

# Bruchmechanische Analyse der Schädigung gradierter keramischer Schichten

I. Pflugbeil, H.-A. Bahr, H. Balke

*Durch definiertes Einstellen von Eigenschaftsgradienten kann das Schädigungs- und Bruchverhalten und damit die Lebensdauer von Hochtemperaturwerkstoffen, beispielsweise im Gasturbinenbau, wesentlich beeinflusst werden. Mit dem Ziel, Abplatzungen durch Reduzieren der Rißausbreitung parallel zur Oberfläche (Delaminationsrichtung) zu vermeiden, werden Gradientenwerkstoffe, insbesondere Wärmedämmschichtsysteme, theoretisch untersucht. Für eine bruchmechanisch gestützte Gradientenoptimierung dient als Kriterium die Minimierung des Verhältnisses der Energiefreisetzungsrates  $\dot{G}$  in Delaminationsrichtung bezogen auf ihren kritischen Wert  $G_c$ , um das Wärmedämmschichtsystem maximal belasten zu können. Am Beispiel einer möglichen Gradierung wird für den stationären Lastfall ein positiver Effekt, d. h. eine Reduzierung von  $\dot{G}$ , gezeigt.*

## 1 Einleitung

Der Wirkungsgrad von Gasturbinen kann durch Erhöhen der Gastemperatur bei der Verbrennung verbessert werden. Da die verwendeten Nickel-Superlegierungen bei hohen Temperaturen einen Abfall der Festigkeit verzeichnen, werden keramische Wärmedämmschichten durch Plasmaspritzen oder Verdampfung (beispielsweise mittels Elektronenstrahl: electron beam physical vapour deposition (EB-PVD)) aufgebracht. Diese Schichten besitzen eine deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zum metallischen Substrat und ermöglichen so eine Steigerung der Verbrennungstemperatur.

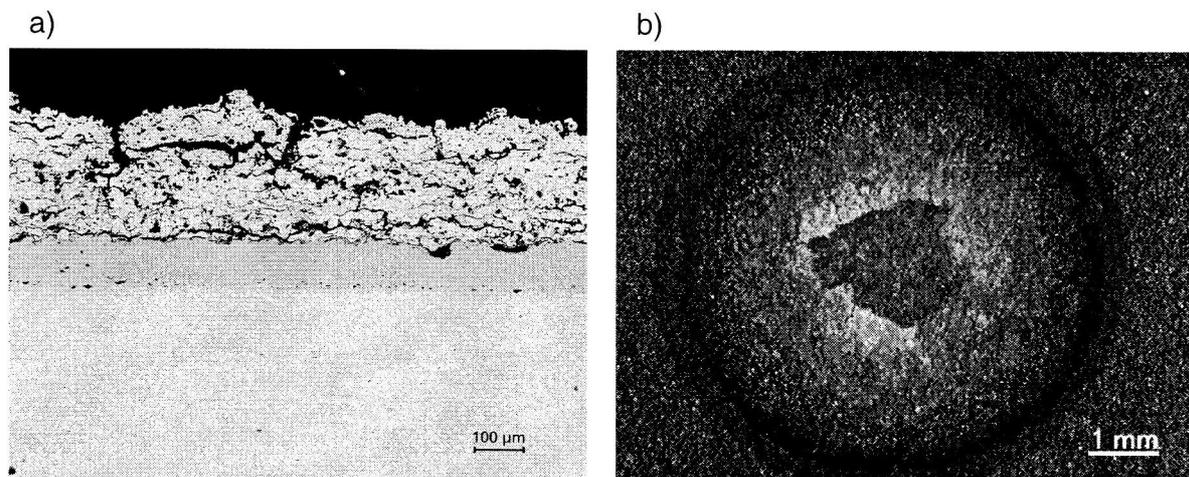


Bild 1. Durch Thermozyklierung (wiederholte Oberflächenbestrahlung mittels Laser) bewirkte Schädigung von plasmagespritzten Wärmedämmschichten (Kirchhoff u. a., 1996 und Pompe u. a., 1997)

- a) Querschliff mit Vertikal- und Delaminationsrissen,
- b) Draufsicht mit Schichtabplatzung im Zentrum des bestrahlten Bereiches

Bei der Beurteilung dieser Schichten steht das Phänomen der Rißausbreitung senkrecht und parallel zur erwärmten Oberfläche im Mittelpunkt. Eine Rißausbreitung parallel zur Oberfläche führt zum Abplatzen der Schichten und damit zum Ausfall von Bauteilen (siehe Beispiel der Schädigung einer Wärmedämmschicht in Bild 1). Als Ursachen für solche Schädigungen kommen verschiedene Belastungsregime in Frage. Stationäre und instationäre Temperaturfelder können kritische Spannungen im elastischen Bereich erzeugen. Bei sehr hohen Temperaturen und hinreichender Einwirkungszeit finden auch Kriechverformungen statt, die nach der Abkühlung tangential zur Oberfläche orientierte Zugspannungen erzeugen. Wie in Modellexperimenten an lasererwärmten Kreisscheiben

nachgewiesen wurde (Bild 2), verursachen diese Zugspannungen senkrecht zur Oberfläche verlaufende Vertikalrisse, welche in tangentialer Richtung umlenken.

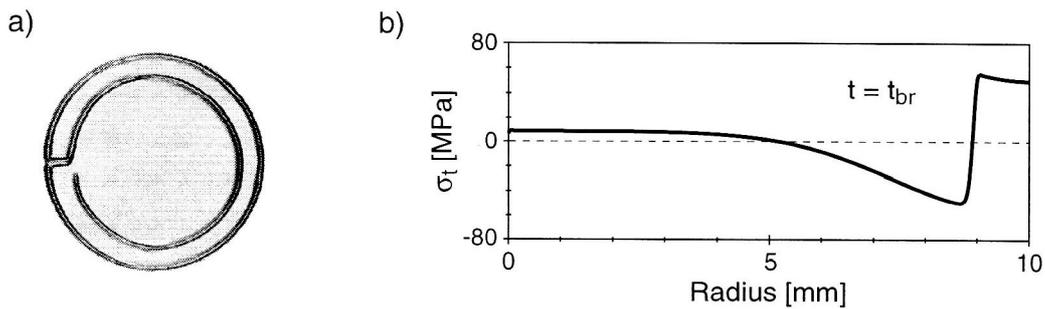


Bild 2. a) Ringrisse nach Randerwärmung dünner Glasscheiben mittels Laser (Pflugbeil, 1996)  
b) Tangentialspannung  $\sigma_t$  in Abhängigkeit vom Radius zum Bruchzeitpunkt  $t = t_{br}$

## 2 Gradientenoptimierung

Werkstoffgradienten sollen helfen, thermomechanische Schädigungen zu minimieren. Durch Reduzieren von Unterschieden der thermischen Ausdehnungskoeffizienten werden thermische Spannungen verringert, und es können Abplatzungen, wie sie typischerweise bei homogenen Wärmedämmschichten auftreten (siehe Bild 1), verhindert werden.

Bild 3 zeigt das Prinzip der Gradientenoptimierung. In Abhängigkeit von der Geometrie, den Last- und Materialparametern sind mittels Methoden der Festkörpermechanik die Spannungen zu berechnen. Mit der Energiefreisetzungsrate  $\mathcal{G}$  als Beanspruchungsparameter erhält man aus dem Rißausbreitungskriterium

$$\mathcal{G} \geq \mathcal{G}_c \quad (1)$$

Bedingungen für das Auftreten von Vertikalrisen oder Delamination als Folge von Vertikalrisen. Dabei stehen  $\mathcal{G}$  und  $\mathcal{G}_c$  für die Energiefreisetzungsraten und ihren kritischen Wert. Beide Größen werden für Vertikal- bzw. Delaminationsriß in Bild 3 mit dem Index  $\perp$  bzw.  $\parallel$  gekennzeichnet. Insbesondere geht es bei einer bruchmechanisch orientierten Gradientenoptimierung um die Minimierung von  $\mathcal{G}/\mathcal{G}_c$ .

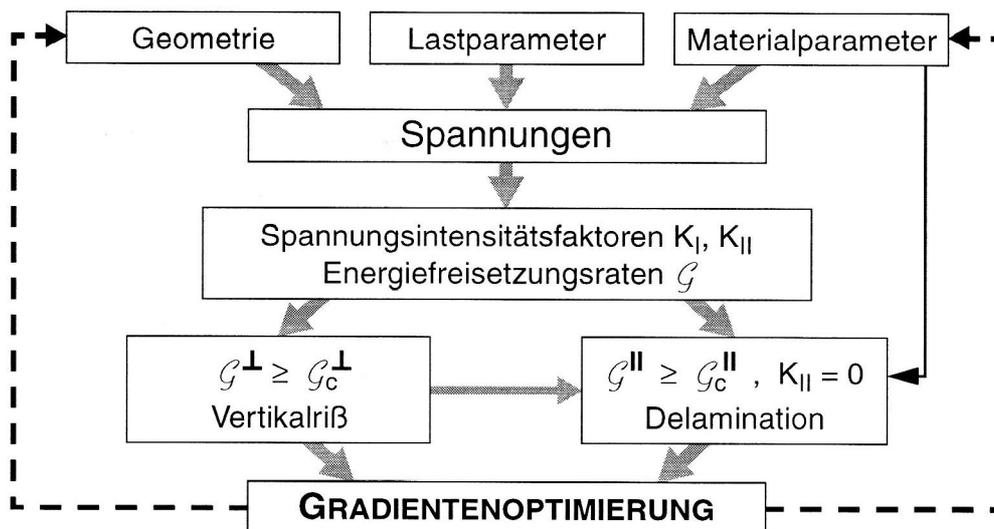


Bild 3. Prinzip der Gradientenoptimierung

### 3 Bruchmechanisch gestützter Gradienteneffekt

#### 3.1 Stationäres Temperaturfeld

Das Vorgehen gemäß Bild 3 wird bezüglich der Energiefreisetzungsrate  $\mathcal{G}$  am Beispiel einer Wärmedämmschicht (WDS) erläutert. Bei einem hier betrachteten Schichtsystem (bestehend aus EB-PVD-WDS der Dicke  $h_{hom} = 0,3$  mm, Oxidschicht, Haftvermittler und Substrat) liegt nach Schaller (1996) der in Bild 4 dargestellte stationäre Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Koordinate  $x_{hom}$  vor (gestrichelte Kurve). Dieser Verlauf folgt aus dem Fourierschen Gesetz

$$j = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

für die Temperatur  $T$  mit der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und der konstanten Wärmestromdichte  $j$ . Technisch ist die brennraumseitige Wandtemperatur  $T(x_{hom} = 0)$  gegeben (Bild 4). Die Dicke der homogenen Wärmedämmschicht  $h_{hom}$  bestimmt sich wegen der konstanten Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{WDS}$  gemäß

$$j = \frac{\lambda_{WDS}}{h_{hom}} [T(0) - T(h_{hom})] \quad (3)$$

so daß  $T(x_{hom} = h_{hom})$  einen zulässigen Wert nicht überschreitet.

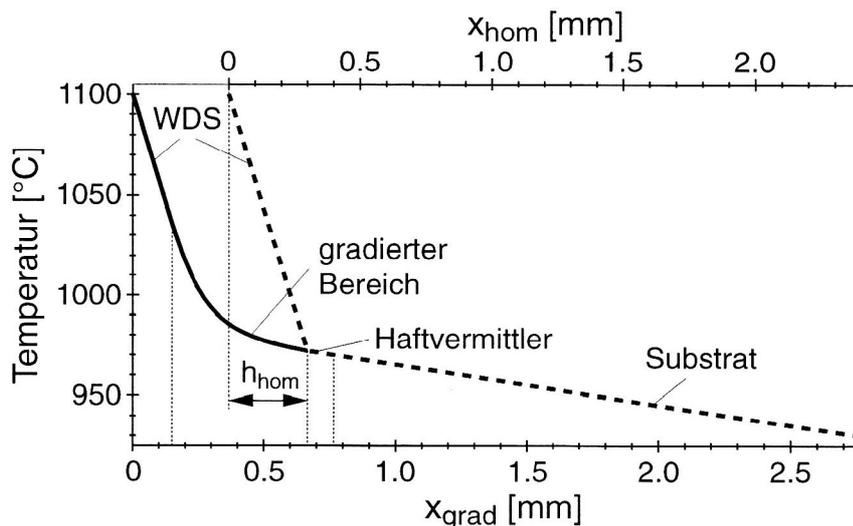


Bild 4. Stationärer Temperaturverlauf in Abhängigkeit von  $x_{hom}$  (gestrichelte Kurve: homogene WDS) und  $x_{grad}$  (durchgehende Kurve: z. T. gradierte WDS, mündet für Haftvermittler und Substrat in die gestrichelte Kurve)

An diesem Beispiel soll der Effekt einer möglichen gradierten Wärmedämmschicht demonstriert werden. Aus Gleichung (1) folgt für den Temperaturverlauf:

$$T(x_{grad}) = T(0) - j \int_0^{x_{grad}} \frac{1}{\lambda(x)} dx \quad \text{mit} \quad T(x_{grad} = 0) = T(x_{hom} = 0) \quad (4)$$

Dabei bezeichnet  $\lambda(x)$  die ortsabhängige Wärmeleitfähigkeit im gradierten Bereich. Diese effektive Materialeigenschaft wird nicht durch die einfache Mischungsregel, sondern mit einer selbstkonsistenten Theorie beschrieben (Landauer, 1952), da die Wärmeleitfähigkeit beider Materialien stark voneinander abweichen kann. Für  $\lambda(x)$  gilt

$$\lambda(x) = \frac{1}{4} \left\{ \lambda'(x) + \sqrt{\lambda'^2(x) + 8\lambda_1\lambda_2} \right\} \quad \text{mit} \quad \lambda'(x) = 3(v_1(x)\lambda_1 + v_2(x)\lambda_2) - (\lambda_1 + \lambda_2) \quad (5)$$

wobei  $\lambda_1$  sowie  $\lambda_2$  die Wärmeleitfähigkeit und  $v_1(x)$  sowie  $v_2(x)$  die ortsabhängigen Volumenanteile beider Materialien bezeichnen.

Die gradierte Wärmedämmschicht besteht aus zwei Bereichen. Der erste Bereich, ausgehend von der brennraumseitigen Wand, wird homogen belassen und der zweite zum Haftvermittler gradiert. Der auf die homogene Schichtdicke  $h_{hom}$  bezogene gradierte Anteil wird im folgenden mit  $f$  bezeichnet. Die Gradierung zum Haftvermittler bewirkt eine Anpassung der thermischen Ausdehnungskoeffizienten und damit eine Spannungsreduzierung.

Damit die gleiche Wärmedämmung, d. h. gleiche Temperatur am Übergang zum Haftvermittler (vgl. Bild 4) erreicht wird, ist bei dieser Gradierung zu einem wärmeleitfähigeren Werkstoff (Haftvermittler) eine dickere Schicht erforderlich. Die gesamte Schichtdicke läßt sich nach Gleichung (4) aus

$$h_{ges} = h_{hom} \left\{ 1 - f + \frac{f}{\lambda_{WDS}} \left( \int_0^1 \frac{1}{\lambda(\xi)} d\xi \right)^{-1} \right\} \quad (6)$$

berechnen.

Bei einer bezüglich  $x$  linearen Gradierung und  $f=0,5$  erhöht sich die gesamte Schichtdicke von 0,3 mm auf 0,67 mm. In Bild 4 ist der Temperaturverlauf bei dieser im Bereich  $0 < x_{hom} < h_{hom}/2$  homogen belassenen und im Bereich  $h_{hom}/2 < x_{hom} < h_{hom}$  gradierten Wärmedämmschicht als durchgehende Kurve dargestellt. Im Bereich des Haftvermittlers und des Substrats fällt diese Kurve mit der gestrichelten zusammen.

### 3.2 Spannungsfeld

Bei diesem Demonstrationsbeispiel werden für die Dehnungen in  $y$ -Richtung (siehe Bild 5) die Dehnungen der Balkentheorie benutzt, aber bezüglich der  $z$ -Richtung ein ebener Verzerrungszustand zugrunde gelegt. Die Spannung  $\sigma_{yy}$  kann auch für gradierte Schichten mit ortsabhängigen effektiven Materialparametern analytisch ermittelt werden.

$$\begin{aligned} \sigma_{yy}(x) &= E'(x) [-\alpha'(x) (T(x) - T_0) + A + Bx] \\ \text{mit } E' &= \frac{E}{1 - \nu^2} \quad \text{und} \quad \alpha' = \alpha(1 + \nu) \end{aligned} \quad (7)$$

Die Konstanten  $A$  und  $B$  werden aus den Gleichgewichtsbedingungen für die Kräfte und Momente bestimmt (siehe Bild 5).  $E$  bezeichnet den Elastizitätsmodul,  $\alpha$  den thermischen Ausdehnungskoeffizienten,  $\nu$  die Querkontraktionszahl und  $T_0$  eine Bezugstemperatur zum Zeitpunkt spannungsfreier thermischer Dehnung.

Die Größen  $E(x)$  und  $\alpha(x)$  sind analog zu  $\lambda(x)$  aus einer selbstkonsistenten Theorie ermittelte effektive Materialeigenschaften. Nach Pompe u. a. (1985) gilt für  $E(x)$

$$E(x) = \left[ \frac{v_2(x) - v_1(x)}{2} \frac{E_2 - E_1}{E_1} + \sqrt{\frac{E_1}{E_2} + \left\{ \frac{v_2(x) - v_1(x)}{2} \frac{E_2 - E_1}{E_1} \right\}^2} \right] E_2 \quad (8)$$

und für  $\alpha(x)$

$$\alpha(x) = \alpha_2 + \left( \frac{1}{E(x)} - \frac{1}{E_2} \right) \left( \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right)^{-1} (\alpha_1 - \alpha_2) \quad (9)$$

mit  $E(x)$  aus Gleichung (8).  $E_1$  sowie  $E_2$  bezeichnen den Elastizitätsmodul und  $\alpha_1$  sowie  $\alpha_2$  den thermischen Ausdehnungskoeffizienten beider Materialien. Es ist anzumerken, daß die Gleichungen (8) und (9) für den Fall  $\nu_1 = \nu_2 = 0,2$  gelten. Alle Berechnungen wurden mit diesem Wert für  $\nu$  durchgeführt, obgleich die tatsächlichen Werte geringfügig davon abweichen.

Im allgemeinen wird für  $T_0$  die Herstellungstemperatur der hier betrachteten EB-PVD-Wärmedämmschicht (ca. 1000 °C) zugrunde gelegt. Es gilt die Annahme, daß die Probe bei der Herstellung homogen erwärmt ist. Beim Abkühlen nach dem Aufdampfen finden jedoch Relaxationsprozesse statt, die einen niedrigeren Wert für  $T_0$  rechtfertigen. Für  $T_0 = 700$  °C ist in Bild 6 der Spannungsverlauf bei einer homogenen Wärmedämmschicht dargestellt

(gestrichelte Kurve), wobei die Materialparameter von Schaller (1996) zugrunde gelegt wurden. Die Wärmedämmschicht steht dabei trotz höherer Temperatur aufgrund des geringeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten dieser Schicht im Vergleich zum Substrat unter Zugspannungen.

Der Spannungsverlauf bei der z. T. gradierten Wärmedämmschicht ist in Bild 6 als durchgehende Kurve dargestellt. Nach einem linearen Anstieg im homogen belassenen Bereich der Wärmedämmschicht fällt die Spannung aufgrund der Gradierung ab. Die maximale Zugspannung in dieser Schicht reduziert sich von 105,9 MPa auf 57,8 MPa. Diesem Effekt steht jedoch eine Schichtdickenzunahme nach Gleichung (6) gegenüber, die erfahrungsgemäß die Abplatzneigung verstärkt.

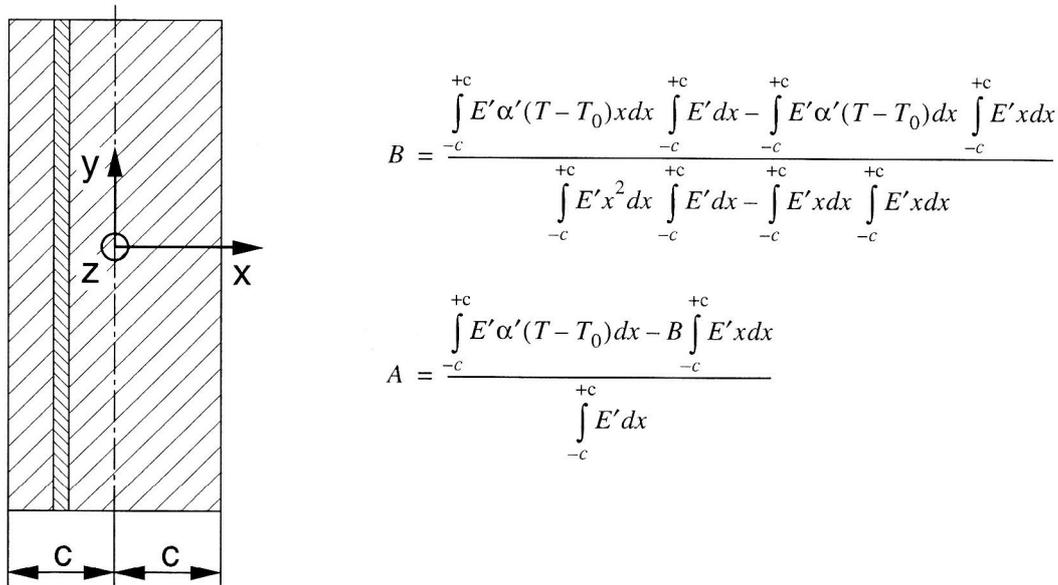


Bild 5. Balkengeometrie in kartesischen Koordinaten, Angabe der aus den Gleichgewichtsbedingungen bestimmten Konstanten A und B in Gleichung (7)

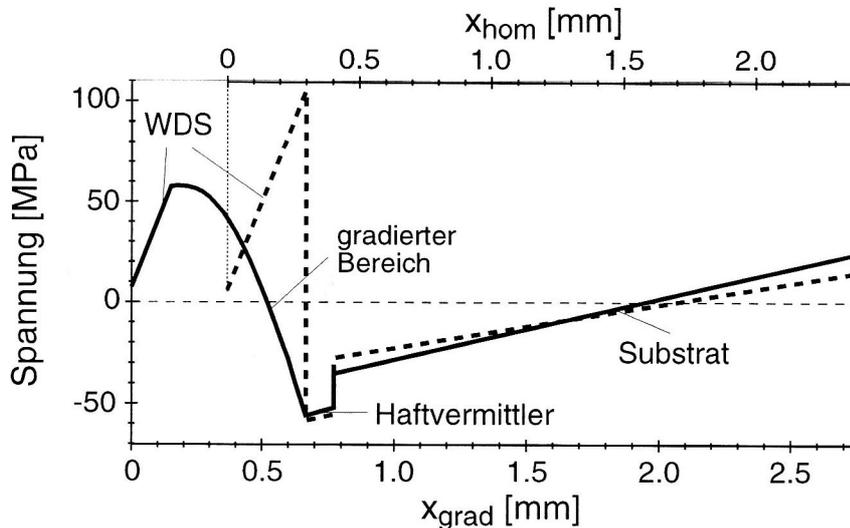


Bild 6. Positiver Gradienteneffekt: stationärer Spannungsverlauf in Abhängigkeit von  $x_{hom}$  (gestrichelte Kurve: homogene WDS) und  $x_{grad}$  (durchgehende Kurve: z. T. gradierte WDS) bei  $T_0 = 700 \text{ } ^\circ\text{C}$

### 3.3 Energiefreisetzungsrate

Zum Quantifizieren dieser gegenläufigen Effekte bietet sich eine bruchmechanische Analyse der Ausbreitung von Delaminationsrissen an. Triebkraft dieser Rißausbreitung ist die freigesetzte Energie pro Delaminationsfläche, die Energiefreisetzungsrate  $\mathcal{G}$  (im folgenden wird nur der Delaminationsriß besprochen und deshalb der Index II weggelassen). Die zur Verfügung stehende elastische Energiedichte in der Schicht beträgt  $(1 - \nu^2)\sigma^2/2E$ , wenn

auch für die abgelöste Schicht bezüglich der  $z$ -Richtung ein ebener Verzerrungszustand zugrunde gelegt wird. Bei einem langen Riß ergibt sich unabhängig von der Rißlänge aus der Integration über die ortsabhängige Energiedichte ein Näherungswert für  $\mathcal{G}$ .

$$\mathcal{G} = \int_0^h \frac{(1-\nu^2) \sigma^2(x)}{2E} dx \quad (10)$$

wobei eine kleine plastische Zone um die Rißspitze im Substrat vorausgesetzt wird (small scale yielding). Im allgemeinen Fall sei auf Wei u. a. (1997) verwiesen. Die Gleichung (10) bedeutet, daß die ursprünglich verspannte Schicht der Dicke  $h$  (ohne Riß) in  $y$ -Richtung elastisch entspannt wird. Die pro Delaminationsfläche freigesetzte elastische Formänderungsenergie steht zur Rißausbreitung zur Verfügung.

Bild 7 zeigt die Energiefreisetzungsrate  $\mathcal{G}$  in Abhängigkeit von der Delaminationstiefe  $d$  bei homogener Wärmedämmschicht (gestrichelte Kurve) und bei z. T. gradierter Schicht (durchgehende Kurve). Bei homogener Schicht nimmt  $\mathcal{G}$  stark zu, was mit dem experimentellen Befund der Schichthersteller (stärkere Abplatzneigung bei dickeren Schichten) korreliert. Bei der zweiten Kurve wird nach dem Anstieg im homogen belassenen Bereich der Wärmedämmschicht nur eine geringe Zunahme im gradierten Bereich ermittelt, da die Spannung abnimmt. Vergleicht man die maximalen Werte  $\mathcal{G}$  beider Schichten, so erhält man einen positiven Gradienteneffekt.  $\mathcal{G}_{max}$  reduziert sich von 10,2 Pa m (□ in Bild 7) auf 7,0 Pa m (○ in Bild 7).

Berücksichtigt man zusätzlich das Entspannen des Substrates infolge der Schichtablösung sowie eine Restverspannung in der abgelösten gradierten Schicht, stehen 12,0 Pa m (■ in Bild 7) geringe 8,6 Pa m (● in Bild 7) gegenüber.

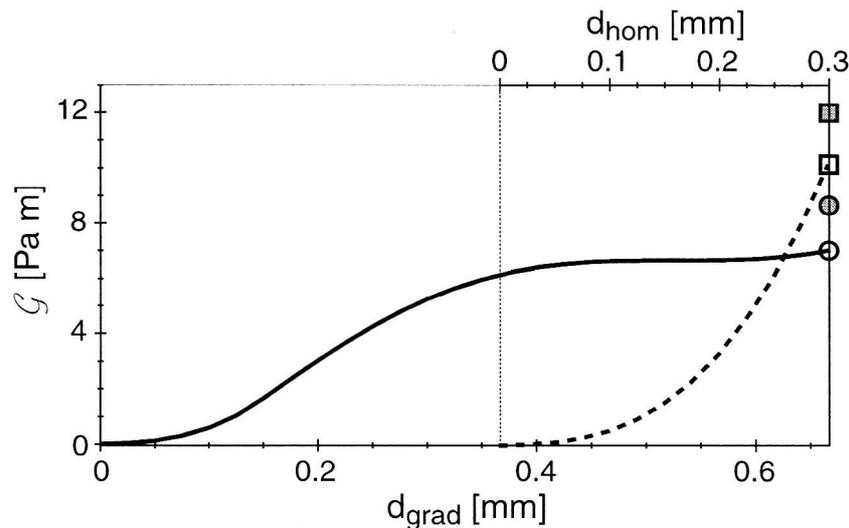


Bild 7. Positiver Gradienteneffekt: stationäre Energiefreisetzungsrate  $\mathcal{G}$  in Abhängigkeit von der Delaminationstiefe  $d_{hom}$  (gestrichelte Kurve: homogene WDS) und  $d_{grad}$  (durchgehende Kurve: z. T. gradierte WDS)

Die Tiefe, in der ein Delaminationsriß läuft, läßt sich für homogenes Material aus der Bedingung (Hutchinson u. a., 1992)

$$K_{II} = 0 \quad (11)$$

bestimmen. Bei homogenen Schichten kann  $K_{II}$  in Abhängigkeit von der Tiefe  $d$  analytisch ermittelt werden. Nach Thouless u. a. (1987) gilt für den langen Delaminationsriß

$$K_{II} = 0,558 P d^{-1/2} - 1,503 M d^{-3/2} \quad (12)$$

wobei der Spannungsverlauf in der WDS in seiner Wirkung einer Kraft  $P$  und einem Moment  $M$  (beide Größen sind auf eine Einheitsdicke normiert) statisch äquivalent ist. Für die ungradierte Wärmedämmschicht wurde in jeder Tiefe  $K_{II} > 0$  ermittelt. Damit findet die Delaminationsrißausbreitung nicht in der Wärmedämmschicht sondern möglicherweise in der Grenzfläche oder in der sich anschließenden Oxidschicht statt. (Eine Rißausbreitung im metallischen Substrat wird bei Wärmedämmschichtsystemen nicht beobachtet.)

Bei gradierten Schichten kann  $K_{II}$  nicht analytisch sondern nur mittels Finite-Elemente-Rechnungen berechnet werden. Im Fall der z. T. gradierten Wärmedämmschicht wurde nicht die Delaminationstiefe  $d$  bestimmt, sondern der Wert  $\mathcal{G}(h_{ges})$ , also der ungünstigste größte Wert für  $\mathcal{G}$  zur Bewertung des Gradienteneffekts herangezogen. (Der Gradienteneffekt erhöht sich, wenn die Bedingung  $K_{II} = 0$  in geringerer Tiefe erfüllt ist.)

Die zur gleichen Wärmedämmung erforderliche Gesamtdicke von 0,67 mm einer z. T. gradierten WDS bereitet jedoch technologische Probleme bei der Herstellung, da für die Anwendung des EB-PVD-Verfahrens Schichten nicht zu dick sein sollten. Deshalb wird im folgenden die Gradierung modifiziert. In Bild 8 ist die Energiefreisetzungsrates  $\mathcal{G}$  (durchgehende Kurve) sowie die Gesamtdicke  $h_{ges}$  der z. T. gradierten Wärmedämmschicht (gestrichelte Kurve) in Abhängigkeit vom gradierten Anteil  $f$  dargestellt. Diese Abbildung zeigt, daß die Energiefreisetzungsrates  $\mathcal{G}(h_{ges})$  zunächst stark mit zunehmendem gradierten Anteil  $f$  abfällt.

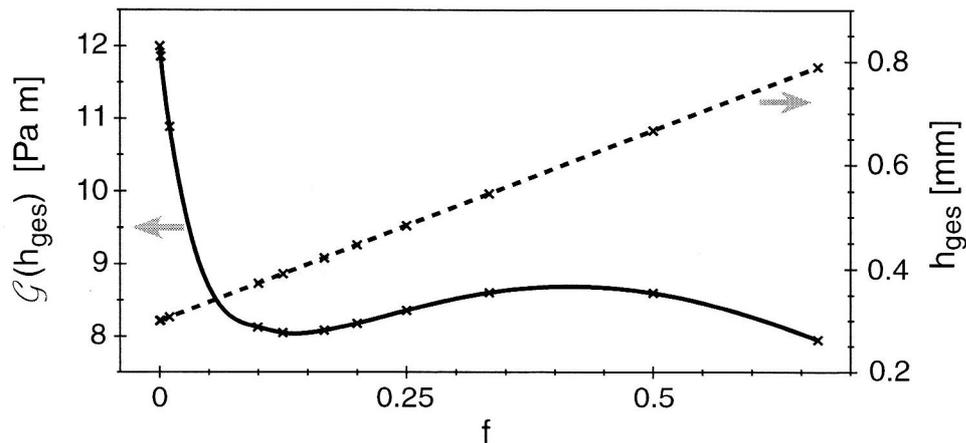


Bild 8. Optimierung der Gradierung anhand der Energiefreisetzungsrates  $\mathcal{G}$  und der erforderlichen Gesamtschichtdicke  $h_{ges}$  in Abhängigkeit vom gradierten Anteil  $f$  der WDS

In Abhängigkeit davon, welche Gesamtschichtdicke mit dem EB-PVD-Verfahren noch herstellbar ist, kann anhand dieser Darstellung der Gradienteneffekt ermittelt werden. Bei einem gradierten Anteil  $f \approx 0,05$ , was eine Gesamtschichtdicke  $h_{ges} \approx 0,34$  mm erfordert, reduziert sich  $\mathcal{G}(h_{ges})$  von 12,0 Pa m auf 8,8 Pa m, also um mehr als 25 %.

#### 4 Diskussion und Zusammenfassung

Das untersuchte Demonstrationsbeispiel stationär belasteter Wärmedämmschichten zeigt, daß durch Gradieren die Triebkraft der Delaminationsrißausbreitung herabgesetzt werden kann. Zur vollständigen Optimierung eines Schichtsystems sind jedoch alle Belastungssituationen, wie beispielsweise auch das instationäre Aufheizen und die für Gasturbinen wichtige Notabschaltung, heranzuziehen.

Die mit stationärer Belastung berechneten Energiefreisetzungsrates  $\mathcal{G}$  liegen deutlich unterhalb der von Thurn (1997) an plasmagespritzten  $ZrO_2$ -Wärmedämmschichten ermittelten kritischen Werte  $\mathcal{G}_c$ . Diese  $\mathcal{G}_c$ -Bestimmung erfolgte an Proben im Ausgangszustand. Beim Einsatz von Wärmedämmschichten finden jedoch Alterungsprozesse z. B. infolge Oxidation statt, die zur Herabsetzung der kritischen Energiefreisetzungsrates  $\mathcal{G}_c$  führen (Thurn, 1997) und damit eine niedrigere Belastung im Einsatzfall erfordern. Andererseits bewirken Sinterprozesse in der Wärmedämmschicht eine Erhöhung des Elastizitätsmoduls und damit der Energiefreisetzungsrates  $\mathcal{G}$ . (In Gleichung (10) ändern sich mit  $E$  auch die Spannungen, da die thermischen Dehnungen vorgegeben sind.) Zur Quantifizierung beider nachteiliger Tendenzen sei an dieser Stelle auf das Konzept der zeitabhängigen Sicherheitsdiagramme zur Lebensdauervorhersage (Thurn u. a., 1996) verwiesen.

Gemäß dem Prinzip der Gradientenoptimierung in Bild 3 stand die Bestimmung des wesentlichen Beanspruchungsparameters, der Energiefreisetzungsrates  $\mathcal{G}$  für Delaminationsrißausbreitung, im Mittelpunkt. Für eine vollständige bruchmechanische Analyse und damit zur Beschreibung der Rißausbreitung (nach Gleichung (1)) ist die Messung der kritischen Energiefreisetzungsrates  $\mathcal{G}_c$  für Delamination in Abhängigkeit von der Gradierung erforderlich. Eine Methode zur experimentellen Bestimmung von  $\mathcal{G}_c$  für Delamination, insbesondere bei dünnen Schichten, wird in Pflugbeil u. a. (1997) vorgestellt. Mit der Belastungsmodellierung und Kenntnis von  $\mathcal{G}_c$

besteht die Möglichkeit, den Einsatz von gradierten Schichten zu verbessern. Bei der Optimierung kommt es darauf an, das Verhältnis  $G/G_c$  zu minimieren, um das Wärmedämmschichtsystem maximal belasten und den Wirkungsgrad von Gasturbinen erhöhen zu können.

## Dank

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung des Projektes „Bruchmechanische Modellierung und Schädigungscharakterisierung von Gradientenwerkstoffen mittels Laserschock“ im Rahmen des Schwerpunktprogrammes „Gradientenwerkstoffe“. Ein besonderer Dank gilt dem Institut für Werkstoff-Forschung der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e. V. in Köln sowie dem Institut für Zuverlässigkeit und Schadenskunde im Maschinenbau der Universität Karlsruhe für die gute Zusammenarbeit.

## Literatur

1. Hutchinson, J. W.; Suo, Z.: Mixed Mode Cracking in Layered Materials, *Advances in Applied Mechanics* 29 (1992) 63-191
2. Kirchhoff, G.; Langmeier, P.; Weiß, H.-J.: Schädigung von Wärmedämmschichten durch Thermozyklierung, *ceramic forum international · Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft*, 11 [2] (1996) 215-224
3. Landauer, R.: The Electrical Resistance of Binary Metallic Mixtures, *Journal of Applied Physics*, 23 [7] (1952) 779-784
4. Pflugbeil, I.: Bruchmechanische Analyse von Laserschockexperimenten an viskoelastischem Material, Dissertation, Technische Universität Dresden, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 18: Mechanik/Bruchmechanik Nr. 202, 1996
5. Pflugbeil, I.; Oechsner, M.; Bahr, H.-A.: Modified Test Specimen for Determining the Interface Fracture Energy for Thin Layers, *in Vorbereitung*
6. Pompe, W.; Bahr, H.-A.; Gille, G.; Kreher, W.; Schultrich, B.; Weiss, H.-J.: Mechanical Properties of Brittle Materials Modern Theories and Experimental Evidence, in: *Current Topics in Materials Science*, Vol. 12, ed. E. Kaldis, Elsevier Science Publishers B. V., North-Holland · Amsterdam · New York Oxford · Tokyo, 1985, 242ff.
7. Pompe, W.; Bahr, H.-A.; Pflugbeil, I.; Kirchhoff, G.; Langmeier, P.; Weiss, H.-J.: Laser Induced Creep and Fracture in Ceramics, *Materials Science and Engineering A233* (1997) 167-175
8. Schaller, W.: Berechnung der Thermospannungen in einem vierschichtigen Metall-Keramik Verbund mit und ohne Gradierung, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, Institut für Zuverlässigkeit und Schadenskunde im Maschinenbau, 1996
9. Thouless, M. D.; Evans, A. G.; Ashby, M. F.; Hutchinson, J. W.: The Edge Cracking and Spalling of Brittle Plates, *Acta Metallurgica*, 35 [6] (1987) 1333-1341
10. Thurn, G.; Kirchhoff, G.; Bahr, H.-A.; Oechsner, M.; Schneider G.; Bast, U.; Löbel, G.; Baatz, M.: „Hochtemperaturresistenz keramischer Wärmebarrieren“, *in: Tagungsband der „Werkstoffwoche '96 (Stuttgart)“ Band 3: Werkstoffe für die Energietechnik*, Hrsg. von G. Zickler u. a., DGM Informationsgesellschaft, Frankfurt, 1996, 237-242
11. Thurn, G.: Hochtemperatureigenschaften und Schädigungsverhalten plasmagespritzter ZrO<sub>2</sub>-Wärmebarrieren, Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für nichtmetallisch anorganische Materialien, 1997
12. Wei, Y.; Hutchinson, J. W.: Nonlinear Delamination Mechanics for Thin Films, *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 45 [7] (1997) 1137-1159

---

*Anschrift:* Dr.-Ing. Ines Pflugbeil, Dr. rer. nat. Hans-Achim Bahr und Prof. Dr.-Ing. habil. Herbert Balke, Institut für Festkörpermechanik, Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität Dresden, D-1062 Dresden