

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungen</b>	<b>vi</b>
<b>Tabellen</b>	<b>x</b>
<b>Symbole</b>	<b>xi</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2 Vorgehensweise</b>	<b>5</b>
<b>3 Analyse des Vordrall-Kühlluftsystems</b>	<b>8</b>
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

---

<b>4</b>	<b>Experimenteller Aufbau und Messverfahren</b>	<b>41</b>
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
<b>5</b>	<b>Aussagekraft der numerischen Strömungsberechnungen</b>	<b>70</b>
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) $\eta_V$ 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
<b>6</b>	<b>Messergebnisse und Berechnungsansätze</b>	<b>97</b>
6.1	Durchfluss-Charakteristiken der Vordrall-Kühlluftsysteme	98
6.1.1	Verlustkoeffizient $\eta_V$ der Vordralldüsen	98
6.1.1.1	Definitionen	98
6.1.1.2	Einflussparameter	99
6.1.1.3	Korrelationen für $\eta_V$	103
6.1.2	Verlustkoeffizient $\eta_R$ der Receiverbohrungen	104
6.1.2.1	Definitionen	104
6.1.2.2	Einflussparameter	105
6.1.2.3	Korrelationen für $\eta_R$	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 $C_{IV}$ , $C_{IR}$ , $\ell_I$ , $\ell_{II}$ , $\ell_{III}$ , $x_S$ 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
<b>7</b>	<b>Bewertung der Gesamteffizienz</b>	<b>144</b>
7.1	Charakteristische Druck- und Temperaturkennfelder . . . . .	144
7.2	Definition und Kennlinien des Wirkungsgrades $\eta_{p3}$ . . . . .	146
7.3	Potenzielle Erhöhung der Effizienz durch Konstruktionsänderung . . . . .	147
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>151</b>
	<b>Literatur</b>	<b>155</b>
	<b>Anhang</b>	<b>165</b>
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 $\eta_R^{rd015}$ . . . . .	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 $v'_\phi$ 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 $v_r = \pm \dot{m}/(2\pi s\rho r)$ 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