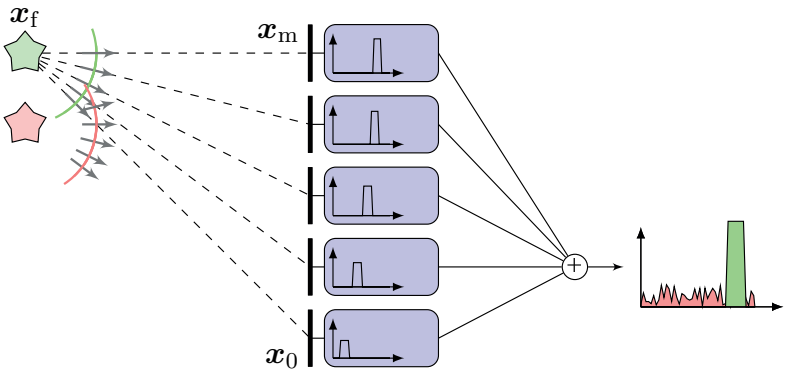
Dresdner Berichte zur Messsystemtechnik

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Czarske

13

Richard Nauber

# Untersuchung bildgebender Ultraschallmesstechnik für instationäre Strömungsvorgänge in der Magnetohydrodynamik




SHAKER VERLAG

MST
Professur für
Mess- und Sensorsystemtechnik

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

**Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik** Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik

# Untersuchung bildgebender Ultraschallmesstechnik für instationäre Strömungsvorgänge in der Magnetohydrodynamik

Richard Nauber

## Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

## Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

Vorsitzende:
Prof. Dr. rer. nat. et Ing. habil. Kühnicke

Gutachter:
Prof. Dr.-Ing. habil. Czarske
Prof. Dr.-Ing. Henning
Prof. Dr.-Ing. habil. Hampel

Eingereicht am: 07.08.2018
Verteidigt am: 16.02.2018

Dresdner Berichte zur Messsystemtechnik

Band 13

**Richard Nauber**

# Untersuchung bildgebender Ultraschallmesstechnik für instationäre Strömungsvorgänge in der Magnetohydrodynamik

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.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2018

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 978-3-8440-6387-5
ISSN 1866-5519

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

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

**Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik** Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik

## Zusammenfassung

Bei einer Reihe bedeutsamer industrieller Prozesse, wie dem Stahl-Strangguss oder der Kristallzucht für die Photovoltaik, ist die Strömung flüssiger Metalle oder Halbleiter entscheidend für den Energieaufwand bei der Herstellung und die Qualität des Endproduktes. Eine gezielte, berührungslose Einwirkung von Lorentzkräften auf die heißen Schmelzen kann dabei die Ressourceneffizienz eines Prozesses signifikant steigern. Die komplexe Interaktion von elektrisch leitfähigen Fluiden und magnetischen Wechselfeldern wird dazu in der Magnetohydrodynamik (MHD) durch Experimente im Labormaßstab an niedrigschmelzenden Metallen untersucht. Die dabei auftretenden instationären, dreidimensionalen Strömungsfelder erfordern eine nicht-invasive, bildgebende Strömungsmesstechnik für opake Fluide mit hoher Orts- und Zeitauflösung, welche derzeitig nicht für die MHD zur Verfügung steht.

Im Rahmen dieser Arbeit soll mit den Mitteln der Elektrotechnik eine für MHD-Modellexperimente geeignete Messtechnik basierend auf dem Ultraschall-Doppler-Prinzip geschaffen werden. Dabei wird der Ansatz verfolgt, die Komplexität eines Messsystems vom mechanischen Aufbau hin zur Rechentechnik zu verlagern, um durch die dort in jüngster Zeit verfügbaren Ressourcen neuartige Signalverarbeitungsmethoden und eine höhere Flexibilität zu ermöglichen. Mit dem Ultrasound Array Doppler Velocimeter (UADV) wurde ein flexibles Messsystem für MHD-Modellexperimente geschaffen, welches eine mehrkomponentige Mehrebenenmessung durch Sensordatenfusion von bis zu neun linearen Wandlerarrays im kombinierten Zeit- und Ortsmultiplex erreicht. Die Signalverarbeitung ist durch eine auf einem Field Programmable Gate Array implementierte Datenkompression onlinefähig. Sie reicht trotz geringer rechentechnischer Komplexität bis auf Faktor $3$ an die fundamentale Grenze der Messunsicherheit, die Cramér-Rao-Schranke, heran. Das UADV wurde über ein Kalibrierexperiment mit interferometrischer Referenzmessung auf die SI-Einheiten zurückgeführt.

Das UADV wurde an einer magnetfeldgetriebenen Strömung in einem kubischen Gefäß angewandt. Numerische Simulationen sagen dort nicht-deterministisch einsetzende Instabilitäten im Übergangsbereich des laminaren zum turbulenten Strömungsregimes vorher. Durch eine simultane Zweiebenenmessung mit hoher örtlicher (3 … 5 mm) und zeitlicher Auflösung (Bildrate 11,2 Hz) bei gleichzeitig langer Aufnahmedauer (> 1000 s) konnten die Instabilitäten erstmals experimentell charakterisiert werden. Eine Hauptkomponentenanalyse identifizierte ein gekoppeltes Paar von Strömungsmoden, welche eine spontan anfachende harmonische Oszillation mit der Frequenz $f = 0{,}072\,\mathrm{Hz}$ beschreiben und durch komplexe Wirbel gekennzeichnet sind. Die Analyse der Messunsicherheit für das gegebene Experiment ergab, dass diese mit $\sigma_{\mathrm{v,rel}} = 13{,}9\,\%$ hauptsächlich durch das räumliche Auflösungsvermögen bestimmt wird.

Das Schallfeld ist bei ultraschallbasierten Messverfahren ausschlaggebend für die Eigenschaften der Bildgebung. Mit dem Phased Array Doppler Velocimeter (PAUDV) wurde ein modulares Messsystem mit adaptiven Schallfeld aufgebaut, wobei durch digitale Strahlformung die örtliche und zeitliche Auflösung signifikant erhöht werden kann. Eine aktive Kontrolle des Schallfeldes ermöglicht zudem die Messung durch Objekte mit komplexen, unbekannten Ausbreitungseigenschaften. Mit dem Time Reversal Virtual Array (TRVA) wird dabei eine effiziente Methode zur Bildgebung vorgestellt und auf die Strömungsmessung durch einen Multimode-Wellenleiter angewandt. Damit kann die Beschränkung bildgebender Ultraschallmesstechnik hinsichtlich der Betriebstemperatur der Wandler umgangen und heiße Schmelzen industrieller und technischer Prozesse für nichtinvasive In-Prozess-Bildgebung zugänglich gemacht werden.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

**Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik** Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik

## Abstract

In many important industrial processes, such as continuous steel casting or crystal growth for photovoltaic silicon, the flow of liquid metals or semiconductors determines the energy consumption of the process and the quality of the product. Influencing the hot melts contactlessly through Lorentz forces for a targeted flow control can significantly improve the resource-efficiency of a process. The complex interaction of electrically conductive fluids and alternating magnetic fields is investigated in the field of magnetohydrodynamics (MHD) through laboratory-scale experiments in low melting metals. The emerging instationary, three-dimensional flows require a temporally and spatially high-resolved non-invasive flow imaging system, which currently is not available for MHD research.

In this work, a flow instrumentation for MHD experiments based on the ultrasound Doppler principle is created through means of electrical engineering. The general approach is to shift the complexity of a system from mechanics over electronics to an algorithmic implementation in order to exploit the recent computational advances, enabling novel signal processing methods and increasing the flexibility.

The ultrasound array Doppler velocimeter (UADV) has been created as a flexible instrumentation system for MHD experiments. It supports multicomponent, multiplane velocity measurements through sensor fusion of up to nine linear transducer arrays with spatiotemporal multiplexing. An online signal processing is realized through data compression on a field-programmable gate array (FPGA). It achieves an uncertainty as low as a factor 3 of the Cramér-Rao lower bound despite a low computational complexity of the algorithm.

The UADV has been applied to a magnetically-driven flow in a cubic vessel. Numerical simulations predicted a non-deterministic instability in the transitory region between laminar and turbulent flow regimes. A simultaneous two-dimensional two-component flow measurement with high spatial (3 … 5 mm) and temporal resolution (frame rate 11,2 Hz) over long durations ($> 1000$ s) allowed to characterize those instabilities experimentally for the first time. A principal component analysis identified a pair of coupled modes with a complex vortex structure that performs a spontaneously onsetting oscillation at $f = 0{,}072$ Hz. The measurement uncertainty for the experiment has been evaluated to be $\sigma_{\mathrm{v,rel}} = 13{,}9\,\%$ and is primarily caused by the spatial resolution of the system.

The properties of ultrasound-based imaging are primarily determined by the sound field. The phased array Doppler velocimeter (PAUDV) has been developed as a modular flow instrumentation system with an adaptive sound field, which allows to increase the spatial and temporal resolution. Furthermore, an active control of the sound field enables measurements despite a complex, unknown sound propagation. A method to image through strong aberrations efficiently has been proposed with the time reversal virtual array (TRVA). It has been applied to flow imaging through a multimode waveguide, thus allowing to circumvent the limitation of common ultrasound imaging systems regarding their maximum operating temperature. This paves the way for in-process flow imaging of hot, opaque liquids in technical and industrial processes.

The only way to define your
limits is by going beyond them.

*(Arthur C. Clarke)*

# Vorwort

Dass die vorliegende Arbeit in ihre heutige Form wachsen konnte, ist einer Vielzahl von Menschen zu verdanken. Zunächst sei mein Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Czarske genannt, der die exzellenten Rahmenbedingungen für meine wissenschaftliche Tätigkeit schuf.
Allen meinen Kolleginnen und Kollegen an der Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik möchte ich für ihre tatkräftige Unterstützung und die großartige Arbeitsatmosphäre danken, insbesondere den Mitgliedern der Ultraschall-Gruppe: Hannes Beyer, Mantvydas Kalibatas, Christian Kupsch, Kevin Mäder und Norman Thieme, außerdem Dr. Lars Büttner und Dr. Andreas Fischer. Weiterhin konnte ich in meiner Doktorandenzeit auf die Mitarbeit vieler Studentinnen und Studenten bauen, die in ihren (Abschluss-)Arbeiten sowie als studentische Hilfskräfte einen beachtlichen Beitrag leisteten: Chaitanya Bharathi Akkineni, Markus Burger, David Dawidowski, Hamza Ben Hassen, Arne Klaß, Berend Leferink, Hannes Radner, Christian Paulig, Nico Peter, Julia Schmidt, Luca Setili und David Weik.
Unverzichtbar für meine Arbeit waren auch unsere Kooperationspartner, welche mit neuen Ideen, fundiertem Wissen, konstruktiven Diskussionen, aber auch handfester materieller Unterstützung zum Gelingen unserer Projekte beitrugen. Dies waren am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf Dr. Sven Eckert, Sven Franke, Dr. Vladimir Galindo, Dr. Sascha Heitkam, Dr. Dirk Räbiger und Dr. Joseph Pal; an der TU Freiberg Dagmar Meier, Dr. Kathrin Niemitz und Wolfgang Fütterer; bei der SolarWorld Innovations GmbH Dr. Paul Bönisch, Dr. Kaspars Dadzis, Dr. Lamine Sylla; und am Zentrum für BrennstoffzellenTechnik Duisburg Dr. Sebastian Burgmann und Lucas Feierabend.
Außerdem möchte ich meinen Eltern und meinen Freunden danken: ohne Euch und Euren Rückhalt würden im Anschluss hier nur leere Seiten folgen! Zu guter Letzt möchte ich diese Arbeit meiner kleinen Familie widmen: meiner Freundin Jule und unserer Tochter Juna. Erstere hat mich mit drahtseilartigen Nerven durch die gesamte Doktorandenzeit begleitet, und Letztere durch ihren festen Schlaf und gelegentliche textuelle Beiträge auch ein wenig an dieser Arbeit mitgewirkt.

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung iii

Abstract v

Symbolverzeichnis xi

Abkürzungsverzeichnis xv

1 Einleitung 1
1.1 Motivation . . . 1
1.2 Stand der Technik . . . 3
1.3 Lösungsansatz und Struktur der Arbeit . . . 9

2 Theoretische Grundlagen 11
2.1 Schall . . . 11
2.2 Bestimmung des Schallfelds . . . 12
2.2.1 Abschätzung der Grenzen der Schallfokussierung . . . 12
2.2.2 Elastodynamische Finite-Integrationsmethode . . . 13
2.2.3 Rayleigh-Sommerfeld-Integral . . . 14
2.3 Beeinflussung des Schallfelds . . . 14
2.3.1 Phased-Array-Prinzip . . . 14
2.3.2 Zeitumkehrverfahren . . . 15
2.4 Ultraschall-Doppler-Velozimetrie . . . 17
2.4.1 Dopplereffekt an einem bewegten Reflektor . . . 19
2.4.2 Pulswellen-Doppler-Verfahren . . . 20
2.4.3 Signalverarbeitung für das Pulswellen-Doppler-Verfahren . . . 22
2.4.4 Cramér-Rao-Schranke der Messunsicherheit . . . 24
2.4.5 Örtliche und zeitliche Auflösung . . . 28
2.5 Zusammenfassung . . . 29

3 Modulares Ultraschall-Array-Doppler-Velozimeter 31
3.1 Systemarchitektur . . . 31

3.2 Onlinefähige Signalverarbeitung . . . . . 35
3.3 Rückführung auf SI-Einheiten und Messunsicherheitsabschätzung . . . . 39
3.4 Zusammenfassung . . . . . 42

4 Strömungsbildgebung eines RMF-getriebenen Würfels 45
4.1 Experimenteller Aufbau . . . . . 46
4.2 Charakterisierung der Messeigenschaften . . . . . 49
4.3 Strömungsstruktur in Abhängigkeit der Taylorzahl . . . . . 53
4.4 Charakterisierung globaler Strömungs- und Turbulenzkenngrößen . . . 56
4.5 Zeitliche Entwicklung der Strömungsstrukturen beim Einschaltvorgang . 57
4.6 Zeitaufgelöste Langzeitmessung zur Aufklärung von Strömungsinstabilitäten . . . . . 59
4.7 Zusammenfassung . . . . . 68

5 Ansatz zur nichtinvasiven In-Prozess-Strömungsbildgebung in heißen Schmelzen 69
5.1 Modulares Ultraschall-Doppler-Messsystem mit adaptivem Schallfeld . . 70
5.1.1 Systemarchitektur . . . . . 71
5.1.2 Demonstration und Charakterisierung des gesteuerten Schallfelds 74
5.1.3 Zusammenfassung . . . . . 74
5.2 Ex-situ-kalibrierte Bildgebung durch einen Multimode-Wellenleiter . . . 77
5.2.1 Strahlformung durch einen Multimode-Wellenleiter . . . . . 77
5.2.2 Stabilitätsuntersuchung der Übertragungsfunktion . . . . . 79
5.2.3 Virtuelles Zeitumkehr-Wandlerarray . . . . . 85
5.3 Experimentelle Demonstration . . . . . 86
5.4 Zusammenfassung . . . . . 92

6 Zusammenfassung und Ausblick 97
6.1 Zusammenfassung . . . . . 97
6.2 Ausblick auf anknüpfende Arbeiten . . . . . 100

Literaturverzeichnis 103

Publikationsverzeichnis 117
Artikel in Zeitschriften mit peer-review . . . . . 117
Tagungsbeiträge . . . . . 118
Patente . . . . . 121