

Inhaltsverzeichnis

Symbolle	v
1 Einleitung und Motivation dieser Arbeit	1
2 Grundlagen und wissenschaftlicher Kenntnisstand	5
2.1 Rauigkeit an Gasturbinenschaufeln	5
2.1.1 Rauigkeitskenngrößen	5
2.1.2 Entstehung von Oberflächenrauigkeit	8
2.2 Schaufelumströmung	11
2.2.1 Staupunktbereich	14
2.2.2 Laminare Grenzschicht	15
2.2.3 Laminar-turbulente Transition	18
2.2.3.1 Natürliche Transition	19
2.2.3.2 Bypass-Transition	20
2.2.3.3 Transition über eine Ablöseblase	22
2.2.4 Turbulente Grenzschicht	24
2.3 Sekundärströmungen im Bereich der Schaufelplattform	29
2.4 Verlustbetrachtung	31
2.5 Existierende experimentelle Untersuchungen	35
2.6 Ziele dieser Arbeit	44
3 Versuchsaufbau und Messtechnik	47
3.1 Versuchsaufbau	47
3.1.1 Einlaufstrecke und Turbulenzerzeuger	48
3.1.2 Schaufelgitter und Betriebsbereiche	50
3.1.3 Wahl und Definition der Oberflächenrauigkeiten	52
3.2 Messtechnik	56
3.2.1 Geschwindigkeits- und Turbulenzmessung mit Hilfe der Hitzdraht-anemometrie	57
3.2.2 Bestimmung der Profildruckverteilung	59
3.2.3 Bestimmung des Wärmeübergangs	59
3.2.3.1 Messträger	60

3.2.3.2	Messprinzip	63
3.2.4	Bestimmung des aerodynamischen Verlusts	66
3.2.4.1	Bestimmung des Profilverlusts durch Messung im Nachlauf	68
3.2.4.2	Bestimmung der Grenzschichtdicken an der Schaufelhinterkante	69
4	Vorgehensweise bei den numerischen Begleituntersuchungen	73
4.1	Berechnung des dreidimensionalen Strömungsfeldes	73
4.1.1	Grundgleichungen	73
4.1.2	Modellierung der Turbulenz	75
4.1.3	Modellierung der Transition	77
4.1.4	Geometrie, Gitter und Randbedingungen	79
4.2	Zweidimensionales Grenzschichtrechenverfahren	82
4.2.1	Grundgleichungen	82
4.2.2	Modellierung der Turbulenz	83
4.2.3	Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit	84
4.2.3.1	Versperrungswirkung der Rauigkeitselemente	85
4.2.3.2	Widerstandskräfte an den Rauigkeitselementen	86
4.2.3.3	Wärmeübertragung an die Rauigkeitselemente	87
4.2.3.4	Turbulenzproduktion im Nachlauf der Rauigkeitselemente .	88
4.2.3.5	Modifizierte Grenzschichtgleichungen des Diskrete-Elemente-Modells	89
4.2.3.6	Oberflächenbeschreibung	90
4.2.4	Randbedingungen und Berechnungsverfahren	93
4.2.5	Modellierung der transitionalen Grenzschicht	95
5	Experimentelle Untersuchungen	99
5.1	Strömungsgrößen in der Anströmung	99
5.1.1	Zeitlich gemittelte Strömungsgrößen	99
5.1.2	Turbulenzintensität und Längenmaße	101
5.1.3	Grenzschicht am Schaufelfuß	105
5.2	Aerodynamische Untersuchungen bei glatter Oberfläche	107
5.2.1	Schaufeldruckverteilung im Mittelschnitt	108
5.2.2	Aerodynamik im Einflussbereich der Sekundärströmung	113
5.3	Wärmeübergang im Einflussbereich der Sekundärwirbel	120

5.3.1	Wärmeübergang auf der Schaufelplattform	124
5.3.2	Wärmeübergang auf der Schaufel: Beeinflussung durch das Sekundärwirbelsystem	131
5.4	Wärmeübergang im Schaufelmittelschnitt	134
5.4.1	Untersuchungen bei glatter Oberfläche	134
5.4.2	Einfluss der Rauigkeitshöhe	139
5.4.3	Einfluss der Anisotropie der Rauigkeit	143
5.4.4	Zusammenfassende Betrachtung des Rauigkeitseinflusses	148
5.5	Aerodynamische Verluste im Schaufelmittelschnitt	152
5.5.1	Untersuchungen bei glatter Oberfläche	152
5.5.2	Einfluss der Rauigkeitshöhe	160
5.5.3	Einfluss der Anisotropie	163
5.5.4	Zusammenfassende Betrachtung des Rauigkeitseinflusses	165
6	Korrelationsentwicklung	169
6.1	Vorhandene Vorhersagemodelle zur Transition auf rauen Oberflächen	169
6.2	Entwicklung einer neuen Korrelation für raue Oberflächen	171
6.2.1	Experimenteller Datensatz	172
6.2.2	Vorgehensweise	172
6.2.3	Neue Korrelation für den Transitionsbeginn	176
6.2.4	Vergleich mit bestehenden Korrelationen	177
6.3	Validierung anhand realer Rauigkeiten	181
6.4	Zusammenfassung und Einsatzgrenzen der Startstellenkorrelation	188
7	Zusammenfassung	191
Literatur		197
Anhang		215
A.1	Umfangswirkungsgrad	215
A.2	Schaufelgeometrie	218
A.3	Druckmessstellen	220
A.4	Temperaturmessstellen	221
A.5	Kalibrierung der Nachlaufsonde	223
A.6	Betrachtung der Ausmischung im Gitternachlauf	224

A.7	Zur Turbulenzmodellierung der dreidimensionalen Strömungssimulationen	228
A.7.1	Zum Turbulenzmodell	228
A.7.2	Zum Transitionsmodell	228
A.8	Strömungsgrößen stromab der Turbulenzerzeuger	232
A.9	Druckverteilung und Beschleunigungsparameter im Mittelschnitt	235