



Thomas Bubolz (Autor)

Untersuchungen von randzonenkorrigierten Axialverdichterbeschaufelungen mit Strömungs- Meßsonden

Thomas Bubolz

**Untersuchungen
von randzonenkorrigierten
Axialverdichterbeschaufelungen
mit Strömungs-Meßsonden**



 Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/2572>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

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 Profilauffädellungsline	20
2.2.1.1	Geneigte Beschau felungen	21
2.2.1.2	Gepfeilte Beschau felungen	25
2.2.2	Casing-Treatment und Radialspaltkonfigurierung	30
2.2.3	Seitenwandkonturierung	31
2.2.4	Profilnasen	32
2.3	Randzonenkorrigierte Axialverdichterbeschau felungen	33
3	Versuchseinrichtungen und allgemeine Me ßtechnik	38
3.1	Aufbau des Axialverdichterprüfstandes	39
3.2	Der Versuch axialverdichter	41
3.3	Die me ßtechnische 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	Temperaturme ßtechnik	48
3.4	Me ßdatenerfassung	49
3.4.1	Stationäre Me ßgrößen	49
3.4.2	Instationäre Me ßgrößen	50
4	Sonden-Me ßtechnik	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 Sechslloch-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	Auswertalgorithmus zur Berechnung der Strömungsgrößen aus den Meßdaten der Vektorsonden	68
4.2.2	Sechslloch-Zylindersonde	71
4.3	Dynamische Eigenschaften der instationären Druckmeßtechnik	72
4.3.1	Wandbündige Drucksensoren	72
4.3.2	Sechslloch-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 Beschauelungen am dreistufigen Axialverdichter . .	131
6.2	Die Profilmodifikationen der randzonenoptimierten Beschauelung	132
6.2.1	Grundlegende Ansätze bei der Profilmodifikation	132
6.2.2	Die Profilmodifikationen im Detail.	137
6.2.2.1	Lauftrad 1	137
6.2.2.2	Lauftrad 2	140
6.2.2.3	Leitrad 2	144
6.2.2.4	Lauftrad 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 Verdichterbeschaukelung	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 Sechslloch-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
8.8.3.1	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	Lauftrad 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 Sechslloch-Zylindersonde	285
	8.10.3.1 Lauftrad 1	288
	8.10.3.2 Lauftrad 2	294
	8.10.3.3 Lauftrad 3	301
	8.10.3.4 Zusammenfassende Bemerkungen zur Messung mit der Sechslloch-Zylindersonde	308
8.11	Zusammenfassung der Ergebnisse der Strömungsfelduntersuchung	312
	8.11.1 Lauftrad 1	312
	8.11.2 Leitrad 1	315
	8.11.3 Lauftrad 2	316
	8.11.4 Leitrad 2	321
	8.11.5 Lauftrad 3	323
	8.11.6 Interpretationen der Ergebnisse der Strömungsfelduntersuchung ...	325
	8.11.6.1 Bemerkungen zur Aerodynamik der randzonenoptimierten Axialverdichterbeschaufelung	329
	8.11.6.2 Meßtechnische Aspekte	337
9	Zusammenfassung, Bewertung der Ergebnisse und Ausblick	339
10	Literaturverzeichnis	358