VDI

REIHE 08
MESS-,
STEUERUNGS-
UND REGELUNGS-
TECHNIK

Fortschritt-Berichte VDI

Dr.-Ing. Wieland Uffrecht,
Dresden

NR. 1273

Meßtechnik für Messungen an Maschinenstrukturen in schneller Bewegung

BAND
1|1

VOLUME
1|1

https://doi.org/10.51202/9783186273086-I
Generiert durch IP '18.221.59.245', am 19.05.2024, 10:42:52.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

https://doi.org/10.51202/9783186273086-I
Generiert durch IP '18.221.59.245', am 19.05.2024, 10:42:52.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

Meßtechnik für Messungen an Maschinenstrukturen in schneller Bewegung

Von der Fakultät Maschinenwesen
der
Technischen Universität Dresden

zur
Erlangung des akademischen Grades eines
habilitierten Doktors
angenommene Habilitationsschrift

Dr.-Ing. Wieland Uffrecht
geb. am 17.03.1972 in Dresden

Tag der Einreichung: 13.03.2019

Vollzug der Habilitation: 18.12.2019

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Stefan Odenbach
Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle
Dr.-Ing. habil. Alexander Wiedermann

Vorsitzender der Habilitationskommission: Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Wallmersperger

https://doi.org/10.51202/9783186273086-I
Generiert durch IP '18.221.59.245', am 19.05.2024, 10:42:52.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

https://doi.org/10.51202/9783186273086-I
Generiert durch IP '18.221.59.245', am 19.05.2024, 10:42:52.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

VDI

REIHE 08
MESS-,
STEUERUNGS-
UND REGELUNGS-
TECHNIK

Fortschritt-Berichte VDI

Dr.-Ing. Wieland Uffrecht,
Dresden

NR. 1273

Meßtechnik für Messungen an Maschinenstrukturen in schneller Bewegung

BAND
1|1

VOLUME
1|1

VDI verlag

https://doi.org/10.51202/9783186273086-I
Generiert durch IP '18.221.59.245', am 19.05.2024, 10:42:52.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

VDI verlag

Uffrecht, Wieland

Meßtechnik für Messungen an Maschinenstrukturen in schneller Bewegung

Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 08, Nr. 1273. Düsseldorf: VDI Verlag 2021.

138 Seiten, 119 Bilder, 6 Tabellen.

ISBN 978-3-18-527308-7, ISSN 0178-9546

52,00 EUR/VDI-Mitgliederpreis: 46,80 EUR

Für die Dokumentation: Meßtechnik – Telemetrie – Telemetriesysteme – Messung an bewegten Maschinenteilen – Strömung – Wärmeübergang – thermische Energiemaschinen – Gasturbinen

Keywords: Measurement technology – Telemetry – Telemetry systems – Measurement on moving machine parts – Flow – Heat transfer – Thermal energy machines – Gas turbines

Die vorliegende Arbeit systematisiert den technischen Aufwand für telemetrische Messungen an bewegten Maschinenteilen. Schwerpunkt ist der Teil einer Meßkette, der wegen der Relativbewegung der Maschinenteile zueinander zusätzlich entsteht. Die technische Realisierung notwendiger Trennstellen muß den Hilfsenergietransport zur Meßstelle hin sowie den Meßwerttransfer in entgegengesetzte Richtung entlang der Meßkette gewährleisten. Dabei sind im Übertragungsbereich ablaufende Bewegungen, die Übertragung von Hilfsenergie und Meßdaten sowie Positionen erforderlicher Trennstellen in der Meßkette maßgebliche Kriterien für die Lösung der Meßaufgaben. Dieser Systematisierung folgend, präsentiert die Arbeit ausgewählte Ergebnisse von Meßaufbauten für Entwicklungsarbeiten an thermischen Energiemaschinen – vornehmlich für Sekundärluftsysteme von Gasturbinen. Die mit unterschiedlicher Auflösung telemetrisch bereitzustellenden Meßdaten werden für relevante Größen wie Druck, Schalldruck, Temperatur, Wärmeübergang nebst Strömungsgeschwindigkeiten und Stoffaustausch ausgewertet.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek (German National Library)
The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

© VDI Verlag GmbH | Düsseldorf 2021
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten. Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.
ISBN 978-3-18-527308-7, ISSN 0178-9546
https://doi.org/10.51202/9783186273086-I
Generiert durch IP '18.221.59.245', am 19.05.2024, 10:42:52.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner bis heute andauernden Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am *Maschinenlabor* der Technischen Universität Dresden, zunächst am Lehrstuhl für Meß- und Automatisierungstechnik unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Erwin Kaiser, sowie nach Berufung seines Nachfolgers Herrn Prof. Dr. Stefan Odenbach am Lehrstuhl für Magnetofluiddynamik, Meß- und Automatisierungstechnik.

An dieser Stelle bedanke ich mich bei allen, die aktiv oder gewährend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Zuvorderst steht hier Herr Prof. Erwin Kaiser – ist er doch mein Doktorvater und auch erster Motivationsgeber für eine Habilitationsschrift und damit ebenso Urheber maßgeblicher Voraussetzungen für ein derartiges Vorhaben. Sein Interesse für die bearbeiteten Inhalte reicht weit über seine Emeritierung bis in die Gegenwart und ist beständiges Reflexionsmedium sowie Rat zu allen aufkommenden Fragen. Dieser Position keinesfalls nachrangig, ist Herr Prof. Stefan Odenbach zu nennen, denn er ermöglichte und beförderte als langjähriger, aktueller Leiter der Struktureinheit das Gelingen dieser Schrift. Nur mit vereinten Motivationskräften generierten beide das für die Fertigstellung dieser Arbeit erforderliche Maß an Ermutigung zum Konzentrieren und Dokumentieren der Inhalte. Auch bei der Einwerbung notwendiger Drittmittel standen beide fachinhaltlich sowie motivierend Pate und sorgten somit für wesentliche Voraussetzungen des hiermit abgeschlossenen Vorhabens. Ein großes Dankeschön geht an beide.

Das in der Konstellation gebildete Spannungsfeld aus wichtiger Wahrung fachlicher Kontinuität einerseits und notwendiger endgültiger Ankunft in bundesrepublikanischer Drittmittelforschungswirklichkeit andererseits bot Bewährungsmomente, bei denen die Industriepartner *MAN*, *MTU*, *GE* sowie *Siemens* für die notwendige Bewegungsfreiheit sorgten, jene angespannte Situation aufzulösen. Die fachliche Forschungslinie konnte dadurch – mitgetragen von einer Gruppe emsiger Doktoranden – der Struktureinheit erhalten werden. Ein aufrichtiger Dank geht an die genannten Industriepartner für das Interesse an den Inhalten sowie für das Engagement in gemeinsamen interessanten Forschungsvorhaben.

Dankende Grüße sende ich von hier zudem an Herrn Prof. Dr. Alexander Wiedermann und an Herrn Prof. Dr. Martin Böhle für die freundliche Übernahme der notwendigen weiteren Gutachten zum Abschluß des Habilitationsverfahrens.

Meinen aktuellen sowie ehemaligen Kollegen vom Maschinenlabor und insbesondere den Doktoranden der Gruppe sei ebenfalls gedankt. Haben sie doch in Summe zur Bewerkstelligung aller experimentellen Arbeiten in maßgeblichem Umfang beigetragen. Schlußendlich sind nicht alle Inhalte, die Dank der Mithilfe zur Zeit der Einreichung vorlagen, in die Arbeit eingeflossen. Sie mögen mir die ungleiche Auswahl der Inhalte verzeihen. Hervorzuheben ist an dieser Stelle der über seine längst beendete Dienstzeit hinaus wirkende Fundus an Konstruktionen unseres letzten Konstrukteurs Herrn Heinz Kluttig, der für junge Kollegen immer wieder Ausgangspunkt und Anregung für aktuelle konstruktive Auslegungen ist.

Auch den Mitarbeitern vom Werkstattverbund der Technischen Universität Dresden möchte ich meinen Dank aussprechen. Sie haben in fundamental maßgeblicher Weise das Gelingen der experimentellen Arbeiten abgesichert bzw. ermöglicht. Ihre Erfahrung sowie Ihr konstruktiv fertigungstechnisches Mitdenken, sind Sicherheit sowie doppelter Boden für die Konstruktionen junger Aspiranten, auf denen die experimentelle Forschung im Maschinenbau in der aktuellen Hochschullandschaft infolge irriger Mittelbaupolitik nun allein beruhen muß.

Einen Gruß richte ich von hier aus an die Familie – hat sie doch die ursächlichen Voraussetzungen geschaffen. Ausgehend von den Eltern, die Elektrotechnik und Physik bzw. Ingenieurökonomie Maschinenbau studierten, sind zudem der Großvater mit dem Fach Maschinenbau sowie der Onkel

https://doi.org/10.51202/9783186273086-I
Generiert durch IP '18.221.59.245', am 19.05.2024, 10:42:52.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

mit Experimentalphysik und seiner Tätigkeit im Fernmeldewesen als Einflüsse zu nennen. Möglicherweise hatte die Lage in der späten DDR zur Folge, daß diese Fachlichkeiten ausstrahlten beim Ausgleich der Mangelsituation und dem Sproß das Verständnis technischer Funktionalität nebst Selbsthilfebefähigung als zwingend erforderlich erscheinen mußte. Mindestens förderte die Familie mein technisches Interesse zeitig und interdisziplinär, was ganz sicher dieser Arbeit zugute kam – vielen Dank dafür.

Nun noch ein Wort an eventuelle Leser, wenngleich mir bewußt ist, daß deren Anzahl überschaubar bleibt, da Monographien im ingenieurwissenschaftlichen Bereich selten großes Publikum erzielen, und diese Arbeit ganz gewiß nicht davon abweicht. Sie berichtet überblicksartig und führt Ergebnisse einzelner Forschungsaktivitäten im Detail aus. Sie ist *keinesfalls* als *Nachbauanleitung* für Telemetriesysteme oder Teile davon gedacht. Eine Ausnahme davon bildet lediglich Bild 5 in Abschnitt 3.2.3 „Aktive analoge Technik“, das den bewegten Systemanteil eines zweikanaligen analogen Telemetriesystems zeigt und darüber hinaus geeignet ist, meinen Kindern Aila und Alrik Uffrecht erste prinzipielle Einblicke in die Meßtechnik zu geben. Die Tochter realisierte jene Schaltung, um eine Temperaturmessung an zwei Laufschaufeln ihrer Weihnachtspyramide zu ermöglichen.

Freital, den 05.01. 2021

Wieland Uffrecht

https://doi.org/10.51202/9783186273086-I
Generiert durch IP '18.221.59.245', am 19.05.2024, 10:42:52.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort ... **III**

Inhaltsverzeichnis ... **V**

Kurzfassung ... **VII**

Abstract ... **VIII**

1 Motivation und Abgrenzung ... **1**

2 Einführung ... **2**

2.1 Grundaufbau einer Meßkette ... *3*

2.2 Übergang zur Messung an bewegten Maschinenteilen ... *4*

2.3 Begriff Telemetrie ... *5*

3 Systematisierung ... **7**

3.1 Bewegung und Übertragung ... *9*
3.1.1 Bewegung ... 9
3.1.2 Übertragung ... 12

3.2 Anordnung der Trennstelle ... *17*
3.2.1 Meßeffekt im bewegten System ... 18
3.2.2 Passive Technik ... 19
3.2.3 Aktive analoge Technik ... 21
3.2.4 Digitalisierung in der Trennstelle ... 23
3.2.5 Aktive digitale Technik ... 24
3.2.6 Digitale Technik mit Zwischenspeicher ... 26

3.3 Weitere Aspekte ... *28*
3.3.1 Meßaufgabe und -verfahren ... 28
3.3.2 Belastung ... 29
3.3.3 Aufbau ... 30

3.4 Realisierung von Meßaufbauten an bewegten Maschinenteilen ... *31*

3.5 Zusammenfassung ... *34*

4 Meßeffekt und passive Technik im bewegten System ... **35**

4.1 Messungen mit 2D-LDA in einer rotierenden Kammer ... *37*
4.1.1 Meßaufbau und Auswertung ... 37
4.1.2 Ergebnisse für drallarme axiale Zuströmung zu K2, radiale Ausströmung K1 ... 40
4.1.3 Ergebnisse für radiale Zuströmung Kammer 1 und axiale Ausströmung Kammer 2 ... 46
4.1.4 Zusammenfassung ... 48

4.2 Wandtemperatur einer rotierenden Kammer gemessen anhand der Farbreaktion von Flüssigkristallen ... *49*
4.2.1 Meßaufbau ... 49
4.2.2 Auswertung ... 50
4.2.3 Auswertung instationärer Effekte ... 54
4.2.4 Ergebnis und Zusammenfassung ... 56

4.3 Bestimmung der Luftwechselzahl in einer rotierenden Kammer unter Verwendung von Zigarettenrauch ... *57*
4.3.1 Meßaufbau ... 58

https://doi.org/10.51202/9783186273086-I
Generiert durch IP '18.221.59.245', am 19.05.2024, 10:42:52.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

4.3.2 Luftwechselzahl ... 59
4.3.3 Auswertung ... 60
4.3.4 Ergebnis und Zusammenfassung ... 62

4.4 Einordnung ... 65

5 Messungen mit Telemetriesystem ... 67

5.1 Prinzipieller Aufbau eines digitalen Telemetriesystems ... 67

5.2 Kalibrierung der Druckmeßtechnik ... 69
5.2.1 Druckzuleitung zum Sensor unter Fliehkrafteinfluß ... 69
5.2.2 Drucksensormembran im Fliehkraftfeld ... 71
5.2.3 Rotierende Drucksensorkalibrierung ... 72
5.2.4 Zusammenfassung ... 73

5.3 Strömung in rotierender radial durchströmter Kammer ... 74
5.3.1 Kernrotationsverhältnis β ... 74
5.3.2 Eindimensionales Modell ... 76
5.3.3 Experimentelle Untersuchungen zum Kernrotationsverhältnis β ... 80
5.3.4 Ergebnis ... 82
5.3.5 Wertung ... 86
5.3.6 Zusammenfassung ... 86

5.4 Einordnung ... 87

6 Messungen mit komplexem Telemetriesystem ... 88

6.1 Prinzipieller Aufbau eines digitalen Telemetriesystems mit Zwischenspeicher ... 88

6.2 Akustische Messungen im rotierenden Ringraum ... 90

6.3 Wärmeübergangskoeffizientensensor für telemetrische Anwendungen ... 96
6.3.1 Literatursicht ... 96
6.3.2 Anordnung zur Messung von Wärmeübergangskoeffizienten ... 99
6.3.3 Erprobung an längsangeströmter Platte ... 102
6.3.4 Auswertung ... 104
6.3.5 Ergebnis ... 106

6.4 Rotierende Scheibe ... 107
6.4.1 Instrumentierung ... 107
6.4.2 Kalibrierung in der Längsplatte ... 109
6.4.3 Messungen an der freien Scheibe ... 110
6.4.4 Messungen am offenen Rotor-Stator-System ... 114
6.4.5 Ergebnis ... 116

6.5 Einordnung ... 117

7 Zusammenfassung ... 118

Literaturverzeichnis ... 121

Zitierte, vom Autor betreute akademische Abschlußarbeiten ... 126

Zitierte Berichte ... 126

Veröffentlichungen mit eigener Beteiligung ... 127

https://doi.org/10.51202/9783186273086-I
Generiert durch IP '18.221.59.245', am 19.05.2024, 10:42:52.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit systematisiert den technischen Aufwand für telemetrische Messungen an bewegten Maschinenteilen. Schwerpunkt ist der Teil einer Meßkette, der wegen der Relativbewegung der Maschinenteile zueinander zusätzlich entsteht. Die technische Realisierung notwendiger Trennstellen muß den Hilfsenergietransport zur Meßstelle hin sowie den Meßwerttransfer in entgegengesetzte Richtung entlang der Meßkette gewährleisten. Dabei sind im Übertragungsbereich ablaufende Bewegungen, die Übertragung von Hilfsenergie und Meßdaten sowie Positionen erforderlicher Trennstellen in der Meßkette maßgebliche Kriterien für die Lösung der Meßaufgaben. Dieser Systematisierung folgend, präsentiert die Arbeit ausgewählte Ergebnisse von Meßaufbauten für Entwicklungsarbeiten an thermischen Energiemaschinen – vornehmlich für Sekundärluftsysteme von Gasturbinen. Die mit unterschiedlicher Auflösung telemetrisch bereitzustellenden Meßdaten werden für relevante Größen wie Druck, Schalldruck, Temperatur, Wärmeübergang nebst Strömungsgeschwindigkeiten und Stoffaustausch ausgewertet.

https://doi.org/10.51202/9783186273086-I
Generiert durch IP '18.221.59.245', am 19.05.2024, 10:42:52.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

Abstract

This thesis systematises the technical effort for telemetric measurements on moving machine parts. The focus is on the part of a measurement chain that is additionally created due to the relative movement of the machine parts to each other. The technical realisation of necessary separation points must guarantee the auxiliary energy transport to the measuring point as well as the measurement data transfer in the opposite direction along the measuring chain. Movements occurring in the transmission range, the transmission of auxiliary energy and measured data as well as the positions of necessary separation points in the measuring chain are decisive criteria for the solution of the measuring tasks. Following this systematisation, the thesis presents selected results of measurement set-ups for development work on thermal energy machines - primarily for secondary air systems of gas turbines. The measurement data to be provided telemetrically with different resolutions are evaluated for relevant variables such as pressure, sound pressure, temperature, heat transfer together with flow velocities and mass transfer.

https://doi.org/10.51202/9783186273086-I
Generiert durch IP '18.221.59.245', am 19.05.2024, 10:42:52.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.