

# Untersuchung der Wirkungsweise von Stator- und Rotor-Clocking in Axialverdichtern

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zu Erlangung der Würde  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von  
Dipl.-Ing. Jörn Städing  
aus Braunschweig

Eingereicht am: 15.06.2012  
Mündliche Prüfung am: 02.10.2012  
Referenten: Prof. a.D. Dr.-Ing Günter Kosyna  
Jun.-Prof. Dr.-Ing. Dragan Kožulović

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>2</b>
<b>Abstract</b>	<b>3</b>
<b>Bezeichnungen</b>	<b>7</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>13</b>
1.1 Motivation . . . . .	13
1.2 Der Clocking-Effekt . . . . .	13
1.3 Ziel . . . . .	15
<b>2 Stand des Wissens</b>	<b>16</b>
2.1 Strömungsverluste in Turbomaschinen . . . . .	16
2.1.1 Profilverluste . . . . .	16
2.1.2 Spaltverluste . . . . .	17
2.1.3 Randverluste . . . . .	18
2.2 Transitionsmechanismen in Turbomaschinen . . . . .	19
2.2.1 Natürliche Transition . . . . .	20
2.2.2 Bypass-Transition . . . . .	21
2.2.3 Transition über abgelöste Scherschichten . . . . .	22
2.3 Nachlaufinteraktionen . . . . .	23
2.3.1 Nachlaufinduzierte Transition . . . . .	24
2.3.2 Instationäre Profildruckverteilungen . . . . .	27
2.4 Literatur zum Clocking-Effekt . . . . .	29
2.4.1 Aerodynamische Untersuchungen an Verdichtern . . . . .	29
2.4.2 Aeromechanische Untersuchungen an Verdichtern . . . . .	31
2.4.3 Aerodynamische Untersuchungen an Turbinen . . . . .	32
2.4.4 Akustische Untersuchungen . . . . .	34
2.4.5 Zusammenfassung . . . . .	35
<b>3 Versuchsanlage</b>	<b>37</b>
3.1 Versuchsverdichter . . . . .	37
3.2 Umbau der Versuchsanlage . . . . .	39
3.3 Definition der Clocking-Positionen . . . . .	40
<b>4 Messtechnik</b>	<b>42</b>
4.1 Kennlinienmessungen . . . . .	42
4.1.1 Datenerfassung . . . . .	42
4.1.2 Datenauswertung . . . . .	43
4.1.3 Korrektur des Betriebszustands . . . . .	44
4.1.4 Fehlerbetrachtung . . . . .	44
4.2 Pneumatische Nachlaufmessungen . . . . .	46
4.2.1 Grundlagen . . . . .	46
4.2.2 Datenerfassung . . . . .	46
4.2.3 Datenauswertung . . . . .	48
4.2.4 Korrektur und Mittelung der Daten . . . . .	50
4.3 Instationäre Druckmessungen . . . . .	51
4.3.1 Grundlagen . . . . .	51
4.3.2 Datenerfassung . . . . .	51

4.3.3	Instationäre Totaldruckmessungen . . . . .	52
4.3.4	Instationäre Profildruckmessungen . . . . .	53
4.4	Instationäre Nachlaufmessungen . . . . .	55
4.4.1	Grundlagen . . . . .	55
4.4.2	Datenerfassung . . . . .	57
4.4.3	Sondenkalibrierung . . . . .	58
4.5	Oberflächenheißfilme . . . . .	59
4.5.1	Grundlagen . . . . .	59
4.5.2	Oberflächenheißfilmmessungen am Stator . . . . .	61
4.5.3	Oberflächenheißfilmmessungen am Rotor . . . . .	62
4.6	Telemetrie . . . . .	62
4.7	Auswertung instationärer Daten . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Stator-Clocking Untersuchungen</b>	<b>66</b>
5.1	Einfluss des Stator-Clockings auf die Verdichtercharakteristik . . . . .	66
5.1.1	Beeinflussung des Wirkungsgrades . . . . .	66
5.1.2	Beeinflussung des Stator 2-Druckrückgewinns . . . . .	68
5.2	Nachlaufmessungen . . . . .	69
5.2.1	Nachlaufkonturen . . . . .	69
5.2.2	Radialverteilungen . . . . .	73
5.2.3	Umfangsverteilungen . . . . .	75
5.3	Instationäre Profildruckverteilung . . . . .	78
5.3.1	Weg-Zeit-Diagramme der periodischen Schwankungsanteile . . . . .	79
5.3.2	Instationäre Inzidenzwinkel . . . . .	84
5.4	Oberflächenheißfilmmessungen . . . . .	84
5.4.1	Weg-Zeit-Diagramme . . . . .	85
5.4.2	Bestimmung der mittleren Transitionslage . . . . .	91
5.5	Bewertung der Messergebnisse . . . . .	92
<b>6</b>	<b>Rotor-Clocking Untersuchungen</b>	<b>94</b>
6.1	Einfluss des Rotor-Clockings auf die Verdichtercharakteristik . . . . .	94
6.1.1	Globaler Rotor-Clocking-Effekt . . . . .	94
6.1.2	Lokaler Rotor-Clocking-Effekt . . . . .	95
6.2	Nachlaufmessungen . . . . .	98
6.2.1	Nachlaufkonturen . . . . .	98
6.2.2	Radialverteilungen . . . . .	102
6.3	Instationäre Profildruckverteilung . . . . .	105
6.3.1	Weg-Zeit-Diagramme der periodischen Schwankungsanteile . . . . .	105
6.3.2	Weg-Zeit-Diagramme der stochastischen Schwankungsanteile . . . . .	109
6.3.3	Instationäre Inzidenzwinkel . . . . .	110
6.4	Oberflächenheißfilmmessungen . . . . .	112
6.4.1	Weg-Zeit-Diagramme . . . . .	112
6.4.2	Bestimmung der mittleren Transitionslage . . . . .	118
6.5	Bewertung der Messergebnisse . . . . .	119
<b>7</b>	<b>Beeinflussung der Teillastreserven durch Rotor-Clocking</b>	<b>121</b>
7.1	Basismessungen . . . . .	121
7.2	Pneumatische Nachlaufmessungen . . . . .	122
7.3	Instationäre Nachlaufmessungen . . . . .	124
7.4	Bewertung der Messergebnisse . . . . .	126
<b>8</b>	<b>Full-Clocking Untersuchungen</b>	<b>127</b>
8.1	Einfluss des vollständigen Clockings auf die Verdichtercharakteristik . . . . .	127
8.2	Pneumatische Nachlaufmessungen . . . . .	129
8.3	Bewertung der Messergebnisse . . . . .	131

<b>9 Zusammenfassung</b>	<b>133</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>137</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>143</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>151</b>
<b>A Abbildungen</b>	<b>152</b>
<b>B Tabellen</b>	<b>213</b>