

# Aus der Instandhaltungspraxis: "Lead Fouling" auch heute noch ein Thema



Holger Dachsel

## Abstract

Bei der Überholung von Kolbentriebwerken treten hin und wieder besondere Schadensbefunde auf: Ein Auslassventil zeigte massiven Korrosionsangriff im Übergangsbereich von Ventiltulpe und Schaft. Im Rahmen der Schadensuntersuchung konnte massive Bleikorrosion ermittelt werden!

*Massiver Korrosionsschaden am Auslassventil – Bestimmung des Schadensmechanismus – Kraftstoff – Betriebseinfluss – Möglichkeiten zur Analyse für Sachverständige*

## 1. Einleitung

Bei der Demontage der Kolbenflugtriebwerke finden sich hin und wieder sehr auffällige Befunde, so auch in diesem Fall: Der untere Schaftbereich eines Auslassventils zeigte massive Schädigung mit einer deutlich sichtbaren Querschnittsverringering und extrem rauher, dunkelgrau gefärbter Oberfläche.

Das befundete Ventil wurde aus einem Hauptantrieb Continental TSIO-520 C, einem Sechs-Zylinder-Boxermotor mit Einspritzung und Turbolader im Rahmen der Motorinstandsetzung, ausgebaut. Es handelt sich um ein Bauteil des OEM Continental (USA) mit der Partnummer P/N 655771. Dieser Ventiltyp ist ohne Natriumkernkühlung ausgelegt, die nur bei thermisch besonders belasteten Triebwerkstypen zum Einsatz kommt.

Der Flugzeugbetreiber, der die Zylinderüberholung durch einen Unterauftrag einer Luftwerft veranlasst hat, setzt das Flugzeug für das Absetzen von Fallschirmspringern ein.

Nach Erfahrungen des Hauses Dachsel zum Zustand des Auslassventilsystems bei diesem Motortyp gilt als typischer Ausbau- und Verschrottungsgrund der Verschleiß der Lauffbuchsen. Diese werden häufig außerhalb der für den Wiedereinbau zugelassenen Maße vorgefunden. Die Schadensquote bei Ventilen mit Korrosion im Ventilschaftbereich ist aktuell mit unter 2% ein außergewöhnlicher Befund. Einige der



Abb 1: (a) Schadbauteil im ausgebauten Zustand, (b) Kritischer Oberflächenzustand im Übergangsbereich zum Schaft (rechts)

Zylinder von genau diesem Motor mussten bis zum heutigen Tage schon mehrmals auf Grund des gleichen Schadenbildes an den Auslassventilen erneut instandgesetzt werden.

## 2. Bauteilbefund mit Laboruntersuchung

Um die massive lokale Schädigung des Auslassventils näher zu charakterisieren und nach Möglichkeit den Schadensmechanismus zu identifizieren, wurde eine genauere Analyse des Bauteils zusammen mit dem Schadensuntersuchungslabor bei der Zentralen Werkstofftechnik der Lufthansa Technik AG in Hamburg HAM TQ/M durchgeführt. Nach der standardmäßigen Befundung während der Triebwerksdemontage wurden in der labortechnischen Untersuchung folgende Analysen zusätzlich eingesetzt:

- Metallographische Analysen, unter anderem Oberflächenanalysen im Querschliff
- Rasterelektronenmikroskopie (REM) für Oberflächenstruktur
- REM/EDX zur Klärung der Zusammensetzung von Bauteil und Korrosionsprodukten

In der Untersuchung ergaben sich folgende relevante Befunde:

1. Das auffällige makroskopische Schadensmerkmal ist eine **signifikante Durchmesserverringering des Auslassventils**

besonders im **Übergang von der Ventiltulpe zum Ventilschaft aufgrund von Materialverlusten**. Dies geht mit **Dunkelfärbung des Ventiltulpen- und -bodenbereichs** einher. Die Schädigung ist **am Übergang von Ventiltulpe in den Ventilschaft besonders ausgeprägt**, einem Bereich, in dem der Abgasstrom eine starke Umlenkung erfährt.

2. Der **Ventilschaft selbst**, der weitgehend durch die Führungsbuchse und Ölfilm vor der Abgasumströmung geschützt ist, zeigt **nahezu keinen Angriff**.

3. Die anthrazitfarbene bis schwarze Oberflächenstruktur im **Schadbereich (Ventilkegel) scheint ausgeprägt porös und schwammartig**.

4. Im labortechnisch aufbereiteten Querschliff des Ventil-Schadbereiches ergibt die EDX Analyse zur Bestimmung der elementaren Zusammensetzung des Werkstoffs:

- a. Normzusammensetzung im Kernbereich: Der Strukturwerkstoff des Ventils liegt innerhalb der Spezifikation des Nickelbasiswerkstoffs *Nimonic 80*
- b. **Massive Bleibelegung** mit Bromanreicherungen auf dem verbleibenden Bauteil
- c. Eine Nickel-Verarmung in der Chromreichen Randschicht
- d. Durchbrochene Oxidschicht
- e. Brom-Anreicherung auf der Belagschicht

5. **Kornvergrößerung des Grundwerkstoffs** im oberflächennahen Bereich im Vergleich zu Bauteilkern

6. Befund-Hinweise auf Korngrenzenangriff mit Spannungsrisskorrosion / **SCC (Stress Corrosion Cracking) mit signifikantem Interkristallinen Anriß** Im Übergang zum Schaftbereich.

Diese Befunde sind in den Bildern 1 bis 5 im Detail dargestellt und dokumentiert



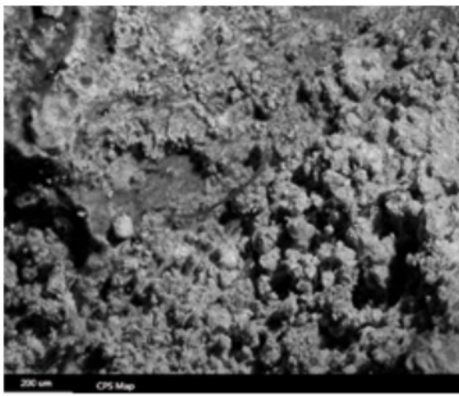


Abb 2a: REM Aufnahme der Oberflächenstruktur im Schadensbereich

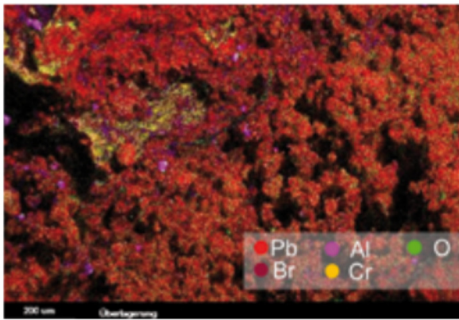


Abb 2b: Gleiche REM Aufnahme mit EDX Mapping, massive Blei-Brom-Belegung ausweisend

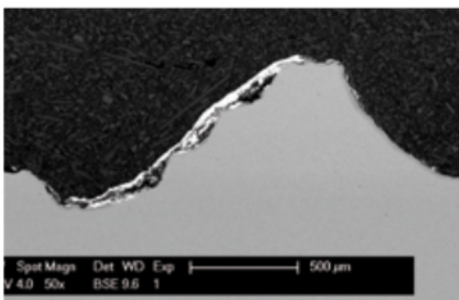


Abb 3: Massive Bleibelegung besonders auf der Anströmseite nach bereits fortgeschrittenem Materialabtrag (weiß erkennbarer Belag: Blei)

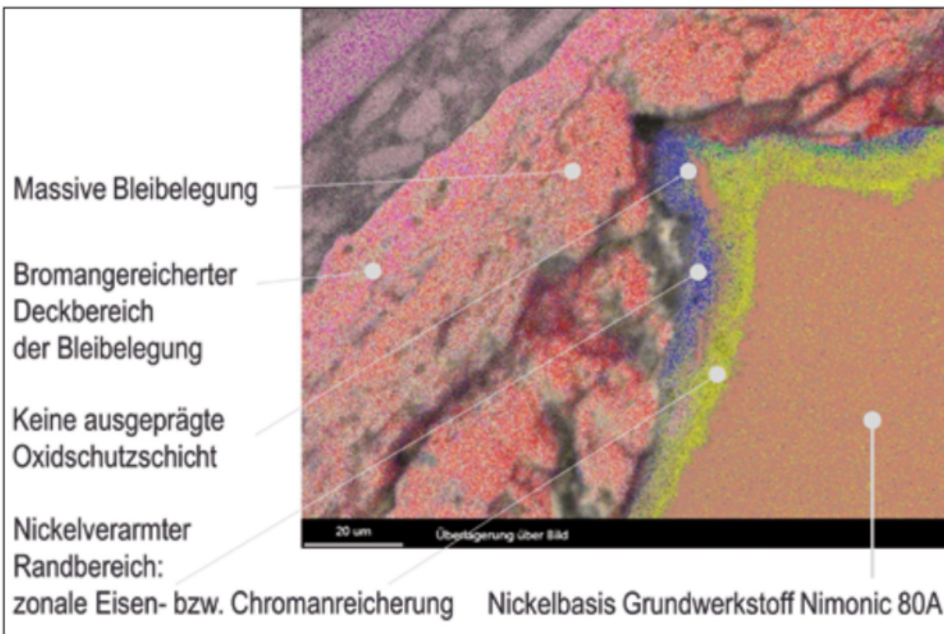


Abb 4: Details des fortgeschrittenen Angriffs durch Bleikorrosion mit Grundwerkstoffverarmung nach Auflösung der oxidischen Schutzschicht

### 3 Schadensrelevante Wirkmechanismen

Das Schadensbild und der Schadensmechanismus lassen sich wie folgt klären:

#### 3.1 Bleiadditive zur Erhöhung der Klopfestigkeit

Die gefundenen Ablagerungen auf Bleibasis haben ihren Ursprung in der Kraftstoff-Additivierung. In der Infobox sind die wichtigsten Fakten zur Funktionsweise der hier relevanten Additive als Hintergrundinformation zusammengefasst.

#### 3.2 Werkstoffstrategien

Grundsätzlich sind Kraftstoffe mit Bleiadditiven als Ursache für Korrosionsprozesse im Brennraum und gesamten Abgaskanal – schon seit Einführung der Bleiadditive zur Steigerung der Kraftstoff-Klopfestigkeit und Verbesserung der Ventil Sitzschmierung – in den 1920 und 30ern lange bekannt (z.B. [1,7]). Verschiedene Optionen in der Verbesserung der Ventil-Werkstoffe zur Kompatibilität mit Bleiablagerungen wurden seitdem bei der Weiterentwicklung von Ottokolbenmotoren nicht nur für Flugmotoren entwickelt. Schon in den 1950er wurden sowohl Weiterentwicklungen der Grundwerkstoffe von Ventil im Bereich höherfester Stähle bis hin zu Nickelbasislegierungen als auch Beschichtungen der Ventiltulpenoberfläche als Schutz gegen Bleikorrosion untersucht [1]. Konkret haben die Triebwerkshersteller generell bei der Entwicklung mittels verbesserten Werkstoffsystemen im Verbrennungs- und Abgassystem und u.a. darauf reagiert. Der gegenständli-

che Motor war mit verbesserten Ventilen aus Nickelbasiswerkstoffen *Nimonic 80A* anstelle der Vorgängervarianten ausgestattet (hier beispielsweise [2]).

#### - Info Box -

##### Refresher: Klopfestigkeit durch Blei im Kraftstoff

Beim „Klopfen“ von Otto-Kolbentriebwerken entzündet sich das im Zylinder befindliche Kraftstoff-Luft-Gemisch im Anschluss an die von der Zündkerze ausgelöste Verbrennung im restlichen Verbrennungsraum von selbst durch die beim Verdichtungshub entstehende Wärme. Auch durch besonders heiße Stellen im Brennraum kann die Zündung erfolgen, ohne auf den Zündfunken zu warten. Die Verbrennung folgt dabei nicht einem gesteuerten Flammenfront-Ablauf „weich“, sondern ist detonationsartig „hart“, häufig an mehreren Stellen gleichzeitig und plötzlich mit viel stärkerer thermischer und mechanischer Belastung des Triebwerks und führt zur Überlastung. [5] Es wurden daher Zusatzstoffe entwickelt, die die Klopfestigkeit erhöhen, ohne andere Eigenschaften des Kraftstoffes ungünstig zu verändern: TEL – Tetra Ethyl Lead bzw. Blei-Tetraäthyl, das bereits in geringsten Mengen die Klopfestigkeit sehr stark steigert. Die Wirkungsweise von TEL ist in ihrer Ultradynamik im Verbrennungsprozess nach wie vor nicht vollständig geklärt, wird jedoch im wesentlichen auf die Verzögerung der Flammfrontausbreitung durch Bildung von Bleioxid und Radikalen beim thermischen Zerfall der Bleiverbindungen zurückgeführt [5]. Die blei-oxidischen Verbindungen können sich über lange Betriebszeiträume des Motors hinweg auf den Brennraumwänden und auf den Komponenten in der Abgasführung ablagern [3].

Deshalb werden – typischerweise bei Bleigehalten von über 0,15 g/l – weiterhin Brom-Trägerstoffe wie Ethylen-Dibromid ( $C_2H_4Br_2$ ) als zusätzliches Additiv dem Kraftstoff hinzugefügt, das die Bleiverbindungen flüchtig halten und Ablagerungen so vermeiden soll [3, 4].

#### 3.3 Einfluß der Betriebsbedingungen

Obwohl es sich bei dem Untersuchungsgegenstand bereits um die verbesserte Post-SB-Partnummernvariante handelt, tritt dennoch eine außergewöhnlich starke Schädigung ein. Dies lässt sich auf das sehr besondere Flugprofil beim Betrieb des Flugzeugs mit dem untersuchungs-

» Fortsetzung auf Seite 12



gegenständlichen Bauteil zurückführen. Zwei besondere Betriebsprofile des Motors nehmen Einfluss auf die Genese des Schadensprofils:

I. Bei Betriebsbedingungen deutlich außerhalb eines durchschnittlichen Lastprofils zum Beispiel **bei sehr kaltem Leerlaufbetrieb** kommt es zu Störungen des Additivwirkungsverhaltens im Verbrennungsprozess:

- die Umsetzung des Bleiadditivs zur Steigerung der Kraftstoff-Klopffestigkeit TEL (Tetra Ethyl Lead bzw. Blei-Tetraäthyl) erfolgt unvollständig,
- Blei-oxidische Produkte aus dem Verbrennungsprozess lagern sich im Brennraum und Abgaskanal ab;
- Die Brom-Ethylen-Additive (Ethylen-Dibromide ( $C_2H_4Br_2$ ) (z.B. [1]) **vermögen dann in diesen vergleichsweise kalten Betriebsbedingungen nicht, komplett die angestrebten volatilen, gasförmigen Bleibromide aus den Oxiden zu bilden**, die im Regelfall den Austrag des Bleis sicherstellen würden [3,4].
- Es baut sich eine nicht flüchtige Blei-/Blei-bromidische Schicht an kälteren und umlenkungsintensiven Bereichen des Abgaskanals auf.

II. In heißen Betriebsphasen

- kommt es dann – nach lokaler **Auflösung der Oxidschutzschicht** – zu metallischem Kontakt von Nickel und Blei.
- Es bilden sich **niedrigschmelzende Ni-Pb-Phasen**, die dann **abgetragen werden können** und zu einer allmählichen Zersetzung des Abgasventils von der Oberfläche her führen.

Das Flugzeug wurde häufig für das Ab-

setzen von Fallschirmspringern genutzt. Damit ergibt sich für das Triebwerk ein **extremes Belastungsprofil** von langen **Vollastphasen im (missionsbedingt besonders steilen) Steigflug** und **Niedriglast- bzw. Leerlaufphasen im (missionsbedingt steilen) Sinkflug** in der nahen Umgebung des Flugplatzes und im Rollbetrieb vor und nach den Flugphasen. Die charakteristischen, einzelnen Einsatzmissionen sind außerdem kurz und haben **quasi keine nennenswerte mittlere Streckenflugphase mit konstanter mittelhoher Leistung** („cruise“-Phasen). Dabei wird das Ventil in der Steigphase überdurchschnittlich lange höchsten Abgastemperaturen ausgesetzt. Anschließend im Sinkflug kühlen das Triebwerk und damit die gasführenden Komponenten durch lange Betriebsphasen im leerlaufnahen Bereich mit minimaler Leistung besonders stark ab. **In diesen kalten Betriebsphasen ist der Austragungsmechanismus der Kraftstoffzusätze TEL und Bromethylen stark kompromittiert; die im Abgas enthaltene Substanzen kondensieren** und es kommt zur Ablagerung von **Bleioxid bzw. von Bleibromidresiduen** an den vergleichsweise kalten Wänden des Gaskanals im Abgassystem gerade an der strömungstechnisch empfindlicheren Umlenkung der Abgase im Ventiltulpenbereich.

Dieser Bereich der Ventiltulpe soll auslegungsseitig auch zuverlässig und gut gekühlt sein, um insgesamt das metallische Ventil mit ausreichender mechanischer Festigkeit betreiben zu können und auch die Ölschmierung des Ventilschafts betriebssicher zu gewährleisten. Zusätzlich kann in der Sinkflugphase durch mangelhaftes oder grenzwertiges Verarmen des Kraftstoffgemischs eine weitere Absenkung des Temperaturni-

veaus im thermodynamischen Zyklus hervorgerufen werden, die nochmals die Blei-Bromkondensat-Ablagerungen verstärkt. Die nicht nur kältere, sondern auch reichere Gemischkonstitution führt schließlich auch absolut mehr potentielle Ablagerungssubstanzen der angeströmten Ventiloberfläche zu.

Bei der nachfolgenden **Flugmission mit langem Vollaststeigflug** wird das Ventil **sehr heiß**. Dadurch ist die **Reaktivität der Ablagerungen mit dem Bauteilwerkstoff besonders hoch**: es kann verstärkt zu Wechselwirkung des Ventilwerkstoffs mit den Blei-Brom-Ablagerungen kommen:

- Die schützende Oxidschicht der Ventiloberfläche wird angegriffen, lokal gelöst und durchbrochen
- Die Metalle des Bauteils und der Ablagerungen kommen in direkten Kontakt und bilden niedrig schmelzende Nickel-Blei Basis Verbindungen, die volatil oder erosiv abgetragen werden. Durch die mechanische Stoßbelastung bei jedem Ventilschließprozess besteht die allmählich zunehmende Gefahr des interkristallinen Rissfortschritts bis zum Abriss des Ventilkegels

Durch die Aufräumung der Ventiloberfläche mit verstärktem Wärmeübergang und durch die Verminderung des kühlungswirksamen / Wärme abtransportierenden Restquerschnitts des Ventils beschleunigt sich die Schädigung nach dem Erstangriff zunehmend.

#### 4. Zusammenfassung und Empfehlungen

Zusammengefasst konnte bei der Befunderhebung verifiziert werden, dass

- der Strukturwerkstoff des Ventils in seiner Legierungszusammensetzung der Spezifikation des Nickelbasiswerkstoffs Nimonic 80 entspricht,
- der Ventilkegelbereich erheblichen korrosiven Schaden mit fortgeschrittener Geometrieänderung (Schaftquerschnittsverringerung) und oberflächennaher Werkstoffveränderung (Bleibelegung, Auflösung der schützenden Oxidschicht, Bildung niedrigschmelzender metallischer Phasen, oberflächennahe Verarmung von Grundwerkstoff-Legierungselementen), sowie einen ersten interkristallinen Anriss aufweist, der, falls sich ein Rissfortschritt einstellen würde, die Integrität der Ventiltulpe beeinträchtigen könnte.

Für das Auslassventil ist die besondere

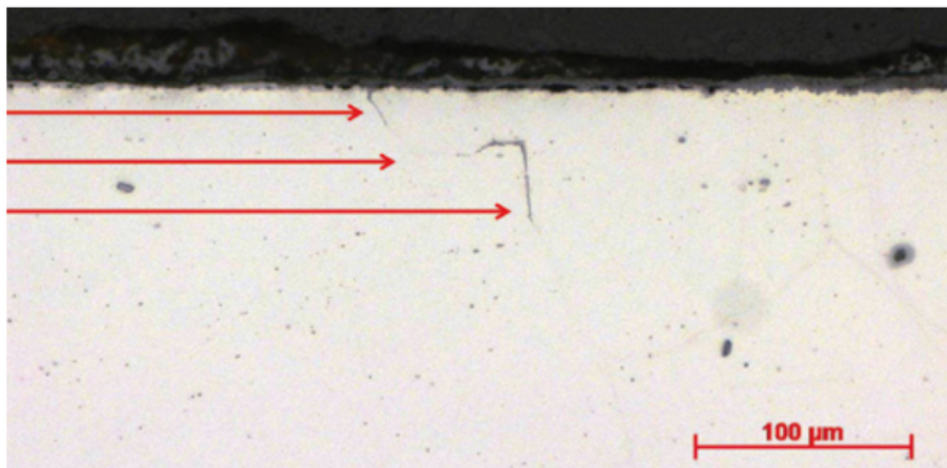


Abb 5: Interkristalliner Anriss des Ventils



## Abkürzungen und Definitionen

Abkürzung	Für	Kurzdefinition
EDX	Energie- dispersive Röntgenanalyse	Hochauflösende Analyse zur Bestimmung der Zusammensetzung aus chemischen Elementen
Leadfouling	-	Bleikorrosion „Blei-Verschmutzung“ mit funktionsstörender, hier korrosiver Auswirkung
OEM	Original Equipment Manufacturer	Ursprungshersteller, bzw. -lieferant eines Bauteils oder technischen Systems
P/N	Part number	Partnummer, Bauteiltypennummer
SB	Service Bulletin	Technische Herstellerempfehlung
SCC	Stress Corrosion Cracking	Spannungsrißkorrosion, Bestimmte kombinierte chemo-mechanische Korrosionsform
Ventilschaft	-	Führt das Ventil in Längsrichtung
Ventiltulpe	-	Geometrische Aufweitung vom Schaft zum Ventilsitz und -teller
Ventilsitz	-	Ringförmige Ventildichtzone
REM	Rasterelektronenmikroskop	Hochauflösendes Mikroskopieverfahren, in der Kombination mit EDX (s.o.) auch hochauflösende Substanzanalysen möglich
TEL	Tetra Ethyl Lead bzw. Blei-Tetraethyl	Blei-Träger-Additiv zur Steigerung der Klopffestigkeit

Ausprägung der Bauteilschädigung auf das besondere Einsatzprofil in einem Absetzflugzeug für Fallschirmspringer zurückzuführen, die durch extreme thermische Wechselbelastung zwischen Steig- und Sinkflug gekennzeichnet ist. Auch der Einsatz von verbesserten korrosionsresistenteren Werkstoffen wie beim Untersuchungsgegenstand kann diesen Degradationsmechanismus offensichtlich nicht komplett unterdrücken.

Es kann auf der Basis des Befundes und den Erkenntnissen aus dieser Untersuchung abgeleitet und empfohlen werden,

- lange Steigflugphasen handbuchgemäß – sofern möglich – nicht mit maximal zulässiger Vollast und bei möglichst intensiver Motorkühlung zur Vermeidung oder Minimierung extrem heißer Betriebsweisen durchzuführen,
- das Sinkflugmanagement handbuchgemäß mit Triebwerksleistungen deutlich oberhalb der Leerlaufleistung zu Vermeidung extrem kühler Betriebsweisen durchzuführen,
- die Anreicherung des Gemisch im Sinkflug handbuchgemäß möglichst spät zu beginnen, um extrem kühle Betriebsweisen zu vermeiden oder zu minimieren
- bei solchen besonderen Betriebsprofilen präventive Ventilinspektionen zum Beispiel durch Boroskopie in engeren Intervallen als luftrechtlich gefordert ergänzend vorzusehen.

## Literatur

1. Moore, D.G., Mason, M.A., Effectiveness of ceramic coatings in reducing corrosion of five heat-resistant alloys by lead-bromide vapors (National Advisory Committee for Aeronau-

tics/Technical Note 2380), 1951, Washington USA

2. Partnummerbezogene Service Bulletins (SBs): hier beispielhaft Continental SB M90-13 /Stem Corrosion, 16.07.1990, Teledyne Industries Inc)
3. The Swedish Transport Agency - Civil Aviation Department Jonas Bäckstrand Sakari Havbrandt ISSN 1400-5719 Report RL 2012:14e, Aircraft accident to SE-FMU at Kumla, Örebro county on 28 August 2011 Case L-92/11, 2011, Norrköping Sweden
4. Australian Transport Safety Bureau (ATSB), Aviation Safety Report 200002157 -Piper PA31-350 Chieftain VH-MZK Spencer Gulf SA, 2001, (Untersuchungsbericht der Australischen Luftfahrtbehörde)
5. Kahsnitz, R.: Das Mineralöltaschenbuch, 1964, Verlag J .Erberl KG, Immenstadt
6. Shell Internet, Lead Fouling (Shell): <http://www.shell.com/global/products-services/solutions-for-businesses/aviation/aeroshell/knowledge-centre/technical-talk/techart18-30071600.html> 2014 (Zugriff 07.09.2014)
7. Fa. Total, /N.N.: Kraftstoffe für die Allgemeine Luftfahrt heute und vielleicht morgen, Proc. 5. Konferenz für die allgemeine Luftfahrt, Schönhausen, 19.05.2014

## © Ko-Autoren

Dipl.-Luftfahrtsachverständige:

Holger Dachsel,  
Claus-Dieter Bäumer,  
Christian W. Siry

## © Fotos:

Holger Dachsel,  
Claus-Dieter Bäumer,  
Christian W. Siry

... Nur für Sie gehen wir in die Luft ...



**Heli Austria**  
www.heli-austria.at

**Heli Austria GmbH**  
A-5600 St. Johann im Pongau, Heliport  
Tel. +43 (0)6462 - 4200

**AIR WORK & Heliseilerei GmbH**  
www.air-work.com

**Helicopter External Sling Load**  
The next generation LongLine fitting

**HAI HELI-EXPO** EXPLORE. COMMIT. UNITE.

Join us in Louisville, Kentucky on booth 3006 (Mereo Swisshelicopter) from March 1 - 3



**A&H Equipment**  
Competence in ropes

CE EU MSD 2006/42/EC, EU PPE 89/686/EEC

CS 27/29/86, CH PCDS Part 21 PCA Ch.21.G.0022

ISO 9001:2008 SGS 32488

Produktzeichnung und Hardware by AIRWORK & Heliseilerei GmbH (HAI) © 2014  
EU Directive 2006/42/EC – EASA CS-27.865  
A&H EQU 03160204