

# **Die beschichtungsprozessabhängige Materialmodellierung von EB-PVD- und APS-Wärmedämmschichten**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen  
Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der  
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Reimo Nickel

aus

Eberswalde-Finow

Berichter: Univ.-Prof. Dr. techn. Prof. h.c. (RC) Erich Lugscheider  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin

Tag der mündlichen Prüfung: 4. Dezember 2006

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>APS- und EB-PVD-Wärmedämmschichten im Gasturbinenbau</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Aspekte einer durchgängigen Prozesssimulation</b>	<b>15</b>
3.1	Multiskalenansatz bei der APS-Beschichtungssimulation . . . . .	15
3.1.1	APS Teilprozessmodellierung . . . . .	15
3.1.2	Simulation des Pulverpartikelauftreffens . . . . .	16
3.1.3	FEM Schichtbildungssimulation . . . . .	20
3.1.4	Charakterisierung der APS-PYSZ-TBC-Eigenschaften . . . . .	27
3.2	Modell Schnittstelle Wärmetransport zwischen Plasmafreistrahl und Substrat	30
3.2.1	Problemstellung . . . . .	30
3.2.2	Simulation des Plasmafreistrahls und der Schichtbildung . . . . .	31
3.2.3	Modellierung der Schnittstelle . . . . .	33
3.2.4	Einsatz der Schnittstelle in der Prozesssimulation . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Methoden der Homogenisierung zur Berechnung von Schichteigenschaften</b>	<b>39</b>
4.1	Einführung in die Methoden der Homogenisierung . . . . .	39
4.2	Überblick über den Stand der Forschung . . . . .	40
4.3	Methode der Physikalischen Äquivalenz . . . . .	43
4.3.1	Prinzip der Methode . . . . .	43
4.3.2	Spannungs- und Dehnungsverhalten . . . . .	47
4.3.3	Thermodynamische Materialparameter . . . . .	53
4.4	Homogenisierung für periodische Strukturen . . . . .	55
4.4.1	Asymptotische Analyse für periodische Strukturen . . . . .	55
4.4.2	Thermoelastisches Problem . . . . .	58
4.4.3	Asymptotische Erweiterung . . . . .	59

4.4.4	Lösung der Differentialgleichungen . . . . .	61
4.4.5	Thermodynamische Materialparameter . . . . .	64
4.4.6	Ein-Periodenansatz . . . . .	66
4.4.7	Multiperiodenansatz . . . . .	68
<b>5</b>	<b>Materialeigenschaften von APS-Wärmedämsschichten</b>	<b>99</b>
5.1	Experimentelle Arbeiten . . . . .	99
5.1.1	Beschichtungsexperimente . . . . .	99
5.1.2	Messung des E-Moduls . . . . .	101
5.1.3	Messung der Fließspannung . . . . .	102
5.2	Ergebnisse der PE-Homogenisierung . . . . .	103
5.3	Ergebnisse der PS-Homogenisierung . . . . .	108
5.4	Diskussion . . . . .	113
<b>6</b>	<b>Komplexe Mikrostrukturen bei EB-PVD-Wärmedämsschichten</b>	<b>121</b>
6.1	Einleitung . . . . .	121
6.2	Gezielte Herstellung von komplexen Mikrostrukturen . . . . .	124
6.3	Modellierung von komplexen Mikrostrukturen . . . . .	128
6.3.1	Idealisierte Modelle zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit . . . . .	128
6.3.2	Modelle auf Basis von realen Strukturen . . . . .	133
6.3.3	Berechnung der Wärmeleitfähigkeit . . . . .	134
6.4	Minimierung der Wärmeleitfähigkeit . . . . .	136
6.4.1	Wesentliche Ergebnisse und erzielte Fortschritte . . . . .	136
6.4.2	Durchführung der Minimierungsprozedur . . . . .	137
6.4.3	Ergebnisse der Minimierungsprozedur . . . . .	138
6.4.4	Ausblick auf künftige Arbeiten . . . . .	148
<b>7</b>	<b>Diskussion und Schlussfolgerungen</b>	<b>151</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>155</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>157</b>
	<b>Glossar und Abkürzungen</b>	<b>169</b>
	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>173</b>
	<b>Index</b>	<b>177</b>