

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Stand des Wissens	2
2.1 Beanspruchung von Gasturbinenschaufeln	2
2.2 Wärmedämmschichtsysteme	4
2.2.1 Wärmedämmschichten	5
2.2.2 Aufbau von Wärmedämmschichten	9
2.2.2.1 APS-Wärmedämmschichten	12
2.2.2.2 EB-PVD-Wärmedämmschichten	16
2.2.2.3 Hybrid-Wärmedämmschichten	18
2.2.2.4 Physikalische und mechanische Eigenschaften	19
2.3 Haftvermittlerschichten	22
2.3.1 Auflageschutzschichten	24
2.3.2 Diffusionsschutzschichten	25
2.3.3 Hochtemperaturoxidation von Haftvermittlerschichten	25
2.3.3.1 Oxidschichtbildung bei MCrAlY-Haftvermittlerschichten	27
2.3.3.2 Oxidschichtbildung bei Diffusionsschutzschichten	28
2.3.4. Haftfestigkeit der Al_2O_3 -Oxidschicht	29
2.3.5 Mechanisches Verhalten von Haftvermittlerschichten	30
2.4 Grundwerkstoff	31
2.4.1 Nickelbasislegierungen	33
2.4.2 Herstellungstechnologie	34
2.5 Schädigung von Wärmedämmschichtsystemen	38
2.5.1 Spannungs-Dehnungsverhalten	39
2.5.2 Sintern von Wärmedämmschichten	45
2.5.3 Weitere Versagensursachen	46
2.6 Prüftechnik	48
2.7 Lebensdauermodelle für Wärmedämmschichtsysteme	53
3. Forschungsziel	61
4. Werkstoffe und Versuchstechnik	62
4.1 Versuchswerkstoff	62
4.2 Flachproben	65
4.3 Hohlproben	68
4.4 Versuchstechnik	70
4.4.1 Voroxidation	71
4.4.2 Vierpunktbiegeversuche nach Charalambides	71
4.4.3 Thermomechanische Ermüdungsversuche	77
4.4.4 Temperaturwechselversuche (TF-Versuche)	87
4.5 Zusammenfassung	89
5. Versuchsergebnisse	90
5.1 Oxidationsverhalten	90

5.2 Kritische Energiefreisetzungsrate G_{IC}	95
5.2.1 Diskussion der Ergebnisse der Charalambides-Versuche	98
5.3 Schädigungsvorgänge unter TMF Beanspruchung	102
5.3.1 Industriegasturbinenzyklus	102
5.3.1.1 APS-Wärmedämmschichten unter Out-of-Phase-Beanspruchung	103
5.3.1.2 APS-Wärmedämmschichten unter In-Phase-Beanspruchung	110
5.3.1.3 EB-PVD Wärmedämmschichten unter Out-of-Phase-Beanspruchung	114
5.3.2 Fluggasturbinenzyklus	118
5.3.2.1 Plasmagespritzte (APS) Wärmedämmschichten	118
5.3.2.2 EB-PVD-Wärmedämmschichten	120
5.3.2.3 EB-PVD-Wärmedämmschichten mit PtAl-Haftvermittlerschicht	122
5.3.3 Diskussion der Ergebnisse der TMF-Versuche	122
5.4 Schädigung unter Temperaturwechselbeanspruchung	124
5.5 Bewertung der Schädigungsbefunde	126
6. Finite-Elemente-Analyse	133
6.1 Modellierung des Wärmedämmschichtsystems	133
6.1.1 Netzgenerierung	133
6.1.2 Physikalische Eigenschaften der Schichtverbundpartner	135
6.1.3 Modellierung der thermomechanischen und oxidativen Beanspruchung	136
6.2 Ergebnisse der FE-Modellierung	137
6.2.1 Vergleich von In-Phase und Out-of-Phase-Beanspruchung	140
6.2.2 Vergleich von unterschiedlichen Rauheiten	144
6.2.3 Vergleich von Temperaturwechsel- und TMF-Beanspruchung	148
6.3 Bewertung der Ergebnisse	150
7. Beschreibung der Schädigungsmechanismen	152
7.1 Qualitative Beschreibung der Schädigungsmechanismen	152
7.1.1 APS-Wärmedämmschichtsysteme	152
7.1.2 EB-PVD-Wärmedämmschichtsysteme	155
7.2 Beschreibung der Lebensdauer	158
7.2.1 Verifizierung des Lebensdauermodells	165
7.2.2 Diskussion des Lebensdauermodells	172
7.3 Beschreibung der Lebensdauer mittels kritischer Dehnungen	174
7.4 Diskussion	176
8. Zusammenfassung und Ausblick	177
9. Literatur	180