

EROSIONSSCHUTZ IN TRIEBWERKSVERDICHTERN – EIN BEITRAG ZUR CO₂-REDUKTION

Dr. Thomas J. Uihlein, Thomas Brendel, Wolfgang Eichmann, Dr. Falko Heutling
MTU Aero Engines GmbH
München, D-80995
Germany

Zusammenfassung

Erosionsangriff insbesondere der Verdichterbeschauflung ist heute von zivilen und militärischen Anwendungen im Mittleren Osten, in Afghanistan oder in Ländern mit zunehmender Wüstenbildung ein bekanntes Phänomen. Der Metallabtrag an den Profilen von Lauf- und Leitschaufeln kann bei Hubschraubertriebwerken zu einer Limitierung der Laufzeit auf 80 bis 150h und bei zivilen Großtriebwerken zu ersten Shop Visits nach ca. 3.000h im Vergleich zu sonst mehr als 10.000h Laufzeit führen. Aber auch nichtfliegendes Gerät wie stationäre Gasturbinen, die häufig aus Flugtriebwerken abgeleitet sind, können in sand- und salzhaltigen Umgebungen einem massiven Angriff ausgesetzt sein.

Die Konsequenzen sind vielfältiger Art wie vorzeitige Verschrottung der Verdichterbeschauflung mit Kosten von bis zu 1 Mio. € für den vorzeitigen Shop Visit eines Großtriebwerks, enormer logistischer Aufwand für den Transport der geschädigten Triebwerke und Bereitstellung von Ersatztriebwerken oder evtl. sog. Inflight Shut Downs (Triebwerksabstellungen) bei Bruch der Schaufeln im Einsatz aufgrund reduzierter dynamischer Festigkeit nach Erosion.

Neben diesen offensichtlichen Schäden kommt es aber auch durch die geometrischen Veränderung der Verdichterbeschauflung zu Wirkungsgradeinbußen. Infolgedessen erhöht sich der Treibstoffverbrauch, wird die Belastung der Turbine gesteigert und über all diese Faktoren letztendlich auch der CO₂-Ausstoß.

Erste Abschätzungen zeigen, dass selbst unter normalen wenig sandbelasteten Bedingungen durch die Veränderung der Schaufelprofile über lange Zeiten und bei Annahme selbst von geringsten Veränderungen des Treibstoffverbrauchs im Zehntel-Bereich bei Langstreckeneinsätzen von Flugzeugen pro Jahr Tausende Liter von Kraftstoff und hunderte von Tonnen CO₂-Ausstoß eingespart werden können.

Um geometrische Veränderung der Schaufelprofile über lange Zeit zu verhindern wurden in den letzten Jahren bei MTU Multilayerschichten entwickelt, die mittels Gasphasenabscheidung in Schichtdicken von ca. 15 bis 20 µm auf die Beschauflung aufgetragen werden und aufgrund ihres komplexen Aufbaus mit Nanostrukturierung die vielfältigen Funktionsanforderungen im Triebwerk erfüllen können.

Die Eigenschaften wurden mittels ausgeklügelter Prüfverfahren ermittelt und die Schichten für erste zivile Anwendungen entwickelt und zum Erosionsschutz zugelassen. Mitte 2010 lagen über 15.000h positive Flugerfahrung vor und werden kontinuierlich erweitert.

Diese Multilayerschichten werden in Zukunft mit dem zunehmenden Einsatz von Hochwerteteilen wie Blisken (integrale Verdichterräder) und vor dem Hintergrund des „Emission Trading System“ ab 2012 und der Vorgabe der EU einer 10%-igen CO₂-Reduktion im Luftverkehr eine herausragende Rolle spielen.

1. EINLEITUNG

Viele der Wachstumsregionen des zivilen Flugverkehrs wie der Mittlere Osten, China oder Indien weisen Umgebungsbedingungen auf, die mit hoher Erosionsbelastung verbunden sind (BILD 1). Auf der anderen Seite werden in modernen Triebwerken zunehmend Hochwerteteile wie Bliske (Bladed Disk) bei steigenden Strömungsgeschwindigkeiten eingesetzt, um den Wirkungsgrad zu erhöhen. Der Schutz dieser Bauteile vor Erosionsangriff stellt daher eine wichtige Forderung dar, um die garantierten Lebensdauern einhalten zu können. Bei militärischen Anwendungen steht die Einsatzfähigkeit im Vordergrund. D.h. die verwendeten Triebwerke sollen unter den meist widrigen Umgebungsbedingungen mit Feldflugplätzen und sehr

hoher Sandbelastung über lange Zeiten betriebsfähig bleiben, da ein Wechsel der Triebwerke mit extrem hohem logistischen Aufwand verbunden ist. Ein durch Erosion hervorgerufener Leistungsverlust, der bei sehr starker Erosionsbelastung, wie sie z. B. auf nicht präparierten Flugfeldern auftreten kann, in kürzester Zeit durch Start und Landung erfolgt, kann den Handlungsspielraum eines militärischen Einsatzes einschränken.

Neben diesen Extrembeanspruchungen kommt es auch unter normalen Bedingungen - jedoch über lange Zeiten - zu einer schlechenden Veränderung der Profile der Beschauflung durch in geringer Konzentration in der Luft enthaltene Schmutzpartikel. Dieser Verschleiß führt zu aerodynamischen Verschlechterungen, abnehmendem Wirkungsgrad und zunehmendem spezifischen

Treibstoffverbrauch und CO₂-Emissionen.

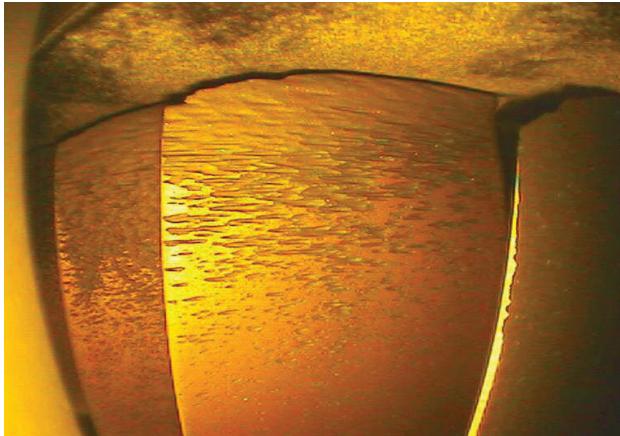


BILD 1. Laufschaufel mit massivem Erosionsangriff nach Einsatz im Mittleren Osten

Letztere Punkte gewinnen vor dem Hintergrund kontinuierlich steigender Erdölpreise (BILD 2) und der zukünftigen finanziellen Belastung der Airlines aus dem „Emission Trading System“ eine zunehmende Bedeutung.

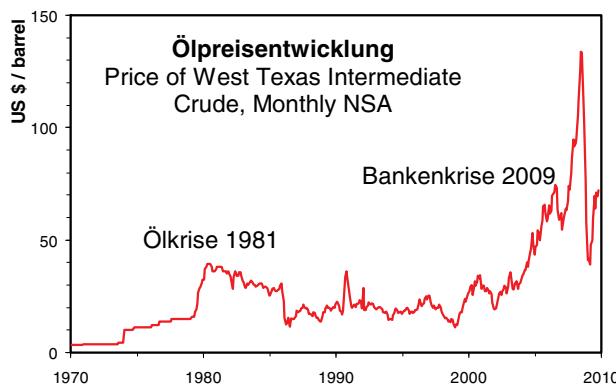


BILD 2. Zeitliche Entwicklung des Erdölpreises

Alle diese Anforderungen können mit geeigneten Erosionsschutzbeschichtungen der Verdichterbeschauflung erreicht werden, die unter massiver Belastung von Sand, Eis und Steinchen und bei extrem geringen Schichtdicken ihre Funktion über lange Zeiten erfüllen. Zusätzlich können bei Helikoptertriebwerken Partikelseparatoren eingesetzt werden. Diese filtern jedoch nur große Sandpartikel, reduzieren den Wirkungsgrad, erhöhen das Abfluggewicht und müssen geöffnet werden, wenn die Mission volle Leistung verlangt.

2. EROSIONSANGRIFF IM VERDICHTER

Der Erosionsangriff im Verdichter wird von einer Reihe von Faktoren wie dem Ort der Aufhängung des Triebwerks an der Zelle, dem Vermögen des Triebwerks eingesaugte Partikel vor dem Kerntriebwerk zu separieren, der Erosionslast aufgrund des Verdichtungsverhältnisses des Fans oder z.B. der geometrischen Ausprägung der Beschauflung bestimmt.

2.1 Erosionsbild

Das Erosionsbild (BILD 3) der Beschauflung eines großen zivilen Verdichters ist von einigen typischen Merkmalen geprägt:

- Laufschaufeln werden aufgrund der Zentrifugalkräfte vor allem in der äußeren Hälfte erodiert.
- Die Druckseite wird deutlich mehr als die Saugseite beansprucht.
- Die vorderen Stufen weisen meist eine höhere Rauigkeit als die hinteren auf.
- Die Eintrittskante wird unter großen Winkeln durch größere Partikel geschädigt. Die Partikel zerbrechen und treffen auf die nachfolgenden Stufen auf.
- Die Austrittskante und Blattflächen werden durch kleinere Partikel unter kleineren Winkeln abgetragen.
- Leitschaufeln werden vor allem im Übergangsbereich Deckband zu Filetradius Schaufelblatt beansprucht.

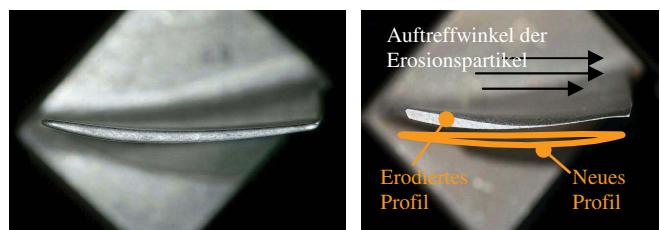


BILD 3. Blick auf die Schaufel spitze eines neuen und eines erodierten Profils. Materialverlust in Blattmitte und an der Austrittskante

2.2 Einflussfaktoren auf Erosion

Je nach Material der Beschauflung aus Titan-, Stahl- oder Nickellegierungen kommt es zu stärkerem oder schwächerem Abtrag (TAB 1).

	kleine Winkel	große Winkel
Weiche Metalle	stärkerer Abtrag abrasiver Abtrag	geringerer Abtrag Einbettung Strahlpartikel
Harte Metalle	geringerer Abtrag	rasche Zerrüttung

TAB 1. Abtragsverhalten Metalle

Bei weichen Metallen wie Aluminium, Magnesium und Titan liegt der maximale Abtragswinkel zwischen 20° und 30° und bei harten Metallen wie Stahl- und Nickellegierungen zwischen 30° und 50°.

Ein weiterer Einflussfaktor ist der Einsatzort und die Mission (BILD 4). Bei zivilen Verdichtern muss zwischen Kurz- (hohe Zyklenzahl und höhere Anzahl Starts und Landungen) und Langstreckeneinsatz unterschieden werden. Besonders gefährdet sind Fluggesellschaften, die häufig in sandiger und heißer Umgebung operieren, wo

Sandpartikel auch noch in größeren Höhen zu finden sind. Die Erosionsrate ist im Wesentlichen vom Zyklus Rollen auf dem Flughafen, Start, Flug in niedriger Höhe und Landung abhängig. D.h. die Anzahl von Starts und Landungen sind entscheidender als die absolute Zahl der Flugstunden.

Die Chemie der angesaugten Partikel bestimmt, ob Erosion, Korrosion oder Belagbildung stattfindet. Letztere entsteht durch schwefel- oder salzhaltige Bestandteile. Vulkanasche im pazifischen Raum wirkt bis zu viermal so abrasiv wie Quarzsand. CaCO_3 -Staub von Landebahnen oder Bautätigkeiten in der Nähe des Flughafens bewirkt verkrustete Beläge auf Schaufeln und anderen Teilen des Verdichters.



BILD 4. Landung auf einer Sandpiste

3 GRÜNDE FÜR EROSIONSSCHUTZ

Durch Erosionsangriff im Verdichter kann im Extremfall bei militärischen Helikoptertriebwerken bereits zwischen 80 und 150 h und bei zivilen Großtriebwerken nach ca. 3.000 h bis 4.500 h ein Tausch der Verdichterbeschaukelung notwendig werden. Dies bedeutet Wartungskosten für einen dreistufigen Bliskverdichter von ca. 200.000 US\$ oder bis zu 1.000.000 US\$ bei einem Großtriebwerk. Aber auch weniger aggressive Bedingungen können bei Kurzstreckeneinsatz zu einem Verschrottungsanteil der Laufschaufel - Beschaukelung von 10% und bei Langstreckeneinsatz von 5% und mehr durch Erosion führen.

Neben diesen mehr finanziellen und logistischen Auswirkungen, sind in einigen Fällen auch sogenannte Inflight Shut Downs (Abstellung des Triebwerks im Flug) zu verzeichnen, wenn Leitschaufeln durch Erosion so weit ausgedünnt werden, dass sie unter Schwingbelastung anfangen zu reißen und durch Bruch eines Schaufelblattes die nachfolgenden Schaufelreihen beschädigen.

Ein weiteres Argument für Erosionsschutz ist die Erhaltung einer möglichst glatten Schaufeloberfläche und geometrisch unveränderter Profile für gleichbleibend hohe aerodynamische Effizienz. Einen Eindruck vom Einfluss z. B. der Verkürzung der Sehnenlänge durch Erosion auf

den spezifischen Treibstoffverbrauch gibt BILD 5. Durch zunehmende Erosionsrate wird die Zyklenzahl bei der eine bestimmte Erhöhung des Treibstoffverbrauchs eintritt zunehmend verkürzt.

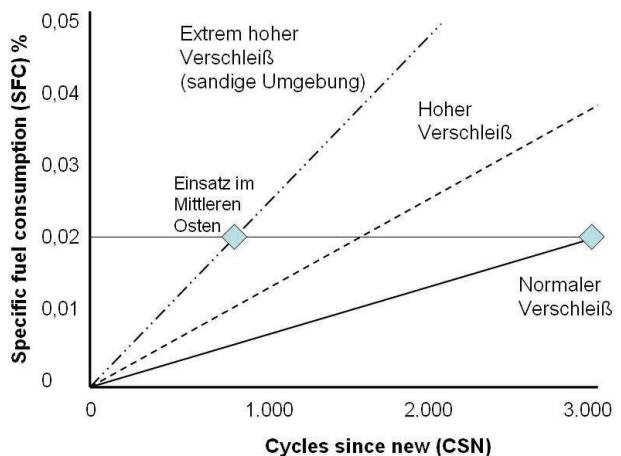


BILD 5. Einfluss der Sehnenlängenreduktion eines Hochdruckverdichters durch Erosion auf den spezifischen Treibstoffverbrauch (SFC) in Abhängigkeit von der Zyklenzahl (CSN)

4 EROSIONSSCHUTZSCHICHTEN

4.1 Schutzschichtarten

In der Vergangenheit und teilweise auch noch heute werden vor allem thermisch gespritzte Hartstoffschichten wie z. B. WC in Co-Matrix eingesetzt. Nachteil dieser Schichtsysteme ist die hohe Schichtdicke um die 100 μm , die zu einem signifikanten Einfluss auf die Schwingfestigkeit (High Cycle Fatigue), zu einer Versperrung der aerodynamischen Querschnitte und zu Unwuchten führen kann. Aus diesen Gründen können die Schichten nur partiell auf der Druckseite im oberen Schaufelspitzenbereich aufgebracht werden. Infolge dieser Konfiguration kommt es bei entsprechender Lage des Erosionsangriffs zu „Unterwaschungen“ der Schicht durch Abtrag des Grundmaterials, was eine Kerbung des Schaufelblattes und vorzeitiges Versagen bedeutet.

Alle diese Nachteile sind mit den seit einigen Jahren in Entwicklung und bereits teilweise im Einsatz befindlichen mittels Aufdampfverfahren (Physical Vapour Deposition) aufgebrachten Schichten vermeidbar. Sowohl theoretische Überlegungen als auch praktische Versuche zeigten, dass hierzu Mehrlagenschichten (Multilayer), die aus harten und weichen Einzellagen aufgebaut sind, die beste Schutzwirkung gegen Erosionsangriff aufweisen (BILD 6).

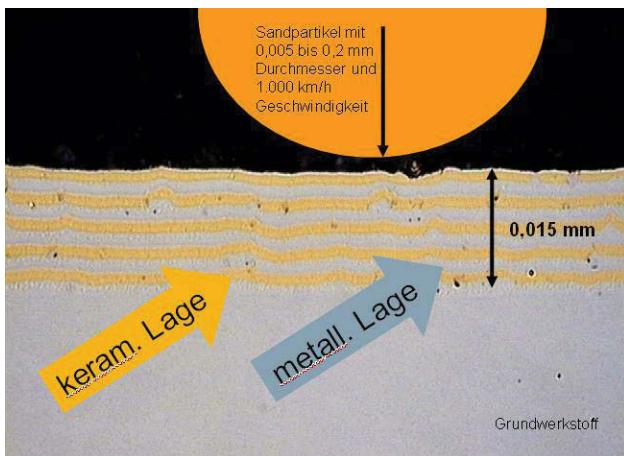


BILD 6. Querschliff durch die Mikrostruktur einer Multilayerschicht mit harten keramischen und weichen metallischen Einzellagen zur Energiedissipation bei Partikelaufschlag

4.2 Schutzschichtaufbau

Bei der Auswahl der Anzahl der Einzellagen oder der Dicke der Einzellagen gibt es große Variationsmöglichkeiten. Grundlagenarbeiten dazu sind u. a. von Hassani et al. [1] veröffentlicht worden. Neben einem hohen Erosionswiderstand werden den einzelnen Schichten des Multilayeraufbaus weitere wünschenswerte Eigenschaften zugeordnet, die zu einem Multilayer führen, der neben einer Erosionsschutzwirkung auch günstige mechanischen Eigenschaften im Zusammenspiel mit dem Grundwerkstoff besitzen soll. Einige dieser Eigenschaften sind hoher Risswiderstand, Rissabstumpfung bzw. Rissstoppfunktion, Spannungsübertragung oder Stützwirkung. Bei Änderung des Multilayeraufbaus oder z.B. der Duktilität einer Lage im Multilayeraufbau werden oft gegensätzliche Wirkungen für das gesamte Erosionsschutzsystem beobachtet. Zur Charakterisierung unterschiedlicher Schichtsysteme wurden Erosionsversuche (BILD 7) durchgeführt. Hierbei wurden Proben einem definierten Partikelbeschuss ausgesetzt und die jeweiligen Abtragsraten gemessen. Die Gesamtschichtdicken liegen im Bereich von einigen wenigen μm bis maximal $50\mu\text{m}$.

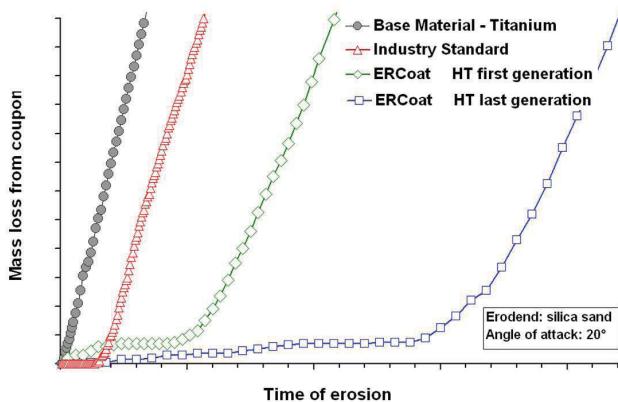


BILD 7. Vergleich des Erosionsverhaltens unterschiedlicher Multilayer mit dem typischen Schaufelmaterial Titan

Die aktuell im Einsatz befindlichen Systeme (BILD 8) sind auf Basis TiN aufgebaut und führen je nach Umgebungsbedingungen zu Lebensdauerverlängerungen von wenigstens einem Faktor 2 oder höher. Einen Nachteil dieser Schichten stellt die begrenzte Oxidationsbeständigkeit dar, die für Verdichter neuer Generation nicht ausreichend ist. Als weiteres Problem erweist sich, dass TiN- beschichtete Titanlegierungen nicht oder nur durch sehr aufwändige Verfahren entschichtet werden können. Eine einfache Entschichtbarkeit ist jedoch Grundvoraussetzung für Reparaturarbeiten während Neuteilfertigung und Instandsetzung.



BILD 8. TiN-Beschichtete Schaufeln

Gleichzeitiges Vorliegen von Korrosion und Erosion in küstennahen Einsatz- Bereichen führt bei Beschichtung von Stahlschaufeln mit TiN zu deutlich verstärkter Korrosion im Vergleich zu unbeschichteten Stahlschaufeln. Bei Schäden in der Schicht kann aufgrund der stark unterschiedlichen elektrochemischen Potentiale von vergleichsweise edler Schicht und unedlem Grundwerkstoff sogar Lochfraß entstehen.

Durch Weiterentwicklungen auf TiAlN-, CrN-Basis und anderen chemischen Zusammensetzungen ist das Temperaturpotential in den Bereich 600 bis 700°C und kurzzeitig auch darüber hinaus anhebbar (BILD 9).



BILD 9. Blisk mit Hochtemperatur- Erosionsschutzbeschichtung ERCoat^{nt} von MTU

Die Erosionsbeständigkeit kann durch Anpassung der Mikro- und Makrostruktur weiter erhöht werden. Unter der Makrostruktur ist die Anzahl und Dicke der Einzellagen aus harten keramischen und weichen metallischen Lagen zu verstehen. Unter der Mikrostruktur ist der Aufbau der jeweiligen Einzellage aus wiederum einzelnen um die 20 bis 50 nm dicken Unter-Schichtlagen zu verstehen, der ebenfalls für die gewünschten Eigenschaften mit verantwortlich ist (BILD 10).

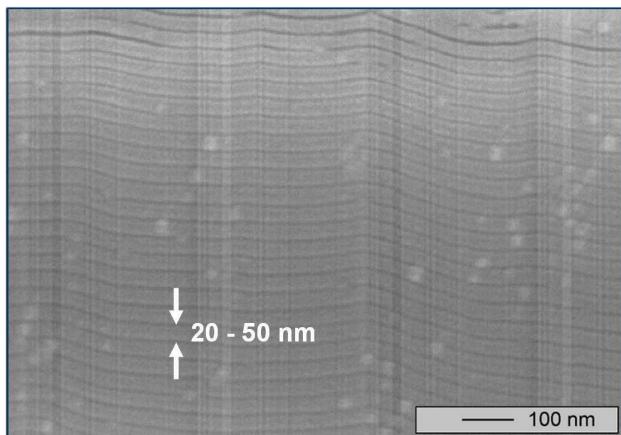


BILD 10. Nanostruktur einer Erosionsschutzschicht

5 NOTWENDIGER UMFANG DER BESCHICHTUNG VON VERDICHTERN

Die einzelnen Lauf- und Leitstufen eines Verdichters sind je nach Design und verwendeten Materialien sehr unterschiedlich von Erosion beaufschlagt. D. h. es kann ausreichend sein, nur einige wenige Stufen zu beschichten, was gleichzeitig eine wirtschaftliche Optimierung darstellt. Durch entsprechende Schadensuntersuchungen (Scrap Reviews) sind diese bei bereits im Betrieb befindlichen Triebwerken festlegbar. Bei neuen in Einführung befindlichen Triebwerken kann nur durch Simulation des Erosionsangriffs versucht werden zu ersten Abschätzungen zu kommen.

Von MTU wurde mit Unterstützung von DLR das Aerodynamik-Programm TRACE-U für die Strömungsberechnung auch von Partikeln weiterentwickelt. Erste Validierungen zeigten, dass zumindest qualitativ der Erosionsangriff sehr gut wiedergegeben wird (BILD 11). Zahlreiche Beiträge zur Simulation der Erosion wurden von Tabakoff veröffentlicht [2].

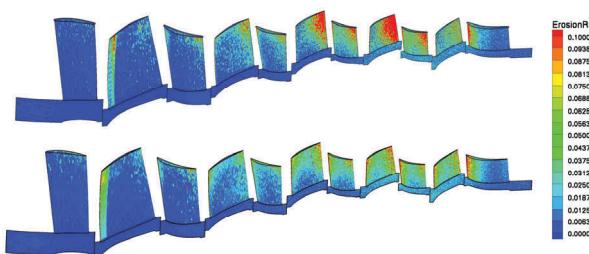


BILD 11. Mit unterschiedlichen Methoden simulierter Erosionsangriff in einem Verdichter

6 ZULASSUNG VON EROSIONSSCHUTZSCHICHTEN

Für die Zulassung von Erosionsschutzschichten ist vor allem nachzuweisen, dass die aufgebrachten Hartstoffsichten mit Härtewerten bis und über 2000 HV unter den Betriebsbedingungen zu keiner vorzeitigen Schädigung der Beschaufelung führen. Herausforderung ist durch entsprechendes Design der Struktur dieser Multilayer zu gewährleisten, dass nach Möglichkeit kein Abfall in der Schwingfestigkeit bei HCF und Low Cycle Fatigue (LCF) Beanspruchung im Vergleich zur unbeschichteten Neuschaufel auftritt bzw. im Vergleich zur unbeschichteten erodierten Schaufel ein entsprechender Lebensdauergewinn verbleibt (BILD 12). Dies muss auch unter außergewöhnlichen Betriebsbedingungen wie z. B. Verdichterpumpen gewährleistet sein.

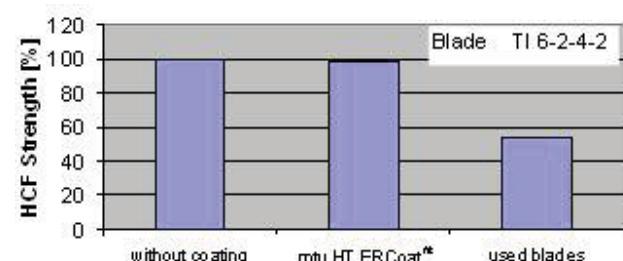


BILD 12. HCF-Festigkeit von unbeschichteten neuen, beschichteten neuen und gelaufenen erodierten Laufschaufeln

Weitere Nachweise betreffen die Unverändertheit von Aerodynamik und Wuchtzustand sowie die überlagerte Reaktion mit der umgebenden Atmosphäre.

Neben dem Einfluss der Schicht auf das Neuteil ist auch deren Einfluss auf eventuell notwendige Reparaturen zu betrachten. Im Falle von größeren Beschädigungen von beschichteten Schaufeln durch FOD's (Foreign Object Damage) wurde für MTU ERCoat^{nt} Schichten die Möglichkeit eines Blendens innerhalb der zulässigen Grenzwerte ohne Wiederbeschichtung gezeigt.

7 BETRIEBSERFAHRUNG MIT EROSIONSSCHUTZSCHICHTEN

Erosionsschutzschichten auf Basis TiN sind seit 2004 von General Electric Aircraft für den Antrieb T64 des Hubschraubers Sikorsky CH-53 im Einsatz. Von MTU erfolgt seit 2007 die Erprobung von verschiedenen Erosionsschutzschichten in mehreren militärischen und zivilen Anwendungen unter unterschiedlichsten Umgebungsbedingungen. Zielrichtung sind zum einen Kunden, die ihre Triebwerke in stark sandhaltigen Umgebungen betreiben müssen. Hier wurde Anfang 2010 ein Verdichter von einem Kunden im Mittleren Osten nach mehr als 3.400 h Betriebszeit, der mit unterschiedlichen Erosionsschutzschichten ausgerüstet war, zurück in die Wartung gebracht (BILD 13). Typischerweise muss bei dieser Airline bereits nach größer 2.000 h die komplette Beschaufelung wegen Unterschreitung geometrischer Grenzwerte verschrottet werden. Ergebnis war, dass nach diesem extremen Einsatz die MTU

Erosionsschutzschichten das Profil der Lauf- und Leitbeschaukelung im Verdichter erhalten haben.

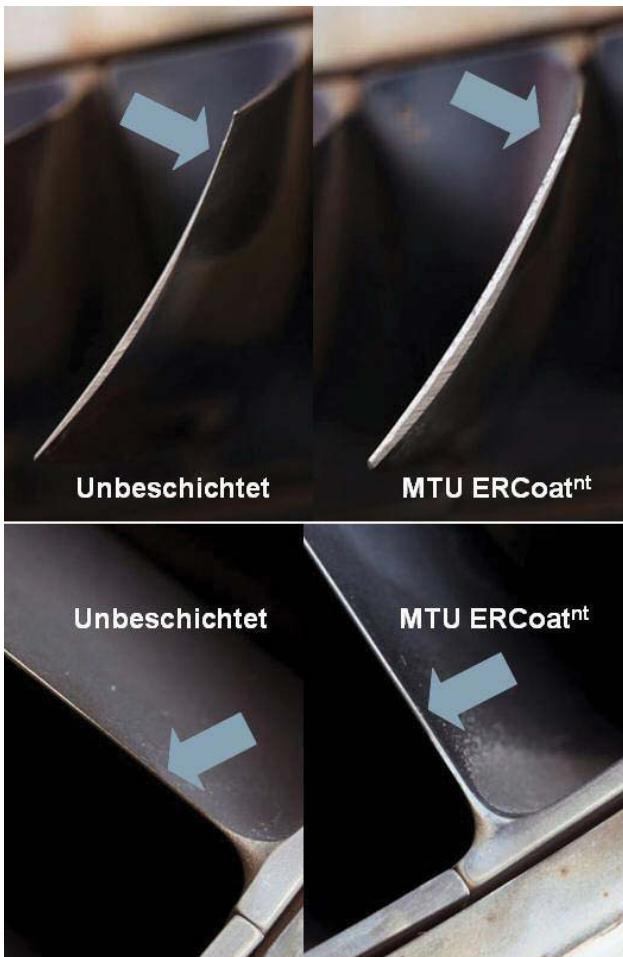


BILD 13. Oben: Blick auf Schaufelspitze Laufschaufeln mit voll erhaltenem Profil im Fall der Beschichtung. Unten: Blick auf Austrittskante Leitschaufeln mit voll erhaltenem Profil im Fall der Beschichtung

Zweite Zielrichtung war ERCoat^{nt} Schichten von MTU als Schutz gegen allmähliche über lange Zeiträume eintretende Profil- und Topografie - Veränderungen von Verdichterbeschaukelungen einzusetzen. Hier wurde ein Triebwerk mit einem Regenbogensatz von beschichteten Schaufeln ausgerüstet, das aktuell im nordamerikanischen Raum betrieben wird und Ende 2009 nach über 3.000 h die 6. Boroskopinspektion gesehen hat. Außer einzelnen FOD's waren bis dato keine weiteren Schädigungen des Schaufelblatts oder der Beschichtung erkennbar.

8 CO₂-REDUKTION

Neben dem zunehmenden spezifischen Kraftstoffverbrauch von Triebwerken, der durch erhöhte Rauigkeit, verkürzte Sehnenlängen, vergrößerte Spalte im Schaufel spitzenbereich oder Veränderungen des Schaufelprofils in Folge von Erosion hervorgerufen wird, ist auch der damit verbundene erhöhte CO₂-Ausstoß ein sehr wichtiges Argument für Schutzmaßnahmen geworden. Mit dem in 2012 einzuführenden EU-Emissionshandelssystem (EU-ETS) kommen hier auf

Fluggesellschaften zusätzliche Kosten hinzu, die durch Maßnahmen wie die Einführung von ERCoat^{nt} Schichten reduziert werden können.

Nimmt man je nach Betriebsbedingungen z. B. eine nur 0,3%ige Verminderung in der zeitlichen Zunahme im spezifischen Treibstoffverbrauch durch obige Schutzmaßnahme an, kann für einen Airbus A340 mit 4 Triebwerken je nach jährlicher Betriebsdauer eine Einsparung von 100.000 bis 120.000 l Treibstoff pro Jahr errechnet werden. Bei einem aktuellen Preis (Stand Februar 2010) von 0,5 US\$/l bedeutet dies eine jährliche Kostenersparnis von über 50.000 bzw. 60.000 US\$. Rechnet man den eingesparten Treibstoffverbrauch in t CO₂ um, können zusätzlich 260 bis 300 t CO₂ vermieden werden für die kein Kauf von Zertifikaten notwendig ist. Bei einer Flotte von 50 Airbus A340 bei einer Fluglinie können hier jährlich Zertifikate für 13.000 bis 15.000 t CO₂ und rund 3.000.000 US\$ Treibstoffkosten eingespart werden.

9 AUSBLICK

Durch die Entwicklung von Erosionsschutzschichten für Kunden in stark sandhaltigen Umgebungen und für den Schutz von Hochwertteilen wie Verdichterblößen konnte eine signifikante Verlängerung der Lebensdauer erreicht werden. Mit Übertragung dieses Wissens auch auf Triebwerke im Kurz- und Langstreckeneinsatz unter vergleichsweise „sauberer“ Umgebungsbedingungen können deutliche Einsparungen im Treibstoffverbrauch und bei den CO₂-Emissionen erzielt werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass eine vorzeitige und kostenaufwändige Reprofilierung von erodierten Laufschaufeln bei der Wartung vermieden werden kann.

DANKSAGUNG

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 20T0601A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

[1] S. Hassani, M. Bielawski, W. Beres, M. Balazinski, L. Martinu, J. E. Klemburg-Sapieha: Impact stress absorption and load spreading in multi-layered erosion-resistant coatings. Wear 268 (2010) 770-776

[2] A. Hamed und W. Tabakoff: Erosion and Deposition in Turbomachinery, J. of Propulsion and Power, 22, No.2, March-April 2006