

Christian Kupsch

Ultraschallmessverfahren für komplexe Suspensionsströmungen in kleinen Geometrien: Untersuchung am Beispiel der Zink-Luft-Flussbatterie



Ultraschallmessverfahren für komplexe Suspensions- strömungen in kleinen Geometrien: Untersuchung am Beispiel der Zink-Luft-Flussbatterie

Christian Kupsch

Geboren am: 22.04.1988 in Berlin

genehmigte Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

Vorsitzende:

Prof. Dr. rer. nat. et Ing. habil. Elfgard Kühnicke

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Czarske

Prof. Dr.-Ing. Christian Cierpka

Eingereicht am: 25.11.2019

Verteidigt am: 03.09.2020

Dresdner Berichte zur Messsystemtechnik

Band 16

Christian Kupsch

**Ultraschallmessverfahren für komplexe
Suspensionsströmungen in kleinen Geometrien:
Untersuchung am Beispiel der Zink-Luft-Flussbatterie**

Shaker Verlag
Düren 2020

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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7651-6

ISSN 1866-5519

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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



Kurzfassung

Der zunehmende Einsatz regenerativer Energiequellen erfordert die Nutzung von Energiezwischen Speichern, die umweltfreundlich, günstig und skalierbar sein sollten. Die Zink-Luft-Flussbatterie (ZLFB) kann perspektivisch diese Anforderungen erfüllen, wobei zur Bereitstellung der gespeicherten Energie eine Suspension aus Zinkpartikeln in einem gelierten Elektrolyt durch eine elektrochemische Zelle gepumpt wird. Um die Strömungsstruktur der ZLFB auszulegen und Fehlfunktionen zu vermeiden, ist ein grundlegendes Verständnis der Rheologie der Zinksuspension notwendig. Außerdem kann über die Einstellung einer geeigneten Strömung die bei der Entladung erreichte elektrische Leistungsdichte gesteigert werden.

Bereits die Flüssigphase der Zinksuspension weist eine komplexe nicht-Newtonsche Rheologie auf, welche durch die Zugabe der Partikel komplexer wird. Für das grundlegende Verständnis der Rheologie werden daher Modellexperimente durchgeführt, wobei in dieser Arbeit ein L-förmiger Kanal mit Strömungsaufweitung untersucht wurde, um die komplexen strömungsmechanischen Eigenschaften der Zinksuspension abzubilden. Zur Erfassung des Strömungsfeldes ist eine Ortsauflösung von 1 ... 2 mm in einem Messbereich von $20 \times 15 \text{ mm}^2$ erforderlich. Ultraschall ist prinzipiell geeignet, um das Strömungsfeld in der opaken Suspension zu erfassen, wobei die wesentliche Herausforderung in den starken Wellenfrontverzerrungen besteht, welche durch die Zinkpartikel eingebracht werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Ultraschall-Imaging Velocimetry (UIV) robuster gegenüber diesen Störungen ist, als die Ultraschall-Doppler-Velozimetrie (UDV). Die UIV wurde daher mittels Geschwindigkeitsnormalen an die messtechnischen Randbedingungen der Zinksuspension angepasst und charakterisiert. Bei einer Ortsauflösung von 1,6 mm wurde eine Gesamtmessunsicherheit von 2,5 % axial und 4,1 % lateral zur Schallausbreitungsrichtung erreicht. Das im Modellexperiment gemessene Strömungsfeld weist eine Totzone an der Strömungsumlenkung auf, deren Auftreten durch eine von der Scherhistorie abhängige Viskosität erklärt werden kann. Dieser Effekt wird als Thixotropie bezeichnet.

Durch die In-situ-Messung der Strömung in einer aktiven ZLFB kann eine Korrelation von Strömung und elektrischer Leistung erfolgen und die erzielte Leistungsdichte perspektivisch durch eine Anpassung der Strömung gesteigert werden. Bei der Messung im 2,6 mm hohen Anodenspalt muss aufgrund der komplexen Rheologie der Suspension und der daraus resultierenden hohen Geschwindigkeitsgradienten eine Ortsauflösung von unter $100 \mu\text{m}$ bei gleichzeitig kleiner Ultraschallfrequenz realisiert werden, da der Ultraschall für hohe Frequenzen nicht in die Zinksuspension eindringt. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde die Super Resolution Ultrasound Particle Tracking Velocimetry (SRPTV) genutzt, welche Ortsauflösungen unterhalb des Beugungslimits ermöglicht. Einzelne nichtlineare Streupartikel werden mittels Harmonic Imaging isoliert abgebildet und verfolgt, wobei die durch die Zinkpartikel eingebrachten Wellenfrontstörungen durch einen kohärenzgewichteten Strahlformer kompensiert werden. Es wurde eine Ortsauflösung von $67 \mu\text{m}$ axial und $30 \mu\text{m}$ lateral zur Schallausbreitungsrichtung bei einer Anregungswellenlänge von $330 \mu\text{m}$ erreicht. Trotz der stark streuenden Zinksuspension, konnte so eine Messung in der aktiven ZLFB mit einer maximalen Messunsicherheit von 12,5 % durchgeführt werden. Dabei wurde eine Wandgleitgeschwindigkeit von 3 mm s^{-1} bei einer maximalen Geschwindigkeit von etwa 8 mm s^{-1} festgestellt. Die SRPTV kann darüber hinaus in anderen technischen Prozessen eingesetzt werden, in denen Suspensionsströmungen in kleinen Geometrien auftreten.



Abstract

For the efficient use of renewable energies, energy storage systems are required that are environmentally friendly, low priced and scalable. The zinc-air flow battery (ZAB), which is operated by pumping an opaque suspension of zinc particles in an gelled electrolyte through an electrochemical cell, is a promising candidate as energy storage system for these requirements. To design the fluidic structures and avoid malfunction, a fundamental understanding of the rheology of the zinc suspension is required. Additionally, the electrical performance of the cell can be improved by optimizing the flow in the electrochemical cell.

The liquid phase of the suspension itself has complex non-Newtonian properties, which are even more complex when the particles are considered. For the fundamental understanding of the suspension rheology, model experiments are conducted. In this work an L-shaped channel with a widening is used to represent relevant effects from the complex rheology of the suspension. To measure the flow field, a spatial resolution of 1 ... 2 mm and a measurement area of $20 \times 15 \text{ mm}^2$ are required. Ultrasound can be used to measure the flow in opaque liquids, but wavefront distortions are introduced by the zinc particles. Established measurement methods for homogeneous opaque fluids, the Ultrasound Imaging Velocimetry (UIV) and the Ultrasound Doppler Velocimetry (UDV), were compared for the application at the suspension. The UIV has a 50 % lower random deviation, which makes it more suitable for the flow measurement in the suspension and it was adapted to the measurement conditions in the suspension. At a spatial resolution of 1.66 mm, a velocity uncertainty of 2.5 % axial and 4.1 % lateral to the ultrasound propagation were achieved. The application of the UIV to the suspension flow in the model experiment revealed a thixotropic behavior of the fluid, which resulted in a dead flow zone opposite to the inlet of the channel.

The in situ measurement of the flow in an active ZAB, allows to correlate electrical performance and flow and thereby an improvement of the cell performance by adapting the flow. For the measurement in the anodic channel with a width of 2.6 mm, a spatial resolution of $100 \mu\text{m}$ is required because of the high velocity gradients due to the non-Newtonian rheology of the suspension. The high spatial resolution has to be achieved at low ultrasound frequencies, since the ultrasound does not penetrate into the suspension for high frequencies. To achieve this, the Super Resolution Ultrasound Particle Tracking Velocimetry (SRPTV) was used, which allows a spatial resolution beyond the diffraction limit. Harmonic Imaging is used to image isolated non-linear tracer particles, which are tracked for velocity estimation. The speckle and image distortion due to the induced wavefront distortions are compensated with a coherence weighting beamformer. A spatial resolution of $67 \mu\text{m}$ axial and $30 \mu\text{m}$ lateral to the ultrasound propagation were achieved. Despite the strong scattering of the ultrasound at the zinc particles, a maximum velocity uncertainty of 12.5 % referred to the maximum velocity was achieved for the measurement in the active ZAB. A slip velocity of 3 mm at a maximum velocity of 8 mm was observed. The SRPTV can be applied to other technical processes, where suspension flows in small geometries play an important role.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand an der Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik der Technischen Universität Dresden. Dem Lehrstuhlinhaber Prof. Dr.-Ing. Jürgen Czarkse bin ich zu besonderem Dank verpflichtet, da er die exzellenten Rahmenbedingungen für diese Arbeit geschaffen hat. Ebenso möchte ich Dr. rer. nat. Büttner und Dr.-Ing Richard Nauber für ihre Unterstützung danken. Sie haben mir den Einstieg in die Welt der Wissenschaft durch viele Ratschläge und wertvolle Diskussionen ermöglicht.

An meinen Arbeitsplatz zu kommen, hat mich in meiner Promotionszeit gefreut und motiviert. Das lag vor allem an dem tollen Kollegium, welches ich als engagiert, hilfsbereit und äußerst loyal kennen gelernt habe. Besonders danken möchte ich Dr.-Ing. Robert Kuschmierz (Robby) für viele Diskussionsrunden im Freien. Besonders erwähnt sei außerdem das Hannes-Radner-Gerätezentrum (HRGZ), in dessen Rahmen Hannes Radner mir unzählige Male bei der Überwindung technischer Schwierigkeiten oder mit der Bereitstellung von experimentellem Equipment geholfen hat.

Außerdem haben einige Studenten zum Erfolg des Forschungsvorhabens beigetragen. Dafür möchte ich im Speziellen bei meinen ehemaligen Diplomanden Sören Schusser, David Weik und Franz Grabbert sowie bei Paul Schwentek als Studentische Hilfskraft bedanken.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen eines AiF-Forschungsvorhabens in Kooperation mit dem Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH (ZBT) erarbeitet. Lukas Feierabend hat von Seiten des ZBT das Forschungsvorhaben bearbeitet. Über die Projektzeit ist er nicht nur ein guter Kollege, sondern ein Freund geworden. Die Zusammenarbeit mit ihm hat mich stets motiviert und meinen Arbeitsalltag bereichert. Ich bin sehr froh ihn kennengelernt zu haben.

Danken möchte ich auch meinen Eltern. Ihren Beitrag zu meiner Entwicklung und damit auch zu dieser Arbeit kann ich erst jetzt richtig schätzen, da ich selbst Vater bin. Meiner kleinen Schwester Andrea und ihrem Mann Uli möchte ich für die Nachhilfe in Chemie danken: Am Ende ist eben alles Chemie. Meiner kleinen Familie bestehend aus meiner Frau Elisa und meinem Sohn Mika möchte ich einfach sagen, dass ich unendlich froh bin, dass es sie gibt und sie mich durch diese manchmal nervenaufreibende Zeit mit viel Verständnis und Rückhalt begleitet haben. Euch möchte ich diese Arbeit widmen.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	xiii
Abkürzungsverzeichnis	xv
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielstellung	1
1.2 Stand der Technik	4
1.3 Lösungsansatz und Struktur der Arbeit	8
2 Theoretische Grundlagen	11
2.1 Grundlagen der Schallausbreitung	11
2.1.1 Schallausbreitung in homogenen Medien	11
2.1.2 Schallausbreitung in inhomogenen Medien	13
2.2 Ultraschall Bildgebung	14
2.2.1 Phased-Array-Prinzip	15
2.2.2 Plane wave imaging	16
2.2.3 Grenzen der Schallfeldfokussierung	16
2.3 Messung von Strömungsfeldern	17
2.3.1 Ultraschall-Doppler-Velozimetrie	18
2.3.2 Ultrasound Imaging Velocimetry	19
2.3.3 Ultrasound Particle Tracking Velocimetry	19
2.4 Nichtlineare akustische Effekte	20
2.4.1 Beschreibung von Linearität	20
2.4.2 Interaktion von nichtlinearen Streupartikeln und Schallwelle	20
2.4.3 Harmonic Imaging	21
3 Experimentelle Grundlagen	25
3.1 Charakterisierung der Zinksuspension	25
3.1.1 Zusammensetzung der Zinksuspension	25
3.1.2 Bestimmung von Dämpfung und Schallgeschwindigkeit	26
3.1.3 Bestimmung der spezifischen akustischen Impedanz	29
3.2 Messtechnik	30
3.2.1 Ultraschallforschungsplattform: Phased Array Ultrasound Doppler Velocimeter	30
3.2.2 Ultraschallwandler	32
4 Verfahren zur Strömungsmessung im Modellexperiment	37
4.1 Experimenteller Aufbau	37

4.2	Untersuchung geeigneter Verfahren zur Messung von Strömungsfeldern in der Zinksuspension	38
4.3	Optimierung der Signalverarbeitung und Charakterisierung der Messeigenschaften	44
4.3.1	Geschwindigkeitsnormal	44
4.3.2	Optimierung der Messsystemparameter	45
4.3.3	Charakterisierung der Messeigenschaften	48
4.3.4	Validierung	49
4.4	Messung der Suspensionsströmung im Modellexperiment	55
4.4.1	Messergebnisse	55
4.4.2	Vergleich von Simulation und Messung	58
4.5	Fazit	61
5	Verfahren zur In-situ-Strömungsmessung in einer Zink-Luft-Flussbatterie	63
5.1	Experimenteller Aufbau	63
5.2	Strömungsmessung unterhalb des Beugungslimits - Super Resolution Ultrasound Particle Tracking Velocimetry (SRPTV)	65
5.2.1	Nutzung nichtlinearer Streupartikel	68
5.2.2	Trennung von linearem und nichtlinearem Signalanteil	72
5.2.3	Strahlformung mit Kompensation der Streuung	76
5.2.4	Particle Tracking	80
5.3	Charakterisierung der Messeigenschaften	81
5.3.1	Vorgehen zur Charakterisierung der Messeigenschaften	82
5.3.2	Untersuchung der Positionsunsicherheit	83
5.3.3	Untersuchung der Geschwindigkeitsunsicherheit	92
5.4	Messung an einer aktiven Zink-Luft-Flussbatterie	95
5.4.1	Aufbau und Durchführung	95
5.4.2	Messergebnisse	97
5.4.3	Vergleich von Simulation und Messung	97
5.5	Fazit	102
6	Zusammenfassung und Ausblick	103
6.1	Erkenntnisse und Fortschritt	103
6.1.1	Ultrasound Imaging Velocimetry	103
6.1.2	Super Resolution Ultrasound Particle Tracking Velocimetry	104
6.1.3	Fazit	106
6.2	Ausblick und weiterführende Arbeiten	106
6.2.1	Messtechnik	106
6.2.2	Anwendung	107
	Literaturverzeichnis	109
	Publikationsverzeichnis	117
	Artikel in Zeitschriften mit peer-review	117

Tagungsbeiträge	117
Patente	119

Symbolverzeichnis

Bezeichnung	Beschreibung
c	Schallgeschwindigkeit
g	Konstanter Faktor
α	akustische Dämpfung
τ	Zeitverzögerung bei der Strahlformung
$d_{\text{elevation}}$	Höhe der Ultraschallelemente orthogonal zur Messebene (engl.: elevation direction)
δ	Schrittgröße bei der Quantisierung einer Ortskoordinate
$d_{\text{horizontal}}$	Breite der Ultraschallelemente
ρ	Dichte
f_{Doppler}	Dopplerfrequenz
f	Frequenz
f_{prf}	Pulswiederholrate
$FWHM$	Halbwertsbreite des Fokus (Full Width at Half Maximum)
Z_0	Spezifische akustische Impedanz
i	Index
K	Kompressionsmodul
ω	Kreisfrequenz
l_{iw}	Größe des Interrogation Window
λ	Wellenlänge des Ultraschalls
∇	Nabla-Operator
n_{epp}	Anzahl der Ultraschallaussendungen zur Ermittlung eines Geschwindigkeitswertes (engl.: emissions per profile)
N_{periods}	Anzahl der Perioden in einem Ultraschallpuls
N_{pos}	Anzahl der Messpositionen
N_{el}	Anzahl der Ultraschallwandlerelemente
T	Periodendauer
φ	Signalphase
d_{pitch}	Mittlerer Abstand der Mitte benachbarter Ultraschallelemente
Γ	Betrag des komplexen Reflexionsfaktors
F	relative Messabweichung
Re	Reynolds-Zahl
p	Schalldruck
v_{schnelle}	Schallschnelle
σ_t	Standardunsicherheit der Zeit
σ_v	Vektor der Standardunsicherheit der Strömungsgeschwindigkeit

Bezeichnung	Beschreibung
σ_{v_x}	Standardunsicherheit der Strömungsgeschwindigkeit in x -Richtung
σ_{v_y}	Standardunsicherheit der Strömungsgeschwindigkeit in y -Richtung
σ_{v_z}	Standardunsicherheit der Strömungsgeschwindigkeit in z -Richtung
$\sigma_{\mathbf{x}}$	Vektor der Standardunsicherheit der Position
σ_x	Standardunsicherheit der Position in x -Richtung
σ_y	Standardunsicherheit der Position in y -Richtung
σ_z	Standardunsicherheit der Position in z -Richtung
r	Zeitsignal
r_a	Ausgangssignal
r_e	Eingangssignal
R	Fouriertransformierte eines Zeitsignals
s	empirische Standardabweichung
t	Zeit
v	Strömungsgeschwindigkeit
v_s	Strömungsgeschwindigkeit in Schallausbreitungsrichtung
\mathbf{v}	Strömungsgeschwindigkeitsvektor
v_x	Strömungsgeschwindigkeit in x -Richtung
v_y	Strömungsgeschwindigkeit in y -Richtung
v_z	Strömungsgeschwindigkeit in z -Richtung
v	Volumenanteil
k	Wellenzahl
\mathbf{x}	Ortsvektor
x	kartesische Ortskoordinate x
y	kartesische Ortskoordinate y
z	kartesische Ortskoordinate z

Abkürzungsverzeichnis

Bezeichnung	Beschreibung
2C	zweikomponentig
2D	zweidimensional
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer
ADU	Analog-Digital-Umsetzer
CFD-Simulation	Computational-Fluid-Dynamics-Simulation (dt.: Simulation mittels numerischer Strömungsmechanik)
DAS	Delay-and-Sum-Strahlformer
DGV	Doppler-Global-Velozimetrie
DMAS	Delay-Multiply-and-Sum-Strahlformer
DS-DMAS	Double-Stage Delay-Multiply-and-Sum-Strahlformer
EIS	Elektrische-Impedanz-Spektroskopie
FWHM	Full Width at Half Maximum (dt.: Halbwertsbreite)
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
HB-Modell	Herschel-Bulkley-Modell
HI	Harmonic Imaging (dt.: nichtlineare Bildgebung)
MRV	Magnetresonanz-Velozimetrie
PAA	poly acrylic acid (dt.: Polyacrylsäure)
PAUDV	Phased Array Ultrasound Doppler Velocimeter
PET	Positronen-Emissions-Tomographie
PI	Pulsinversionsverfahren
PIV	Particle Image Velocimetry (dt.: Partikelbild-Velozimetrie)
PMMA	Polymethylmethacrylat
PWC	Plane Wave Compounding
PWI	Plane Wave Imaging (dt.: Bildgebung mit einer ebenen Welle)
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis (engl.: signal-to-noise ratio)
SRPTV	Super Resolution Ultrasound Particle Tracking Velocimetry
UDV	Ultraschall-Doppler-Velozimetrie
UIV	Ultrasound Imaging Velocimetry (dt.: Ultraschall-Partikelbild-Velozimetrie)
ULM	Ultrasound Localization Microscopy
UPTV	Ultrasound Particle Tracking Velocimetry (dt.: Ultraschallgeschwindigkeitsmessung mittels Partikelverfolgung)
ZLFB	Zink-Luft-Flussbatterie

Tabellenverzeichnis

3.1	Zusammensetzung der Zinksuspension.	25
3.2	Größenverteilung der Zinkpartikel. Angabe in vol.-%.	26
3.3	Übersicht der Messparameter für die Messung von Dämpfung und Schallgeschwindigkeit der Zinksuspension.	29
3.4	Spezifikationen für das Phased Array Ultrasound Doppler Velocimeter (PAUDV).	32
3.5	Spezifikationen des Imasonic-Arrays	34
3.6	Spezifikationen des Vermon-Zweifrequenz-Arrays	35
4.1	Anforderungen an das Messsystem für das Modellexperiment.	39
4.2	Parameter und Spezifikationen für die numerische Simulation der Schallausbreitung in der Zinksuspension	39
4.3	Physikalische Eigenschaften der kontinuierlichen und suspendierten Phase der Zinksuspension.	40
4.4	Parameter für die Messung am Geschwindigkeitsnormal.	47
4.5	Parameter für die Messung der Glycerinströmung im Modellexperiment	52
4.6	Parameter für die Messung der Suspensionsströmung und der Elektrolytströmung im Modellexperiment.	56
5.1	Anforderungen an das Messsystem für die Messung in der aktiven ZLFB.	66
5.2	Beiträge zur Positionsunsicherheit bei der Lokalisierung eines Streupartikels und deren Ursachen.	84
5.3	Parameter für die Messung am Positionsnormal.	85
5.4	Beiträge zur Positionsunsicherheit bei der Lokalisierung eines Streupartikels.	92
5.5	Beiträge zur Messunsicherheit der Geschwindigkeit v_x bei der Messung in der ZLFB.	92
5.6	Parameter für die Messung an der aktiven ZLFB.	101

Abbildungsverzeichnis

1.1	Elektrochemische Zelle einer ZLFB mit den für den Zellbetrieb (Entladung) relevanten chemischen Reaktionen.	2
2.1	Schematische Darstellung einiger Elemente eines Ultraschall-Phased-Arrays.	16
2.2	Vergleich von sendeseitiger und empfangsseitiger Fokussierung für einen Fokuspunkt.	17
2.3	Schematische Darstellung der Amplitudenspektren des Anregungssignals und des gestreuten Signals für einen linearen und einen nichtlinearen Streuprozess.	22
2.4	Schematische Gegenüberstellung einer Abbildung mit konventioneller Bildgebung und mit Harmonic Imaging (dt.: nichtlineare Bildgebung) (HI).	23
3.1	Mikroskopische Aufnahme der Zinkpartikel aus Partikelklasse 1.	26
3.2	Messanordnung zur experimentellen Bestimmung von Dämpfung und Schallgeschwindigkeit der Zinksuspension.	27
3.3	Dämpfungskoeffizient α und Schallgeschwindigkeit c der Zinksuspension (Partikelklasse 1) für verschiedene Volumenanteile v der Zinkpartikel	28
3.4	Experimenteller Aufbau zur Messung der akustischen Impedanz der Zinksuspension.	30
3.5	Systemarchitektur des PAUDV. Mit Genehmigung entnommen aus [65].	33
3.6	Schnitt durch das Zweifrequenz-Array.	35
4.1	Links: dreidimensionale Ansicht des Strömungskanals für das Modellexperiment. Der Messbereich befindet sich in z-Richtung mittig. Rechts: Schnitt durch die Messebene.	38
4.2	Simulationsanordnung: Ein Ultraschallpuls wird von einer Punktquelle (rotes Kreuz) zu einem Punktempfänger (blaues Kreuz) durch die Zinksuspension propagiert.	39
4.3	Verteilung des Schalldruckpegels für $t = 3 \mu\text{s}$ nach der Aussendung des Ultraschallpulses.	41
4.4	(a) Überlagerung von empfangenen Signalen für 50 verschiedene Partikelanordnungen (grau), sowie deren Mittelwert (rot). (b) Relative zufällige Standardabweichung $F_{v,zuf}$ in Abhängigkeit des Volumenanteils v der Zinkpartikel für die Geschwindigkeitsschätzung mittels Ultraschall-Doppler-Velozimetrie (UDV) und Ultrasound Imaging Velocimetry (dt.: Ultraschall-Partikelbild-Velozimetrie) (UIV).	43
4.5	Geschwindigkeitsnormal für laterale (links) und axiale (rechts) Strömungskomponente.	45

4.6	Ultraschallbild der Suspension während der Messung im lateralen Geschwindigkeitsnormal.	47
4.7	Oben: relative Messabweichung der axialen (links) und der lateralen Strömungskomponente (rechts), Unten: örtliche Auflösung (links) und Zielfunktion (rechts).	48
4.8	(a) Gemessene Geschwindigkeitsfelder für UIV mit Gaußscher (oben) und parabolischer (mittig) Subpixel-Interpolation sowie das simulierte (unten) Geschwindigkeitsfeld für Glycerin. Messpunkte an denen die Standardabweichung der Geschwindigkeit größer als 2 mm s^{-1} ist, wurden weiß maskiert. (b) Strömungsprofile der x -Komponente der Strömung an ausgewählten x -Positionen.	53
4.9	Standardabweichung der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit für UIV mit Gaußscher (links) und parabolischer (rechts) Subpixel-Interpolation.	54
4.10	Gemessene Strömungsfelder für die Zinksuspension mit $v = 8 \text{ vol.-%}$ (links) und $v = 0 \text{ vol.-%}$ (rechts).	59
4.11	Oben: Strömungsprofile der Komponente v_x für ausgewählte Positionen entlang der x -Richtung. Unten: Messunsicherheit σ_{v_x} . Jeweils für die Zinksuspension mit $v = 8 \text{ vol.-%}$ (links) und $v = 0 \text{ vol.-%}$ (rechts).	60
4.12	Vergleich der gemessenen Strömung mit einer numerischen Simulation basierend auf dem Herschel-Bulkley-Modell (HB-Modell) und dem adaptierten HB-Modell. (a) Geschwindigkeitsfelder, (b) Strömungsprofile der x -Komponente für ausgewählte Positionen entlang der x -Achse.	62
5.1	Explosionsansicht der ZLFB.	64
5.2	Schnitt durch den Strömungskanal der ZLFB.	65
5.3	Prinzip der SRPTV.	68
5.4	(a) Amplitudenspektren der Ultraschallsignale aus der KOH-Lösung mit $300 \mu\text{l}$ der Mikrobläschensuspension sowie für Streupartikel aus Polyamid mit einem mittleren Durchmesser von $20 \mu\text{m}$. Die Frequenzbänder für die Auswertung der Signalenergie in der ersten und zweiten Harmonischen sind blau unterlegt. Das Amplitudenspektrum wurde auf die maximale Amplitude zum Zeitpunkt $t = 0$ normiert. (b) Signalenergie im Frequenzband der zweiten Harmonischen für die KOH-Lösung mit $300 \mu\text{l}$ der Mikrobläschensuspension.	70
5.5	Signalenergie im Frequenzband (vgl. 5.4a) der zweiten (f_2) Harmonischen, wenn das Fluid gepumpt wird.	71
5.6	Schematische Darstellung der Amplituden der ersten und zweiten Harmonischen für verschiedene Fälle.	73
5.7	(a) Vereinfachte, schematische Darstellung des Amplitudenspektrums des empfangenen Signals. (b) Amplitudenspektrum des empfangenen Signals mit und ohne Anwendung des Pulsinversionsverfahrens.	75
5.8	Blockdiagramm des Delay-Multiply-and-Sum-Strahlformers.	77

5.9	Simulationsanordnung für den Vergleich des Delay-and-Sum-Strahlformers (DAS) und des Double-Stage Delay-Multiply-and-Sum-Strahlformers (DS-DMAS).	78
5.10	Vergleich der Abbildung einer Punktschallquelle für den Delay-and-Sum-Strahlformer (DAS) und den Double-Stage Delay-Multiply-and-Sum-Strahlformer (DS-DMAS).	79
5.11	Schematische Darstellung (a) und Bild (b) der experimentellen Anordnung zur Erzeugung des Positionsnormals	86
5.12	Darstellung der aus den Ultraschallbildern ermittelten Positionen (Messung) und der tatsächlichen Position (Referenz) des Streukörpers.	87
5.13	Systematische Abweichung der x - und y -Position zwischen Messung und Referenz.	88
5.14	Unsicherheit der Positionsbestimmung eines Streupartikels in Abhängigkeit des Signal-Rausch-Verhältnisses.	89
5.15	Simulationsanordnung für die Charakterisierung der zufälligen Messabweichung aufgrund der Zinkpartikel bei der Positionsbestimmung einer Punktquelle.	90
5.16	Abbildung der Punktschallquelle ($x = 0$ mm, $y = 4$ mm) aus der numerischen Simulation für vier verschiedene zufällige Anordnungen der Zinkpartikel.	91
5.17	Bilder der geöffneten ZLFB (links) und der experimentellen Anordnung (rechts).	95
5.18	Vergleich der bei der Messung in der ZLFB aufgenommenen Ultraschallbilder mit (a) dem Delay-and-Sum-Strahlformer (DAS) und (b) dem Double-Stage Delay-Multiply-and-Sum-Strahlformer (DS-DMAS).	96
5.19	Links: Ergebnis der Strömungsmessung in der betriebenen ZLFB. Die aus den einzelnen Trajektorien ermittelten Geschwindigkeiten $v_{x,i}$ sind als graue Punkte dargestellt. Dabei wurden nur Geschwindigkeiten berücksichtigt, welche im $3\sigma_{v_x}$ -Intervall um den Mittelwert der Geschwindigkeit v_x liegen. Das Strömungsprofil wurde mit einem Polynom vierten Grades approximiert (grüne Linie, gekennzeichnet durch "fit "). Rechts: Beiträge zur Geschwindigkeitsunsicherheit sowie Gesamtunsicherheit der Geschwindigkeit	98
5.20	Vergleich von gemessenem und simuliertem Strömungsprofil in der aktiven ZLFB.	100