

Untersuchungen zum Betriebsverhalten von vielstufigen Axialverdichtern mit Wassereinspritzung

Jan Philipp Schnitzler



Untersuchungen zum Betriebsverhalten von vielstufigen Axialverdichtern mit Wassereinspritzung

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau der
Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Jan Philipp Schnitzler
aus
Hilden

Referent: Prof. Dr.-Ing. F.-K. Benra

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. F. Joos

Tag der mündlichen Prüfung: 18.10.2017

Berichte aus der Strömungstechnik

Jan Philipp Schnitzler

**Untersuchungen zum Betriebsverhalten von
vielstufigen Axialverdichtern mit Wassereinspritzung**

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5735-5

ISSN 0945-2230

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit thematisiert den Nassverdichtungsprozess in vielstufigen Axialverdichtern von Gasturbinen mit Wassereinspritzung. Durch diese Modifikation werden Leistungsreserven aus Gasturbinenanwendungen verfügbar, welche Spitzenlasten bereitstellen sowie die fluktuationsbehafteten Energieeinspeisungen durch regenerative Energien kompensieren. Zusätzlich ergeben sich Potentiale für rekuperativ geführte, hocheffiziente und flexible Gasturbinenprozesse, die auf der Technologie der gezielten Abkühlung des Arbeitsmediums durch eine Wassereinspritzung basieren.

Zielsetzung der Arbeit ist die Entwicklung eines Einspritzsystems, das sich in bestehende strömungsführende Komponenten integrieren lässt. Die Integration einer Düse in die Hinterkante einer Leitschaufel bildet den zentralen Ansatzpunkt des Systems und ermöglicht somit eine sequentielle Einspritzung von Wasser in den Verdichter der Gasturbine mit jeder Leitschaufelreihe.

Anhand grundlegender Experimente wird zunächst die Spraycharakteristik der Zweistrahlndüse als favorisiertes Düsenkonzept unter der Variation von geometrischen Parametern und des Wasservordruckes untersucht. Mittels laseroptischer Messmethoden (PDPA) wird die Spraycharakteristik ermittelt und mit analytischen Auslegungsansätzen verglichen. Die Messergebnisse validieren die Auslegungsansätze und verbessern deren Genauigkeit durch abgeleitete Korrekturfaktoren. Die Messauswertungen zeigen ferner eine Eignung der Zweistrahlndüse als Düsenkonzept für ein integriertes Einspritzsystem hinsichtlich generierter Tropfengröße, Durchflusskapazitäten und Fertigungsaspekten auf. Anhand von drei Demonstrator Leitschaufeln wird die reproduzierbare Herstellbarkeit der Leitschaufel mittels selektiven Laserschmelzens (SLM) und erodierten Düsenbohrungen nachgewiesen.

An weiterführenden Experimenten wird erstmalig die Zweiphasenströmung am Eintritt und am Austritt eines vierstufigen Axialverdichters mit einem Einspritzsystem in der Ansaugleitung während des Nassverdichtungsprozesses mittels konventioneller und laseroptischer Messverfahren (PDPA) untersucht. Die Experimente liefern aerodynamische Kenndaten sowie Kenngrößen der Zweiphasenströmung, welche durch einzelne Mittelungsansätze der Tropfenkennzahlen, flächige Verteilungen sowie Tropfenklassenanalysen für variierende Verdichterbetriebspunkte dargestellt werden. Die Messungen zeigen, dass nur kleinste Tropfen den Verdichter ohne Tropfen-/Wand-Interaktion passieren können, was mit ergänzenden Ergebnissen aus numerischen Studien bekräftigt wird. Ein positiver Einfluss auf die Verdichterkenndaten wird bei Wassermassenanteilen von einem Prozent, aber ein zunehmend negativer Einfluss bei Wassermassenanteilen bis zwei Prozent, festgestellt.

Die Arbeit leistet einen Beitrag zum Verständnis des Nassverdichtungsprozesses in vielstufigen Axialverdichtern und erörtert Ansätze für ein integriertes Einspritzsystem.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Strömungsmaschinen der Universität Duisburg-Essen. Sie basiert auf Untersuchungen, welche innerhalb des Forschungsvorhabens „Effizientere Gasturbinenprozesse mit Luftkühlung durch Wassereinspritzung“ und im Anschluss daran durchgeführt wurden. Das Forschungsvorhaben wurde finanziell durch das BMWi unter der Kennziffer 0327861 gefördert und entstand in Kooperation mit der Siemens AG.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Friedrich-Karl Benra für das entgegengebrachte Vertrauen und der Übetragung der Projektleitung, für die vielfältige Unterstützung bei der Projektabwicklung in fachlicher und persönlicher Hinsicht sowie für die Betreuung der Doktorarbeit. Gleichfalls möchte ich mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. Franz Joos für die Übernahme des Korreferats bedanken. Herrn Dr.-Ing. Hans Josef Dohmen möchte ich für die entgegengebrachte Unterstützung, für die stetige Hilfsbereitschaft sowie für das freundliche Arbeitsklima danken.

Stellvertretend für viele möchte ich Herrn Dr.-Ing. Klaus Werner, Herrn Dr.-Ing. Tjark Eisfeld, Herrn Jan Dirk Beiler, Herrn Michael Schwarz und Herrn Ulrich Knörr auf Seiten der Firma Siemens AG meinen Dank für die Unterstützung und das kollegiale Arbeitsklima in diesem Projekt entgegenbringen.

Meinen besonderen Dank möchte ich ferner den weiteren Kollegen am Lehrstuhl für Strömungsmaschinen ausdrücken. Für das Engagement und die Teamarbeit mit Herrn Detlev Weniger beim Aufbau und der Inbetriebnahme der Prüfstände sowie dem maßgeblichen Mitwirken durch Herrn Stefan Clauss bei der Konstruktion des Axialverdichters bin ich sehr dankbar. Die Unterstützung auf fachlicher und persönlicher Ebene hat maßgeblich zum Gelingen des Projekts beigetragen. Weiterhin möchte ich Frau Inez von Deschwanden, Herrn Botond Barabas, Herrn Alexander Kefalas, Herrn Bastian Dolle für die Mithilfe im Projekt sowie Frau Silke Motz für die zuverlässige Übernahme administrativer Tätigkeiten danken. Jeder Einzelne hat zu einer motivierenden, einzigartigen und unvergesslichen Atmosphäre am Lehrstuhl beigetragen, die mich mit großer Freude auf die Zeit zurückblicken lässt. Dies gilt insbesondere für Michael Rabs, der immer ein inspirierender Begleiter auf Konferenzen war.

Abschließend und mit besonderem Nachdruck möchte ich ganz herzlich meiner Familie und meiner Freundin für die immerwährende Unterstützung auf meinem Lebensweg, für die aufbauenden Worte und Taten sowie für den Rückhalt in einer herausfordernden Zeit danken.

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	A
VORWORT	C
INHALTSVERZEICHNIS	I
DEFINITIONEN UND NOMENKLATUR	III
1 EINLEITUNG	1
1.1 DIE STRUKTUR DER VORLIEGENDEN ARBEIT	5
2 STAND DES WISSENS	7
2.1 STAND DER TECHNIK UND AKTUELLE FORSCHUNGSGEBIETE.....	7
2.2 KREISPROZESSE MIT ZWISCHENKÜHLUNG	11
2.3 AKTUELLE FORSCHUNG	14
2.3.1 <i>ID-Berechnungsmethoden</i>	14
2.3.2 <i>Stromlinienkrümmungsverfahren und numerische 3D-CFD Methoden</i>	17
2.3.3 <i>Experimentelle Arbeiten</i>	19
2.4 PATENTRECHERCHE.....	25
3 THERMODYNAMISCHE UND PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN	27
3.1 THERMODYNAMISCHE BETRACHTUNG VON KREISPROZESSEN	27
3.1.1 <i>Stoffdaten</i>	27
3.1.2 <i>Wirkungsgraddefinitionen und spezifische Nutzarbeit</i>	29
3.1.3 <i>Berechnungsmodule der Hauptgasturbinenkomponenten</i>	32
3.1.4 <i>Prozessberechnungen der Gasturbine ohne und mit Wassereinspritzung</i>	42
3.2 TROPFENGRÖßENANALYSE VON SPRAYS UND KENNZAHLEN	46
3.2.1 <i>Laserbasierte Messtechnik</i>	46
3.2.2 <i>Graphische Darstellung von Tropfenanalysen</i>	47
3.2.3 <i>Zeitkonsistenz von räumlichen Tropfenmessungen</i>	50
3.2.4 <i>Kennzahlen von Aerosolen und Ähnlichkeitskennzahlen</i>	52
4 THEORETISCHE UND EXPERIMENTELLE ANALYSE DER DOPPELSTRAHLDÜSE	57
4.1 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DER DOPPELSTRAHLDÜSE MITTELS DÜSENLANZE	71
4.1.1 <i>Prüfstandsaufbau und Messprozedur</i>	71
4.1.2 <i>Messergebnisse und Validierung der analytischen Korrelationen</i>	74
5 NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN AM AXIALVERDICHTER	95
5.1 AERODYNAMISCHE AUSLEGUNGSPARAMETER DER VERDICHTERBESCHAUFELUNG	95
5.2 NUMERISCHES SIMULATIONSGBIET UND TROCKENES VERDICHTERKENNFELD	98
5.3 TROPFEN-/ WAND-INTERAKTION UND TROPFENABSCHIEDUNG	102
6 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AM AXIALVERDICHTER	107
6.1 PRÜFSTANDSAUFBAU UND MESSTECHNIK	107
6.1.1 <i>Einspritzsystem für Wasser in der Ansaugleitung</i>	112
6.1.2 <i>Konventionelle Messtechnik und Kenndaten-Evaluierung</i>	113
6.1.3 <i>Laserbasierte Messtechnik</i>	116

6.2	MESSUNGEN UND MESSERGEBNISSE	119
6.2.1	<i>Fahrweise und Betriebspunkte der Testserie</i>	<i>119</i>
6.2.2	<i>Trockenes Kennfeld.....</i>	<i>121</i>
6.2.3	<i>Betriebsbedingungen mit Wassereinspritzung</i>	<i>124</i>
6.2.4	<i>Laserbasierte Messergebnisse</i>	<i>135</i>
7	INTEGRALES WET COMPRESSION-SYSTEM.....	159
7.1	LEITRADBESCHAUFELUNG MIT INTEGRIERTER DÜSE.....	161
7.1.1	<i>Konstruktion und Fertigungsprozess der Leitschaufel.....</i>	<i>162</i>
7.1.2	<i>Reproduzierbarkeit des Fertigungsprozesses und der Düsencharakteristik</i>	<i>169</i>
8	RESÜMEE UND AUSBLICK.....	181
	LITERATURVERZEICHNIS.....	187
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	206
	TABELLENVERZEICHNIS.....	211
	ANHANG PATENTKLASSEN.....	212
	CURRICULUM VITAE	216