Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen **IX**

Kurzfassung **XIV**

Abstract **XV**

1 Einleitung und Zielsetzung **1**

2 Beeinflussung der Randzonenströmung **9**

2.1 Randzonenströmung in Axialverdichtern 10
2.2 Ansätze zur Beeinflussung der Randzonenströmung 20
2.2.1 Variation der Profilauffädelungslinie 20
2.2.1.1 Geneigte Beschaufelungen 21
2.2.1.2 Gepfeilte Beschaufelungen 25
2.2.2 Casing-Treatment und Radialspaltkonfigurierung 30
2.2.3 Seitenwandkonturierung 31
2.2.4 Profilnasen 32
2.3 Randzonenkorrigierte Axialverdichterbeschaufelungen 33

3 Versuchseinrichtungen und allgemeine Meßtechnik **38**

3.1 Aufbau des Axialverdichterprüfstandes 39
3.2 Der Versuchsaxialverdichter 41
3.3 Die meßtechnische Instrumentierung 42
3.3.1 Massenstrom und Verdichtereintrittszustand 44
3.3.2 Drehzahl 45
3.3.3 Wanddruck 45
3.3.3.1 Stationär 45
3.3.3.2 Instationär 45
3.3.4 Möglichkeiten der Sondenmessung in den Axialspalten und Sondenverstellgeräte 46
3.3.5 Stationär messende Drucksensoren 46
3.3.6 Statische Kalibrierung der Drucksensoren 47
3.3.7 Temperaturmeßtechnik 48
3.4 Meßdatenerfassung 49
3.4.1 Stationäre Meßgrößen 49
3.4.2 Instationäre Meßgrößen 50

4 Sonden-Meßtechnik **51**

4.1 Pneumatische Strömungsvektorsonden 51
4.1.1 Stationär messende Vierloch-Sonden 51
4.1.2 Stationär messende Dreiloch-Sonden 53
4.1.2.1 Stationär messende Totaltemperatursonde 55
4.1.3 Stationär messende Dreiloch-Grenzschichtsonde 55
4.1.4 Kombination von Drei- und Vierloch-Sonden 56
4.1.5 Instationär messende Sechsloch-Zylindersonde 57
4.2 Stationäre Kalibrierung der Strömungsvektorsonden 58
4.2.1 Stationär messende pneumatische Vektorsonden 58

4.2.1.1 Vierloch-Sonden 58
4.2.1.2 Dreiloch-Sonden 65
4.2.1.3 Totaltemperatur-Sonde 68
4.2.1.4 Dreiloch-Grenzschichtsonde 68
4.2.1.5 Auswertealgorithmus zur Berechnung der Strömungsgrößen aus den Meßdaten der Vektorsonden 68
4.2.2 Sechsloch-Zylindersonde 71
4.3 Dynamische Eigenschaften der instationären Druckmeßtechnik 72
4.3.1 Wandbündige Drucksensoren 72
4.3.2 Sechsloch-Zylindersonde 72

5 Fehlereinflüsse auf pneumatische Sonden in mehrstufigen Turbomaschinen 74

5.1 Zur Messung mit ortsfesten pneumatischen Strömungssonden in Turbomaschinen 78
5.2 Dynamische Eigenschaften und Meßfehler pneumatischer Strömungssonden 80
5.3 Meßfehler raumfester Sonden durch den Wechsel des Bezugssystems 87
5.4 Instationäre Kalibrierung und Ansätze zur Verringerung dynamischer Meßfehler. 90
5.5 Statische Eigenschaften und Meßfehler pneumatischer Strömungssonden. . . 97
5.5.1 Der Einfluß der Reynoldszahl 98
5.5.2 Der Einfluß der Machzahl 104
5.5.3 Der Einfluß des Isentropenexponenten 104
5.5.4 Der Einfluß von Geschwindigkeits- und statischen Druckgradienten 105
5.5.5 Rückwirkungen der Kármánschen Wirbelstraße. 108
5.5.6 Versperrungseinflüsse bei Kalibrierung und Messung 110
5.5.7 Der Wand- und Schafteinfluß 114
5.6 Korrektur statischer Fehlereinflüsse in den vorliegenden Meßergebnissen . 126
5.6.1 Massenstrom-Korrekturverfahren für die Sondenmessung 127
5.6.2 Korrektur des Totaldruckgradienten an Nabe und Gehäuse 129

6 Erläuterung der Profilmodifikationen 131

6.1 Randzonenkorrigierte Beschaufelungen am dreistufigen Axialverdichter . . 131
6.2 Die Profilmodifikationen der randzonenoptimierten Beschaufelung 132
6.2.1 Grundlegende Ansätze bei der Profilmodifikation 132
6.2.2 Die Profilmodifikationen im Detail. 137
6.2.2.1 Laufrad 1. 137
6.2.2.2 Laufrad 2. 140
6.2.2.3 Leitrad 2 144
6.2.2.4 Laufrad 3. 146

7 Die Kennfeldmessung 148

7.1 Durchführung der Kennfeldmessung. 148
7.2 Ähnlichkeit der Betriebspunkte. 150
7.3 Definitionsgleichungen der Kennfeldmessung 152
7.3.1 Der isentrope Totalwirkungsgrad 152
7.3.2 Das Totaldruckverhältnis. 153
7.4 Reproduzierbarkeit der Kennfeldmessung 154

7.4.1 Durchführung der Reproduzierbarkeitsmessung 155
7.4.2 Verschmutzung der Verdichterbeschaufelung 156
7.4.3 Ergebnisse der Reproduzierbarkeitsmessung 158
7.5 Ergebnisse der Kennfeldmessung 160
7.5.1 Das Totaldruckverhältnis 160
7.5.2 Der isentrope Totalwirkungsgrad 162
7.6 Zusammenfassung der Ergebnisse der Kennfeldmessung. 164

8 Die Strömungsfelduntersuchung 166

8.1 Durchführung der Strömungsfelduntersuchung 167
8.2 Auswertung der Strömungsfelduntersuchung 168
8.2.1 Mittelwertbildung 168
8.2.2 Meßgrößenreduzierung 168
8.2.3 Definition der Verlust- und Belastungsparameter 169
8.3 Ermittlung der Strömungsgrößen der stationären Sondenmessung. 176
8.4 Reproduzierbarkeit der Strömungsfelduntersuchung 178
8.4.1 Messung mit Vierloch-Sonde E 178
8.4.2 Messung mit Dreiloch-Sonde G1 181
8.4.3 Messung mit Dreiloch-Sonde N2 183
8.5 Plausibilisierung der gemessenen Strömungsgrößen. 183
8.6 Untersuchung der Strömungssonden 188
8.6.1 Vergleich der Vierloch-Vektorsonden 188
8.6.1.1 Abtastung nach einem Leitrad 188
8.6.1.2 Abtastung nach einem Laufrad 192
8.6.2 Vergleich der Sonden im Gehäusebereich. 195
8.6.2.1 Vergleich Vierloch-Sonde C mit Dreiloch-Sonde G3 197
8.6.2.2 Vergleich Vierloch-Sonde E mit Dreiloch-Sonde G3 198
8.6.2.3 Vergleich Vierloch-Sonde B mit Dreiloch-Sonde G3 200
8.6.2.4 Zusammenfassende Bemerkungen zum Vergleich der Sonden für den Gehäusebereich. 200
8.6.3 Vergleich der Sonden für den Nabenbereich 203
8.6.4 Übergangsbereich zwischen Drei- und Vierloch-Sonden 205
8.6.5 Meßergebnisse der Dreiloch-Grenzschichtsonde 209
8.6.6 Vergleich der Ergebnisse der Dreiloch-Sonden an Nabe und Gehäuse im Nennpunkt und an der Stabilitätsgrenze 213
8.6.6.1 Nabenbereich 213
8.6.6.2 Gehäusebereich 215
8.6.7 Vergleich einer stationär messenden Vierloch-Sonde mit der instationär messenden Sechsloch-Sonde 218
8.7 Zusammenfassende Bemerkungen zur Sondenmeßtechnik 221
8.8 Ergebnisse der Strömungsfelduntersuchung 237
8.8.1 Laufrad 1 238
8.8.1.1 Nennpunkt 238
8.8.1.2 Stabilitätsgrenze 245
8.8.2 Leitrad 1 246
8.8.2.1 Nennpunkt 246
8.8.2.2 Stabilitätsgrenze 252
8.8.3 Laufrad 2 252
8.3.3.1 Nennpunkt 252

8.8.3.2 Stabilitätsgrenze 257
8.8.4 Leitrad 2 260
8.8.4.1 Nennpunkt 260
8.8.4.2 Stabilitätsgrenze 267
8.8.5 Laufrad 3 268
8.8.5.1 Nennpunkt 268
8.8.5.2 Stabilitätsgrenze 275
8.9 Variation der Verteilung der Schaufelkranz- und Stufendruckverhältnisse . . 276
8.10 Ergebnisse der Untersuchungen mit instationärer Meßtechnik 278
8.10.1 Instationäre Effekte bei Annäherung an die Stabilitätsgrenze 278
8.10.2 Wandbündige Drucksensoren 280
8.10.3 Sechsloch-Zylindersonde 285
8.10.3.1Laufrad 1 288
8.10.3.2Laufrad 2 294
8.10.3.3Laufrad 3 301
8.10.3.4Zusammenfassende Bemerkungen zur Messung mit der Sechsloch-Zylindersonde 308
8.11 Zusammenfassung der Ergebnisse der Strömungsfelduntersuchung. 312
8.11.1 Laufrad 1 312
8.11.2 Leitrad 1 315
8.11.3 Laufrad 2 316
8.11.4 Leitrad 2 321
8.11.5 Laufrad 3 323
8.11.6 Interpretationen der Ergebnisse der Strömungsfelduntersuchung. . . 325
8.11.6.1Bemerkungen zur Aerodynamik der randzonenoptimierten Axialverdichterbeschaufelung 329
8.11.6.2Meßtechnische Aspekte 337

9 Zusammenfassung, Bewertung der Ergebnisse und Ausblick 339

10 Literaturverzeichnis 358