

# FORTSCHRITTLICHE DICHTSYSTEME IN FLUGTRIEBWERKEN – EINE INTERDISZIPLINÄRE HERAUSFORDERUNG

F. Buckl, M. A. Daeubler, J. Bamberg, K. K. Schweitzer, M. Hertter, J. Eichner  
MTU Aero Engines GmbH  
Dachauer Str. 665, 80995 München

## 1. EINLEITUNG

Bei der Beschreibung der erfolgreichen Entwicklungsgeschichte von Flugtriebwerken wird in der Regel auf die Fortschritte bei den klassischen Auslegungsparametern eines Triebwerks verwiesen. Es ist richtig, daß große Fortschritte bei der Steigerung des Gesamtdruckverhältnisses auf Werte bis 45 und der Turbineneintrittstemperatur auf Werte bis zu 2000 K erreicht wurden. Die kontinuierliche Erhöhung des Nebenstromverhältnisses auf Werte von nahezu 9 war dafür die notwendige Ergänzung nicht nur zur Verbesserung des Treibstoffverbrauchs, sondern vor allem auch zur Reduzierung der Lärmemissionen. Diese Fortschritte wurden ermöglicht durch verbesserte aerodynamische Gestaltung der Turbokomponenten, bessere Werkstoffe und Bauweisen und optimierte Bauteilkühlung [1].

Neben diesen klassischen Elementen, die auch für die zukünftige Entwicklung eine wichtige Rolle spielen werden, darf man aber nicht die vielen Subsysteme eines Triebwerks vergessen, ohne deren Verbesserungen die genannten Fortschritte gar nicht möglich gewesen wären. Gemeint sind damit z.B. Dichtsysteme, Sekundärluftsystem, Lager- und Ölsystem, Triebwerksregelung und Anbaugeräte. Diese Systeme haben entscheidenden Einfluß auf das Betriebsverhalten des Triebwerks und damit auch auf Zuverlässigkeit und Sicherheit. Gleiches gilt für die Wartungskosten, weil der Grad der Abnutzung von Triebwerksschaufeln und –scheiben, z.B. infolge Einlaufen der Schaufelspitzen bzw. thermischer Belastung der Scheiben, durch diese Systeme wesentlich gesteuert wird. Durch die gestiegenen Anforderungen bezüglich Temperaturen und Drücken sind diese Systeme heute so komplex geworden, daß sie auch einen nicht vernachlässigbaren Einfluß auf die Herstellkosten des Triebwerks haben.

Allein zum Thema Dichtsysteme ließen sich Bücher schreiben, ist doch die Art und Ausführung dieser Systeme sehr vielseitig und komplex. Gemeint sind hier Spalthaltungssysteme in den Verdichter- und Turbinenkomponenten, die die Aufgabe haben, den Dichtspalt von rotierender Beschaukelung zum Gehäuse als auch die Spalte von stehender Beschaukelung (den Statoren) zu den drehenden Rotornaben minimal zu halten und damit ein stabiles Betriebsverhalten bei hohem Wirkungsgrad zu gewährleisten.

Die größten Herausforderungen stellen sich dabei sicherlich bei der Spalthaltung des Hochdruckturbinenrotors mit dem Turbinengehäuse, weil hier die größten absoluten Temperaturen und –gradienten zu beherrschen sind, aber auch die Spalthaltung eines Hochdruckverdichterrots zum Verdichtergehäuse stellt hohe Ansprüche, nicht zuletzt deshalb, weil bei den filigranen transsonischen Verdichterlaufschaukeln auf Deckbänder, wie man sie bei den Turbinen verwendet, verzichtet werden muß. Man unterscheidet generell 'aktive' Systeme, bei denen die thermische Dehnung des Gehäuses über aktiv kontrollierte Kühlluft - sogenannte 'active clearance control' - gesteuert wird, von den passiven Systemen, bei denen auf dieses aktive Element verzichtet wird.

Dieser Artikel beschreibt die vielseitigen Anforderungen und Elemente, die bei der Entwicklung eines 'passiven' Dichtsystems für einen Hochdruckverdichter berücksichtigt werden müssen. Wegen der starken Verflechtung von Verdichterdesign, thermischem Verhalten, Werkstoff- und Verfahrensparametern, Qualitätskontrolle und Reparaturforderungen läßt sich die erfolgreiche Entwicklung eines fortschrittlichen Dichtsystems nur durch eine interdisziplinäre Arbeitsweise (siehe Bild 1) realisieren.

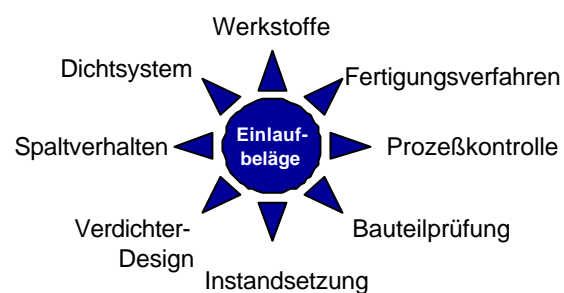


BILD 1: Für die Entwicklung von Einlaufbelägen relevante Disziplinen.

Zur Reduzierung der Herstell- und Wartungskosten von Verdichtern werden integrale Bauweisen mit möglichst geringen Stufen- und Schaufelzahlen angestrebt. Dies erzwingt hohe Stufendruckverhältnisse, die sich nur über höhere Drehzahlen und Umfangsgeschwindigkeiten der Verdichterroten realisieren lassen. Im Ergebnis ergibt dies eine hohe aerodynamische, thermische und mechanische Belastung aller Verdichterbauteile. Die eingesetzten Werkstoffe und Schichten werden bis an den Rand ihrer Belastbarkeit beansprucht.

Das verwendete Dichtsystem hat wesentlichen Einfluß auf den Wirkungsgrad, die Stabilität und das Betriebsverhalten des Verdichters. Die Anforderungen an das Dichtsystem betreffen hauptsächlich die Struktur und den Aufbau der Einlaufbeläge, die den Radialspalt zwischen rotierenden Laufschaufeln und Gehäuse einstellen.

## 2. SPALTVERHALTEN

Der Dichtspalt zwischen Rotor und Gehäuse während des Betriebs ist einer der wichtigsten Parameter bei der Auslegung von modernen Verdichtern für höchste Wirkungsgrade und optimiertes Betriebsverhalten. Eine Verschlechterung der Spalte mit zunehmender Betriebszeit über ein zulässiges Maß hinaus beeinflusst wesentlich Wirkungsgrad und Pumpgrenze des Verdichters und stellt damit nach wie vor eine der Hauptursachen für die vorzeitige Instandsetzung der Triebwerke dar [2].

### 2.1. Verhalten der Dichtspalte eines Verdichters im Betrieb

In Bild 2 ist das typische Verformungsverhalten von Rotor und Gehäuse für einen Verdichter bei Beschleunigung und Verzögerung des Triebwerks gezeigt.

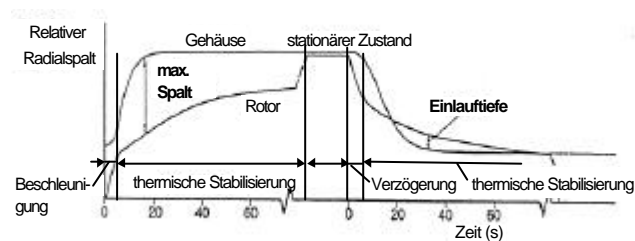


BILD 2: Verformungsverhalten von Rotor und Gehäuse bei Beschleunigung und Verzögerung des Triebwerks.

Während der Beschleunigungsphase bis zum Erreichen der Vollast-Drehzahl wird die Rotor-Ausdehnung im wesentlichen von der Fliehkraft- (einschließlich Randlast-) dehnung der Laufscheibe und von der thermischen Dehnung der Laufschaufel bestimmt. Die thermische Ausdehnung des Gehäuses während dieses kurzen Vorgangs ist nur gering.

In der Folgephase, vom Erreichen der Vollast-Drehzahl bis zum voll thermisch stabilisierten, stationären Zustand, wird die Rotordehnung nur noch von der thermischen Dehnung der Laufscheibe bestimmt, die mehrere Minuten lang dauern kann. Die thermische Ausdehnung des Gehäuses erfolgt jetzt ebenfalls, aufgrund der geringeren Trägheit des Gehäuses im Vergleich zum Rotor allerdings zu Beginn deutlich schneller als beim Rotor. Diese Spaltvergrößerung führt zu einem zeitweisen Wirkungsgradabfall und damit zu einem Schub- bzw. Leistungsverlust, der nur durch eine kurzzeitige Erhöhung

der Turbineneintritts-Temperatur kompensiert werden kann. Die in dieser Phase auftretende Spaltvergrößerung führt zusätzlich zu einer Verschlechterung der Pumpgrenze des Verdichters, was im schlimmsten Fall den stabilen Betrieb des Triebwerks in dieser Phase stören kann.

Im thermisch stationären Betriebszustand stellt sich dann, bei richtiger Gestaltung des Dichtsystems, der angestrebte minimale Spalt und damit der bestmögliche Wirkungsgrad bei stabilem Betrieb ein.

Die Verzögerung des heißen Triebwerks von thermisch stationärer Vollast auf thermisch stationären Leerlauf läßt sich analog in zwei Phasen unterscheiden:

In Phase 1 erfolgt die Verzögerung von Vollast- auf Leerlauf-Drehzahl. Durch den plötzlichen Rückgang der Fliehkraftspannung schrumpft die Laufscheibe, die thermische Ausdehnung der Laufschaufel geht durch den Temperaturabfall im Gasstrom ebenfalls zurück, während das Gehäuse in dieser kurzen Spanne nur gering reagiert.

In Phase 2, vom Erreichen der Leerlauf-Drehzahl bis zum voll thermisch stabilisierten Leerlauf erfolgt das thermische Schrumpfen des Gehäuses wesentlich schneller als beim Rotor, der durch seine größere Masse und den nur indirekten Kontakt zum Gasstrom träger reagiert. Dies führt ohne besondere Maßnahmen in der Regel dazu, daß die Schaufeln des thermisch trägen Rotors in das Gehäuse einlaufen, was entweder zum Abrieb am Gehäuse oder an den Schaufelspitzen führt.

### 2.2. Spaltoptimierung

Bei der Betrachtung dieser Phänomene wird unmittelbar klar, daß man bei der Gestaltung eines Dichtsystems immer den gesamten Betriebsbereich des Triebwerks im Auge haben muß. Letztlich geht es um die Forderung nach den jeweils in allen Betriebspunkten minimal möglichen Dichtspalten. Für die Auslegung eines Dichtsystems ergeben sich folgende Gestaltungsziele:

- minimaler Spalt bei stationärer Vollast und hoher Teillast sowie ausreichend kleiner Spalt während der Beschleunigung des kalten Triebwerkes, d.h. der Montagepalt wird so eingestellt, daß bei Vollast der Rotor gerade einläuft.
- kein Einlaufen des Rotors in allen anderen Betriebspunkten d.h. speziell kein Einlaufen bei Wiederbeschleunigung des warmen Triebwerkes. Dies ist die wohl schwierigste Aufgabe bei der Realisierung guter Spalte, denn schnelles Wachsen der noch heißen Laufscheibe aufgrund der Fliehkraftdehnung würde ohne entsprechende Gestaltung des Dichtsystems zu einem Einlaufen ins Gehäuse führen, welches den Spalt in allen anderen Betriebsbedingungen entsprechend vergrößert.

- geringe Verschlechterung/Vergrößerung der Spalte im Langzeitbetrieb.

### 3. DICHTSYSTEME

Laufschaufeln im Verdichter haben kein Deckband, wie es in der Turbine üblich ist. Deshalb sind die Spitzen von Verdichterlaufschauflern beim Anstreifen ins Gehäuse bzw. in den Belag dem direkten Reibkontakt ausgesetzt. Solch ein Anstreifen wird bei Einstellung minimaler Radialspalte beispielsweise durch Fertigungs- und Montagetoleranzen bzw. durch Rotor/Gehäuse Exzentrizitäten infolge Verformung im Betrieb hervorgerufen. Da durch den Reibkontakt an den Spitzen der rotierenden Schaufeln Material abgetragen wird, entsteht über den gesamten Umfang von Gehäuse und Rotor eine ungewünschte Spaltvergrößerung (siehe Bild 3). Um das zu vermeiden, werden die Spitzen der Laufschaufeln häufig mit einem harten Belag oder mit abrasiven Partikeln gepanzert. Auf die Weise wird die Schaufelspitze vor Beschädigung und Kürzung durch Abschleifen geschützt (siehe Bild 4).

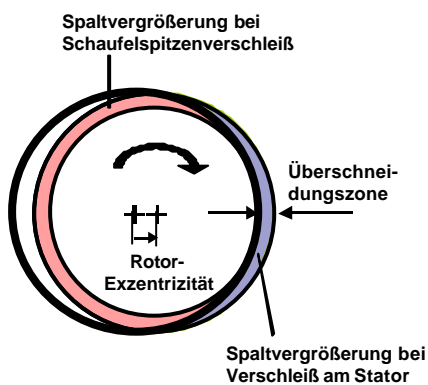
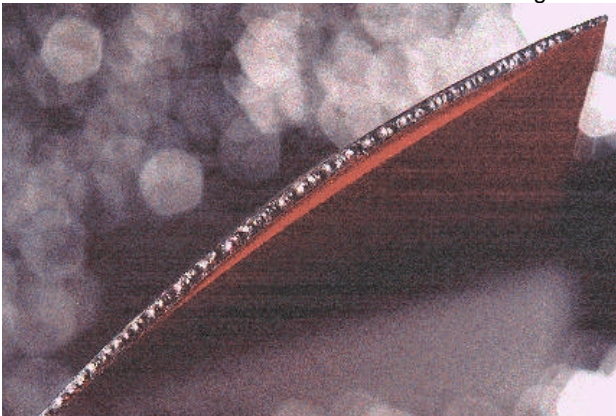


BILD 3: Spaltvergrößerung bei Schaufelspitzenverschleiß und bei Verschleiß am Gehäuse.

Eine andere Möglichkeit den Schaufelspitzenverschleiß bei Einstellung minimaler Radialspalte zu vermeiden bzw. zu verringern, besteht in der Beschichtung der Gehäuse mit sogenannten Einlaufbelägen. Diese führen zudem bei ihrem Materialabtrag nicht wie beim Schaufelspitzenverschleiß zu einer Spaltvergrößerung über den gesamten Umfang, sondern nur zu einer sichelförmigen Vergrößerung des Dichtspaltes (siehe Bild 3). Hierdurch fällt die Leistung des Triebwerks nicht so stark ab. Aus diesem Grund sind Gehäuse mit Einlaufbelägen die



anzustrebende technische Lösung.

BILD 4: Schaufelspitzenpanzerung mit aufgelöteten CBN-Partikeln als Verschleißschutz.

Führt ein Einlaufbelag beim Anstreifen dennoch zu inakzeptablen Beschädigungen an den Schaufelspitzen, weil z.B. der Einlaufbelag aufgrund anderer Forderungen zu hart ausfällt, dann wird zur Erzielung optimaler Wirkungsgrade des Triebwerks ein Dichtsystem aus Einlaufbelag und Schaufelspitzenpanzerung verwendet.

Generell müssen die Dichtsysteme folgende technische Anforderungen erfüllen:

- gute Einlauffähigkeit
- hohe Temperaturbeständigkeit
- gute Erosionsbeständigkeit
- hohe bzw. optimale Wärmedämmfähigkeit
- und hohe Titanfeuerbeständigkeit.

Wenn ein einschichtiger Belag diese Anforderungen nicht zufriedenstellend erfüllen kann und dies ist bei den anspruchsvollen Auslegungsparametern heutiger Verdichter zunehmend der Fall, werden Verbundeinlaufbeläge eingesetzt. Diese mehrschichtigen Beläge können an das zu erfüllende Beanspruchungsprofil optimal angepasst werden.

Bild 5 zeigt einen Verbundeinlaufbelag bestehend aus Haftschrift, Wärmedämm- bzw. Titanfeuerschutzschicht und Einlaufbelag. Die metallische Haftschrift unmittelbar auf der metallischen Bauteiloberfläche ist für eine ausreichende Haftung der keramischen Wärmedämm- und Titanfeuerschutzschicht notwendig. Die gute Einlauffähigkeit sowie Erosionsbeständigkeit wird im dargestellten Verbundeinlaufbelag durch die poröse Deckschicht, dem eigentlichen Einlaufbelag, sichergestellt.

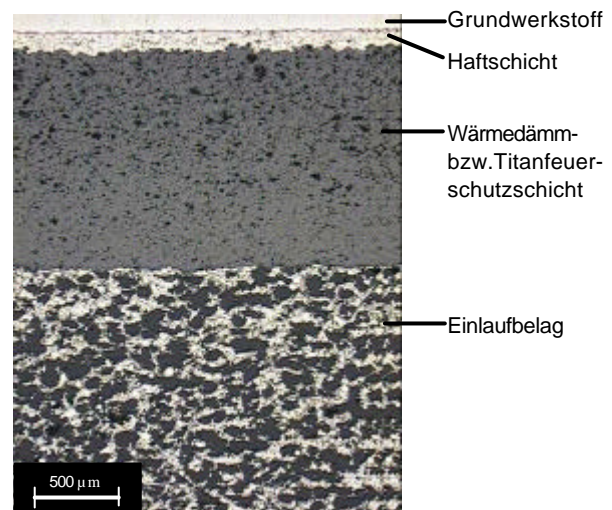


BILD 5: Verbundeinlaufbelag bestehend aus Haft-, Wärmedämm- bzw. Titanfeuerschutzschicht und Einlaufbelag.

Auf den Strukturaufbau des Einlaufbelages wird im nachfolgenden Kapitel eingegangen.

#### 4. WERKSTOFFSTRUKTUR DER EINLAUFBELÄGE

##### 4.1. Anforderungen

Die Anforderungen an solche Einlaufbeläge sind sehr komplex. Neben den Eigenschaften, die das Abriebverhalten betreffen, wie

- gute Spanbildung und Entfernbarekeit des Abriebes
- kein Materialübertrag auf Reibpartner
- niedrige Reibenergie und –widerstand
- keine Entzündung des Abriebes beim Anstreifen

sind noch weitere Anforderungen zu beachten, die zum Teil konträr zu den vorgenannten sind, wie

- Erosionsbeständigkeit
- Temperaturbeständigkeit
- Thermowechselbeständigkeit
- Glatte Oberfläche
- Keine offene Porosität
- Widerstand gegen Schwingbelastung
- Korrosionsbeständigkeit gegen Schmierstoffe
- Korrosionsbeständigkeit gegen Meerwasser

Nicht zuletzt ist auch eine reproduzierbare Herstellung und Reparatur zu beachten.

##### 4.2. Typische Materialien für Einlaufbeläge

Typische Materialien für Einlaufbeläge sind:

a) hoch poröse (60-80% Poren) metallische Werkstoffe, wie Metallfilze oder durch thermisches Spritzen (siehe Kapitel 5.1.) gezielt porös aufgetragene Schichten, bei denen beim Anstreifen lockere Bindungen zwischen den Partikeln leicht zu brechen sind und sehr feine Späne entstehen. Bei Spritzschichten werden oft inerte Füllstoffe aus leicht spaltbaren Materialien (Graphit, Bentonit, hexagonales Bornitrid) integriert, die die Bindungsenergie der metallischen Matrix weiter verringern und Materialübertrag reduzieren.

b) aber auch dichte Materialien (< 30% Poren), bei denen die geringe Scherfestigkeit der Werkstoffe ausgenutzt wird. Je nach Einsatztemperatur können dies sein: Kunststoffe (Elastomere oder Thermoplaste) ohne oder mit Füllstoffen (Graphit, Talkum, Glashohlkugeln, Fasern), Al-Legierungen ebenfalls ohne und mit Füllstoffen wie Polyester, Graphit oder hexagonales Bornitrid, die beim Anstreifen die Spangröße verringern, oder für den

Turbinenbereich auch CoNiCrAlY-Legierungen, die oberhalb 700 °C sehr duktil sind.

Mit solchen Belägen soll ein in Bild 6 schematisch beschriebenes Einlaufverhalten realisiert werden, d.h. der Einlaufbelag wird ohne große mechanische und thermische Belastung der Schaufel zerrüttet und als pulverisierter Abrieb freigesetzt, ohne daß die Schaufeln übermäßig abgerieben werden und kein Materialübertrag von einem Reibpartner auf den Anderen stattfindet.

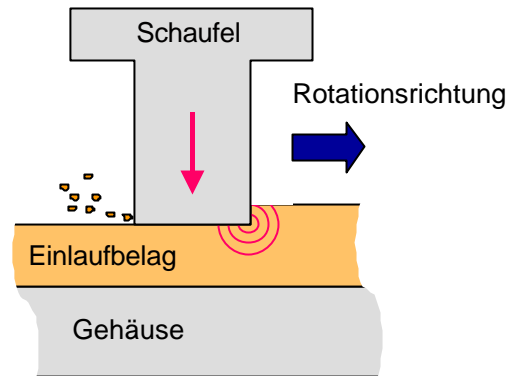


BILD 6: Skizziertes Einlaufen einer Schaufel in den Einlaufbelag nach [3, 4].

Unabdingbar bei Anstreifsystemen ist, dass das mechanisch höher belastete, rotierende Bauteil durch den Anstreifvorgang nicht geschädigt wird. Daher werden Schaufelspitzen und Dichtlippen der Rotoren in zunehmenden Maße gepanzert z.B. durch Aufspritzen von Keramikschichten (Aluminium- oder Zirkonoxid) oder Auflöten von CBN-Hartstoffpartikeln (siehe Bild 4).

##### 4.3. Einlaufbeläge für Hochdruckverdichter

Beispiele für die zeitliche Entwicklung der wichtigsten Auslegungsparameter von Einlaufbelägen im Hochdruckverdichter, um den immer steigenden Anforderungen gerecht zu werden, sind in Bild 7 zu sehen. NiC-Schichten sind seit Jahrzehnten im Triebwerkseinsatz und haben zum Zeitpunkt ihrer Einführung die oben aufgezählten Randbedingungen mit Ausnahme der Temperaturbeständigkeit und der Wärmedämmwirkung erfüllt. Um dennoch eine ausreichende Wärmedämmung zu erzielen, wurde ein Verbundeinlaufsystem mit einer Zirkonoxidschicht verwendet. Die zu geringe Temperaturbeständigkeit mußte jedoch akzeptiert werden, da zum Zeitpunkt der Einführung kein besser Einlaufbelag zur Verfügung stand.

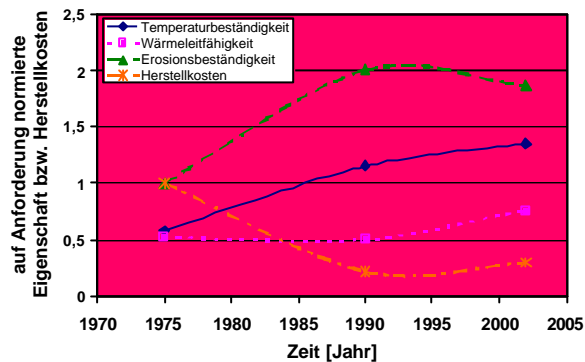


BILD 7: Zeitliche Entwicklung der auf die Anforderungen normierten Eigenschaften bzw. Herstellkosten von Einlaufbelägen. Die Eigenschaften der Einlaufbeläge wurde an Proben mit der für die jeweiligen Schichten typischen Härte bestimmt.

Die Weiterentwicklung der Verdichter zu immer höheren Wirkungsgraden und Verdichtungsverhältnissen haben jedoch zu immer höheren, insbesondere thermischen und erosiven Belastungen geführt. Bei NiCrAl/Bentonit wurde durch Verwendung oxidationsbeständigerer Werkstoffe für die metallische Matrix, als auch den Füllstoff, speziell auf die vorgenannten Eigenschaften eingegangen. Es zeigte sich jedoch, daß der keramische Füllstoff, obwohl es sich um eine relativ „weiche“ Keramik handelt (Ziegelmehl), bei Verdichterschaukeln aus Titanlegierungen zu unzulässig hohem Verschleiß führt. Deshalb müssen bei diesem Einlaufbelag die Schaufeln gepanzert werden, wodurch die Herstellkosten drastisch gegenüber dem Einlaufsystem mit Ni/C-Schichten steigen.

Erst mit dem CoNiCrAlY/hBN-Belag wurde bei guter Oxidationsbeständigkeit die Einlauffähigkeit des NiC-Belages wieder erreicht, da als Füllstoff das ebenfalls leicht spaltbare Hochtemperatur-Analogon zum Graphit, das hexagonale Bornitrid (hBN) verwendet wird [5].

An diesem Beispiel soll die Struktur eines Einlaufbelages im Detail beschrieben werden. In Bild 8 ist die schematische Schichtstruktur eines porösen (low density) Einlaufbelages dargestellt.

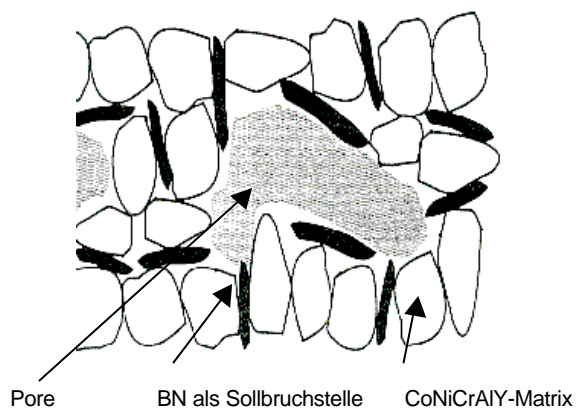


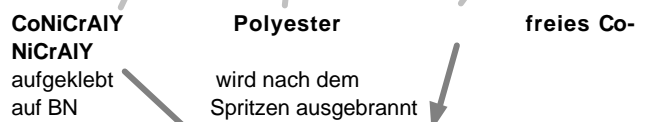
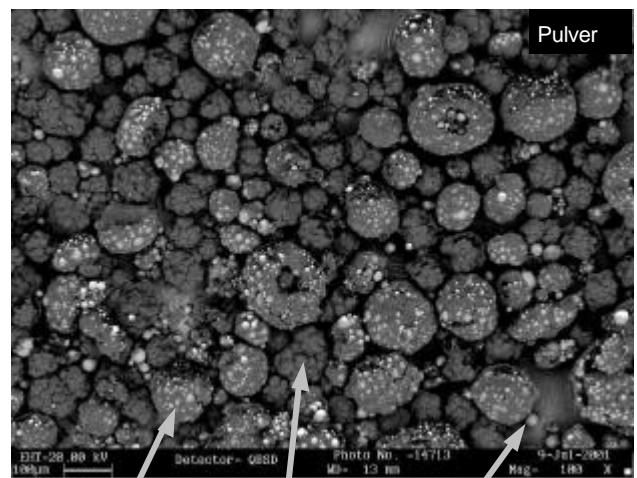
BILD 8: Schematische Schichtstruktur eines porösen Einlaufbelages.

Bild 9 zeigt die pulverförmigen Ausgangskomponenten sowie einen porösen Einlaufbelag aus CoNiCrAlY/hBN als Ergebnis des im folgenden näher erläuterten Plasmaspritzprozesses.

## 5. HERSTELLUNG DER EINLAUFBELÄGE

### 5.1. Thermisches Spritzen

Für die Herstellung der Verbundeinlaufbeläge mit Schichtdicken im Millimeterbereich finden üblicherweise Thermische Spritzverfahren Anwendung. Sie bieten sich als Fertigungsverfahren für die Verbundeinlaufbeläge, die aus unterschiedlichen aber in der Regel spritzbaren Schichtwerkstoffen bestehen, besonders an. So lassen sich mit diesem Beschichtungsverfahren ausnahmslos alle schmelzbaren Werkstoffe verspritzen. Ein weiterer Vorteil des weit verbreiteten Thermischen Spritzens liegt in der nahezu unbegrenzten Kombinationsmöglichkeit zwischen Schicht- und Grundwerkstoff.



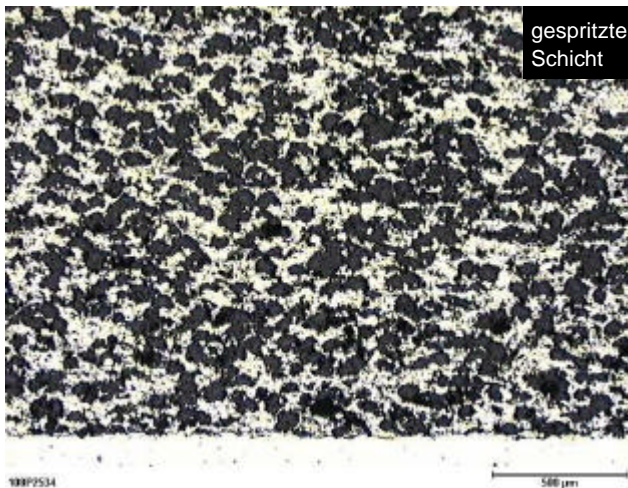


BILD 9: Pulverförmige Ausgangskomponenten und plasmagespritzter poröser Einlaufbelag aus CoNiCrAlY/BN.

Seit Anfang des letzten Jahrhunderts wurden viele Thermische Spritzverfahren wie das Flamm-, Hochgeschwindigkeitsflamm-, Lichtbogen- und Plasmaspritzen entwickelt. Die Spritzanlagen unterscheiden sich vorwiegend durch die verwendete Wärmequelle, die zur Verarbeitung des Spritzwerkstoffes benötigt wird. Welches dieser kommerziell erhältlichen Verfahren im jeweiligen Anwendungsfall zum Einsatz kommt, hängt von den zu verspritzenden Materialien, den zu erzielenden Schichteigenschaften und nicht zuletzt von der Kostenrechnung ab. Im Beispiel des CoNiCrAlY/hBN-Einlaufbelages werden die drei unterschiedlichen Schichtlagen mit Hilfe des Plasmaspritzverfahrens hergestellt. Das Verfahren ermöglicht durch seine hohen Prozesstemperaturen auch die Verarbeitung von hochschmelzenden Materialien wie beispielsweise des Zirkonoxids der Wärmedämmschicht.

Durch Wahl des gleichen Herstellungsverfahrens sowohl für die Haftschrift, für den Einlaufbelag und für die Wärmedämmschicht, können die drei Schichtlagen des Verbundeinlaufbelages an einer Spritzanlage hergestellt und somit die Beschichtungskosten vergleichsweise gering gehalten werden.

Wie in Bild 10 dargestellt wird beim Plasmaspritzen zwischen Kathode und Anode ein Lichtbogen gezündet, der das durch die Spritzpistole strömende Plasmagas erhitzt und beschleunigt. Dadurch bildet sich ein Plasmastrahl, der im Kern eine Temperatur bis zu 20000 °C erreichen kann. Als Plasmagase werden Argon, Wasserstoff, Stickstoff und Helium oder deren Gemische verwendet. Das außerhalb der Spritzpistole mit Hilfe eines Trägergases in den Plasmastrahl injizierte pulverförmige Spritzgut wird dort an- oder aufgeschmolzen und auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt. Mit der hohen thermischen und kinetischen Energie prallen die Partikel des pulverförmigen Spritzgutes auf die zu beschichtende Oberfläche, wo sich eine Schicht ausbildet. Je nach gewählten Beschichtungsparametern wie

Stromstärke, Primärgas-, Sekundärgas- und Trägergasfluss bilden sich die charakteristischen, in Abnahmestandards spezifizierten, Schichteigenschaften aus.

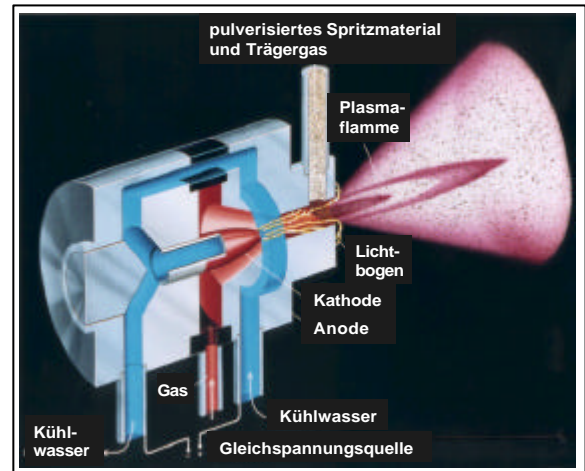


BILD 10: Schematische Darstellung des Plasmaspritzprozesses nach [6].

Obwohl der thermische Spritzprozess schon weitgehend automatisiert ist, unterliegen die Eigenschaften thermisch gespritzter Schichten selbst bei scheinbar konstanten Beschichtungsparametern großen Streuungen. Ursächlich hierfür sind eine Vielzahl von Einflussgrößen sowie der komplexe Zusammenhang zwischen den Prozessparametern und den Schichteigenschaften. Deshalb ist der Spritzprozess äußerst empfindlich gegenüber Prozessschwankungen. Mit der daraus resultierenden, variierenden Schichtqualität entstehen hohe Kosten durch Qualitätssicherungsmaßnahmen und durch Nacharbeit, sowie bei der Entwicklung neuer Prozessparameter.

## 5.2. Prozeßkontrolle

Bisher können die Schichteigenschaften überwiegend nur durch zerstörende Prüfmethode an Dummys überprüft werden, die vor oder mit den eigentlichen Bauteilen beschichtet werden. Diese Qualitätssicherungsmethode ist sehr kosten- und zeitintensiv. Eine Möglichkeit, die hohen anfallenden Kosten beim Thermischen Spritzen zu reduzieren, besteht im Einsatz einer Online-Prozesskontrolle. Bei dieser modernen Qualitätssicherungsmethode werden die Partikeleigenschaften wie Partikeltemperatur, -geschwindigkeit, -größe, Leuchtintensität der Partikel etc. im Plasmastrahl bzw. in der Flamme erfasst.

Zur Veranschaulichung des Prinzips der Online-Prozesskontrolle wird diese im folgenden an Hand des Prozesskontrollsystems PFI (Particle Flux Imaging) [7] näher erläutert. Dieses System nimmt mit Hilfe einer

CCD-Kamera die für den jeweiligen Beschichtungsprozess charakteristischen Leuchtdichteverteilungen des Plasma- und des Partikelstrahls auf. Aus den Aufnahmen werden anschließend durch einen Algorithmus die Höhenlinien mit gleicher Leuchtintensität berechnet (siehe Bild 11).

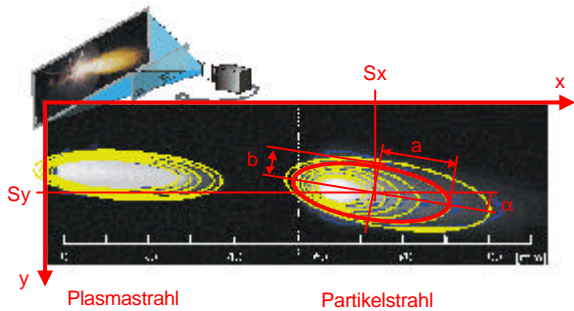


BILD 11: Funktionsprinzip des Online-Prozesskontrollsystems PFI [7], Höhenlinien gleicher Leuchtintensität mit einbeschriebenen Ellipsen und den daraus ermittelten Ellipsenkenngößen.

In diese Höhenlinien werden Ellipsen für den Plasma- und Partikelstrahl einbeschrieben, deren Kenngößen, wie die Halbachsen  $a$  und  $b$ , der Schwerpunkt der Ellipsen etc. den aktuellen Zustand des Spritzprozesses eindeutig definieren. Liegen die Ellipsenkenngößen außerhalb von Prozessschranken, die durch Korrelationen zwischen den Prozessparametern, den Partikeleigenschaften und den Schichteigenschaften für jede Spritzschicht zu bestimmen sind, erfolgt eine Warnmeldung. Diese signalisiert, dass mit dem aktuellen Zustand des Spritzprozesses nicht die spezifizierten Schichteigenschaften erzeugt werden und folglich die Beschichtung abgebrochen werden muss. Durch die beschriebene Vorgehensweise wird eine fehlerhafte Beschichtung und eine anschließende kostspielige Entschichtung von Bauteilen vermieden.

## 6. BAUTEILPRÜFUNG

Bauteilprüfungen bilden die Brücke zwischen Probenversuchen und Triebwerkstests. Bei der Bauteilprüfung werden die geforderten mechanischen und thermischen Bauteileigenschaften überprüft. Zudem ermöglicht sie auch im Hinblick einer gezielten Werkstoff- und Verfahrensentwicklung eine schnelle und effektive Rückkopplung zu den einzelnen Disziplinen.

### 6.1. Einlauffähigkeit von Belägen

In einem hausintern entwickelten Anstreichprüfstand wird die Einlauffähigkeit von Belägen untersucht (siehe Bild 12). Bei voller Drehzahl des Rotors wird dieser mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten der radialen Verschie-

bung zum Einlaufen in den Belag gebracht. Hierbei erwärmen sich die Schaufelspitzen, was mittels Thermoelementen überwacht wird. Die Erwärmung darf keine Veränderung der Werkstoffeigenschaften hervorrufen.

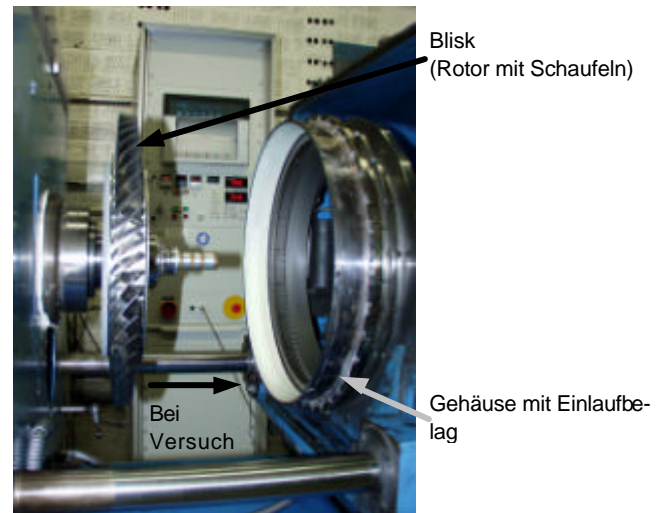


BILD 12: Anstreichprüfstand mit Blick (integrierter Rotor mit Schaufeln) und Gehäuse im ausgefahrenen Zustand.

Auf diese Weise können die zulässigen Anstreichparameter ermittelt werden. Erfüllen diese die gestellten Anforderungen dann ist das Entwurfsziel erreicht. Ist dies nicht der Fall, so geben die Versuchsergebnisse in der Regel genügend Hinweise zur weiteren Optimierung der Struktur des Einlaufbelages. Dabei sind die Forderungen an die nachfolgenden Eigenschaften ebenfalls zu erfüllen.

### 6.2. Erosionsbeständigkeit

Die Erosionsbeständigkeit der Beläge wird in einem Erosionsprüfstand ermittelt. Das Erosionsmedium Sand wird dazu mittels strömender Luft auf die geforderte Strömungsgeschwindigkeit gebracht, z.B. 250 m/s. Dies erfolgt in einer Beschleunigungsstrecke, welche mit entsprechendem Druck und der geforderten Sandmenge gespeist wird. Für Tests bei erhöhten Temperaturen wird ein elektrische Heizeinrichtung verwendet. Die bei der Prüfung einzustellenden Parameter sind Strömungsgeschwindigkeit, Beladungsdichte (Sand/Luftdurchsatz) Prüftemperatur, Fördermenge, Anströmwinkel und Partikelgröße. Anhand der Ergebnisse können relative Aussagen über die Erosionsbeständigkeit der Beläge gemacht werden. Durch den Vergleich von Belägen mit bekannter Erosionsbeständigkeit aus dem Triebwerkseinsatz kann eine relativ zuverlässige Bewertung erfolgen.

### 6.3. Titanfeuerbeständigkeit

Bei einem Titanfeuer im Verdichter werden die Verdichtergehäuse durch flüssiges und brennendes Titan von Laufschaufeln stark beansprucht. Um ein „Durchbrennen“ zu verhindern, müssen zusätzlich Titanfeuerschutzschichten eingesetzt werden. Die Resistenz gegen Titanfeuer wird im Titanfeuer-Rig untersucht. Im Prüfstand werden definierte Titanblechstreifen gezündet und diese brennen dann selbständig ab. Die Schmelzpartikel treffen mit hoher Geschwindigkeit auf eine sogenannte Containmentprobe. Diese simuliert ein Gehäuse mit Schutzschicht. Bewertet wird der Schichtabbrand (siehe Bild 13) und die Temperaturentwicklung auf der Rückseite.



BILD 13: Titanfeuerschutz-Versuch: Die Wärmedämmschicht hat ein Durchbrennen des Verbundeinlaufbelages verhindert.

Der Prüfaufbau ermöglicht Tests unter triebwerksnahen Strömungs-, Druck- und Temperaturbedingungen. Es können Aussagen zur Schichtauswahl, Schichtdicke und auch zum Grundwerkstoff gemacht werden. Hierzu wird das Abbrennverhalten des Brenneleches bewertet.

### 6.4. Thermografieprüfung

Die Thermografie wird zur zerstörungsfreien Überprüfung der Verbundeinlaufbeläge eingesetzt. Haft- und Bindefehler in und zwischen den einzelnen Schichten können ebenso zuverlässig detektiert werden, wie Risse, die innerhalb einer Schicht entstanden sind. Damit dient diese Prüftechnik nicht nur zur Qualitätssicherung von plasmagespritzten Neuteilen, sondern ermöglicht auch im Rahmen der Bauteilprüfung durch das Erkennen von Vorschädigungen eine schnelle Rückkopplung zur Werkstoff- und Verfahrensentwicklung. In Bild 14 ist das Prinzip der Thermografieprüfung dargestellt.

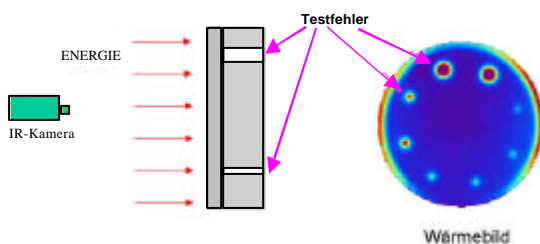


BILD 14: Funktionsprinzip der Thermografieprüfung.

Bild 15 zeigt die Realisierung des ersten Thermografie-Serienprüfstandes für Verbundeinlaufbeläge.

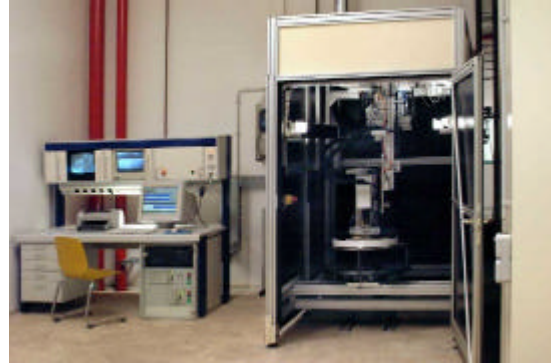


BILD 15: Thermografie-Serienprüfstand.

### 6.5. Thermowechselprüfung

Verbundeinlaufbeläge in Verdichtergehäusen müssen die wechselnden thermischen Belastungen während des Betriebs rissfrei überstehen. Dazu werden beschichtete Gehäuse realen thermisch-zyklischen Belastungen unterzogen.

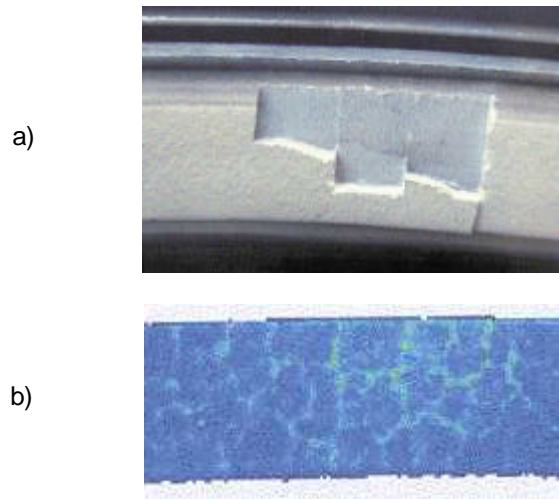


BILD 16: Einlaufbelag nach einer Thermowechselprüfung a) makroskopische Aufnahme von Schichtabplatzungen, b) Ergebnis einer Thermographiemessung an einer vorgeschädigten Schicht.

Ein Zyklus besteht aus 6 Minuten heizen und 6 Minuten kühlen, also 5 Zyklen pro Stunde. Für jede Verdichterstufe ist dabei sowohl die maximal auftretende Temperatur als auch der Temperaturgradient über die gesamte

Gehäusewandung, d.h. von Gehäusewand außen bis Schichtoberfläche innen zu simulieren. Bei der Durchführung des Tests wird abwechselnd das Gehäuse bzw. der Belag mittels Heizgas einer Brennkammer von innen beheizt und anschließend von außen mit Druckluft gekühlt. Der Belag muss einige tausend Zyklen rissfrei überstehen. Rissfreiheit wird durch lichtoptische Untersuchungen und durch Thermografiemessungen festgestellt (siehe Bild 16).

## 6.6. Ermüdung

Der Druckunterschied zwischen Druck- und Saugseite an den rotierenden Laufschaufeln bewirkt eine sehr hochfrequente Druckwechselbeanspruchung des Belages. Es können Frequenzen bis zu 20 kHz bei Amplituden bis 5 bar auftreten. Die Anregung erfolgt über den Luftstrom. Üblicherweise wird diese Belastung mit einem Aufbau nach dem „Helmholtzresonatorprinzip“ realisiert und simuliert.

## 7. INSTANDSETZUNG

Eine weitere Anforderung für die Anwendung einer Schicht auf einem Bauteil ist, dass diese Schicht auch wieder entfernt und erneuert werden kann.

### 7.1. Allgemeine Verfahren zum Entschichten

Es gibt seit Jahrzehnten erprobte Entschichtungsverfahren, die meist auf einer Kombination von mechanischen und chemischen Prozessen beruht.

Sofern ein chemischer Prozess zur Verfügung steht, mit dem eine Schicht ohne Angriff des Grundwerkstoffes wirtschaftlich abgetragen werden kann, wird dieser angewendet, da geometrische Veränderungen am Bauteil z.B. Verzug, unberücksichtigt bleiben können.

Meistens wird jedoch der chemische Prozess durch ein mechanisches Abtragen, wie Drehen, Schleifen oder abrasives Strahlen unterstützt. Weil in einem Verbundbelag die keramische Zwischenschicht chemisch resistent ist, wird der überwiegende Teil der Schicht ausgedreht oder gestrahlt und nur die Haftschiicht chemisch entfernt.

### 7.2. Hochdruckwasserstrahlen

Eine echte Alternative zum chemischen Entschichten ist das Hochdruckwasserstrahlen. Bei diesem Verfahren wird durch einen, in hoch beschleunigte einzelne Tröpfchen zerfallenden Hochdruckwasserstrahl die Schicht zerrüttet (siehe Bild 17). Die Prozessparameter Druck, Abstand, Übergangsgeschwindigkeit und Strahldüsenquerschnitt können so gewählt werden, dass die kom-

plette Verbundschicht abgetragen wird, aber der Grundwerkstoff unversehrt bleibt oder aber nur der Einlaufbelag abgetragen wird. Dies ist notwendig, wenn bei Neuteilfertigung der Einlaufbelag mit einem falschen Härtewert hergestellt wird oder wenn der Belag nach einem Triebwerkeinsatz beschädigt ist und erneuert werden muss. Nach Absicherung der Unversehrtheit der verbleibenden Wärmedämm- und Haftschiicht z.B. mittels Thermographie können die entfernten äußeren Schichten wieder aufgebracht werden.



BILD 17: Entschichtung durch Hochdruckwasserstrahlen.

## 8. ZUSAMMENFASSUNG

Die Beschreibung der vielseitigen Anforderungen an ein Dichtsystem für einen Hochdruckverdichter zeigt die Herausforderungen, die sich bei der Entwicklung stellen. Diese Herausforderungen lassen sich nur durch interdisziplinäre Arbeitsweisen meistern. Um zu guten Entwicklungsergebnissen zu gelangen, müssen der konstruktive Verdichterentwurf, das thermische Teileverhalten, Werkstoffeigenschaften, Verfahrensparameter für die Fertigung, die Qualitätskontrolle und Reparaturforderungen in Einklang gebracht werden und durch vielseitige Bauteilprüfungen verifiziert werden.

Der vorliegende Artikel zeigte aber auch, wie wichtig Dichtsysteme und im speziellen die Einlaufbeläge für das Gesamttriebwerk sind. Sie werden benötigt, um minimale Spalte zwischen rotierenden und statischen Bauteilen während der wechselnden Betriebsbedingungen des Triebwerks sicher zu stellen. Dichtsysteme leisten einen wesentlichen Beitrag zur Realisierung hoher Komponentenwirkungsgrade und zu stabiler Arbeitsweise der Komponenten in allen Betriebspunkten. Sie unterstützen damit die Reduzierung des Treibstoffverbrauchs und haben wesentlichen Einfluß auf Zuverlässigkeit und Sicherheit der Flugtriebwerke. Zu Recht darf man sie deshalb als Schlüsselsysteme für das Triebwerk bezeichnen.

## 9. LITERATUR

- [1] K. Steffens, A. Schäffler: Triebwerksverdichter – Schlüsseltechnologie für den Erfolg bei Luftfahrtantrieben, DGLR Jahrbuch 2000, **1**
- [2] G. Albrecht :Grundlagen zur Minimierung der Laufspalte in Turbomaschinen; DGLR-Jahrestagung 1999, Berlin
- [3] T.J. Uihlein: Airseals for Advanced Military Jet Engines; AGARD-CP589, 17(1-19) (1996)
- [4] Söhngen: A New Analytical Model for Interpreting the Wear Mechanisms of Abradable Seal System und Verification by Testing; ASME 89-GT-331 (1989)
- [5] R. K. Schmid, F. Ghasripoor, M. Dorfmann, X. Wie: An Overview of Compressor Abradables. In: C. C. Berndt (Herg.): Thermal Spray – Surface Engineering via Applied Research, Proceedings of the 1<sup>st</sup> Int. Thermal Spray Conf., ASM International, Materials Park, 2000, S. 1087 - 1093
- [6] S. Schneiderbanger, T. Cosack: Thermisches Spritzen im Triebwerksbau, DVS-Sondertagung, Moderne Werkstoffe in Luft und Raumfahrzeugbau – Schweißen, Löten, Thermisches Spritzen, 7.-8. Jun. 2000, Berlin
- [7] J. Zierhut, R. Hartmann, K. D. Landes: Indirektes Plasmatron, Europäisches Patent 97810823.1-2208 (1997)