

Strömungsbildgebung in elektromagnetisch getriebenen Flüssigmetallströmungen mit einem Ultraschall-Array-Messsystem

Flow mapping in electromagnetically driven liquid metal flows by means of an ultrasound array measurement system

N. Thieme¹, R. Nauber¹, D. Meier², O. Pätzold², J. Czarske¹, L. Büttner^{1*}

¹ Technische Universität Dresden, Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik
Helmholtzstr. 18, 01069 Dresden

* E-Mail: Lars.Buettner@tu-dresden.de, Internet: <http://www.tu-dresden.de/et/mst>

² TU Bergakademie Freiberg, Institut für Nichteisen-Metallurgie und Reinstoffe
Leipziger Straße 34, 09599 Freiberg/Sachsen

Ultraschall-Doppler-Technik, Flüssigmetallströmungen, Magnetohydrodynamik
Ultrasound Doppler velocimetry, liquid metal flows, magnetohydrodynamics

Zusammenfassung

Die gerichtete Kristallisation ist eine etablierte Züchtungsmethode für die Herstellung von massiven Halbleiterkristallen für die Anwendung in der Mikroelektronik und Photovoltaik. Während der Züchtung spielt die auftretende Schmelzkonvektion eine signifikante Rolle, da sie den Wärme- und Stofftransport maßgeblich beeinflusst. Der Einsatz eines magnetischen Wanderfeldes ist eine Möglichkeit, die Schmelzströmung gezielt zu optimieren, um Kristalle mit verbesserten strukturellen und elektrischen Eigenschaften zu züchten [1]. Zur Strömungsuntersuchung werden Modellexperimente verwendet, die als Modellfluid die niedrigschmelzende Legierung GaInSn nutzen. Für die Strömungsmessung in opaken Medien wie dem Modellfluid hat sich die Ultraschall-Doppler-Velozimetrie etabliert, da optische Messverfahren wegen der Opazität des Modellfluids ausscheiden. Aufgrund des komplexen und teilweise zeitabhängigen Strömungsverhaltens ist eine bildhafte bzw. volumetrische Erfassung der Strömung erforderlich. Es wird ein bildgebendes Ultraschall-Messsystem [2], das durch Einsatz segmentierter Ultraschallwandler (Wandlerarrays) und deren weitgehenden Parallelbetrieb sowohl eine hohe Zeit- als auch eine hohe Ortsauflösung ermöglicht. Dabei kann eine Bildwiederholrate von 20 Hz und eine räumliche Auflösung von 3 mm in GaInSn erreicht werden. Das Messsystem kann bis zu acht Wandlerarrays ansteuern und damit simultan mehrere Geschwindigkeitskomponenten in mehreren Messebenen erfassen, aus denen schließlich die volumetrische Strömung (3D-3C) rekonstruiert werden kann. Es konnte gezeigt werden, dass sich das Messsystem für eine hochauflösende Untersuchung instationärer 3D Strömungsvorgänge in viereckigen und zylindrischen Modellgeometrien eignet. Durch die bildhafte, zeitaufgelöste Messung einer mittels Wandermagnetfeld getriebenen Strömung in einem zylindrischen Gefäß ($D = 75 \text{ mm}$) konnten Turbulenzintensitätsfelder ermittelt werden. Mithilfe derer wurden Bereiche mit einer oszillierenden Strömung identifiziert. Ebenso wurde das Messsystem zur Kartierung von Strömungsstrukturen und deren zeitlichen Verhalten in Abhängigkeit von Magnetfeldparametern und der Schmelzhöhe eingesetzt. Der Fortschritt für die Wissenschaft besteht in der nun vorhandenen Möglichkeit, komplexe örtlich-zeitliche Strömungsmuster in Flüssigmetallen mit hoher Detailgenauigkeit zu studieren und Kristallzüchtungsprozesse besser zu verstehen.

Einleitung

Die Beeinflussung der Strömung in Metallschmelzen ist in einer Vielzahl industrieller Prozesse, insbesondere in der Halbleiterindustrie und Stahlverarbeitung, von großer Bedeutung. Auf Grund der elektrischen Leitfähigkeit besteht die Möglichkeit, mittels Magnetfeldern kontaktlos auf die Schmelzen einwirken zu können und dabei die resultierenden Materialeigenschaften zu beeinflussen. Beispielhaft soll im Folgenden die gerichtete Kristallisation nach dem Vertical-Gradient-Freeze-Verfahren (VGF) als eine etablierte Züchtungsmethode zur Herstellung von monokristallinem GaAs für die Mikro- und Optoelektronik bzw. multikristallinem Silizium für die Photovoltaik betrachtet werden. Die auftretende Schmelzkonvektion beeinflusst sowohl den Wärme- und Stofftransport als auch die Form der Phasengrenze [3,4]. Es wird angestrebt, durch den Einsatz eines wandernden Magnetfeldes (TMF: Travelling Magnetic Field) die Schmelzströmung gezielt zu optimieren, um Kristalle mit verbesserten strukturellen und elektrischen Eigenschaften zu züchten [5].

Hierzu müssen die strömungsmechanischen Phänomene in magnetfeldbeeinflussten Flüssigmetallen verstanden werden, was mittels numerischer Simulationen in Kombination mit messtechnischer Validierung versucht wird [6]. Da die auftretenden Strömungsstrukturen jedoch vergleichsweise komplex und zudem instationär sein können, werden an die Messtechnik hohe Anforderungen gestellt: Strömungsfelder müssen bildgebend, mehrkomponentig und mit hoher Zeit- und Ortsauflösung aufgenommen werden.

Eine direkte Strömungsmessung im flüssigen Silizium ist derzeit mit keinem etablierten Verfahren unter den genannten Anforderungen möglich, so dass man auf Modellexperimente mit GaInSn als niedrigschmelzender Legierung angewiesen ist. Auf Grund der vernachlässigbaren Eindringtiefe für sichtbares Licht können optische Strömungsmessverfahren nicht eingesetzt werden. Hier hat sich stattdessen die Ultraschall-Doppler-Technik (UDV: Ultrasound Doppler Velocimetry) als geeignetes Verfahren erwiesen [7,8].

Dieser Beitrag stellt ein bildgebendes Ultraschall-Doppler-Messsystem vor, das sich von kommerziell verfügbaren Ultraschallsystemen durch den Einsatz mehrerer Wandlerarrays abhebt [6-8]. Dies ermöglicht eine quasisimultane Betrachtung des Messvolumens und vermeidet langwieriges Traversieren von Einzelwandlern, die nur Strömungsinformationen in einer einzelnen Linie liefern.

Das Messsystem

Das Messsystem besteht aus vier Ultraschallwandlerarrays mit je 25 Einzelwandlern der Abmessungen von $2,5 \times 5 \text{ mm}^2$ und der dazugehörigen elektronischen Ansteuerung und Signalverarbeitung. Es erlaubt die quasisimultane, vektorielle Strömungsmessung in Ebenen, die ein Messfeld von jeweils $67 \times 67 \text{ mm}^2$ umfassen, in welchem 24×24 zweikomponentige Geschwindigkeitsvektoren bestimmt werden. Dabei sind jeweils zwei dieser Linienarrays orthogonal zueinander angeordnet, wie in Abb. 1a dargestellt.

Innerhalb eines Wandlerarrays werden jeweils zwei benachbarte Einzelelemente parallel angesteuert, so dass dieses Paar als Einzelwandler mit quadratischer Querschnittsfläche und einer geringen Schallfelddivergenz wirkt [9]. Die Wandler werden pulsformig mit einem 8-MHz-Sinussignal bestehend aus acht Schwingungsperioden angesteuert, so dass sich in dem verwendeten Flüssigmetall GaInSn (Schmelztemperatur ca. $10 \text{ }^\circ\text{C}$, Schallgeschwindigkeit $c = 2740 \text{ m/s}$) eine Ortsauflösung von ca. $1,4 \text{ mm}$ in axialer Richtung und ca. 3 mm in lateraler

Richtung ergibt. Dieses segmentierte Ansteuern der Einzelwandler erlaubt dann eine elektronische Traversierung in Schritten von 2,5 mm, was einer halben effektiven Wandlerbreite entspricht, siehe Abb. 1b.

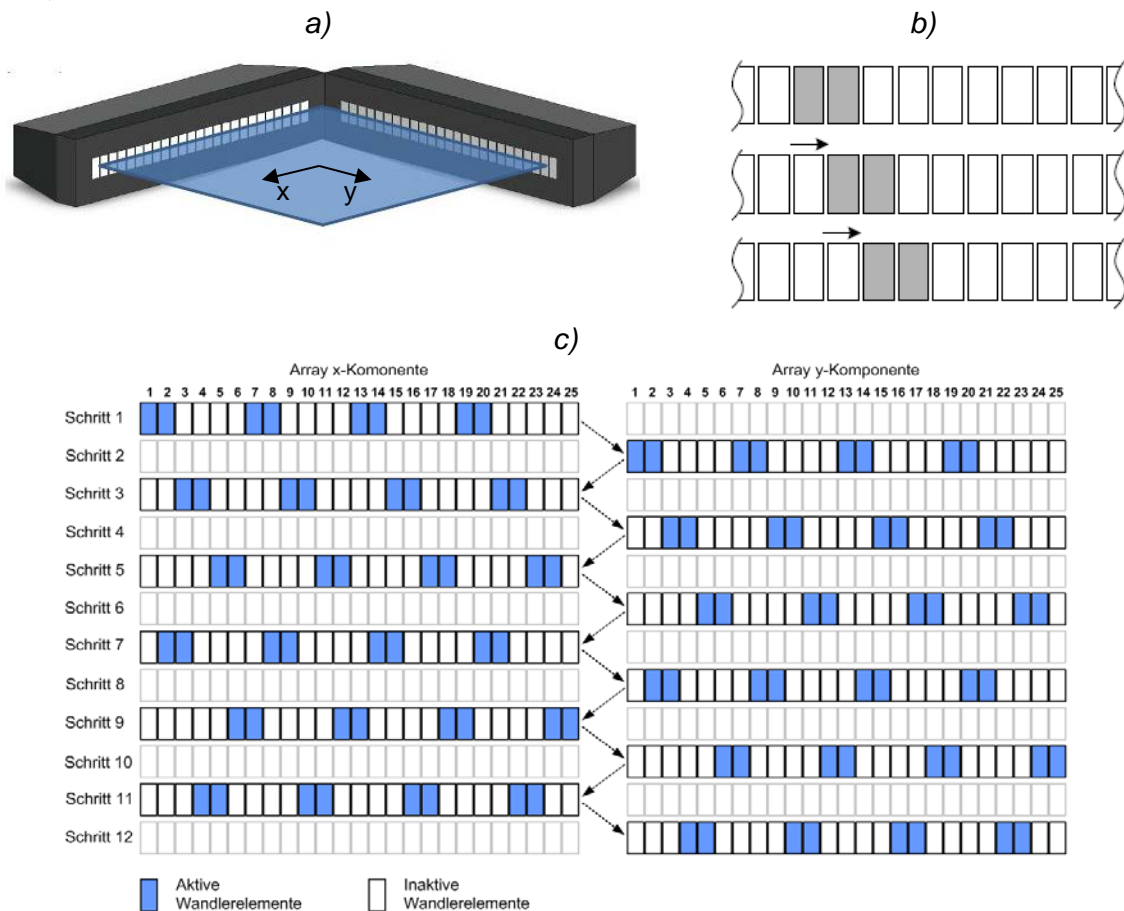


Abb. 1: a) Anordnung der Ultraschall-Arrays zur zweikomponentigen Vermessung der Fluidgeschwindigkeiten in zwei Ebenen. b) Elektronische Traversierung der aktiven Wandlerpaare in Halbschritten. c) Ansteuerschema für zweikomponentige Messungen in einer Ebene. Das Weiterschalten von Schritt zu Schritt erfolgt je nach Anordnung mit einer Rate von bis zu 6 kHz, die Wiederholung des gesamten Schemas mit maximal 500 Hz.

Für die geforderte hohe zeitliche Auflösung ist es notwendig, die Erfassung einer Ebene zu parallelisieren, d.h. mehrere Messlinien simultan aufzunehmen. Um ein Übersprechen der Echosignale zu vermeiden, muss dabei in GalnSn ein räumlicher Abstand von mindestens 4 inaktiven Wandler Elementen eingehalten werden [7]. In einem 25-elementigen Array können damit vier Wandlerpaare gleichzeitig betrieben werden, was mit einer Erhöhung der Zeitaufklärung um diesen Faktor einhergeht. In Abb. 1c ist das daraus abgeleitete Ansteuerschema für zwei orthogonale Arrays dargestellt.

Das Kernstück der modularen Ansteuerelektronik, dargestellt in Abb. 3, ist eine Multiplex-Elektronik, welche die von 16 Pulsgeneratoren erzeugten Hochfrequenzpulse an die jeweils aktiven Wandlerpaare weiterleitet (Sendebetrieb) und unmittelbar danach die mit denselben Wandlern aufgezeichneten Ultraschallechos an das Datenerfassungssystem durchreicht (Empfangsbetrieb). Das Ansteuerschema (Abb. 2) ist dabei in einem Mikrokontroller hinterlegt, und kann mit einem PC parametrierbar werden. Die empfangenen Echosignale werden vom FPGA-System digitalisiert und bereits vorverarbeitet. Durch die Vorverarbeitung kann abhängig von der Konfiguration eine Reduzierung der Datenrate um den Faktor 5 bis 10 erreicht

werden. Anschließend wird mittels einer in MATLAB implementierten Signalverarbeitung die Dopplerfrequenz der Ultraschallechos bestimmt, was auf der Auswertung der Phasenverschiebung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Pulsen beruht. Die Tiefenaufösung der Geschwindigkeitsmessung erfolgt durch die Auswertung der Signallaufzeit und damit der Messtiefe der Echos. Für eine hinreichend genaue Bestimmung der Dopplerfrequenz auf einige Prozent Messunsicherheit werden üblicherweise 25 bis 100 Echosignale ausgewertet. Je nach Schalllaufzeit im verwendeten Gefäß kann bei 25 ausgewerteten Echosignalen eine Messrate des gesamten Geschwindigkeitsfeldes (=Bildrate) von derzeitig bis zu 20 Hz erreicht werden. Der modulare Aufbau des Messsystems erlaubt zudem die individuelle Parametrierung der Ultraschall-Arrays und ermöglicht so Messungen in verschiedensten geometrischen Anordnungen, beispielsweise auch zur Erfassung dreikomponentiger Geschwindigkeitsfelder entlang zweier Linien.

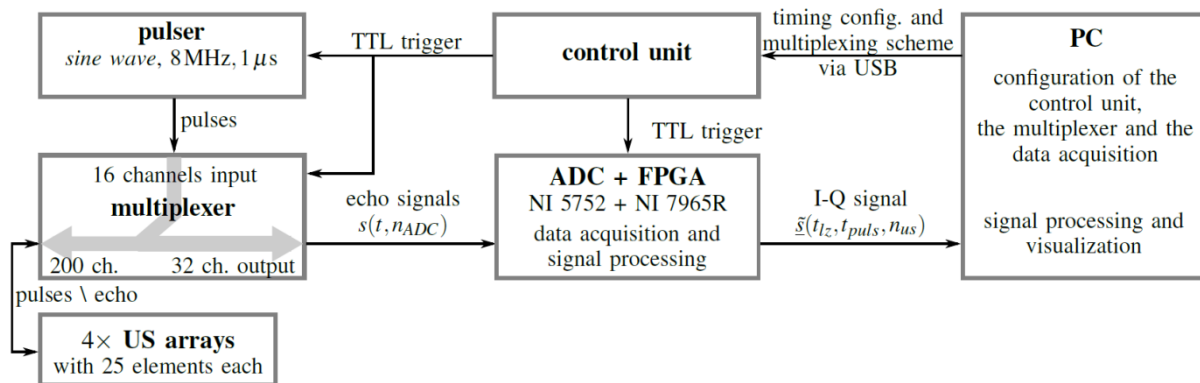


Abb. 3: Blockschema des Ultraschall-Array-Messsystems.

Messungen an einem isothermalen Modellexperiment zur Kristallzüchtung

Im Folgenden wird die Eignung des Messsystems für hochauflösende Untersuchungen instationärer 3D-Strömungsvorgänge demonstriert. Die Messungen erfolgten in einem Zylindergefäß gefüllt mit GalnSn, welches sich konzentrisch in einem Spulensystem befindet (vgl. Abb.4). Das Spulensystem besteht aus 6 Spulen zu je 36 Kupferwindungen mit einer festen Phasenverschiebung von 60° zwischen benachbarten Spulen [10]. Die Stromrichtung, -stärke und -frequenz kann vorgegeben werden, woraus ein aufwärts- (TMF up) oder abwärts- (TMF down) gerichtetes Wanderfeld mit einer maximalen magnetischen Induktion von 3 mT resultiert. Das Magnetfeld kann anhand der magnetischen Kraftzahl F und des Abschirmparameters S beschrieben werden, die sich wie folgt berechnen lassen:

$$F = \frac{\sigma \omega k B_0^2 R^4 H}{4 \eta \nu} \text{ und } S = \mu_0 \sigma \omega R^2.$$

Die magnetische Kraftzahl ist besonders von der magnetischen Flussdichte B_0 abhängig, wohingegen der Abschirmparameter von der Frequenz abhängt und die Eindringtiefe des Magnetfelds beeinflusst. Mit steigendem S und damit sinkender Eindringtiefe verändert sich die Lorentzkraft von einer überwiegend vertikal gerichteten Kraft zu einer überwiegend horizontal gerichteten Kraft, siehe Abb. 5. Die folgenden Messungen wurden mit TMF down durchgeführt, wobei die magnetische Kraftzahl sowie der Abschirmparameter variiert wurden, vgl. Tab. 1.

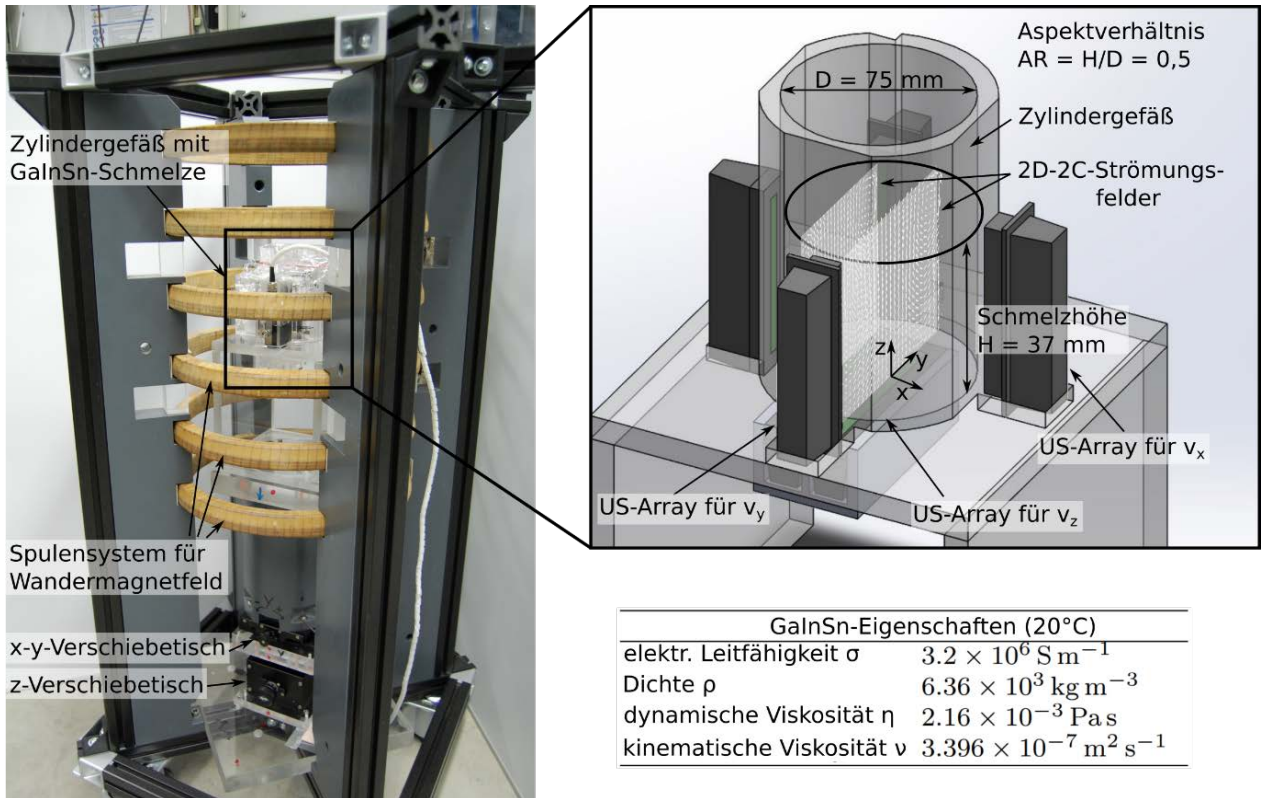


Abb. 4: Aufbau des Modellexperiments bestehend aus einem Spulensystem zur Erzeugung eines Wander magnetfelds und einem Zylindergefäß gefüllt mit GalnSn.

Abschirmparameter S	2	2	10	10
Magnetische Kraftzahl F	$0,4 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	$0,4 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$
Frequenz f	56 Hz	56 Hz	281 Hz	281 Hz
Spulenstrom I	6,6 A	23,2 A	2,9 A	10,4 A
Messdauer	600 s	1800 s	600 s	1800 s

Tab. 1: Zusammenfassung der untersuchten Magnetfeldkonfiguration.

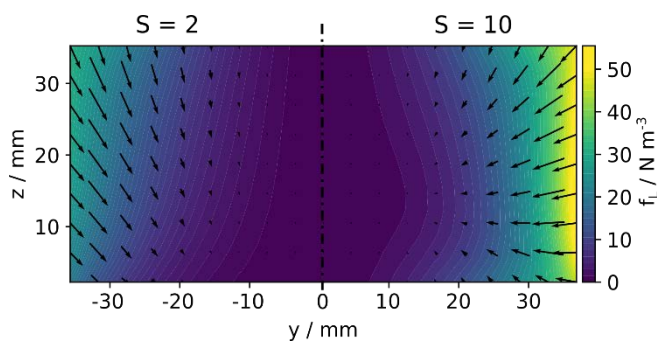


Abb. 5: Lorentzkraftverteilung in Abhängigkeit des Abschirmparameters S.

Die daraus resultierenden Strömungen sind in Abb. 6 dargestellt. Aufgrund der Lorentz-Kraftverteilung (siehe Abb. 5) strömt die Schmelze an der Wand nach unten und steigt in der Mitte des Behälters auf, so dass sich ein typisch poloidales Strömungsmuster bildet. Mit steigender Kraftzahl F steigt auch die Strömungsgeschwindigkeit v_{mean} . Zur Betrachtung des zeitabhängigen Strömungsverhaltens wurde die Turbulenzintensität T_U analysiert, s. Abb. 6b. Dabei wurde beobachtet, dass mit Erhöhung von F und S die Turbulenzintensität ansteigt.

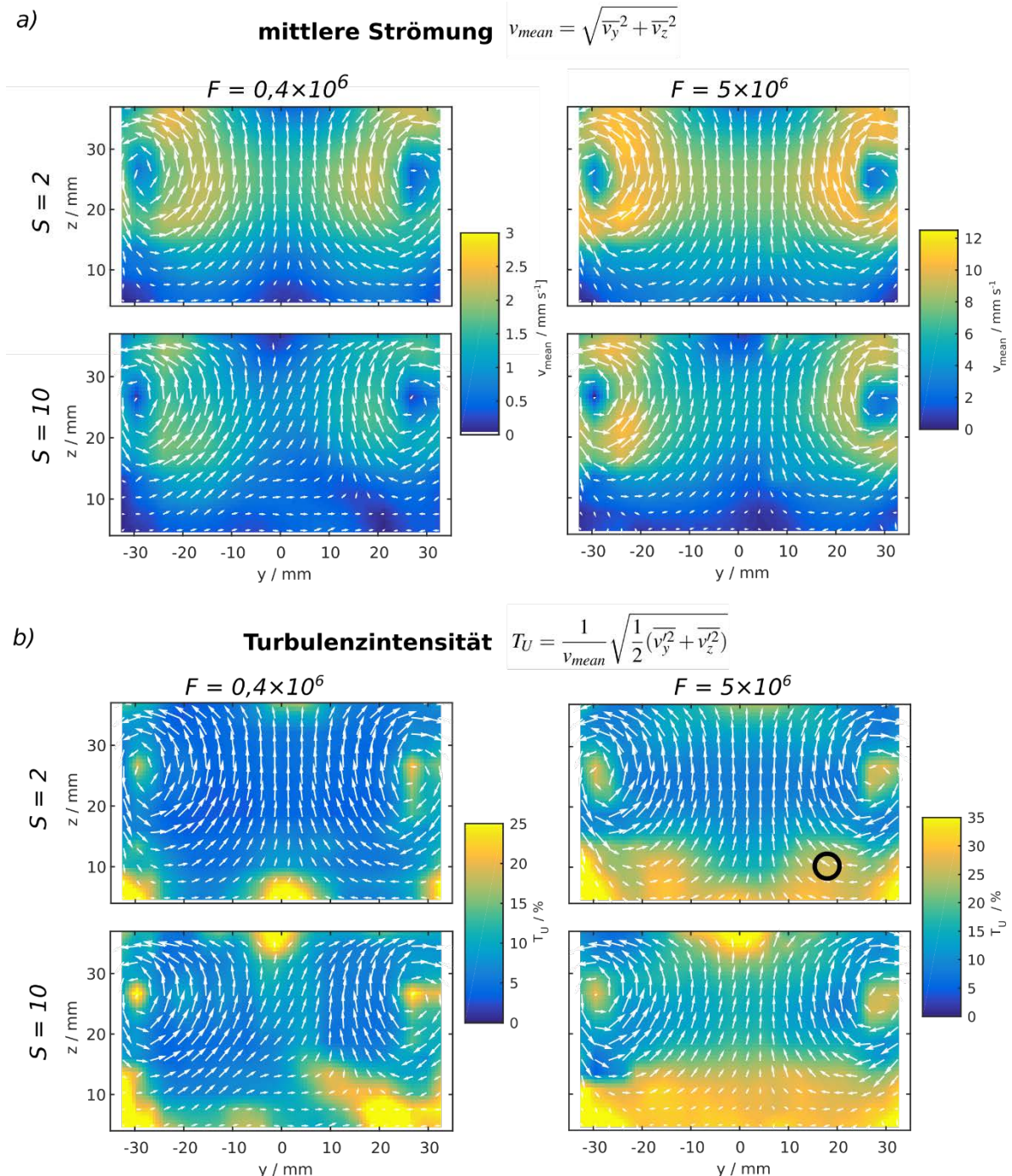


Abb.6: a) Die mittlere Strömung und b) die dazugehörige Turbulenzintensität einer Messung durch die Achse des Zylindergefäßes. Die Vektoren zeigen stets die mittlere Strömung an. Das Zeitverhalten an der eingekreisten Position wird in Abb. 7 näher untersucht.

Durch Betrachtung des zeitabhängigen Strömungsverhaltens an einem Punkt, s. Abb. 7, konnte eine weitere Differenzierung zwischen laminarer und zeitabhängig, turbulenter Strömung durchgeführt werden. Neben dem wie zu erwartenden flachen Spektrum für den laminaren Strömungsfall, konnte eine quasiperiodische Strömungsszillation mit der mittleren Periodendauer $T_{osc} = 16$ s für den zeitabhängigen Strömungsfall beobachtet werden. Die Strömungsszillation könnte durch das mögliche Entstehen eines zweiten Torus in Bodennähe verursacht werden, der bei Aspektverhältnissen $> 0,5$ bereits beobachtet wurde, jedoch in den vorliegenden Messungen noch nicht nachgewiesen werden konnte.

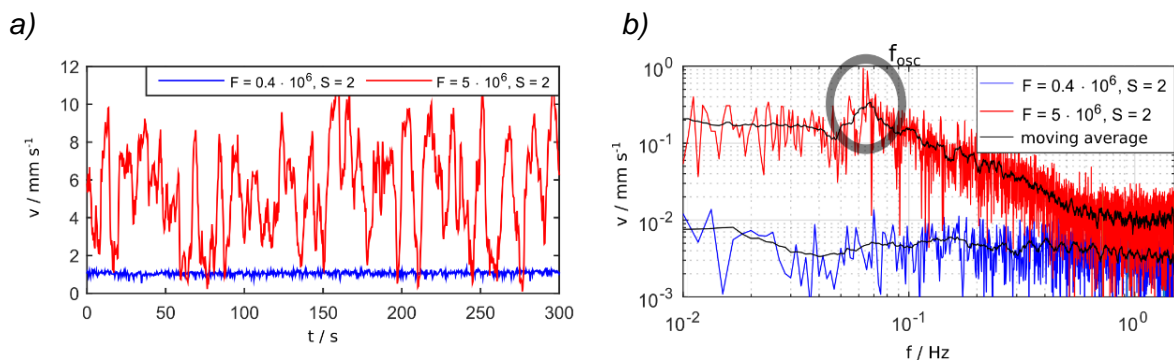


Abb.7: a) Die zeitabhängige Strömungsgeschwindigkeit und (b) das korrespondierende Spektrum an der Stelle $(x, y, z) = (0 \text{ mm}, 18 \text{ mm}, 10 \text{ mm})$ (siehe Markierung in Abb. 6). Das Mittelungsintervall der gleitenden Mittelung (moving average) betrug 0,016 Hz.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein UDV-System für die Vermessung von Strömungen in Flüssigmetallen vorgestellt. Dabei kommen vier Ultraschall-Arrays für flächenhafte, mehrkomponentige Messungen bei Bildraten bis zu 20 Hz zum Einsatz. Das Messsystem wurde erstmalig an einem Modellexperiment zur Strömungsuntersuchung in einem Zylindergefäß unter dem Einfluss eines magnetischen Wanderfeldes eingesetzt, wobei zweikomponentige Messungen durchgeführt und als Parameter die magnetische Kraftzahl und der Abschirmparameter variiert wurden. Durch die Auswertung der Turbulenzintensität konnten Konfigurationen mit turbulenter Strömung identifiziert werden, was weiterhin durch eine spektrale Analyse unterstützt wird.

Es lässt sich feststellen, dass das Messsystem für eine hochauflösende Untersuchung instationärer, dreidimensionaler Strömungsvorgänge in einer zylindrischen isothermalen Modellgeometrie geeignet ist. Perspektivisch sollen umfangreiche Untersuchungen an einem Modellexperiment mit quadratischer Grundfläche durchgeführt werden. Weiterhin sind Untersuchungen mit einem nicht-isothermalen Temperaturfeld geplant. Darauf aufbauend sollen Erstarrungsexperimente durchgeführt werden, bei denen die komplexe Interaktion zwischen der instationären, dreidimensionalen Strömung und der sich vertikal verschiebenden Phasengrenze untersucht werden soll und somit ein Fortschritt für die Wissenschaft erzielt werden kann.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung der Arbeiten unter den Förderkennzeichen CZ-55/31-1 und PA 1236/5-1.

Literatur

- [1] D. Meier, G. Lukin, N. Thieme, P. Bönisch, K. Dadzis, L. Büttner, O. Pätzold, J. Czarske, M. Stelter, "Design of model experiments for melt flow and solidification in a square container under time-dependent magnetic fields", *Journal of Crystal Growth* 461, S. 30-37, 2017
- [2] N. Thieme, P. Bönisch, D. Meier, R. Nauber, L. Büttner, K. Dadzis, J. Czarske, „Ultrasound flow mapping for the investigation of crystal growth”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 64, S. 725 – 735, 2017
- [3] F. M. Kiessling, F. Büllsfeld, N. Dropka, Ch. Frank-Rotsch, M. Müller, P. Rudolph: "Charakterization of mc-Si directionally solidified in travelling magnetic field", *J. Cryst. Growth* doi: 10.1016/j.jcrysgro.2012.03.017
- [4] C. Tanasie, D. Vizman, J. Friedrich: „Numerical study of the influence of different types of magnetic fields on the interface shape in directional solidification of multi-crystalline silicon ingots”, *J. Cryst. Growth* 318, S. 293-297, 2011
- [5] Ch. Frank-Rotsch, P. Rudolph: "Vertical gradient freeze of 4 inch Ge crystals in a heater-magnet module", *J. Cryst. Growth* 311, S. 2294-2299, 2009
- [6] K. Dadzis, J. Ehrig, K. Niemietz, O. Pätzold, U. Wunderwald, J. Friedrich, "Model experiments and numerical simulations for directional solidification of multicrystalline silicon in a traveling magnetic field", *J. Cryst. Growth* 333, S.7-15, 2011
- [7] Y. Takeda, H. Kikura, "Flow mapping of mercury flow", *Exp. Fluids* 32, S. 161-169, 2002
- [8] S. Eckert, A. Cramer, G. Gerbeth, "Velocity measurement techniques for liquid metal flows", in "Magnetohydrodynamics - Historical Evolution and Trends", S. Molokov, R. Moreau, H.K. Moffatt (Eds.), Springer-Verlag, Dordrecht, S. 275 – 294, 2007
- [9] S. Franke, L. Büttner, J. Czarske, D. Rübiger, S. Eckert, „Ultrasound Doppler system for two-dimensional flow mapping in liquid metals”, *Flow Meas. Instr.* 21, S. 402-409, 2010
- [10] R. Lantsch, V. Galindo, I. Grants, C. Zhang, O. Pätzold, G. Gerbeth, M. Stelter, "Experimental and numerical results on the fluid flow driven by a traveling magnetic field", *J. Cryst. Growth* 305, S. 249-256, 2007