

3.2.3 Typische Schäden der Brennkammer, Ursachen und Abhilfen.

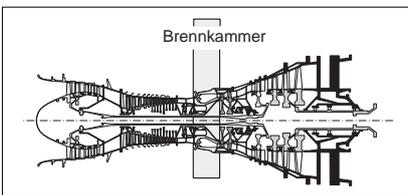
Brennkammern können unterschiedliche Schäden aufweisen (Bild 3.2.3-1). Typisch sind solche, die auf örtlich hohe Wandtemperaturen zurückzuführen sind. Beispielsweise können Bereiche, deren Festigkeit unter Temperatureinwirkung zu weit abfällt, vom Brennkammerinnendruck **ausbeulen**. **Verzug und Verwerfungen** durch Wärmespannungen sind nicht selten. Sie werden auch von der Position der Einspritzdüse beeinflusst. Dann ist die Gefahr örtlicher **Verbrennungen der Wandungen** gegeben. Große, sich zeitlich verändernde Temperaturgradienten mit hohen **Wärmespannungen** in den Wandungen entstehen im Bereich von Luftzuführungsbohrungen, um **Heißgassträhnen** bei örtlich fehlendem Kühlluftschleier und an Kiemenschlitzen für die Kühlluftzufuhr. Diese Spannungen führen zu einem niedrigzyklischen Ermüdungsvorgang im **LCF-Bereich** (LCF = Low Cycle Fatigue), der **Thermoermüdung** (Bild 3.3-16). Die entstehenden Risse zeigen gewöhnlich einen anfangs schnelleren, sich dann verlangsamen Fortschritt. Auf Grund dieses Verhaltens werden sie beherrschbar und können deshalb **zulässig** sein. In diesem Fall sind im Überholungshandbuch des OEM Grenzen angegeben. Wichtig ist, dass ein ausreichender Sicherheitsabstand zu einer gefährlich großen Risslänge eingehalten wird. Die Gefahr eines spontanen Versagens durch Schwingbruch oder mechanische Überlastung ist unbedingt zu vermeiden. Das wird bei zusätzlichen mechanischen Belastungen wie Gasschwingungen schwieriger. Umlaufende Lochreihen an Brennkammern können örtlich oder auch über größere Umfangbereiche als Folge von Rissbildung **„aufknöpfen“**.

Brennkammern können extrem **empfindlich auf eine Veränderung** der Strömung, besonders auch des Widerstands der Kühlluftöffnungen reagieren. Das Bohrverfahren der Lochreihen bei Neuteilfertigung oder **Reparatur** ist mit veränderten Rauigkeiten, Graten oder unterschiedlichen Verrundungen in der Lage, ein unzulässiges Betriebsverhalten auszulösen. Das gilt auch für **Verstopfungen von Kühlluftbohrungen** durch Ablagerungen oder Oxidbildung.

Ein besonderes Problem ist die **Temperaturverteilung im Heißgasstrom** am Brennkammeraustritt (Bild 3.2.3-2). Für die Rotorscheufeln der folgenden Hochdruckturbinenstufe ist besonders die radiale Temperaturverteilung (RTD = Radial Temperature Distribution) wichtig. Die Statorbeschaufelung wird zusätzlich von der Temperaturverteilung am Umfang (OTD = Orbital Temperature Distribution) beeinflusst (siehe hierzu Kapitel 3.3). Temperaturunterschiede von mehreren 100 °C sind nicht selten. Wichtig ist, dass solche Abweichungen nicht über die Auslegung der Konstruktion hinausgehen.

Bei Schäden an der HDT- Beschaufelung ist grundsätzlich die Brennkammer auf unzulässige Veränderungen zu prüfen.

In Brennkammern mit keramischen Innenbeschichtungen (ZrO_2 Plasmaspritzschicht; Bild 3.2.3-3 und 3.2.3-4) können **Erosion und Abplatzungen** auftreten (Bild 3.2.3-1). Die Erosion beruht auf einer Ablösung kleiner Schichtpartikel an der Oberfläche, was sich in einer Aufrauung zeigt. Das kann **Schutzschichten der Turbinenkomponenten** (z.B. Diffusionsschichten für den Oxidationsschutz) schädigen und deren **Lebensdauer verkürzen**. Für Schichtausbrüche sind besonders Kanten und konvexe Radien anfällig. Unteroxidation schwächt nach längeren Laufzeiten die **Haftfestigkeit der Wärmedämmschichten**. So nimmt die Schadenswahrscheinlichkeit zu (Bild 3.2.3-7). Die Betriebstauglichkeit der Schichten ist sehr stark von **Herstellungsparametern** wie Substrattemperatur, Rauigkeit der Haftflächen und der



Pulverreinheit abhängig. Deshalb sind **bei Überholungen und Reparaturen die Vorgaben des OEM streng einzuhalten**.

Einige Brennkammern von Gasturbinen russischer Konstruktion, insbesondere Derivate, weisen als Innenbeschichtung ein **Hochtemperaturemail** auf. Diese Beschichtung hat sich bei nicht zu hohen Wandungstemperaturen gut bewährt. Ihr Isolationseffekt ist jedoch vergleichsweise beschränkt.

Die Verbrennung läuft immer mit niedrigfrequenten Druckschwingungen ab. Dies führt im Normalfall an den typischen Steckverbindungen der Brennkammern, die zum Ausgleich der Wärmedehnungen notwendig sind, zu **Reibverschleiß**. Mit Hilfe von **Hartstoffbeschichtungen** (meist Wolframcarbid = WC) lassen sich diese Probleme jedoch erfahrungsgemäß beherrschen. Ein besonderer Fall sind offenbar Dry-Low-NO_x-Brennkammern. Trotz vieler Vorteile weisen sie ein prinzipielles Problem auf: Die bewusst niedrige **Flammtemperatur** begünstigt Flamminstabilität, es kommt zum "Flackern". Damit verbunden sind Druckschwingungen in der Brennkammer, welche die Kraftstoffeinspritzung beeinflussen. Bei Druckanstieg und erhöhter Flammtemperatur wird die Kraftstoffzufuhr behindert, die Flammtemperatur sinkt. So fällt der Brennkammerdruck ab und die Kraftstoffmenge erhöht sich. Flammtemperatur und der Druck steigen erneut usw. Es handelt sich also um einen selbsterregenden Vorgang (Bild 3.2.2-5). Er macht sich bei **Gas als Kraftstoff** besonders bemerkbar. Die **Schwingungen** können derart intensiv sein, dass die **Brennkammer Ermüdungsschäden** erleidet, starker Verschleiß an den Halterungen auftritt und gegebenenfalls Brennkammerschindeln gelöst werden. Im Extremfall wird der Turbinenrotor zu unzulässigen Schwingungen angeregt.

Auch Brennkammern mit **Wassereinspritzung** haben spezifische Probleme. So kann es bei großen Wassermengen, wie sie für eine merkbare Leistungssteigerung notwendig sind, zu einer unvollständigen Verdampfung in der Brennkammer kommen. Die verbleibenden Tröpfchen lösen **Erosionsschäden** aus. Auch über Probleme in der **Wasserzufuhr** und der Düse wird berichtet. Vor allem Korrosion und Erosion wird befürchtet. Ein Versagen der Wasseraufbereitung kann zu **Ablagerungen im Heißteilbereich** führen. Überhitzung und Heißgaskorrosion sind die Folge. Erfahrungsgemäß ist bereits ein Feststoffanteil von max. 2,6 mg /ltr und max. 0,5 ppm Gewichtsanteil metallischer Verunreinigungen wie Na, K, Li, Pb und V problematisch. Die Bereitstellung der relativ großen Wassermenge hoher Qualität führt zu deutlichen Mehrkosten. In dieser Hinsicht ist die **Dampfeinblasung** (Bild 3.2.2-3) günstiger. Hier kann über einen Wärmetauscher Abgaswärme zur Verdampfung genutzt werden. Zu berücksichtigen ist, dass bei hohem Wasseranteil mit einem Anstieg des CO- Ausstoßes zu rechnen ist.

Merksätze:

**Bei Brennkammerschäden
immer die Turbine überprüfen!**

**Bei Turbinenschäden immer
die Brennkammer überprüfen!**

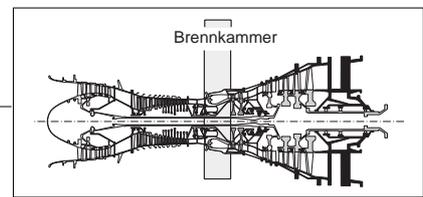


Bild 3.2.3-1: Brennkammern zeigen eine Vielzahl spezifischer **Schäden**. Diese Bilder sollen neben einem **Befund an ausgebauten Teilen** auch dazu beitragen, bei **Boroskopinspektionen** (Bild 4.1-6) das „wo und was“ besser zu erkennen und zu verstehen. Dazu ist das Beispiel einer einfachen Ringbrennkammer, links im Schnitt, rechts perspektivisch, gewählt. Schäden an der Brennkammer können immer auch die Heiteile der im Gasstrom folgenden **Turbine beeinflussen**. Die Brennkammer ist gewöhnlich durch Boroskopbohrungen (Bild 4.1-5) gut inspizierbar. Schäden können deshalb meist rechtzeitig im Anfangsstadium erkannt und Abhilfen eingeleitet werden.

„1, 9“ **Verzug:** Ursache ist gewöhnlich eine ungleichmäßige Temperaturverteilung mit hohen **Wärmespannungen**. Verformungen der Brennkammerwände beschleunigen sich, wenn dabei die Kühlwirkung und/oder der Verbrennungsvorgang ungünstig beeinflusst wird. Eine typische Folge sind „**heiße Strähnen**“, die im Zusammenhang mit einer Auswölbung von Khlflutlippen stehen.

„2“ **Beulen** entstehen bei örtlicher Überhitzung. Auslösend wirkt die, vom umgebenden kälteren Material, **behinderte Wärmedehnung**. So entstehen hohe Druckspannungen und es kommt zum **Ausbeulen**. Dabei ist mit Rissbildung zu rechnen. Im Extremfall brennt die Brennkammerwandung durch. Schwere Folgeschäden bis zur Explosion des druckaufnehmenden Gehäuses sind dann zu erwarten.

„3“ **Oxidation** bedroht besonders die Kanten von Blechen im Gasstrom, aber auch überhitzte Wandbereiche. Ein typisches Schadensmerkmal ist der „**Orangenschalenefekt**“ (Bild 3.3-10). Es handelt sich um eine deutlich aufgetraute, meist dunkelgraue oder grünliche Zone mit flachen, auserodierten Rissfeldern.

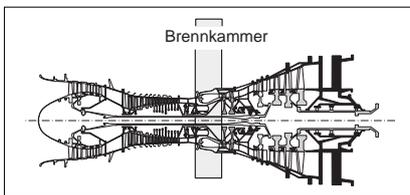
„4“ **Verbrennungen** werden Oxidationszonen genannt, die sich bei extrem hohen Werkstofftemperaturen unter schneller Sauerstoffaufnahme bilden. In der Umgebung kann es auch zu **Anschmelzungen** kommen. Mit einer durchgehenden Werkstoffschädigung ist zu rechnen.

me bilden. In der Umgebung kann es auch zu **Anschmelzungen** kommen. Mit einer durchgehenden Werkstoffschädigung ist zu rechnen.

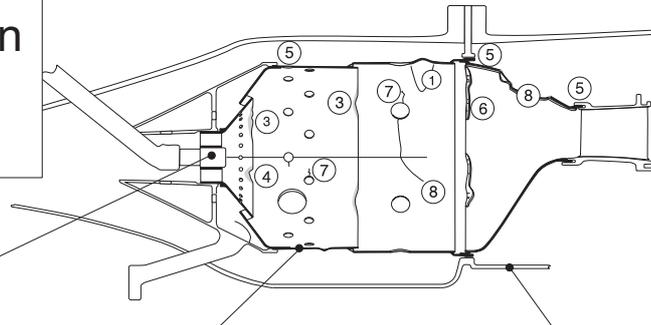
„5, 16“ **Verschleiß** tritt als Reibverschleiß (**Fretting**) an Brennkammern, bevorzugt an Anlageflächen von **Steckverbindungen**, auf. Der Verschleiß ist auf Relativbewegungen zurückzuführen. Sie stehen neben **Wärmedehnungen** häufig im Zusammenhang mit **Brennkammerschwingungen**. Beschleunigend wirkt die Oxidation der frischen metallischen Verschleißflchen. Besonders **Flamminstabilitten** bei Low NO_x-Verbrennung dürfen schadensbegnstigend wirken (Bild 3.2.2-5).

„6“ **Schichtabplatzer** betreffen die zur Reduzierung der Wandtemperatur in neueren Brennkammertypen häufig angewendeten **Wärmedämmschichten** (Bild 3.2.3-7 und Bild 3.2.3-8). Sie stehen oft im Zusammenhang mit einer plastischen Deformation (Verzug, Beule) der Wandung. Die **Kante** der Wände sind für Abplatzungen besonders empfindlich. Wird sie vom Gasstrom angeblasen, **heizt sich die Wärmedämmschicht schnell und hoch auf**. Das führt zu **Druckspannungen in der Schicht**, die, insbesondere bei einer oxidationsbedingten Schwächung der Haftzone, ein **Abheben** auslösen.

„7, 11“ **Rissbildung durch Thermoermüdung** (Bild 3.3-16) ist ein typisches Brennkammerproblem. Hohe zyklische Temperaturgradienten bei Leistungsänderungen, insbesondere Start und Abstellen führen zu plastischen Verformungen und Ermüdungsrisse (LCF, Bild 3.1.2.1-0). Die **Fortschrittsgeschwindigkeit der Risse verlangsamt sich** anfangs, oft bis zum Stillstand. ber längere Zeiträume und bei merklichen überlagerten mechanischen Beanspruchungen aus Belastungen wie Gasdrücken und Vibrationen, kann es jedoch zu beschleunigtem Rissfortschritt kommen. In diesem Fall steht ein spontanes Versagen des Bauteils bevor.



Brennkammerschäden können in vielen Formen auftreten



- Einspritzdüse:**
- ⑫ Verstopfung innen
 - ⑬ Erosion innen
 - ⑭ Verzug (mit Aufhängung)
 - ⑮ Koksbildung
 - ⑯ Verschleiß außen

- Flammrohr:**
- ① Verzug
 - ② Beulen
 - ③ Oxidation
 - ④ Verbrennungen
 - ⑤ Verschleiß
 - ⑥ Schichtabplatzer
 - ⑦ Rissbildung durch Thermoermüdung (LCF)
 - ⑧ Rissbildung durch Schwingungen (HCF)

- Gehäuse:**
- ⑨ Verzug
 - ⑩ Rissbildung durch Schwingungen (HCF)
 - ⑪ Rissbildung durch Thermoermüdung (LCF)

Bild 3.2.3-1

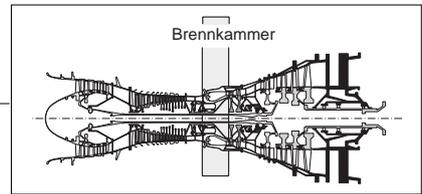
„8, 10“ **Rissbildung durch HCF** (Bild 3.1.2.1-0) wird gewöhnlich von **hochfrequenten Schwingungen** ausgelöst. Diese gehen typischerweise auf Gasschwingungen beim Verbrennungsvorgang zurück (Bild 2.6-2 und Bild 3.2.2-5). Derartige Risse starten an Schwachstellen wie Thermoermüdungsrissen. Sie sind wegen ihrem schnellen Rissfortschritt mit Boroskopprüfungen kaum abfangbar.

„12“ **Verstopfung von Kraftstoffdüsen** kann von **Fremdpartikeln** wie **Spänen** (Montage, Fertigung) ausgelöst werden. Auch die Bildung von **Koks** als Folge einer ungewöhnlich hohen Düsentemperatur führt zur Verstopfung. So entsteht eine ungleichmäßige Temperaturverteilung im Gasstrom mit Langzeitschäden an der Turbinenbeschaukelung (Bild 3.3-9). Noch gefährlicher ist eine **Ablenkung des Kraftstoff-Sprühkegels**, der die Brennkammerwände bis zum Bersten überhitzt.

„13“ **Erosion in der Kraftstoffdüse** kann eine Folge zu hoher Kraftstofftemperatur sein. Dadurch laufen im Kraftstoff Crackprozesse mit der Bildung winziger, sehr harter Partikel ab. Sie können die Düsenöffnung verschleifen, so den Kraftstoffstrahl ablenken und die Brennkammerwand gefährlich überhitzen.

„14“ **Verzug der Düsen bzw. deren Aufhängung** ist im Zusammenhang mit Wärmedehnungen der gesamten Brennkammerstruktur denkbar. Eine gefährliche Folge ist wiederum eine Überhitzung (siehe Punkt 2 und 3) der Brennkammerwand.

„15“ **Koksbildung** kann an vielen Stellen, in denen geeignete Temperaturen und chemische Bedingungen herrschen, auftreten. An Kraftstoffdüsen kann Koksansatz den **Sprühkegel gefährlich ablenken**.



Typische Brennkammerschäden

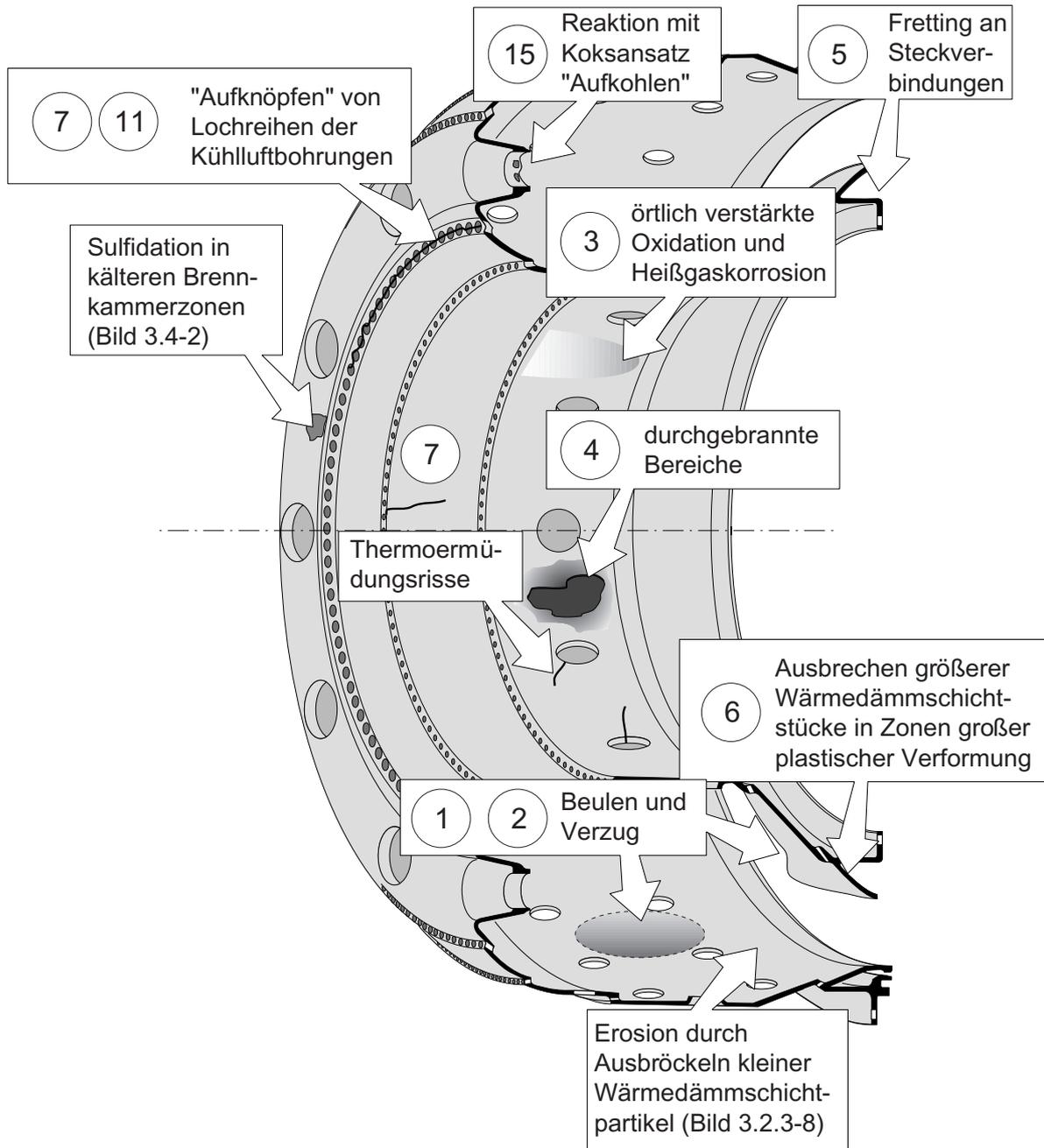


Bild 3.2.3-1

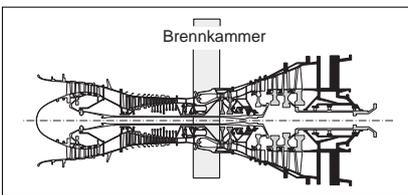
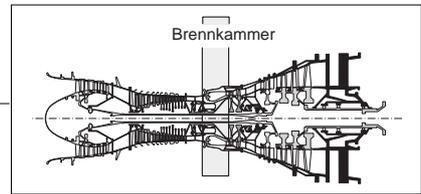
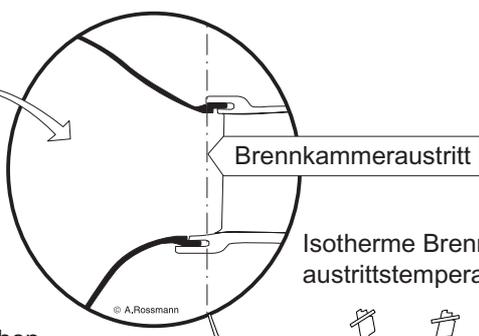
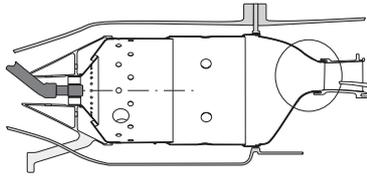


Bild 3.2.3-2: Dieses Bild zeigt im mittleren Detail die **radiale Temperaturverteilung (RTD)** in drei, am Umfang verteilten Bereichen des Ringkanals am Austritt der Brennkammer einer 5 MW Heavy Frame Maschine (Lit. 0-2). Es lässt die Größenordnung der Temperaturungleichmäßigkeit einer normal betriebenen Maschine, ohne Besonderheiten der Komponenten, erkennen. Die maximale Temperaturdifferenz liegt bei über 100 °C. Am inneren Deckband um ca. 75 °C niedriger als am äußeren. Das dürfte dem Scheibenbereich der Hochdruckturbinen zugute kommen (Bild 3.3-11). Je nach Maschinentyp und Zustand ist durchaus mit noch größeren Temperaturdifferenzen zu rechnen.

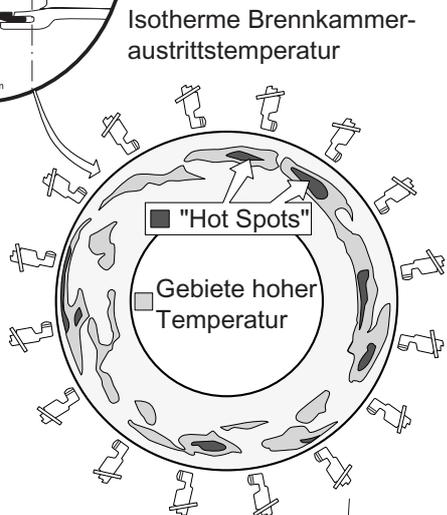
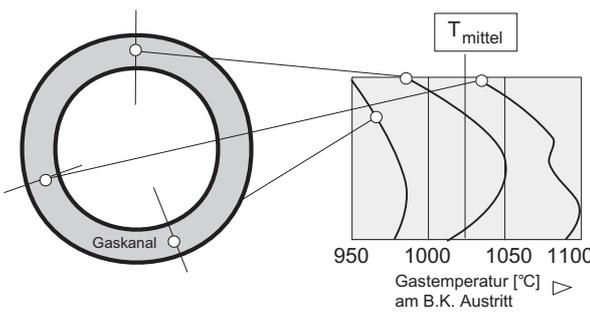
Die RTD wird von den Turbinenrotorschaukeln im Gasstrom nicht voll ausgeglichen. Die Verteilung am Umfang (OTD) wird dagegen gemittelt. Der **Hochdruckturbinenleitapparat** sieht die Temperaturverteilung dagegen ohne Ausgleichseffekte. Die einzelnen Leitschaufeln können sehr unterschiedlichen Temperaturbelastungen unterliegen. Sie zeigen deshalb, in Ausmaß und Verteilung, individuell sehr unterschiedliche Überhitzungsschäden (Bild 3.3-9). Oft sind diese der Position der Einspritzdüsen zuordenbar.



Der Brennkammeraustritt = Hochdruck-turbineneintritt ist eine der thermisch höchstbelasteten Zonen.



Als Beispiel drei typische Kurven radialer Temperaturverteilungen (RTD) in unterschiedlichen Bereichen am Umfang



Typische Erscheinungsformen von Schäden an Turbinenrotorschaukeln auf Grund schlechter RTD

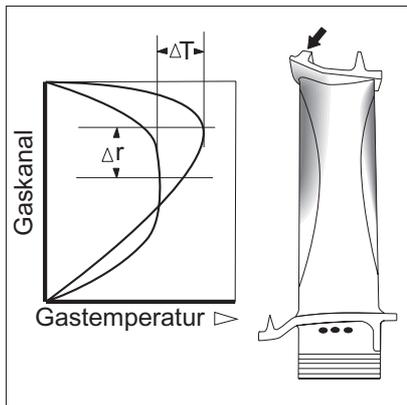
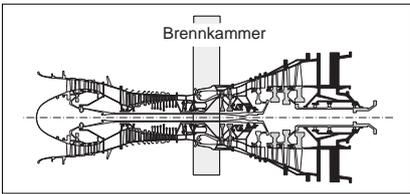


Bild 3.2.3-2



Die Eigenschaften thermischer Spritzschichten werden entscheidend von ihrer Struktur bestimmt.

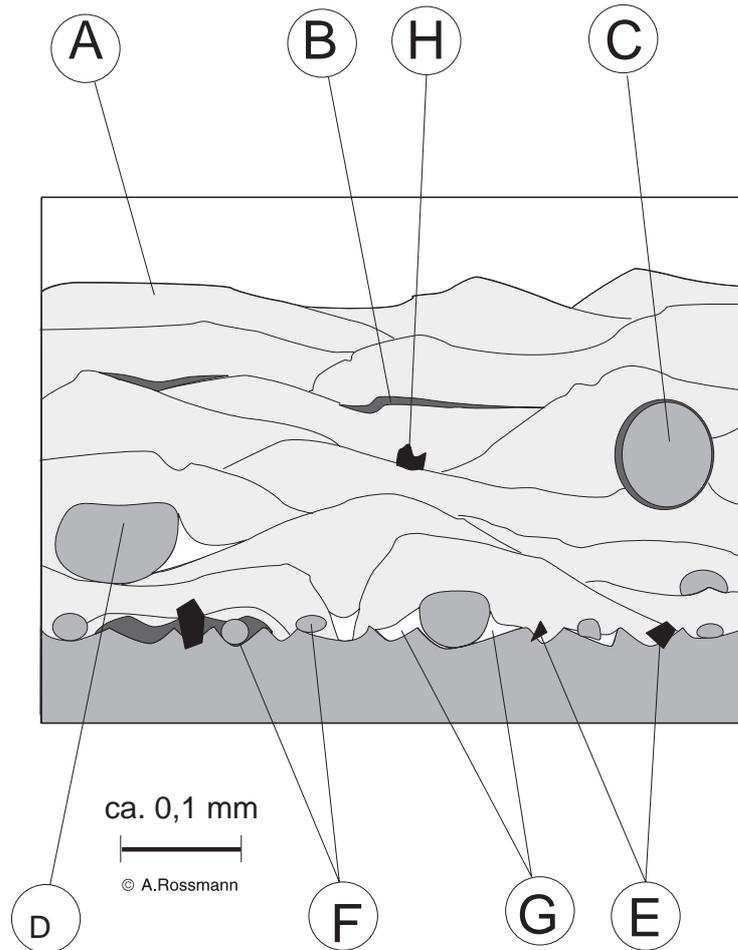


Bild 3.2.3-3

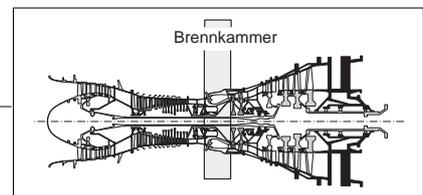
Bild 3.2.3-3: Thermische Spritzschichten kommen in vielen Bereichen in Gasturbinen mit sehr **unterschiedlichen Aufgaben** zum Einsatz. Typische Anwendungen sind:

- Verschleißschutz,
- Wärmedämmschicht,
- Oxidationsschutz und Schutz gegen Heißgaskorrosion (HGK),
- Anstreif- und Einlaufschichten,
- Panzerungen.

Typische Eigenschaften und Besonderheiten sollten nicht nur dem Werkstofffachmann geläufig sein.

Es gibt eine Vielfalt **thermischer Spritzverfahren**. Häufig handelt es sich um Plasma- und Flammsspritzen. Sie werden an Luft oder unter Schutzgas, bei atmosphärischem Druck oder bei Niederdruck angewendet. Die typische **Schichtdicke** liegt im Bereich von mehreren Zehntel Millimetern.

Die Struktur einer solchen Schicht ist **lamellar** ("A") entsprechend der Verformung auftreffender weicher oder flüssiger Partikel.



Bei Verfahren die an Luft durchgeführt werden treten verstärkt **Oxide** (“**B**”) auf. Sie stammen von der Oxidation der frischen Schichtlage und Teilchen mit einer Oxidhaut.

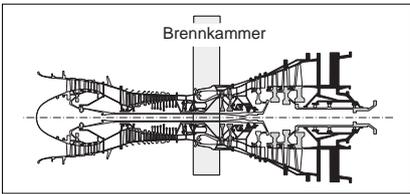
Voraussetzung für eine gute Haftfestigkeit ist eine ausreichende Aufrauung der Spritzfläche. Sie muss für eine Verklammerung von Schicht und Substrat sorgen. Das geschieht mit **abrasivem Strahlen**. Es lässt mineralische Strahlteilchen wie Al_2O_3 (“**E**”) zurück. Ein solcher **Beladungseffekt** kann die Haftschrift beeinflussen.

Merkliche **Oxidation des Haftgrunds** durch Sauerstoffzutritt bei hoher Prozesstemperatur **verschlechtert die Bindung** der Wärmedämmschicht. Nicht selten erkennt man oxidierte Teilchen, die sich im Spritzstrahl und Kontakt mit Sauerstoff bildeten (“**C**”) wenn diese **nicht ausreichend aufgeschmolzen** sind (“**D**”).

Sogenannte “**Abpraller**” (“**F**”) von Spritzpartikeln in größerer Zahl auf der Haftfläche sind ein **Indiz für schlechte Haftfestigkeit**. Dieses Phänomen beobachten wir am Klebefilm auf einer staubigen Fläche. Es wird entsprechend dem mikroskopischen Befund (REM) als „**Kügelchenproblem**“ (Bild 3.1.2.4-7.2) bezeichnet.

Poren (“**G**”) sind in Spritzschichten typisch. In vorschriftsmäßiger Menge, Verteilung und Größe benötigt man sie zur Erzielung bestimmter Eigenschaften wie Einlauffähigkeit, Isolierwirkung und Thermowechselstabilität. Eine **Bewertung** muss sich deshalb an der zugehörigen **Spezifikation** ausrichten. Im Zweifelsfall kann ein Vergleich mit der Struktur bewährter Schichten helfen. Zu große Porosität beeinträchtigt die **Schichtfestigkeit**. Die Porosität wird entscheidend von den Parametern des Beschichtungsprozesses bestimmt. Im Haftschriftbereich ist die **Haftfestigkeit** betroffen.

Auch **nicht aufgeschmolzene Einschlüsse** (“**H**”) mit hohem Schmelzpunkt sind in der Schichtstruktur erkennbar. Sie sind bei häufigem Auftreten ein Indiz für unzulässige **Verunreinigungen des Spritzpulvers**.



Wärmedämmschichten finden in den Heiteilen immer mehr Verbreitung.

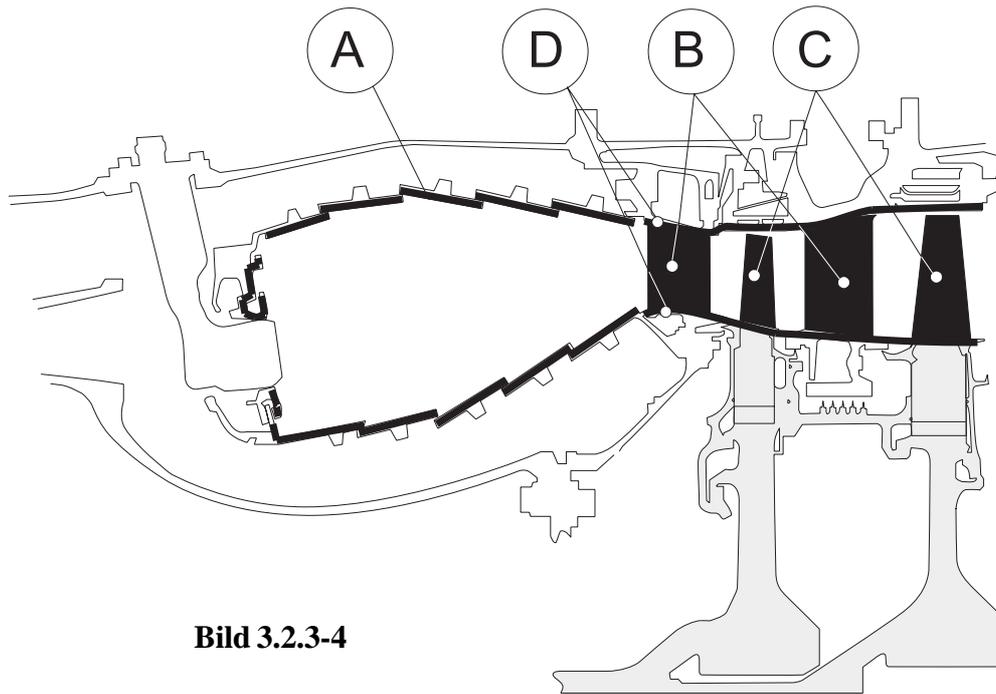
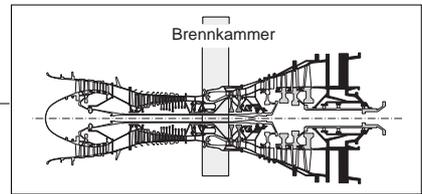


Bild 3.2.3-4

Bild 3.2.3-4: Wärmedämmschichten, auch **Thermobarrieren** genannt, dienen zur Reduzierung der Heiteilstemperaturen und/oder zur Minimierung des Khlluftverbrauchs (Lit 3.2-17). Es handelt sich um keramische Schichten, die in der Hauptsache aus **Zirkonoxid** (ZrO_2) bestehen. Um eine Gefügestruktur mit den gewünschten Betriebseigenschaften Wärmeisolation, Thermoermdungsresistenz und Langzeitstabilität zu erhalten, wird **Yttriumoxid** zugegeben (Bild 3.2.3-8). Bevorzugte Aufbringverfahren sind **thermische Spritzverfahren** oder **Aufdampfen** (PVD, Bild 3.2.3-6). Anfangs war die Anwendung von Wärmedämmschichten auf die Brennkammer (A) beschränkt. Dann folgten die Deckbandinnenseiten (D) und später die Blätter (B) der Hochdruckturbinenleitschaufeln (Bild 3.3-6). Inzwischen sind beschichtete Turbinenlaufschaufeln (C) Stand der Technik

(Bild 3.2.3-6). Hier kommen PVD-Schichten zum Einsatz. Ihre **Stngelstruktur** (Bild 3.2.3-6) verhilft zu einem günstigen Verhalten bei Thermoermüdung.



Manchmal funktioniert etwas doch, auch wenn scheinbar nichts zusammenpasst.

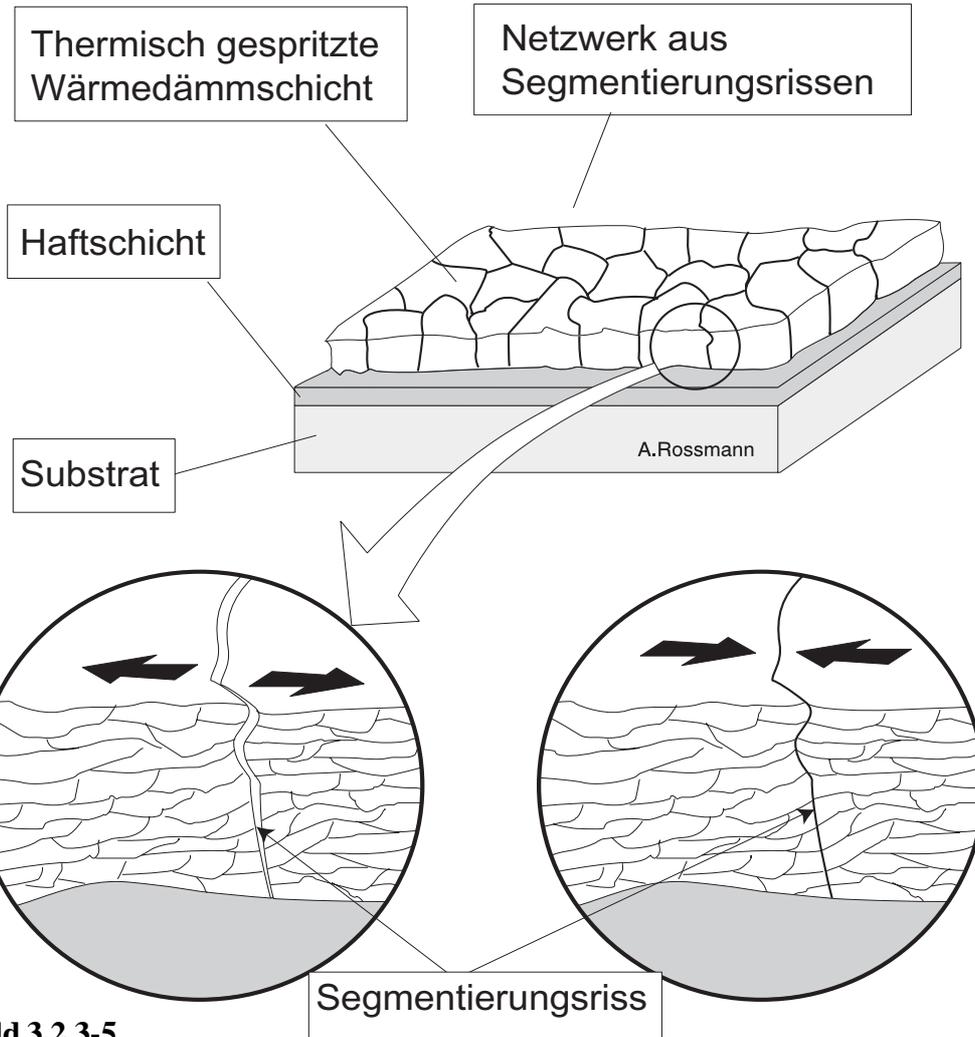
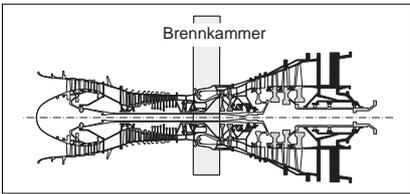


Bild 3.2.3-5: Thermisch gespritzte keramische Wärmedämmschichten zeigen einen typischen lamellaren Aufbau (Bild 3.2.3-3). Sie gleichen die Wärmedehnungsunterschiede gegenüber dem metallischen Grundmaterial mit einer inselartigen Rissbildung aus. Diese sogenannte Segmentierung ermöglicht der Schicht zu „atmen“. Sie sollte bereits von der Temperaturführung beim Fertigungsprozess günstig beeinflusst werden (Eigenspannungen). Sie entsteht in gewünschter Form bei der Beschich-

tung und/oder bildet sich in den ersten Betriebszyklen. In der **Aufheizphase** (rechtes Detail) dehnt sich die isolierende Keramikschicht aufgrund der schnellen Erwärmung trotz relativ kleinem Wärmeausdehnungskoeffizienten stärker als das Grundmaterial. Es kommt zur Schließung der Risse und zu beherrschbaren **Druckspannungen**. Im **stationären Betrieb** bildet sich je nach Temperaturgradienten in Schicht und Grundwerkstoff ein Spannungszustand, der auch langfristig ertragen werden



Auch für Wärmedämmschichten gilt:
Jede Art hat ihre Daseinsberechtigung.

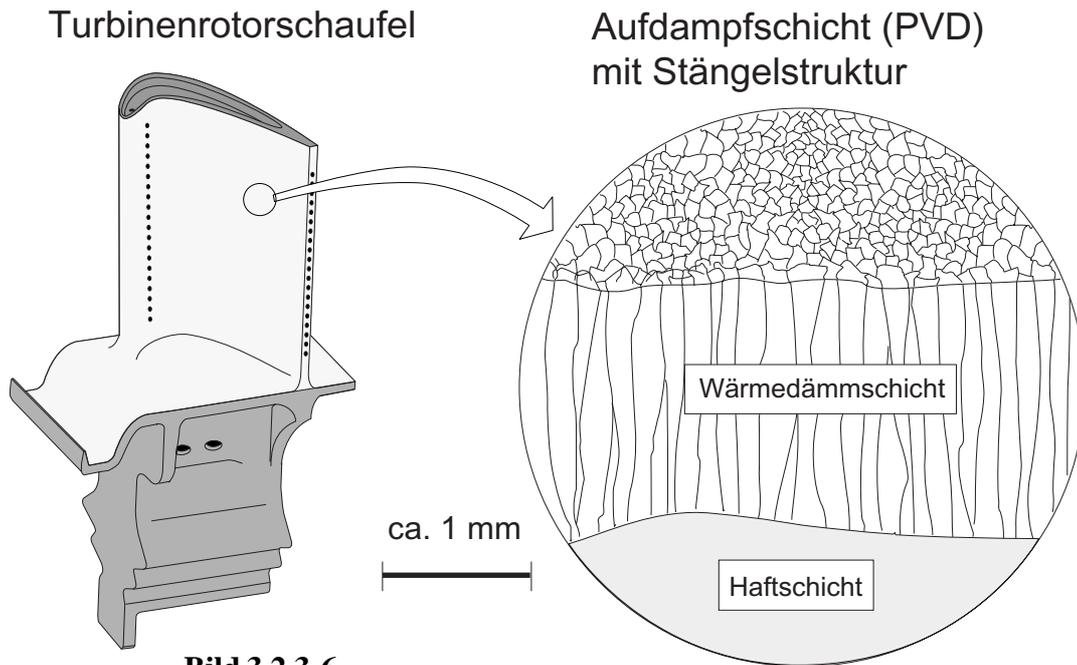
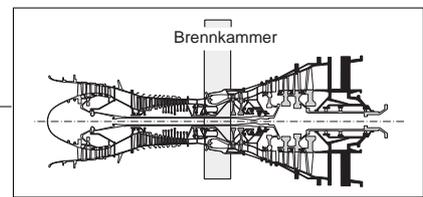


Bild 3.2.3-6

muss. Bei **gekühlten Heißeilen** kann der beschriebene Effekt in der **Aufheizphase** zu einem höheren Druckspannungsniveau führen. In der **Abkühlphase** (linkes Detail) erfolgt der umgekehrte Vorgang, die Risse öffnen sich wieder. Im kalten Zustand kann ein Riss wegen der höheren Wärmeschrumpfung des metallischen Grundwerkstoffs geschlossen sein. Diese Vorgänge dürfen von **Betriebseinflüssen** nicht so behindert werden, dass die Festigkeit der Schicht im Inneren und am Haftgrund überschritten wird und abplatzt (Bild 3.2.3-7).

Bild 3.2.3-6: Die Struktur **keramischer Wärmedämmschichten** (vergleiche Bild 3.2.3-5) ist verfahrensabhängig. Sie beeinflusst entscheidend das Betriebsverhalten und kann betriebs-spezifisch optimiert werden. Auf den Blättern von **Turbinenrotorschaukeln** (Skizze links) haben sich relativ dünne Aufdampfschichten (PVD-Schichten) bewährt. Sie zeichnen sich durch eine besonders gute Thermowechselfestigkeit bei hoher Erosionsbeständigkeit aus. Ihre Qualitätsanforderungen genügen hohen Ansprüchen. Die gute Thermowechselfestigkeit verdanken sie ihrer Stängelstruktur senkrecht zur Oberfläche (Detail rechts). So entsteht der Effekt einer **sehr feinen Segmentierung**.



Wie jede Technologie haben auch Wärmedämmschichten ihre Probleme.

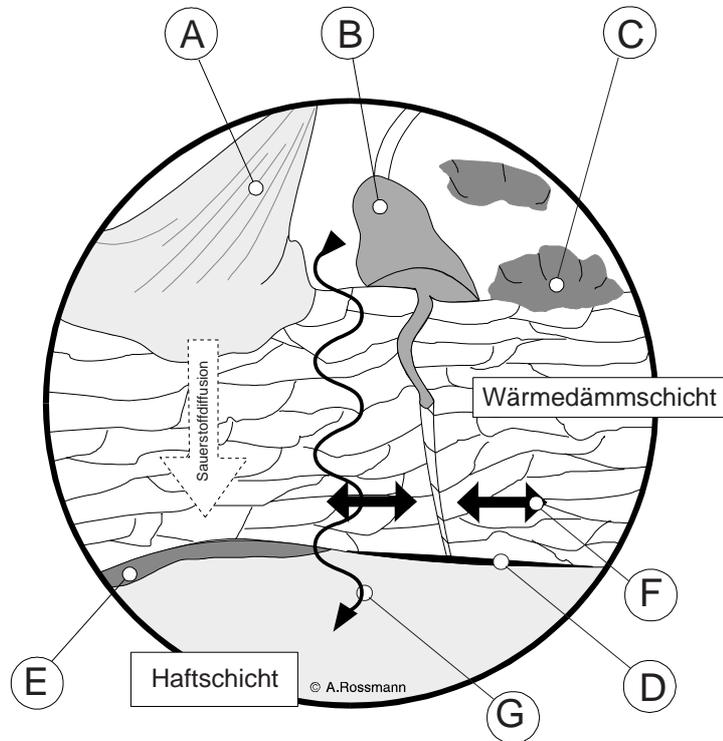


Bild 3.2.3-7

ca. 1 mm

Bild 3.2.3-7: Als Beispiel typischer Betriebsprobleme einer Technologie, können keramische Wärmedämmschichten aus ZrO_2 dienen. Ihre vielfältige Anwendung zeigt Bild 3.2.3-3.

“A”: **Erosion** durch Partikel und/oder den Gasstrom (Bild 3.2.3-8). Typisch sind Schäden an den Hochdruckturbinensegmenten. Es handelt sich um die gehäuseseitigen Dichtflächen gegenüber deckbandlosen HDT-Rotorschaukelspitzen.

“B”: **Schmelzen von Staubablagerungen** (Bild 3.2.3-8) dringen in die Segmentierungsrisse ein und erzeugen bei der Abkühlung im erstarrten Zustand eine Sprengwirkung (Lit. 3.3-9).

“C”: **Chemische Reaktion** mit Ablagerungen. Dazu gehören **Rückstände aus Kraftstoffen** und **verunreinigtem Einspritzwasser** (Bild 3.2.2-3).

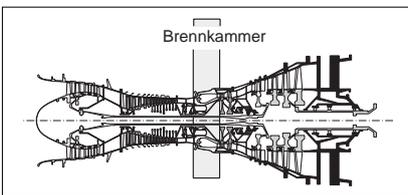
“D”: **Abheben der Schicht** als Folge von herstellungsbedingter schlechter Haftung.

“E”: **Oxidation der Kontaktfläche**, z.B. der **Haftschicht** auf Grund der **Leitung von Sauer-**

stoffionen durch die heiße keramische Schicht. Dieser Versagensmechanismus hat eine relativ lange Inkubationszeit und **bestimmt die Lebensdauer** der beschichteten Teile. Er ist deshalb für die langen Laufzeiten der Gasturbinen besonders problematisch. Heute erreicht man mit dem Einsatz hoch oxidationsfester Haftschichten (z.B. vom MCrAlY-Typ) Garantiezeiten von 10^4 Stunden.

“F”: **Wärmespannungen** aus Fertigung und Betrieb können besonders im Bereich konvexer Radien und Außenkanten zu Abplatzungen führen (Bild 3.2.3-1).

„G“: Über längere Betriebszeiten können **Gefügeänderungen** (Bild 3.2.3-8, Lit 3.2-3) mit einer **Änderung der Wärmeleitfähigkeit** eintreten. Dabei wird diese bis zum Dreifachen erhöht. Das lässt bei gleicher Kühlung eine deutliche Temperaturerhöhung mit einer „schmerzlichen“ **Lebensdauerverkürzung** der betroffenen Heißeile erwarten (Bild 2.3-2).



Schadensmechanismen von Thermo- barrieren (Wärmedämmschichten)

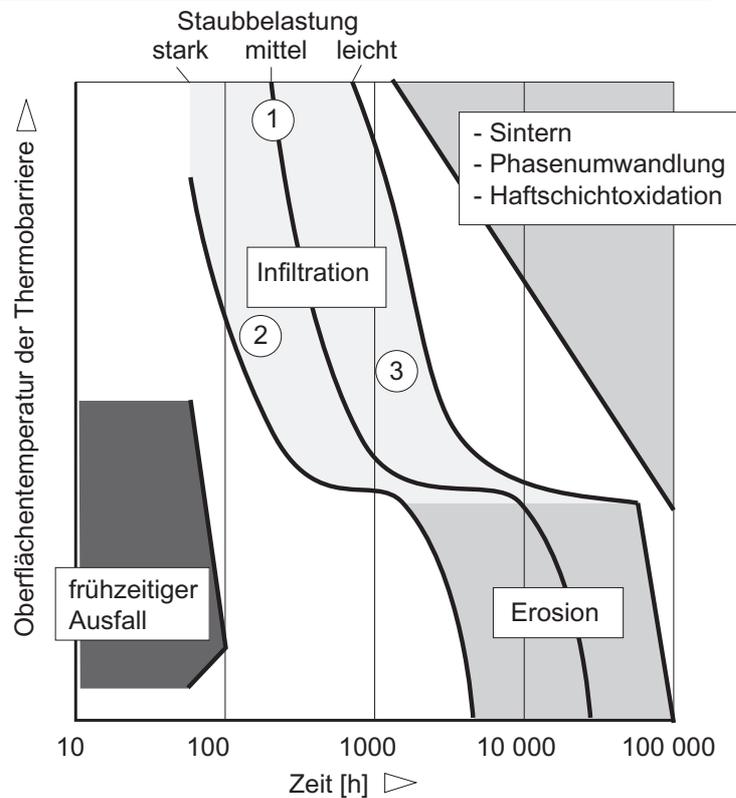


Bild 3.2.3-8

Bild 3.2.3-8: Betriebsschäden (Lit. 3.3-9) von **atmosphärisch plasmagespritzten YSZ** (Yttrium stabilisiertes Zirkonoxid) TBCs (Thermal Barrier Coating) sind in erster Linie von der **Oberflächentemperatur der Schicht** abhängig. Gerade die erwünschte **Isolierwirkung bedingt eine starke Schichtaufheizung**. Dies gilt insbesondere für die typisch langen Betriebszeiten stationärer Gasturbinen.

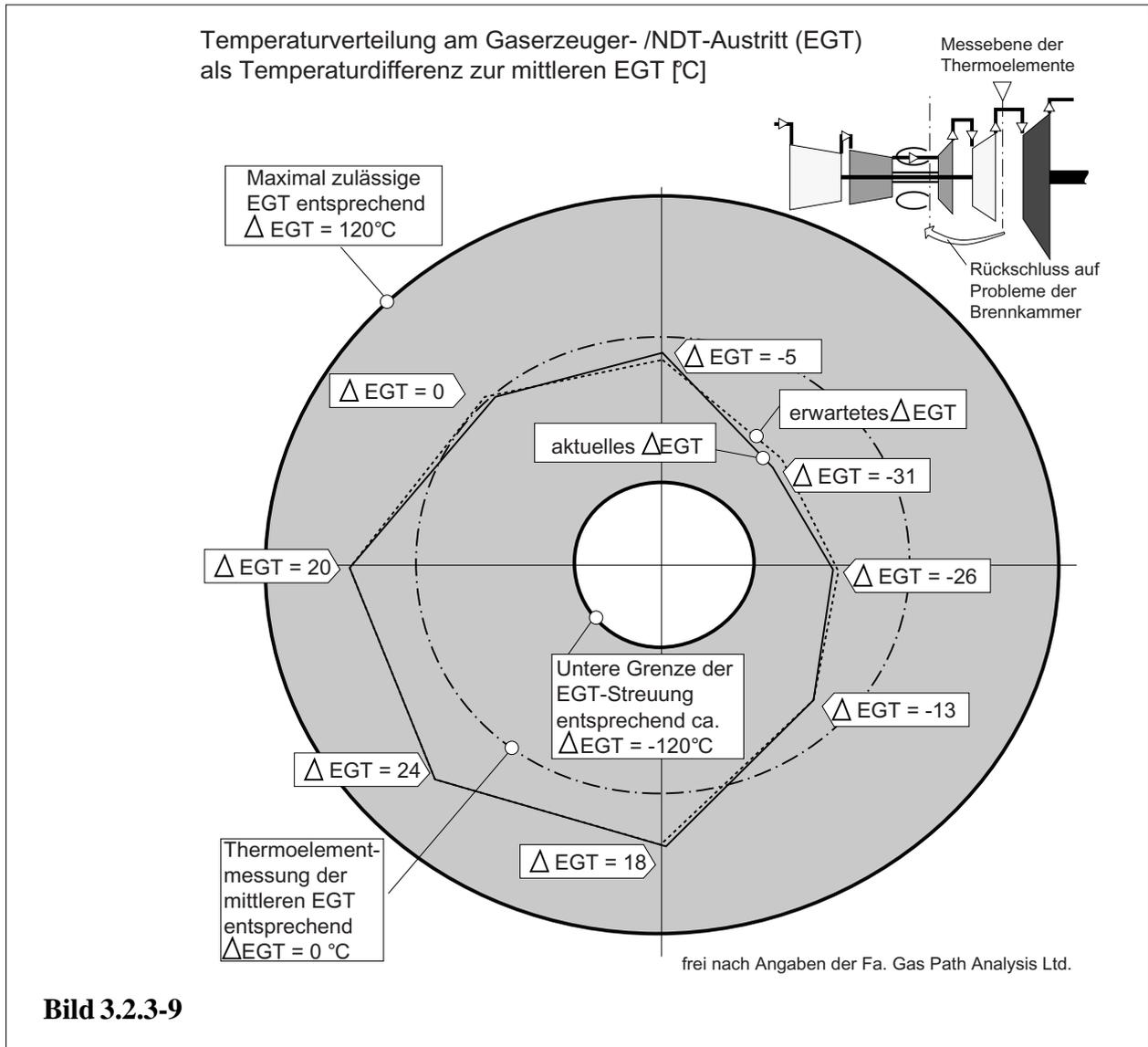
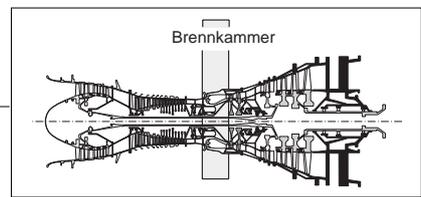
Schäden im linken Diagrammabschnitt die zu frühzeitigem Ausfall führen, werden auf **Fertigungsprobleme** zurückgeführt. Die Kurven "1", "2", "3", geben das Versagensverhalten bei **Staubbelastung** an (Bild 3.2.3-7). Solche Ablagerungen sind z.B. $FeO+NiO$ aus **Dichtungsabrieb** und $MgO+CaO, Al_2O_3, SiO_2$ aus extern **angesaugten Stäuben**. Bei niedrigerer Betriebstemperatur macht sich **Erosion verstärkt** bemerkbar (Bild 3.2.3-7).

Während **sehr langer Betriebszeiten** werden trotz Yttrium-Stabilisierung Effekte wirksam, die auf einer **Veränderung der Schichtstruktur** beruhen:

- **Phasenumwandlung:** Diese Alterung der Wärmedämmschicht kann die **Wärmeleitfähigkeit** (Lit 3.1.2.3-1) **bis zum Dreifachen erhöhen** bzw. den Isolationseffekt mindern. Damit steigt die Temperatur der gekühlten Heißeile, ganz besonders der Hochdruckturbinenschaufeln. So kann sich die Lebensdauer dieser teuren Bauteile spürbar verkürzen (Bild 2.3-2).

- **Sintereffekte** die Segmentierung (Bild 3.2.3-5) und damit die Thermoermüdung beeinflussen.

- **Oxidation der Haftsicht** am Übergang der Haftsicht zur TBC (Bild 3.2.3-7).

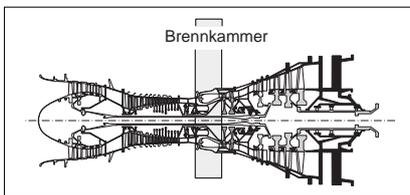


- **Anstieg der Rauigkeit durch Erosion** von Wärmedämmschichten der Turbinensegmente, Heißgasführungen und Beschaufelungen. Das kann zu einer Leistungseinbuße der Gasturbine im Prozentbereich bzw. zu einem entsprechenden Wirkungsgradabfall führen (Lit 3.1.2.3-1).

Bild 3.2.3-9 (Lit. 3.2-26): Mit Hilfe von **On-Line Messungen und einer computergestützten Analyse** (Kapitel 5.1) ist die kontinuierliche **Überwachung der Brennkammer** möglich. Dabei geht es um Probleme wie

- Fehlfunktionen der Kraftstoffdüsen.
- Schäden wie Rissbildung und Verzug.
- Verbrennungsungleichmäßigkeiten.

Am Beispiel einer Mehrwellenmaschine (Detail oben rechts) ist hier eine mit Thermoelementen bestimmte **Temperaturverteilung am Austritt des Gaserzeugers (EGT)** auf dem Überwachungsbildschirm dargestellt. Die kennzeichnende Größe (fault index) ergibt sich aus den prozentualen **Abweichungen der EGT**. Die Vielecke entsprechen der Thermoelementverteilung am Umfang. Sie zeigen die absolute Temperaturdifferenz zur mittleren EGT.



Mit Hilfe der Gasstromanalyse lassen sich Emissionen im Abgas auf preiswerte und schnelle Weise sehr genau und zuverlässig bestimmen.

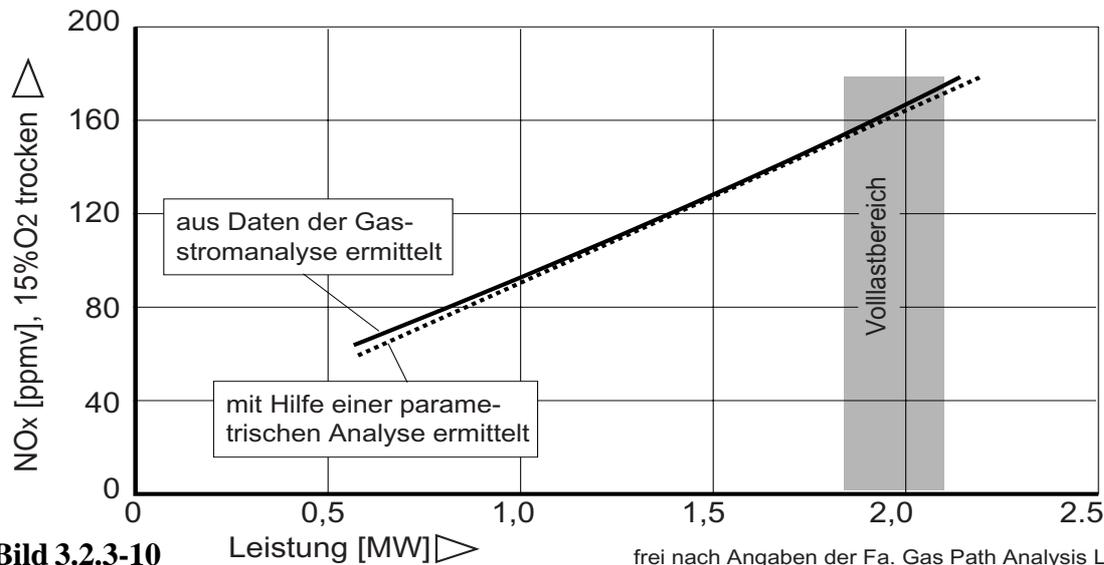


Bild 3.2.3-10

frei nach Angaben der Fa. Gas Path Analysis Ltd

Bild 3.2.3-10 (Lit. 3.2-26): Die **Emissionsminimierung** ist heute eine zentrale Forderung an eine Gasturbinenanlage. Leider ist die Tendenz der beiden Hauptemissionen **NO_x** und **CO** durch die Beeinflussung der Verbrennung in Richtung niedriger Gas-/Flammtemperaturen (Bild 3.2.1-1) gegenläufig (Bild 3.2.2-1 und Bild 3.2.3-11).

Die **NO_x-Bildung** steigt mit der Turbineneintrittstemperatur, dem Kraftstoff-Luft-Verhältnis und dem Brennkammerdruck (Bild 3.2.1-3). Sie **verstärken sich mit ansteigender Leistung** der Maschine.

Die **Messung der Emissionen** im Austrittsgas kann technisch äußerst schwierig und kostspielig sein.

Mit Hilfe **parametrischer Modelle** können auf Basis **computergestützter Berechnungen** Voraussagen gemacht werden. Die notwendigen Messungen der Parameter wie die Luftströmung in der Brennkammer und die Brennkammeraustrittstemperatur (Turbineneintrittstemperatur) ist jedoch offenbar nicht praktikabel. Beispielsweise weil derartig warmfeste lang-

zeittaugliche Thermoelemente nicht verfügbar sind.

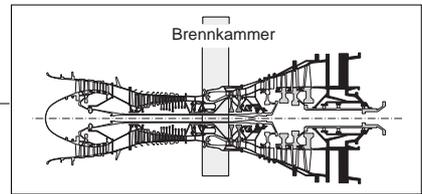
Diese Messungen lassen sich mit abgeleiteten Werten aus anderen, leichter messbaren Parametern, die sowieso im Rahmen einer **Gasstromanalyse** (Gas Path Analysis, Kapitel 5.1) anfallen (Bild 5.1-2), umgehen. Das ist eine praktikable und kostengünstige Methode.

Dieses Vorgehen wurde für unterschiedliche Turbinentypen bestätigt und ist verbreitet im Einsatz. Ihre **Genauigkeit** ist beeindruckend. Das Diagramm zeigt **NO_x** im Abgas am Beispiel einer Derivatorturbine mittlerer Leistungsstufe, in Abhängigkeit von der abgegebenen Leistung.

Man erkennt lediglich minimale **Abweichungen zwischen parametrischer Methode und der Berechnung aus der Gasstromanalyse**.

Ein Temperaturanstieg aufgrund des Wirkungsgradabfalls der Gasturbine über der Betriebszeit (deterioration), beeinflusst die **NO_x-Bildung** stark. Im Volllastbereich nimmt die **CO-Entstehung** dagegen nur wenig ab (Bild 3.2.3-11).

Selbst ein scheinbar geringer Anstieg von **NO_x** kann für den Betreiber weitreichende Konsequenzen haben. Ein **verschmutzter Verdichter**



Mit Hilfe eines parametrischen Modells ermittelter CO-Ausstoß in Abhängigkeit von der Leistung einer Derivatmaschine mittlerer Leistungsklasse.

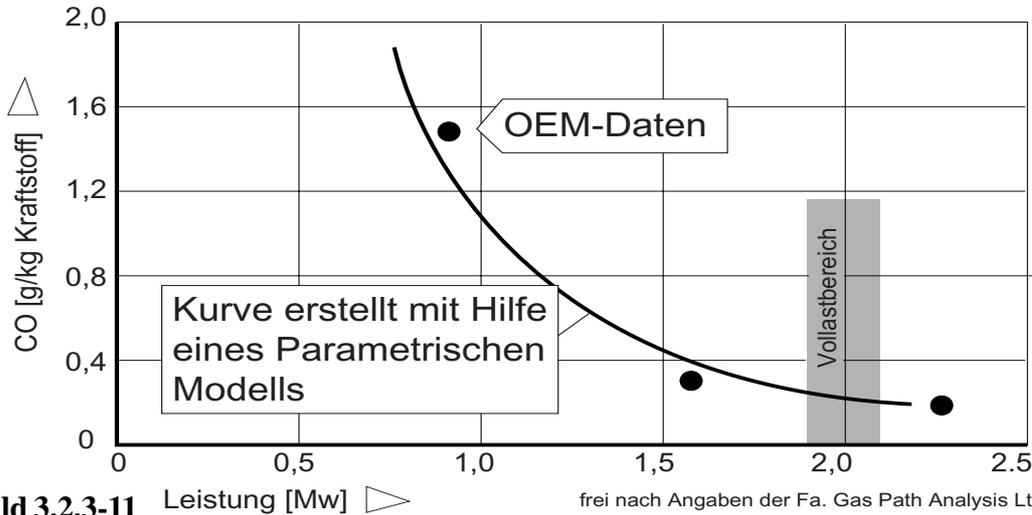


Bild 3.2.3-11 Leistung [Mw] frei nach Angaben der Fa. Gas Path Analysis Ltd.

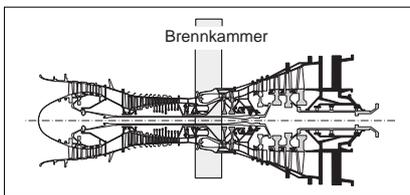
(fouling, Bild 4.2-1.1 und Bild 4.2-1.2) kann beispielsweise die NOx-Emission um 5 % verstärken. Damit sind möglicherweise bereits vom Gesetzgeber festgelegte Grenzwerte überschritten. Aus diesem Grund ist die **Wirkungsgradüberwachung** der Maschine und ihrer Komponenten für eine Begrenzung der Emissionen von großer Bedeutung.

Für die Bestimmung der Emissionen mit Hilfe einer computergestützten Berechnung werden bei einer Zweiwellenmaschine folgende **Parameter** gemessen:

- Verdichter:
 - Eintrittstemperatur
 - Eintrittsdruck
 - Austrittsdruck
- Niederdruckturbine / Gaserzeuger:
 - Austrittstemperatur
 - Austrittsdruck
 - Drehzahl
- Kraftstoff:
 - Durchsatz
 - untere Grenze des Heizwerts.

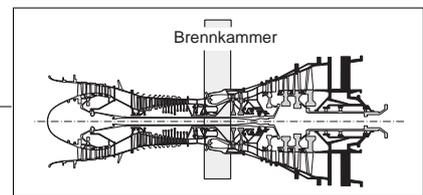
Interessant ist, dass weder die Leistung der Maschine noch der Luftmassenstrom am Verdichtereintritt benötigt werden.

Bild 3.2.3-11 (Lit. 3.2-26): Als äußerst giftige Emission steht CO neben NOx (Bild 3.2.3-10) bei der Vermeidung im Vordergrund. Senkt man zur NOx-Reduzierung die Verbrennungstemperatur ab, wird mehr CO gebildet (Bild 3.2.1-3). Um einen optimalen Kompromiss zu finden, ist deshalb auch der CO-Gehalt im Abgas zu bestimmen. Dazu dient ein **parametrisches Modell**. Es nutzt **im Rahmen der Gasstromanalyse** benötigte direkte Messwerte in der Brennkammer wie Temperatur in der Primärzone, Druck und Druckabfall.

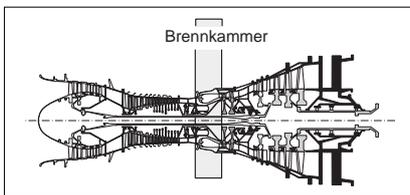


Literatur zu Kapitel 3.2

- 3.2-1** H.Löffel, "Auswirkungen der TA Luft auf den Betrieb von Gasturbinen" Gaswärme International, Band 36 (1987) Heft 3.
- 3.2-2** Rolls Royce Ltd., "The Jet Engine", Publication Ref.T.S.D. 1302, July 1969, 3rd Edition, Seite 10 und 29-37.
- 3.2-3** Northern Research and Engineering Corporation, Cambridge, Massachusetts, "The Design and Performance Analysis of Gas-Turbine Combustion Chambers" Volume 1, Theory and Practice of Design.
- 3.2-4** M.Hartmann, R.Robben, P.Hoppe, „Inspection, Maintenance and Field Repair of Heavy Duty Industrial Gasturbines“ ASME Paper 74-GT-147(1974),
- 3.2-5** L.B.Davis, "Dry Low NOx Combustion Systems for GE Heavy-Duty Gas Turbines", Proceedings des Yokohama International Gas Turbine Congress 1995. Seite I -245.
- 3.2-6** R.Farmer, "See 57% net efficiency combined cycles powered by 2400 F '3A' series Turbines", Gas Turbine World:Jan/Feb 1995 Seite 26.
- 3.2-7** B.Becker,H.H.Finckh, „Die 3A-Gasturbinen kombinieren bewährte und neue KWU-Technologien mit Triebwerk-know-how“, Siemens Power Journal 2/95, Seite 13-17.
- 3.2-8** A.Saul, D.Altemark, "Die Verbrennung vorgemischter Magergemische in den Brennkammern von Gasturbinen", Gaswärme International 40 (1991) Heft 7/8 Seite 336 ff.
- 3.2-9** Power Plant Technology Economics & Maintenance-March/April 1996 Seite 48-50 „To Coat with Many Covers“.
- 3.2-10** Power Plant Technology Economics & Maintenance-Jan/Feb.1996 Seite 16-18 „Learning from LM6000“.
- 3.2-11** S.S.Smith,GE Company, "GE Aero-derivative Gas Turbines", GE Power Generation Marketing Communications, USA
- 3.2-12** D.W.. Bahr,T.F.Lyon,GE Company „NOx Abatement via Water Injection in Aircraft-Derivative Turbine Engines“, ASME Paper 84-GT-103.
- 3.2-13** Power Plant Technology Economics & Maintenance-July/August 1996,Kapitel Technology Seite 13.



- 3.2-14** K. Fujisawa, M. Kunihiro, D.Kokuten, „Operation Experience with an MS9001 Gas Turbine in a Combined-Cycle Power Plant at East Japan Railway Company Kawasaki Power Station“, Hitachi Review Vol.38 (1989) No.3. Seite 145 - 150.
- 3.2-15** „Low NOx combustion for gas turbines“, Power Plant Technology Economics & Maintenance- July/August 1997, Seite 22-26.
- 3.2-16** D.A.Kolp, S.R.Gagnon, M.J. Rosenbluth, „Water Treatment and Moisture Separation in Steam-Injected Gas Turbines“, ASME Paper Nr. 90-GT-372 (1990).
- 3.2-17** T.Torigoe,T.Kitai,I.Tsiji,H.Kawai,Y.Kasai,Mitsubishi Heavy Industries,Ltd. „Zirconia TBC Application in Power Generating Gas Turbine“, Proceedings of ASM 1993 Materials Congress, Seite 131-134.
- 3.2-18** H.E.Eaton,N.S.Bornstein,J.T.De Masi-Marcin,“The Effects of Environmental Contaminations on Industrial Gas Turbine Thermal Barrier Coatings“, ASME Paper 96-GT-283 (1996).
- 3.2-19** T Fujii, „Estimation of Thermophysical Properties and Microstructure of Aged Thermal Barrier Coatings“,Proceedings of ASME Turbo Expo 2001, June 4-7, 2001, New Orleans, Louisiana, Seite 1-6.
- 3.2-20** F.W. Skidmore, J.M.Bennett, D.E. Glenny, „An Investigation Into Hard Carbon Formation in a Modified Gas Turbine Combustor“, Proceedings Paper ISABE 95-7116, Seite 1268 bis 1273.
- 3.2-21** H.F. Butze, C.H. Liebert, „Effect of Ceramic Coating of JT8D Combustor Liner on Maximum Liner Temperatures and other Combustor Performance Parameters“, NASA Technical Memorandum, NASA TM X-73581, December 1976, Seite 1-11.
- 3.2-22** M.Zhu, A.P.Dowling, K.N.CBray, „Self-Excited Oscillation in Combustors With Spray Atomizers“, ASME Paper 00-GT-108 des „International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition“, Munich, Germany, May 8-11, 2000.
- 3.2-23** W. Krebs, J. Hellat, A. Eroglu, „Technische Verbrennungssysteme“, Kapitel aus C. Lechner, J.S. Seume „Stationäre Gasturbinen“, Springer Verlag, ISBN 3-540-42831-3, Seite 447 bis 528.
- 3.2-24** T. Sattelmayer, „Grundlagen der Verbrennung in stationären Gasturbinen“, Kapitel 8 aus C. Lechner, J.S. Seume „Stationäre Gasturbinen“, Springer Verlag, ISBN 3-540-42831-3, Seite 385 bis 468.
- 3.2-25** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken“, Band 3, ISBN 3-00-017733-7, 2003, Axel Rossmann Turboconsult, Bachweg 4, 85757 Karlsfeld.
- 3.2-26** „State of the Art Performance Monitoring systems for Gas Turbines, Process Compressors & CHP systems - Gas turbine combustion diagnostics“, Fa. Gas Path Analysis Ltd., www.gpal.co.uk, 2008.



3.2-27 T.Sattelmayer, „Grundlagen der Verbrennung in stationären Gasturbinen“, „Beitrag im Buch „Stationäre Gasturbinen“, C.Lechner, J.Seume, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-42831-3, 2002, Seite385-445.

3.2-28 W.Krebs, J.Hellat, A.Eroglu, „Technische Verbrennungssysteme“, „Beitrag im Buch „Stationäre Gasturbinen“, C.Lechner, J.Seume, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-42831-3, 2002, Seite447-486.

3.2-29 K.-U.Schildmacher, „Experimentelle Charakterisierung der Instabilitäten vorgemischter Flammen in Gasturbinen-Brennkammern“, „Forschungsberichte aus dem Institut für Thermische Strömungsmaschinen- Universität Karlsruhe (TH), Band 26/2005.(Lit HB451)

3.2-30 C.Taut, W.Kollenberg, U.Rettig, „Keramische Komponenten“, „Beitrag im Buch „Stationäre Gasturbinen“, C.Lechner, J.Seume, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-42831-3, 2002, Seite727-743.