

SCHMIERSTOFFE FÜR LUFTFAHRTGETRIEBE

Andreas Doleschel; Eurocopter Deutschland GmbH; 81663 München; Deutschland

Zusammenfassung

Luftfahrtgetriebe werden üblicherweise mit Schmierstoffen nach MIL-PRF-23699 oder MIL-PRF-6086 geschmiert. Diese Schmierstoffe bieten wenig Potenzial, die Leistungsgrenzen eines Getriebes zu erreichen. Mit der Verwendung von speziellen Getriebschmierstoffen lässt sich die Leistungsdichte erhöhen oder der Verschleiß verringern. Die Zulassung eines solchen Schmierstoffs ist aufwendig, da es gilt, verschiedene Anforderungen aus technischer Sicht, vom Kunden oder von den Behörden zu erfüllen. Somit müssen technische Details im Vorfeld durch Modellversuche und die Akzeptanz beim Kunden geklärt werden. Ist ein Schmierstoff festgelegt, muss im Rahmen der Zulassung die Konformität mit den Vorschriften gezeigt werden. Ist dieser neue Schmierstoff zugelassen, kann der Kunde im Rahmen von erhöhten Überholzeiten oder Ölwechselintervallen profitieren. Ein weiteres Ziel kann die Leistungssteigerung sein, um das Getriebe bei erhöhten Leistungskennwerten für ein bestehendes Muster zu verwenden.

ECD-PUB-001507

1. EINLEITUNG

In vielen Luftfahrzeugen werden Getriebe zur Leistungsübertragung verwendet. Die komplexesten und leistungsfähigsten Getriebe werden bei Hubschraubern als Haupt-, Zwischen- oder Heckgetriebe benutzt. Geprägt durch die militärisch unterstützte Entwicklung in den 50er und 60er Jahren wird meistens ein Turbinenschmierstoff nach MIL-PRF-23699 [1] zur Schmierung der Getriebe eingesetzt. Die gleichzeitige Anwendung im Triebwerk und Getriebe ist hier ein Vorteil. Dieser Schmierstoff ist auch die erste Wahl bezüglich der Verfügbarkeit und Verbreitung, jedoch ist er als Turbinenschmierstoff nicht auf die Anforderungen im Getriebe optimiert.

Ein Beispiel für einen Hubschrauber mit einem modernen Schmierstoff ist der Eurocopter Hubschrauber EC135 P2i/T2i [2] (siehe **Bild 1**) bei dem ein optimierter Schmierstoff zum Einsatz kommt. Bei der Verwendung des Schmierstoffs erhält der Betreiber ein höheres Überholintervall (TBO) und gleichzeitig eine erhöhte Leistung im Ein-Motoren-Betrieb (OEI)

Ziel eines modernen Getriebschmierstoffs in der Luftfahrt muss es sein, diese und weitere Ziele umzusetzen und dem Betreiber hierbei die maximale Leistung aus dem Getriebe bei minimalem Verschleiß zu Verfügung zu stellen.

1.1. Begriffe

1.1.1. Grundöl

Schmierstoffe unterscheiden sich in ihren Eigenschaften und diese sind definiert durch das Grundöl und die Additive. Bei der Wahl des Schmierstoffs ist erstes Augenmerk auf das Grundöl zu legen, da dieses die grundlegenden Eigenschaften wie die Viskositätskennwerte oder die Verträglichkeit bestimmt.



BILD 1. EC135 P2i/T2i: Mehrzweckhubschrauber mit erhöhter Leistung dank optimiertem Schmierstoff [2].

Schmierstoffe können nach dem Grundöltyp in zwei Gruppen eingeteilt werden: Mineralische und synthetische Schmierstoffe. Die Gruppe der synthetischen Schmierstoffe unterteilen sich wieder in eine Vielzahl von Untergruppen wie die PAO (Polyalphaolephine), die Ester oder die Polyglykole.

Durch die Mischung verschiedener Grundöle können verschiedene Eigenschaften wie z.B. die Viskositätsklasse eingestellt werden. Die Temperatur-Viskositätsabhängigkeit ist jedoch charakteristisch für jeden Grundöltyp.

Bei ausformulierten Schmierstoffen ist die genaue Zusammensetzung der Grundöle meist das geschützte Wissen der Ölhersteller.

1.1.2. Additive

Die Additive im Schmierstoff werden meist nur in geringen Mengen beigefügt und verändern die Eigenschaften des Schmierstoffs. Es gibt Additive zur Verbesserung der

Zahnflankentragfähigkeit (EP – extreme pressure), zur Verbesserung der Viskositäts-Temperaturabhängigkeit (Viskositäts-Index-Verbesserer) oder zur Temperaturstabilität.

Weitere Gruppen von Additiven beeinflussen andere Faktoren wie z.B. die Verschleißtragfähigkeit oder die Reibungszahl.

1.1.3. Viskosität

Bei der Viskosität wird zwischen der dynamischen η und der kinematischen Viskosität ν unterschieden. Eine Umrechnung erfolgt mit **Gleichung (1)**.

$$\eta = \nu \cdot \rho \quad (1)$$

mit

η	mPas	dynamische Viskosität
ν	mm ² /s	kinematische Viskosität
ρ	kg/m ³	Dichte

Die dynamische Viskosität ν bei 40° gibt die Viskositätsklasse (VG) vor. Schmierstoffe in der Luftfahrt sind meist sehr dünnflüssig und entsprechen in etwa der Viskositätsklasse VG32. In der Luftfahrt hat sich jedoch die Orientierung an der Viskosität bei 100 °C durchgesetzt.

Eine weitere wesentliche Kenngröße ist der Viskositätsindex VI, der die Temperatur-Viskositäts-Abhängigkeit eines Schmierstoffes beschreibt. Nach DIN 3348 spannen Mineralschmierstoffe den Kennwert zwischen 0 (hohe Temperaturabhängigkeit) und 100 (geringe Temperaturabhängigkeit) auf. Für synthetische Schmierstoffe können Werte über 100 erreicht werden. Je höher der Kennwert, desto geringer die Änderung der Viskosität mit der Temperatur. Ein hoher Kennwert ist somit erwünscht, um eine möglichst konstante Viskosität im gesamten Temperaturbereich zu erhalten.

2. SCHMIERSTOFFE IN DER LUFTFAHRT

In der klassischen Auswahl für Hubschrauber- oder Luftfahrtgetriebeschmierstoffe finden sich Schmierstofftypen, die nach MIL oder DoD spezifiziert sind [3], jedoch sind diese Entwicklungen sehr speziell auf bestimmte Anwendungen zugeschnitten oder haben einen beschränkten Einsatzbereich.

Im Wesentlichen werden nur drei häufig verwendete Schmierstoffspezifikationen benutzt:

- MIL-PRF-23699 [1]: Synthetischer Schmierstoff auf Esterbasis mit einer Viskosität von ca. 5 mm²/s bei 100°C. Der Schmierstoff zeichnet sich durch eine große Verbreitung als Triebwerksschmierstoff aus. Die Anwendung im Getriebe wird im Wesentlichen durch die große Verbreitung des Schmierstoffs gerechtfertigt.
- Schmierstoffe nach MIL-PRF-7808 [4] entsprechen von den Eigenschaften der Spezifikation MIL-PRF-23699, jedoch zeigen diese eine Viskosität von 3 mm²/s bei 100°C. Aufgrund dieser geringen Viskosität werden diese Schmierstoffe auch gern als „Winteröl“ bezeichnet.

- MIL-PRF-6086 [5]: Mineralischer Schmierstoff, der für die Anwendung im Hubschrauber- oder Luftfahrtgetriebe entwickelt und zugelassen wurde. Der Schmierstoff ist in 2 Viskositätsklassen erhältlich (Light Grade and Medium Grade), um die Verwendung in verschiedenen Temperaturbereichen zu ermöglichen. Die starke Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur erlaubt es oft nicht, den Schmierstoff bei allen Temperaturen zu verwenden.

Für alle Spezifikationen gibt es eine Vielzahl von Schmierstoffen verschiedener Hersteller. Alle zugelassenen Schmierstoffe sind in der zu jeder Norm beigefügten Liste „Approved Lubricants“ aufgenommen.

Für ein modernes Getriebe muss, wie in der Industrie und im Automobilbau üblich, ein speziell ausgewählter, auf die Beanspruchung optimierter Schmierstoff verwendet werden. Die Schmierstoffe nach MIL-PRF-23699 und MIL-PRF-7808 sind für den Einsatz im Triebwerk entwickelt und spezifiziert und somit für einen anderen Einsatz als im Getriebe optimiert. Für Triebwerksschmierstoffe ist z.B. eine hohe Temperaturstabilität sehr wichtig, für Getriebeschmierstoffe spielt dies eine untergeordnete Rolle.

Die Schmierstoffe nach MIL-PRF-6086 basieren auf Mineralöl und zeigen bereits mit ihrer starken Viskositäts-Temperaturabhängigkeit deutliche Nachteile.

Für die Anwendung im Getriebe sind auch für die Luftfahrt andere Eigenschaften von Bedeutung. Das spezifische Gewicht unterscheidet sich zwischen $\rho \approx 0,9$ kg/dm³ für Mineralöle und bis zu $\rho \approx 1,1$ kg/dm³ für Polyglykole. Für ein Hauptgetriebe mit ca. 10 l Öl beträgt der Unterschied somit bis zu 2 kg. Auch die spezifische Wärmekapazität zur Weiterleitung der Reibungswärme aus dem Reibungskontakt (Verzahnungen, Lager) ist eine maßgebliche Größe für die Wahl des Schmierstoffs.

Ein moderner Getriebeschmierstoff ist durch folgende Eigenschaften definiert:

Temperaturkonstante Viskosität

Aus technischer Sicht ist eine ausreichende und weitgehend temperaturkonstante Viskosität gewünscht. Dies wird mit Schmierstoffen mit einem hohen Viskositätsindex (VI) erfüllt. Spezielle Additive sichern für den Getriebeschmierstoff eine hohe Tragfähigkeit im Verzahnungs- und Lagerkontakt. Optimiert wird der Schmierstoff somit für eine hohe Leistungsdichte, die ein günstiges Gewichts/Leistungsverhältnis eines Getriebes ermöglicht.

Gute Verfügbarkeit

Aus Kundensicht ist eine weltweite sichere und günstige Verfügbarkeit notwendig. Ziel sind natürlich auch geringe Betriebskosten, die sich durch einen niedrigen Preis und einem hohen Ölwechselintervall erzielen lassen.

Gleichbleibende Qualität

Aus Herstellersicht sollte ein Schmierstoff in konstanter Qualität und Formulierung über Jahrzehnte verfügbar sein. Auch die Behörde wünscht sich eine eingefrorene Formulierung.

Verträglichkeit

Die Verträglichkeit mit anderen Schmierstoffen, Lacken, Buntmetallen, Dichtungen und Kunststoffen muss gegeben sein.

Aus diesem Grund haben sich verschiedene Luftfahrtshersteller entschlossen, Schmierstoffe aus dem Automobilbereich im Hubschrauber anzuwenden. So verwenden Sikorsky [6] oder Kaman [7] in einigen Hubschraubern für Achsgetriebeöle ausgelegte Schmierstoffe nach der Automobil Spezifikation DEXRON II oder III.

MD Helicopter [8] verwendet für die Hauptgetriebe ihrer Modelle den speziellen Schmierstoff Mobil AGL auf PAO Basis.

Bei der Verwendung von Schmierstoffen, die auf Basis von Spezifikationen aus der Automobilbranche definiert sind, ist die Abhängigkeit von dieser Spezifikation groß. Da diese Spezifikationen nicht von staatlichen Stellen sondern von Automobilherstellern erstellt werden, ist die (wenn auch geringe) Gefahr von Änderungen vorhanden. Für den Hersteller von Luftfahrzeugen ist diese Abhängigkeit unerwünscht, denn bei Änderungen sind dann entsprechende Nachweise zu erbringen.

Bei der Verwendung eines bestimmten Schmierstoffs ist andererseits die Abhängigkeit von dem Hersteller des Schmierstoffs groß. Bei Änderungen der Formulierung aufgrund von gesetzlichen Forderungen (z.B. aus Umwelt-schutzgründen) oder aufgrund von wirtschaftlichen Gründen muss eine Vereinbarung mit dem Hersteller getroffen werden, dass die Formulierung nicht ohne Information an den Luftfahrzeughersteller geändert wird. Eine solche Vereinbarung ist, bei dem geringen Absatz für die Anwendung in Hubschraubergetrieben, nur schwer gegenüber den Schmierstoffherstellern durchzusetzen.

3. ANFORDERUNGEN

Bevor ein alternativer Schmierstoff in den Einsatz eines Hubschraubergetriebes kommt, müssen eine Vielzahl von Tests und Nachweisen für die technische Eignung erbracht werden. Neben den technischen Bedingungen müssen auch kommerzielle und Verfügbarkeitsaspekte geprüft werden.

3.1. Technische Anforderung

Der Schmierstoff muss die Zahnflanken, die Lager und alle anderen Bauteile im Getriebe bei allen Einsatzbedingungen vor Verschleiß schützen.

3.1.1. Temperaturbereich

Je nach Hubschrauberspezifikation muss der Schmierstoff im gesamten Temperaturbereich von -45°C bis zur oberen Getriebegrenztemperatur von ca. 105°C einsatzfähig sein. In diesem Temperaturbereich muss somit eine operative Viskosität des Schmierstoffs vorhanden sein. In **Bild 2** sind für verschiedene Schmierstoffe die Viskositäts-Temperatur-Kurven gezeigt.

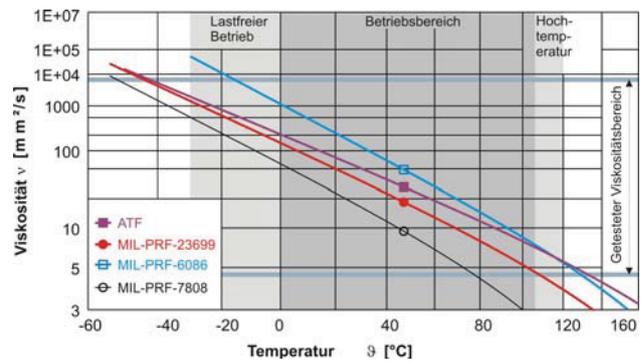


BILD 2. Viskositäts-Temperatur-Diagramm für verschiedene Schmierstoffe im Anwendungsbe-reich für das EC135 Hauptgetriebe FS108.

Als Beispiel für eine Anwendung ist für das Getriebe FS108 des Hubschraubers EC135 der benutzte Öltemperaturbereich in den Bereichen „Lastfreier Betrieb“ unter 0°C , „Betriebsbereich“ von 0°C bis 105°C und „Hochtemperatur“ von 105° bis 120°C eingezeichnet. Der im Prüfstand getestete Viskositätsbereich von ca. $\nu = 4\text{ mm}^2/\text{s}$ bis ca. $\nu = 6000\text{ mm}^2/\text{s}$ ist ebenfalls eingezeichnet.

Der Schmierstoff nach MIL-PRF-23699 deckt hier den gesamten Temperaturbereich ab. Mit dem Stockpunkt bei -54°C ist er bei -35°C schon relativ flüssig und lässt sich durch die Schmierstoffpumpe bereits umwälzen, während im hohen Temperaturbereich eine geringe, wenn auch gerade noch ausreichende Viskosität vorhanden ist.

Der Schmierstoff nach MIL-PRF-7808 zeigt im hohen Temperaturbereich keine ausreichende Viskosität mehr. Somit ist dieser Schmierstoff nur bei Getriebeöltemperaturen unter 80°C verwendbar. Bei großen Außentemperaturen wird dieser Temperaturbereich leicht überschritten. Die ursprünglich geplante Zulassung für diesen Schmierstoff wurde nie umgesetzt.

Der mineralische Schmierstoff nach MIL-PRF-6086, Medium Grade, zeigt bei hohen Temperaturbereichen eine gute Viskosität, die deutlich über der Viskosität des synthetischen Schmierstoffs MIL-PRF-23699 liegt. Dies ist vorteilhaft für den hoch belasteten Zahneingriff, da dann eine ausreichende Schmierfilmdicke den Zahnkontakt schützt. Bei tiefen Temperaturen ist der Einsatz des Schmierstoffs nicht optimal, da durch den Stockpunkt bei -29°C keine ausreichende Umwälzung des Schmierstoffs gegeben ist. Ein Wechsel des Schmierstoffs je nach Betriebsbedingungen ist vom Betreiber als auch vom Hersteller jedoch nicht erwünscht.

Lösung bietet hier ein synthetischer Schmierstoff mit einem höheren Viskositätsindex (VI), der eine geringere Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur bietet. Ein solcher Schmierstoff wäre z.B. ein ATF (Automatic transmission fluid) welcher bei hohen Temperaturen die Viskosität des mineralischen Schmierstoffs MIL-PRF-6086 aufweist und bei tiefen Temperaturen noch genauso flüssig wie der Schmierstoff MIL-PRF-23699 ist.

3.1.2. Schmierzustand

Für eine gute Schmierung von Verzahnungen oder Lagern im Wälzkontakt ist im Wesentlichen der Schmierfilm entscheidend. Betrachtet man den Schmierfilm in Relation zur Oberflächenrauheit der Wälzpartner spricht man von der relativen Schmierfilmdicke λ . Je nach Definition und Bauteil spricht man bei kleinen relativen Schmierfilmdicken $\lambda < 0,7$ von Grenz- oder Festkörperreibung, zwischen $0,7 < \lambda < 2$ von Mischreibung und für $\lambda > 2$ von elasto-hydrodynamischer (EHD) Reibung [9].

Diese Schmierzustände sind somit abhängig von der Oberflächenrauheit, welche aufgrund der Herstellbarkeit begrenzt ist, und von der absoluten Schmierfilmdicke h .

Nach Dowson-Higginson [11] ist die Schmierfilmdicke h abhängig von den lokalen Betriebsbedingungen wie Temperatur, Gleitgeschwindigkeit und Belastung der Reibpartner im Kontakt.

Die Beanspruchung der Zahnflanken wird durch die Kombination von Normalspannung und Schubspannung bestimmt. Die Normalspannung wird im wesentlichen durch die zu übertragende Last der Reibpartner erzeugt, während die Schubspannung aus der Reibkraft im Kontakt erzeugt wird. Diese ist abhängig von der Normalspannung und der Reibungszahl im Zahnkontakt. Durch einen Schmierstoff mit geringer Reibungszahl wird somit direkt die Beanspruchung der Reibpartner reduziert. In **Bild 3** ist die Reibungszahl für die verschiedenen Reibungszustände gezeigt.

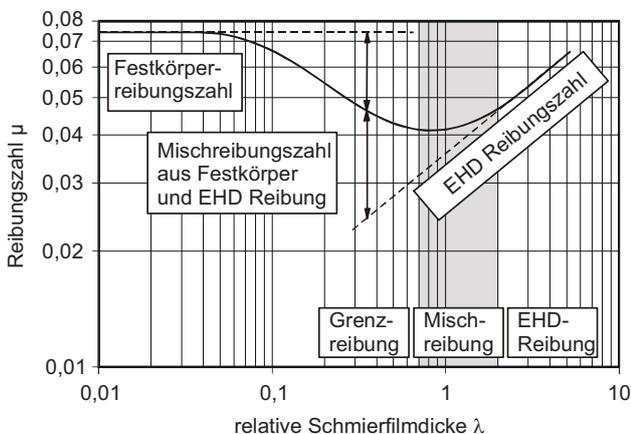


BILD 3. Mittlere Reibungszahl in Abhängigkeit der Schmierfilmdicke in den Bereichen der Festkörper-, Misch- und EHD-Reibung nach [10].

Ein optimaler EHD Schmierfilm schützt vor Getriebebeschäden. Jedoch kann nicht für alle Betriebsbedingungen ein ausreichender EHD Schmierfilm erzeugt werden. Für diese Betriebsbedingungen im Misch- und Grenzreibungsgebiet kann der Schmierstoff mit den Eigenschaften des Grundöls und auch des Additivpakets optimiert werden. Der Nachweis für die Funktion der ausreichenden Schmierung muss in einer Vielzahl von Tests erbracht werden.

Bei ungenügender Schmierung kann es zu Verzahnungsschäden kommen, exemplarisch sind hier die Schadensarten Grauflecken und Pitting (**Bild 4**) oder Fressen (**Bild 5**) gezeigt.

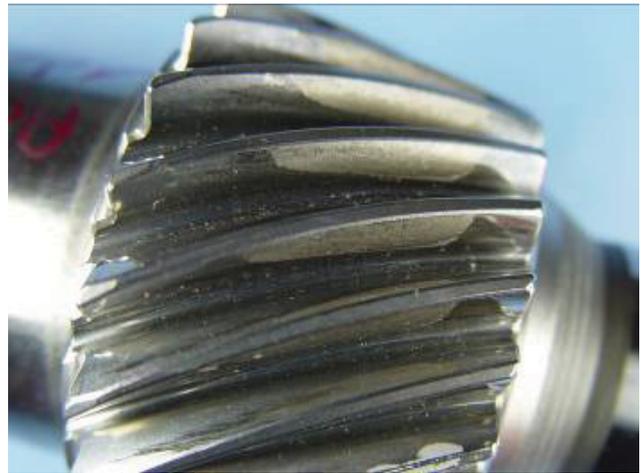


BILD 4. Graufleckenschaden an einem Zahnrad mit beginnenden Pitting im Zahnfuß

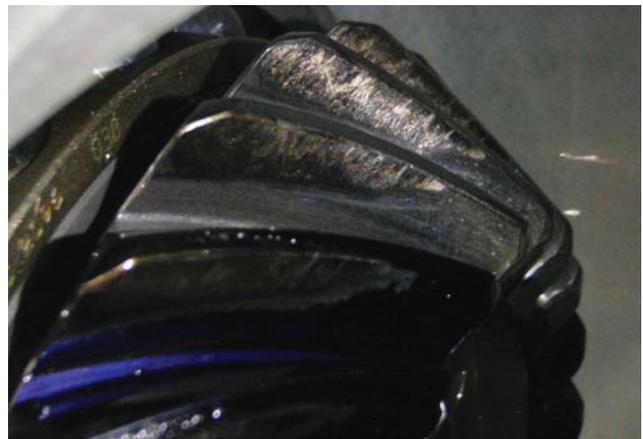


BILD 5. Schadensart Fressen an einem Zahnrad

3.1.3. Verträglichkeit

Die Eigenschaften der Schmierstoffe müssen so gewählt werden, dass sie alle anderen Funktionen des Getriebes erfüllen. Speziell muss auf eine ausreichende Verträglichkeit mit anderen Stoffen geachtet werden, so z.B. die Verträglichkeit mit Dichtungen, Lacken und Kunststoffen von Sensoren sowie die Verträglichkeit mit Montagemitteln. Auch außerhalb des Getriebes sollte eine Leckage nicht zu weiteren Schäden führen.

Technisch interessant ist auch die Funktion des Freilaufs, der die Getriebe vom Triebwerk abkoppelt, sollte dieses ausfallen. Im Hubschrauber werden üblicherweise reibschlüssige Freiläufe verwendet und diese sind daher, im Gegensatz zu den Verzahnungen, eher auf eine geringe Schmierfilmdicke und eine hohe Reibungszahl ausgelegt.

3.1.4. Schmierkreislauf

Der Schmierkreislauf (siehe **Bild 6**) eines Hauptgetriebes ist auf die Viskosität des Schmierstoffs abgestimmt. Die Durchmesser der Öldüsen, die Querschnitte der Ölleitungen und die Daten der Pumpe sind auf den Schmierstoff zugeschnitten, bei einem Wechsel des Schmierstoffs ist hier auf Kompatibilität zu achten.

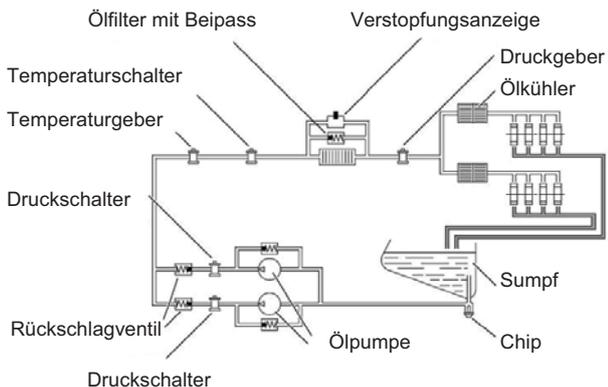


BILD 6. Schmierstoffkreislauf des Getriebes FS108 mit Ölpumpe, Ölkäneren und Ölfilter

Unter Umständen muss der Filter bzw. die Filtrierleistung oder der Öffnungsdruck der Bypassfunktion an die speziellen Eigenschaften wie Viskosität des Schmierstoffes angepasst werden.

3.2. Kundenerwartungen

Der Kunde ist nicht an den technischen Details eines Schmierstoffes interessiert, er erwartet eine technisch gereifte Lösung, dies gepaart mit der einfachen Verfügbarkeit für einen adäquaten Preis.

Als Referenz für den Preis und die Verfügbarkeit wird oft der Schmierstoff nach MIL-PRF-23699 herangezogen. Dieser Schmierstoff ist aufgrund des Einsatzes in Triebwerken sehr weit verbreitet und nahezu überall auf der Welt zu einem akzeptablen Preis zu beziehen. Jede Alternative zu diesem Schmierstoff muss somit den Kunden auch in anderen technischen Kriterien Vorteile bringen um damit eine Akzeptanz zu erreichen.

Eine Möglichkeit ist die Erhöhung der Ölwechselintervalle, die zum einen direkt die Kosten je Flugstunde, aber natürlich auch den direkten Wartungsaufwand reduziert.

3.3. Luftfahrtvorschriften

Die Vorschriften der Behörde lassen sich in zwei Richtungen unterscheiden. Zum einen muss der Schmierstoff seine technische Verwendbarkeit im Einklang mit den Zulassungsvorschriften wie der CS/FAR 27/29 [12, 13] nachweisen. Andererseits ist die Herstellung und der Weg des Schmierstoffes vom Hersteller zum Kunden durch die Regelungen für Verbrauchsstoffe im Luftfahrtbereich festgelegt. Die Einhaltung der Lagervorschriften muss auf der gesamten Lieferkette nachgewiesen werden. Durch adäquate Maßnahmen muss die Qualitätskontrolle die Konstanz der Eigenschaften des Schmierstoffes über die Jahre und Jahrzehnte der Benutzung zeigen.

4. NACHWEISE

4.1. Entwicklungstests

Schmierstoffe, die die oben genannten Kriterien erfüllen, müssen einer Vielzahl von Tests unterzogen werden, so

z.B. verschiedenen Labor- und Modelltests zum Nachweis ausreichender Eigenschaften gegenüber bekannten Schadensarten wie Verschleiß, Grauflecken, Grübchen oder Fressen von Verzahnungen und Lagern in den Getrieben. Hier werden gerne Verspannungsprüfstände verwendet, für welche zum Teil genormte Testverfahren für diese Schadensarten existieren. Spezielle Rechenverfahren bieten Möglichkeiten zur Übertragung auf die Anwendung.

Bei der grundlegenden Untersuchung werden gerne Modellprüfstände wie z.B. ein Zwei-Scheiben-Prüfstand (ZSP, vgl. Bild 7) verwendet. Im ZSP können unter fest definierten Betriebsbedingungen Messungen der Schmierfilmdicke durchgeführt werden.

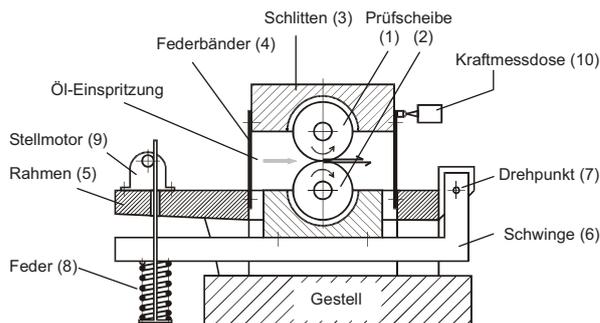


BILD 7. Zwei-Scheibenprüfstand zur Prüfung des Reibungskontakts mit definierten Gleitgeschwindigkeiten, Temperaturen und Pressungen

Für die praktische Anwendung werden jedoch besser praxisnähere Testmethoden verwendet, wie z.B. mit speziellen Lagerprüfmethode oder dem FZG-Verspannungsprüfstand (Bild 8) für Verzahnungen.

Für den FZG-Verspannungsprüfstand sind viele Testverfahren etabliert, wie der Grauflecken-test, der Grübchen-(Pitting-), oder der Freßtest. Mit diesen Methoden kann die Tragfähigkeit von verschiedenen Schmierstoffen bewertet und verglichen werden. Die normierten Verfahren erlauben auch den Vergleich von Ergebnissen aus unterschiedlichen Laboren. Für gängige Schmierstoffe liegen diese Ergebnisse meist bei den Herstellern vor.

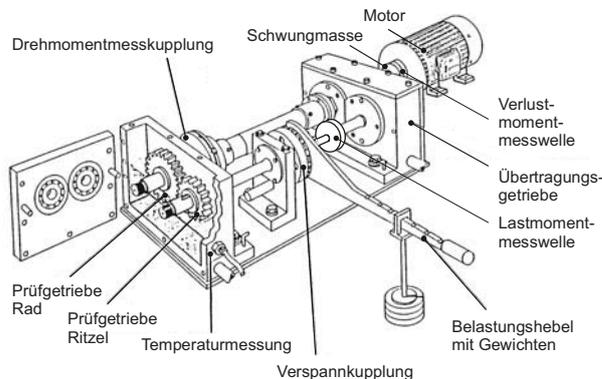


BILD 8. FZG-Zahnradverspannungsprüfstand zur Bestimmung von Schmierstoffparametern im Zahnkontakt [14]

4.2. Berechnungsverfahren

Zur Berechnung der Tragfähigkeit von Verzahnungen oder Getrieben können genormte Verfahren verwendet werden. Für Lager gilt das Verfahren nach ISO 281 mit entsprechender Erweiterung durch den Schmierstofffaktor a_0 .

Für Verzahnungen gelten die Verfahren nach AGMA oder DIN 3990 (Stirnräder) oder DIN 3991 (Kegelräder).

Der Nachweis für die Tragfähigkeit von verschiedenen Schadensarten ist jedoch besser mit Hilfe der Versuche durchzuführen. Ein großer Vorteil der Versuche und Ergebnisse von den FZG-Verspannungsprüfständen ist die Möglichkeit der rechnerischen Übertragung der Ergebnisse mit Hilfe der normierten Berechnungsverfahren. Die Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. bietet hier eine Vielzahl von Rechenprogrammen für die Übertragung auf die Anwendung (Bild 9).

Die Ergebnisse im Wirkungsgradtest lassen sich durch entsprechende Rechenverfahren auf die Anwendung übertragen. Als Beispiel ist ein Ergebnis der Wirkungsgradberechnung von einem Vergleich eines Getriebes mit Hilfe der Ergebnisse aus dem Wirkungsgradprüfstand gezeigt (Bild 10).

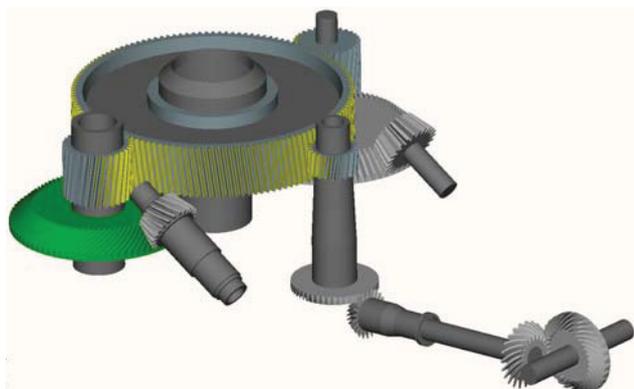


BILD 9. Bild der Eingabemaske des Berechnungsprogramms Workbench [15] der FVA: Definition Hubschrauberantriebssystem

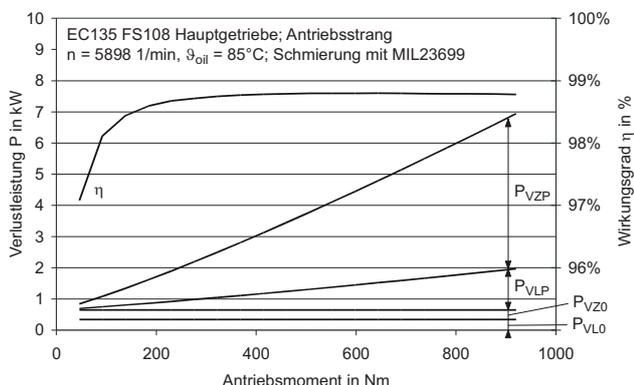


BILD 10. Berechnung des Wirkungsgrads des Hubschraubergetriebes FS108 in Abhängigkeit des Antriebsmoments [16].

4.3. Zulassungstests

Nach den Tests im Labor bzw. in den praxisnahen Prüfständen ist ein Test im realen Hubschraubergetriebe vorgeschrieben. Hierzu sind nach FAR/CS 29 „large Rotorcraft“ [13] im § 29.923 p 3 Zyklen im Testprogramm nach dem § 29.923 vorgeschrieben. Bei der Zulassung sollte dieser Versuch in der „Tie Down“-Konfiguration durchgeführt werden, eine Vorprüfung im Hauptgetriebeprüfstand ist jedoch zu empfehlen, und für spezielle Betriebsbedingungen notwendig.

Die Zyklen nach § 29.923 sind in Bild 11 zu erkennen. Die genau definierten Betriebsbedingungen nach §29.923 müssen bei maximaler Temperatur und minimalem Öl-druck durchfahren werden. Hierbei werden die wesentlichen Betriebsbedingungen wie 3 Stunden Lauf bei den Betriebspunkten AEO MCP, 6 Anwendungen bei AEO TOP, aber auch OEI Fälle und Brems- und Kupplungsvorgänge simuliert.

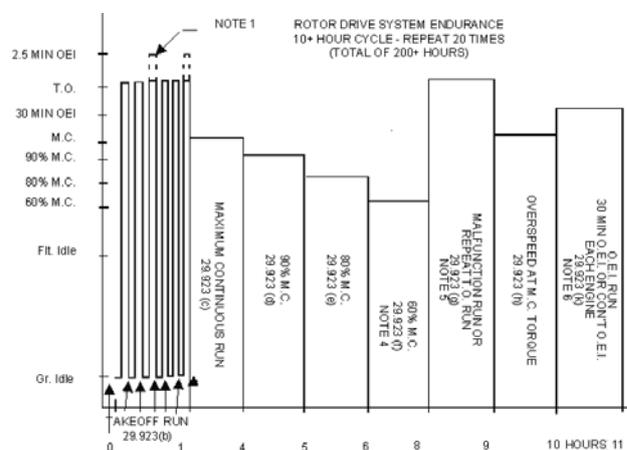


BILD 11. Spektrum für „Drive System and Control mechanism Test“ für die Zulassung nach FAR AC § 29.293 [17]

5. ZUSAMMENFASSUNG

Technisch optimierte Schmierstoffe bieten Potential für weitere Leistungserhöhungen oder eine Verlängerung der Überholzeiten von Getrieben. Auch sekundäre Ziele wie ein optimierter Wirkungsgrad [3] oder eine spezielle Umweltverträglichkeit können angestrebt werden. Für den Kunden können optimierte Schmierstoffe spezielle Vorteile durch niedrige Wartungskosten und höhere Leistungsdaten des Hubschraubers bieten.

Die Zulassung eines neuen Schmierstoffs erfordert eine Vielzahl von Tests und Nachweisen, die im Rahmen der Zulassung erbracht werden müssen. Für die Anwendung im Hubschraubergetriebe bietet es sich an, auf bestehende Schmierstoffe zurückzugreifen, da für diese meist wesentliche Daten aus Lager- oder Verzahnungsprüfläufen zur Verfügung stehen. Ein wesentlicher Aspekt ist auch die Verträglichkeit mit anderen Stoffen wie Dichtungen, Lacke und Sensoren, die für das Schmier-system notwendig ist.

Neben den technischen Herausforderungen, gilt es aber auch die Anforderungen der Kunden auf Verfügbarkeit und Wartungskosten sowie der Anforderungen der Luftfahrtbehörden auf eine sichere und eingefrorene Formulierung zu erfüllen.

Wird dies konsequent umgesetzt, kann ein solcher Schmierstoff zur Leistungserhöhung eines Hubschraubers (wie bei der EC135 T2i/P2i) oder zur Erhöhung der Überholzeiten des Getriebes (wie bei der EC135 T1/2 P1/2) beitragen.

6. ABKÜRZUNGEN

AEO	All Engines Operative
AGMA	American Gear Manufacturer Association
ATF	Automatic Transmission Fluid
CS	Certification Specification
DIN	Deutsches Institut für Normung
DoD	Department of Defense
EHD	Elastohydrodynamisch
EP	Extreme Pressure
FAR	Federal Aviation Regulation
FVA	Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.
FZG	Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau
MCP	Maximum Continuous Power
MIL	United States Military Standard
OEI	One Engine Inoperative
PAO	Polyalphaolefine
TBO	Time Between Overhaul
TOP	Take off Power
VG	Viskositätsklasse
VI	Viskositätsindex
ZSP	Zwei-Scheiben-Prüfstand
ZVP	Zahnradverspannungsprüfstand

7. SCHRIFTTUM

- [1] MIL-PRF-23699: Performance Specification, Lubricating oil, Aircraft turbine engine, Synthetic base, NATO Code O-156
- [2] Eurocopter EC135: Master Serviceing Manual (MSM)
- [3] Shell Aviation: The AeroShell Book, Edition 18, 2003
- [4] MIL-PRF-7808: Performance Specification, Lubricating oil, Aircraft turbine engine, Synthetic base
- [5] MIL-PRF-6086:; Lubricating Oil, Gear, Petroleum Base, Grade L, Grade M
- [6] Sikorsky S76C: Airworthiness limitations and inspection Requirements
- [7] Orkin, Curis; Gustafson, Milton: K-MAX intermeshing rotor drive system, American Helicopter Society, Annual Forum, Virginia Beach, 1997
- [8] MD Helicopter Service Bulletin: Replacement of Mobil SHC 626 with Mobil AGL, 20.07.2011
- [9] Niemann, G. und Winter, H.: Maschinenelemente Band 2. Springer, Berlin 1985.
- [10] Doleschel, A.: Wirkungsgradberechnung von Zahnradgetrieben in Abhängigkeit vom Schmierstoff, Dissertation TU München, 2003
- [11] Dowson, D., Higginson, G.: Elasto-Hydrodynamic Lubrication, Pergamon Press, Oxford, 1977
- [12] CS 27; EASA: Certification Specification for small rotorcraft.
- [13] CS 29 EASA: Certification Specification for large rotorcraft.
- [14] DIN 51354: FZG-Zahnrad-Verspannungsprüf-

maschine, 1990.

- [15] Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.: Benutzeranleitung FVA Workbench, 2011
- [16] Doleschel, A.: Wirkungsgradberechnung bei Hubschraubergetrieben in Abhängigkeit des Schmierstoffs, DGLR Jahrestagung 2003
- [17] FAR 29 AC: Advisory Circular