

**Titel:** "Erosionsschutz für Titan- und Superlegierungen"

**Verfasser:** Dr. Falko Heutling; Dr. Thomas Uihlein; Thomas Brendel; Wolfgang Eichmann; Markus Ücker;

## **1 Kurzfassung**

Insbesondere bei Verdichtern von Gasturbinen, die im Betrieb Sand, Feinstaub, Salzkristalle, Eispartikel oder Vulkanasche mit der Verdichterluft einsaugen, muss mit frühzeitigem Leistungsverlust gerechnet werden. Die nach Erosionsbelastung beobachteten Leistungsverluste bei zivilen Verdichtern können mit einem Materialabtrag an der Beschau felung erklärt werden.

Nach heutigem Stand der Technik bieten dünne (5 bis 50 µm) aufgedampfte TiN-Schichten den besten Schutz gegenüber Erosionsangriffen der Verdichterbeschau felung. Die über PVD hergestellten ERCoat<sup>nt</sup>-Beschichtungen zeichnen sich durch einen patentierten Mehrlagen-aufbau aus, der durch eine alternierende Abscheidung von Hartstofflagen und weiche Zwischenlagen erzielt wird. ERCoat<sup>nt</sup>-Beschichtungen besitzen die Fähigkeit, einen Erosionsan-griff der Beschau felung deutlich zu verzögern oder sogar ganz zu unterdrücken. Ein negati- ver Einfluss auf die Aerodynamik durch ERCoat<sup>nt</sup> kann aufgrund der geringen Schichtdicken von 5 µm bis 50 µm und der geringen Oberflächenrauheit ausgeschlossen werden.

In aufwendigen Testreihen an beschichteten Materialproben und Bauteilen wurde der Ein- fluss von ERCoat<sup>nt</sup> auf die mechanischen Eigenschaften von Verdichterschaufeln aus Nickel- und Titanlegierungen untersucht. Eine wesentliche Erkenntnis aus den Testreihen ist, dass moderne Erosionsschutzbeschichtungen bei Überschreiten einer kritischen Dehnung die Rissinitiierung bei LCF-Belastung beschleunigen können, was bei der Auswahl und Einfüh- rung von Erosionsschutzbeschichtungen für Verdichteranwendungen berücksichtigt werden muss.

## **2 Erosion von Gasturbinen**

Insbesondere bei Verdichtern von Gasturbinen, die im Betrieb Sand, Feinstaub, Salzkristalle, Eispartikel oder Vulkanasche mit der Verdichterluft einsaugen, muss mit frühzeitigem Lei- stungsverlust gerechnet werden (**Abb. 1**). Vor allem in Gebieten, in denen Staub und Sand in der Atmosphäre vermehrt auftreten, ist mit einer rasch einsetzenden Erosion der Verdichter- beschau felung zu rechnen.

Die nach Erosionsbelastung beobachteten Leistungsverluste bei zivilen Verdichtern können mit einem Materialabtrag an der Beschaukelung erklärt werden. In **Abb. 2** wird eine Neuschaukel und eine durch Erosion beschädigte Verdichterschaukel gegenübergestellt. Die erodierte Schaukel zeigt vor allem im oberen Schaukelblattbereich (Tip) Materialverlust. Im Bereich der Schaukeleintrittskante (leading edge) trifft das Erosionsmedium fast senkrecht auf die Kante und führt zu einer Verkürzung der Sehnenlänge durch Materialabtrag. Während es im Bereich der Austrittskante (trailing edge) aufgrund des flachen Auftreffwinkels des Erosionsmediums zu einem flächigem Oberflächenabtrag kommt, der zu einer Schaukelstärkenreduzierung in diesem Bereich führt. Generell ist die Beobachtung, dass vom Materialabtrag durch Erosion vor allem die Druckseite (pressure side) von Verdichterschaukeln betroffen ist, wohingegen auf der Saugseite (suction side) von Verdichterschaukeln nur ein sehr schwacher Erosionsangriff erfolgt.

Der durch Erosion hervorgerufene Materialverlust an der Verdichterbeschaukelung führt vor allem auf der Schaukelstärkeseite zu einer Anhebung der Oberflächenrauheit. In **Abb. 3** sind Rauheitsmessungen eines 10 stufigen Verdichters zusammengestellt. Die Rauheitsmessungen erfolgten an Neuschaukeln und an gelaufenen Schaukeln, die in stark erosiver Umgebung betrieben wurden (ca. 4.000 Flugstunden). Alle gezeigten Rauheitsmessungen erfolgten auf der Schaukelstärkeseite im Bereich Schaukelstärke-Austrittskante. Als Ergebnis zeigen die gelaufenen Verdichterschaukeln einen Anstieg der Oberflächenrauheit gegenüber den Neuteilen. Die Rauheitszunahme durch Erosion fällt für die ersten Verdichterstufen stärker aus als für die hinteren Verdichterstufen, was unter anderem damit erklärt wird, dass größere Erosionspartikel durch Kollisionen in den ersten Verdichterstufen zerbrechen und somit die mittlere Größe der Erosionspartikel zu den hinteren Verdichterstufen abnimmt.

### **3 Erosionsschutz**

#### **3.1 Erosionsschutzsysteme**

Nach heutigem Stand der Technik bieten dünne (5 bis 50 µm) aufgedampfte TiN-Schichten den besten Schutz gegenüber Erosionsangriffen der Verdichterbeschaukelung. Hochgeschwindigkeitsflammgespritzte Hartstoff-Schichten, Aliterschichten oder über Schlickerverfahren aufgetragene Beschichtungen erwiesen sich als wenig geeignet.

Technische Neuentwicklungen basieren überwiegend auf mehrlagigen Hartstoffschichten, die mit Hilfe von PVD-Techniken hergestellt werden. Aufbauend auf diesem Kenntnisstand hat die MTU Aero Engines Erosionsschutzbeschichtungen für Verdichteranwendungen mit der Bezeichnung ERCoat<sup>nt</sup> entwickelt. In den **Abb. 4** ist ein Ausschnitt einer Blisk (Blisk Integrated Disk) gezeigt, die einige mit Niedertemperatur ERCoat<sup>nt</sup> beschichtete Schaukeln er-

kennen lässt. **Abb 5** zeigt mehrere Verdichterbauteile mit Hochtemperatur ERCoat<sup>nt</sup> beschichteten Schaufeln.

Die über PVD hergestellten ERCoat<sup>nt</sup>-Beschichtungen zeichnen sich durch einen patentierten Mehrlagenaufbau aus, der durch eine alternierende Abscheidung von Hartstofflagen und weichen Zwischenlagen erzielt wird. Die Gesamtschichtdicke des Multilayers liegt bei ca. 5 bis 50 µm. Vorteil des Multilayers ist die Möglichkeit zur Rissverzweigung bei Partikelerosion, was zu höheren Lebensdauern der Schicht führt.

Sowohl theoretische Überlegungen als auch Versuchsergebnisse zeigen, dass der Multilayeraufbau einen Einfluss auf die zu erwartenden Erosions- und mechanischen Eigenschaften ausübt. Bei der Auswahl der Anzahl oder der Dicke der Einzellagen gibt es große Variationsmöglichkeiten. Neben einem hohen Erosionswiderstand werden den einzelnen Schichten des Multilayeraufbaus weitere wünschenswerte Eigenschaften zugeordnet. Einige dieser Eigenschaften sind hoher Risswiderstand, Rissabstumpfung bzw. Rissstopper, Spannungsübertragung und Stützwirkung.

Für eine Niedertemperatur ERCoat<sup>nt</sup> wird beispielhaft in **Abb. 6** der Multilayeraufbau im Querschliff gezeigt. **Abb. 6a** zeigt einen metallographischen Querschliff, in dem die Gesamtschichtdicke von ca. 25 µm und eine Dicke der keramischen und metallischen Zwischenlagen von ca. 3 µm deutlich zu sehen ist. **Abb. 6b** zeigt ein mit Hilfe eines hochauflösenden Rasterelektronenmikroskop aufgenommenes Bild, in dem die Nanolagigkeit in der keramischen Zwischenschicht sichtbar wird. Die chemische Zusammensetzung von aufeinander folgenden Nanolagen unterscheidet sich nur gering und jede einzelne Nanolage weist lediglich eine Dicke von 20 bis 50 nm auf.

### 3.2 Erosionstest

ERCoat<sup>nt</sup>-Beschichtungen besitzen die Fähigkeit, einen Erosionsangriff der Beschaukelung deutlich zu verzögern oder sogar ganz zu unterdrücken. Ein negativer Einfluss auf die Aerodynamik durch ERCoat<sup>nt</sup> kann aufgrund der geringen Schichtdicken von 5 µm bis 50 µm und der geringen Oberflächenrauheit ausgeschlossen werden.

Untersuchungen zum Erosionsverhalten konnten in einem Erosionsprüfstand durchgeführt werden. Als Erosionsmedium diente ein Quarzsand mit Partikelgrößen zwischen 75 µm und 200 µm. Die Partikel werden im Prüfstand mit Hilfe von Druckluft auf eine Geschwindigkeit zwischen 200 m/s und 350 m/s beschleunigt und unter einem Winkel von 20° auf die zu testende Oberflächen geschossen.

Die Gewichtsverlustkurven einer mit Niedertemperatur und Hochtemperatur ERCoat<sup>nt</sup> beschichteten Flachprobe sind zusammen mit der Gewichtsverlustkurve einer unbeschichteten Flachprobe (Grundwerkstoff Ti-6-4) in **Abb. 7** gezeigt. Der gemessene Gewichtverlust für die Grundwerkstoffprobe aus der Titanlegierung Ti-6-4 verläuft proportional zur Zeit. Die ERCoat<sup>nt</sup> beschichteten Flachproben ertragen über eine bestimmte Zeit die Erosionsbelastung ohne messbaren Gewichtsverlust. In dieser Phase, die als Initiierungsphase bezeichnet wird, besteht ein vollständiger Schutz vor Erosionsangriff. Mit anhaltender Erosionsbelastung kommt es zu einem allmählichen Angriff der Erosionsschutzschicht bis diese vollständig vom Grundwerkstoff abgetragen ist. Die Erosionsrate (Masseverlust pro Zeiteinheit) nimmt in dieser Phase, die als Übergangsphase bezeichnet wird, zu. In der dritten Phase erfolgt der Grundwerkstoffabtrag, wobei die Erosionsrate die des ungeschützten Grundwerkstoffes erreicht hat.

Die Initiierungszeit, die für die beiden ERCoat<sup>nt</sup> beschichteten Flachproben in **Abb. 7** gefunden wird, ist vergleichbar lang. Der Titan Grundwerkstoff zeigt dagegen keine Initiierungsphase und der Erosionsabtrag erfolgt vom ersten Moment der einsetzenden Erosionsbelastung. Ein erheblicher Unterschied wird in der Ausprägung der Übergangsphase zwischen Niedertemperatur und Hochtemperatur ERCoat<sup>nt</sup> gefunden. Im Vergleich zur Niedertemperatur ist die Übergangsphase der Hochtemperatur ERCoat<sup>nt</sup> Beschichtung fast 4 mal so lang, was die Zeit bis zum Erreichen der Abtragsrate des Grundwerkstoffes von 150 Minuten für Niedertemperatur auf ca. 700 min für Hochtemperatur ERCoat<sup>nt</sup> erhöht.

Die gewählten Erosionsparameter stellen eine starke Erosionsbelastung dar, mit der unter Zeitraffer eine für Verdichter realistische Erosion simuliert wird. Die Erosionsparameter wurden im Verlauf der Untersuchungsreihen so festgelegt, dass ein Vergleich der Erosionseigenschaften von unterschiedlichen Schichtsystemen in kurzer Zeit möglich ist. Ziel der Entwicklung von Erosionsschutzsystemen ist es aber, den vollständigen Schutz (Initiierungsphase) über die gesamte Einsatzdauer einer Verdichterkomponente aufrechtzuerhalten.

### **3.3 Einfluss von Erosionsschichten auf Grundwerkstoffeigenschaften**

In aufwendigen Testreihen an beschichteten Materialproben und Bauteilen wurde der Einfluss von ERCoat<sup>nt</sup> auf die mechanischen Eigenschaften von Verdichterschaufeln aus Nickel- und Titanlegierungen untersucht.

Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass die betrachteten Erosionsschutzsysteme keinen bemerkenswerten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der untersuchten

Nickellegierung, Inconel 718, ausüben. Die Temperatureinsatzgrenze für eine mit ERCoat<sup>nt</sup> beschichtete Komponente aus einer Nickelbasislegierung wird durch die Oxidationsbeständigkeit der Beschichtung bestimmt.

Für die betrachteten Titanlegierungen Ti-6-4 und Ti-6-2-4-2 zeigten sich dagegen unter zyklischen Belastungen Einsatzgrenzen von ERCoat<sup>nt</sup> beschichteten Proben und Bauteilen. Die durchgeführten mechanischen Tests betrachteten vor allem den Einfluss von ERCoat<sup>nt</sup> Beschichtungen auf die HCF- (High Cycle Fatigue) und LCF-Festigkeit (Low Cycle Fatigue). Generell kann davon ausgegangen werden, dass neben den untersuchten ERCoat<sup>nt</sup>-Schichtschichten auch andere Erosionsschutzschichten, die auf Hartstoffbeschichtungen basieren, die gefundenen Einflüsse auf die zyklische Festigkeit aufweisen.

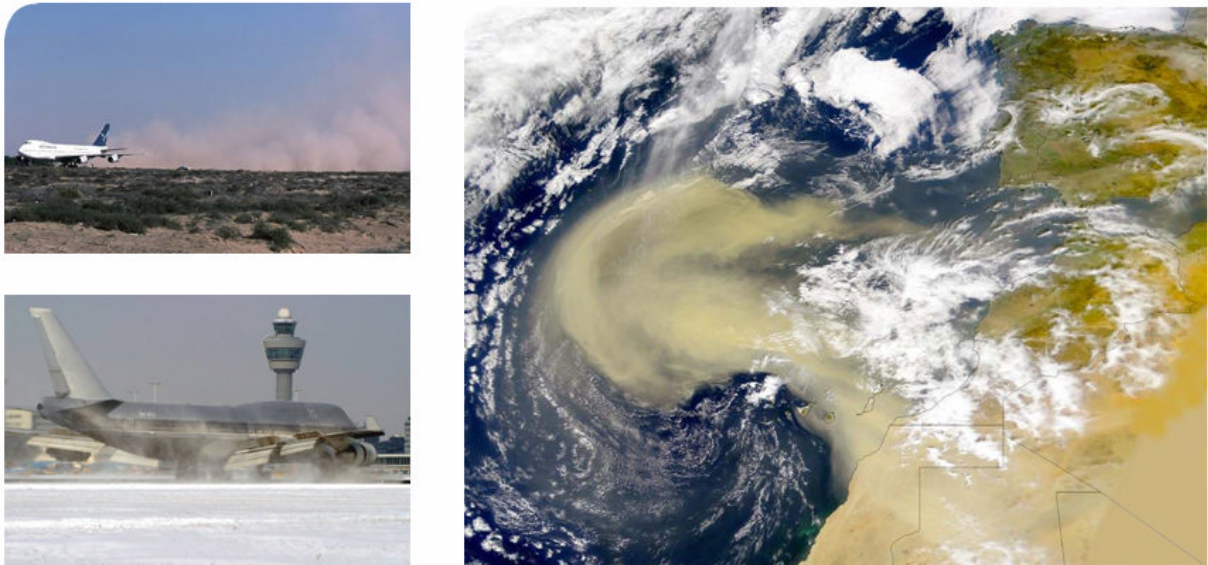
**Abb. 8** zeigt schematisch den Einfluss von ERCoat<sup>nt</sup>-Beschichtungen auf die HCF- und LCF-Festigkeit von Titanlegierungen. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass in Abhängigkeit vom gewähltem Beschichtungssystem, Schaufelwerkstoff und der Geometrie mit einer Reduzierung der HCF-Festigkeit von bis zu 15 % gerechnet werden muss. Die Mechanismen unter zyklischer HCF-Belastung sind noch nicht ausreichend untersucht, um die gefundenen Festigkeitsreduzierungen erklären zu können.

Eine weitere wesentliche Erkenntnis aus den Testreihen ist, dass moderne Erosionsschutzbeschichtungen bei Überschreiten einer kritischen Dehnung die Rissinitiierung bei LCF-Belastung beschleunigen können, was bei der Auswahl und Einführung von Erosionsschutzbeschichtungen für Verdichteranwendungen berücksichtigt werden muss.

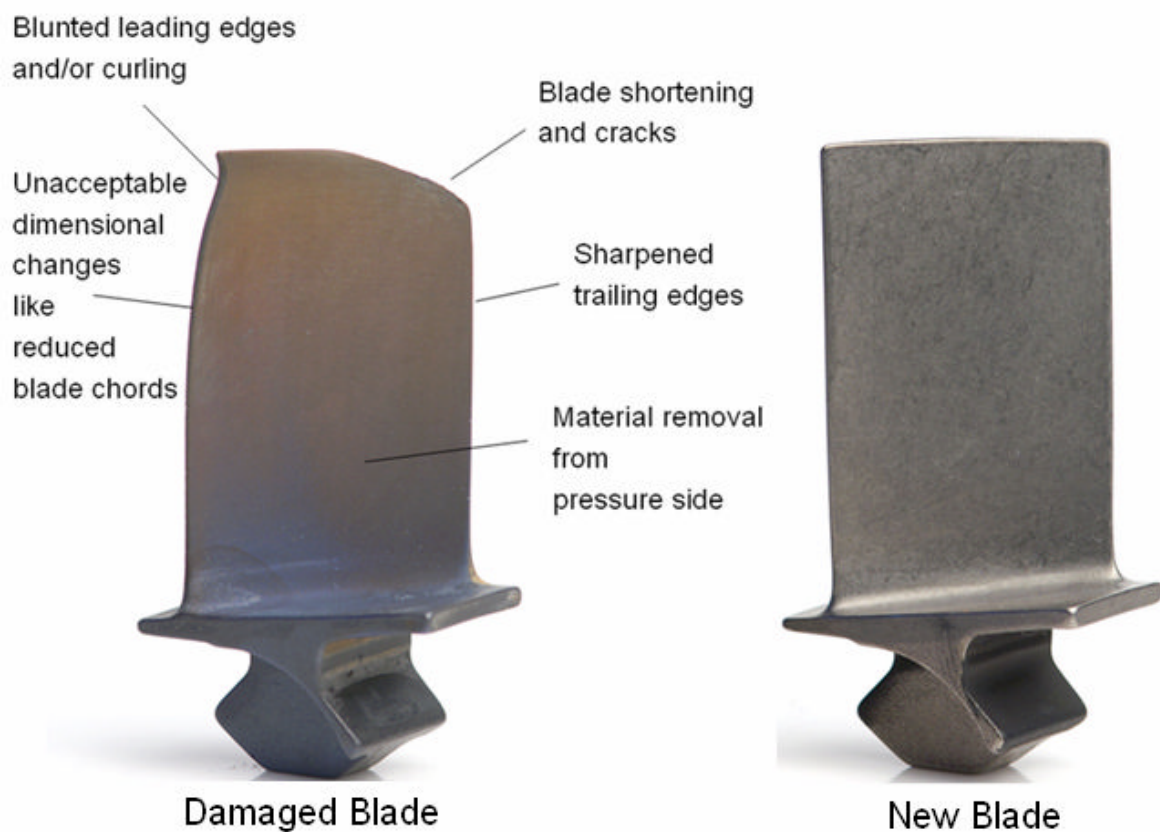
#### **4. Anwendung von Erosionsschutzsystemen**

Vor allem aus zwei Gründen wird die Einführung von Erosionsschutzschichten in den nächsten Jahren vorangetrieben: Die Blisk-Bauweise der nächsten Verdichtergeneration führt zu einer deutlichen Leistungssteigerung, aber auch zu teuren integralen Bauteilen, deren Verlust durch Erosionsschäden zu einem wirtschaftlichen Risiko werden kann.

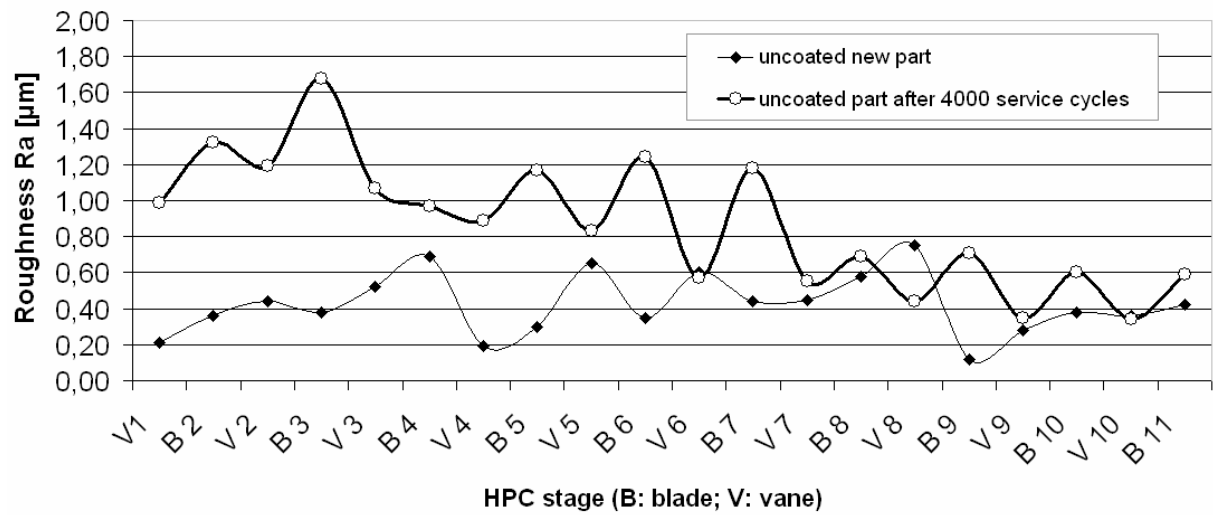
Eine nachträgliche Einführung von Erosionsschutzschichten in laufende Verdichterprogramme erweist sich durch verringerten Treibstoffverbrauch (Profilstabilität Beschauflung sowie länger glatt bleibende Schaufeloberflächen) und einer Reduzierung der Ersatzteilkosten (längere Standzeiten) für die Betreiber als wirtschaftlich. Zusätzlich bieten Verdichter mit reduzierter Erosionsneigung Vorteile in der Flugsicherheit, da die Verdichter über einen längeren Zeitraum in einem sicheren Bereich des Verdichterkennfeldes operieren und sich negativ auswirkende Strömungszustände (z.B. Pumpen) vermeiden lassen.



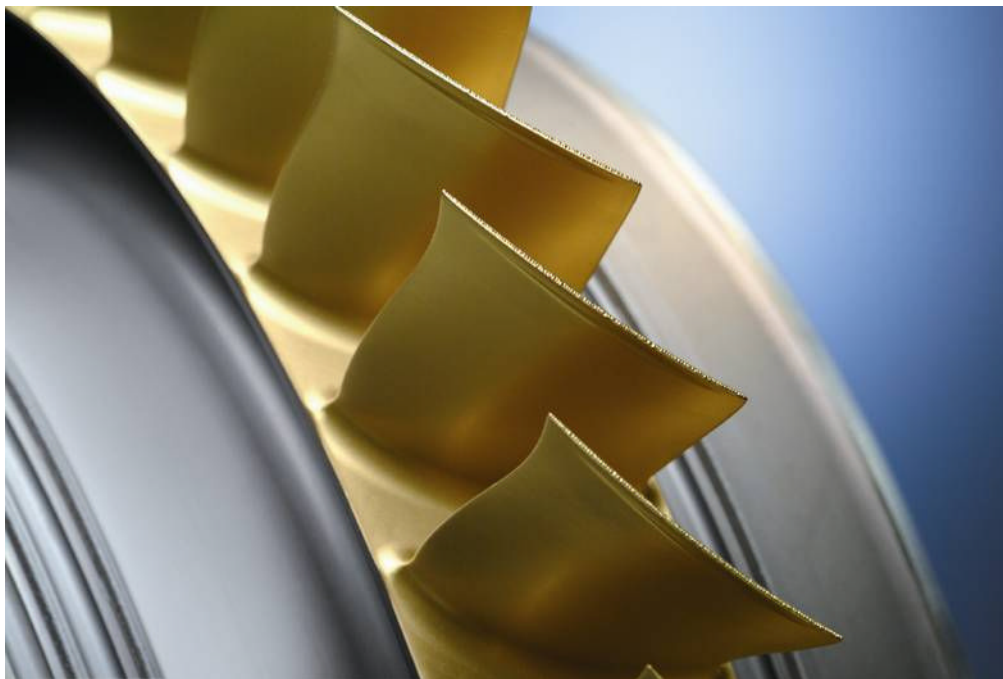
**Abb. 1:** Die in der Atmosphäre vorkommenden Sande, Vulkanascheteilchen, Salz- und Eiskristalle können zu einem Erosionsangriff von Triebwerkskomponenten führen.



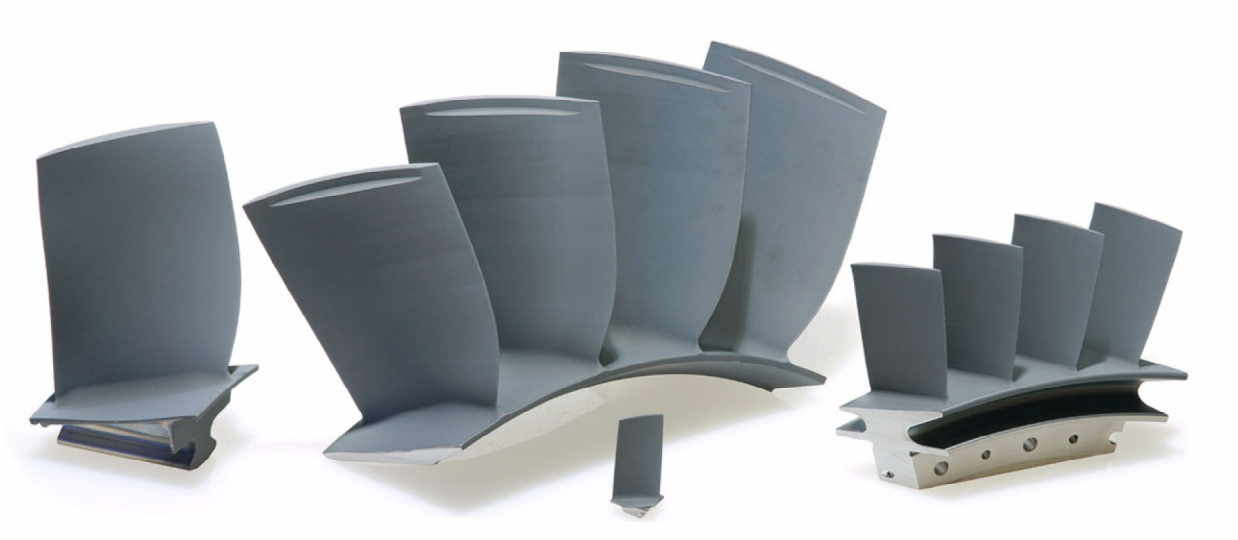
**Abb. 2:** Gegenüberstellung einer durch Erosion beschädigten Verdichterschaufel mit einer Neuschaufel.



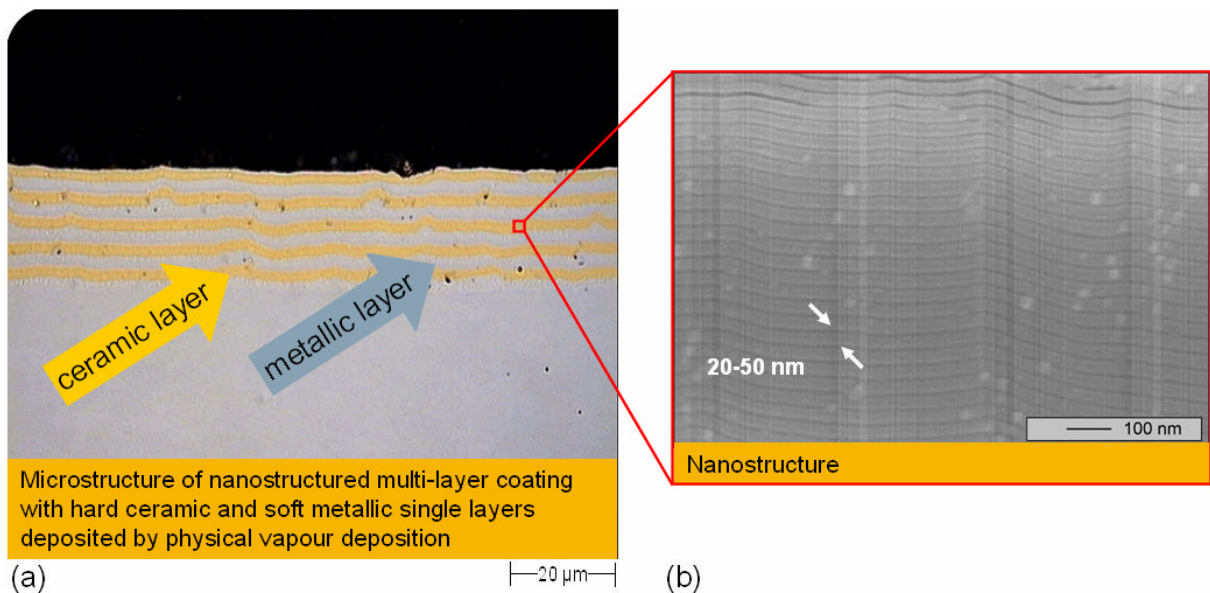
**Abb. 3:** Oberflächenrauheit erodierter Verdichterschaufeln (nach ca. 4.000 Flugzyklen) im Vergleich zur Rauheit von Neuteilen



**Abb. 4:** Ausschnitt einer Blisk (Blisk Integrated Disk) mit Niedertemperatur ERCoat<sup>nt</sup> beschichtete Schaufeln



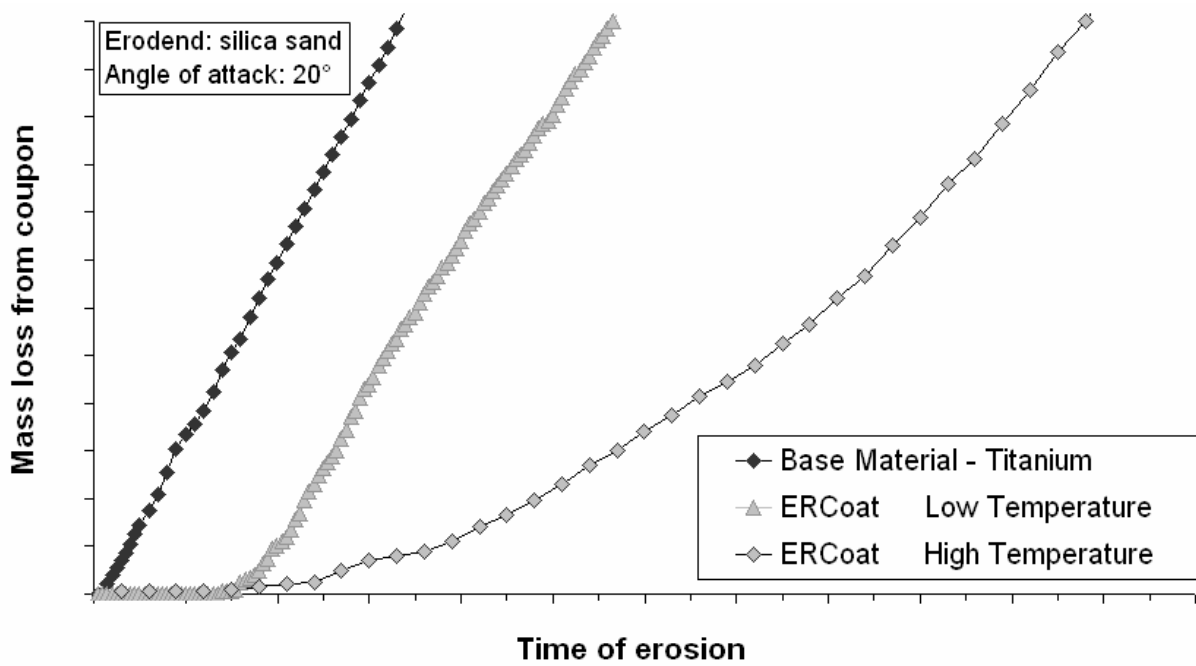
**Abb. 5:** Verdichterbauteile mit Hochtemperatur ERCoat™ beschichteten Schaufeln



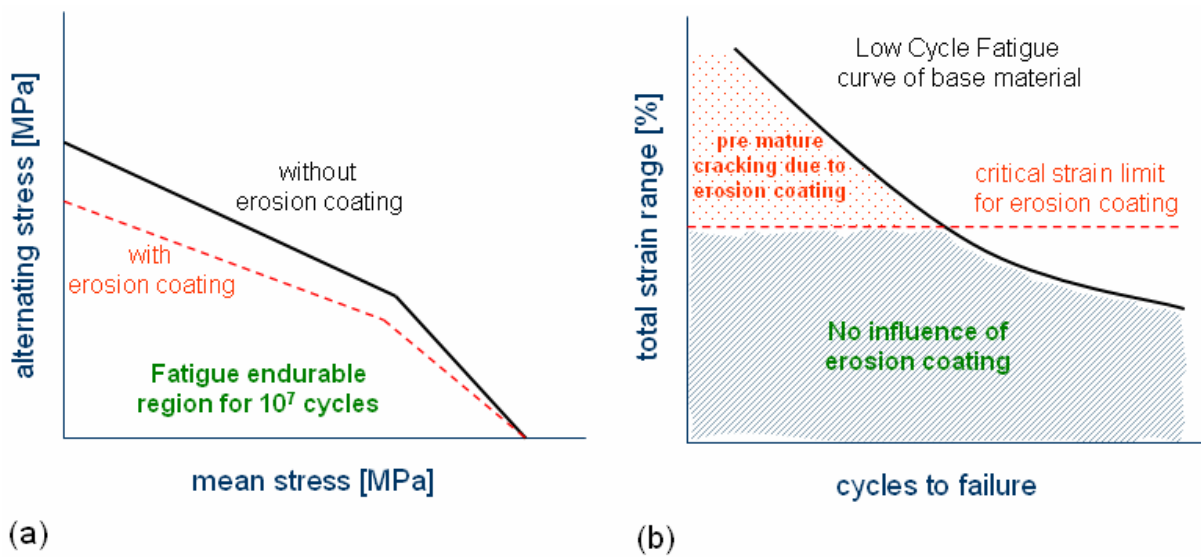
**Abb. 6:** Multilayeraufbau einer Niedertemperatur ERCoat™ Beschichtung im Querschliff

(a) metallographischer Querschliff

(b) hochauflösendes Rasterelektronenbild am Querschliff



**Abb. 7:** Ergebnisse aus Erosionsversuchen an beschichteten und unbeschichteten Titanproben.



**Abb. 8:** Einfluss von modernen Erosionsschutzschichten auf die HCF- und LCF-Festigkeit von Titanlegierungen

- (a) Einfluss auf HCF-Festigkeit
- (b) Einfluss auf LCF-Festigkeit