

Bi-Layer Wärmedämmschichtsysteme II

**Entwicklung eines mechanismen-basierten Lebensdauermodells für
Bi-Layer Wärmedämmschichtsysteme, Teil II**

Abschlussbericht

[Leerseite für doppelseitigen Druck]

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Allgemeine Angaben..... | 5 |
| 1.1 | Projektbezogene Publikationen..... | 6 |
| 1.1.1 | Veröffentlichte Arbeiten aus Publikationsorganen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung, Buchveröffentlichungen sowie bereits zur Veröffentlichung angenommene, aber noch nicht veröffentlichte Arbeiten..... | 6 |
| 1.1.2 | Andere Veröffentlichungen | 6 |
| 1.1.3 | Patente | 7 |
| 2 | Arbeits- und Ergebnisbericht..... | 9 |
| 3 | Zusammenfassung | 17 |
| 4 | Literaturverzeichnis..... | 18 |

1 Allgemeine Angaben

DFG-Geschäftszeichen:

- OE 558/2-2
- SCHU729/25-2
- VA163/5-2

Forschungsstelle 1:

Matthias Oechsner, Prof. Dr.-Ing.
Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde
Grafenstrasse 2, 64283 Darmstadt
Email: Oechsner@mpa-ifw.tu-darmstadt.de

Technische Universität Darmstadt
Zentrum für Konstruktionswerkstoffe
IfW
Tel. 06151/1624900, Fax. 06151/1624301

Forschungsstelle 2:

Michael Schütze, Prof. Dr.-Ing.
apl. Professor an der RWTH Aachen
Theodor-Heuss-Allee 25, 60486 Frankfurt
am Main
Email: schuetze@dechema.de

DECHEMA-Forschungsinstitut
High Temperature Materials
DFI

Tel. 069/7564-0, -337 Fax: 069/7564-388

Forschungsstelle 3:

Robert Vaßen, Prof. Dr. rer. nat.
Professor an der Ruhr Universität Bochum
52425 Jülich
Email: r.vassen@fz-juelich.de

Forschungszentrum Jülich GmbH
IEK-1

Tel. 02461 / 616108 Fax: 02461 / 612455

Initiator des Forschungsvorhabens bei der FVV:

Werner Stamm, Dr. rer. nat.
Mellinghofer Str. 55
45473 Mülheim an der Ruhr
Email: werner.stamm@siemens.com

Siemens AG
Energy Sector
Power Generation Division
Gas Turbines/ Generators
E P GT LGT EN MT 2 1
Tel: 0208/456-4148 Fax: 0208/456-2843

Thema des Projekts:

Entwicklung eines mechanismen-basierten Lebensdauermodells für Bi-Layer Wärme-dämmschichtsysteme bestehend aus Gadoliniumzirkonat (GZO) und Yttrium-teilstabilisiertem Zirkonoxid (6 - 8 Gew.-% Y₂O₃ teilstabilisiertes ZrO₂, YSZ)

Förderungszeitraum:

01.07.2015 - 31.03.2018

1.1 Projektbezogene Publikationen

1.1.1 Veröffentlichte Arbeiten aus Publikationsorganen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung, Buchveröffentlichungen sowie bereits zur Veröffentlichung angenommene, aber noch nicht veröffentlichte Arbeiten

M. Frommherz, A. Scholz, M. Oechsner, E. Bakan, und R. Vaßen,

„Gadolinium zirconate/YSZ thermal barrier coatings: Mixed-mode interfacial fracture toughness and sintering behavior“,

Surf. Coat. Technol., Bd. 286, S. 119–128, 2016.

E. Bakan, D.E: Mack, G. Mauer, R. Mücke, und R. Vaßen,

„Porosity–Property Relationships of Plasma-Sprayed Gd₂Zr₂O₇/YSZ Thermal Barrier Coatings“,

J. Am. Ceram. Soc., 1–8 (2015)

E. Bakan, D.E: Mack, G. Mauer, und R. Vaßen,

„Gadolinium Zirconate/YSZ Thermal Barrier Coatings: Plasma Spraying, Microstructure, and Thermal Cycling Behavior“,

J. Am. Ceram. Soc., 97 [12] 4045–4051 (2014)

1.1.2 Andere Veröffentlichungen

M. Frommherz *u. a.*, „Entwicklung eines mechanismenbasierten Lebensdauermodells für Bi-Layer Wärmedämmschichtsysteme“, *Informationstagung Turbomaschinen Herbst 2013 Bad Neuenahr Zwischenber. Über Vorh. Nr 1108*, Bd. Heft R565 (2013), S. 115–141.

M. Frommherz, A. Scholz, M. Oechsner, E. Bakan, und R. Vaßen, „Gadoliniumzirkonat - Eine keramische Wärmedämmschicht der neuesten Generation“, *37 Vortragsveranstaltung Langzeitverhalten Warmfester Stähle Hochtemp. FVWFVHT 28 Novemb. 2014 Düsseld.*, S. 11–22, 2014.

W. Stamm *u. a.*, „Gadoliniumzirconate, a Thermal Barrier Coating of newest Generation“, *Proc. 10th Liège Conf. Mater. Adv. Power Eng.*, Bd. September 14th – 17th, 2014, Palais des Congrès Liège, Belgium, S. 479–491, 2014.

M. Frommherz, A. Scholz, und M. Oechsner, „Gadolinium Zirconate/YSZ Thermal Barrier Coatings: Mixed-Mode Interfacial Fracture Toughness and Sintering Behavior“, in *Proceedings of Advanced High-Temperature Materials Technology for Sustainable and Reliable Power Engineering (123HiMAT-2015)*, 29 June-3 July, Sapporo, Japan, 2015.

Vorträge:

Robert Vaßen, Emine Bakan, Nadin Schlegel, Daniel Mack, Robert Mücke
Mechanical properties of Gd₂Zr₂O₇ layers deposited by atmospheric plasma spraying
International Conference and Exposition on Advanced Ceramics and Composites
Daytona Beach, 24. - 29. Januar 2016

- M. Rudolphi, M.C. Galetz, M. Schütze
 Bi-Layer Thermal Barrier Coatings – Assessment of Coating Lifetime from Critical Strain Measurement
 Turbine Forum 2017
 Nice, France, 26. - 28. April 2017
- M. Rudolphi, M.C. Galetz, M. Schütze, M. Adam, M. Oechsner, D. Koch, R. Vaßen
 Entwicklung eines mechanismenbasierten Lebensdauermodells für Bi-Layer Wärmedämmschichtsysteme – von der Mikrostruktur zum Bauteil
 FVV Herbsttagung 2017
 Leipzig, 5. - 6. Oktober 2017
- M. Rudolphi, M. C. Galetz, M. Schütze
 Mechanical stability diagrams for bi-layer TBC systems and their integration into FEM for an assessment of failure location in complex geometries
 Turbine Forum 2018
 Nice, France, 25. - 27. April 2018

Veröffentlichungen (in Vorbereitung):

- M. Rudolphi, M. Schütze, M.C. Galetz
 Mechanical Stability Diagrams for Thermal Barrier Coating Systems – Part I: Single-layered YSZ coatings prepared by Atmospheric Plasma Spraying
 in Vorbereitung für: Surface and Coatings Technology
- M. Rudolphi, M. Schütze, M.C. Galetz
 Mechanical Stability Diagrams for Thermal Barrier Coating Systems – Part II: Double-layered GZO/YSZ coatings prepared by Atmospheric Plasma Spraying
 in Vorbereitung für: Surface and Coatings Technology
- M. Adam, C. Kontermann, M. Oechsner
 A study on failure of double-layer thermal barrier coatings subjected to uniaxial compression tests using acoustic emission analysis and digital image correlation
 in Vorbereitung für: ECF22 - Loading and Environmental Effects on Structural Integrity, 26-31. August 2018, Belgrade/Serbia
- D. Koch, D. Mack, R. Vaßen
 Gradient Testing of a Combustor Tile
 in Vorbereitung für: Journal of the European Ceramic Society
- R. Vaßen, D. Koch, D. Mack
 Thermal Gradient Tests of YSZ and GZO/YSZ Thermal Barrier Coatings
 in Vorbereitung für: Journal of the American Ceramic Society

1.1.3 Patente

1.1.3.1 Angemeldet

Keine.

1.1.3.2 1.1.3.2 Akzeptiert
Keine.

2 Arbeits- und Ergebnisbericht

Neuartige doppellagen-Wärmedämmschichtsysteme auf der Basis von Gadoliniumzirkonat (GZO) und Yttrium-stabilisiertem Zirkonoxid (YSZ) bieten das Potential für eine weitere Anhebung der Betriebstemperatur in Gasturbinen. Gadoliniumzirkonat besitzt eine exzellente Phasenstabilität bis über 1500 °C und eine im Vergleich zu YSZ nochmals geringere Wärmeleitfähigkeit [1], [2]. Unerwünschte Reaktionen des GZO mit dem Aluminiumoxid der thermisch wachsenden Oxidschicht auf der Haftvermittlerschicht und die deutlich geringere Bruchzähigkeit des GZO führen jedoch zu signifikant kürzeren Lebensdauern von einlagigen GZO Wärmedämmschichten im Vergleich zu YSZ [3]. Ein doppellagiges Wärmedämmschichtsystem mit einer unteren Lage aus YSZ und einer oberen Lage aus GZO bietet dagegen die Möglichkeit, die jeweiligen Vorteile der Schichtpartner zu kombinieren und gleichzeitig die negativen Eigenschaften teilweise zu eliminieren [4].

Über solche doppellagigen Wärmedämmschichtsysteme auf der Basis von GZO und YSZ lagen bisher nur recht wenige Erkenntnisse vor. Weder waren für die Herstellung umfassende Parameterstudien vorhanden, die die Auswirkungen unterschiedlicher Spritzparameter auf die Mikrostruktur und die Qualität der erzeugten Schichten dokumentieren, noch waren hinreichend Erkenntnisse vorhanden, wie sich die Schichten bei Hochtemperaturlagerung verändern. Darüber hinaus lagen nur wenige thermophysikalische Daten für GZO vor. Ziel der durchgeführten Arbeiten war es daher, zunächst eine Prozessroutine zu entwickeln mit deren Hilfe sich reproduzierbar GZO-Schichten mit einer vorgegebenen Porosität und Mikrostruktur erzeugen lassen. Um den Einfluss der Porosität/Mikrostruktur auf die Eigenschaften der Schichten zu untersuchen wurden Schichten mit verschiedenen Porositäts-Stufen hergestellt (vgl. Abbildung 2.1).

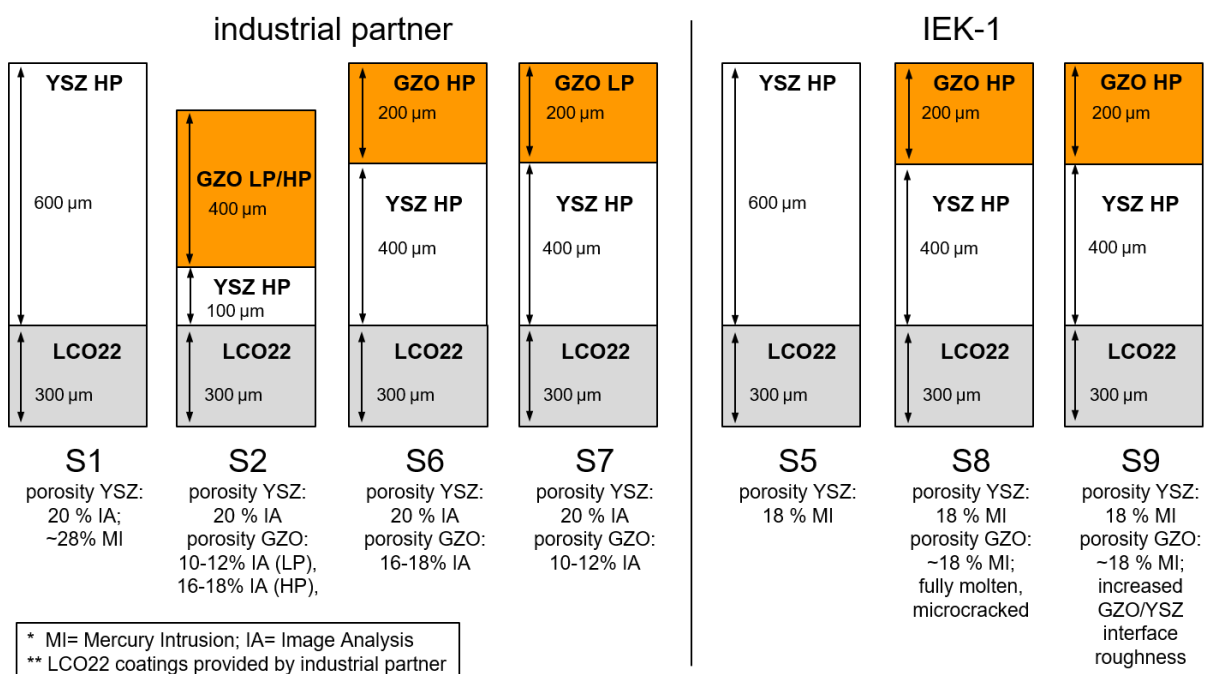


Abbildung 2.1: Übersicht der untersuchten Ein- und Doppellagen-Wärmedämmschichtsysteme auf PWA 1483 (hier nicht dargestellt)

Darüber hinaus sollten die wesentlichen thermophysikalischen Eigenschaften der Schichten bestimmt werden, darunter die thermische Leitfähigkeit, der Wärmeausdehnungskoeffizient und das Elastizitätsmodul. Intensive mikrostrukturelle Untersuchungen wurden vorgenommen, um das Sinterverhalten und das Defekt- bzw. Risswachstum in den Schichten zu ana-

lysieren. Über mechanische Versuche (uniaxiale Druckversuche, 4-Punkt Biegeversuche, Charalambides-Versuche [5]–[8]) wurden mechanische Kenngrößen wie die Energiefreisetzungsrates und die kritische Versagensdehnung bestimmt. Um einen Vergleich mit den etablierten einlagigen YSZ-Systemen vornehmen zu können, wurde fast der identische Umfang an Messungen auch an einlagigen Referenzsystemen durchgeführt. Zusätzlich wurde der Einfluss der Krümmung auf die mechanischen Eigenschaften und das Risswachstum anhand von zylinderförmigen Proben mit zwei verschiedenen Radien und einem Schaufelähnlichen Modelkörper mit konvexer und konkaver Krümmung untersucht. Die thermophysikalischen und mikrostrukturellen Daten sowie die mechanischen Kenngrößen wurden verwendet um ein bruchmechanisches Lebensdauermodell zu erstellen. Dieses beschreibt Bereiche, in denen die Schicht ohne Beschädigung mechanisch belastet werden kann, und definiert Regionen in denen eine Beschädigung zu erwarten ist. Diese, sogenannten mechanischen Stabilitätsdiagramme, wurden in Finite-Elemente-Modelle integriert, um an komplexen Geometrien eine Vorhersage des Schichtversagens zu ermöglichen.

Die Prozessführung bei der Herstellung von GZO-Schichten mittels Atmosphärischem Plasmaspritzen (APS) gestaltete sich als nicht trivial. Bedingt durch den hohen Dampfdruck von Gadoliniumoxid kommt es zur Abdampfung von Gadoliniumoxid in der Plasma-Flamme, wodurch die Stöchiometrie der abgeschiedenen Schicht beeinträchtigt wird und teilweise unterstöchiometrische Schichten entstehen. Es wurden jedoch Spritzparameter ermittelt, mit denen sich Schichten mit der gewünschten Stöchiometrie und geeigneter Porosität herstellen lassen. Über das Auftragen einer Zwischenschicht (Flash-Coat) wurde versucht eine höhere Rauigkeit am Übergang zwischen YSZ und GZO zu erreichen, wodurch die Haftung des GZO verbessert werden sollte. Zwar konnte die Oberflächenrauigkeit erhöht werden, jedoch zeigten Stirnabzugversuche, dass die Haftfestigkeit verringert wurde. Eine Fourier-Analyse des Höhenprofils einer Probe mit und einer ohne Flash-Coat zeigte, dass durch den Flash-Coat zwar die Rauigkeit erhöht wird, die Mikrorauigkeit jedoch sinkt.

Die Prozessparameter zur Herstellung von Doppellagensystemen konnten auf verschiedene Probengeometrien übertragen werden. Dabei wurden zum einen Stabproben mit einem Radius von 4 mm und 9 mm verwendet und zusätzlich wurde die Beschichtung eines schaufelähnlichen Modelkörpers untersucht. Bei der Beschichtung der Stabproben fiel auf, dass der Beschichtungsprozess sehr empfindlich gegenüber leichten Veränderungen in den Prozessbedingungen ist. Auch an dem schaufelähnlichen Modelkörper gestaltete sich die Aufbringung von mikrostrukturell homogenen Schichten als komplex. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass eine gleichmäßige Beschichtung einer solchen komplexen Geometrie möglich ist (vgl. Abbildung 2.2). In der Folge wurden die schaufelähnlichen Proben ausschließlich durch den industriellen Partner beschichtet. Am FZ Jülich wurde stattdessen der Schwerpunkt auf die Reproduzierbarkeit des Spritzprozesses gelegt.

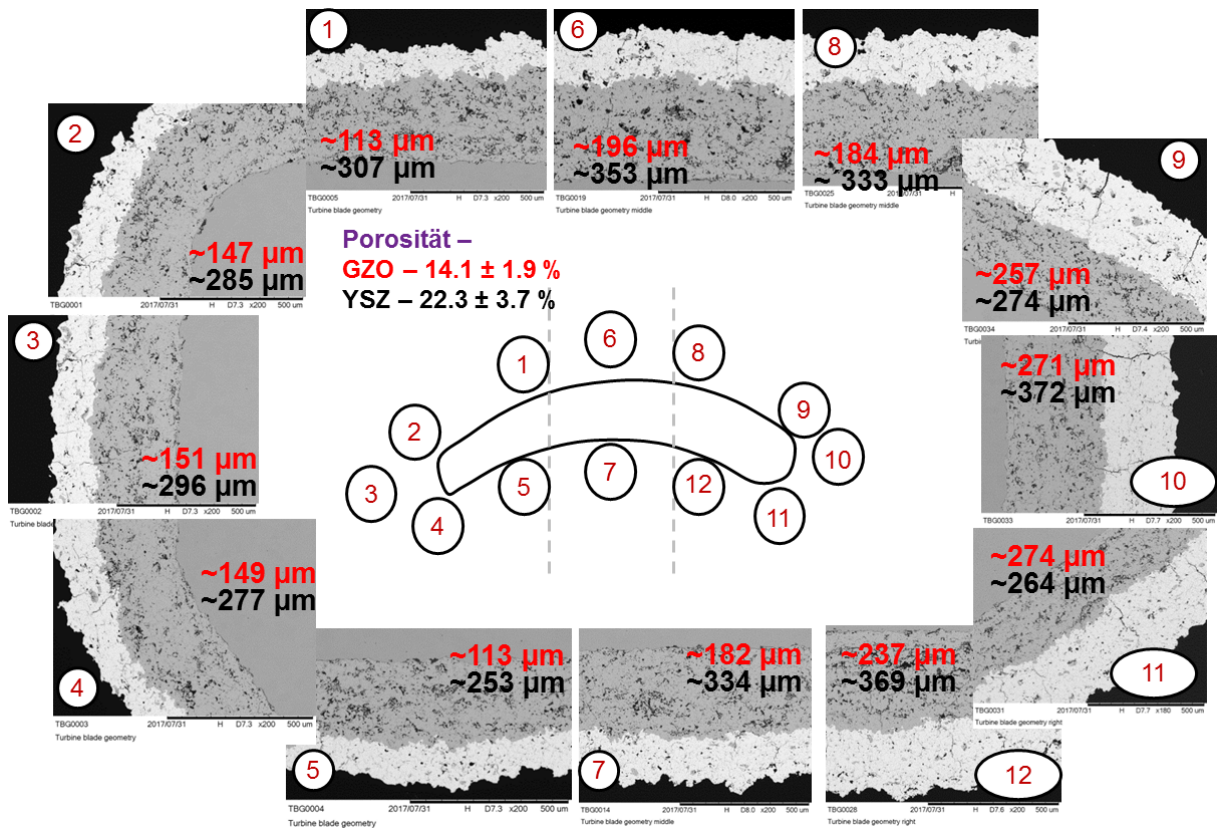


Abbildung 2.2: REM-Aufnahmen an verschiedenen Positionen des beschichteten schaufelähnlichen Modelkörpers mit der jeweiligen Schichtdicke und der mittels Bildanalyse ermittelten Porosität für die YSZ- und die GZO-Schicht

Das Sinterverhalten des Doppellagensystems wurde anhand von metallographischer und fraktographischer Untersuchungen an Schlifflinien und Bruchflächen von gesinterten Proben und Proben im Ausgangszustand untersucht. Die GZO-Schichten zeigen im Vergleich mit YSZ eine geringere Sinterrate, jedoch zu Beginn eine größere relative Zunahme der Steifigkeit. Die teilweise in den GZO-Schichten vorhandenen unaufgeschmolzenen Partikel scheinen für das Sinterverhalten von geringem Einfluss zu sein. Die geringere Bruchzähigkeit von GZO ist dagegen von großer Relevanz für die Lebensdauer der Schichten. Der Einfluss des Substrats auf die Veränderung der Härte und des Elastizitätsmoduls wurde untersucht, indem Proben mit und ohne die Beschränkung durch das Substrat gesintert wurden. Die Untersuchungen zeigten, dass die Erhöhung der Härte und des Elastizitätsmoduls für die frei gesinterten Schichten höher ausfallen.

An den Schichten wurden isotherme und thermozyklische Oxidationsversuche bei $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ und $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ für Zeiten bis 1500 h bzw. 500 Zyklen (\dot{a} 1 h Heißzeit) durchgeführt, um verschiedene Schädigungszustände zu erzeugen. Die Risse wurden anhand ihrer Lage relativ zur Grenzfläche mit der Haftvermittlerschicht in die Kategorien „Delamination“, Scher-Risse“ bzw. „Segmentierung“ eingeteilt. Die größten Risse bzw. Defekte sind parallel zur Grenzfläche Haftvermittlerschicht/Keramik ausgerichtet (Delamination) und im unteren Bereich der YSZ-Schicht nahe der TGO zu finden. Die doppellagigen Schichten zeigen zudem ein starkes Wachstum der Delaminationsrisse an der Grenzfläche GZO/YSZ. Die den Kategorien Segmentierung bzw. Scher-Versagen zugeordneten Risse und Defekte zeigen deutlich geringere Wachstumsraten und scheinen für das Versagen weniger relevant zu sein. Das Riss- bzw. Defektwachstum in der Kategorie „Delamination“ zeigt über den untersuchten Bereich einen annähernd linearen Anstieg der maximalen Defektgröße, sowohl in den YSZ- wie auch

in den GZO-Schichten. Ein signifikanter Einfluss der Oberflächenkrümmung auf das Risswachstum konnte nicht beobachtet werden (vgl. Abbildung 2.3). Die Defekt bzw. Rissauswertung der schaufelähnlichen Modelkörper zeigt ein uneinheitliches Bild. So ist für die GZO-Schicht auf der konvexen Seite der Probe ein deutlich stärkeres Risswachstum zu erkennen. Es wird vermutet, dass dies durch lokale Inhomogenitäten in der Mikrostruktur der Beschichtung oder einen aufgrund der höheren Wärmekapazität der großen Probe gegenüber den Zylinderproben veränderten Spannungszustand nach dem Abkühlen verursacht wird.

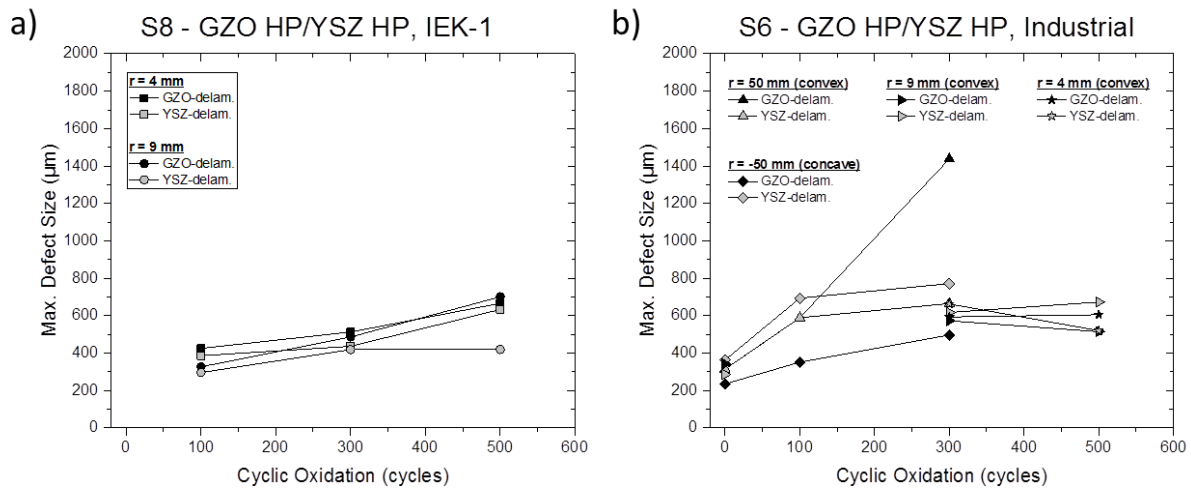


Abbildung 2.3: Einfluss der Probengeometrie auf die maximale Defektgröße nach thermozyklischer Auslagerung bei 1050 °C.

Mehrere Proben wurden im Gradiententest [9] untersucht, die dabei ermittelte Lebensdauer ist in Abbildung 2.4 als Funktion der Oberflächentemperatur der TBC gezeigt. Dabei wiesen die zuerst hergestellten dichteren Schichten ein schlechtes Zyklierergebnis auf (YSZ/GZO 80 mm im Vergleich zu YSZ 150 mm, Abbildung 2.4).

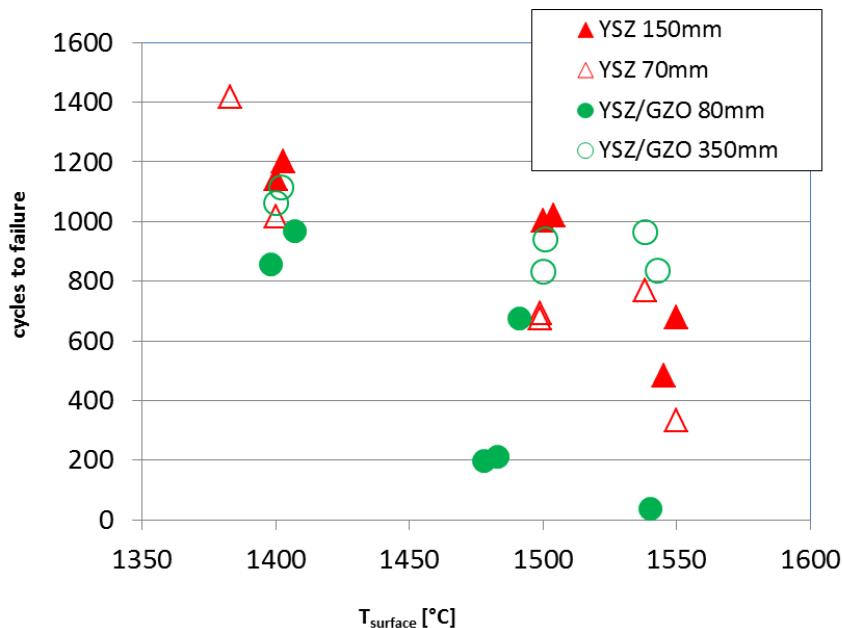


Abbildung 2.4: Zyklen bis zum Versagen als Funktion der Oberflächentemperatur für die verschiedenen YSZ und GZO/YSZ-Wärmedämmschichten. Die Bondcoattemperaturen lagen zwischen 1070 und 1100°C.

Die Lebensdauer der GZO/YSZ-Doppellagen konnte jedoch deutlich verbessert werden, indem sowohl die YSZ-, als auch die GZO-Schicht mit einer höheren Porosität hergestellt wurde. Besonders bei hohen Oberflächentemperaturen zeigte das Doppellagensystem ein gutes Zyklierverhalten, welches mit dem von einlagigen YSZ-Systemen verglichen werden kann. Bei sehr hohen Oberflächentemperaturen (1550 °C) liegt die Lebensdauer des Doppellagensystems sogar oberhalb der des einlagigen YSZ-Vergleichssystems (YSZ/GZO 350 mm im Vergleich zu YSZ 70 mm, Abbildung 2.4).

Die Daten der im ersten Teil des Projekts durchgeführten 4-Punkt Biegeversuche, der Rissauswertung und die mechanischen Kenngrößen wurden verwendet, um ein bruchmechanisches Lebensdauermodell zu entwickeln, das auf den Arbeiten von Griffith und Irwin über das Versagen spröder Werkstoffe aufbaut [10], [11]. Das Modell definiert Beanspruchungsgrenzen, bei deren Überschreiten ein Versagensmodus eintritt und wurde in ähnlicher Form auch für das Versagen von Oxidschichten verwendet [12], [13]. Dabei können verschiedene Versagensarten (z.B. Segmentierung, Delamination) und die verschiedenen Einzelschichten (GZO bzw. YSZ) unterschieden werden. In gleicher Weise wie mit Wöhler-Kurven kann mit Hilfe dieser mechanischen Stabilitätsdiagramme auch eine Lebensdauerabschätzung erfolgen (Abbildung 2.5).

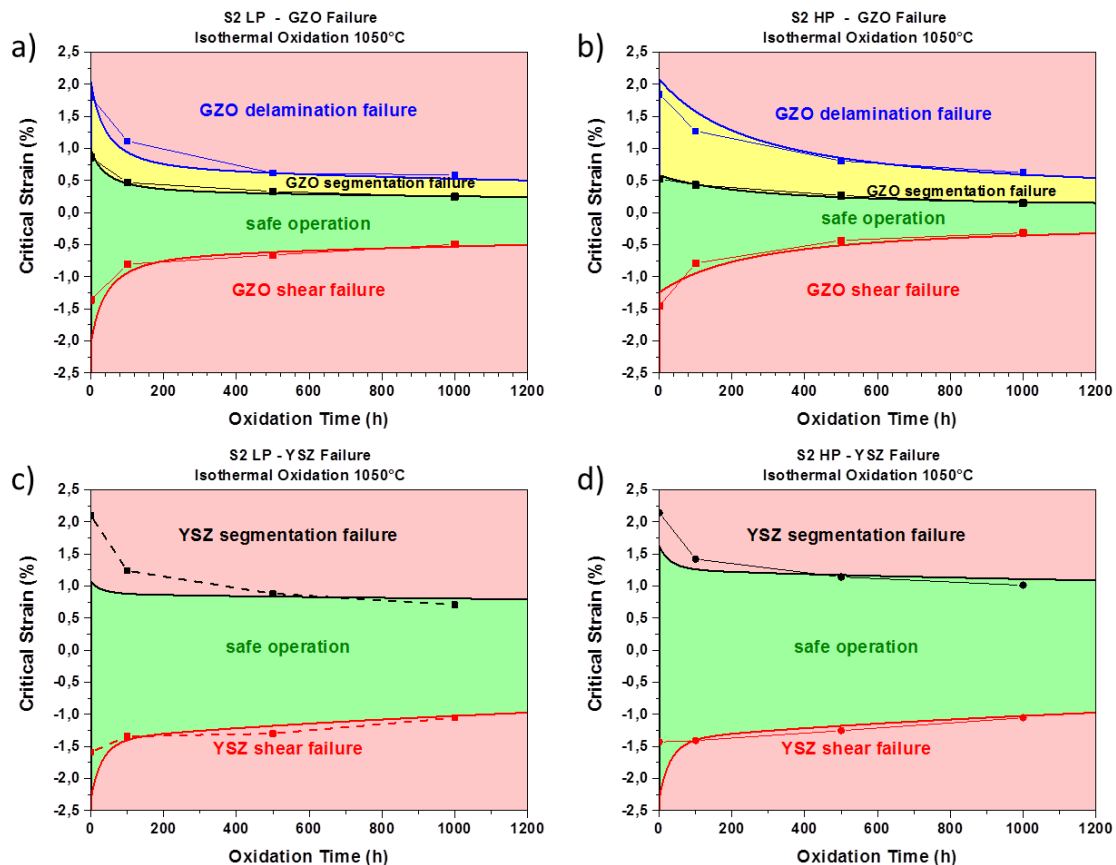


Abbildung 2.5: Mechanische Stabilitätsdiagramme für die doppellagigen Wärmedämmschichtsysteme S2 LP (niedrige Porosität) und S2 HP (hohe Porosität) im Vergleich mit den experimentellen kritischen Dehnungen aus dem 4-Punkt Biegeversuch (Punkte).

Durch die Integration der Versagenswerte in ein Finite-Elemente Modell kann eine Vorhersage über den Versagensort in komplex gekrümmten Bauteilen getroffen werden. Eine Verifikation durch die Simulation der mechanischen Experimente (4-Punkt Biege und uniaxialer

Druckversuch) zeigte eine gute Übereinstimmung der Simulation mit den experimentellen Werten (Abbildung 2.6).

Druckversuch – Doppellagige GZO/YSZ Wärmedämmschicht, R4

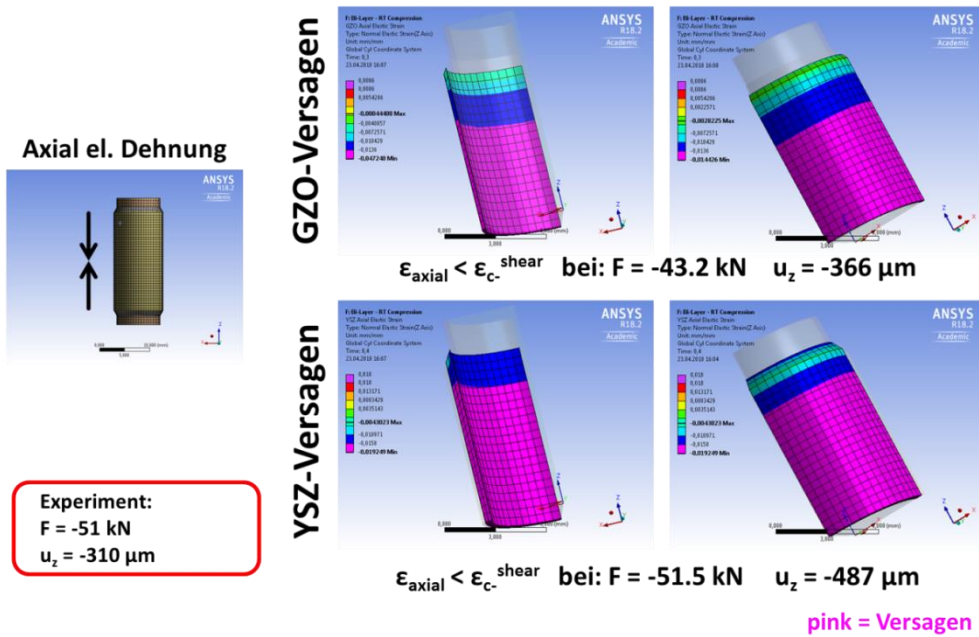


Abbildung 2.6: FEM Simulation des Druckversuchs an der Zylinderprobe R4 mit doppellagiger Wärmedämmschicht. Die kritische Dehnung (in der Zylinderebene der Wärmedämmschicht) ist in axialer Richtung zuerst in der GZO-Schicht überschritten. Das Versagen der YSZ-Schicht erfolgt später.

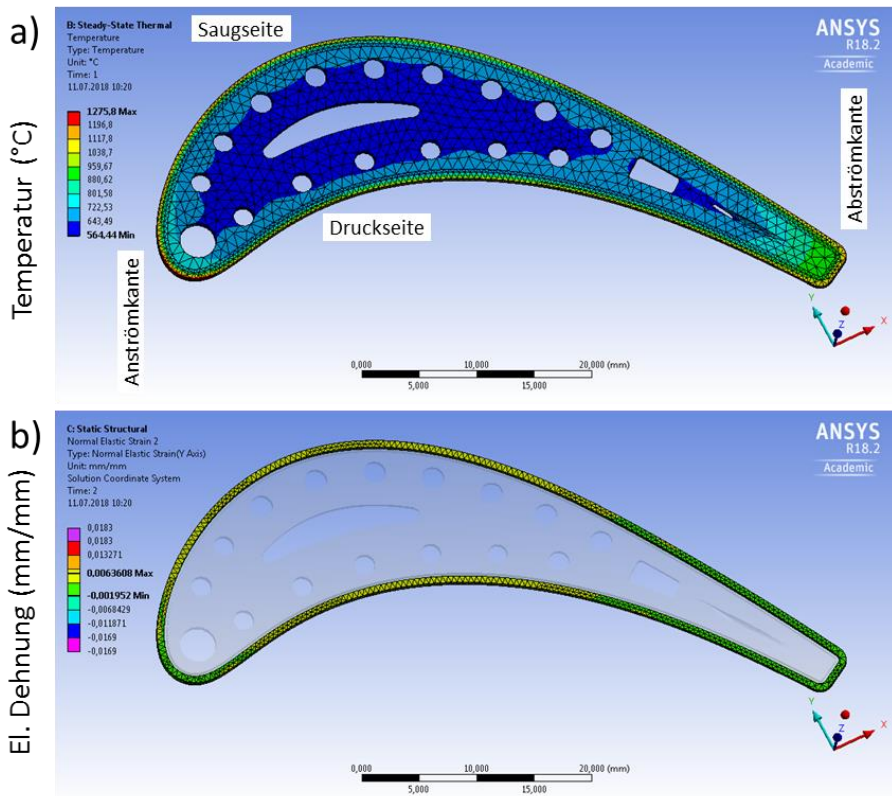


Abbildung 2.7: Berechnete Temperaturverteilung im Mittelschnitt einer Turbinenschaufel (a) und aus der Abkühlung nach Raumtemperatur resultierende Dehnung in der Wärmedämmschicht. Aufgetragen ist die Dehnung parallel zur TBC/BC-Grenzfläche. (b).

Die Übertragung auf ein komplex gekrümmtes Bauteil wurde anhand einer Turbinenschaufel vollzogen. Hierzu wurde der Mittelschnitt (Querschnitt in halber Höhe) einer Schaufel herangezogen und zunächst eine Temperaturverteilung aufgeprägt, die dem Betriebszustand möglichst nahe kommen soll.

Abbildung 2.7a zeigt die Temperaturverteilung des Schaufelschnitts. Es liegen Oberflächentemperaturen von ca. 1275 °C im Bereich der Anströmkante und etwa 1200 °C auf der Saugseite vor. Der Grundwerkstoff hat im Bereich der Abströmkante die höchste Temperatur (ca. 930 °C) und der zentrale innere Bereich liegt bei ca. 560 °C. Im zweiten Schritt wurde ein Abkühlvorgang von dieser Temperaturverteilung auf Raumtemperatur simuliert. Die dabei entstehenden Dehnungen in der YSZ-Schicht sind in

Abbildung 2.7b gezeigt. Die Farbcodierung ist so gestaltet, dass bei Überschreiten einer Versagensdehnung (hier für die Beschichtung im Ausgangszustand gewählt) ein Umschlag nach „pink“ erfolgen würde. Dargestellt ist die Dehnung in Umfangsrichtung, an jedem Punkt parallel zur Oberfläche der TBC. Die Farbcodierung zeigt, dass die Beschichtung in einem Dehnungsbereich verblieben ist, in dem vom Modell kein Versagen der TBC vorhergesagt wird. Es ist also von keiner Schädigung am realen Bauteil auszugehen.

Die Druckversuche an den Zylinderproben ergaben beim doppellagigen Schichtsystem S6 eine durchweg geringere kritische Versagensdehnung für die Proben mit dem kleineren Radius R4. Eine numerische Analyse des resultierenden Spannungszustands innerhalb des Wärmedämmschichtverbunds infolge der äußeren, mechanischen Druckbeanspruchung als auch nach thermischer Auslagerung zeigt geringfügige Unterschiede zwischen Radius R4 und R9. Hieraus kann abgeleitet werden, dass stärkere Grenzflächenkrümmungen auch in Doppellagensystemen zu höheren Beanspruchungen der WDS führen. Ein Vergleich der ermittelten Versagensdehnungen der Systeme S1 und S6 (Abbildung 2.8) zeigt, dass Doppellagensysteme unter verschiedenen thermischen Vorbeanspruchungen im niedrigeren Temperaturbereich ($T = 1050^{\circ}\text{C}$) durchaus vergleichbare Leistungsfähigkeiten aufweisen wie konventionelle APS-YSZ Schichten.

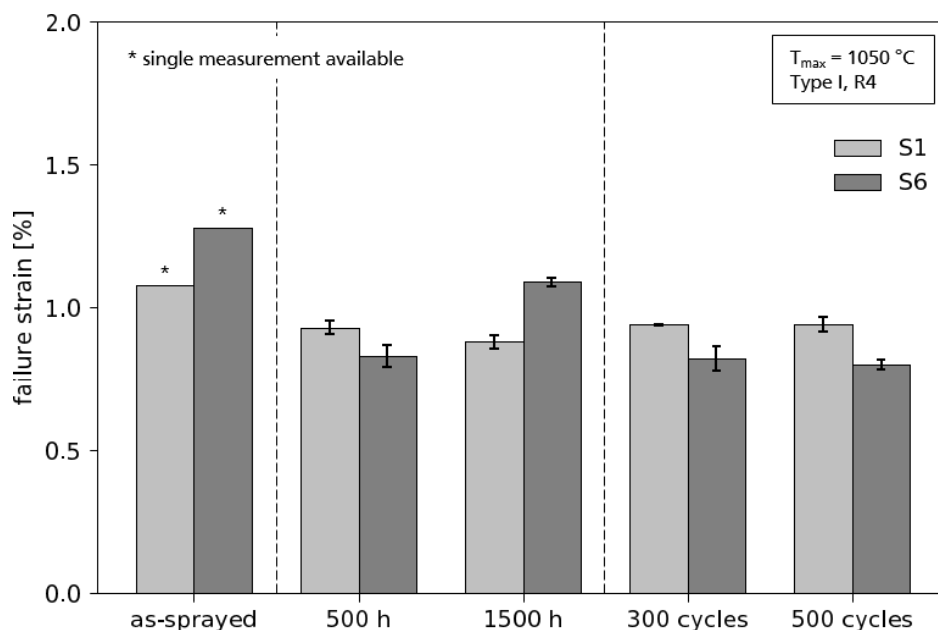


Abbildung 2.8: Axialdehnung des Substrat-HVS-Verbunds zum Zeitpunkt des WDS-Versagens für das Einlagensystem S1 und das Doppellagensystem S6 auf Modellkörper Typ I, R4 nach isothermer und zyklischer Auslagerung sowie im Ausgangszustand

Eine von der Industrie bereitgestellte Hitzeschildplatte mit doppellagen TBC wurde in einem modifizierten Gasbrenner-Teststand unter Temperaturgradient ausgelagert. Dafür wurde der Teststand umgebaut, um eine größere Heizleistung zu erreichen (Abbildung 2.9). Aus der so ausgelagerten Probe, konnten 4-Punkt Biegeproben entnommen werden, um an einem industriellen Bauteil mit doppellagen Wärmedämmschicht Biegeversuche nach Belastung im Gradienten durchzuführen. Die ermittelte kritische Dehnung ist sowohl für GZO als auch für YSZ geringer als bei den Flachproben. Hierfür könnten durch die Krümmung der Proben verursachte Ungenauigkeiten in der berechneten Dehnung verantwortlich sein, da die Dehnung aus der Auflagerverschiebung und der Probengeometrie unter Annahme einer Flachprobe ohne Krümmung berechnet wurde. Zusätzlich wurden aus dem restlichen Hitzeschild Proben präpariert um die Auslagerung dieses großformatigen Bauteils im Gradiententest vollständig beurteilen zu können. Die Untersuchung dieser Proben wird auch nach Ende der Projektdauer weitergeführt.

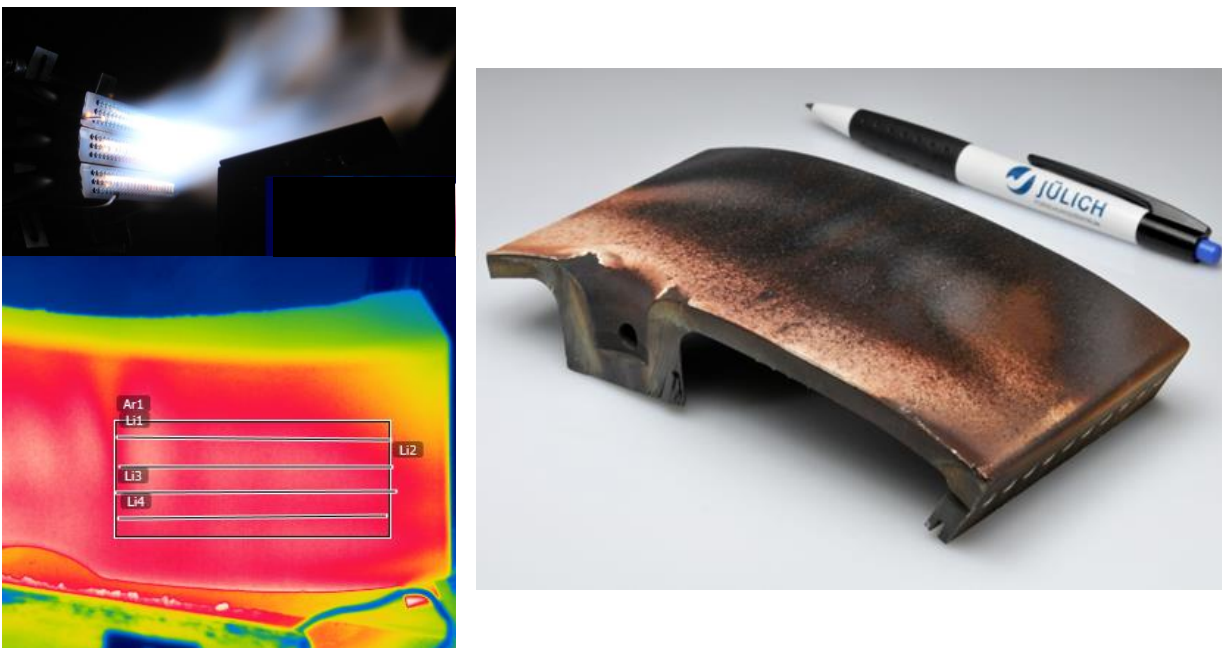


Abbildung 2.9: Link: (oben) Photographie der Brennerflamme und Proben in Burner-Rig-Versuchen mit Dreifach-Kaskadenbrenner, (unten) Wärmebild im Bereich des Hitzeschildes, der für weitere Probenentnahmen vorgesehen ist; Rechts: Photographie des Hitzeschildes nach 100 Zyklen Auslagerung im Gradiententest

3 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die Grundlagen geschaffen, um in einem dehnungskontrollierten Modell die Schädigungsmoden der Keramik zu bestimmen und ausgehend von der aktuellen kritischen Dehnung über die Dehnung des Basiswerkstoffes die Lebensdauer bzw. die Restlebensdauer der Beschichtung zu ermitteln. Jedoch zeigt sich, dass die aufwendige Bestimmung der Risslänge ein nicht zu unterschätzender kritischer Faktor ist. Insbesondere durch die Beschichtung mit unterschiedlichen TBC Strukturen und damit vorhandenen unterschiedlichen Risslängen ergeben sich Probleme bei der Bestimmung der Lebensdauer. In diesem Fall wäre die Einführung einer generalisierten Ersatz-Fehlergröße wünschenswert, um die doch zu individuell gestaltete Bestimmung der Fehlergröße zu vermeiden.

Die Untersuchungen der Bi-Layer Schichtsysteme GZO/8YSZ zeigen auch, dass die Bruchzähigkeit der GZO Schicht selbst und das Interface eine Schwachstelle im Gesamtsystem darstellen. Insbesondere die Bruchzähigkeit von GZO, die bei gleicher Porosität nur ca. 1/3 von 8YSZ beträgt, ist eine Schwachstelle in dem Gesamtsystem. Trotz der eingebrachten Verbesserungsvorschläge, wie eine Anpassung der Kanten oder eine Reduzierung der Schichtdicke der Oberlage, und der damit verbundenen Lebensdauerverbesserung müssen weitere Schritte unternommen werden, um die Stabilität solcher Systeme zu verbessern. Zusätzlich zeigte sich die Sensibilität der Lebensdauer des untersuchten Doppellagensystems auf die durch die Beschichtungsparameter gesteuerte Mikrostruktur. Optimierte Systeme besitzen jedoch eine Lebensdauer, die bei hohen Oberflächentemperaturen die Leistung von einlagigen YSZ-Schichten übertreffen kann.

Prinzipiell kann das in diesem Projekt entwickelte Modell auch für andere Schichtsysteme eingesetzt werden, wenn man einige Basisparameter an den neuen Systemen bestimmt und die Diagramme an die Basisparameter anpasst. Durch die Überführung der kritischen Dehnung in Finite-Elemente-Modellierung ist es zudem möglich, auch an konkreten Bauteil-Geometrien mit komplexen Krümmungen eine Lebensdauerabschätzung vorzunehmen. Gerade im Hinblick auf die immer detailreichere Abbildung kompletter Maschinen und komplexer Abläufe sind damit erste Grundlagen geschaffen, um auch das Versagen der Wärmedämmschichten mit in eine vollständige physikalische Beschreibung von Turbinen zu integrieren.

4 Literaturverzeichnis

- [1] C. Wang, M. Zinkevich, und F. Aldinger, „Phase diagrams and thermodynamics of rare-earth-doped zirconia ceramics“, *Pure Appl. Chem.*, Bd. 79, Nr. 10, S. 1731–1753, 2007.
- [2] H. Lehmann, D. Pitzer, G. Pracht, R. Vassen, und D. Stöver, „Thermal Conductivity and Thermal Expansion Coefficients of the Lanthanum Rare-Earth-Element Zirconate System“, *J. Am. Ceram. Soc.*, Bd. 86, Nr. 8, S. 1338–1344.
- [3] R. M. Leckie, S. Krämer, M. Rühle, und C. G. Levi, „Thermochemical compatibility between alumina and ZrO₂–GdO_{3/2} thermal barrier coatings“, *Acta Mater.*, Bd. 53, Nr. 11, S. 3281–3292, Juni 2005.
- [4] R. Vaßen, F. Traeger, und D. Stöver, „New Thermal Barrier Coatings Based on Pyrochlore/YSZ Double-Layer Systems“, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, Bd. 1, S. 351–361, 2004.
- [5] P. G. Charalambides, J. Lund, A. G. Evans, und R. M. McMeeking, „A Test Specimen for Determining the Fracture Resistance of Bimaterial Interfaces“, *J. Appl. Mech.*, Bd. 56, Nr. 1, S. 77, 1989.
- [6] I. Hofinger, M. Oechsner, H.-A. Bahr, und M. V. Swain, „Modified four-point bending specimen for determining the interface fracture energy for thin, brittle layers“, *Int. J. Fract.*, Bd. 92, Nr. 3, S. 213–220, Aug. 1998.
- [7] Y. Yamazaki, A. Schmidt, und A. Scholz, „The determination of the delamination resistance in thermal barrier coating system by four-point bending tests“, *Surf. Coat. Technol.*, Bd. 201, Nr. 3–4, S. 744–754, Okt. 2006.
- [8] M. Oechsner, *Ein Beitrag zur Lebensdauervorhersage von keramischen Wärmedämmschichten*, Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI Verl, 2001.
- [9] F. Traeger, R. Vassen, K. H. Rauwald, und D. Stover, „Thermal cycling setup for testing thermal barrier coatings“, *Adv. Eng. Mater.*, Bd. 5, S. 429+, Juni 2003.
- [10] A. A. Griffith, „The phenomena of rupture and flow in solids“, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A*, Bd. 221, Nr. 1, S. 163–198, 1921.
- [11] G. R. Irwin, „Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate“, *J. Appl. Mech.*, 1957.
- [12] M. Rudolphi und M. Schütze, „Investigations for the Validation of the Defect Based Scale Failure Diagrams - Part I: Nickel Oxide“, *Oxid. Met.*, Bd. 79, Nr. 3–4, S. 167–177, 2013.
- [13] M. Rudolphi und M. Schütze, „Investigations for the Validation of the Defect Based Scale Failure Diagrams - Part II: Extension of the Concept and Application to Nickel Oxide, Titanium Oxide and Iron Oxide“, *Oxid. Met.*, Bd. 84, Nr. 1–2, S. 45–60, 2015.