

Inhaltsverzeichnis

Abbildungen	vi
Tabellen	x
Symbole	xi
1 Einführung	1
2 Vorgehensweise	5
3 Analyse des Vordrall-Kühlluftsystems	8
3.1 Kühlluftzufuhr zu rotierenden Schaufeln - Gestaltung und Grundprinzipien . . .	8
3.1.1 Hauptkomponenten und Bezeichnungen	8
3.1.2 Globale Druck- und Temperatur-Änderungen der Kühlluft	10
3.1.3 Vordralleffekte	13
3.2 Quantifizierung der Strömungsverluste: Kenntnisstand	17
3.2.1 Dimensionslose Einflussparameter	18
3.2.1.1 Achsensymmetrische Rotor-Stator Strömungen	18
3.2.1.2 Vordrallkammer Strömungen	22
3.2.2 Durchfluss-Charakteristiken und Totaldruckverluste	24
3.2.2.1 Drallerzeuger	25
3.2.2.2 Receiverkanäle	26
3.2.3 Drehimpulsverlust in der Vordrallkammer	28
3.2.3.1 Vordrall am Eintritt der Receiverbohrungen	29
3.2.3.2 Wandschubspannung	31
3.2.4 Kühllufttemperatur in den rotierenden Receiverkanälen	33
3.2.4.1 Kennzahlen für die Kühllufttemperatur und die Kühleffektivität	33
3.2.4.2 Temperatur-Kennlinien für ein adiabates System	34
3.2.4.3 Einfluss eines überlagerten radialen Massenstroms	38
3.2.4.4 Einfluss des Wärmeübergangs in der Vordrallkammer	39
3.2.5 Gesamteffizienz des Vordrall-Kühlluftsystems	40

4	Experimenteller Aufbau und Messverfahren	41
4.1	Parametervariation	41
4.2	Vordralldüsenprüfstand	45
4.3	Luftversorgung	46
4.4	Auswahl der Messgrößen	49
4.5	Bereitstellung der Instrumentierung	50
4.5.1	Druckmessstellen	51
4.5.2	Anpassung des PIV-Systems für die Geschwindigkeitsmessungen	52
4.5.3	Spezifische Maßnahmen zur Messung der Lufttemperaturen	55
4.5.3.1	Allgemeine Vorbereitungsschritte	56
4.5.3.2	Die Referenztemperatur stromauf der Düsen	56
4.5.3.3	Receiverbohrungen	57
4.5.3.4	Vordrallkammer	60
4.5.3.5	Innere Dichtung und Labyrinthdichtung	60
4.5.4	Vorbereitungen zur Messung der Wandtemperatur	61
4.6	Gesamte Messwerterfassung	63
4.7	Ausgewählte Parameter für die PIV-Auswertung	63
4.8	Verfahren zur Ermittlung der Wärmeübergangszahlen	64
4.8.1	FEM-Gitter	65
4.8.2	Randbedingungen	66
4.8.3	Iterativer Auswertungsprozess	68
4.9	Messgenauigkeit relevanter Größen	69
5	Aussagekraft der numerischen Strömungsberechnungen	70
5.1	Vorgehensweise bei den numerischen Untersuchungen	70
5.1.1	Rechengitter und Randbedingungen	71
5.1.2	Modellierung der Turbulenz	74
5.2	Voraussage des Strömungsfeldes	76
5.2.1	Hauptströmungspfad der Kühlluft	76
5.2.2	Effekte der Überdrall- und Unterdrall-Bedingung:	79
5.2.2.1	Freiströmung	79
5.2.2.2	Temperaturgrenzschicht bei adiabaten Wänden	80
5.2.3	Strömungsinstationaritäten	81

5.2.3.1	Von der Receiverbohrung angeregte Strömungsinstationaritäten	81
5.2.3.2	Turbulente Schwankungen	83
5.3	Überprüfung der numerischen Ansätze mit experimentellen Vergleichsdaten . .	84
5.3.1	Verlustkoeffizient (Geschwindigkeitsverhältnis) η_V der Vordralldüsen .	85
5.3.2	Geschwindigkeitsverteilung	87
5.3.3	Tangentialgeschwindigkeit am Eintritt der Receiverbohrungen	89
5.3.4	Druckrückgewinn	90
5.3.5	Totaltemperaturänderungen	92
5.3.6	Temperaturabsenkung am Eintritt der Receiverbohrungen	94
5.4	Grenzen der gewählten numerischen Verfahren	95
6	Messergebnisse und Berechnungsansätze	97
6.1	Durchfluss-Charakteristiken der Vordrall-Kühlluftsysteme	98
6.1.1	Verlustkoeffizient η_V der Vordralldüsen	98
6.1.1.1	Definitionen	98
6.1.1.2	Einflussparameter	99
6.1.1.3	Korrelationen für η_V	103
6.1.2	Verlustkoeffizient η_R der Receiverbohrungen	104
6.1.2.1	Definitionen	104
6.1.2.2	Einflussparameter	105
6.1.2.3	Korrelationen für η_R	109
6.1.2.4	Strömungsverluste am Bohrungsaustritt	110
6.1.3	Anwendungen	110
6.1.3.1	Ermittlung des Kühlluftmassenstroms	110
6.1.3.2	Ermittlung des Totaldrucks in den Receiverbohrungen	111
6.2	Vordrall und Kühllufttemperatur	112
6.2.1	Gemessene Temperatur-Kennlinien	112
6.2.2	Korrelationen zur Analyse der Vordrallströmung	113
6.2.2.1	Radiale Geschwindigkeitskomponente	115
6.2.2.2	Radiale Druckverteilung	117
6.2.2.3	Radialer Drallverlauf	117
6.2.2.4	Totaltemperaturverteilung	121
6.2.2.5	Wandreibung	121

6.2.2.6	Wärmeübergang	123
6.2.2.7	Iterative Berechnungsschritte	124
6.2.3	Kalibrierung und Überprüfung der Korrelationen für die Vordrallströmung	125
6.2.3.1	Drehimpulsverlustkoeffizient C_{IV} am Austritt der Vordralldüsen	126
6.2.3.2	Drehimpulsverlustkoeffizient C_{IR} am Eintritt der Receiverbohrungen	126
6.2.3.3	Radiale Verteilungen der Strömungsgrößen in der Vordrallkammer	126
6.2.3.4	Temperaturänderung durch Vordrall	129
6.2.3.5	Temperaturänderung durch Rotorwandreibung	130
6.2.3.6	Ermittelte Werte für C_{IV} , C_{IR} , ℓ_I , ℓ_{II} , ℓ_{III} , x_S und x_R	131
6.2.4	Rückschlüsse über den Vordrall und die Drehimpulsverluste	131
6.3	Wärmeübergang am Rotor	135
6.3.1	Gemessene lokale Wärmeübergangszahlen	135
6.3.2	Umfangsgemittelte Wärmeübergangszahlen	137
6.3.2.1	Einflussparameter	137
6.3.2.2	Korrelationen	141
7	Bewertung der Gesamteffizienz	144
7.1	Charakteristische Druck- und Temperaturkennfelder	144
7.2	Definition und Kennlinien des Wirkungsgrades η_{p3}	146
7.3	Potenzielle Erhöhung der Effizienz durch Konstruktionsänderung	147
8	Zusammenfassung	151
	Literatur	155
	Anhang	165
A.1	Abschätzung der Rotorreibleistung in einer Ringkammer	165
A.2	Durchflussbeiwert C_{dR} der Receiverbohrungen nach Yan et al. (2003)	166
A.3	Einfluss der Wärmeleitung auf die Thermoelementtemperatur bei unterschiedlichen Thermoelementlängen l_{TE}	167
A.4	Details des Verfahrens zur Auswertung der Wärmeübergangsmessungen	169
A.4.1	Randbedingungen des FE-Modells	169
A.4.2	Bilineare Interpolation	172

A.5	Bestimmung der Messgenauigkeit	173
A.5.1	Strömungsgeschwindigkeit	173
A.5.2	Wärmeübergangszahl	174
A.6	Geometrische Parameter der von Geis et al. (2000) untersuchten Vordralldüsen-systeme	176
A.7	Verwendete Messdaten zur Herleitung der Korrelation für η_R^{rd015}	177
A.8	Berechnete Strömungsverluste am Bohrungsaustritt	178
A.9	Totaldruck p_{trel3} in den Receiverbohrungen: Vergleich von Gl. (6.13) mit den CFD-SST-Berechnungen	179
A.10	Herleitung der turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen v'_r und v'_ϕ im zylindrischen Koordinatensystem	180
A.11	Herleitung angenäherter Lösungen für die Impulsgleichung Gl. (6.37)	182
A.11.1	Lösungen für ein Ringvolumen mit $v_r \approx 0$ und ohne Düse und Receiverbohrung	182
A.11.1.1	Für $\ell = \text{konstant}$ in Analogie zum Mischungswegkonzept von Prandtl	183
A.11.1.2	Für $\ell \neq \text{konstant}$ in Analogie zum Mischungswegkonzept von von Kármán	183
A.11.2	Lösung für ein Ringvolumen mit $v_r = \pm \dot{m}/(2\pi sr)$ und ohne Düse und Receiverbohrung ($r_1 \neq r_2$)	184
A.11.3	Lösung für ein Ringvolumen nur mit den Düsen ($r_1 \neq r_2$)	185
A.11.4	Lösung für ein Ringvolumen nur mit den Receiverkanälen ($r_1 \neq r_2$)	186
A.11.5	Lösung für ein Ringvolumen mit den Düsen und den Receiverbohrungen ($r_1 \approx r_2$)	187
A.12	Angenäherte Lösungen der radialen Drallverteilung für die Fälle $r_1 > r_2$ und $r_1 < r_2$	188
A.13	Dimensionsloser Drehimpuls C_{IV} am Austritt der Vordralldüsen	190
A.14	Dimensionsloser Drehimpuls C_{IR} am Eintritt der Receiverbohrungen	191
A.15	Radiale Verläufe von Strömungsgrößen in der Vordrallkammer beim Überdrall und Unterdrall	192
A.16	Abschätzung des Einflusses des Wärmeübergangs auf die Kühllufttemperatur T_{t2} bei den angenommenen adiabaten Versuchen	193
A.17	Rotor- und Stator-Wandreibung in der Vordrallkammer G-Ref	194
A.18	Exemplarische radiale Drallverteilungen aus der Literatur	195
A.19	Exemplarische radiale Verteilungen von Nußelt-Zahlen aus der Literatur	196