Entwicklung und Erprobung eines optischen Messsystems zur Untersuchung von instationären Nässephänomenen in Düsen und Dampfturbinen

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Timo Eberle

aus Weinheim

Hauptberichter: Prof. Tekn. Dr. Damian Vogt

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Weigand

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Oktober 2016

Institut für Thermische Strömungsmaschinen
und Maschinenlaboratorium der Universität Stuttgart

2016

Berichte aus der Strömungstechnik

Timo Eberle

**Entwicklung und Erprobung eines optischen
Messsystems zur Untersuchung von instationären
Nässephänomenen in Düsen und Dampfturbinen**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4965-7

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

"Über allen Gipfeln ist Ruh'..."

*Für
Paul und Peter*

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium der Universität Stuttgart.

Meinem Doktorvater Herrn Professor Tekn. Dr. D. Vogt sowie seinem Vorgänger als Institutsleiter, Herrn Professor M. Casey, D. Phil., möchte ich herzlich für die Ermöglichung dieser Arbeit und das entgegengebrachte Vertrauen danken. Herrn Professor Dr.-Ing. habil. B. Weigand danke ich für die freundliche Übernahme des Mitberichts.

Ein ganz besonderer Dank gilt dem Leiter der Abteilung Thermische Strömungsmaschinen und Thermische Kraftwerke Herrn Dr.-Ing. Markus Schatz, der mich an seinem enormen Fachwissen teilhaben ließ und mich durch unzählige fachliche wie persönliche Diskussionen und Anregungen stets geduldig unterstützt hat.

Herrn Dr.-Ing. Thomas Polklas von MAN Diesel & Turbo SE in Oberhausen danke ich für die Möglichkeit, die instationäre Nässemesstechnik an einer F&E-Industriedampfturbine zu erproben und die Daten zu veröffentlichen.

Meinen langjährigen Kollegen Markus Häfele und Fabian Müller danke ich sehr herzlich für die hervorragende Zusammenarbeit und die stets sehr heitere Stimmung im Nässe-/ Endstufenzimmer. Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen wissenschaftlichen Mitarbeitern, die mich über die Jahre am ITSM begleitet haben. Die überaus gute und freundschaftliche Atmosphäre habe ich immer sehr geschätzt.

Weiterhin gilt mein Dank allen Institutsmitarbeitern und Studenten, die durch ihre tatkräftige Mitarbeit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Vor allem bei Martin Brausewetter möchte ich mich herzlich bedanken. Ohne sein Engagement wäre ein Großteil meiner experimentellen Arbeit nicht möglich gewesen.

Nicht zuletzt danke ich meiner Frau Eva sowie meinen Söhnen Marius und Janosch für ihre Geduld während der vielen Wochenenden, an denen sie auf mich verzichten mussten.

Wald-Michelbach, Januar 2016

Timo Eberle

Kurzfassung

Am ITSM werden Nässemessungen in ND-Dampfturbinen auf Basis der Lichtextinktionsmethode durchgeführt. Mit dieser optischen Messmethode ist es möglich, das Tropfengrößenspektrum sowie die Anzahlkonzentration in der Nassdampfströmung zu bestimmen. Die Messergebnisse werden vor allem für die Validierung von numerischen Berechnungsmodellen, die zur Beschreibung von Ungleichgewichts-Kondensation entwickelt wurden, benötigt. Bevor diese physikalischen Modelle jedoch für die Berechnung von kondensierenden Turbinenströmungen eingesetzt werden, werden sie zunächst an zweidimensionalen Düsenströmungen überprüft.

In Düsen kommt es zu selbsterregtem periodischem Strömungs- und somit Kondensationverhalten, wenn der Dampf mit nur geringer Überhitzung in die Düse eintritt. Es wird angenommen, dass auch in Dampfturbinen die Kondensationszone, durch den Temperaturunterschied zwischen Kern- und Nachlaufströmung, keine stabile Lage findet und innerhalb des Schaufelkanals (fremderregt) oszilliert. Beide instationären Kondensationsabläufe sorgen dafür, dass es zu zeitlichen Nässeschwankungen und somit zur Schwankung der Tropfengröße und der Tropfenanzahl kommt.

Bisher ist kein Messsystem verfügbar, mit dem zeitliche Tropfengrößenschwankungen gemessen werden können. Die vorliegende Arbeit hat sich daher zum Ziel gesetzt, ein optisches Messsystem auf Basis der Lichtextinktionsmethode zu entwickeln, mit dem es möglich sein soll, instationäre Nässemessungen in Düsen und Dampfturbinen durchzuführen.

Im ersten Teil werden die thermodynamischen und strömungsmechanischen Grundlagen des instationären Kondensationsprozesses von Wasserdampf in Düsen und Dampfturbinen beschrieben und daraus die Anforderungen an das Messsystem abgeleitet. Im Anschluss wird die Messmethode beschrieben und verschiedene Auswertemethoden zur Berechnung des Tropfengrößenspektrums aus der gemessenen Extinktion vorgestellt, an generierten Messdaten erprobt und der Einfluss von rauschbehafteten Messsignalen auf das Berechnungsergebnis abgeschätzt.

Der zweite Teil behandelt die Auslegung und Umsetzung der Hauptkomponenten Lichtquelle und Spektrometer und die Erprobung bzw. Validierung des Gesamtsystems mit Labormessungen. Im letzten Teil der Arbeit wird das Messsystem sowohl an einem dampfbetriebenen Düsenkanal als auch an einer Industriedampfturbine erprobt und die Messergebnisse detailliert vorgestellt.

Mit dem neuentwickelten optischen Messsystem liegt nun ein Gerät vor, mit dem instationäre Kondensationsvorgänge sowohl in Düsen als auch in Dampfturbinen zeitaufgelöst untersucht werden können.

Abstract

For measuring the mass fraction of condensed water in steam turbines, an optical method based on light extinction is used at the ITSM. This method enables the determination of droplet size spectra as well as the number concentrations in wet steam flows. The measurements are used to validate the numerical models, which are developed to describe the non-equilibrium condensation process. However, before the models are applied to condensing turbine flows, calculations of two-dimensional nozzle flows are used first to prove their general suitability.

When the steam at the entrance of a nozzle is at almost saturation condition, the subsequent condensation process shows an unsteady periodic and self-excited behaviour. A similar but separately excited condensation behaviour is assumed for turbine flows. In this case, the periodic temperature fluctuations between wake and core flow move the condensation zone up- and downstream within the blade passages. Both phenomena are finally generating fluctuations in the droplet sizes and thus wetness fraction.

Up to now, there is no measuring system available, with which it is possible to determine droplet size fluctuations with a high time resolution. The objective of the present work is the development and testing of an optical measurement system based on the light extinction method in order to carry out unsteady wetness measurements in nozzles and steam turbines.

In the first part, the thermo- and flowdynamic fundamentals of the unsteady condensation process of steam are described and used to derive terms of reference for the optical system. Subsequently, the measuring method is described and different evaluation methods in order to calculate the droplet sizes from extinction data are presented. The methods are validated using theoretical data and the influence of signal noise on the calculated droplet sizes was estimated.

In the second part, the two main components of the measuring system (light source and spectrometer) are designed and implemented and the overall system is tested and validated with laboratory measurements. Furthermore, the new optical measurement system is tested under real conditions in a specifically designed steam driven nozzle channel as well as in an industrial steam turbine and the time-resolved results are presented in detail.

It could be successfully shown, that the new optical system meets the requirements for investigating unsteady condensation phenomena in nozzles and steam turbines.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	v
Kurzfassung	vii
Abstract	ix
Nomenklatur	xiii
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung	7
2.1 Experimentelle Untersuchungen in Laval-Düsen	7
3 Theorie der Tropfenbildung	25
3.1 Unterkühlung und Keimbildung	25
3.2 Zustandsverläufe kondensierender Strömungen	32
3.2.1 Selbst- und fremderregte Strömungsfuktuationen	35
4 Lichtextinktionsmethode zur Bestimmung der Dampfneße	45
4.1 Grundlagen und Messaufbau	46
4.2 Methoden zur Auswertung der Extinktionsdaten	50
4.2.1 Matrixinversion	53
4.2.2 Vergleichsverfahren	55
4.2.3 Graphisches Lösungsverfahren	59
4.3 Testauswertung von generierten Messwerten	62
4.4 Fehlerabschätzung und Grenzen der Auswertemethoden	63
4.5 Zusammenfassung zur Lichtextinktionsmethode	72
5 Optisches Messsystem für zeitaufgelöste Nässemessungen	75
5.1 Anforderungen	75
5.2 Konzeption und Auslegung	80

5.3	Validierung	87
5.3.1	Ansprechverhalten und Signalqualität	87
5.3.2	Partikelmessungen	93
5.4	Zusammenfassung zum optischen Messsystem	95
6	Dampfbetriebene Düsenmessstrecke	97
6.1	Aufbau und Instrumentierung	97
6.2	Qualifikation	101
6.3	Messergebnisse	108
6.3.1	Druck- und Tropfengrößenverläufe	110
6.3.2	Analyse der zeitaufgelösten Messdaten	124
6.4	Zusammenfassung zur Düsenmessstrecke	128
7	Näsemessungen an einer Industriedampfturbine	131
7.1	Analyse der zeitaufgelösten Messdaten	133
7.2	Tropfengröße und -anzahlkonzentration	137
7.3	Vergleich mit stationären Messergebnissen	142
7.4	Zusammenfassung der Turbinenmessungen	147
8	Zusammenfassung	151
	Literaturverzeichnis	155
A	Verteilungsfunktionen der Auswerteverfahren	165
B	Ergebnisse der Partikelmessungen	169
C	Messergebnisse der BaI-Düse	173
D	Ergebnisse der Turbinenmessung für Traverse 2	179