

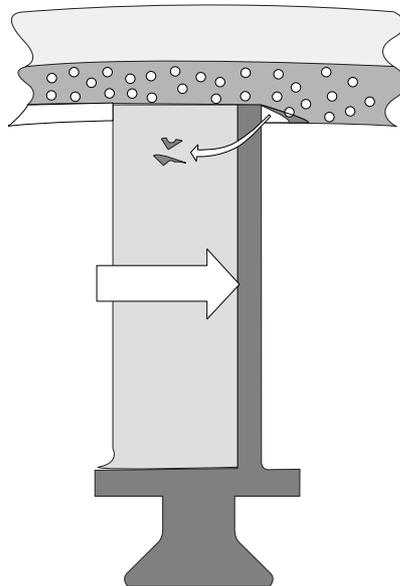
7.1 Anstreifverhalten und Spalthaltung an Schaufelspitzen

7.1.1 Grundlagen des Anstreifvorgangs

7.1.2 Spaltänderungen

7.1.3 Schäden durch Anstreifen

7.1.4 Abhilfen gegen Schäden



7.1.1 Grundlagen des Anstreifvorgangs an Schaufelspitzen

Ursachen für Anstreifvorgänge und besondere Anforderungen an das Anstreifsystem:

Anstreifvorgänge an Schaufelspitzen können sehr verschiedene Ursachen haben. Mit Anstreifsystemen müssen deshalb neben einer Spaltminimierung unterschiedlichste Betriebszustände und Anforderungen beherrscht werden. Daraus ergeben sich besondere Forderungen an Anstreifsysteme. Anstreifvorgänge dürfen z.B. Schadensabläufe nur so beeinflussen, dass die Folgeschäden möglichst gering gehalten werden. Der turbinenseitige Rotor ist bei Wellentrennern abzubremesen, um gefährliche Überdrehzahlen zu vermeiden. Der Bruch einer Schaufel darf nicht zum Bruch der restlichen Schaufeln führen. Anstreifvorgänge sollten nicht selbstverstärkend sein und dürfen das Gehäuse nicht überlasten (thermisch, mechanisch, Verschleiß). Diese Gefahr besteht insbesondere dann, wenn Blattbruchstücke von den Spitzen der Schaufeln überlaufen werden. Es darf zu keinem (Titan-) Feuer bzw. zu keinen (Staub-) Explosionen kommen.

Das Anlauf- / und Einlaufverhalten von Tribosystemen zur Spaltminimierung

Wegen der vielfältigen Betriebseinflüsse (Bild 7.1.1-1) auf ein Spalthaltungssystem ist dessen Entwicklung und Optimierung äußerst zeit- und kostenaufwändig (Bild 7.1.1-2). Ein besonderes Problem ist die ausreichend betriebsnahe Charakterisierung, Prüfung und Erprobung der Eigenschaften von An- und Einlaufsystemen. Dies beginnt bei der Qualitätssicherung im Fertigungsprozess, gilt für die Bewertung in technologischen Versuchen und die Erprobung im Triebwerk. Die Beurteilung der Prüfergebnisse wird sinnvollerweise vergleichend mit Erfahrungen an Systemen aus dem Triebwerksbetrieb erfolgen. Die Erprobung sollte möglichst an Originalbauteilen oder diesen ausreichend ähnlichen Proben erfolgen, weil bauteiltypische Eigenschaften, wie z.B. das Schwingverhalten, Steifigkeiten, Querschnitte und damit die Wärmeabfuhr für das Ergebnis von entscheidender Bedeutung sind. Letztendlich ist das Langzeitverhalten im Triebwerk im typischen Betrieb entscheidend („the engine will tell us!“). Die Auswahl der Werkstoffe des Tribosystems muss neben dem Anstreifverhalten eine Vielzahl weiterer Forderungen berücksichtigen. Hierzu gehört:

- Keine unzulässige Beeinflussung der Komponenten (z.B. durch Schwingermüdung oder Überhitzung).
- Keine Schädigung anderer Bauteile durch Abriebpartikel (z.B. Heißeilverstopfung, Reaktionen mit Heißeiloberflächen, Erosion).

Anstreifparameter

Die Ausbildung und Größe eines Spalts zwischen Bauteilen mit unterschiedlichen Umlaufgeschwindigkeiten hängt von verschiedenen Parametern ab und kann variieren. Zu den Anstreifparametern gehören Zustellung, Anstreifgeschwindigkeit und Zeitdauer. Wichtiges Merkmal der Zustellung ist die Art der Zustellbewegung. Diese kann kontinuierlich oder oszillierend, bleibend (z.B. bei plastischen Verformungen durch Kriechen) oder reversibel (z.B. bei Wärmedehnungen oder elastischen Verformungen) ablaufen. Beim Anstreifvorgang ist der Kontaktbereich von erheblicher Bedeutung (z.B. für die Wärmeentstehung und Schwingungsanregung). Die Schaufelspitzen können über den gesamten Umfang, nur über eine kurze Strecke oder periodisch mit der Gegenfläche in Kontakt stehen. Typische Ursachen für den ungleichmäßigen Verzug eines Gehäuses sind Steifigkeitssprünge im Bereich von Axialflanschen.

Zeitabläufe und Zustellung:

Von den Anstreifbedingungen hängt die Beanspruchung der Bauteile beim Anstreifvorgang ab. Hierzu gehören Schwingungsanregungen, statische Verformungen und die Aufheizung der Schaufeln, Rotornaben und Gehäuse.

Natürlich sind die Zustellbewegungen die zur Spaltüberbrückung führen ebenfalls durchaus unterschiedlich. Stoßartige Rotordurchbiegungen können in Sekundenbruchteilen einen Anstreifvorgang ablaufen lassen, Wärmedehnungen bei Gehäusen können Minuten benötigen.

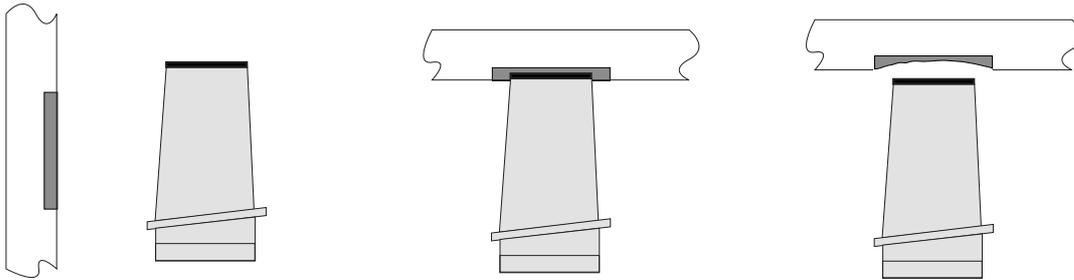
In Lit. 7.1.1-3 wird festgestellt, dass **langsame Zustellbewegungen bei hohen Betriebstemperaturen schwere, besonders schädigende, Anstreifvorgänge auslösen. Höhere Zustellgeschwindigkeiten sind dagegen bei niedrigen Betriebstemperaturen gefährlicher.**

Die Spaltüberbrückung zwischen rotierenden und statischen Bauteilen ist bauteilspezifisch von Parametern wie Anstreifzeit, Zustellung, Kontaktweg bzw. Kontaktfläche abhängig:

- Große Zustellungen in Sekundenbruchteilen bei großen Unwuchten in Schadensabläufen (Verdichterpumpen, Vogelschlag, Unwuchten)
- Große Zustellungen in Sekundenbruchteilen durch Verformungen von Gehäusen und Leitapparaten als Folge von Schäden bzw. extremer Krafteinwirkung (z.B. Vogelschlag, Containment bei Schaufelbruch)
- Zustellung in Sekundenbruchteilen als Folge eines Fremdkörpers im Spalt
- Axiale große und schnelle Anstreifvorgänge, besonders mit Axialbewegungen als Folge von Wellentrennern.
- Schnelle große Zustellung durch selbstverstärkende Anstreifvorgänge wie „Fangen“ und Aufdrehen einer Fanschaufel im Gehäuse oder Materialaufbau durch Aufschmieren.
- Kleine schnelle radiale Zustellungen in Sekundenbruchteilen durch hochfrequente Schwingungen von Gehäusen und/oder Rotorkomponenten.
- Über Sekunden anwachsende große Zustellung (z.B. bei Rotorverkrümmung)
- Elastische Verformungen im Minutenbereich von Gehäusen und/oder Rotoren (z.B. bei Kurvenflug durch Trägheitskräfte und Kreiselkräfte).
- Langsame, relativ kleine Zustellung über mehrere Minuten (z.B. bei Dehnungsunterschieden durch thermische Dehnungen, Fliehkräfte, Gasdrücke).

Anstreifen und Spalthaltung: Schaufelspitzen: Grundlagen

Ein Anlauf- oder Einlaufsystem muss einer Vielzahl unterschiedlichster, teilweise gegensätzlicher Forderungen genügen.



Herstellung

- Schichten:
 - Struktur
 - Härte
 - Festigkeit
 - Haftfestigkeit
 - Eigenspannungen
 - Dicke
 - zulässige Fehlstellen
 - Kosten
 - Machbarkeit
 - Prüfbarkeit
 - Entfernbarkeit
 - Erneuerung/Reparatur
- Gegenflächen (Schaufel- und Labyrinthspitzen):
 - geeignete Geometrie
 - Panzerung
 - Reparaturfähigkeit

Funktion

- Anstreifverhalten:
 - keine unzulässigen Schädigungen (z.B. thermisch oder Schwingermüdung)
 - gewünschtes Verschleißverhalten
 - keine Schwingungsanregung anderer Bauteile.
 - kein katastrophaler Versagensmechanismus
 - kein Zünden eines Titanfeuers
 - kein Zünden eines Ölfeuers (Funkenbildung)
 - keine Staubexplosion
 - Funktionsfähig nach Modultausch
- Dichtwirkung:
 - gute Dichtwirkung
 - ausreichende Dichtwirkung über die vorgesehene Lebensdauer.
- Spaltkontrolle:
 - Wärmeisolation
 - Wärmeleitung

Betriebseinflüsse

- auf das Tribosystem:
 - geringe Alterung (z.B. Oxidation)
 - Schwingfestigkeit (z.B. "blade passing frequency", Gehäuse-schwingungen)
 - Korrosionsfestigkeit
 - Erosionsfestigkeit
 - ausreichende Haftfestigkeit von Schichten (LCF, HCF)
- auf andere Komponenten:
 - Keine unzulässige Erosion durch Abrieb aus dem Anstreifvorgang
 - keine unzulässigen Reaktionen des Abriebs mit Heißeiloberflächen
 - keine korrosive Wirkung
 - keine gefährlichen (harten) Fremdkörper im Ölkreislauf (Lager)
 - keine Heißeilverstopfung
 - keine Verschmutzung von Pyrometerlinsen

Bild 7.1.1-1

Bild 7.1.1-1: Die Vielzahl oft gegensätzlicher Anforderungen an Anstreifsysteme macht Kompromisse notwendig.

Herstellung:

Schichten:

Die **Struktur** einer Schicht beeinflusst das Zerspanungsverhalten und Alterungsprozesse (z.B. Oxidation, Korrosion). Sie wird von Merkmalen wie Porosität, Ausrichtung (z.B. Lagen bei Spritzschichten), Anordnung, Größe und Form unterschiedlicher Phasen (z.B. Nickel und Grafit) bestimmt. Schichteigenschaften lassen sich über die Parameter des Beschichtungsprozesses (z.B. thermisches Spritzen) in weiten Grenzen beeinflussen.

Die **Härte** einer Schicht beeinflusst neben dem eigenen Abriebverhalten den Verschleiß an der Gegenfläche. Die Messung der Härte poröser, vielphasiger spröder Schichten ist äußerst problematisch und ergibt gewöhnlich stark streuende Werte die nur bedingt für eine ausreichend sichere Qualitätskontrolle geeignet sind.

Festigkeit: Struktur und Härte bestimmen die innere Festigkeit der Schicht. Diese ist zusammen mit dem Verformungsverhalten (spröde oder duktil) von besonderer Bedeutung für das Zerspanungsverhalten und damit die Anstreifkräfte, welche auf die Schaufelspitze wirken. Sie beeinflusst zusätzlich die Erosionsempfindlichkeit der Schicht und das Schwingerermüdungsverhalten.

Haftfestigkeit: Schichten müssen über die gesamte Betriebszeit, insbesondere die Betriebszyklen, sicher auf dem Substrat/Bauteil haften. Unterschiedliche Wärmedehnungen und mechanische Belastungen (z.B. Fliehkräfte) müssen ohne unzulässige Schwächung der Haftfestigkeit aufgenommen werden. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Haftfestigkeit wird gewöhnlich zuerst eine Haftsicht auf die mechanisch aufgerauhte Bauteiloberfläche (abrasiv gestrahlt) aufgebracht. Eine geeignete mechanische Verklammerung (Rauigkeit und

Topografie) und ausreichende Kohäsionskräfte (Diffusion, Verschweißung) sind Voraussetzung für eine gute Haftfestigkeit. Diese steht zusätzlich in Zusammenhang mit der inneren Festigkeit der Schichten und Eigenspannungen.

Eigenspannungen überlagern sich den Betriebsbelastungen. So können je nach Eigenspannungshöhe und -art entweder die Schichtlebensdauer über die Haftfestigkeit verbessert oder verschlechtert werden. Die Ausbildung der Eigenspannungen ist vom Herstellungsprozess gesteuert. Besonders einflussreich ist die Temperaturführung von Schicht und Substrat beim Beschichtungsvorgang.

Die Dicke einer Einlaufschicht bestimmt die mögliche radiale Zustellung. Sie beeinflusst aber auch den Wärmeübergang in das Bauteil und kann so als Wärmedämmschicht ein Gehäuse thermisch träge machen. Dagegen verbessert eine dichte Al-Spritzschicht den Wärmefluss. Damit trägt die Schicht entscheidend zur Spaltkontrolle bei. Je dicker eine Schicht ist, um so größer sind gewöhnlich die Eigenspannungen im Schicht/Substratsystem.

Zulässige Fehlstellen müssen in seriengeeigneten Verfahren feststellbar und bewertbar sein. Solche Fehlstellen erfordern ausreichend Betriebserfahrungen.

Die Prüfbarkeit von Schichten ist in diesem Zusammenhang eine wichtige Voraussetzung für den Serieneinsatz. Nicht selten sind speziell an den Schichttyp angepasste Verfahren (z.B. Thermografie, oder besondere Eindringverfahren) notwendig. Eine Ultraschallprüfung lässt sich z.B. bei lamellarer Schichtstruktur und/oder Porosität nicht erfolgreich anwenden. Die Kosten eines Anstreifsystems entstehen sowohl durch den Herstellungsprozess, als auch durch, im Rahmen der Überholung notwendige, **Reparaturen. Schichten, die sich nur mit einer merklichen Schädigung wenige Male erneuern lassen, können durch die Bauteilkosten indirekt sehr teuer werden.**

Fortsetzung Seite 7.1.1-6

Anstreifen und Spalthaltung: Schaufelspitzen: Grundlagen

Fortsetzung von Seite 7.1.1-5

Gegenflächen (Schaufel- und Labyrinthspitzen):

Die Herstellung der Geometrie der Gegenfläche darf diese nicht als Schwingfestigkeitsabfall schädigen. Überhitzungen bei einem Schleifprozess oder Schwingerermüdungsrisse beim Überschleifen der Spitzen müssen vermieden werden.

Panzerungen dürfen die aerodynamische Wirksamkeit der Schaufelspitzen nicht unzulässig beeinflussen. Deshalb ist besonders auf die **Einhaltung der vorgegebenen Schichtdicken und die Schichtrauigkeit** zu achten. Bei Panzerungen ist auf Veränderungen der Schwingfestigkeit bzw. das Schwingverhalten der Schaufeln zu achten. Reaktionen der Beschichtung (z.B. Lot für die Einbettung von Hartpartikeln) mit dem Grundmaterial können versprödet wirken. Gegenflächen unterliegen in jedem Fall beim Anstreifvorgang auch einem Verschleiß.

Bei der **Überholung bzw. Reparatur** muss gewöhnlich die Neuteilgeometrie wieder hergestellt werden. Dies ist z.B. durch eine plastische Verformung der Schaufelspitze (feather edging) oder durch Aufschweißen und mechanische Nacharbeit möglich. Labyrinthspitzen werden ebenfalls mit speziellen Verfahren aufgeschweißt und nachgearbeitet. In jedem Fall sind vorher Panzerungen zu entfernen. Eine bei der Überholung bzw. Reparatur nicht ausreichend problemlos entfernbare Panzerung ist deshalb praxisungeeignet. Hierzu gehören chemisch und abrasiv resistente keramische Schichten, deren Entfernung im Ätzbad auch die natürlichen Karbide des Grundwerkstoffs herauslösen. Werkstoffe, die sich nicht Aufschweißen lassen, schränken den Betriebsnutzen der Bauteile wegen der eingeschränkten Reparierbarkeit entscheidend ein.

Darüber hinaus müssen Panzerungen als Voraussetzung für niedrige Anstreifkräfte und geringe Reibungswärme eine ausreichend

schneidfähige Oberfläche aufweisen. Schichten sollten deshalb keine glatte, nachgearbeitete Oberfläche besitzen, sondern eine ausreichende Rauigkeit aufweisen.

Funktion:

Anstreifverhalten:

Beim Anstreifvorgang darf kein Element des Systems unzulässige Schädigungen erfahren. Überhitzungen der Schaufelspitzen, von Anlaufschichten oder Rotor- bzw. Gehäusewandungen müssen vermieden werden. Werkstoffe der Gegenflächen, die beim Anstreifen zu Thermoermüdungsrisse oder Heißrisse neigen, sind genauso wenig geeignet wie Beläge, die beim Anstreifvorgang die Beschauung zu bedenklichen Schwingungen anregen.

Das Verschleißverhalten der Kontaktwerkstoffe des Anstreifsystems muss entsprechend einer Anlauf- oder Einlauffunktion aufeinander abgestimmt sein. Üblicherweise wird man, soweit es sich realisieren lässt, die Gegenflächen (z.B. Schaufelspitzen) möglichst wenig verschleifen lassen, weil eine Reparatur teurer, risikobehafteter und komplexer ist als die Erneuerung des Anstreifbelags.

Ein katastrophaler Versagensmechanismus, durch progressiven Aufbau der Gegenfläche mit Abriebmaterial, sollte durch Panzerungen und konstruktive Gestaltung vermieden werden.

Feuer (Titanfeuer, Ölfeuer) dürfen durch einen Anstreifvorgang nicht ausgelöst werden. D.h. die Aufheiztemperaturen beim Anstreifen dürfen die Zündtemperaturen des Grundmaterials im Luftstrom nicht erreichen. Die Bildung niedrig schmelzender Phasen (Schädigung, brennende Tröpfchen) ist zu vermeiden.

Bei extremen Anstreifvorgängen, z.B. bei großen Unwuchten, müssen große Abriebmengen, die zu einer unbeherrschbaren **Staubexplosion** führen, vermieden werden (Kapitel 9.4). Ein besonderes Gefahrenpotential besteht z.B. bei fein verteilten Metallstäuben (Aluminium, Magnesium, Titan), und/oder Kunstharz- oder

Grafitstaub (grafithaltige Beläge, C-Faser verstärkte Kunststoffe). Dies ist bei der Auswahl des Belagmaterials zu berücksichtigen.

Dichtwirkung:

*Die Dichtwirkung eines Anstreifsystems hängt nicht nur von der Spaltgröße und der Spaltgeometrie ab. Von Einfluss sind auch die Oberflächenstruktur des Belags (z.B. Honeycomb-dichtung) oder eine offene innere **Porosität** (z.B. Metallfilz). Mit einer geeigneten Kontur der Gegenfläche lässt sich diese Problematik entschärfen.*

Erosion oder Ausbrüche durch Betriebseinflüsse wie Schwingermüdung und Thermo-spannungen können die Spaltverluste über die Laufzeit (Deterioration) merklich vergrößern. Es ist deshalb auf ausreichende Langzeitbeständigkeit, insbesondere der relativ weichen Einlaufbeläge, zu achten. Ausreichend aussagefähig ist nur die Betriebserfahrung und/oder realistische Erprobungsergebnisse.

*Beschichtungen beeinflussen den **Wärmeübergang und Wärmedurchgang**. Sie können deshalb, je nach Schichtart, zum schnelleren oder langsameren Erwärmen von Gehäusewandungen oder Rotorkomponenten und damit zu **Spaltänderungen** im Betrieb beitragen. Dies kann oder muss z.B. in Gehäusen des Hochdruckverdichters berücksichtigt und genutzt werden. Änderungen des Belags in Rauigkeit oder Dicke wirken sich somit auch auf die Spaltgrößen, besonders bei instationärem Betrieb, aus.*

Betriebseinflüsse:

Auf das Tribosystem:

Von den Betriebseinflüssen des Gasstroms wie Oxidation, Korrosion, Erosion und Schwingbeanspruchung sind besonders die relativ weichen Einlaufbeläge betroffen. So beginnt bereits zwischen 300 und 400°C eine merkliche Oxi-

dation von Grafitbestandteilen in Ni/Grafit Spritzschichten.

*Druckpulsationen (auch Schallbeaufschlagung) können Ermüdung und Ausbrüche der Beläge auslösen. Bemerkenswert ist die sog. „**Blade Passing Frequency**“ welche auf die Druckverteilung um die Schaufelspitzen zurückzuführen ist. Der Druckberg vor und das Drucktal nach einer Verdichtertrotorschau-felspitze erzeugt beim Vorbeilaufen der Schaufeln hochfrequente Gasschwingungen an den Belägen.*

***Schwitzwasserbildung im Stillstand** unter Einwirkung von Meeresatmosphäre lässt besonders an Al-Pulver gefüllten Kunststoffbelägen im vorderen Verdichterbereich Korrosionsschäden mit Belagausbrüchen entstehen. Kann Schwitzwasser durch Spalte, Risse oder offene Porosität bis zu einem korrosionsempfindlichen Grundwerkstoff oder einer empfindlichen Haftschrift vordringen, werden auch korrosionsunempfindliche Beläge unterwandert und abgelöst. Dieser Effekt ist z.B. bei beschichteten Zwischenringen (Spacern) aus Stählen zu berücksichtigen.*

Der Gasstrom und von ihm mitgeführte Partikel beanspruchen Anstreifbeläge, insbesondere die weichen Einlaufbeläge in Gehäusen, merklich. Sinkt die Festigkeit infolge Alterung, kann eine ausgeprägte Spaltvergrößerung durch Erosion erfolgen und so das Triebwerksverhalten verschlechtern.

Erosion an Heißeilen lässt sich als Folge ausbröckelnder keramischer Schichten beobachten. Werden dünne Oxidationsschutzschichten erosionsgeschädigt, beschleunigen sich Oxidation und Abtrag.

***Wärmedehnungen und Dehnungen unter mechanischen Beanspruchungen** (bei Rotorkomponenten durch die Fliehkräfte, bei Verdichtergehäusen durch den Druckaufbau) können die Haftfestigkeit des Belags auf dem Bauteil absenken und zu Ausbrüchen führen.*

Fortsetzung auf Seite 7.1.1-8

Fortsetzung von Seite 7.1.1-7

Gefährdet sind erfahrungsgemäß harte keramische Zwischenringbeläge mit einem **ungünstigen Eigenspannungszustand** durch die LCF-Beanspruchung infolge der Start/Abstellzyklen.

Folgeschäden nach Versagen der Anstreifschicht:

Anstreifsysteme können auch andere Komponenten des Triebwerks merklich beeinflussen. Belagpartikel, die durch den Anstreifvorgang oder durch Erosion entstehen, werden im Gasstrom mitgeführt und wirken erosiv oder korrosiv auf andere Komponenten. **Reaktionen mit Heißeiloberflächen** sind ebenso zu vermeiden wie eine äußere oder innere Verstopfung der Heißeile. Die Neigung zur **Verstopfung von Heißeilen** hängt u.a. von der Zähigkeit und Schmelztemperatur der Partikelschmelze, die im Brennkammerbereich entsteht, ab. Schmelzen, die mit dem Grundwerkstoff bzw. den schützenden Oxidschichten reagieren, können beim Abkühlen zum Abplatzen (Wärmedehnungsunterschied zwischen Ablagerung und Grundwerkstoff) führen. So wird der Abzehrungsvorgang verstärkt.

Bild 7.1.1-2: Viele **Werkstoffkennwerte** beeinflussen das Anstreifverhalten eines Gehäusebelags (Lit 7.1.1-3). Zu den werkstofflichen Merkmalen gehören Struktur, Dichte, Zusammensetzung und die mechanischen Eigenschaften. Hinzu kommen thermo-physikalische Eigenschaften wie Schmelzpunkt, spezifische Wärme, Wärmeleitfähigkeit und Wärme-dehnung. Eine Auswahl potentieller Belagwerkstoffe nach diesen Kriterien kann wegen der Komplexität des Anstreifvorgangs nicht den praktischen Eignungsnachweis ersetzen. **Die Werkstoffkennwerte sind jedoch hilfreich für Erklärung bzw. Interpretation der Versuchsergebnisse. Es bleibt festzuhalten:**

Die Entwicklung und Prüfung von Anstreifsystemen erfordert entsprechend dem Anforderungsspektrum vielfältige technologische Prüfungen. Hierzu gehören:

A und F: Messung des Abriebverhaltens. Im Aufbau A wird die Energieabgabe einer pendelnden Schneide für einen vorgegebenen Abrieb der zu prüfenden Belagprobe gemessen (Lit. 7.1.1-9). Messwerte an dieser Anlage streuen erfahrungsgemäß stark und entsprechen nicht ausreichend dem Triebwerksbetrieb mit weit höheren Schnittgeschwindigkeiten und unterschiedlichen Bauteilelastizitäten. Aussagekräftiger, aber auch bedeutend aufwändiger, sind **Versuche mit Originalteilen in einem Anstreifprüfstand („F“)**.

B: Bei dieser Anordnung zur Ermittlung der **Schwingfestigkeit** im Belag und an der Haftfläche wird ein Ultraschallwerkzeug gegen das Substrat (Gehäusewand) gedrückt. So lassen sich hochfrequente Schwingungen der Luft („blade passing frequency“) und der Gehäuse einigermaßen simulieren. Diese Versuche sind eher zur Schadenssimulation geeignet, um Verbesserungen im Vergleich abzusichern.

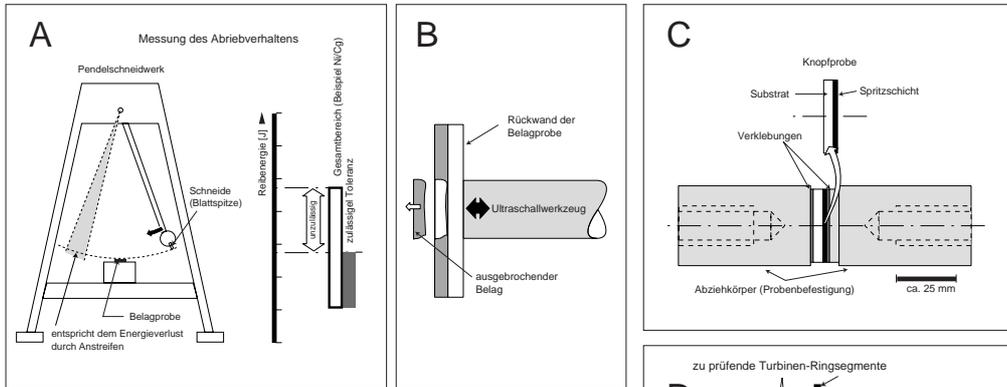
C: Die **Haftfestigkeitsprüfung** erfolgt an „Knopfproben die zwischen zwei Einspannungen für eine Zugprobe geklebt werden. Haft- bzw. Schichtfestigkeiten über der Festigkeit dieser Kunstharzkleber sind somit nicht zu ermitteln. Dies gilt insbesondere für Temperaturen, bei denen die Festigkeit des Klebers merklich abfällt (ca. 100°C).

D: Die **thermische Wechselfestigkeit (Thermoermüdung)** kann durch wechselnde Anströmung mit Heißgas und kalter Luft vergleichend abgeschätzt werden. Die Beurteilung der Versuchsergebnisse benötigt Erfahrung mit dem Betriebsverhalten der Komponenten im Triebwerk. Kriterien sind Rissbildung, Ablösungen und Alterung.

Fortsetzung auf Seite 7.1.1-10

Anstreifen und Spalthaltung: Schaufelspitzen: Grundlagen

Eigenschaftsnachweis und Qualitätssicherung sind bei Anstreifsystemen eine anspruchsvolle Aufgabe



Wichtige Eigenschaften eines Anstreifsystems

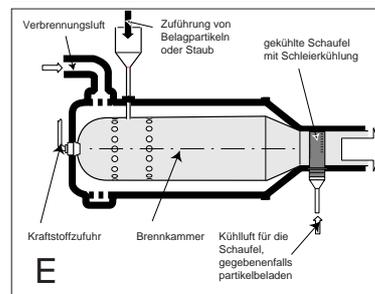
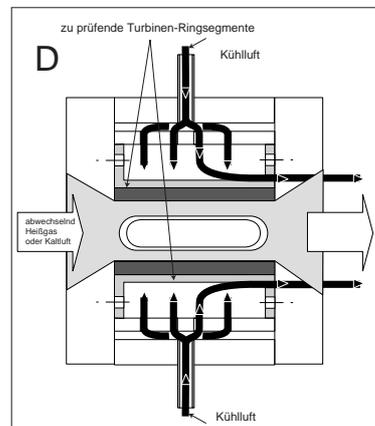
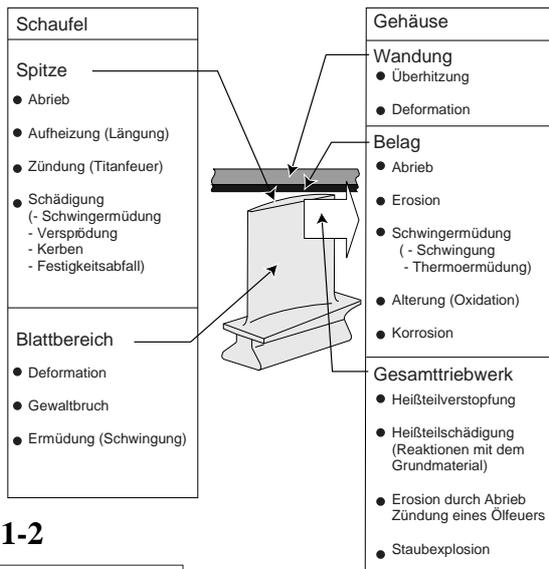
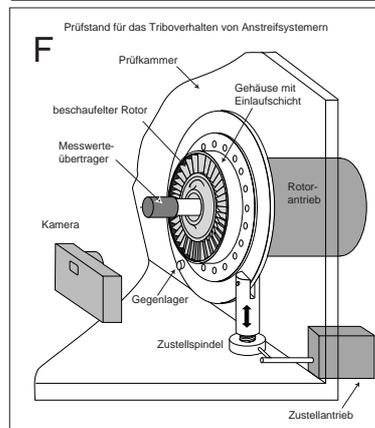
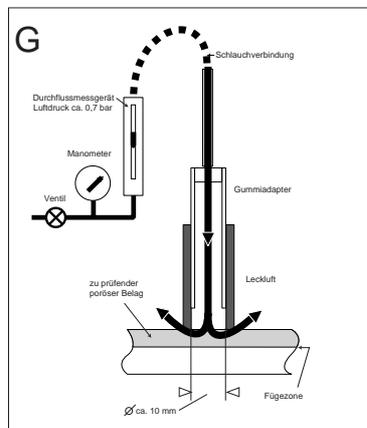
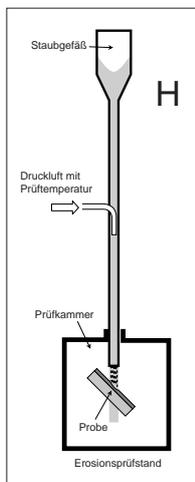


Bild 7.1.1-2



Anstreifen und Spalthaltung: Schaufelspitzen: Grundlagen

Fortsetzung von Seite 7.1.1-8

E: Für die Abschätzung der **schädigenden Neigung des Schichtabriebs** auf Heißeile, wie **Verstopfung von Kühlluftöffnungen** und -kanälen oder unzulässige **Reaktionen mit der Oberfläche**, lässt sich ein Heißgasversuch nutzen. Schichtabrieb wird in eine Brennkammer eingeblasen und vom Gasstrom auf oder in das Heißeil transportiert. Geschmolzener Abrieb kann sich auf dem Blatt ablagern, Bohrungen für die Schleierkühlung zusetzen und mit der schützenden Oxidschicht reagieren. Beim Abkühlen kommt es gegebenenfalls zum Abplatzen des spröden Belags mit der Oxidschicht. Die freigelegten metallischen Oberflächen oxidieren verstärkt. Innen liegende Kühlluftbohrungen können durch zähflüssigen Staub verstopfen.

F: Anstreifstand zur Untersuchung des Verhaltens eines Systems unter realistischen Anstreifbedingungen. Von besonderem Interesse ist die thermische und dynamische Schaufelbelastung beim Anstreifvorgang. Dabei werden mit geeigneten Sensoren (Temperatur, Dehnung) ausgerüstete Originalschaufeln mit betriebstypischen Umfangsgeschwindigkeiten und Temperaturen mit Originalanstreifflächen (Gehäuse oder Rotornabe) zum Anstreifen unter kontrollierten Zustellbedingungen gebracht (Bild 7.1.1-8). Es sei darauf hingewiesen, dass diese Versuche üblicherweise im Vakuum erfolgen. Damit wird der Aspekt der Titanfeuerzündung nicht abgedeckt. In diesem Fall ist ein Prüfstand erforderlich, bei dem die Schaufel steht und der Anstreifbelag rotiert (Bild 9.1.1-14). Das Tribosystem ist darauf zu überprüfen, dass kein „**Streichholzeffekt**“ auftritt.

G: Permeabilitätsmessung poröser Anstreifschichten. Ermittelt wird die Neigung des Belags Leckluft um die Schaufel- oder Labyrinthspitze fließen zu lassen.

H: Dieser **Erosionsversuch** sollte vergleichend mit Betriebserfahrungen erfolgen. Der Staub

wird mit injizierter Luft auf die Probe geblasen. Mit diesem Versuch kann der Einfluss verschiedener Parameter wie Partikelgeschwindigkeit und Auftreffwinkel auf das Erosionsverhalten der Anstreifschicht abgeschätzt werden.

Bild 7.1.1-3: Oben links ist das **Verschleißdiagramm** für das Anstreifsystem Schaufel (TiAl 6-4) gegen eine plasmagespritzte Nickel/Grafit Einlaufschicht. Interessanterweise nimmt der Blattspitzenabrieb mit steigender Anstreifgeschwindigkeit ab. Mit der Zustellgeschwindigkeit nimmt der Blattspitzenabrieb erst zu, dann ab.

Eine typische **Verschleißkarte** (schematisch) des Verschleißmechanismus nach Fa., Sulzer (siehe auch Bild 7.1.1-4) für ein Anstreifsystem zeigt das Diagramm oben rechts. Die hier nicht eingetragenen Einzelmesswerte enthalten Angaben zu den Anstreifparametern: „**gewichtete Belagrauigkeit**“ und Gewichtsänderung des Blattes. Dabei kann es sich um **Abrieb** oder um **Aufschmierungen** handeln. Das Verhalten der Blattspitze (Aufschmierung) überlagert sich mit unterschiedlichem Belagverhalten (Schneidvorgang, Belagausbrüche). Größte Belagrauigkeiten entstehen beim Aufschmieren des Belags auf die Schaufelspitze. Schneidvorgänge führen erwartungsgemäß zu wenig Spitzenabrieb, die entstehenden Belagrauigkeiten können jedoch in einem weiten Streuband zwischen Glättung und deutlicher Aufrauung liegen. Eine Verschleißkarte für ein reales System stellt das untere Diagramm dar. Man erkennt, dass der Verschleißmechanismus teilweise mit den

Anstreifen und Spalthaltung: Schaufelspitzen: Grundlagen

Die Effekte an der Schaufelspitze beim Anstreifen können in Abhängigkeit von den Tribobedingungen sehr unterschiedlich sein.

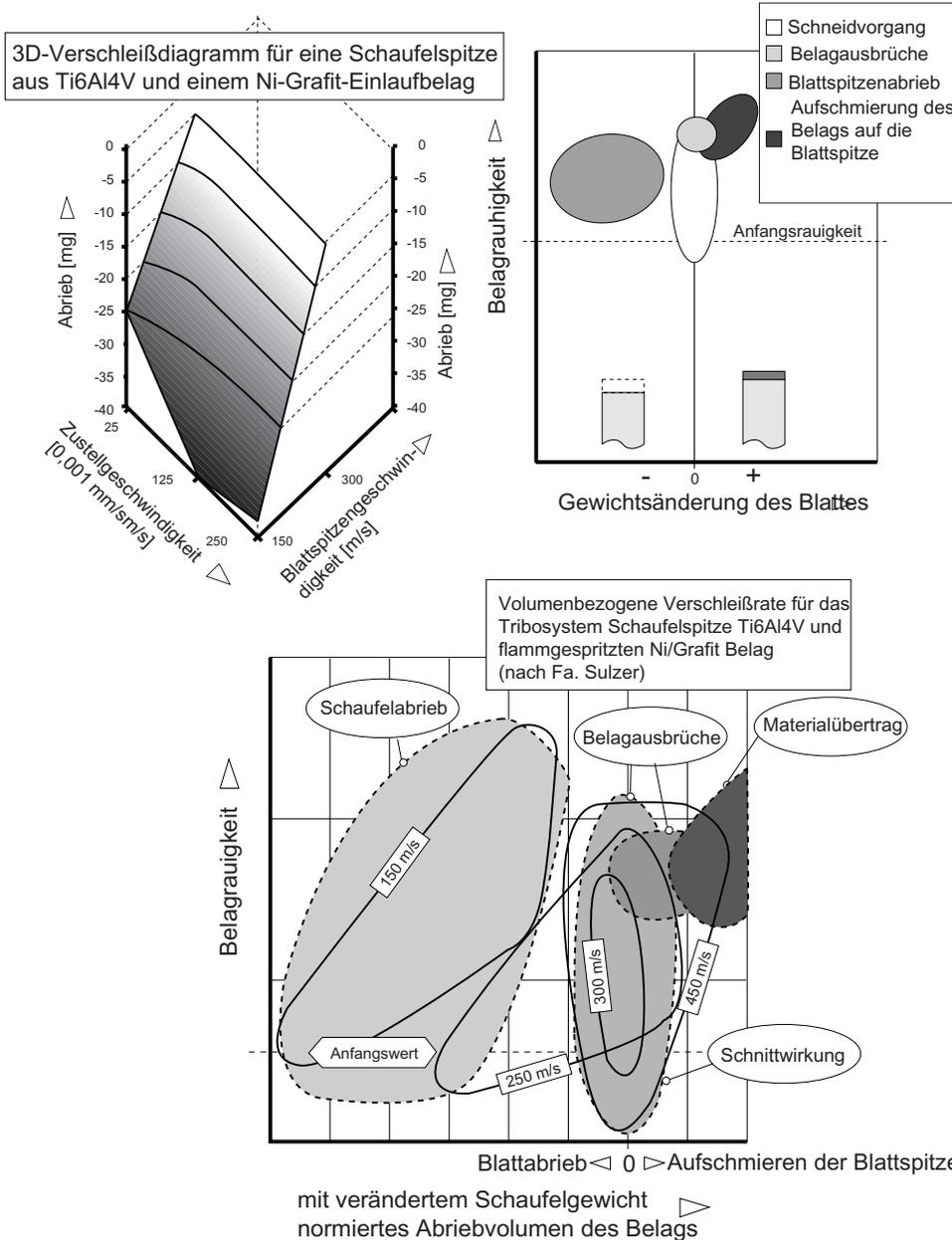


Bild 7.1.1-3

Anstreifgeschwindigkeiten korreliert. Bei niedrigen Anstreifgeschwindigkeiten (150 m/s) tritt bevorzugt Schaufelabrieb auf, bei mittleren Geschwindigkeiten um 300 m/s entstehen Belagausbrüche und bei hohen Geschwindigkeiten besteht die Gefahr der Material-

übertragung auf die Schaufelspitze. Dies bedeutet einen selbstbeschleunigenden Verschleißvorgang.

Es zeigt sich also, dass ein Anstreifsystem genau auf die in der jeweiligen Anwendung herrschenden Parameter abgestimmt werden muss.

Anstreifen und Spalthaltung: Schaufelspitzen: Grundlagen

Die Belastung der Schaufeln beim Anstreifen an einen harten Belag hängt deutlich vom Belagwerkstoff und der Belagrauigkeit ab.

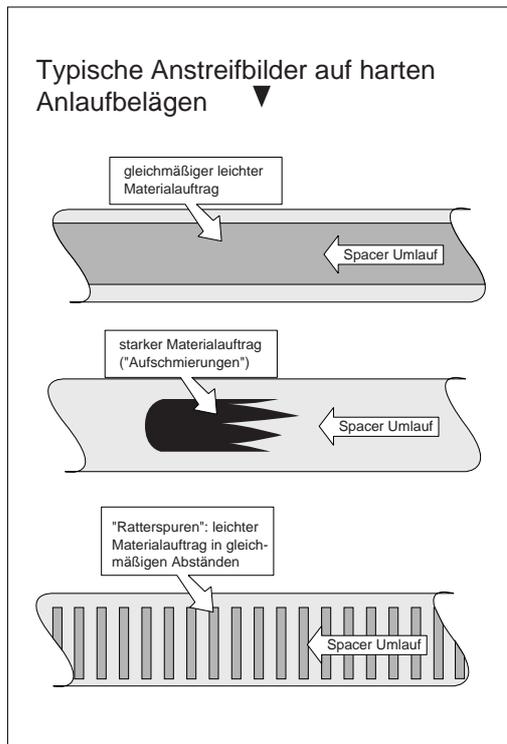
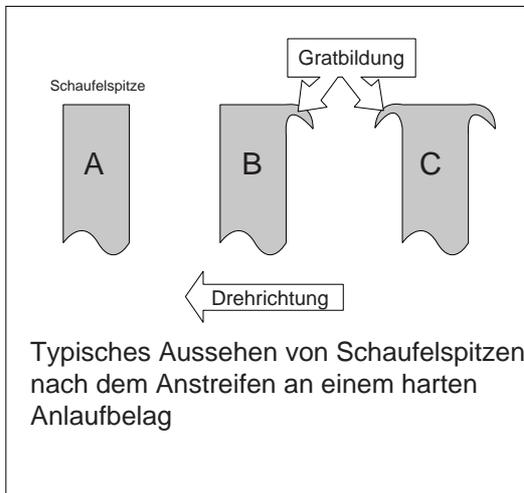
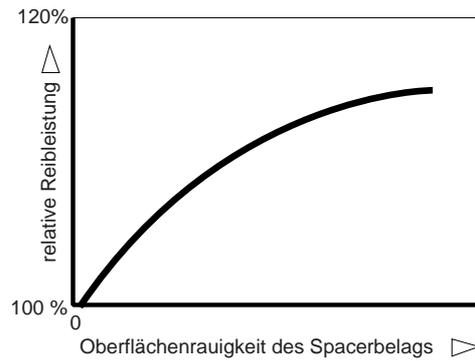
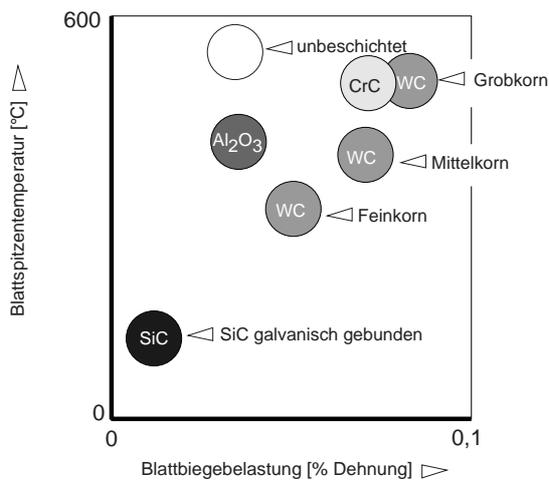


Bild 7.1.1-4

Bild 7.1.1-4: Das Diagramm oben links (Lit.7.1.1-1) zeigt die in einem Prüfstand ermittelten **Anstreiftemperaturen** für typische Spitzenbeschichtungen von Leitschaufeln gegen einen Rotorzwischenring aus Cr-Stahl. Der Belag mit der niedrigsten Reibungstemperatur wurde galvanisch mit eingelagerten harten Partikeln aufgetragen. Die niedrige Wärmeentwicklung wird durch die galvanische Bindung erklärt. Damit sollte verhindert werden, dass, nicht wie bei thermischen Spritzverfahren, ein Abrunden der abrasiven Partikel durch Anschmelzen auftritt. So ist die Zerspanung des Anstreifbelags durch die scharfkantigen Partikel besser. Je niedriger die Anstreiftemperaturen liegen, um so günstiger ist der Belag in Hinsicht auf eine Schädigung des Rotors und/oder der Schaufelspitze zu bewerten. Es vermindert sich z.B. die Gefahr eines Durchbrennens des Rotors (Bild 7.1.3-6). Niedrige Anstreiftemperaturen lassen bei harten Spitzenbeschichtungen entweder auf einen Zerspanungsvorgang im Mikrobereich oder einen sehr niedrigen Reibbeiwert des Tribosystems mit entsprechend geringer Wärmeentstehung schließen. Interessant ist, dass die Reibleistung mit der **Rauigkeit der harten Beläge** anstieg (Diagramm oben rechts). Dies kann damit erklärt werden, dass bei diesem Tribosystem wenig Zerspanung und mehr Abrieb stattfand. Als allgemeingültig ist dieses Verhalten wohl nicht anzusehen. Nach Angaben in Lit. 7.1.1-3 ist die **Reibenergie beim Anstreifvorgang als Kriterium für ein Einlaufsystem untauglich**. „Rub energy does not correlate with blade wear and cannot be used as a screening test for coating materials“.

Das Verhalten eines Tribosystems lässt sich in Grenzen aus dem **Erscheinungsbild der angestreiften Schaufelspitzen** abschätzen (Skizze unten links). Bei weichen Einlaufbelägen und/oder schneidfähigen Schaufelspitzen mit relativ geringer Wärmeentstehung ist ein erwünschter Abrieb ohne merkliche Gratbildung zu erwarten („A“). Eine schlechte Zerspanung mit großer Wärmeproduktion lässt vorzugs-

weise einseitige Grate erwarten („B“). Im Extremfall treten beidseitige Grate auf („C“). Beidseitige Grate dürften von Stauchkräften begünstigt werden, die bei schneller Zustellung zu erwarten sind.

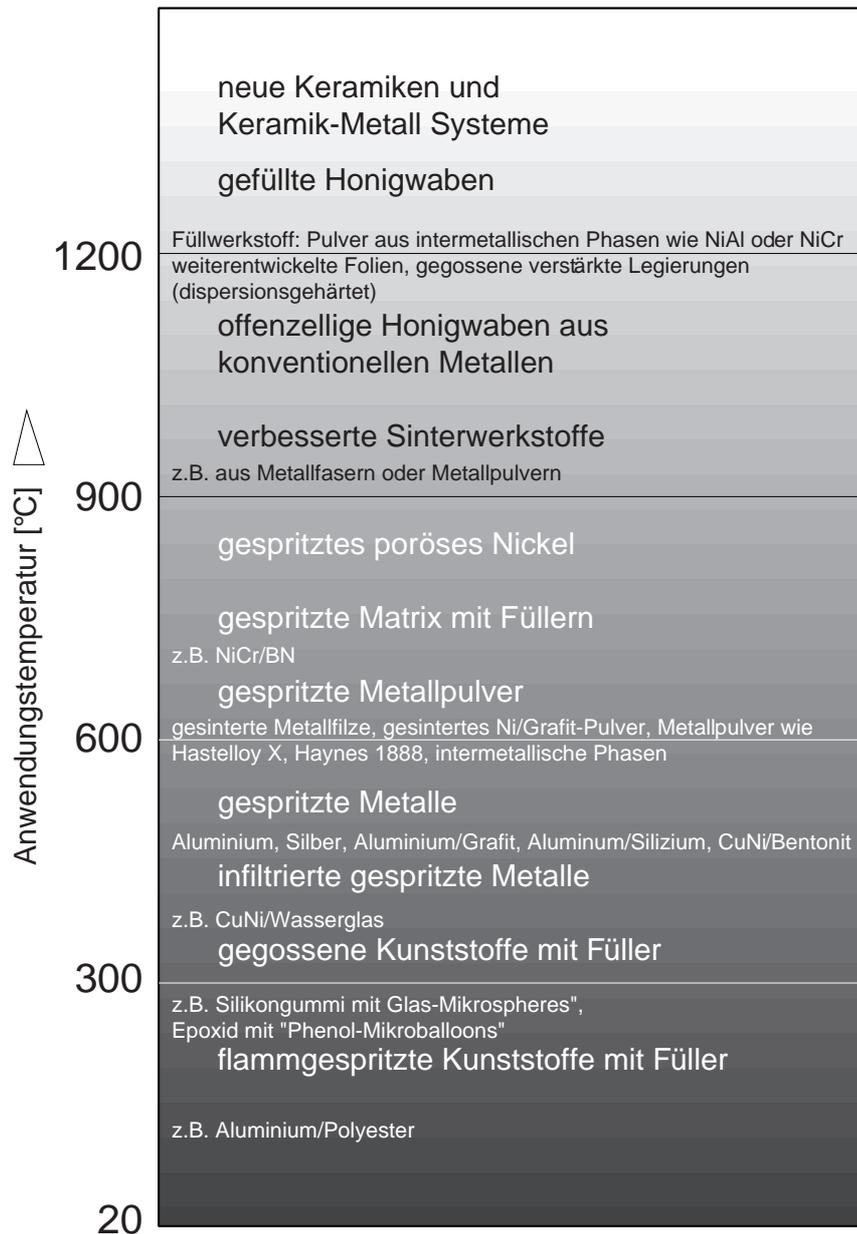
Die Skizze rechts unten zeigt typische **Anstreifbilder auf Belägen von Anlaufsystemen** mit harten Schichten (z.B. Spacer). Es ist möglich, dass die drei dargestellten Haupttypen auch in Kombinationen auftreten. Als normal kann eine gleichmäßige, leichte Anstreifspur gelten. Starker Materialauftrag mit Anzeichen großer Hitzeentwicklung (Lit 7.1.1-5) werden häufig bei starkem Anlauf auf keramischen Schichten, wie an Hochdruckturbinenringsegmenten, beobachtet. In Verdichtern sind solche Anstreifspuren ein Hinweis auf einen potentiell gefährlich beschleunigten Anstreifvorgang der zum „Durchbrennen“ dünner Querschnitte wie Rotorzwischenringen führt.

Schwache, periodische Anstreifspuren werden immer wieder beobachtet (Lit 7.1.1-1). Die Ursache für diese Erscheinung ist nicht eindeutig klar. Es kann sich um den Hinweis auf Schwingungen einer anstreifenden Schaufel handeln. Denkbar ist aber auch, dass sich lediglich fertigungsbedingte Stufen im Belag (Rattermarken vom Schleifprozess) beim Anstreifvorgang abbilden.

Die Anstreifflächen bei Versuchen mit Titan-schaufeln sind darauf zu überprüfen, ob es Hinweise auf die Zündung eines Titanfeuers gibt („Streichholzeffekt“). Derartige Anzeichen sind Oxidation und Aufschmelzungen der Schaufelspitzen welche die Anstreifspuren überdecken.

Anstreifen und Spalthaltung: Schaufelspitzen: Grundlagen

Für einen weiten Temperaturbereich gibt es spezielle Anstreifsysteme mit spezifischen Problemen.



(unter Verwendung von Angaben nach F.H. Mahler)

Bild 7.1.1-5

Anstreifen und Spalthaltung: Schaufelspitzen: Grundlagen

Bild 7.1.1-5 und Bild 7.1.1-6: Spezifisch für die Anforderungen der Komponenten geeignete Anstreifschichten gibt es für den gesamten weiten Betriebstemperaturbereich eines Triebwerks. Für die hohen Temperaturen im Triebwerk kommen meist harte keramische und metallische Anstreifschichten zum Einsatz, während für niedrigere Temperaturen im Verdichter weichere Beläge (z.B. Ni/Grafit, gefüllte Kunstharze, gefüllte Elastomere) geeigneter sind. **Ob eine Schicht als Anlauf- oder Einlaufschicht bezeichnet werden kann, hängt in erster Linie von der Härte der Schaufelspitze gegenüber der Belaghärte ab.** Werden im Folgenden Schichten als Einlaufschichten bezeichnet, wird davon ausgegangen, dass die Schaufelspitze deutlich härter ist als die Schicht. **Elastomere:** Einlaufschichten aus gefülltem Silikongummi kommen im Fan-Bereich zum Einsatz. Sie werden als mehrere Millimeter dicke Streifen eingegossen oder eingeklebt. Ihr Anstreifverhalten ähnelt dem eines Radiergummis. Sie werden von der Schaufelspitze leicht zerspannt. Derartige Beläge können auf das Gehäuse dämpfend wirken und so vor Schwingungsanregung schützen. Die Festigkeit der Klebung muss für die Beanspruchungen des Einlaufvorganges (Kräfte, Temperatur) sicher sein und diese Eigenschaft über die Lebensdauer bewahren.

Gefüllte Kunstharzbeläge wie Epoxidbeläge mit Grafitpulver werden durch Aufspachteln oder (in einem „Schleuderprozess“) durch Aufgießen in das rotierende, gegebenenfalls bereits beschaufelte Gehäuse, eingebracht. So können diese Beläge zusätzlich auf die Leitschaukeln schwingungsdämpfend wirken. Längere Betriebszeiten können durch Alterungs- und Schrumpfprozesse zu Rissbildung und Ablösung der Beschichtung führen.

Thermisch gespritzte Einlaufbeläge: Die üblichen Beschichtungsverfahren sind für solche Beläge das Flamm- oder Plasma-Spritzen.

Aluminium/Polyester: Diese bis zu mehreren Millimeter dicken Beläge bestehen aus einer Mischung flammgespritzter Pulver einer Al-Legierung und einem besonders warmfesten

Polyesterharz. Die maximale Einsatztemperatur liegt bei ca. 340°C. Weil solche Beläge in Meeresatmosphäre sehr korrosionsempfindlich sind (Band 1), bietet sich als Alternative Pulver aus einer Al-Bronze (AlCu-Legierung) oder eloxiertes Pulver an. Hier stellt sich jedoch die Frage nach der Verfügbarkeit. Für Reparaturarbeiten und für eine nachträgliche Versiegelung der Anstreiffläche sowie der Ränder (Schrumpfspalte!) werden organische oder für höhere Temperaturen anorganische Lacke (z.B. Keramikbinder gefüllt mit Al-Pulver) verwendet. Dieser Korrosionsschutz ist verständlicherweise im Fall eines Einlaufs oder bei Rissbildung im Blatt sehr begrenzt. Es wurden Fälle bekannt, wo der Einsatz von Triebwerken durch die Korrosion derartiger Beläge merklich behindert wurde. Die Beläge zeigen eine relativ geringe Porosität der vom Polyestergehalt abhängig ist und mit dem sich ein guter Kompromiss zwischen Einlaufverhalten (Zerspanbarkeit) und Erosionswiderstand erzielen lässt (Bild 7.1.1-8). Bei starkem Ausrieb größerer Belagmengen (z.B. als Folge eines Vogelschlags oder Schaufelschadens) besteht die Gefahr einer Staubexplosion. Reaktionen geschmolzener Al-Partikel mit Heißeiloberflächen können zu örtlichen Anschmelzungen und/oder Veränderungen (z.B. Versprödung) durch Diffusion führen.

Aluminium- und Aluminium/Grafit (Al/Cg, Cg steht für Kohlenstoff in Grafitform): Spritzschichten aus Al-Legierungen haben sich seit Langem als Einlaufschichten in Verdichtern bis zu Betriebstemperaturen von 480 °C bewährt. Sie zeigen einen guten Korrosions- und Erosionswiderstand bei ausreichendem Einlaufverhalten. Der Abrieb dieser Al-Spritzschichten kann durch den Grafitanteil (zwischen 25% und 50%) optimiert werden. Diese Beläge werden aus Mischungen von Al- und Grafitpulver hergestellt. Die Gefahr einer Staubexplosion besteht bei großem Abriebanfall. Die Diffusion aufgespritzter Schichtpartikel kann Heißeile schädigen.

Fortsetzung auf Seite 7.1.1-16

Fortsetzung von Seite 7.1.1-15

Cu/Ni/Wasserglas: Diese Beläge bestehen aus einer porösen Struktur flammgespritzter Cu und Ni-Partikel, die mit Wasserglas (wässrige Lösung von Alkalisilikaten) infiltriert wird. Der Korrosions- und Erosionswiderstand dieser Beläge ist akzeptabel, wegen des Wasserglasanteils kommt es jedoch an den Schaufelspitzen zu erhöhtem Abrieb und Wärmeentwicklung.

Nickel/Grafit (Ni/Cg): Diese flammgespritzten Beläge (plasmagespritzte Beläge sind üblicherweise zu hart), sind die am häufigsten verwendeten Einlaufbeläge in Verdichtern. Der Gewichtsanteil an Grafit liegt üblicherweise zwischen 15% und 25%, womit sich die Porosität und das Einlaufverhalten gezielt beeinflussen lässt. Das für den Spritzprozess verwendete Pulver besteht meist aus galvanisch mit Nickel umhüllten Grafitpartikeln. Falls diese Partikel vorzugsweise rund sind, spricht man von **globularen Pulvern** und oft **irreführend von globularen Schichten**, obwohl der Spritzprozess eine typische lamellare Spritzschichtstruktur erzeugt (Bild 7.1.1-6). Das Einlaufverhalten ist nicht so gut wie das von Al- oder Al/Polyester Belägen. Der Blattspitzenabrieb und die Aufheizung ist relativ hoch, wenn der Belag für eine ausreichende Erosionsfestigkeit dichter gespritzt ist. Die maximalen Betriebstemperaturen für den Dauereinsatz liegen bei ca. 480 °C. Bei dieser Temperatur ist jedoch schon nach wenigen hundert Stunden Laufzeit mit einer merklichen Veränderung der Schicht durch Oxidation zu rechnen und damit einem deutlich verschlechterten Einlauf- und Erosionsverhalten. Der Abrieb solcher Schichten kann zur Verstopfung gekühlter Heißeile führen.

Zur Verbesserung der Langzeitbeständigkeit lässt sich das globulare Ni/Cg-Pulver durch Sintern zu einer Schicht mit weitgehend geschlossener Zellstruktur verdichten. In diesem Fall kann berechtigt von einer globularen Schichtstruktur gesprochen werden. Solche Schichten sind jedoch kompliziert herzustellen und haben sich in der Serienanwendung nicht durchgesetzt.

NiCrAl-Schichten mit Einlagerungen:

Typische Vertreter dieser Gattung sind flammgespritzte NiCrFeAl/Bn-Beläge, die an vielen Stellen im Turbinenbereich genutzt werden. Ihre maximale Betriebstemperatur liegt bei ca. 800 °C. Die metallische Matrix enthält ca. 15% **hexagonales Bornitrid** welches dem Grafit vergleichbare Gleiteigenschaften bei höherer Oxidationsbeständigkeit aufweist.

NiCrAl/Bentonit Flammgespritzschichten sind eine Alternative bei der Bentonit die Gleiteigenschaften bestimmt. Solche Schichten sind porös und haben thermisch isolierende Wirkung. Damit kann zusätzlich eine Spaltänderung über Wärmedehnung beeinflusst werden. Diese Schichten werden wegen der thermischen Isolationseigenschaften auch zum Füllen von Honigwaben verwendet, um die Befestigungslötung ausreichend kühl zu halten.

Ungefüllte metallische Spritzschichten: Hierzu gehören Schichten aus **intermetallischen Phasen (IP)** wie NiAl. Sie kommen bei hohen Betriebstemperaturen (um 800°C, z.B. auf Turbinenringen oder Turbinensegmenten) zum Einsatz. Bei guter Erosions- und Oxidationsbeständigkeit ist ihre Einlaufbarkeit schlecht.

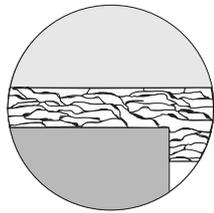
Harte Schichten kommen wegen ihrer guten Warmfestigkeit vorzugsweise auf Zwischenringen (Spacer) in Verdichtertrotoren oder auf Dichtsegmenten deckbandloser Hochdruckturbinen zur Anwendung.

Metallfilze und -gewebe: Solche Werkstoffe werden in Belagdicken bis zu mehreren Millimetern verwendet. Diese Beläge können als Halbzeug bezogen werden (von dem Produktnamen „Feltmetal®“ stammt die häufig verwendete Bezeichnung für diese Belagstypen). Die Belagstruktur besteht entweder aus vernickelten Kohlenstofffasern oder feinen Spänen aus warmfesten Metalllegierungen. Die Aufbringung erfolgt durch Kleben oder Löten. Daraus ergibt sich eine besondere Problematik (Bild 7.2.2-32). Wird der Belag zu stark durch das Haftmedium infiltriert, kann das An-

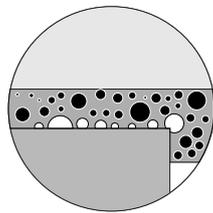
Fortsetzung auf Seite 7.1.1-18

Anstreifen und Spalhaltung: Schaufelspitzen: Grundlagen

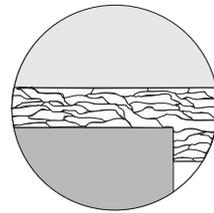
Es gibt eine Vielfalt von Anlauf- und Einlaufbelägen mit unterschiedlichem Betriebsverhalten.



inhomogene poröse lamellare Schicht, thermisch gespritzt

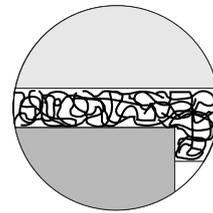
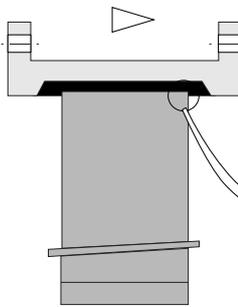


inhomogene Schicht mit globularer Struktur, thermisch gespritzt

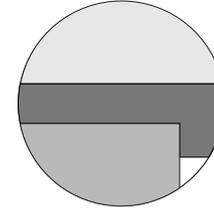


dichte inhomogene lamellare Schicht, thermisch gespritzt

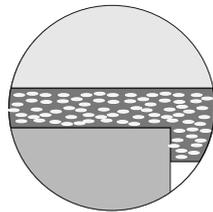
Verdichterbereich



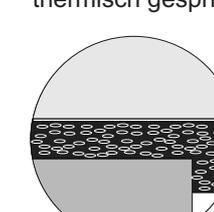
Metallfilz gelötet, geklebt



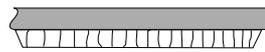
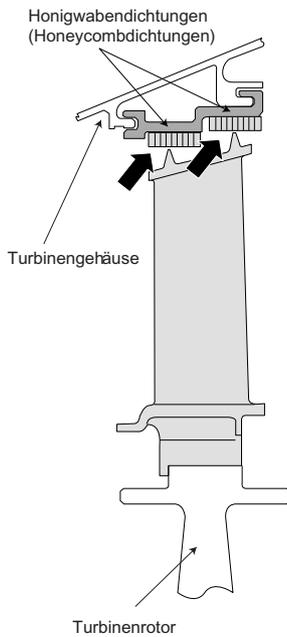
dichte homogene metallische Schicht, thermisch gespritzt



gefülltes Kunstharz gespachtelt, "eingeschleudert"



gefülltes Elastomer, geklebt



keramische Anlaufschicht (Thermobarriere) gegen gepanzerte Schaufelspitze ohne Deckband



gefüllte Honigwaben (Honeycomb) gegen Schaufelspitze mit oder ohne Deckband

Turbinenbereich

Bild 7.1.1-6

Fortsetzung von Seite 7.1.1-16

streifverhalten unzulässig verschlechtert werden. Bei zu wenig Haftmedium besteht die Gefahr unzureichender Bindung und späterer Belagablösung im Betrieb (Bild 7.2.2-33). Der Einsatzbereich galvanisch hergestellter Filze liegt aus Oxidationsgründen bei ca. 500 °C, für Filze aus warmfesten Legierungen bei 800 °C. Die Filze können durch einen Al-Diffusionsprozess eine höhere Oxidationsbeständigkeit erhalten. Das Einlaufverhalten der Metallfilze ist problematisch. Man beobachtet starke Wärmeentwicklung, Materialaufbau und Verschleiß der Schaufelspitze.

Ungefüllte und gefüllte Honigwaben (Honeycomb): Dichtungen aus dünnwandigen Honigwabenstrukturen gehören zu den am längsten angewandten Dichtungssystemen in Triebwerken. Sie werden an Heiteilen wie Turbinenringen und -segmenten in Kombination mit Schaufeln ohne und mit Deckband genutzt. Gewöhnlich bestehen die dünnen Bleche aus der Ni-Basis Legierung „Hastelloy X“. Moderne Ziviltriebwerke haben berholintervalle von mehreren 10 000 Stunden. ber diese lange Betriebszeit besteht die Gefahr einer Schädigung der Dichtungsstege infolge Oxidation und Heißgaskorrosion. Es kommt zum großflächigen Ausbrechen der durchoxidierten Zellstruktur. Es empfiehlt sich eine gezielte Voroxidation der blanken Neuteiloberflchen, um die Oxidationsbeständigkeit graduell zu verbessern. Eine deutlichere Verbesserung kann durch eine Al-Diffusionsbehandlung der Honeycombstruktur erreicht werden. Sind die Waben mit einer Spritzschicht oder Sinterwerkstoffen gefllt (z.B. Ni oder NiAl) lässt sich die Oxidationsbeständigkeit ebenfalls verbessern, zusätzlich lässt sich ein Wrmedmmeffekt nutzen. Derartige Waben haben ein sehr begrenztes Einlaufverhalten. Es kommt zum verstärkten Verschleiß und thermischer Schädigung der Schaufelspitzen. Bei keramischen Fllungen wird dieses Verhalten weiter verschlechtert. Die maximale Langzeitbetriebstemperatur

von Honeycombdichtungen liegt bei 1000 °C.

Keramische Beläge:

Üblicherweise handelt es sich um thermische Spritzbelge auf Zirkonoxid-(ZrO₂), oder Aluminiumoxid (Al₂O₃)-Basis. Solche Beläge werden in Verdichtern auf Rotorzwischenringen und in Turbinen auf den gehäuseseitigen Turbinenringen bzw. Turbinenringsegmenten angewandt (Bild 7.1.1-7).

Beläge mit Schneidpartikeln: Versuche haben gezeigt (Bild 7.1.1-4, Lit 7.1.1-1), dass der Einbau von schneidfhigen harten Partikeln wie in die Schicht galvanisch gebundenes oder aufgeltetes SiC die Wärmeentwicklung und die Biegebelastung des Schaufelblattes entscheidend verringert. Für die Schneidwirkung ist dabei die „Fassung“ des Kornes von entscheidender Bedeutung (Bild 7.1.4-14).

Typische Anwendungen keramischer Anstreifschichten.

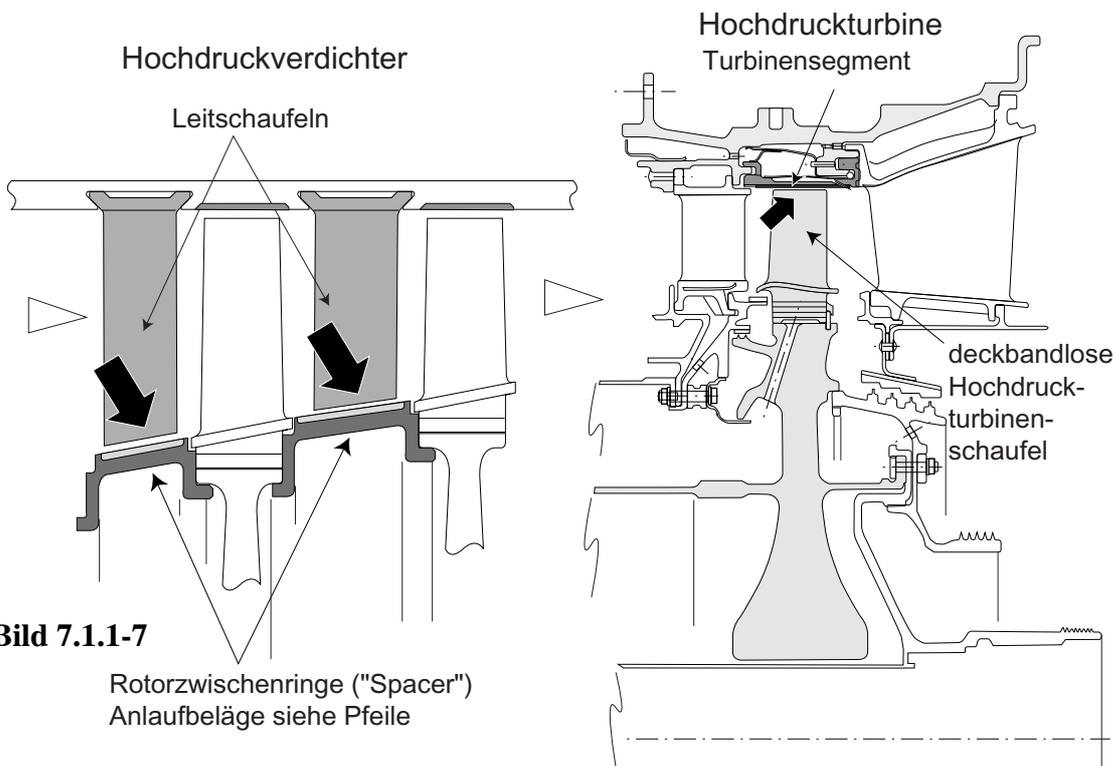


Bild 7.1.1-7

Rotorzwischenringe ("Spacer")
Anlaufbeläge siehe Pfeile

Bild 7.1.1-7: Obwohl Spitzenabrieb an Leit-schaufeln wegen hoher Reparaturkosten bei der Überholung nicht erwünscht ist, lässt sich dieser im Fall der Abstandsringe in Verdichter-rotoren (Skizze oben) nicht vermeiden. Die Betriebsbeanspruchungen des Belags (Fliehkräfte, Wärmedehnungen, fliehkraftbedingte elastische Dehnungen) stellen an Eigen- und Haftfestigkeit der Beschichtung hohe Anforderungen. Aus diesem Grund werden diese Schichtwerkstoffe eher nach einer guten Schleifwirkung (Bild 7.1.1-4) ausgewählt. Kriterien für gutes Anlaufverhalten und damit die Eignung dieser Beläge sind:

- niedrige Blattspitzentemperatur
- niedrige Blattbiegebelastung
- niedrige Schwingbelastung des Blattes
- geringe Aufheizung von Belag und Grundmaterial
- wenig „Aufschmierneigung“ bzw.

gute „Selbstreinigung“

- sichere Haftung des Belags über die gesamte Betriebsdauer unter rotortypischen LCF-Belastungen
- thermische Stabilität
- optimierte Rauigkeit bezüglich Schleifverhalten und Beeinflussung der Strömung.

Ein zweiter wichtiger Einsatzbereich keramischer Anstreifbeläge ist die Hochdruckturbine (Skizze unten). Die Anwendung dieser Schichten wird in den Gehäusen durch die hohen Betriebstemperaturen um 1000°C erzwungen. Auch die Wärmedämmwirkung dieser Schichten ist notwendig, um die tragende metallische Struktur des Dichtrings zu schützen und Wärmedehnungen mit möglichst wenig Kühlluft steuern zu können. Eine Beschichtung der deckbandlosen Schaufelspitzen mit Hartstoffpartikeln wie SiC macht aus einem Anlaufsystem ein Einlaufsystem (Bild 7.1.4-14).

Zerspanungsvorgänge an Einlaufschichten

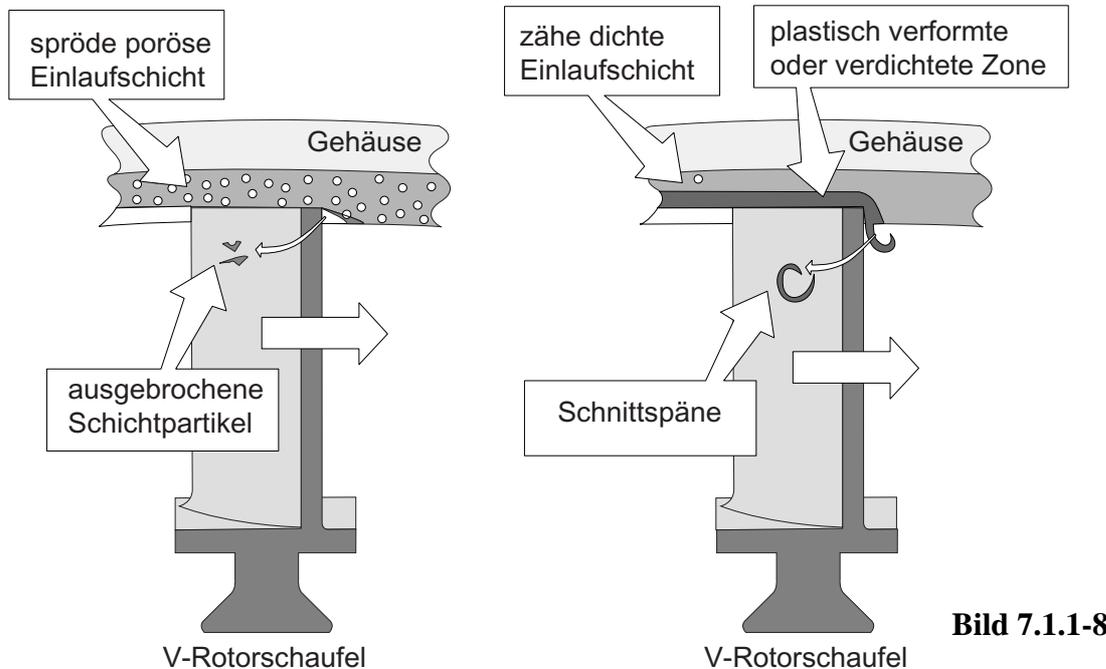


Bild 7.1.1-8 (Lit 7.1.1-4): Für die Entwicklung und den Nachweis eines geeigneten Anstreifverhaltens sind betriebsnahe Anstreifversuche in geeigneten Prüfständen unerlässlich (Bild 7.1.1-2). Grundsätzlich unterscheidet sich das Anlaufverhalten poröser Beläge von dichten, thermisch gespritzten, Einlaufbelägen (Lit 7.1.1-6).

Poröse Beläge (15-45 Vol% Porosität) mit niedriger Dichte geben beim Anstreifvorgang einzelne Partikel, die aus dem Belag gebrochen werden, frei (Skizze links). Der Belag erscheint makroskopisch spröde. Dabei entstehen die Brüche in erwünschten bindungsschwachen Zonen. Im Mikrobereich können die Trennungen durchaus zäh erfolgen.

„Dichte“ Beläge (2-15 Vol % Porosität) zeigen einen komplexeren Zerspanungsmechanismus, der in erster Linie von drei Effekten beeinflusst ist:

- plastische Verformung des Belags
- Nachgeben oder Verdichtung des Belags
- Mikrozerspanung durch die Schaufelspitze

Für thermische Spritzschichten ist das Anstreifverhalten also besonders von der Porosität bestimmt. Ein indirektes und eingeschränkt aussagefähiges Maß ist die **Mikrohärte des Belags**. Die Härte wird üblicherweise mit einem Kegel und niedriger Last gemessen (Rockwell R15Y). Dabei liegen die Belagshärten zwischen R15Y 30 und R15Y 80. Beläge mit niedrigeren Härten sind zu erosionsempfindlich, härtere Beläge reiben die Blattspitzen zu stark ab (Bild 7.1.1-9 und 7.1.3-22).

Natürlich ist auch die **Form der Schnittkante**, also der schneidenden Kante der Schaufelspitze von Bedeutung für das Zerspanungsverhalten des Systems. Dabei ist auch die Steifigkeit des Schaufelblattes wichtig. **Biegt sich das Schaufelblatt aus oder wird es merklich tordiert ändern sich die Schnittparameter**. Es kann zu verstärkten Schaufelschwingungen kommen, ähnlich dem Rattern bei Werkzeugmaschinen. Schneidende Schaufelkanten sind für zähe dichte, stumpfe Kanten eher für spröde poröse Anstreifschichten günstig.

Anstreifen und Spalhaltung: Schaufelspitzen: Grundlagen

Das Betriebsverhalten des Tribosystems
Blattspitze/Belag ist von vielen Einflüssen abhängig.

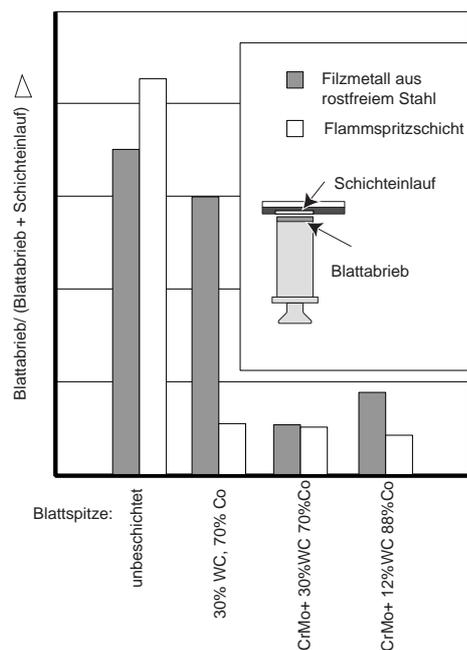
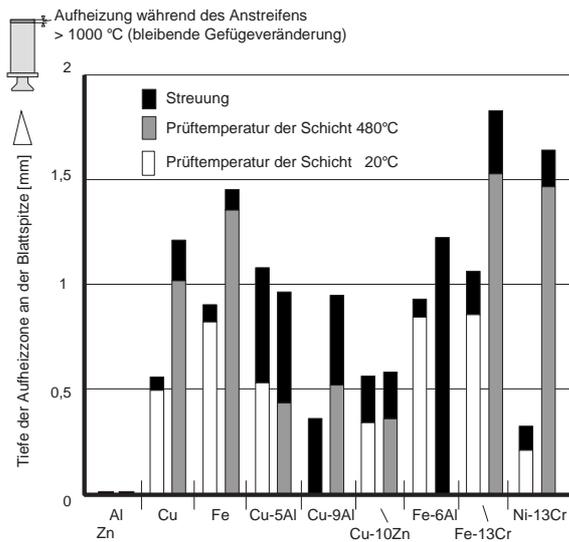
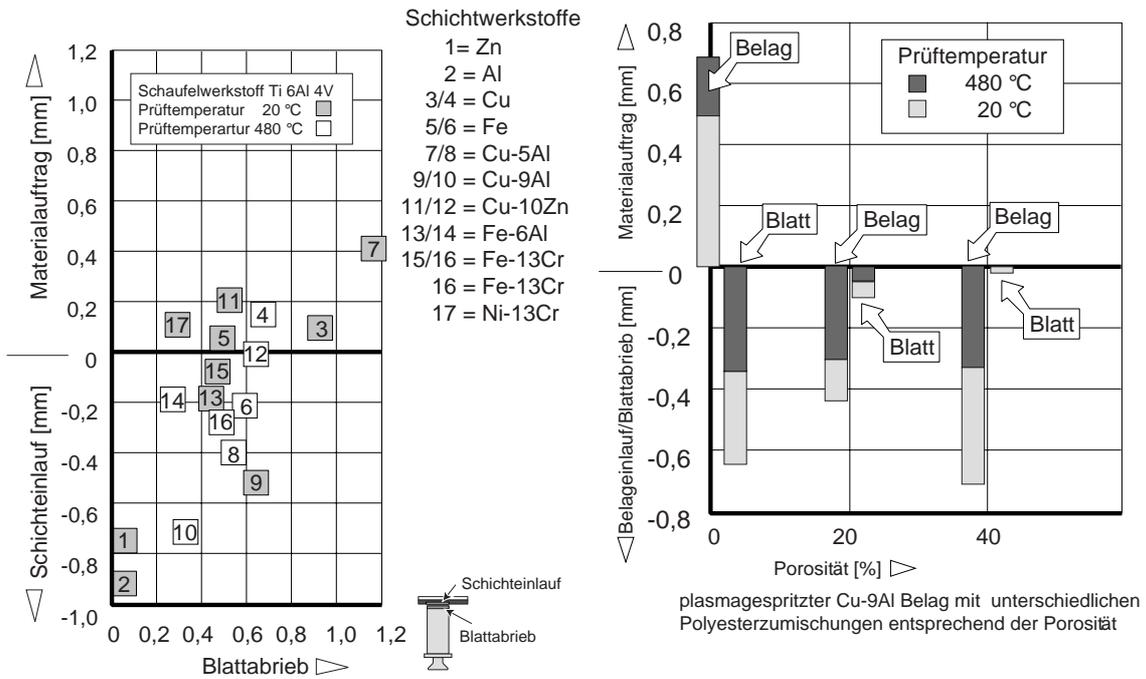


Bild 7.1.1-9

Beschreibung zu Bild 7.1.1-9 nächste Seite

Bild 7.1.1-9 (Lit 7.1.1-3): In einem umfangreichen Programm mit Anstreifversuchen wurden unterschiedliche metallische thermische Spritzbeläge in ihrem Anstreifverhalten gegen Rotor-schaufelspitzen aus der Titanlegierung TiAl6V4 untersucht. Es zeigte sich, dass **kleine Änderungen in den Spritzparametern und der Korngrößenverteilung der Spritzpulver die Eignung eines Anstreifsystems entscheidend beeinflussen**. Dies unterstreicht die Bedeutung stabiler Fertigungsprozesse. Es wurde auch beobachtet, dass kleine Änderungen der Anstreifbedingungen (z.B. Zustellungsgeschwindigkeit und Anstreifgeschwindigkeit) das Verhalten des Tribosystems deutlich verändern. Dies unterstreicht die Bedeutung **ausreichend betriebsnaher Tauglichkeitsnachweise**.

Es zeigte sich, dass Al-Bronzen gegenüber reinen Kupferschichten sowohl den Blattspitzenabrieb reduzieren, als auch die Aufräumung der Belagfläche verringern. Zu klären wäre noch die Frage, in wie weit die Verträglichkeit eines Abriebs dieser Beläge mit Heißeiloberflächen gewährleistet ist. Ob ein Materialauftrag an der Schaufelspitze oder ein Abrieb an der Schicht auftritt, ist nicht ohne weiteres aus den Werkstoffdaten vorhersagbar. Eine wichtige Rolle spielen Reaktionen zwischen Schaufel- und Belagmaterial. Einen deutlich werkstoff-abhängigen Einfluss hat offenbar die Prüf-temperatur (Diagramm oben links).

Dichte Beläge (geringe Porosität) neigen anscheinend zu verstärktem Materialaufbau an der Schaufelspitze und damit zu einer Verstärkung des Anstreifvorgangs. Dieses Verhalten ist unerwünscht und kann zu unbeherrschbaren Reibvorgängen führen. Damit wird die mechanische Blattbeanspruchung hoch und die Gefahr einer statischen oder dynamischen Überlastung wächst (Bild 7.1.3- 4).

Folgerung: Die Porosität eines Anstreifbelags ist wichtig für ein „gutmütiges“ Anstreifverhalten ohne Materialauftrag.

Die Aufheizung der Blattspitze durch die freierwerdende Reibungsenergie führt zu einer Schädigung dieser dynamisch hoch belasteten Bauteilzone (Bild 7.1.3-1, Versprödung durch Oxidation, Festigkeitsabfall, Wärmespannungen / Eigenspannungen). Eine erhöhte Prüftemperatur erzeugt meist, aber nicht immer, eine tiefere Aufheizzone (Diagramm unten links). Dies ist damit zu erklären, dass manche Beläge bei hoher Prüftemperatur ein besseres Anstreifverhalten aufweisen.

Nach Möglichkeit sollte der Blattspitzenabrieb minimiert werden. Großer Abrieb führt zu größeren Spaltquerschnitten als bei Schichteinlauf (siehe Bild 7.1.2-2 und 7.1.2-3) und zu höheren Reparaturkosten.

Um den Blattspitzenabrieb zu minimieren, bieten sich Panzerungen der Spitze an (Diagramm unten rechts). Unbeschichtete Blattspitzen zeigen sowohl gegenüber Filzmetallbelägen als auch gegen Flamm-spritzbeläge großen Abrieb. Eine Panzerung der Spitze mit, in einer Kobaltmatrix eingelagertem, Wolframcarbid (WC) - Partikeln reduziert bei den vorliegenden Versuchsparametern lediglich für die Flamm-spritzschicht den Spitzenabrieb deutlich. Eine Zumischung von CrMo in die Panzerung bringt dagegen eine signifikante Verbesserung gegenüber beiden Belagmaterialien. Dieses Beispiel zeigt, **wie kleine Veränderungen des Tribosystems große Effekte auslösen können**.

Heute werden auch Verdichterschaufeln, ähnlich deckbandlosen Turbinenrotorschaukeln, erfolgreich mit Hartstoffpartikeln gepanzert.

Anstreifen und Spalthaltung:
Schaufelspitzen: Grundlagen

Literatur zum Kapitel 7.1.1

- 7.1.1-1** Stetson A.R., Vogan J.W., Compton W.A. (Solar Turbine Int.) „Abrasive Coatings as Self Cleaning Gas Turbine Compressor Vane Tip Seals“ AGARD-CP-237 Conference Proceedings 1973 Seite 3-1 bis 3-14.
- 7.1.1-2** Patentschrift EP 0254 667 B1 vom 4.7.87, United Technologies Corporation, „Improved Method for Adhesion of Grit to Blade Tips“.
- 7.1.1-3** Schwab R.C., (G.E. Company) „Program to Develop Sprayed, Plastically Deformable Compressor Shroud Materials“, NASA-Cr-159741, Progress Report 1976 - 1979, Seite 1 - 65.
- 7.1.1-4** T.J.Uihlein, „Airseals for Advanced Military Jet Engines“, AGARD Conference Proceedings 589, AGARD Structures and Materials Panel, Sesimbra, Portugal, 6-7 May 1996, Seite 17-1 bis 17-19.
- 7.1.1-5** L.T. Shiembob, O.L. Stewart, R.C. Bill, „Developing of Sprayed Ceramic Seal System for Turbine Gas Path Sealing“, ASME Publication Paper 78-WA/GT-7, Transactions of ASME, Journal of Engineering for Power 1979, Seite 1-7.
- 7.1.1-6** E.R. Novinski, „The Design of Thermal Sprayed Abradable Seal Coatings for Gas Turbine Engines“, Proceedings of the Fourth National Thermospray Conference, Pittsburgh, PA, 4-10 May 1991, Seite 451-456.
- 7.1.1-7** F.E. Kennedy, „Thermomechanical Phenomena in High Speed Rubbing“, Paper presented at the Workshop on Thermal Deformation, Annapolis, Maryland, June 1979.
- 7.1.1-8** R.C. Bill, L.T. Shiembob, „Some Considerations of the Performance of Two Honeycomb Gas-Path Seal Material Systems“, Zeitschrift: „Lubrication Engineering“, April 1981, Seite 209-216.
- 7.1.1-9** J.G.Ferguson, „Use of Coatings in Turbomachinery Gas Path Seals“, Proceeding AGARD-CP-237 der Konferenz „Seal Technology in Gas Turbine Engines“, Seite 2-1-2-13.