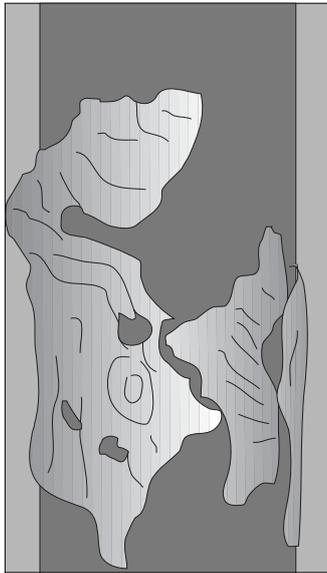


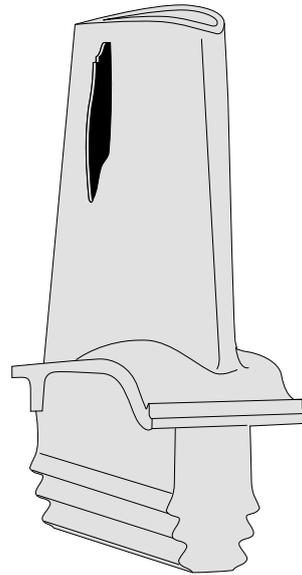
Äußere Einflüsse Korrosion ohne mechanische Belastung: Hochtemperaturkorrosion

5.6.1.4 Hochtemperaturkorrosion/Heißgaskorrosion (HTK)

Sulfid-Schmelzenangriff im
Rohr eines Crackofens



Durchbruch der Innensulfidation
an einer gekühlten Hochdruck-
turbinschaufel



Unter Hochtemperaturkorrosion versteht man die oxidative Schädigung von Metallen und Metalllegierungen durch heiße Gase, flüssige und feste Stoffe. Hierzu gehören alle Schädigungen durch Reaktionen mit der umgebenden Atmosphäre oder durch sie transportierte Fremdpartikel (Lit. 5.6.1.4-1, Bild 5.6.1.4.2-3). Oxidation und **Heißgaskorrosion (HGK)**, Sulfidation, Lit. 5.6.1.4-3) sind wichtige lebensdauerbegrenzende Schadensmechanismen von in erster Linie dem Heißgasstrom ausgesetzten Heißeilen, wie der Brennkammer und der Turbinenbeschaukelung. Die Verunreinigungen der Ansaugluft, des Hauptluftstroms im Triebwerk sowie des Luftsystems (z.B. Kühlluft, Sperrluft, Leckluft) wirken sich nicht nur auf die „heißgasbenetzten“ Außenflächen gekühlter Bauteile aus, sondern über die Kühlluft auch auf die Rück- bzw. Innenseiten der Bauteile. Bei modernen Triebwerken, die im Verdichterbereich weitgehend korrosionsfeste Werkstoffe wie Titan- und Nickellegierungen aufweisen, verlegen sich somit die Korrosionsprobleme vom Verdichterbereich älterer Triebwerkstypen in den Heißeilbereich.

5.6.1.4.1 Grundlagen der Hochtemperaturkorrosion/ Heißgaskorrosion.

Luftverunreinigungen in allen Aggregatzuständen beeinflussen die Heißeile durch unterschiedliche auf Korrosion basierende Schadensmechanismen. Im unteren Temperaturbereich bis ca. 950°C überwiegt die Korrosion. Oberhalb dieser Temperatur dominiert die Oxidation. Es treten flache **Anfressungen**, lochfraßartige **Korrosionskerben**, **Korngrenzenschädigungen** und tiefgehende flächige Veränderungen auf. Dabei kann etwa die Geometrie durch Abtrag oder Aufbau derart verändert werden, dass die Festigkeit durch Werkstoffschädigungen vermindert wird, das plastische Dehnungsverhalten beeinflusst wird und die Lebensdauer verkürzt wird. Eine der spezifischen Schadensformen an Heißeilen sind Schädigungen, die unter dem Überbegriff **Hochtemperaturkorrosion** (HTK) zusammengefasst werden.

Gewöhnlich enthält das Heißgas (typischerweise) weitere, den Oxidationsangriff fördernde Bestandteile aus dem Kraftstoff. Die Schädigung durch Oxidation wird durch die Aufbringung von Oxidationsschutzschichten (z.B. Al-Diffusionsschichten, MCrAlY-Auflageschichten) beherrscht. Wenn sich auf der betroffenen Oberfläche aggressive Ablagerungen angesammelt haben, kommt es zu einer schnell fortschreitenden Schädigung des Grundwerkstoffs. Als besonders aggressiv zeigt sich die sogenannte Sulfidation (Bild 5.6.1.4.1-3). Diese HGK-Form erhält von scheinbar geringfügigen Schwefelmengen eine besondere Fortschrittsdynamik. Sie steht auch im Verdacht für **Spannungsrissskorrosion** verantwortlich zu sein (siehe auch Bild 5.3-8).

Kommen auf Heißeilen keramische Wärmedämmschichten (Bild 5.6.1.4.2-5) zum Einsatz, so ist auch hier ein besonderes Augenmerk auf (Unter-) Oxidation und/oder Reaktionen mit Ablagerungen zu richten.

Formen der Hochtemperaturkorrosion und Fachbegriffe (Bild 5.6.1.4.1-1, Lit. 5.6.1.4-10):

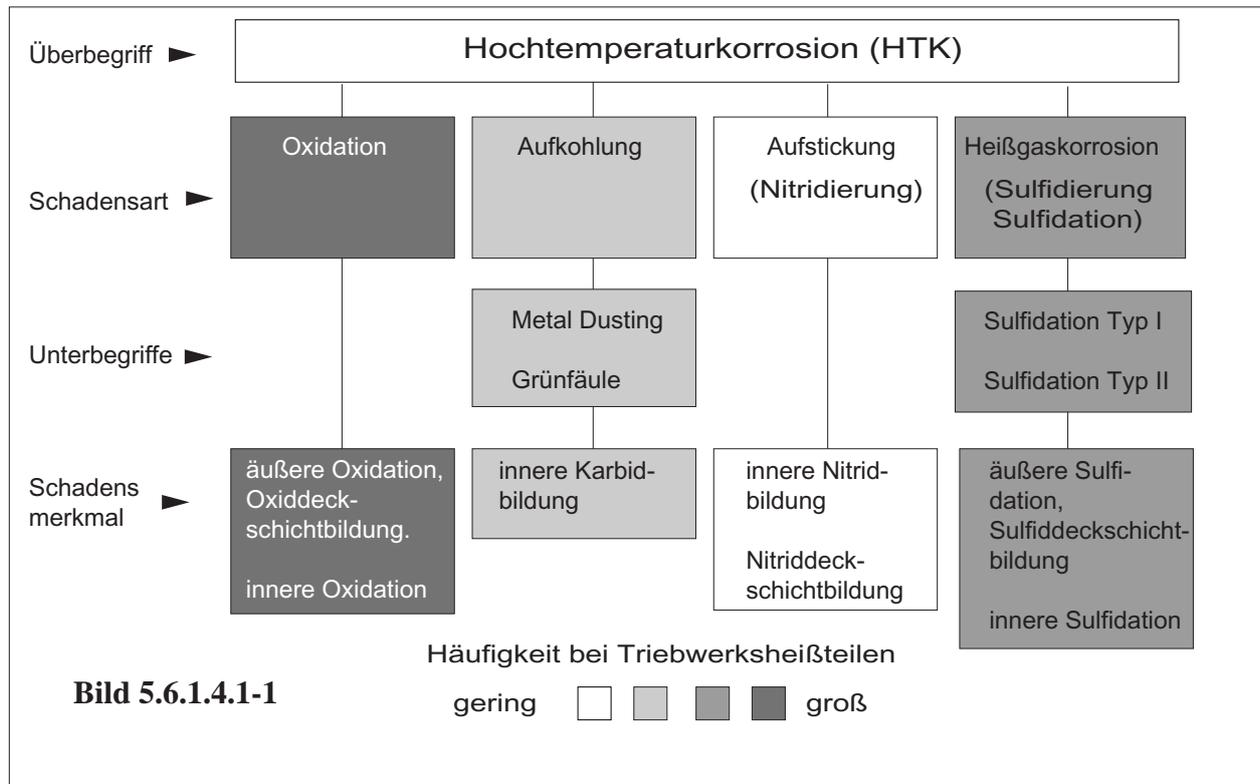
Oxidation: Diese führt im Betriebstemperaturbereich moderner Triebwerke und deren typischer Strukturwerkstoffe zur Bildung von Deckschichten aus Oxiden des Grundwerkstoffs wie Al-Oxid und Cr-Oxid.

Werden diese spröden Oxide erosiv entfernt oder durch Dehnungen (z.B. Wärmedehnungen und Volumenänderungen) geschädigt (Risse, Abplatzen; Bild 5.1-2 und Bild 5.6.1.4.1-2) so kann die Oxidation derart fortschreiten, dass es zu unzulässiger Querschnittsschwächung und zum Versagen des Bauteils kommt.

Katastrophale Oxidation wird eine Oxidation unter Gewichtsverlust bezeichnet, die auf Grund der Bildung flüssiger oder flüchtiger Oxide auftritt. Ein typisches Beispiel für ein flüssiges Oxid ist Vanadiumpentoxid mit einem Schmelzpunkt von ca. 660 °C. Oberhalb 1000°C und hohen Sauerstoff Partialdrücken können Cr-Oxide nennenswert abdampfen. Al-Oxide zeigen dagegen keine merkliche Abdampfung.

Aufkohlung: Es handelt sich um eine innere Korrosionsform unter Bildung von Karbiden die zu einem Mangel an schutzschichtbildenden Legierungsbestandteilen führt. Schäden durch Aufkohlungsvorgänge können im Bereich von Einspritzdüsen und benachbarten Brennkammerzonen auftreten, insbesondere im Bereich unterhalb von Ruß-/ Koksablagerungen.

Äußere Einflüsse Korrosion ohne mechanische Belastung: Hochtemperaturkorrosion



Metal Dusting: Diese besondere Form der Aufkohlung wurde bei Fe-, Ni- und Co-Basislegierungen unter dauernden Aufkohlungsbedingungen beobachtet. Es kann zu starkem Materialverlust kommen. Diese Schadensform wird deshalb auch **katastrophale Aufkohlung** genannt (Lit 5.6.1.4-1). In einem Zwischenstadium bilden sich Karbide als innere Korrosionsprodukte. Die Oxide als Endprodukt des Schadensablaufs fallen typischerweise als Staub von der Oberfläche ab.

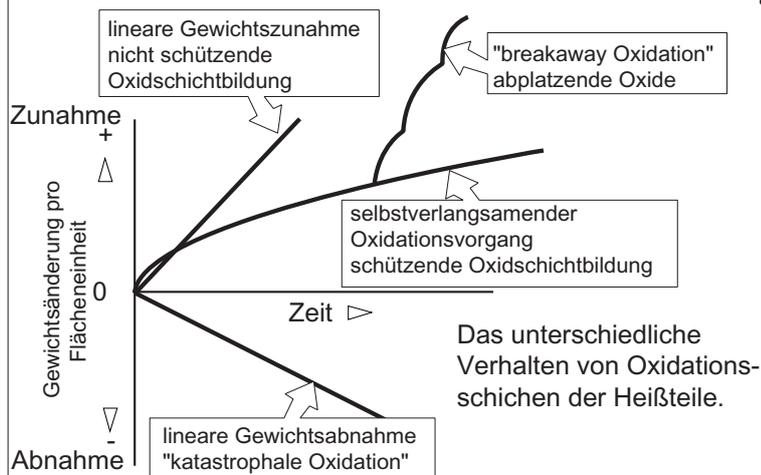
Grünfäule („Green Rot“): Ist ebenfalls eine Form der Aufkohlung. In diesem Fall jedoch unter wechselnden aufkohlenden und oxidierenden Bedingungen (Lit. 5.6.1.4-1). Durch die Abbindung von Cr wird die Bildung einer schützenden Cr-Oxid-Deckschicht verhindert was zur starken Oxidation von Fe- Anteilen führt. Extremer Abtrag wurde in einem Fall beobachtet in dem eine Ni-Basis Legierung mit Fe-Basis Schrauben bei geringem Sauerstoffaustausch verschraubt wurde. Dabei wurde besonders die Ni-Basis Legierung schwer durch Materialverlust bei deutlicher Grünfärbung geschädigt.

Sulfidation (Heißgaskorrosion - HGK, Sulfidierung, Aufschwefelung): Es handelt sich um einen Oxidationsvorgang unter der Einwirkung von Schwefel, der bei oxidationsbeständigen Werkstoffen mit einer mehrere Größenordnungen schnelleren Geschwindigkeit als der normale Oxidationsvorgang abläuft (Bild 5.6.1.4.1-2 und Bild 5.6.1.4.1-3). Sulfidation kann durch kleine Mengen von Silber ausgelöst und weiter beschleunigt werden (Bild 5.3-8, Lit. 5.6.1.4-2). Aus diesem Grund werden nicht selten von manchen Herstellern bei bestimmten Heißeilen nur unversilberte Schrauben und Muttern zugelassen.

Korrosion ohne mechanische Belastung: Hochtemperaturkorrosion

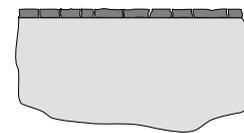
Einfluss von Oxidation und Heißgaskorrosion auf die Bauteillebensdauer.

Oxidation verlängert als schützende Deckschicht die Heißteillebensdauer. Im nicht schützenden Zustand führt sie jedoch zur Lebensdauerreduzierung.

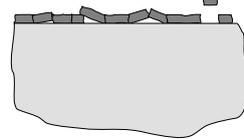


Formen nichtschützender Oxidation als Folge von Rissbildung.

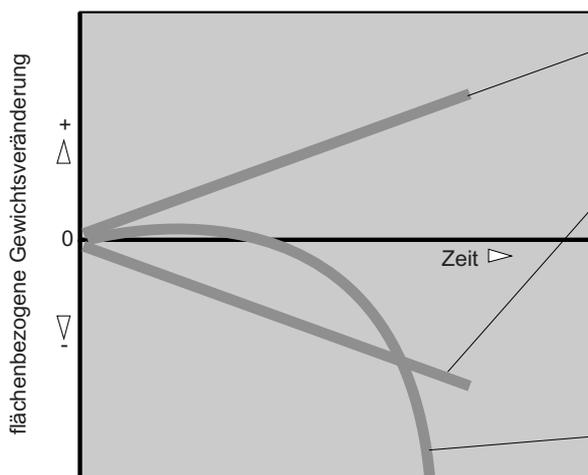
Oxidationsschicht mit hohen Zugspannungen wegen einer Volumenabnahme.



Oxidationsschicht mit hohen Druckspannungen wegen einer Volumenzunahme.



Die wichtigsten Formen atmosphärenbedingter Schädigungsmechanismen an Heißteilen.



Erosion durch das Auftreffen von flüssigen oder festen Partikeln: Asche, Schmutz



Flüssige und feste **Ablagerungen** (Fouling): Ca, P, Mg



Reaktion mit Na, Cl, S aus
 - Gasen
 - flüssigen Ablagerungen
 - Oxidschmelzen:
 - Korrosion
 - Inkubation
 - verstärkter Angriff

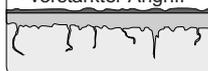


Bild 5.6.1.4.1-2

Äußere Einflüsse Korrosion ohne mechanische Belastung: Hochtemperaturkorrosion

Bild 5.6.1.4.1-2 (Lit. 5.6.1.4-1): Je nach dem Verlauf der Gewichtsänderung lässt sich bereits auf eine schützende oder schädigende Eigenschaft der Oxidschicht schließen (Skizze oben). Eine nicht abflachende Gewichtszunahme deutet auf eine fortschreitende Oxidation aufgrund einer sauerstoffdurchlässigen (Diffusion, oder Durchtritt infolge Porosität und/oder Rissbildung) Oxidschicht hin.

Die unteren Skizzen zeigen modellhaft die verschiedenen Schädigungsmöglichkeiten spröder Oxidschichten, je nach dem ob durch Volumenvergrößerung Druckspannungen oder durch Volumenabnahme Zugspannungen induziert werden, welche die Schichtfestigkeit übersteigen. Sobald Rissbildung in der Oxidschicht auftritt besteht die Gefahr einer Unteroxidation und damit des Absprengens der Oxidschicht, auch wenn Zugeigenspannungen vorliegen.

Bei Heißeilen werden in erster Linie drei Schadensmechanismen wirksam, die in jeder Kombination denkbar sind (Lit. 5.6.1.4-3): Bei Heißeilen werden in erster Linie drei Schadensmechanismen wirksam, die in jeder Kombination denkbar sind:

- Feste und flüssige Ablagerungen erzeugen durch Schichtaufbau geometrische Veränderungen und beeinflussen damit z.B. die aerodynamische Güte von Profilen oder Verstopfen Kühlluftbohrungen. Eine Verkleinerung tragender Querschnitte tritt nicht ein. Das Bauteil erfährt durch die anhaftenden Ablagerungen eine flächenbezogene Gewichtszunahme.

- Feste und flüssige Partikel führen zum Erosionsabtrag, geometrischen Veränderungen in Kombination mit der Schwächung tragender Querschnitte und Veränderung aerodynamischer Eigenschaften. Das Bauteil erfährt üblicherweise anfangs durch den „Beladungseffekt“ (Bild 5.5.1.1-5) eine Gewichtszunahme. Nach einer Inkubationszeit erfolgt ein progressiver Gewichtsverlust.

- Die Reaktion mit Gasen, festen und flüssigen Ablagerungen bzw. Schmelzen führt zum Festigkeitsabfall ohne, dass notwendigerweise der Querschnitt verkleinert oder die Geometrie verändert wird. Bei der Reaktion mit Umgebungsmedien erfolgt eine nahezu lineare Gewichtsabnahme durch einen relativ langsamen flächigen Materialverlust.

Die Kombination der Schadensmechanismen kann die Schädigung gegenüber dem Einzelnfluss deutlich verstärken. Läuft z.B. gleichzeitig mit einer schädigenden Reaktion die eine erosionsempfindliche Oberflächenschicht erzeugt eine Erosionsbeanspruchung ab, so entstehen immer neue frische Metallflächen, was wiederum eine Reaktion unterstützen kann. Damit kann sich ein selbstverstärkender Schadensablauf ausbilden.

Äußere Einflüsse

Korrosion ohne mechanische Belastung: Hochtemperaturkorrosion

Bild 5.6.1.4.1-3: Man unterscheidet zwei Schadensformen der **Sulfidation**. Den **Typ I** (oberhalb 800°C) und den **Typ II** (von ca. 600°C bis 800°C). Diese Temperaturbereiche sind nicht von dem geschädigten Grundwerkstoff vorgegeben, sondern von der Zusammensetzung der aggressiven **Ablagerungen**. Hauptschadensmechanismus ist die **Zerstörung der schützenden Oxid-Deckschicht** und damit der Zutritt schädigender Salzschnmelzen. Die Bestandteile gefährlicher **Salzschnmelzen** sind Natrium, Vanadium, Magnesium, Kalium und Schwefel. In Maschinen die vergleichsweise sauberen Kraftstoff verbrennen, sind korrosionsgefährliche Ablagerungen gewöhnlich auf Verunreinigungen der Ansaugluft zurückzuführen. Weil Natrium, Chlor und Schwefel eine besondere Bedeutung haben, sind Maschinen, besonders Gasturbinen in Meeresatmosphäre und/oder bei schwefelhaltiger Staubbelastung (z.B. gipshaltige Stäube) gefährdet. Die Erfahrung hat gezeigt, dass Silber, z.B. bei versilberten Verschraubungen (Bild 5.3-8 und Bild 5.6.1.4.1-4), den Sulfidationsvorgang stark beschleunigen kann. Silber wirkt dabei wahrscheinlich vergleichbar einem Katalysator. Silberablagerungen können offenbar im Stillstand der Maschine entstehen. Das ist der Fall wenn Schwitzwasser über wässrige Korrosion und Oberflächenverunreinigungen auf versilberte Teile einwirkt. Diese wässrigen Lösungen mit gelösten Silberverbindungen werden dann zu anderen Bauteilzonen (z.B. Flanschansätze der Turbinenscheiben) transportiert. Aus diesen Lösungen scheidet sich offenbar wieder korrosionsauslösendes Silber ab. Dieser Schadensmechanismus ist erfahrungsgemäß entscheidend von den besonderen Umgebungsbedingungen abhängig. Bisher wurden ausgeprägte Schäden dieses Typs z.B. in der Nähe einer chemischen Fabrik beobachtet. Auch hier sei wieder darauf hingewiesen, dass bewusst eingebrachte Verunreinigungen in die Ansaugluft (Schadstoffverbrennung) genauestens auf potentielle Auswirkungen dieser Art zu prüfen sind.

Den **Schadensmechanismus der Sulfidation** kann man sich wie folgt vorstellen:

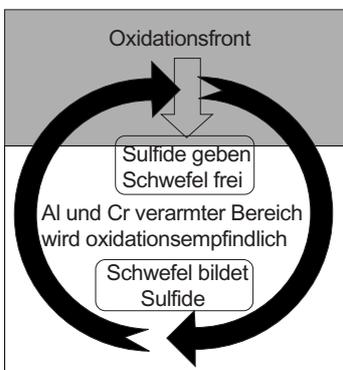
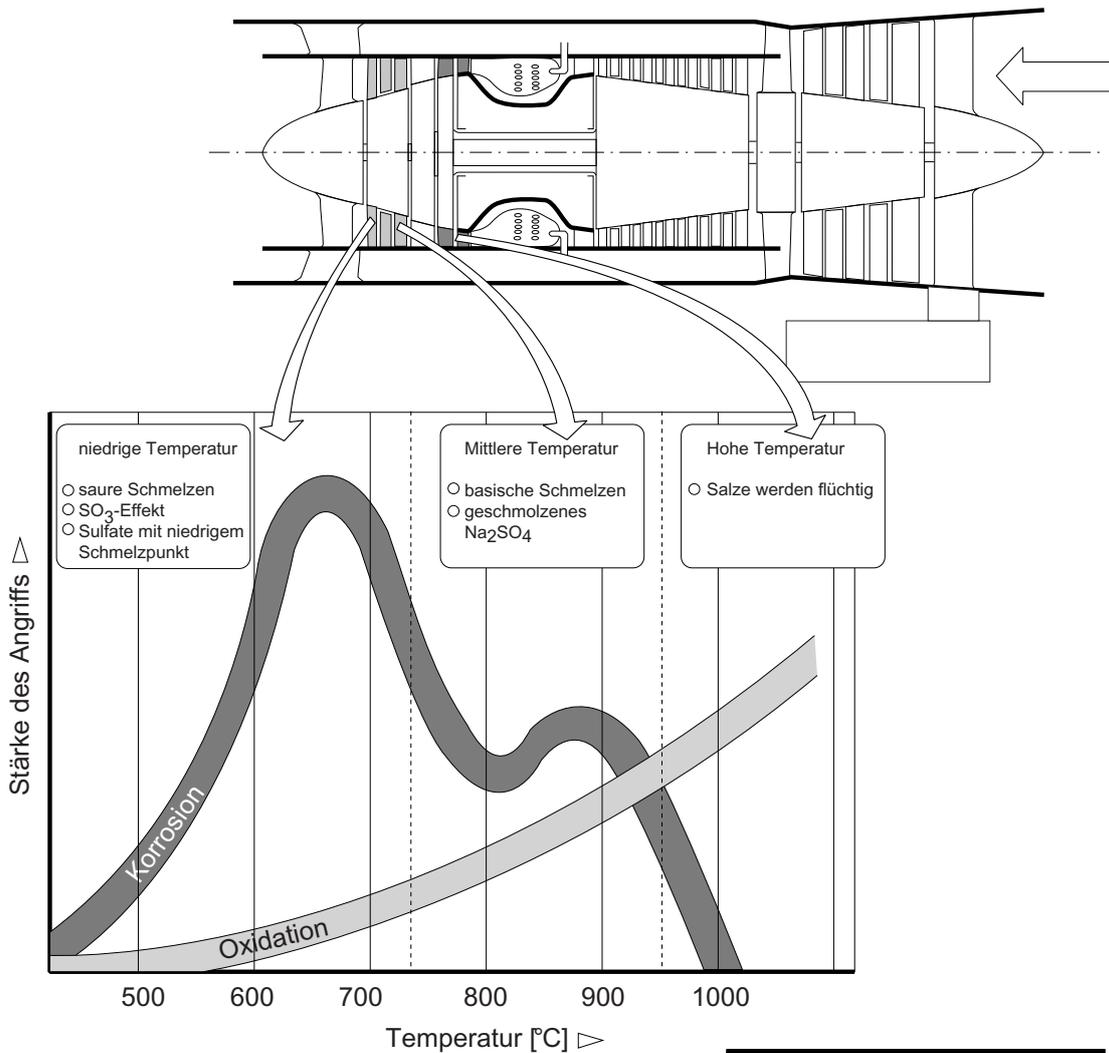
- Der Grundwerkstoff (z.B. Ni-Basis) wird normalerweise durch eine kompakte Cr_2O_3 -Schicht geschützt, die für Schwefel (S) undurchdringlich ist.
- Verschiedene Mechanismen, wie z.B. die chemische Reaktion der Oxidschicht mit Salzschnmelzen, können jedoch dazu führen, dass der Schwefel diese Hürde überwinden kann.
- Dabei "lockern" die Salzschnmelzen durch Platzwechselfvorgänge der in ihnen enthaltenen Metall-Ionen mit dem Cr die Cr_2O_3 -Schicht derart auf, dass Schwefel ungehindert eindiffundieren kann.
- Ist der Schwefel in den Grundwerkstoff eingedrungen, wird die Wiederausbildung der kompakten, schützenden Cr-Oxidschicht verhindert, so dass die Salzschnmelze als Wegbereiter nicht mehr benötigt wird.
- Die Folge ist, dass der Grundwerkstoff durch beschleunigte Oxidation zerstört wird.

Offenbar genügt für den Schadensablauf schon sehr wenig Schwefel, weil dieser nur in einer schmalen Zone am Übergang zum Grundwerkstoff wirksam wird und die Bildung großer Ni-Oxidmengen unterstützt. Es reichen bereits kleinste Mengen Nickelsulfid für den Sauerstofftransport aus. Entsprechend schwierig ist der metallografische Nachweis. Eine zerstörungsfreie Methode zum Nachweis von Sulfidation an nur äußerlich zugänglichen Hohlkörpern (z.B. Turbinenleit- und Laufschauflern im eingebauten Zustand, Bild 5.6.1.4.1-1) ist die **Magnetoskopprüfung**. Sie zeigt größere Mengen von magnetischem, **verarmten Grundmaterial** an, das zu 90 % aus Ni und Co besteht. Unmagnetisch ist dagegen das kompakte Oxid und der unbeeinflusste Grundwerkstoff.

Äußere Einflüsse

Korrosion ohne mechanische Belastung: Hochtemperaturkorrosion

Selbst kleinste Schwefelmengen genügen für einen katastrophalen Sulfidationsangriff.



typisches Sulfidationsbild im metallografischen Schliff

◁ schematische Darstellung des Sulfidationsprozesses

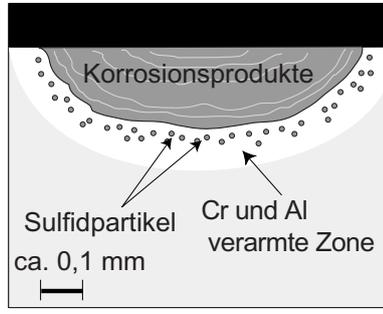


Bild 5.6.1.4.1-3

Äußere Einflüsse

Korrosion ohne mechanische Belastung: Hochtemperaturkorrosion

Versilberte Schrauben und Muttern in Heißteilen können durch Schwefeleinwirkung beschleunigt geschädigt werden als auch in Auflageflächen von Bauteilen Schäden/Rissbildung auslösen.

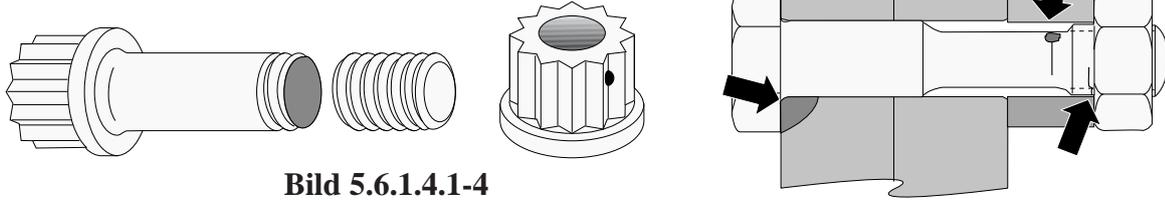


Bild 5.6.1.4.1-4

Bild 5.6.1.4.1-4 (Lit 5.6.1.4-2): In diesem Fall (siehe „6“ in Bild 5.3-8) traten nach mehreren tausend Betriebsstunden kleine Risse in Schrauben und Flansch eines hochbelasteten Rotors auf. Eine Untersuchung führte dies auf schwefelhaltige Säuren zurück. Sie lösten eine korrosive Reaktion des Materials aus. Der Schwefel stammte aus dem verwendeten Kraftstoff.

Äußere Einflüsse Korrosion ohne mechanische Belastung: Hochtemperaturkorrosion

5.6.1.4.2 Schäden durch Hochtemperaturkorrosion (HTK)

Sulfidation (Bild 5.6.1.4.1-3) tritt in Bauteilbereichen mit für diese Schadensformen günstigen Betriebstemperaturen auf. Sie kann ganze Schaufelquerschnitte erfassen und auf diese Weise durchgehend schädigen (Bild 5.6.1.4.2-1). Besonders gefährdet sind schlecht belüftete Hohlprofile (Lit. 5.6.1.4-3), wie sie z.B. zur Gewichtsreduzierung bei dicken Schaufeln typisch sind, bei denen regelrechte "Fenster" im Blattprofil entstehen können. Gefährdet sind zusätzlich Flächen, auf denen sich besonders leicht Stäube absetzen, z.B. Stirnseiten von Leitschaufeldeckbändern.

Es gibt Hinweise, dass Sulfidation auch einer **Spannungsrissskorrosion ähnliche Effekte** wie verzögerte Rissbildung und beschleunigten Risfortschritt auslösen kann .

Die **Lebensdauer keramischer Thermobarrieren** (Wärmedämmschichten) wird von Unteroxidation die zum Abplatzen führt, bestimmt. Dies wird von erstarrenden Ablagerungsschmelzen welche in die funktionsbedingten Risse der Schicht eindringen unterstützt (Bild 5.6.1.4.2-5).

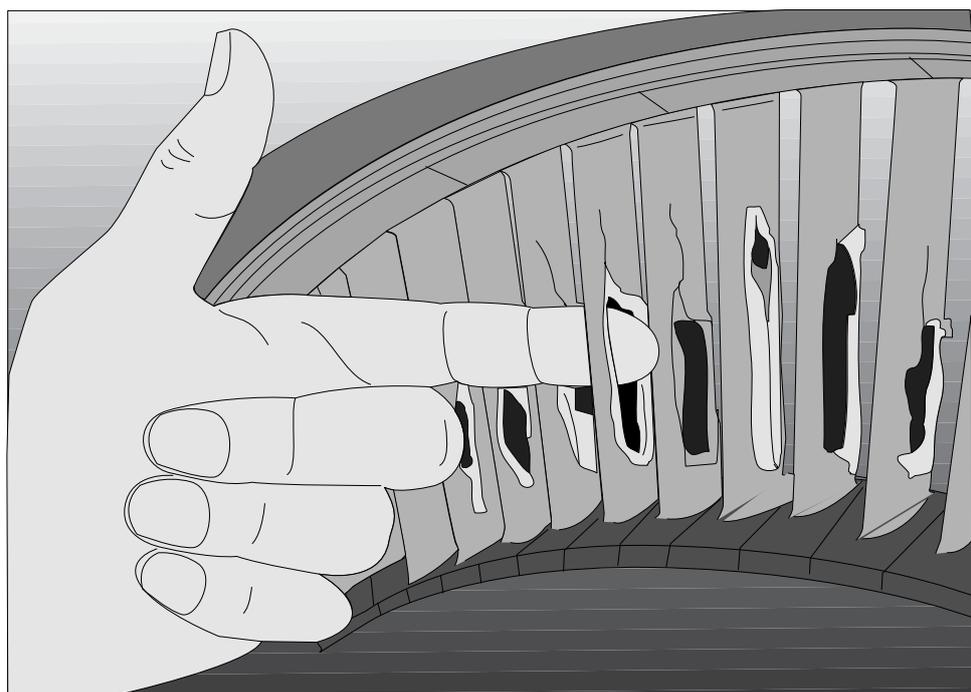


Bild 5.6.1.4.2-1 Durch Sulfidation perforierte Leitschaufeln einer Niederdruckturbine

Bild 5.6.1.4.2-1 (Lit 5.6.1.4-38): Dieses Bild nach einem Foto demonstriert die extreme Schädigung eines ND-Turbinenleitapparates nach mehreren 1000 Betriebsstunden. Der Sulfidationsangriff (Bild 5.6.1.4.1-3) beginnt in den hohlen Schaufelprofilen. Falls der Lei-

tapparat „**Intermeshfunktion**“ hat (Abbremsen bei Wellenbruch durch Schaufelkontakt) stellt sich die Frage nach der verbleibenden zuverlässigen Funktion.

Äußere Einflüsse

Korrosion ohne mechanische Belastung: Hochtemperaturkorrosion

Typische Korrosionsschädigungen, insbesondere an Stählen in Müllverbrennungsanlagen.

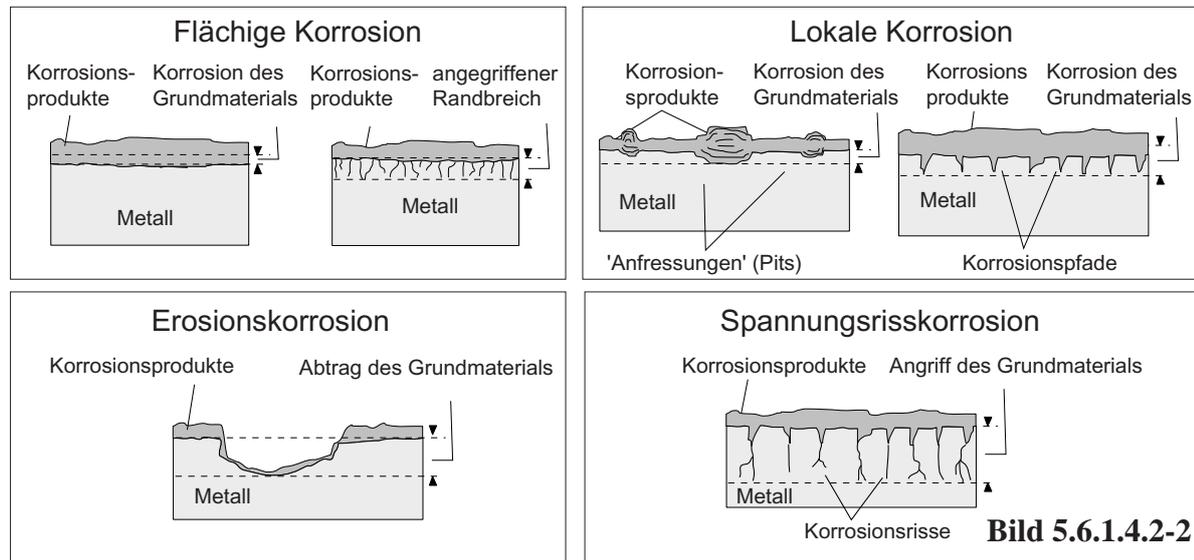


Bild 5.6.1.4.2-2

Bild 5.6.1.4.2-2 (Lit 5.6.1.4-9): Diese Korrosionsarten findet man vorzugsweise in rauchgasseitigen Müllverbrennungsanlagen (Bild 5.3.1-3 und Bild 5.3.1-4).

„A“ **Flächiger Angriff** entsteht wenn der Werkstoff bzw. alle Gefügekomponenten weitgehend gleich auf einen gleichmäßig verteilten Korrosionsangriff reagieren. Die Korrosionsschicht kann aus mehreren unterschiedlichen **Lagen** bestehen. Solche unterschiedlichen Oxide entstehen aus der Dynamik der Oberflächenveränderung durch Diffusionsvorgänge (z.B. Verarmung, Anreicherungen).

„B“ bis „F“ **Ungleichmäßige Korrosionsformen** können unterschiedliche Schadensbilder haben: Sie bilden sich wenn örtlich eine höhere Korrosionsgeschwindigkeit auftritt. Bevorzugt sind **Korngrenzen** (interkristallin, „B“). Die Korngrenze kann doppelt wirken. Als Schwachstelle im Grundwerkstoff und indem sich örtlich keine ausreichende Schutzschicht (Risse, Poren) bilden kann.

Spielt Erosion (z.B. durch Staub) eine Rolle (**Erosionskorrosion**, „E“) ist **Grübchenbildung** zu erwarten. (Bild 5.6.1-2, Bild 5.6.1-3 und Bild 5.6.1-8).

Bei ausreichend hohen Zugspannungen (z.B. Wärmespannungen, Betriebsdrücke in Rohrleitungen) kann der **Rissfortschritt stark erhöht** werden (**Spannungsrisskorrosion**, Bild 5.6.3.1.1-6).

Bild 5.6.1.4.2-3 (Lit 5.6.1.4-9): Das Reaktionsnschema links soll einen Eindruck der komplexen und vielfältigen chemischen **Vorgänge im Rauchgas von Müllverbrennungsanlagen** vermitteln. Dargestellt ist eine Übersicht von **Reaktionen der Verbindungen mit Alkalimetallen (Na, K) und Schwermetallen (Zn, Sn, Pb)**. Hier nicht angegebene Erdalkali-Metalle (Ca, Mg) bilden bei hohem Sauerstoffgehalt heißer Rauchgase Sulfate. Reaktionsprodukte, insbesondere **Chlor- und Schwefelverbindungen** wirken an der Oberfläche der Heißeile (Bild 5.3.1-3) als **Salzschmelzen** schädigend (Bild 5.6.1.4.2-2). Insbesondere **zerstören sie schützende Oxidschichten** oder verhindern deren Bildung. Die Vielfalt gibt ein Gefühl für die Komplexität der Schädigungsmechanismen (Bild 5.3.1-4) und die Problematik befriedigender Abhilfen (Kapitel 5.6.1.4.2). Es wird auch verständlich, dass ein **anlagenspezifisches Vorgehen** notwendig

Äußere Einflüsse

Korrosion ohne mechanische Belastung: Hochtemperaturkorrosion

Korrosion in Müllverbrennungsanlagen.

Vereinfachte Darstellung der Reaktionen in Rauchgasen.

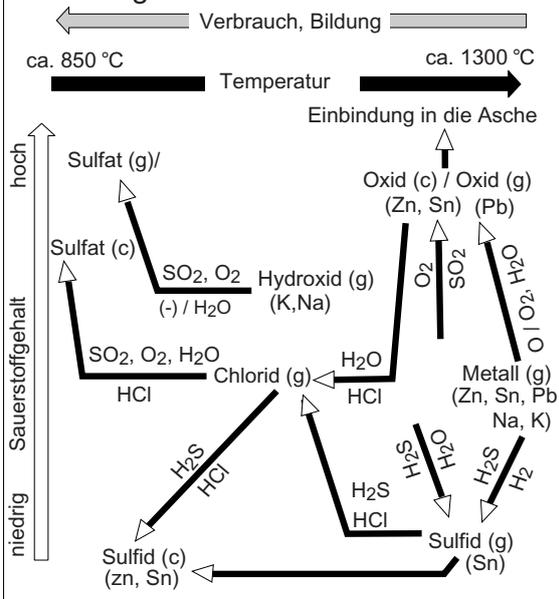


Bild 5.6.1.4.2-3

Materialverlust im Kessel in Abhängigkeit von Rauchgas- und Metalltemperatur.

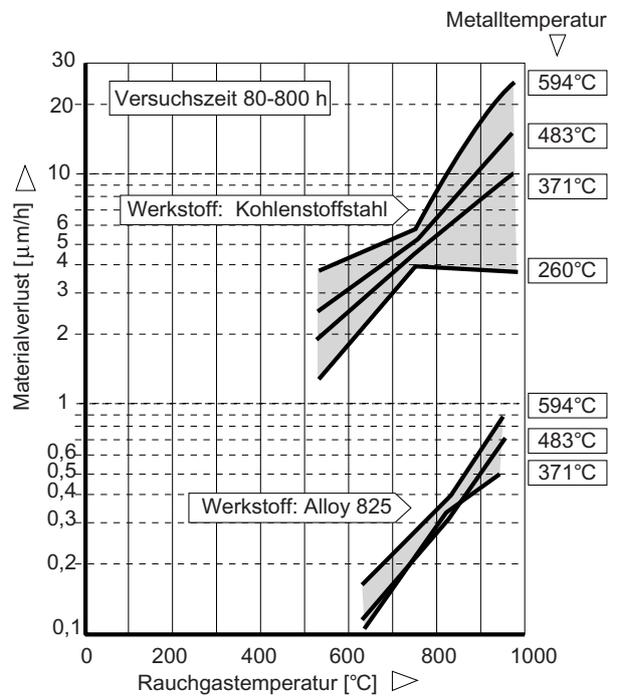


Diagramm rechts soll einen Windruck der Größenordnung des zeitlichen **Materialverlusts** in Abhängigkeit von der Rauchgastemperatur geben. Damit lässt sich die zu erwartende **Lebensdauer** im Zusammenhang mit der erforderlichen **Mindestwandstärke** abschätzen.

Bild 5.6.1.4.2-4: Dieses Schadensbild entsteht, wenn Bauteilzonen über längere Zeit hoch überhitzt werden. Es ist mit einem als „**Orangenschalen-Effekt**“ bezeichneten Aussehen zu rechnen. Diese Erscheinung ist besonders an **Eintrittskanten der Hochdruck-Turbinenschaufeln** zu beobachten. Es handelt sich um flache Rissfelder in einer Zone starker Oxidation mit merklichem Abtrag der Oberfläche. Dieser Abtrag im Zusammenspiel mit der Rissbildung führt zu einer orientierten Oberflächenstruktur („**Riffelbildung**“). Die **Thermoermüdungsrisse** sind durch **Oxidation aufgeweitet** („ausgewaschen“). Hier zeigt sich ein merklicher Zeiteinfluss und ein zumindest zeitweise sehr langsamer Rissfortschritt.

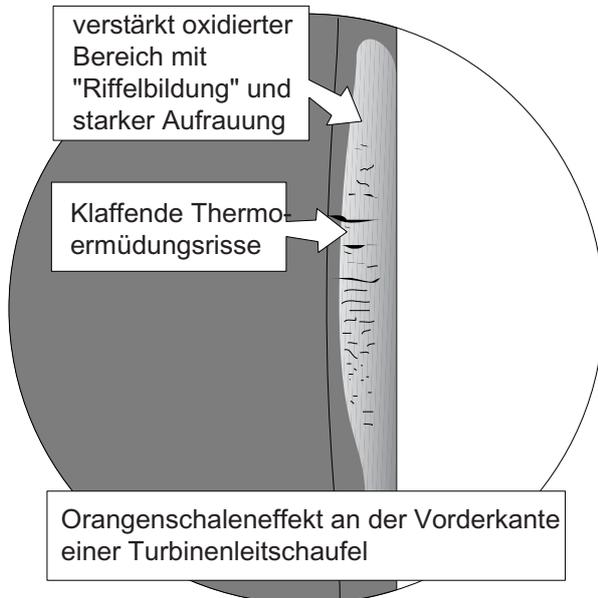


Bild 5.6.1.4.2-4

werden kann. Ähnliche Probleme, wenn auch nicht so ausgeprägt, sind in Anlagen der Verbrennung/Vergasung/Pyrolyse von Biomasse (Bild 5.6.1.2-5 und Bild 5.6.1.2-6) denkbar. Das

Äußere Einflüsse Korrosion ohne mechanische Belastung: Hochtemperaturkorrosion

Typische Betriebsprobleme von Wärmedämmschichten

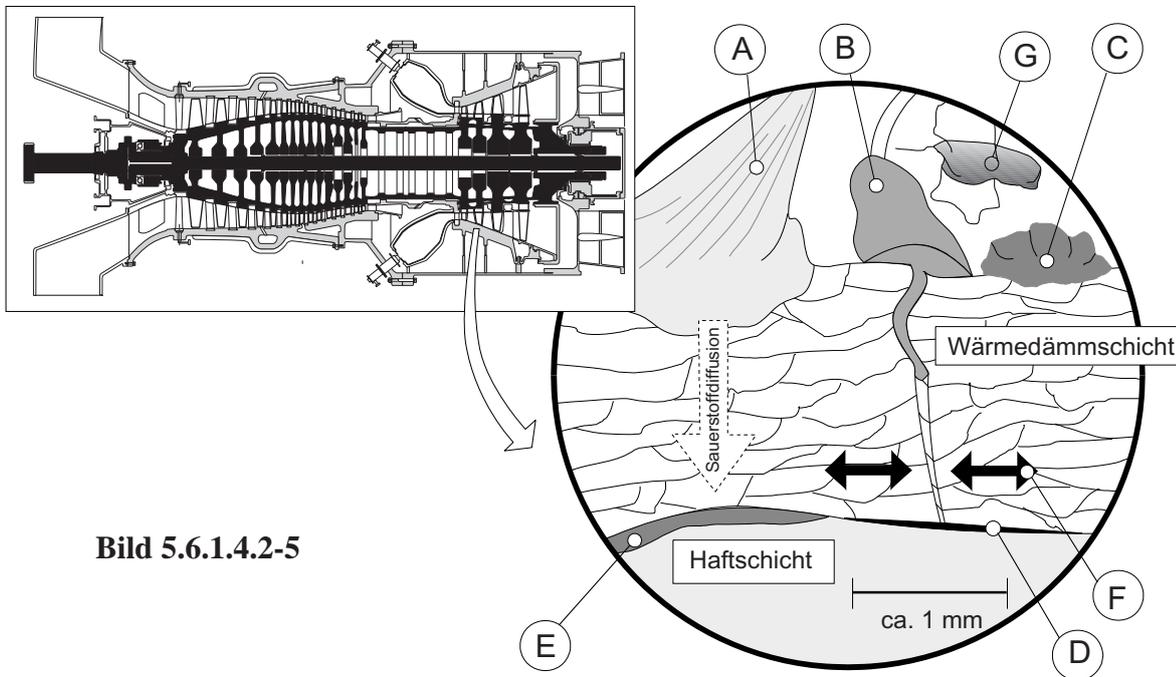


Bild 5.6.1.4.2-5

Bild 5.6.1.4.2-5 (Lit. 5.6.1.4.2): Auch scheinbar inerte Werkstoffe wie Keramiken können korrodieren bzw. mit äußeren Einflüssen reagieren. Als typische Schadensmechanismen keramischer Wärmedämmschichten aus ZrO_2 sind zu nennen:

“A”: **Erosion** durch Partikel und/oder Gaststrom (Bild 5.6.1-3 und Bild 5.6.2-1). Typisch sind Schäden an den Hochdruckturbinensegmenten (gehäuseseitige Dichtflächen gegenüber den HDT Rotorschaukelspitzen).

“B”: **Schmelzen** von Staubablagerungen können in der Brennkammer entstehen und/oder auf der stark aufgeheizten Thermobarriere der Schaufelblätter. Solche Schmelzen können beispielsweise niedrig schmelzende Silikate aus angesaugtem Staub sein (Bild 5.6.1.4-5). Dringt die Schmelze in die Segmentierungsrisse ein, können bei der Abkühlung im erstarrten Zustand eine Sprengwirkung auftreten. **Salzschmelzen** dürften diesen physikalischen Effekt weniger ausgeprägt zeigen. So schrump-

fen z.B. Vanadat-Sulfate bei der Erstarrung so, dass gefährlich hohe Druckspannungen nicht zu erwarten sind (Bild 5.6.1.4-5).

“C”: **Chemische Reaktion** mit Ablagerungen (z.B. Rückstände aus Kraftstoffen). Aus Versuchen lässt sich erkennen, dass Verbindungen der Elemente Natrium (engl. Sodium), Schwefel, Vanadium und wahrscheinlich auch Blei und Phosphor in erster Linie für die Heißgaskorrosion von Thermobarrieren verantwortlich sind. Die Aggressivität entsteht insbesondere bei der **Oxidation der Kraftstoffverunreinigungen** während der Verbrennung in der Brennkammer. Dabei entstehen stark sauer oder basisch wirkende Salzschnmelzen (Bild 5.6.1.4.1-3).

“D”: **Abheben der Schicht** infolge schlechter Haftung (z.B. durch Fertigungsprobleme).

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

Äußere Einflüsse

Korrosion ohne mechanische Belastung: Hochtemperaturkorrosion

Sauerstoffionen durch die heiße keramische Schicht. Dieser Versagensmechanismus hat eine relativ lange Inkubationszeit (bis mehrere 1000 Betriebsstunden) und ist somit besonders problematisch. Auch korrosive Gase können die Wärmedämmschicht durchdringen. So kann z.B. NaCl-Dampf die schützende Oxidschicht auf der Haftschrift schneller wachsen lassen. Die entstehende dickere porösere Oxidschicht unterstützt ein Abplatzen.

Gegenüber Korrosion durch Salzschnmelzen ist üblicherweise das Zirkonoxid der Wärmedämmschicht resistenter als selbst die hoch oxidationsfesten MCrAlY-Haftschriften. Beobachtungen legen nahe, dass selbst dünne ZrO_2 -Schichtreste einen Angriff der Haftschrift durch Salzschnmelzen verhindern.

Auch feste anorganische Oxide können, indem sie sauer wirken, Thermobarrieren schädigen.

“F”: *Wärmespannungen aus Fertigung und Betrieb können besonders im Bereich konvexer Radien und Kanten zu Abplatzungen führen. Bei konvexen Oberflächen wie auf der Saugseite von Turbinenschaufeln wirken die hohen Druckspannungen in der Keramikschicht besonders ablösend. Auf konkaven Flächen ist das Gegenteil der Fall (Bild 5.6.1.4-3 und Bild 5.6.1.4-4). Es gilt vereinfacht die Beziehung: Die Spannung senkrecht zur Oberfläche steigt direkt mit dem Radius der Oberflächenkrümmung (**d.h. je flacher die Krümmung um so empfindlicher für Abplatzungen!**), der Schichtdicke und der Spannung in der Schicht parallel zur Oberfläche.*

“G”: *Oberflächliches ausbröckeln nach längeren Laufzeiten in einer Heißgasströmung. Diese Partikel können die Lebensdauer diffusionsbeschichteter Heißteile (z.B. Turbinenschaufeln) deutlich verkürzen (Bild 5.3.2-4).*