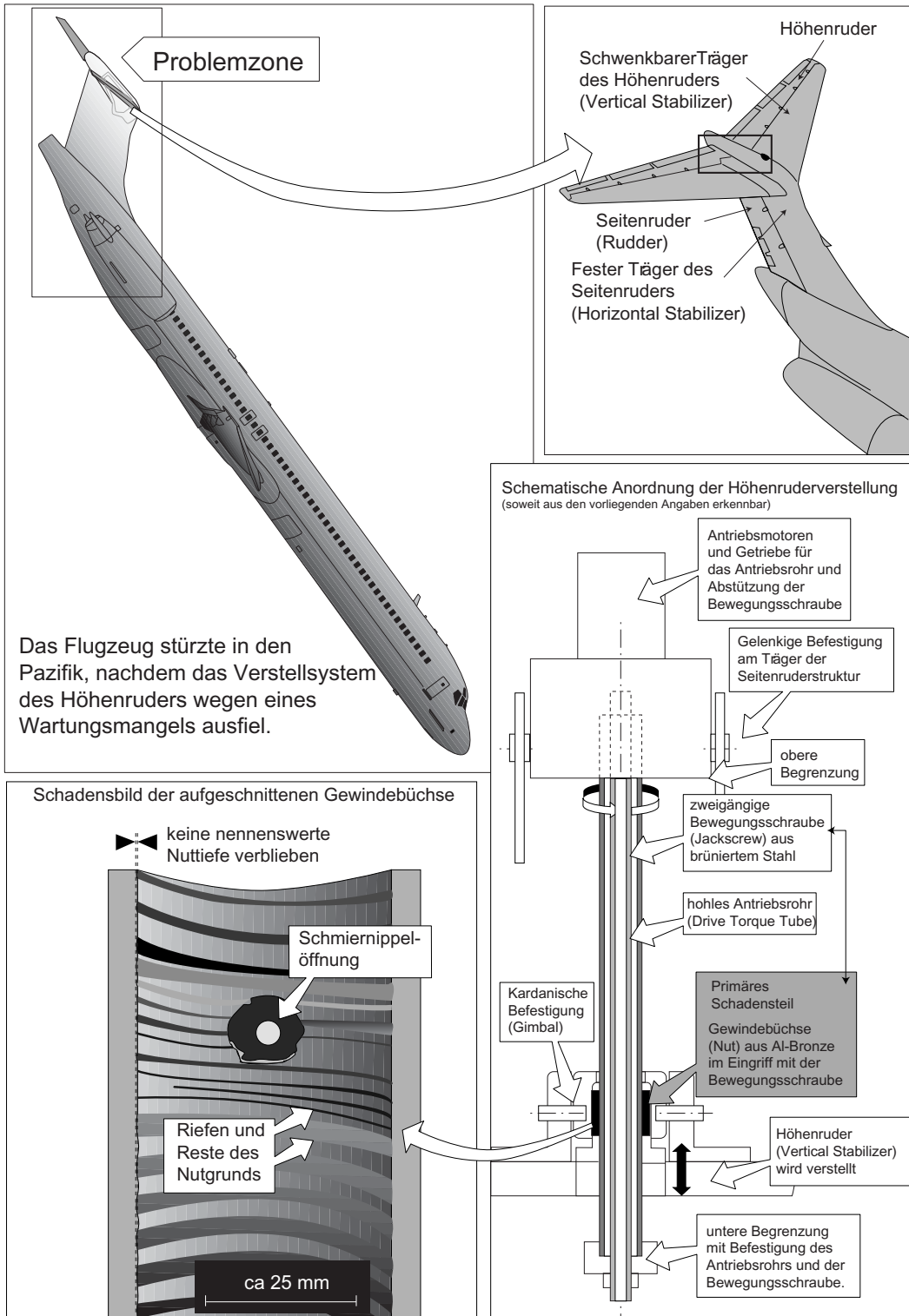


Bild 9.1.2-9.1

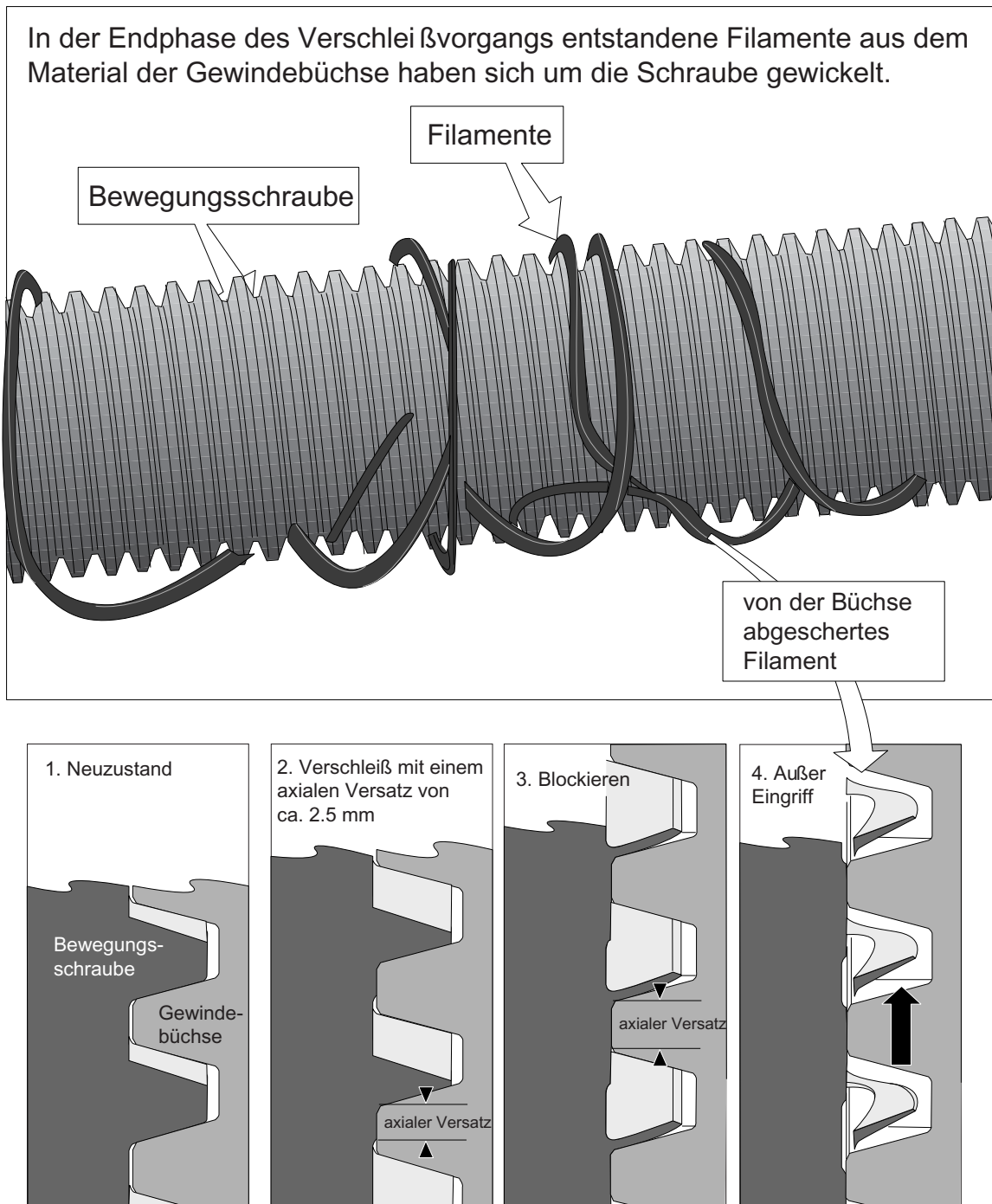


Bild 9.1.2-9.2

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 %

Systeme und Betriebsstoffe: Hilfsstoffe: Gleitfette, Pasten, Schichten

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 beiträgend 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 Schmierfettart 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 **strukturiertes 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.

- 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.

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 1 und 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.silcotec.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.

- 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 Triebwerks-technik 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 Triebwerks-technik Band 4“, 2000, ISBN 3-00-017734-5, Kapitel 16.2.2.3