

KIT SCIENTIFIC REPORTS 7683

Experimentelle Untersuchung der Tropfenabscheidung einer horizontalen, entgegengerichteten Wasser/Luft-Schichtenströmung

Stephan Gerhard Gabriel

Stephan Gerhard Gabriel

Experimentelle Untersuchung der Tropfenabscheidung einer horizontalen, entgegengerichteten Wasser/Luft-Schichtenströmung

Karlsruhe Institute of Technology
KIT SCIENTIFIC REPORTS 7683

Experimentelle Untersuchung der Tropfenabscheidung einer horizontalen, entgegengerichteten Wasser/Luft-Schichtenströmung

von

Stephan Gerhard Gabriel

Report-Nr. KIT-SR 7683

Dissertation, Universität Stuttgart
Fakultät für Energie-, Verfahrens- und Biotechnik, 2014
Tag der mündlichen Prüfung: 24. Januar 2014

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover – is licensed under the
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2015

ISSN 1869-9669

ISBN 978-3-7315-0283-8

DOI: 10.5445/KSP/1000043592

Experimentelle Untersuchung der Tropfenabscheidung einer horizontalen, entgegen-gerichteten Wasser/Luft- Schichtenströmung

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

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Stephan Gerhard Gabriel

aus Basel (Schweiz)

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. habil. E. Laurien

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. T. Schulenberg

Tag der mündlichen Prüfung: 24.01.2014

Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE) der Universität
Stuttgart

2014

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand am Institut für Kern- und Energietechnik (IKET) des Karlsruher Instituts für Technologie. In dieser Zeit ist mir die Unterstützung von vielen Menschen zuteil geworden, bei denen ich mich an dieser Stelle bedanken möchte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Eckart Laurien, Leiter der Abteilung Thermofluidodynamik am Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE) in Stuttgart, danke ich für die Unterstützung dieser Arbeit und die Übernahme des Hauptreferats. Dem Institutsleiter des IKET, Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Schulenberg, möchte ich für die Übernahme des Koreferats und insbesondere auch für viele Hinweise und Anregungen während der Entstehung der Arbeit danken.

Für die gute Zusammenarbeit und viele gute Gespräche möchte ich mich bei Amine Ben Hadj Ali bedanken, der in Stuttgart die Herausforderungen der Modellierung geschichteter Zweiphasenströmungen bearbeitet hat.

Mein Dank für das stetige Interesse und die Unterstützung meiner Arbeit gilt außerdem dem heutigen Leiter der Gruppe Unfallanalysen Herrn Dr.-Ing. Alexei Miassoedov sowie dem ehemaligen Gruppenleiter Herrn Dr.-Ing. Leonard Meyer. Vielen Dank auch an Giancarlo Albrecht, der mich mit unzähligen praktischen Tipps versorgt und immer wieder angespornt hat. Allen Mitgliedern der Gruppe Unfallanalysen möchte ich für die herzliche Aufnahme und die tatkräftige Unterstützung besonders beim Auf- und Umbau der Versuchsanlage danken.

Im Rahmen des Forschungsprojektes haben außerdem zahlreiche Studierende an den Experimenten mitgewirkt. Auch bei ihnen möchte ich mich dafür bedanken, dass sie mir während dieser gemeinsamen Zeit ihre Arbeitskraft und ihre Ideen zur Verfügung gestellt haben. Dies gilt insbesondere für Roland Kuschill, Benedikt Höß, Eva Schüler, Katharina Hauer, Steffen Haase, Oleg Saburow und Florian Kaiser. Vielen Dank für Eure Fragen, für Eure Antworten auf meine Fragen und für Euer Engagement bei der Arbeit.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Freundin Jeannette Pfattheicher und den vielen Menschen in meinem beruflichen und privaten Umfeld bedanken, die diese Arbeit mit stetigem Interesse begleitet und gelegentlich auch mit konkretem Rat unterstützt haben.

Abstract

Experimental investigation of droplet separation in a horizontal counter-current air/water stratified flow

A stratified counter-current two-phase gas/liquid flow can occur in various technical systems. In the past investigations have mainly been motivated by the possible occurrence of these flows in accident scenarios of nuclear light water-reactors and in numerous applications in process engineering. However, the precise forecast of flow parameters, is still challenging, for instance due to their strong dependency on the geometric boundary conditions.

A new approach which uses CFD methods (Computational Fluid Dynamics) promises a better understanding of the flow phenomena and simultaneously a higher scalability of the findings. RANS methods (Reynolds Averaged Navier Stokes) are preferred in order to compute industrial processes and geometries. A very deep understanding of the flow behavior and equation systems based on real physics are necessary preconditions to develop the equation system for a reliable RANS approach with predictive power. Therefore, local highly resolved, experimental data is needed in order to provide and validate the required turbulence and phase interaction models.

The central objective of this work is to provide the data needed for the code development for these unsteady, turbulent and three-dimensional flows. Experiments were carried out at the WENKA facility (Water Entrainment Channel Karlsruhe) at the Karlsruhe Institute of Technology¹ (KIT). The work consists of a detailed description of the test-facility including a new bended channel, the measurement techniques and the experimental results. The characterization of the new channel was done by flow maps. A high-speed imaging study gives an impression of the occurring flow regimes, and different flow phenomena like droplet separation. The velocity distributions as well as various turbulence values were investigated by particle image velocimetry (PIV). In the liquid phase fluorescent tracer-particles were used to suppress optical reflections from the phase surface (fluorescent PIV, FPIV). Measurements in the gaseous phase were carried out by conventional oil-droplets as tracer particles. The volumetric phase distribution was investigated by the new OVM method, which was developed within this work. The validation of this method was done by simultaneous measurements of the new method and an electrical conductivity probe in the WENKA channel. Finally, the droplet mass flux was measured by an isokinetic sampling probe, which was also developed within this work. The functional capability of the probe and the accuracy of isokinetic conditions were demonstrated by PIV-measurements under various flow conditions.

The investigations include both supercritical and subcritical, stratified flows, with partially and fully reversed conditions. The behavior of both fluids was analyzed at four measurement sites and under 31 different volumetric flux conditions. The results include sequences of images and numerical data, providing an accurate impression of the flow behavior in the channel. This dataset can now be used for the development and validation of new turbulence and phase interaction models for stratified counter-current two-phase flows.

¹Institute for Nuclear and Energy Technologies (IKET)

Kurzfassung

Experimentelle Untersuchung der Tropfenabscheidung an einer horizontalen, entgegengerichteten Wasser-Luft-Schichtenströmung

Entgegengerichtete und geschichtete Zweiphasenströmungen aus einem Gas und einer Flüssigkeit treten in verschiedenen verfahrenstechnischen Anlagen und auch in Störfallszenarien von Leichtwasserreaktoren auf. Die Prognose dieser Strömungen stellt bis heute eine Herausforderung dar. Ein neuer Ansatz mit Hilfe von CFD-Methoden (Computer Fluid Dynamics) verspricht eine detailliertere Beschreibung der auftretenden Strömungsphänomene bei gleichzeitig verbesserter Skalierbarkeit. Zur Validierung der erforderlichen Turbulenz- und Phasenwechselwirkungsmodelle werden jedoch hoch aufgelöste experimentelle Daten dieser dreidimensionalen, instationären und turbulenten Strömungen benötigt.

Das vorrangige Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die benötigten Messdaten für die Modellentwicklung und Validierung von CFD-Modellen entgegengerichteter Zweiphasenströmungen mit Tropfenablösung bereitzustellen. Die notwendigen Versuche wurden an der WENKA-Anlage des Karlsruher Instituts für Technologie¹ (KIT) durchgeführt. Die Arbeit beinhaltet eine ausführliche Beschreibung der Anlage mit einem neuen Knickkanal und der Messtechnik sowie die Ergebnisse der Untersuchungen. Zur Charakterisierung des neuen Kanals wurde zunächst eine dimensionsbehaftete Strömungskarte erstellt und eine Hochgeschwindigkeitsstudie zur Phänomenologie durchgeführt. Die Geschwindigkeitsverteilung und die Geschwindigkeitsfluktuationen wurden mit Particle Image Velocimetry (PIV) gemessen. Bei den Messungen in der Flüssigphase wurde dabei auf fluoreszierende Tracerpartikel (FPIV) zurückgegriffen, um optische Effekte an den Phasengrenzflächen der Strömung auszublenden. Die Messungen in der Gasphase wurden mit konventionellem Aufbau durchgeführt. Für die Messung der Phasenverteilung konnte das neue optische Messverfahren OVM entwickelt und angewendet werden. Die Validierung dieses Messverfahrens geschah anhand simultaner Vergleichsmessungen mit einer Kontaktsonde. Für die Untersuchung der Tropfenmassenstromdichte konnte eine Nulldrucksonde entwickelt und verwendet werden. Die Funktionsfähigkeit der Sonde und die Einhaltung isokinetischer Strömungsbedingungen an der Messstelle konnten in einphasiger Strömung anhand von PIV-Messungen demonstriert werden.

Die Untersuchungen umfassen sowohl schießende als auch fließende, teilweise sowie vollständig umgekehrte Strömungszustände. Die Zweiphasenströmung wurde bei 31 verschiedenen Volumenstromkombinationen Luft/Wasser und an vier unterschiedlichen Messpositionen eingehend untersucht. Bilddaten und Messergebnisse zeigen ein detailliertes Bild der ablaufenden Phänomene im Strömungskanal. Damit steht nun ein umfangreicher Datensatz für die Entwicklung und Validierung von CFD-Modellen zur Verfügung.

¹Institut für Kern- und Energietechnik (IKET)

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	vii
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Grundlagen und Stand der Forschung.....	4
1.2.1. Wellenentstehung und Ausbreitung	4
1.2.2. Hydraulischer Sprung	8
1.2.3. Tropfenentstehung und Tropfentransport.....	9
1.2.4. Gegenstrombegrenzung	13
1.2.5. CFD-Modellierung geschichteter Zweiphasenströmungen mit Tropfenabriss...	17
1.2.6. Validierungsexperimente für die CFD-Modellierung geschichteter Zwei- phasenströmungen.....	18
1.3. Zielsetzung der Arbeit.....	20
2. Versuchsstand	21
2.1. Aufbau und Instrumentierung der WENKA-Anlage	21
2.2. Aufbau des Knickkanals	23
3. Messtechnik	27
3.1. Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsschwankung	27
3.1.1. Messprinzip	27
3.1.2. PIV-Messungen in der Gasphase.....	31
3.1.3. PIV-Messungen in der flüssigen Phase	33
3.1.4. Kalibrierung und Auswerteverfahren.....	34
3.2. Messung des Luftvolumenanteils.....	36
3.2.1. Elektrische Kontaktsonde	37
3.2.2. Optische Methode zur Messung der volumetrischen Phasenverteilung, OVM..	38
3.2.3. Validierung und Fehlerbetrachtung.....	42
3.3. Messung des Tropfenmassenstroms mit einer Nulldrucksonde	44
3.3.1. Messprinzip	45
3.3.2. Aufbau und Funktion.....	46
3.3.3. Betriebsgrenzen der Nulldrucksonde.....	53
4. Ergebnisse	55
4.1. Charakterisierung der Strömungsformen.....	55
4.1.1. Schießende Strömung.....	56
4.1.2. Schießende Strömung mit Tropfenabriss.....	56
4.1.3. Teilweise umgekehrte Strömung	59
4.1.4. Vollständig umgekehrte Strömung.....	61

4.2. Strömungsformenkarten	61
4.3. Messpositionen und Messmatrix.....	65
4.4. Schießende Strömung	67
4.4.1. Entwicklung bei variablem Luftvolumenstrom	71
4.4.2. Entwicklung bei variablem Wasservolumenstrom	76
4.5. Teilweise umgekehrte Strömung	80
4.5.1. Entwicklung bei variablem Luftvolumenstrom	85
4.5.2. Entwicklung bei variablem Wasservolumenstrom	92
5. Zusammenfassung	101
6. Literaturverzeichnis	105
Anhang	111
Anhang A - Abmessungen der Teststrecke.....	111
Anhang B - Messmatrix	112
Anhang C - Messpositionen.....	114
Anhang D - Messergebnisse.....	115
Anhang E - Einstellungen PIV Postprocessing	201

Nomenklatur

Symbol	Bedeutung	Einheit
<u>Lateinische Zeichen</u>		
A	Querschnittsfläche	m ²
a, b, l	Abstand	m
C1, C	Konstante, Konstante (Wallis Kriterium)	-
d	Innendurchmesser	m
D	Außendurchmesser	m
g	Gravitationskonstante	m/s ²
h	Schichtdicke	m
I	normierte Intensität (Licht)	W/m ²
\bar{I}	zeitl. gemittelte, normierte Intensität (Licht)	W/m ²
j	dimensionslose Leerrohrgeschwindigkeit	-
k	turbulente kinetische Energie	m ² /s ²
L	Länge	m
LR	Wasserlieferungsrate	-
m	Konstante (Wallis-Kriterium)	-
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
N	Anzahl Einzelmessungen	-
p	Druck	Pa
R	Radius	m
t, t'	Zeit	s
T	Gesamtmessdauer	s
U	mittlere Geschwindigkeit	m/s
u _{kS}	Leerrohrgeschwindigkeit der Phase k	m/s
u, v, w	momentane Geschwindigkeit in x-, y-, z-Richtung	m/s
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	zeitlich gemittelte Geschwindigkeitskomponente	m/s
u', v', w'	momentane Geschwindigkeitsschwankung	m/s
$-\rho \overline{u'v'}$	Reynolds'sche Schubspannung	m/s
\dot{V}	Volumenstrom	l/s
x	horizontale Koordinate	mm
y	vertikale Koordinate	mm
y*	vertikale Koordinate relativ zum Luftleitblech y*=y+20mm	mm
z	Tiefenkoordinate	mm
Δp	Druckdifferenz	Pa

Symbol	Bedeutung	Einheit
--------	-----------	---------

Griechische Zeichen

α	volumetrischer Phasenanteil	-
δ	Schwankungsgröße	-
ε	Unsicherheit der Schwankung	-
ε^G	volumetrischer Gasanteil	-
μ	dynamische Viskosität	Pa·s
π	Kreiszahl Pi	-
ρ	Dichte	kg/m ³
σ	Oberflächenspannung	N/m
τ	Zeitskala	-
φ	Winkel gegenüber der Horizontalen	°

Indizes

char	charakteristisch
dyn	dynamisch
G	Gas, bezogen auf die Gasphase
i	Laufindex
k	Phasenindikator
krit	kritisch
L	Liquid, bezogen auf die Flüssigphase
mess	bezogen auf die Messung
stat	statisch
total	bezogen auf das Ganze
ein	in das Kontrollvolumen einströmend
aus	aus dem Kontrollvolumen ausströmend
rück	Entgegengerichtet, aus dem Kontrollvolumen ausströmend

Dimensionslose Kennzahlen

Bo	Bond-Zahl
Fr	Froude-Zahl
Ku	Kutateladze-Zahl
Oh	Ohnesorge-Zahl
Re	Reynolds-Zahl
St	Stokes-Zahl
We	Weber-Zahl

Abkürzungen

CCFL	Counter-Current-Flow-Limitations
ND:YAG	Neodym dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
OVM	Optical Void Measurement
PIV	Particle Image Velocimetry
PMMA	Polymethylmethacrylat
RH-B	Rhodamin-B
RMS	Roote Mean Square
RSS	Roote Sum Square
UPTF	Upper Plenum Test Facility
WENKA	Water Entrainment Channel Karlsruhe

„Das Wasser ist ein freundliches Element für den, der damit bekannt ist und es zu behandeln weiß.“

Aus „Die Wahlverwandtschaften“ (1809) von Johann Wolfgang von Goethe.

1. Einleitung

1.1. Motivation

Strömungen aus mehreren, nicht mischbaren Fluiden werden als Mehrphasenströmungen bezeichnet und kommen sowohl in der Natur als auch in einer Vielzahl von technischen Anwendungen vor. Die besondere Komplexität von Mehrphasenströmungen entsteht durch die Interaktion der Fluide, die in den drei Zuständen fest, flüssig oder gasförmig vorliegen und gegebenenfalls stark unterschiedliche Eigenschaften aufweisen können. In der technischen Praxis wird das Verhalten einer Zweiphasenströmung dann zur Herausforderung, wenn Funktion oder Sicherheit eines technischen Systems direkt von der Qualität und den Eigenschaften der Strömung abhängt. Beispiele finden sich auf vielen Gebieten: Kavitation beim Pumpen von Flüssigkeiten, Tropfenschlag in Dampfturbinen, Siedephänomene in Kühlsystemen oder der Wasserhammer sind nur einige Beispiele, die veranschaulichen, wie komplex alleine das Zweiphasen-System „Wasser-Dampf“ ist.

Obwohl die zweiphasige Durchströmung von Rohren und Kanälen für den Laien auf den ersten Blick trivial erscheint, ist die Prognose des Verhaltens dieser Strömungen noch immer Gegenstand der Forschung. Grundsätzlich wird dabei zwischen gleichgerichteten Strömungen (*engl. co-current flow*) und entgegengerichteten Strömungen (*engl. counter-current flow*) unterschieden. Die Gegenstrombegrenzung (*engl. Counter-Current-Flow-Limitation, CCFL*) ist ein Phänomen, das in entgegengerichteten, geschichteten Rohrströmungen aus einer Flüssigkeit und einem Gas auftreten kann. Sie wurde bisher meist im Zusammenhang mit Unfallanalysen zur Vorhersage des Systemverhaltens von Kernkraftwerken untersucht. Die Gegenstrombegrenzung kann auftreten, wenn im Laufe eines Kühlmittelverluststörfalls (*Loss Of Coolant Accident, LOCA*) Dampf in den heißen Strang eines Druckwasserreaktors eindringt (Abbildung 1-1).

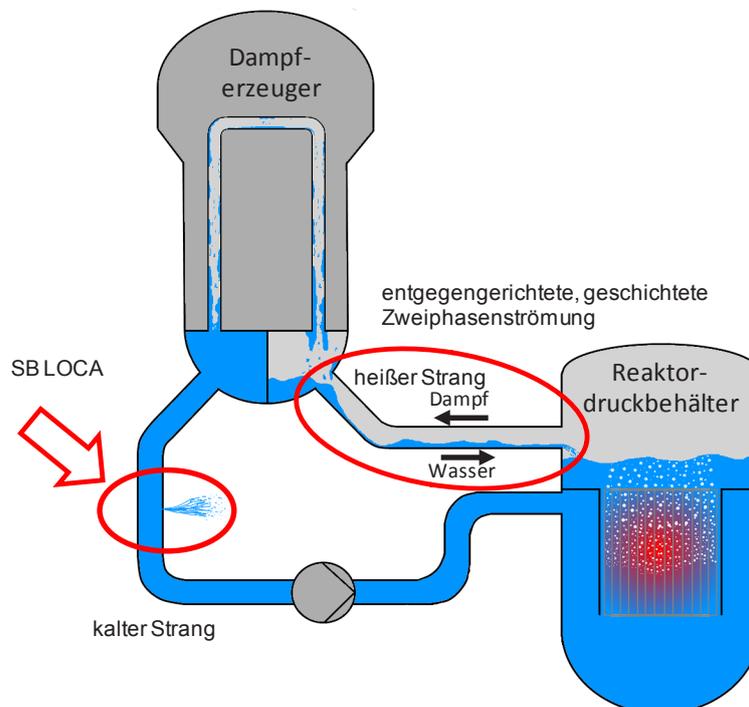


Abbildung 1-1 Zustand des Primärkreises eines Druckwasserreaktors im Reflex-Condensator-Mode

Der Dampf strömt in diesem hypothetischen Fall aus dem überhitzten und teilweise freiliegenden Kern durch den heißen Strang in den Dampferzeuger, kondensiert dort und fließt teilweise wieder zurück in den heißen Strang (Reflux-Condensator-Mode). Dort bildet sich dann eine entgegengerichtete und geschichtete Zweiphasenströmung aus [Mayinger 1993, 43].

Mit zunehmender Relativgeschwindigkeit zwischen Flüssigkeit und Dampf wird der Impulsaustausch zwischen den Fluiden immer intensiver. Die Gegenstrombegrenzung tritt dann ein, wenn die Gasphase die Flüssigphase so stark verzögert, dass ein hydraulischer Sprung entsteht und die zunächst schießende Strömung in eine fließende Strömung übergeht. An der Phasengrenzfläche entsteht dabei ein intensiver Impulsaustausch, durch den ein großer Anteil der Flüssigkeit, entgegen der ursprünglichen Fließrichtung, vom Dampf mitgerissen werden kann. Die Gegenstrombegrenzung kann unter Umständen innerhalb kurzer Zeit zu einer deutlichen Minderung des zur Verfügung stehenden Kühlmittels im Reaktor führen. Sie ist insofern sicherheitsrelevant. Die Prognose des Verhaltens dieser geschichteten Strömung stellt die Hersteller und Betreiber angesichts der möglichen sprunghaften Änderung des Systemverhaltens vor enorme Herausforderungen. Schließlich müssen Funktion und Sicherheit entsprechender Anlagen, auch unter Einbeziehung dieses stark vom Normalzustand abweichenden Systemzustands, gewährleistet und nachweisbar sein. Dabei kann das Verhalten geschichteter Zweiphasenströmungen in Kernreaktoren, ebenso wie in Pipelines oder Anlagen der chemischen und petrochemischen Industrie, auftreten. Konkrete Beispiele sind Öl- und Gaspipelines, Kühlgeräte, Rückflusskondensatoren und Wälzlager, deren fehlerfreie Funktion von entscheidender technischer Bedeutung ist [De Sampiano 2008, 14, Hashmi 2012, 23, Kumara 2010, 35, Navarro 2005, 48, Wallis und Dobson 1973, 71].

Erforderlich ist daher ein tiefgehendes Verständnis der Zusammenhänge und darüber hinaus die Verbesserung der Vorhersagbarkeit auftretender Phänomene, in Abhängigkeit der jeweiligen Randbedingung der konkreten Anwendungen. Aufgrund der zahlreichen Einzelphänomene, aus deren Kumulation schließlich die Gegenstrombegrenzung resultiert, ist gerade die Prognose des Strömungsverhaltens in solchen Systemen komplex. Die auftretenden Phänomene sind überwiegend dreidimensional und oft stark von den lokalen Bedingungen abhängig, sie können deshalb nur zum Teil analytisch beschrieben werden. Die Modellierung in CFD-Codes (*engl. Computational Fluid Dynamics, CFD*) ist deshalb ein vielversprechender Ansatz, um Zusammenhänge und Abläufe in diesen komplexen Strömungen zu verstehen und vorherzusagen. Zur Modellbildung und Validierung von CFD-Codes werden jedoch hochauflösende, experimentelle Daten benötigt. Es gilt, alle möglichen Strömungsformen und die Übergänge zwischen den Strömungsformen ausreichend genau zu beschreiben.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der qualitativen und quantitativen Erfassung der Strömungsparameter der entgegengerichteten und geschichteten Luft-Wasser-Strömung in einem abstrakten Knickkanal. Ziel ist die Bereitstellung lokal hochaufgelöster Daten, die es erlauben, die auftretenden Strömungsformen exakt zu beschreiben und darauf basierend CFD-Codes entwickeln und validieren zu können. Dabei steht die geometrische Ähnlichkeit des untersuchten Kanals zur realen Anwendung im Kernreaktor im Hintergrund. Vielmehr sollen die auftretenden Strömungsformen und Phänomene in einem abstrakten Kanal

untersucht und damit ein Validierungsfall geschaffen werden. Diese Arbeit reiht sich somit an die vorangegangenen Arbeiten von M. Gargallo 2004 [19] und T. Stähler 2007 [62] an.

Die Arbeit ist wie folgt gegliedert:

- In Kapitel 1 werden die wichtigsten Grundlagen zum Verständnis der ablaufenden Prozesse in einer entgegengerichteten und geschichteten Zweiphasenströmung vermittelt. Maßgebliche Vorgänge wie Wellenentstehung und Ausbreitung, die Entstehung eines hydraulischen Sprungs, Tropfenentstehung und -transport sowie die Gegenstrombegrenzung werden vorgestellt. Schließlich wird in einem kurzen Abriss auf den Stand der Wissenschaft eingegangen.
- Kapitel 2 beschäftigt sich mit der WENKA-Anlage am Karlsruher Institut für Technologie, an der die in dieser Arbeit vorgestellten Experimente durchgeführt wurden. Funktion und Veränderungen gegenüber dem Aufbau der vorangegangenen Arbeiten werden erläutert.
- Die bei den Versuchen verwendeten Messmethoden und Instrumente werden in Kapitel 3 vorgestellt. Neben der prinzipiellen Funktionsweise werden insbesondere auch die Messunsicherheiten der verwendeten Geräte betrachtet. Besonders hervorzuheben ist dabei die neue optische Messmethode zur Ermittlung der Phasenanteile (*engl. Optical Void Measurement, OVM*) und die Entwicklung einer isokinetischen Probeentnahmesonde (Nulldrucksonde) für die Bestimmung der Tropfenmassenstromdichte.
- Kapitel 4 geht ausführlich auf die durchgeführten Experimente und deren Ergebnisse ein. Zunächst wird die Phänomenologie der auftretenden Strömungszustände anhand von Einzelbildern und Bildsequenzen einer Hochgeschwindigkeitsstudie erläutert. Dann werden einige ausgewählte Messergebnisse aus den durchgeführten Experimenten mit Particle Image Velocimetry (PIV), der erstmals vorgestellten optischen Messmethode Optical Void Measurement (OVM) sowie mit der entwickelten Nulldrucksonde diskutiert.
- In Kapitel 5 ist schließlich eine Zusammenfassung der Arbeit zu finden.
- Im Anhang findet sich eine Zusammenstellung verschiedener Dokumente. Darunter befinden sich technische Zeichnungen des verwendeten Kanals und eine Zusammenstellung aller Messergebnisse, die bei den Experimenten im Rahmen dieser Arbeit gewonnen werden konnten.

1.2. Grundlagen und Stand der Forschung

Eine Zweiphasenströmung ist eine Strömung aus zwei Fluiden, die in den Aggregatzuständen fest, flüssig oder gasförmig vorliegen können. Man unterscheidet zwischen der *Zweiphasen-Einkomponentenströmung*, bei der die Fluide aus unterschiedlichen Aggregatzuständen des gleichen Stoffs bestehen (Wasser/Wasserdampf) und der *Zweiphasen-Zweikomponentenströmung*, bei der zwei unterschiedliche Stoffe (Wasser/Luft) an der Strömung beteiligt sind. Eine geschichtete Strömung entsteht im Schwerfeld der Erde, wenn sich zwei kontinuierliche Komponenten einer Zweiphasenströmung entsprechend ihrer Dichte anordnen. Grundsätzlich können die Phasen jedoch auch diskontinuierlich (*dispers*) vorliegen, beispielsweise die Flüssigphase in einer Tropfenströmung. Strömen beide Fluide in die gleiche Richtung, spricht man von einer gleichgerichteten Strömung. Bewegen sich die Fluide in inversen Strömungsrichtungen, wird dies als entgegengerichtete Strömung bezeichnet.

Zweiphasenströmungen können, wie auch einphasige Strömungen, durch die kontinuumsmechanischen Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie beschrieben werden. Dabei liefert die *Direkte Numerische Simulation* (DNS) eine vollständige Lösung der Erhaltungsgleichungen. Aufgrund des immensen numerischen Aufwandes der DNS ist diese jedoch bei komplexeren Strömungen bis heute ein Instrument der Grundlagenforschung. Für technische Anwendungen finden Simulationsmethoden mit gröberer Auflösung Verwendung. Beispielsweise löst die Grobstruktursimulation (*engl. Large Eddy Simulation, LES*) Wirbel bis zu einer definierten Größe auf, alle kleineren Wirbel werden modelliert. Diese Form der Beschreibung erfordert jedoch eine Validierung der eingesetzten Modelle anhand von experimentellen Daten [Laurien 2011, 37].

Das Strömungsverhalten entgegengerichteter, geschichteter Zweiphasenströmungen wurde bereits intensiv untersucht und in zahlreichen Veröffentlichungen betrachtet. Zusammenfassungen finden sich in den Artikeln von Bankoff und Lee 1986 [4] sowie von Al Issa und Macian 2011 [2].

1.2.1. Wellenentstehung und Ausbreitung

Eine Zweiphasenströmung kann in einem horizontalen Rohr mehrere unterschiedliche Strömungsformen annehmen. Der einfachste Fall ist eine stabile Schichtung der Fluide, bei der das leichtere Fluid über dem mit der höheren Dichte strömt (siehe Abbildung 1-2). Diese Schichtenströmungen sind allerdings nur für kleine Durchflussraten stabil. Wenn die Durchflussraten gesteigert werden, ergeben sich wellige Strömungsformen und, bei ausreichend hohen Strömungsgeschwindigkeiten, auch Tropfen oder Blasenströmungen. Stabilisierend wirkt dabei die Schwerkraft, destabilisierend hingegen die dynamischen Druckkräfte an der Phasengrenzfläche.

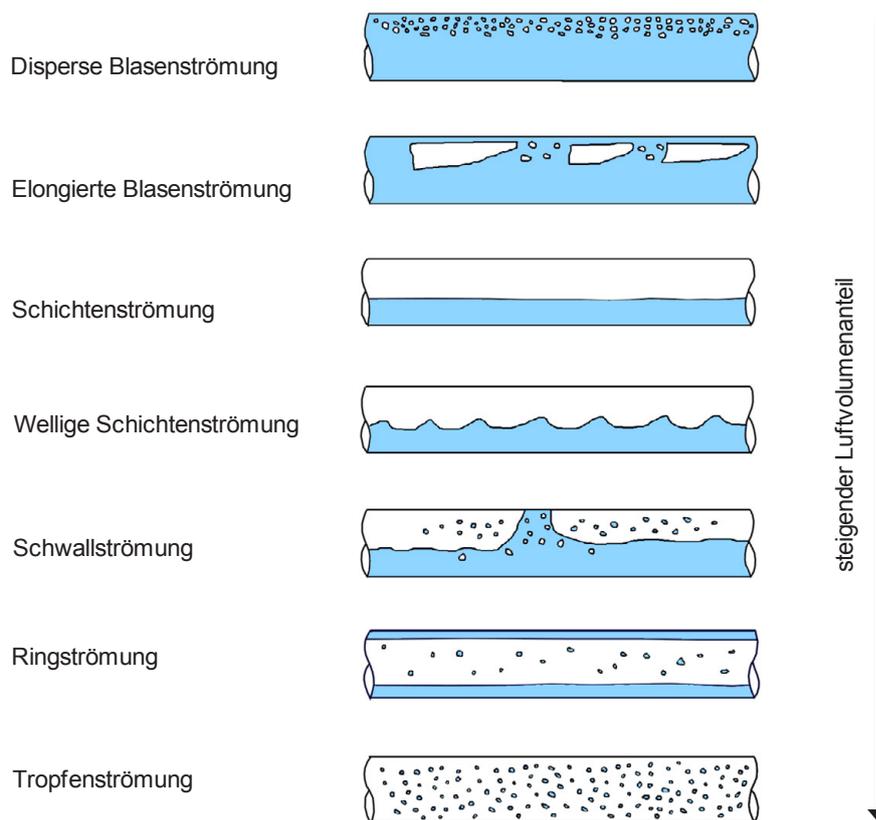


Abbildung 1-2 Strömungsformen im horizontalen Rohr, in Anlehnung an Baer und Stephan 1998 sowie an Dukler und Taitel 1986 [3,16]

Experimentell ermittelte Grenzen zwischen verschiedenen Strömungsformen werden häufig in Strömungskarten erfasst. Wie in Abbildung 1-3 zu sehen ist, werden die Strömungsformen über den Leerrohrgeschwindigkeiten beider Fluide aufgetragen. Dazu wird die Strömung im gesamten Parameterbereich durch visuelle Beobachtung den verschiedenen Strömungsformen zugeordnet. Um Fehler bei der subjektiven Beurteilung des Strömungszustandes zu vermeiden, können Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, Druckmessungen, röntgentomographische Methoden oder auch Leitwertsonden eingesetzt werden [16].

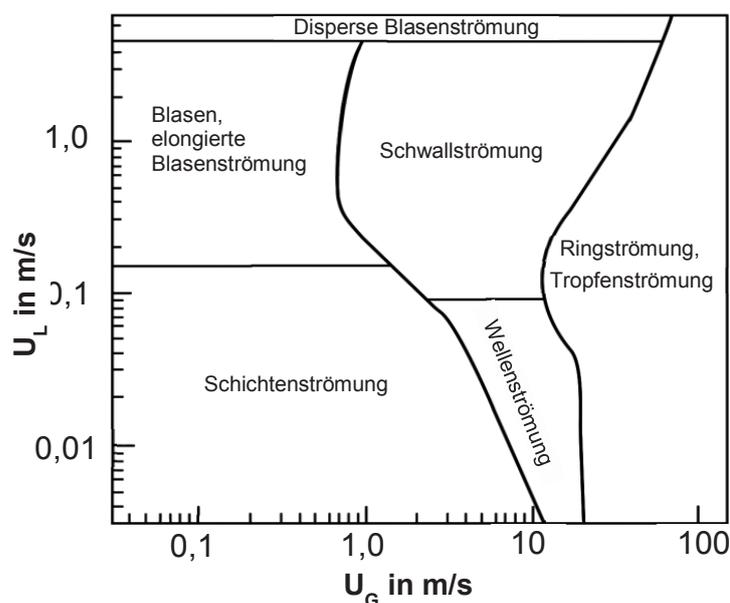


Abbildung 1-3 Strömungskarte für Zweiphasenströmungen Gas/Flüssigkeit im horizontalen Rohr, angelehnt an Mandhane et al. 1974 [42]

Wenn zwei Fluide übereinander strömen, kann das Wellenwachstum als Kelvin-Helmholtz-Instabilität beschrieben werden. Demzufolge wachsen Wellen aus infinitesimal kleinen Störungen der Phasengrenzfläche. Die Gasströmung muss nach Bernoulli beim Überströmen dieser kleinen Wellen beschleunigen (siehe Abbildung 1-4). Deshalb sinkt der statische Druck über dem Wellenkamm. Der so entstehende Sog-Effekt lässt die Welle wachsen und verstärkt sich damit selbst.

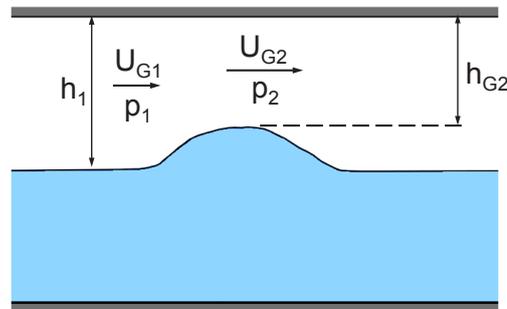


Abbildung 1-4 Wellenwachstum einer einzelnen Welle, in Anlehnung an Taitel und Dukler 1976 [16]

Als Kriterium für das Einsetzen dieser Instabilität leiten Taitel und Dukler [16] eine kritische Relativgeschwindigkeit u_{krit} (Gleichung 1-1) zwischen Gas und Flüssigkeit her, die von der Dichte beider Fluide ρ_L , ρ_G , der Schichtdicke des Flüssigkeitsfilms h_L und der Erdbeschleunigung abhängt.

$$u_{\text{krit}} > C_1 \left[\frac{g(\rho_L - \rho_G)h_L}{\rho_G} \right]^{1/2} \quad 1-1$$

Der Faktor C_1 hängt von der Größe der betrachteten Welle ab und nimmt für infinitesimal kleine Wellen den Wert eins an. Mishima und Ishii berechneten auf Basis der Theorie der am schnellsten wachsenden Welle einen Faktor $C_1 = 0,487$ als Kriterium für die Entstehung einer Schwallströmung (siehe Abbildung 1-2) im horizontalen Rohr. Dieser empirisch ermittelte Faktor bezieht die Verstärkungswirkung der oberen Wand in einer Rohrströmung mit ein. Die räumliche Begrenzung durch die obere Wand zwingt die Gasphase zu einer stärkeren Beschleunigung beim Überströmen von Wellen als bei einer offenen *Gerinneströmung* [Mishima und Ishii 1980, 46]. Aus Kapillarwellen mit kleiner Amplitude bildet sich so zunächst eine Welle, die sich über die vollständige Breite des Kanals erstreckt. Durch eine Steigerung der Luftgeschwindigkeit brechen die Wellen auf und es entsteht eine Oberfläche aus zahlreichen dreidimensionalen Wellen mit kleiner Amplitude.

Wenn die Relativgeschwindigkeit zwischen Gas- und Flüssigphase nicht für die Entwicklung einer Schwallströmung ausreicht, entstehen kleine 2D-Wellen quer zur Hauptströmungsrichtung. Die Wellenkämme sind exponiert und damit stärker der Gasströmung ausgesetzt als die übrige Phasengrenzfläche. Anhand der Erhaltungsgleichung für die Masse kann gezeigt werden, dass sich die Wellenkämme in einer solchen Schichtenströmung schneller bewegen als die darunter befindliche Kernströmung [Lighthill und Whitham 1955, 40]. Deshalb werden die Flanken der Wellen an der stromab gelegenen Seite steiler als die der Luftströmung zugewandten. Die Wellen beginnen dann zunehmend auf der Kernströmung über sich selbst abzurollen, weshalb sie *Rollwellen* genannt werden [Hanratty und Hershman 1961, 22]. Bei einer entgegengerichteten Strömung bewegen sich Rollwellen langsamer als die darunter liegende Hauptströmung, in einer gleichgerichteten Strömung dagegen

schneller [Kardri et al. 2009, 30]. Abhängig von der Luftströmung treten Rollwellen zunächst nur vereinzelt an der Oberfläche auf. Die Frequenz steigt jedoch mit zunehmendem Luftvolumenstrom [22].

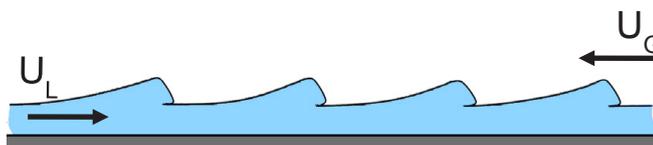


Abbildung 1-5 Rollwellen in entgegengerichteter Schichtenströmung, angelehnt an Jirka und Lang 2009 [28]

Unter der Annahme, dass die Wasserfilmdicke h_L bei einer Rohrströmung wesentlich geringer ist als die dominierende Wellenlänge (*Flachwasserwellen*), kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Flachwasserwellen u_{Welle} entsprechend Gleichung 1-2 bestimmt werden [Jirka und Lang 2009, 28], g steht dabei für die Erdbeschleunigung.

$$u_{\text{Welle}} = \sqrt{g \cdot h_L} \tag{1-2}$$

In einer geschichteten Strömung überlagert sich die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit mit der Strömungsgeschwindigkeit. Das hat zur Folge, dass sich Wellen stromab schneller ausbreiten als stromauf (siehe Abbildung 1-6). Die Froude-Zahl (Gleichung 1-3) bildet das Verhältnis zwischen der mittleren Fließgeschwindigkeit U und der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit. Als dimensionslose Kennzahl dient die Froude-Zahl zur Charakterisierung der Strömung. Beispielsweise kann zwischen fließenden und schießenden Strömungen unterschieden werden.

$$Fr = \frac{\text{Fließgeschwindigkeit}}{\text{Wellenausbreitungsgeschwindigkeit}} = \frac{U}{\sqrt{g \cdot h_L}} \tag{1-3}$$

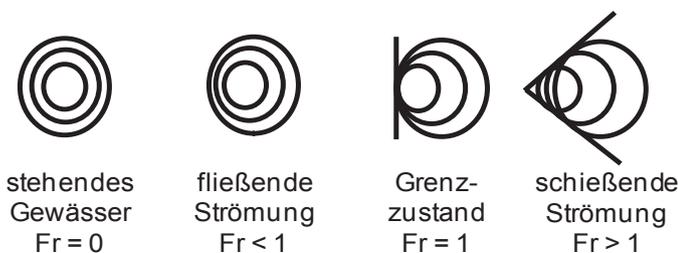


Abbildung 1-6 Wellenausbreitung in stehender, fließender und schießender Strömung

Strömungen mit $0 < Fr < 1$ werden als *fließende Strömung* bezeichnet. Erreicht die Strömungsgeschwindigkeit den Betrag der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit, entsteht ein Grenzzustand ($Fr=1$), der als *kritische Strömung* bezeichnet wird. Die Wellen breiten sich dann nicht mehr entgegen der Strömungsrichtung aus. Steigt die Strömungsgeschwindigkeit weiter an, spricht man von einer *schießenden Strömung* ($Fr>1$). Eine schießende Strömung wird stets durch Reibung in Strömungsrichtung verzögert, so dass der Flüssigkeitspegel entlang der Strömung zunimmt. An der Flüssigkeitsoberfläche können bei geringer Relativgeschwindigkeit nur Kapillarwellen kleiner Wellenlänge und Amplitude beobachtet werden, da die Geschwindigkeit der Strömung größer ist als die von Schwerewellen [19]. Bei zunehmender Relativgeschwindigkeit zur darüberliegenden Phase lassen sich auch Rollwellen beobachten.

1.2.2. Hydraulischer Sprung

Beschleunigt eine fließende Strömung, beispielsweise an einem Gefälle, kommt es, wenn die kritische Geschwindigkeit erreicht ist, zu einem Übergang in eine schießende Strömung. Dieser Übergang verläuft kontinuierlich und verlustarm. Der umgekehrte Fall, der Übergang von schießender zu fließender Strömung, der *als hydraulischer Sprung* (siehe Abbildung 1-7) bezeichnet wird, ist hingegen durch Turbulenzerzeugung stark verlustbehaftet. Der positive Druckgradient im hydraulischen Sprung führt zu einer Aufweitung des Strömungsprofils, wie beim Vergleich des Flüssigkeitspegels zwischen den Positionen x_1 und x_4 zu erkennen ist [28].

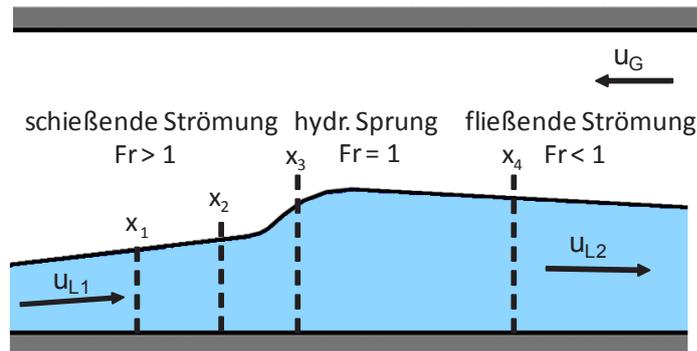


Abbildung 1-7 Hydraulischer Sprung in Anlehnung an Gargallo [19]

Abhängig von der Anström-Froude-Zahl ist der hydraulische Sprung mit mehr oder weniger starker Wellenbildung und Oszillation verbunden. Bei niedrigen Froude-Zahlen ergibt sich ein schwacher ($Fr = 1-1,7$) oder welliger Sprung ($Fr = 1,7-2,5$), wie er in Abbildung 1-7 an der Position x_3 zu sehen ist. Bei höheren Anström-Froude-Zahlen entstehen oszillierende ($Fr = 2,5-4,5$), stetige ($Fr = 4,5-9,0$) oder starke Sprünge ($Fr > 9,0$). In Abbildung 1-8 ist zu erkennen, dass sich bei stärkeren Sprüngen, bedingt durch die Aufweitung des Strömungsprofils (starker Sprung $h_2/h_1 \approx 14$), eine Rezirkulationszone entwickeln kann. Diese kann in Gestalt einer Deckwalze auftreten und zu einem hohen Lufteintrag in die fließende Flüssigkeitsströmung nach dem Sprung führen [28].

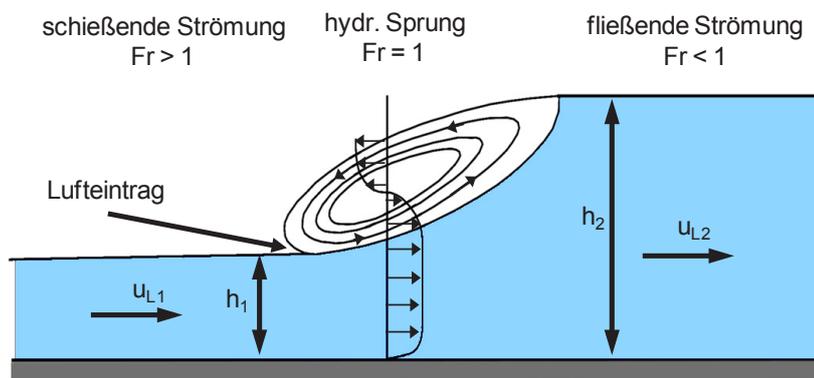


Abbildung 1-8 hydraulischer Sprung, angelehnt an Jirka und Lang 2009 [28]

In einer entgegengerichteten, geschichteten Rohrströmung entsteht der Sprung durch die verzögernde Wirkung des überströmenden Gases. Bei steigender Relativgeschwindigkeit zwischen den Phasen bilden sich zunächst Rollwellen auf der schießenden Strömung. Wenn

die Gasgeschwindigkeit hoch genug ist, kann eine Rollwelle auf der schießenden Strömung anwachsen und einen hydraulischen Sprung etablieren.

1.2.3. Tropfenentstehung und Tropfentransport

Wenn sich Tropfen aus einer Wasseroberfläche lösen, überwiegen ablösende Druckkräfte gegenüber den rückhaltenden Oberflächenkräften. Bei einer geschichteten Zweiphasenströmung entstehen ablösende Druckkräfte an der Phasengrenzfläche, wenn eine Relativgeschwindigkeit zwischen den beiden Fluiden besteht. Die Kutateladze-Zahl beschreibt das Verhältnis zwischen diesen stabilisierenden und destabilisierenden Kräften. In Gleichung 1-4 steht ρ_G für die Dichte des Gases, $\Delta\rho$ für den Dichteunterschied zwischen beiden Fluiden, σ für die Oberflächenspannung, g für die Gravitationskonstante und u_{LG} für die Relativgeschwindigkeit zwischen Flüssigkeit und Gas.

$$Ku = \frac{\text{Druckkräfte}}{\text{Oberflächenkräfte}} = \frac{\rho_G^{1/2}}{(\Delta\rho g \sigma)^{1/4}} u_{LG} \quad 1-4$$

Überwiegen die destabilisierenden Druckkräfte, wird die Oberfläche deformiert und es können Tropfen aus der Flüssigkeitsoberfläche herausgelöst werden. Diese Ablösung ist gemäß den Angaben von Ishii und Grolmes 1975 [25] je nach Reynoldszahl ab $Ku > 3,2 - 7,5$ zu erwarten. Die Autoren haben außerdem fünf verschiedene Mechanismen der Tropfenablösung identifiziert, die in Abbildung 1-9 zu sehen sind. Typ 1 zeigt das Ablösen von einer Welle mit hoher Amplitude. Typ 2 stellt die Tropfenablösung an einer durch die Gasströmung unterschrittenen Welle dar. Die Tropfenentstehung durch das Aufplatzen aufsteigender Gasblasen wird als Typ 3 bezeichnet. Die Tropfen entstehen aus dem kollabierenden Wasserfilm, wenn die Blase die Oberfläche erreicht. Die Tropfen nach Typ 4 entstehen beim Aufprall bereits abgelöster Tropfen auf die Phasengrenzfläche. Bei Strömungen mit hohen Wellenamplituden können sich zwischen den Rohrwänden instabile Flüssigkeitsbrücken ausbilden. Die beim Aufbrechen dieser Flüssigkeitsstrukturen entstehenden Tropfen werden dem Typ 5 zugeordnet [25].

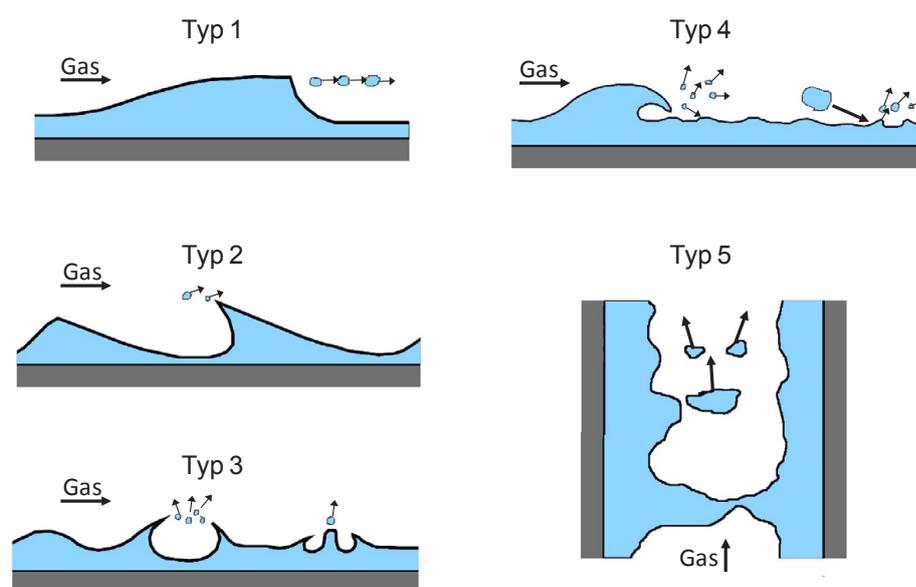


Abbildung 1-9 Typen der Tropfenablösung aus einer Flüssigkeitsoberfläche in Anlehnung an die Darstellung von Ishii und Grolmes [25]

Nach der Tropfenablösung aus der Flüssigkeitsoberfläche kann es in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit, den Stoffgrößen und dem Tropfendurchmesser zu weiteren Zerfallsvorgängen kommen. In erster Linie ist das Verhältnis aus stabilisierenden Oberflächenkräften und destabilisierenden Trägheitskräften ausschlaggebend. Dieses wird durch die Weber-Zahl (Gleichung 1-5) repräsentiert.

$$We = \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{Oberflächenkräfte}} = \frac{\rho_G \cdot u^2 \cdot D_{\text{Tropfen}}}{\sigma} \quad 1-5$$

Wie in Abbildung 1-10 zu sehen ist, kann der Sekundärzerfall unterschiedlichen Mechanismen folgen. Die Größe der daraus entstehenden Tropfen hängt direkt von dem Zerfallsmechanismus ab [Clift et al. 1978, 10]. Die Zerfallsarten können unterschiedlichen Größenordnungen der Weberzahl zugeordnet werden. Bei niedrigen Weber-Zahlen ($We < 12$) zerfallen die Tropfen schwingungsinduziert, höhere Strömungsgeschwindigkeiten ziehen Taschenzerfall ($12 < We < 50$) und Taschen-Stammzerfall ($50 < We < 100$) nach sich. Bei weiter steigenden Weberzahlen zerfallen die Tropfen scherungsinduziert und schließlich bei $We > 350$ katastrophal [Pfeifer 2010, 54, Pilch und Erdman 1987, 55].

$$Oh = \frac{\text{Reibungskräfte}}{\sqrt{\text{Trägheitskräfte} \cdot \text{Oberflächenkräfte}}} = \frac{We^{1/2}}{Re} = \frac{\mu_L}{\sqrt{\rho_L \sigma D_{\text{Tropfen}}}} \quad 1-6$$

Neben den Oberflächen- und Trägheitskräften spielt beim Sekundärzerfall der Tropfen auch die kinematische Viskosität der dispersen Phase eine Rolle. Diese findet in der Ohnesorge-Zahl (Gleichung 1-6), als Verhältnis der dynamischen Viskosität und der Dichte der Flüssigkeit, ihren Ausdruck [54]. Wie in Abbildung 1-11 zu sehen ist, ändert sich die Zuordnung der Zerfallsmechanismen zu den Weber-Zahlen nicht, solange die Ohnesorge-Zahl kleiner als 0,1 ist. Oberhalb dieses Wertes verschiebt sich die Zuordnung zu höheren Weber-Zahlen.

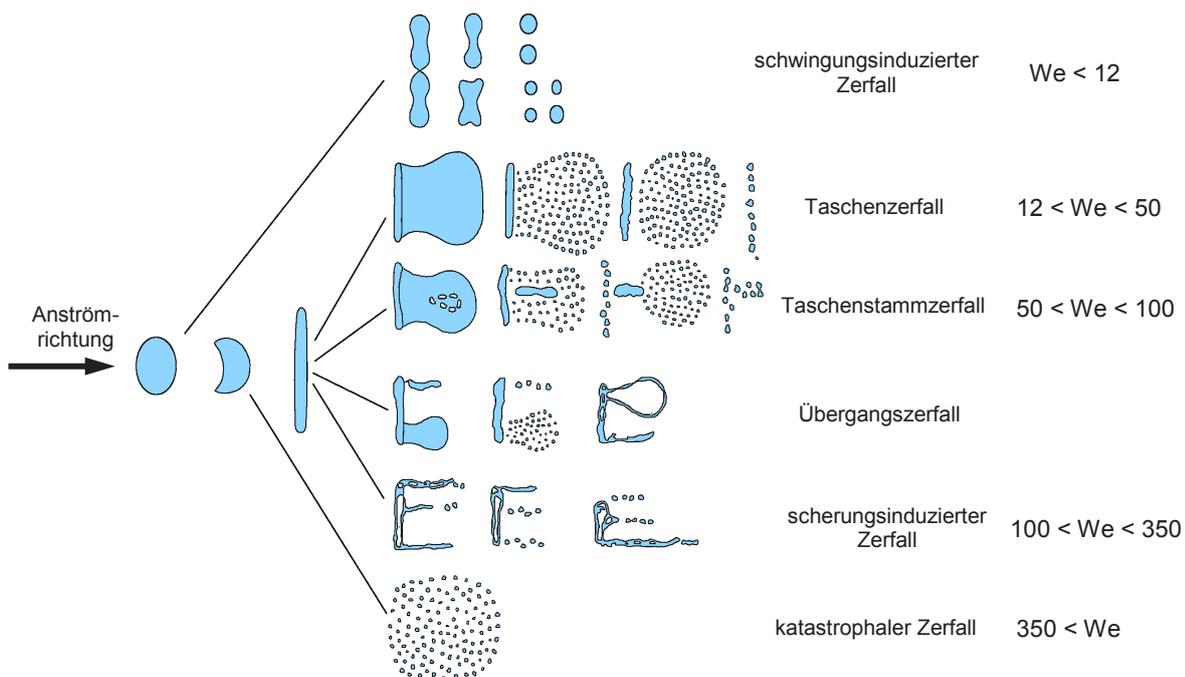


Abbildung 1-10 Sekundärzerfall in Anlehnung an Nigmatullin1991 [49] und Pilch und Erdman 1987 [55]

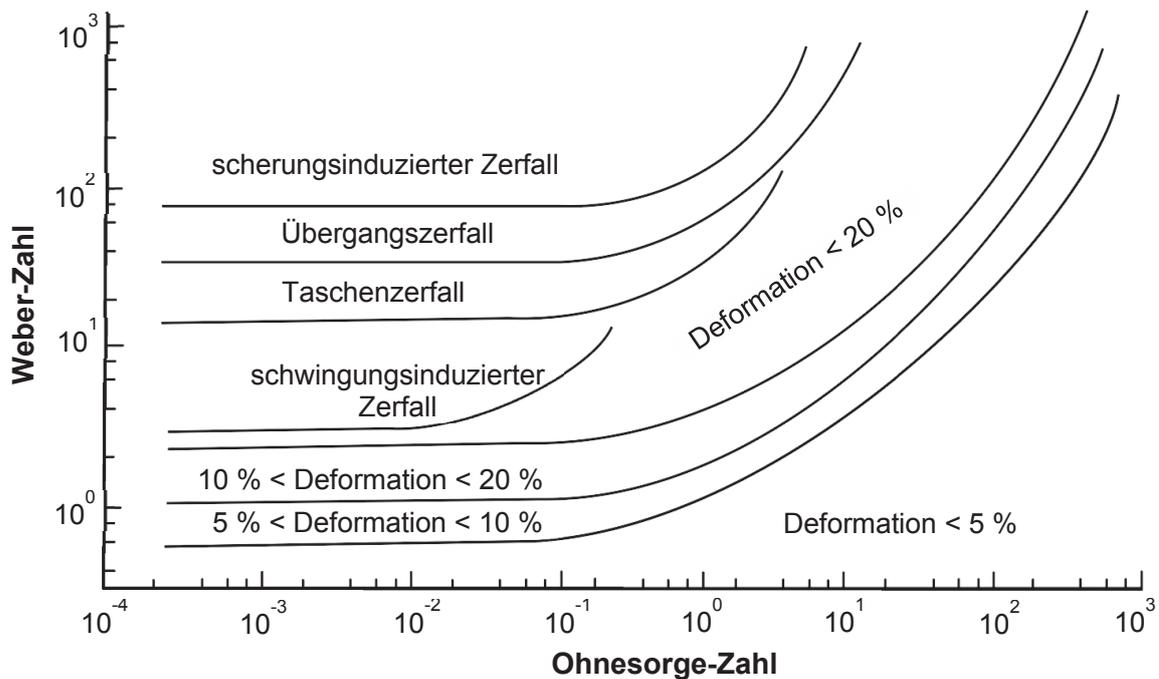


Abbildung 1-11 Sekundärzerfallsarten in Abhängigkeit von Weber- und Ohnesorge-Zahl, angelehnt an Hsiang und Faeth 1994 [24]

Die Entstehung und der Sekundärzerfall von Tropfen in einer entgegengerichteten und geschichteten Zweiphasen-Rohrströmung findet, sowohl zeitlich als auch örtlich verteilt, statt. So befinden sich, oberhalb der Ablösegrenze, immer Tropfen im Zweiphasengebiet, die sich in Größe und Geschwindigkeit unterscheiden. Kollisionen zwischen den Tropfen sind somit sehr wahrscheinlich. Die Bandbreite möglicher Interaktionen zwischen den Tropfen reicht vom Abprallen, über stabile und zeitweise Koaleszenz, bis hin zur Fragmentierung der Tropfen (siehe Abbildung 1-12). Es kann gezeigt werden, dass sich die Interaktion zweier kollidierender Tropfen mit der Weber-Zahl, den Fluideigenschaften und einem Aufprall-Parameter b beschreiben lässt. Dabei entspricht der Parameter b der Projektion des Abstandes der Tropfenmittelpunkte in Richtung der Relativgeschwindigkeit zwischen den Tropfen [Orme 1997, 52]. Die Trajektorie eines Tropfens in einer bewegten, kontinuierlichen Phase hängt neben seinem Impuls auch von der ihn umgebenden Strömung ab. In Gleichung 1-7 ist die Stokes-Zahl für einen kugelförmigen Tropfen der Dichte ρ_{Tropfen} des Durchmessers d_{Tropfen} formuliert. Sie stellt als Verhältnis der dynamischen Antwortzeit τ_{dyn} des Tropfens und der Verweilzeit im Strömungsfeld der kontinuierlichen Phase $\tau_{\text{Strömung}}$ ein Maß für das Folgevermögen eines Tropfens dar. Dabei ist u die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Tropfen und der umgebenden, kontinuierlichen Phase und L_{char} die charakteristische Länge der mittleren Strömung, [Lee und Bankhoff 1983, 38].

$$St = \frac{\tau_{\text{dyn}}}{\tau_{\text{Strömung}}} = \frac{D^2_{\text{Tropfen}} \cdot \rho_{\text{Tropfen}} \cdot u}{18 \cdot \mu_G \cdot L_{\text{char}}} \tag{1-7}$$

Die Trajektorie des Tropfens innerhalb einer kontinuierlichen Phase mit der Zähigkeit μ_G hängt damit direkt von dessen Durchmesser und Dichte sowie von der Viskosität des umgebenden Fluides ab. Für $St \ll 1$ ist die Eigendynamik des Partikels vernachlässigbar, da die dynamische Antwortzeit des Partikels viel kleiner ist als die Verweilzeit im Strömungsfeld. Bei $St \approx 1$ besteht eine starke Beeinflussung zwischen Tropfen und der umgebenden Strömung. Tropfen mit $St \gg 1$ verweilen, im Verhältnis zu ihrer dynamischen

Antwortzeit τ_{dyn} , relativ kurz im Strömungsfeld und werden daher nur geringfügig von der umgebenden Strömung beeinflusst [37]. Daraus folgt, dass große Tropfen einer Richtungsänderung der umgebenden Strömung schlechter folgen können als kleine Tropfen.

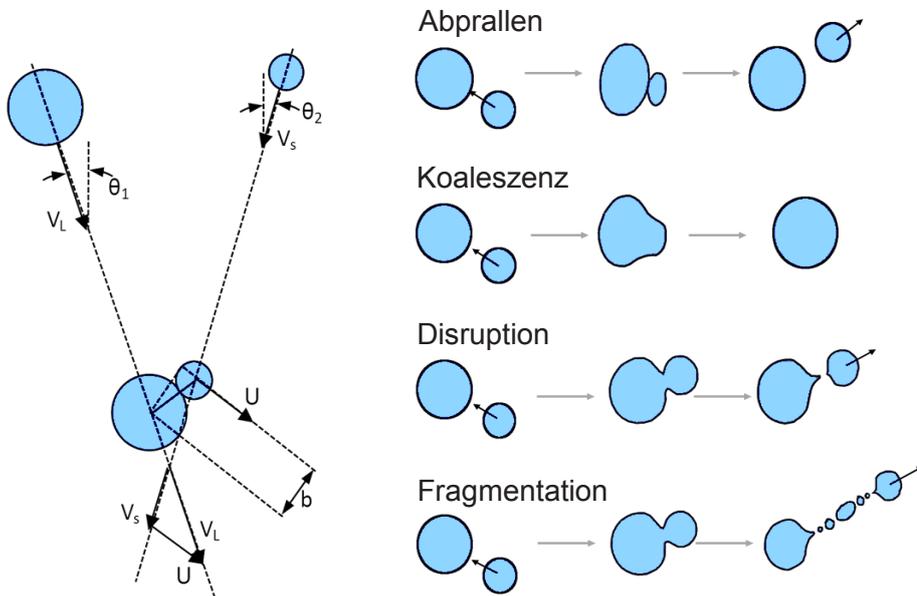


Abbildung 1-12 Möglichkeiten der Tropfen-Tropfen-Interaktion, angelehnt an Abbott 1977 [1], Orme [52]

Tropfen, die aus einer entgegengerichteten Schichtenströmung entstanden sind und der kontinuierlichen Gasströmung nicht folgen können, treffen unweigerlich wieder auf den Flüssigkeitsfilm. Das Verhalten von Tropfen bei der Interaktion mit der Flüssigkeitsoberfläche hängt von der Relativgeschwindigkeit der Tropfen und damit von der Weber-Zahl ab. Die ablaufenden Mechanismen (siehe Abbildung 1-13) sind denen der Tropfen-Tropfen-Interaktion in Abbildung 1-12 ähnlich. Langsame Tropfen tauchen in die Flüssigkeit ein. Mit zunehmender Relativgeschwindigkeit werden weitere Tropfen durch eintauchende Tropfen aus der kontinuierlichen Flüssigkeitsphase herausgelöst. Bei weiterhin steigender Tropfengeschwindigkeit prallen die auftreffenden Tropfen von der Flüssigkeitsoberfläche ab.

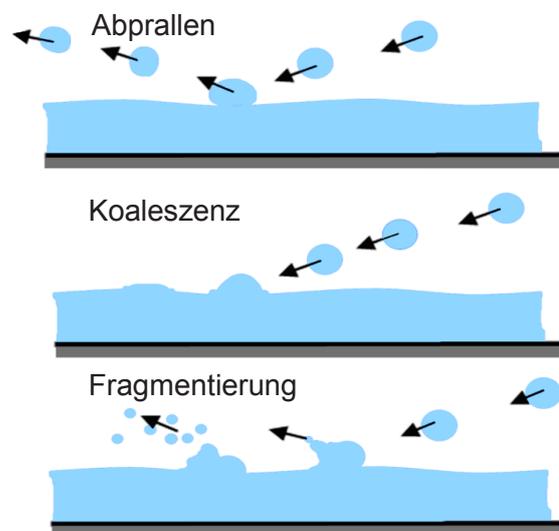


Abbildung 1-13 Tropfen-Film-Interaktion in Anlehnung an Guo Jia-Hong und Dai Shi-Qiang, 2007 [20]

1.2.4. Gegenstrombegrenzung

Entgegengerichtete, geschichtete Rohrströmungen aus einem Gas und einer Flüssigkeit sind nicht bei allen Strömungsbedingungen stabil. Wie schon in den vorangegangenen Abschnitten angeklungen ist, wechselwirken beide Fluide bei hohen Relativgeschwindigkeiten intensiv miteinander. Es entstehen Wellen und Tropfen. Durch den Impulsaustausch zwischen den Fluiden kann es gegebenenfalls zu einem hydraulischen Sprung kommen, der wiederum zur Bildung von Blasen führen kann. Die maximalen Durchflussraten der einander entgegenströmenden Fluide sind daher begrenzt. Der Strömungswechsel bei einsetzender Gegenstrombegrenzung (*engl. counter current flow limitation, CCFL*) wird in der Literatur auch als Fluten oder *onset of flooding* bezeichnet. Dieser Begriff wird allerdings von verschiedenen Autoren unterschiedlich definiert. Wongwises 1996 [74] und Navarro 2005 [48] verstehen als Flutgrenze den Zustand, bei dem der Luftdurchfluss nicht weiter erhöht werden kann, ohne dass sich die Strömungsform ändert. Andere Autoren definieren die Flutgrenze als die Stabilitätsgrenze, bei der der höchste Gasmassenstrom anliegt und die vollständige eingespeiste Wassermenge den Kanal durchströmt, ohne dabei die Strömungsrichtung zu ändern [Deendarlianto et al. 2008, 13].

Wallis stellte mit seiner Korrelation erstmals einen Zusammenhang zwischen den, gemäß Gleichung 1-8, dimensionslos gemachten Volumenstromdichten j_k^{*2} beider Fluide und dem Einsetzen der Gegenstrombegrenzung her. Das Wallis-Kriterium kann somit als Kriterium für das Eintreten der Gegenstrombegrenzung benutzt werden. Nach der Formulierung setzt Fluten ein, wenn die Leerrohrgeschwindigkeiten der beiden Fluide das in Gleichung 1-9 formulierte Kriterium nach oben überschreiten. Dabei variieren beide Konstanten $0,8 > m > 1,0$ und $0,7 > C > 1,0$ abhängig der Stoffgrößen und der geometrischen Randbedingungen. In Abbildung 1-14 ist diese Flutgrenze in Abhängigkeit der beiden Leerrohrgeschwindigkeiten graphisch dargestellt [2].

$$j_k^{*2} = \frac{\rho_k U_k^2}{(\rho_L - \rho_G)gd} \tag{1-8}$$

$$\sqrt{j_G^*} + m\sqrt{j_L^*} = C \tag{1-9}$$

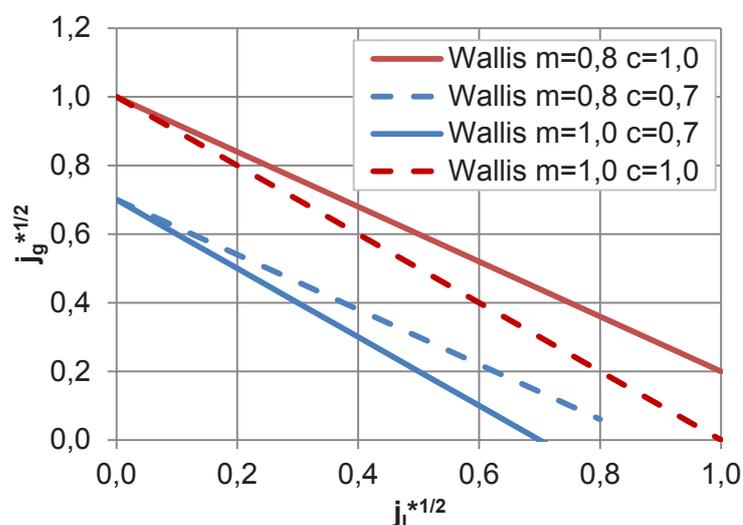


Abbildung 1-14 Diagramm zum Wallis-Kriterium

Ergänzend benennt Gargallo [19] zwei Bedingungen für das Eintreten dieses Instabilitätsphänomens: Erstens muss als notwendige aber nicht hinreichende Bedingung eine unterkritische also fließende Strömung vorliegen. Zweitens tritt die Gegenstrombegrenzung in entgegengerichteter, horizontaler Strömung nur bei ausreichend hohen Leerrohrgeschwindigkeiten auf. In der Wallis-Korrelation entspricht dies einem Wert der Konstanten C zwischen 0,7 und 1.

Der Gasmassenstrom, bei dem das Fluten abklingt, wird als *deflooding point* bezeichnet. Mehrere Autoren berichten über einen Hysterese Effekt, da der Gasmassenstrom häufig bei einsetzender Gegenstrombegrenzung höher ist als bei der Rückkehr zu einem gerichteten Abfluss [Bankoff und Lee 1987, 5, Lopez de Bertodano 1994, 12, Minami et al. 2010, 45, Ohnuki et al. 1988, 51].

Siddiqui et al. 1986 [64] experimentierten an einem Rohrbogen aus Acrylglas, der einen horizontalen und eine vertikalen Abschnitt aufwies. Untersucht wurde unter anderem der Einfluss unterschiedlicher Rohrdurchmesser beziehungsweise verschiedener Verhältnisse von Länge zu Durchmesser (L/D) und Bogenradien des Rohrkrümmers. Es wurde festgestellt, dass die Flutgrenze mit zunehmendem L/D -Verhältnis sinkt, da der Flüssigkeitspegel im Rohrbogen, und infolge dessen die Relativgeschwindigkeit zwischen den Fluiden, steigt. Als weiteren wichtigen Parameter identifizierten sie den mittleren Radius des Rohrbogens. Es wurde beobachtet, dass die Flutgrenze mit zunehmendem Radius sinkt. Dabei handelt es sich um ein Phänomen, das noch nicht vollständig verstanden ist, welches aber möglicherweise auf Veränderungen in der Gestalt des hydraulischen Sprungs zurückzuführen ist.

Die Region, in der die intensivste Wellenbewegung und Durchmischung der Fluide stattfindet, befindet sich nach Aussage mehrerer Autoren stets nahe dem Rohrbogen (Abbildung 1-15). Je nach Größe des Versuchsaufbaus kann unter dieser Strömung ein hydraulischer Sprung oder auch eine wellige Strömung mit Tropfenablösung verstanden werden [Siddiqui et al., 64, Mayinger et al., 43, Wongwises, 74 und Ohnuki et al., 51].

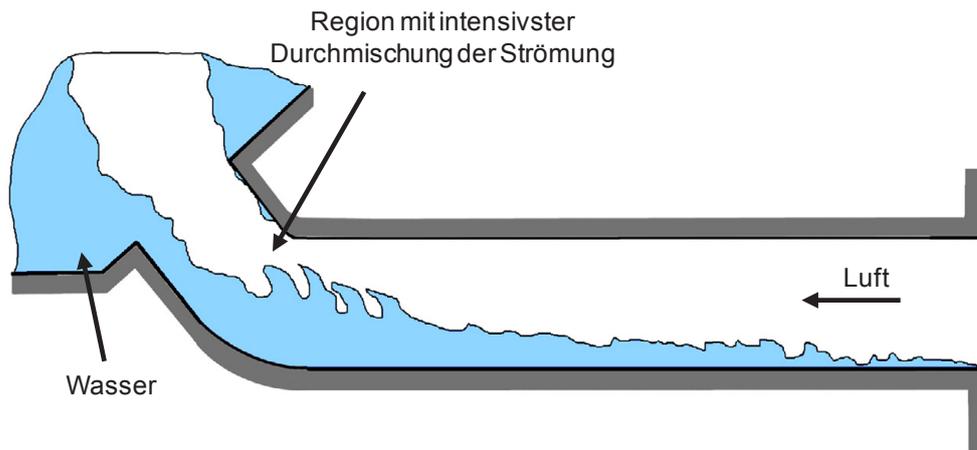


Abbildung 1-15 Flüssigkeitsprofil in gekrümmtem Rohr während einer Gegenstrombegrenzung angelehnt an Ohnuki [51]

K. Yong Choi und H. Cheon No 1995 [9] untersuchten entgegengerichtete Schichtenströmungen an einem kreisförmigen geraden Kanal. Neben Versuchen mit unterschiedlichen Rohrdurchmessern wurden auch verschiedene Neigungswinkel gegenüber der Horizontalen eingestellt. Sie verwendeten zwei unterschiedliche Wasserauslass-

/Lufteinlassgeometrien. Bei den Versuchen identifizierten Choi und Cheon No zweierlei unterschiedliche Mechanismen der Gegenstrombegrenzung: Einerseits Fluten, das durch Wellen im Inneren des Rohres entsteht (*engl. inner flooding*), andererseits Fluten am Rohreingang (*engl. entrance flooding*). Dabei wurde Fluten am Rohreingang nur bei hohen Wasservolumenströmen und steilen Neigungswinkeln des Kanals beobachtet.

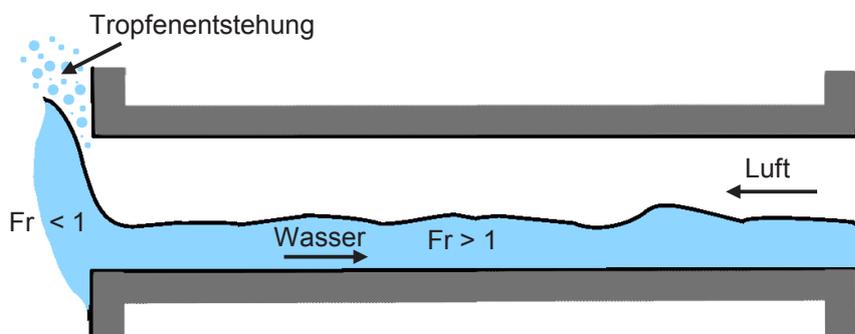


Abbildung 1-16 Fluten am Rohreingang (*entrance flooding*), in Anlehnung an K. Yong Choi und H. Cheon No 1995 [9]

Zapke und Kröger 1996 [76] verwendeten mehrere unterschiedliche Fluide, um damit den Einfluss der drei Stoffgrößen Dichte, Viskosität und Oberflächenspannung zu ermitteln. Zum Einsatz kamen Wasser, Methanol, Propanol, Luft und Helium. Eine Abhängigkeit der Flutgrenze von der Gas-Reynoldszahl konnte dabei negiert werden. Fluten entsteht nach Aussage der Autoren, wenn der Impulsstrom der Gasströmung einen bestimmten Schwellwert überschreitet. Der Schwellwert hängt wiederum vom Flüssigkeitsvolumenstrom, der durchströmten Geometrie und den Stoffeigenschaften der Fluide ab. Bei den Versuchen wurde von den Autoren beobachtet, dass die Viskosität des Gases keinen Einfluss auf die Gegenstrombegrenzung hat. Die Grenzflächenspannung wirkt hingegen geringfügig stabilisierend. Die stärksten Auswirkungen auf die Flutgrenze gehen, nach Aussage von Zapke und Kröger, von der Dichte beider Fluide aus [76].

In der Upper Plenum Test Facility (UPTF) untersuchten mehrere Autoren das Systemverhalten von Druckwasserreaktoren, unter anderem nach einem fiktiven Kühlmittelverluststörfall (SB LOCA). Die UPTF-Anlage diente dabei zur Simulation des primären Kreislaufs eines 1300 MW Druckwasserreaktors. Sie besteht unter anderem aus einem heißen Strang im Maßstab 1:1. Bei den Versuchen wurden entgegengerichtete, geschichtete Zweiphasenströmungen aus Dampf und gesättigtem Wasser bei verschiedenen Drücken untersucht. Die von Weiss und Hertlein 1988 [72] unter reaktortypischen Bedingungen ermittelten Flutgrenzen zeigten eine gute Übereinstimmung mit den Korrelationen von Ohnuki 1986 [50] und Richter et al. 1978 [60].

Mayinger et al. 1993 [43] beobachteten drei verschiedene stabile bzw. instabile Strömungsregimes bei den UPTF-Versuchen. Eine stabile Pfropfenströmung, eine instabile Pfropfenströmung, bei der auch Wasserschläge auftraten, und eine geschichtete Strömung. Auf Basis der Daten eines 3-Strahl-Gammadensimeters und einer ergänzenden Rechnung konnten auch sie feststellen, dass die Gegenstrombegrenzung in der Nähe der Rohrkrümmung auftritt. Dies ist insbesondere deshalb von Bedeutung, da diese Messungen im Vergleich zu den übrigen Experimenten in einer deutlich größeren Geometrie stattfanden. Im Rahmen der Versuche wurde außerdem festgestellt, dass Tropfenabriss schon entsteht, bevor die eigentliche Gegenstrombegrenzung eintritt.

Ohnuki et al. 1988 [51] untersuchten die Gegenstrombegrenzung in einer deutlich verkleinerten heißstrangähnlichen Geometrie. Sie beobachteten bei steigender Gasgeschwindigkeit instabile Rollwellen im Bereich der Umlenkung. Die Wellenkämme brachen bei hohen Gasgeschwindigkeiten in Tropfen auf und wurden von der Gasströmung in den Tank am oberen Ende der Versuchsstrecke transportiert. Die permanente Verlagerung der Wassermasse aus den Rollwellen in den oberen Tank führte schließlich zu einer Gegenstrombegrenzung [51].

Navarro 2005 [48] experimentierte an einer heißstrangähnlichen Geometrie mit horizontalen und geneigten Rohrabschnitten von veränderbarer Länge. Auch er beobachtete, dass die Gegenstrombegrenzung immer in der Nähe des Knicks oder am unteren Rohrende auftrat. Die Variation der Rohrlänge zeigte, dass bei konstantem Luftvolumenstrom eine Verlängerung der geneigten oder horizontalen Länge eine Erhöhung der mitgerissenen Wassermenge erbrachte. Dagegen führte eine Erhöhung des Rohrdurchmessers zu geringerem Tropfenmitriss.

Prayitno et al. 2012 [53] konnten bei Experimenten mit Wasser und zwei unterschiedlichen Butanol und Glycerin-Wasser-Lösungen zeigen, dass die Oberflächenspannung zwar keinen signifikanten Einfluss auf die Flutgrenze, dagegen aber auf den Tropfenmitriss hat. Sie beobachteten die Tropfenentstehung bei geringerer Oberflächenspannung schon bei niedrigeren Wellen. Bezüglich des Einflusses der Viskosität kommen Prayitno et al. zu dem Ergebnis, dass sich ein Anstieg der Viskosität destabilisierend auf die Strömung auswirkt. Bei den Experimenten ergab sich, in Abhängigkeit des Neigungswinkels des Kanals, eine Reduzierung der kritischen Gasgeschwindigkeit für einsetzendes Fluten.

Lopez de Bertodano 1994 [12] kommt aufgrund seiner Untersuchungen zu dem Schluss, dass der hydraulische Sprung, der in kleinskaligen Experimenten beobachtet werden kann, in großer Geometrie nicht relevant ist, was durch die Daten von Ohnuki [51] bestätigt wurde. In Kanälen mit größerem Durchmesser und Länge/Durchmesser-Verhältnis ist demnach das Auftreten einer teilweise oder vollständig umgekehrten (Abbildung 1-17) Strömung ausschlaggebend [43].

Wie in Abbildung 1-17 zu sehen ist, fließt bei einer teilweise umgekehrten Strömung ein Teil des eingebrachten Flüssigkeitsmassenstromes $\dot{m}_{L,\text{ein}}$ in der ursprünglichen Fließrichtung weiter ($\dot{m}_{L,\text{aus}}$). Getrieben durch den Impulsaustausch mit der Gasphase entsteht jedoch auch ein Rückfluss ($\dot{m}_{L,\text{Rück}}$) nahe der Phasengrenzfläche. Abhängig von den lokalen Strömungsbedingungen kann es zu Tropfenmitriss kommen. Wegen der Massenerhaltung addieren sich die Massenströme beider Fluide jeweils zu Null. Das Verhältnis des eingebrachten Flüssigkeitsmassenstroms zum abfließenden Flüssigkeitsmassenstrom wird als Wasserlieferungsrate LR bezeichnet (Gleichung 1-10). Ein Sonderfall ist die vollständig umgekehrte Strömung $LR = 0$, bei der die gesamte Menge des einströmenden Wassers mitgerissen wird.

$$LR = \frac{\dot{m}_{L,\text{aus}}}{\dot{m}_{L,\text{ein}}} \quad 1-10$$

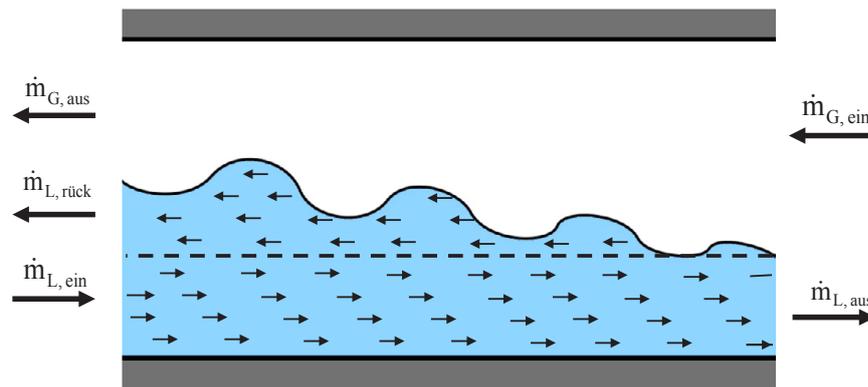


Abbildung 1-17 Teilweise umgekehrte Strömung in Anlehnung an Stähler [62]

Lopez de Bertodano [12] hat auf Basis der Formulierung für einsetzendes Wellenwachstum (Gleichung 1-1) ein Kriterium zur Vorhersage einer teilweise umgekehrten Strömung entwickelt. Wie in Gleichung 1-11 zu sehen ist, hängt dieses Kriterium von dem Winkel φ des Rohres gegenüber der Horizontalen, dem volumetrischen Gasanteil α_G , dem Rohrdurchmesser d und der Dichte beider Fluide ab. Überschreitet die Differenz der Fluidgeschwindigkeiten dieses Kriterium, tritt eine Strömungsumkehr, und damit Fluten, ein.

$$u_G - u_L > 0,487 \left[\frac{\left(\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G} \right) \cdot g d \cos \varphi \cdot \alpha_G}{\frac{8}{\pi} \left[\frac{y}{d} \left(1 - \frac{y}{d} \right) \right]^{1/2}} \right]^{1/2} \quad 1-11$$

1.2.5. CFD-Modellierung geschichteter Zweiphasenströmungen mit Tropfenabriss

Die bisher betrachteten experimentellen Arbeiten stammen überwiegend aus dem Umfeld der Sicherheitsforschung für Leichtwasserreaktoren. Das Hauptziel war es dabei, das Eintreten einer Gegenstrombegrenzung zu prognostizieren. Dementsprechend sind auch die aus den Messungen entwickelten Korrelationen nicht in der Lage, quantitative Aussagen über Strömungsgrößen, wie lokale Phasenverteilung oder Fluidgeschwindigkeit, zu erbringen. In zahlreichen verfahrenstechnischen Anwendungen ist dies jedoch nicht ausreichend. Vielmehr wird eine genaue qualitative und quantitative Beschreibung des Strömungszustandes benötigt.

Einen möglichen Ansatz bietet hier die Beschreibung der Strömung mit den Mitteln der numerischen Simulation. Genauso wie einphasige Strömungen können prinzipiell auch Zweiphasenströmungen durch die Lösung der Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie berechnet werden. Vorteile der numerischen Methoden sind eine hohe mögliche Ortsauflösung, die auch Informationen mit hohem Detailierungsgrad liefern kann, und die Skalierbarkeit des Modells nach Fertigstellung. Da bei der *Direkten Numerischen Simulation (DNS)* jedoch auch kleinste Strukturen aufgelöst werden, steigt der Rechenaufwand bei komplexen und zum Teil kleinskaligen Strömungsstrukturen, wie sie in entgegengerichteten, geschichteten Strömungen auftreten, stark an. Trotz der inzwischen zur Verfügung stehenden Rechenleistung bleibt die DNS damit ein Werkzeug für weniger komplexe Strömungen.

Ein deutlich niedrigerer Rechenaufwand entsteht bei Verwendung eines Ansatzes auf Basis der Reynolds gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (Reynolds Averaged Navier Stokes Equations, Rans). Der RANS-Ansatz vereinfacht das zu lösende mathematische Problem maßgeblich. Die Strömungsgrößen werden dafür in einen Mittelwert und einen Schwankungswert unterteilt. Durch die Mittelung über einen kleinen Zeitraum (Reynolds-Mittelung) kann der Mittelwert so gewählt werden, dass der mittlere Schwankungswert im selben Zeitraum dem Wert Null entspricht. Die Berechnung der Turbulenz wird dann durch ein Turbulenzmodell ersetzt [37]. Zur Beschreibung von geschichteten Zweiphasenströmungen können, in Anlehnung an diesen Ansatz, Formulierungen für Strömungen mit zwei Fluiden hergeleitet werden [Drew 1983, 15, Wintterle 2008, 73]. Die Fluide werden dann jeweils mit einem Satz Erhaltungsgleichungen beschrieben, anhand einer Phasenindikatorfunktion unterschieden und sämtlich im gleichen Rechenraum berechnet [15]. Für Zweiphasenströmungen, in denen die Fluide sowohl kontinuierlich als auch dispers vorliegen können, sind gegebenenfalls weitere Gleichungssätze erforderlich. Die Strömung wird dann mit je einem Gleichungssatz für die disperse und die kontinuierliche Phase beider Fluide beschrieben. Lahey und Drew 2001 [36] haben für eine Zweiphasenströmung mit Wärmeübergang im vertikalen Rohr bereits ein solches Vierfluid-Modell vorgestellt.

Für die Berechnung entgegengerichteter und geschichteter Zweiphasenströmungen wurde von Ben Hadj Ali und Laurien 2012 [6] eine Dreifluidformulierung (Gasphase, Flüssigphase, Tropfenphase) hergeleitet. In diesem Modell erfolgt die Kopplung der Erhaltungsgleichungen über Austauschsterme für Impuls und Masse. Da es sich um eine isotherme Betrachtung der Strömung handelt, muss in erster Linie die Interaktion zwischen den Phasen und die Turbulenz in diesem Modell validiert werden. Zu diesem Zweck wird ein vollständiger Datensatz experimentell ermittelter Messwerte benötigt, mit dem der Strömungszustand einer ausgewählten geschichteten Zweiphasenströmung möglichst direkt mit der Simulation verglichen werden kann. Des Weiteren wird im Rahmen der Modellierung eine genaue Beschreibung der Phänomenologie verschiedener Strömungszustände benötigt, um realistische Modelle mit möglichst direktem physikalischem Bezug erstellen zu können.

1.2.6. Validierungsexperimente für die CFD-Modellierung geschichteter Zweiphasenströmungen

Um den Strömungszustand einer entgegengerichteten, geschichteten Zweiphasenströmung zu erfassen, bedarf es der Anwendung lokal hochauflösender Messmethoden bei mehreren Strömungsgrößen. Dazu zählen die Fluidgeschwindigkeit, einschließlich der mittleren Geschwindigkeit und der Geschwindigkeitsschwankungen. Auch Randbedingungen wie integrale Massenströme, Druck, Temperatur und das Geschwindigkeitsprofil der einströmenden Fluide müssen festgehalten werden. Die Phasenverteilung spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Dies bezieht sich sowohl auf die kontinuierlich wie auch auf die dispers vorliegenden Phasen.

Eine weitere Anforderung ergibt sich aus der für Simulationen zur Verfügung stehenden Rechenleistung. Die hochauflösende Simulation von Zweiphasenströmungen stellt auch heute noch einen beachtlichen Rechenaufwand dar. Ein Validierungsexperiment für die Entwicklung eines Modells für entgegengerichtete Schichtenströmungen sollte deshalb gerade so groß sein, dass alle Phänomene auftreten, jedoch nicht wesentlich größer, um nicht unnötig große Rechnetze zu erfordern.

Deendarlianto et al. [13] betrachteten zu diesem Zweck einen Rechteckkanal, dessen Form stark an den heißen Strang eines Konvoi Reaktors angelehnt ist. Der Kanal wurde in der Mehrzweck Thermohydraulik Anlage TOPFLOW (Transient Two Phase Flow Test Facility) betrieben, die es unter anderem ermöglichte, den Druck zu variieren. Wie auch einige der in Abschnitt 1.2.4 genannten Versuchsanlagen verfügt der verwendete Kanal an den Kanalenden über einen Behälter für Wasser und Luft. Bei den Versuchen wurden die Pegel in diesen beiden Behältern, die eingespeisten Volumenströme Luft/Wasser, die Fluidtemperaturen, Systemdruck und Druckdifferenz über dem Kanal gemessen. Zusätzlich wurden die Strömungszustände mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen visualisiert. Bauartbedingt wurden an dieser Anlage jedoch keine laserbasierten Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Experimente ergeben ein detailliertes Bild der Vorgänge. Sowohl schießende als auch fließende Strömungszustände, einschließlich eines hydraulischen Sprungs, wurden untersucht. Die Versuche können zur Validierung von CFD-Codes eingesetzt werden, zeigen jedoch, dass das komplexe Verhalten der dispersen Gas- und Flüssigkeitsphasen einen starken Einfluss auf das Strömungsgeschehen hat.

Die Arbeit von Gargallo et al. 2004 und 2005 [18,19] am horizontalen Zweiphasenkanal WENKA (Wasser und Entrainment Kanal) ergänzte die Kenntnisse über geschichtete Zweiphasenströmungen. Der verwendete Kanal aus Acrylglas wies dabei einen, im Vergleich zu den Experimenten an der TOPFLOW-Anlage, deutlich geringeren Querschnitt von 90×110 mm auf. Untersucht wurden in erster Linie entgegengerichtete Schichtenströmungen ohne Tropfenabriss. Das Strömungsverhalten lässt sich außerdem anhand von mehreren Strömungskarten nachvollziehen. Gemessen wurden zum einen integrale Größen wie Massenströme, Druck und Temperatur. Zum anderen wurden auch lokale Strömungsgeschwindigkeiten beider Fluide untersucht.

Stäbler et al. 2006 und 2007 [62,63] erweiterte die Kenntnisse über Schichtenströmungen, indem er eine Messeinrichtung zur Quantifizierung der integralen Wasserlieferungsraten in die WENKA-Anlage integrierte. Zusätzlich zu den lokal hochauflösenden Geschwindigkeitsmessungen mit Particle Image Velocimetry (PIV) ermittelte er auch die turbulenten Größen wie Geschwindigkeitsschwankungen und Reynoldsschubspannungen. Er entwickelte außerdem eine elektrische Kontaktsonde zur Messung des lokalen Luftvolumenanteils, mit der auch Wellenspektren gemessen werden konnten. Ergebnis dieser Arbeit ist ein umfassender Datensatz zu entgegengerichteten, geschichteten Strömungen.

Vallée et al. 2007 bis 2012 [67,68,69,70] führte an der HAWAC-Anlage (Horizontal Air/Water Channel), einem Rechteckkanal, Messungen an einer gleichgerichteten Schichtenströmung (*engl. co-current stratified flow*) durch. Er erstellte eine Strömungskarte und differenzierte vier verschiedene Strömungsformen. Neben der Messungen der integralen Strömungsgrößen Druck, Temperatur und den integralen Durchflussraten beider Fluide wurden auch hochauflösende Messungen mit PIV durchgeführt. Besonders hervorzuheben ist hier ein Verfahren zur Identifizierung der Phasengrenzfläche (interface capture method), das den Phasenübergang auf Basis einer computergestützten Schattenbilddauswertung erfasst und somit Aufschluss über die Phasenverteilung gibt.

1.3. Zielsetzung der Arbeit

Die vielfältigen Anwendungen, in denen geschichtete Zweiphasenströmungen auftreten, machen es zunehmend notwendig, auch lokal auftretende Phänomene zu verstehen, um deren Auswirkungen prognostizieren zu können. Dies gilt insbesondere, da in der Kerntechnik sowie in den anderen technischen Bereichen zunehmend Detail-Informationen dieser Strömungen benötigt werden. Wie in den vorangegangenen Abschnitten bereits ausführlich erläutert wurde, wird daher intensiv an neuen CFD-Codes gearbeitet, die in der Lage sind diese komplexen, häufig dreidimensionalen und instationären, Strömungen zu beschreiben.

Trotz der inzwischen über mehrere Dekaden andauernden Forschung ist die Datenbasis lokal hochauflösender Messdaten in Bezug auf entgegengerichtete geschichtete Zweiphasenströmungen mit Tropfenabriss äußerst klein. Geeignete Validierungsdaten sind jedoch eine unerlässliche Voraussetzung für die Entwicklung neuer CFD-Modelle.

Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, die benötigten experimentellen Validierungsdaten für ein Dreifluidmodell zur Simulation entgegengerichteter, geschichteter Zweiphasenströmungen mit Tropfenabscheidung bereitzustellen. Die erforderlichen Versuche werden an der WENKA-Anlage, die im Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Jahr 2002 in Betrieb genommen wurde, durchgeführt. Die Arbeit beinhaltet alle Modernisierungs- und Erweiterungsmaßnahmen, die notwendig sind, um die notwendigen Untersuchungen entsprechend dem aktuellen Stand der Technik durchführen zu können.

Die Auswahl und die Entwicklung der Messmethoden orientieren sich dabei am Messziel und den Anforderungen der Simulation. Soweit möglich sollen lokal hochauflösende, nichtintrusive Messmethoden eingesetzt werden. Da die zu erwartende Strömung jedoch nur begrenzt optischen Zugang bietet, werden auch intrusive Methoden in Betracht gezogen. Dabei kann zum Teil auf die Messsysteme der vorangegangenen Arbeiten zurückgegriffen werden. Für die Validierung des Turbulenzmodells werden Geschwindigkeitsprofile, Profile der Geschwindigkeitsschwankungen und der turbulenten kinetischen Energie benötigt. Außerdem werden Messdaten zur Tropfenmassenstromdichte und Phasenverteilung benötigt.

Da es sich bei dem zu untersuchenden Messziel um turbulente Strömungszustände handelt, sind zeitlich gemittelte Messungen erforderlich. Der Grundgedanke bei der geplanten Vorgehensweise ist es, einen CFD-Code zu entwickeln, der alle in einer entgegengerichteten, geschichteten Zweiphasenströmung vorkommenden Phänomene abdeckt, und mit dem derartige Strömungen, weitgehend unabhängig von Geometrie und Randbedingungen, beschrieben werden können. Es ist also nicht Zweck der Messungen, die Strömung in einer prototypischen Geometrie zu untersuchen, sondern lokal hochauflösende Messungen in einer definierten Kanalgeometrie durchzuführen, um Daten zu erhalten, die den hohen Anforderungen für die Code-Validierung genügen. Die Messungen umfassen sowohl Strömungsformen mit schießenden als auch mit fließenden Strömungszuständen. Die gewonnenen Daten können für Modellierung und Validierung von CFD-Codes genutzt werden. Sie unterstützen damit das Verständnis und die Weiterentwicklung numerischer Modelle entgegengerichteter und geschichteter Zweiphasenströmungen mit Tropfenabriss.

2. Versuchsstand

Die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Experimente wurden an der bereits bestehenden WENKA-Anlage am Institut für Kern- und Energietechnik (IKET) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) durchgeführt. Die Anlage wurde im Rahmen der Arbeit von M. Gargallo [19] mit einem horizontalen Strömungskanal aus Acrylglas aufgebaut. In der darauf folgenden Arbeit von T. Stäbler [62] wurde die Anlage erweitert und angepasst. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Anlage nun erneut an die Anforderungen der durchzuführenden Experimente angepasst, modernisiert und mit einem Knickkanal, anstelle des horizontalen Kanals von Gargallo und Stäbler, ausgestattet.

In diesem Kapitel wird auf die neuen und modifizierten Anlagenkomponenten eingegangen, die im Zuge der Arbeiten am WENKA-Teststand aufgebaut wurden. Auf den bisherigen Aufbau und die bestehenden Teile der Anlage wird nur kurz eingegangen, sie können den Arbeiten von Gargallo [19] und Stäbler [62] entnommen werden.

2.1. Aufbau und Instrumentierung der WENKA-Anlage

Die WENKA-Anlage (**W**ater **E**ntrainment **C**hannel **K**arlsruhe) ist ein Strömungskanal zur Untersuchung von entgegengerichteten, geschichteten Zweiphasenströmungen. Die Anlage wird mit Luft/Wasser anstelle von Dampf/Wasser betrieben, da im Rahmen dieser Arbeit primär die strömungsmechanischen Effekte in entgegengerichteten Schichtenströmungen betrachtet werden sollen. Entsprechend finden die Versuche bei Umgebungsdruck und -temperatur statt. In Abbildung 2-1 ist das CAD-Modell der Anlage in der aktuellen Konfiguration zu sehen. Sie wurde so im Rahmen dieser Arbeit verwendet.

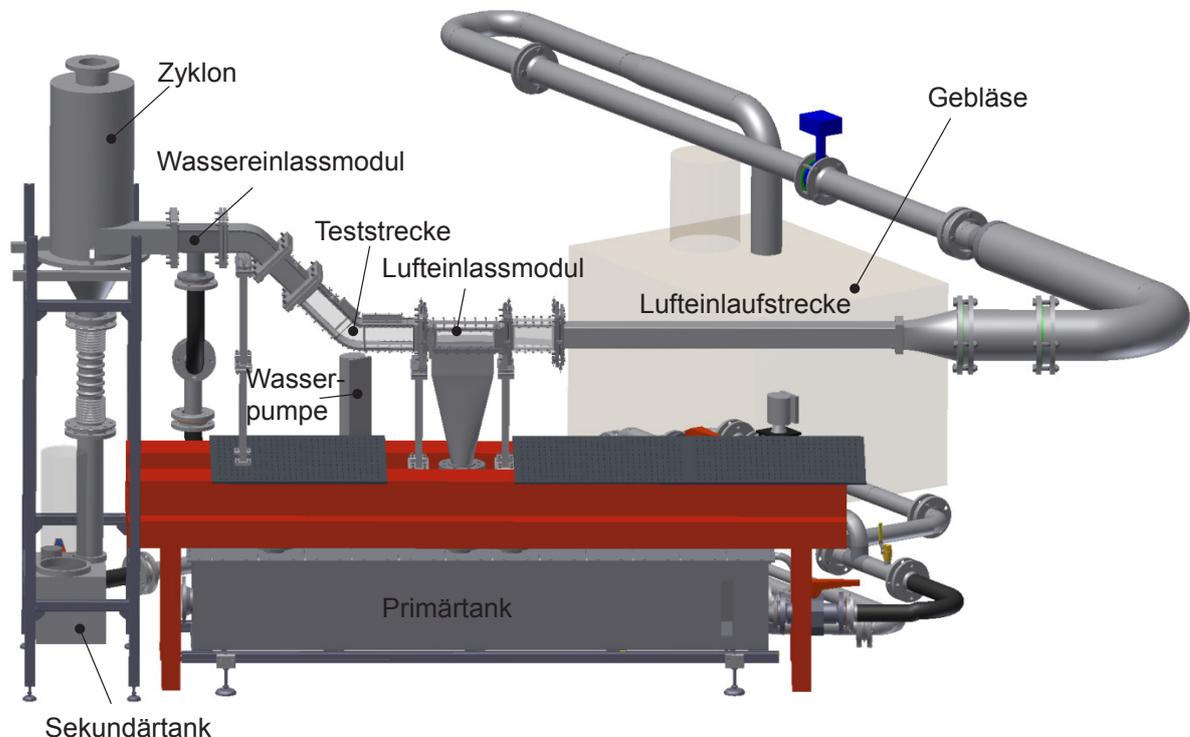


Abbildung 2-1 CAD-Modell des WENKA-Versuchsstands

Der offene Luftkreislauf der Anlage wird durch ein mehrstufiges Gebläse versorgt. Der Volumenstrom kann stufenlos zwischen 70 l/s und 250 l/s variiert werden. Damit eine Untersuchung der Gegenstrombegrenzung unter gleichbleibenden Bedingungen möglich ist, wurde die Anlagensteuerung um einen PID-Regler erweitert. So kann der Luftvolumenstrom auch bei stark pulsierenden Strömungszuständen mit guter Genauigkeit konstant gehalten werden. Der momentane Luftvolumenstrom wird wie bisher mit einem Wirbelstrommessgerät in der Luftereinlaufstrecke gemessen. Wie im Prozessschema in Abbildung 2-2 zu sehen ist, strömt die Luft, vom Gebläse kommend, durch eine Wabenstruktur und anschließend durch eine Einlaufstrecke von 1,48 m Länge, um ein voll entwickeltes Strömungsprofil zu erreichen. In der Einlaufstrecke befinden sich zwei Temperaturmessstellen und eine Druckmessstelle. Danach strömt die Luft weiter in die Teststrecke. In der Teststrecke interagiert die Luft mit der Wasserströmung und strömt dann in den Zyklon am oberen Ende des Kanals. Dort wird Wasser, das unter Umständen in der Teststrecke mitgerissen wurde, von der Luftströmung separiert und wieder dem Wasserkreislauf zugeführt. Die Luft strömt nach oben aus und wird der Umgebung zugeführt.

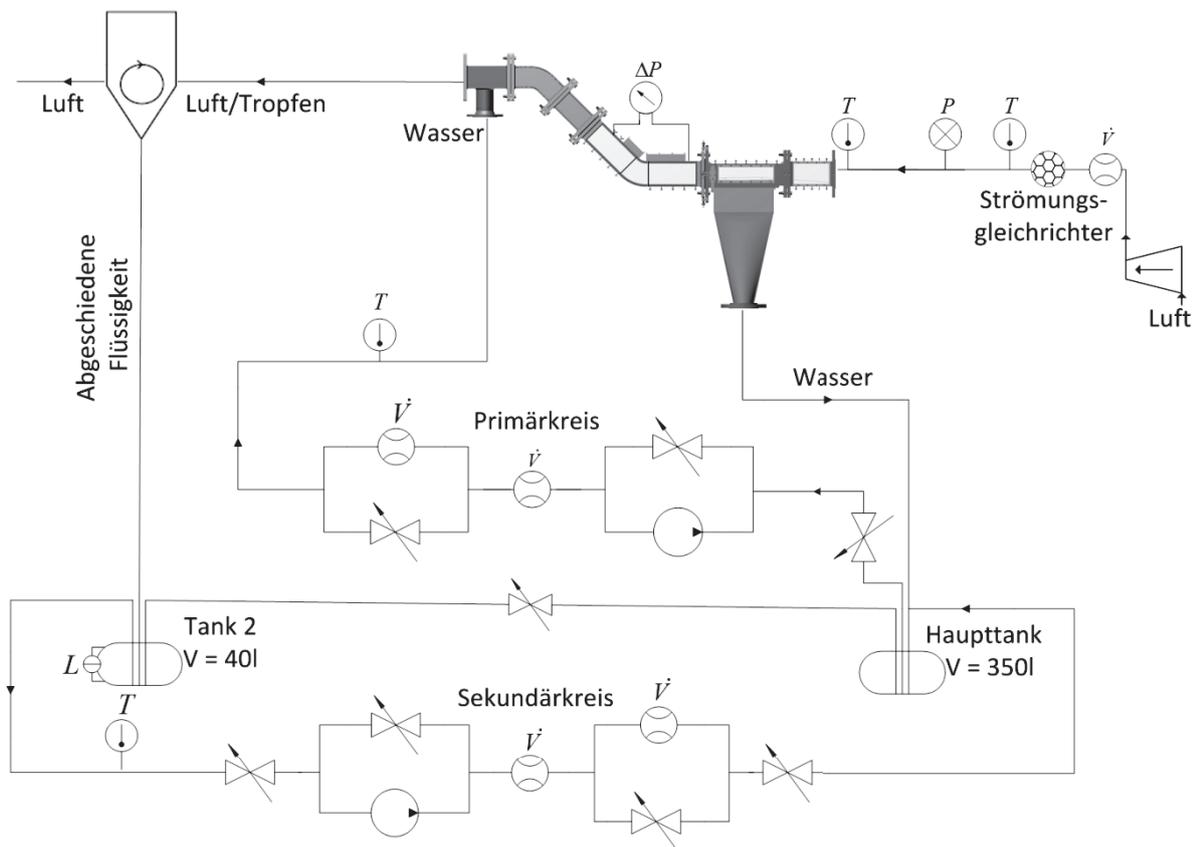


Abbildung 2-2 Prozessschema der WENKA-Anlage

Der Wasserkreislauf wird durch eine Kreiselpumpe versorgt, die Wasser aus dem primären Tank (Tank1) fördert. Das Wasser wird kurz vor dem oberen Knick in den Kanal eingeleitet. Das Wasser durchströmt dann die Teststrecke entgegen der Luftströmung und fließt durch den Trichter im Lufterinlauf-/Wasserablaufmodul zurück in den primären Tank. Wasser, das im Zyklon abgeschieden wurde, fließt durch den sekundären Tank (Tank2) und den offenen Bypass zurück in den primären Tank. Der geförderte Wassermassenstrom wird von magnetisch induktiven Durchflussmessgeräten im Primärkreis erfasst. Der geförderte Massenstrom kann zum einen über die Pumpenleistung und zum anderen über die Stellung

der Drosselventile im Primärkreis eingestellt werden. Der sekundäre Wasserkreislauf diente in der Arbeit von Stähler zur Messung der integralen Wasserlieferungsraten und wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet.

Im Rahmen der Modernisierung der Anlage wurden sowohl die Hardware und Software zur Datenerfassung ersetzt, als auch infolge dessen die Steuerprogramme vollständig überarbeitet. Auch die Mess- und Steuerrechner wurden erneuert, da die neuen Mess- und Regelungsanwendungen eine höhere Rechenleistung und mehr Speicherplatz erforderten. Der primäre Tank unter dem Messtisch wurde durch ein kleineres Modell ersetzt. Damit konnte das Wasserinventar des Tanks auf ca. 350 l reduziert werden. Dies verkleinerte den Aufwand bei der Rückgewinnung von Tracer-Partikeln aus den Versuchen und ermöglicht häufigere Wasserwechsel als bisher. Der Tank ist, wie schon das bisherige Modell, mit einem Prallblech ausgestattet, das die Entstehung von Totwassergebieten verhindert und dafür sorgt, dass das Wasser blasenfrei von der Pumpe im Primärkreis angesaugt werden kann. Alle Wasseranschlüsse an die Teststrecke wurden mit Schläuchen oder Kompensatoren versehen. In Verbindung mit der neuen, höhenverstellbaren Lagerung des Kanals ist die Neigung der Teststrecke nun gegenüber der Horizontalen, mit einer Genauigkeit von weniger als $0,2^\circ$, einstellbar. Die wichtigsten Daten der Anlage können auch Tabelle 2.1 entnommen werden.

2.2. Aufbau des Knickkanals

Die Teststrecke wird aus mehreren verschiedenen Kanalmodulen zusammengesetzt und kann in unterschiedlichen Konfigurationen aufgebaut werden. Im Gegensatz zu dem zuvor eingesetzten horizontalen Kanal aus transparentem Acrylglas (PMMA) werden nun Edelstahlsegmente mit Acrylglasfenstern verwendet. Die Teststrecke hat einen durchströmten Querschnitt von $90 \times 100 \text{ mm}^2$ und weist einen um 45° geneigten Abschnitt auf. Im unteren Knick entsteht durch die Umlenkung ein besonders intensiver Impulsaustausch zwischen den Fluiden. Wie bereits in Kapitel 1 angeklungen ist, ist es dadurch möglich, den unter Umständen entstehenden hydraulischen Sprung, und damit das Gebiet mit den intensivsten Phasenwechselwirkungen, im horizontalen Abschnitt zu stabilisieren, so dass eine gezielte Untersuchung der Strömung möglich wird. Der durch den Knick entstehende Höhenversatz beträgt 430 mm. Die Konstruktion erlaubt eine präzise Ausrichtung der einzelnen Kanalsegmente, so dass der Versatz zwischen den Segmenten auf maximal 0,2 mm begrenzt ist. Die Konstruktion der seitlichen und unteren Kanalfenster gewährleistet ebenfalls minimale Kanten unter 0,2 mm im Inneren des Kanals. Durch die glatte innere Kontur kann eine beinahe ungestörte Strömung gewährleistet werden.

In Abbildung 2-3 ist ein Halbschnitt der Teststrecke zu sehen. Das Wasser wird im obersten Segment in den Kanal eingeleitet. Es fließt dann unter einem starren Leitblech in den geneigten Teil. Das Leitblech trennt die beiden Fluide bis kurz vor der Teststrecke voneinander und sorgt für ein definiertes Aufeinandertreffen der Luft- und Wasserströmung. Das Wasser fließt in den mit Fenstern versehenen Teil der Teststrecke und im Lufteinlauf/Wasserablauf durch den Wasserablauftrichter wieder zurück in den Tank. Die dem Wasser entgegenströmende Luft wird über ein höhenverstellbares Leitblech in den Kanal geführt. Auch hier ist das Leitblech nötig, um Störeffekte beim Aufeinandertreffen der Fluide zu unterbinden. Die Luft strömt dann in die Teststrecke, interagiert dort mit dem Wasser und wird über das Leitblech im oberen Knick durch das letzte Kanalsegment in den angeschlossenen Zyklon geleitet.

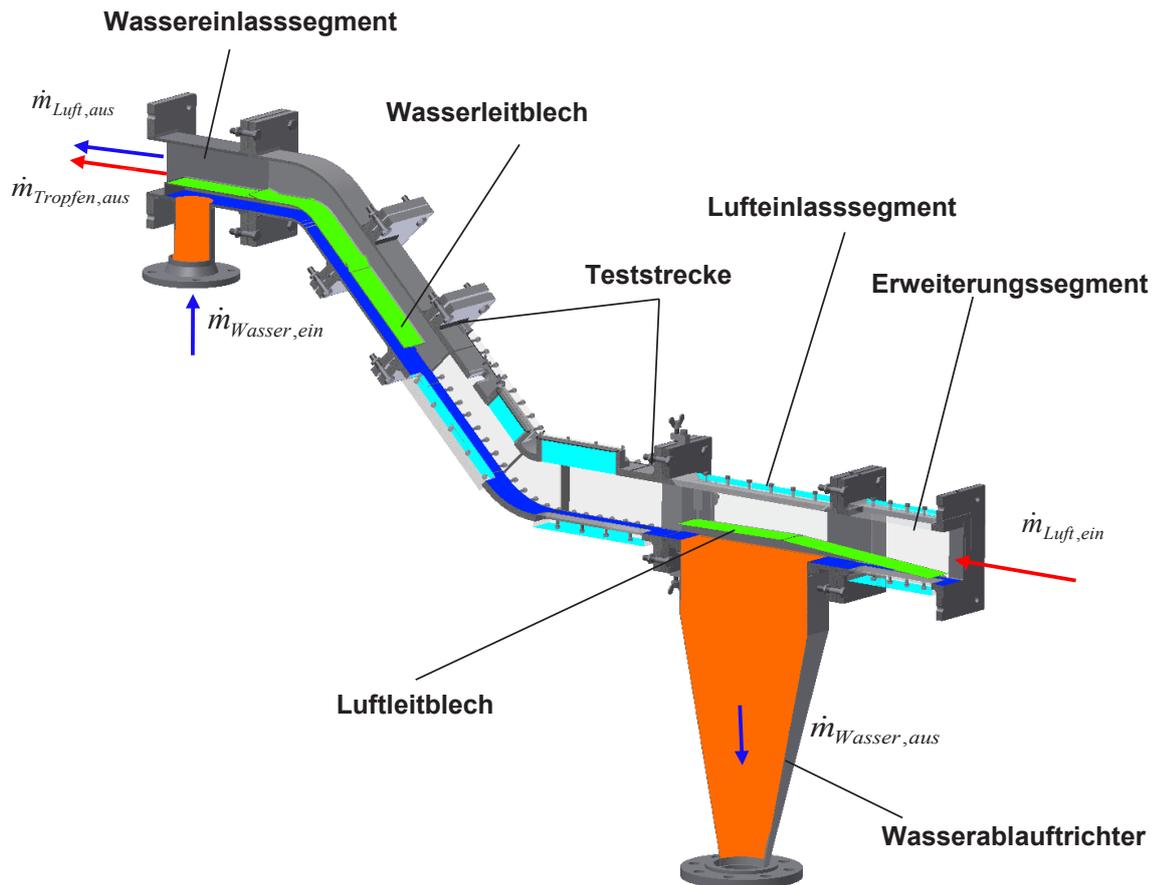


Abbildung 2-3 Knickkanal (Halbschnitt)

Der untere Knick bietet beidseitig und über die gesamte Höhe des Kanals einen vollständigen, optischen Zugang durch Acrylglasfenster. Die einzelnen Fenster sind ohne Zwischenstege nur durch Dichtungen verbunden. Sowohl im geneigten wie auch im horizontalen unteren Abschnitt sind PMMA-Fenster eingebaut. An der Oberseite der Teststrecke befinden sich mehrere Langlöcher, die entweder durch transparente PMMA-Platten verschlossen werden, oder durch die Sonden in den Kanal eingebracht werden können. Der einphasig durchströmte Bereich des Lufteinlauf-/Wasserablaufsegmentes ist über dem Leitblech (grün) ebenfalls mit Fenstern versehen. Die Fenster ermöglichen die Anwendung optischer Messverfahren sowohl an der Teststrecke wie auch im Einlaufbereich. Dabei können diese Messungen sowohl im Durchlicht-, wie auch im Streulichtverfahren geschehen. Die Einkopplung von Laserstrahlen in die Teststrecke kann dabei nicht nur von oben sondern auch von unten erfolgen.

Da die Gegenstrombegrenzung, wie bereits in Kapitel 1.2 erwähnt, ein stark geometrieabhängiges Phänomen ist, wurde für weitere Versuche bereits ein großflächig mit Fenstern ausgestattetes Erweiterungssegment hinter dem Wasserablauf eingebaut. Dieses kann für weiterführende Untersuchungen auch vor den Wasserablauf gezogen werden, so dass der horizontale Abschnitt der Teststrecke deutlich länger wird. Die wichtigsten Abmessungen der Teststrecke sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst. Eine vollständig bemaßte Zeichnung des Kanals, wie er im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurde, befindet sich in Anhang A.

Tabelle 2.1 Eckdaten zur WENKA-Anlage und dem Knickkanal

Größe	Wertebereich	Einheit
Luftvolumenstrom/Leerrohrgeschwindigkeit	70-250	l/s
Länge der Lufteinlaufstrecke	1480	mm
Wasservolumenstrom/Leerrohrgeschwindigkeit	15-65	l/min
Kanalquerschnitt	90 × 110	mm
Höhenversatz des Knickkanals	430	mm
Neigungswinkel	45°	-
Länge des unteren horizontalen Abschnitts bis zum Wasserablauf (*mit vorgezogenem Erweiterungssegment)	290 (*510)	mm

3. Messtechnik

Für die Untersuchung der Strömungsgrößen in entgegengerichteter, geschichteter Zweiphasenströmungen sind Messverfahren erforderlich, die die Strömungsgrößen Geschwindigkeit, turbulente Geschwindigkeitsschwankung, die Phasenverteilung und die Tropfenmassenstromdichte erfassen können. Da es sich überwiegend um turbulente Strömungsphänomene handelt, sind die Messgrößen in zeitlich gemittelter Form von besonderem Interesse. Für Messungen mit dem Ziel, Daten für die Modellierung und Validierung von CFD-Codes zu gewinnen, sind außerdem Messverfahren mit einer hohen Ortsauflösung anzustreben, damit auch lokale Effekte gut abgebildet werden können. In diesem Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Messverfahren und Messinstrumente vorgestellt.

3.1. Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsschwankung

Die messtechnische Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit eines Fluides kann mit vielen unterschiedlichen Messverfahren geschehen. Es handelt sich sowohl um invasive Verfahren, wie Heißfilmanemometrie oder Pitotrohr, als auch um nicht-invasive Verfahren, wie die Phasen-Doppler Anemometrie (PDA), die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) [Ruck 1987, 61] oder die Particle Tracking Velocimetry (PTV) [Tropea et al. 2007, 66]. Nicht-invasive, laseroptische Messverfahren eignen sich besonders gut, da sie meist eine hohe Zeit- und Ortsauflösung bieten und dabei ohne Einbauten in den durchströmten Querschnitt des Kanals auskommen. Nachteil dieser Verfahren ist jedoch, dass während der gesamten Messdauer ein direkter optischer Zugang zur Messstelle gegeben sein muss. Dies stellt bei entgegengerichteten Zweiphasenströmungen eine enorme Herausforderung dar. In den vorangegangenen Arbeiten von Stähler und Gargallo wurde bereits erfolgreich die *Particle Image Velocimetry (PIV)* an einem horizontalen Zweiphasenkanal eingesetzt. Für die Messungen in dieser Arbeit wurde das bestehende Messsystem für die Verarbeitung größerer Datenmengen ertüchtigt, da die zu untersuchenden, stark instationären Strömungen größere Mittelungszeiträume erforderlich machten [63]. Am Messaufbau wurden, abgesehen von der Applikation am neuen Kanal, keine wesentlichen Änderungen vorgenommen. Deshalb wird an dieser Stelle, neben einem kurzen Abriss über das Messprinzip und Aufbau, in erster Linie auf die wesentlichen Aspekte von Auswertung und Messunsicherheiten eingegangen. Darüber hinausgehende Informationen zum Messverfahren können Raffel et al. 1998 [58] und Tropea [66] entnommen werden.

3.1.1. Messprinzip

Die Particle Image Velocimetry erlaubt die Messung der lokalen Fluidgeschwindigkeiten und den davon abhängigen Größen wie die lokale zeitlich gemittelte Geschwindigkeit, zeitlich gemittelte Geschwindigkeitsfluktuation, Reynoldsschubspannungen oder turbulente kinetische Energie. Um die Bewegung des Fluids sichtbar zu machen, werden der Strömung Tracer-Partikel zugegeben, die während der Messung die Fluidbewegung repräsentieren. Voraussetzung sind Tracer mit einem hohen Partikelfolgevermögen ($St \ll 1$). Die Partikel werden in der Messebene durch einen Laserlichtschnitt zweimal nacheinander beleuchtet. Entsprechend der Abbildung 2-1 entstehen so, mit Hilfe einer in Streulichtanordnung aufgebauten Kamera, zwei Bilder in kurzer Folge. Die Fluidbewegung wird auf den Aufnahmen anhand des Partikelversatzes erkennbar. Dabei muss das Zeitintervall Δt_{mess} zwischen den Aufnahmen so gewählt werden, dass das Partikelmuster auf beiden

Aufnahmen ähnlich bleibt, die Bewegung aber gut sichtbar wird. Dies ist bei einem Partikelversatz von 4-8 Pixeln gegeben. Die Bildpaare werden nach der Bildaufbereitung in einzelne Suchfenster (*engl. interrogation areas*) zerlegt und mit Kreuzkorrelation ausgewertet [Kaene und Adrian 1992, 32]. Dies erlaubt eine hochaufgelöste Bestimmung des lokalen Partikelversatzes einzelner Partikelgruppen. Im Verhältnis zu dem zeitlichen Abstand zwischen zwei Bildern kann so die momentane Geschwindigkeit der Strömung in jedem Suchfenster bestimmt werden. Die Höhe der Korrelationspitze (*engl. correlation peak*) gibt dabei Auskunft über die Ähnlichkeit der verglichenen Muster beider Bilder.

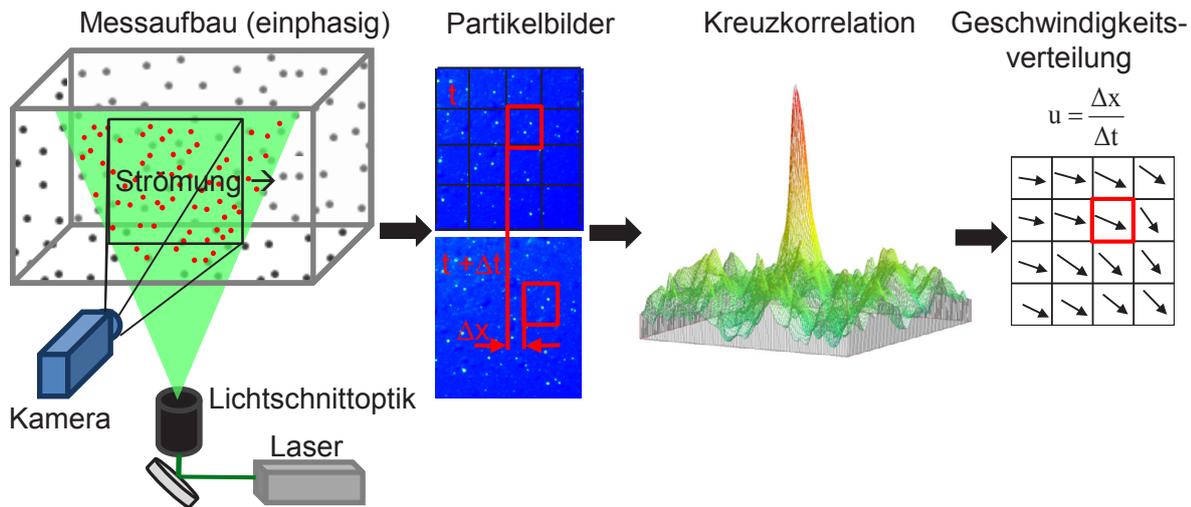


Abbildung 3-1 Messverfahren: Particle Image Velocimetry (PIV)

Die Betrachtung der momentanen Geschwindigkeit hat bei einer turbulenten Strömung nur eine begrenzte Aussagekraft. Deutlich aufschlussreicher sind jedoch die zeitlich gemittelten lokalen Geschwindigkeiten. Diese können durch Mittelwertbildung aus einer großen Anzahl von Einzelmesswerten berechnet werden. Dazu wird gemäß (Gleichung 3-1) auf Basis von N Einzelmessungen über die Periode Δt_{total} die zeitlich gemittelte Geschwindigkeit \bar{u} berechnet. Der Phasenindikator k nimmt dabei entweder den Wert G bei Luftgeschwindigkeiten oder L bei Flüssigkeitgeschwindigkeiten an.

$$\bar{u}^k = \frac{1}{\Delta t_{\text{total}}} \int_t^{t+\Delta t_{\text{total}}} u^k(t') dt' \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i^k \quad 3-1$$

Die turbulente Geschwindigkeitsschwankung u_{RMS} kann entsprechend Gleichung 3-2 aus der Differenz der momentanen Geschwindigkeitswerte u_i und der zeitlich gemittelten Geschwindigkeit \bar{u} berechnet werden. u_{RMS} ist damit das zeitliche Mittel der momentanen Geschwindigkeitsfluktuation u' .

$$u_{\text{RMS}}^k = \sqrt{u'^{2k}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i^k - \bar{u}^k)^2} \quad 3-2$$

Weitere wichtige Größen zur Charakterisierung des Impulsaustauschs in der Strömung und dementsprechend auch für die Validierung numerischer Codes sind die zeitlich gemittelten turbulenten Schubspannungen. Zur Ermittlung der turbulenten Schubspannungen wird zunächst nach Gleichung 3-3 die Korrelation der Geschwindigkeitsschwankungen aus der

Messung bestimmt. Diese entspricht der zeitlichen Mittelung des Produktes der Geschwindigkeitsfluktuationen u' und v' der jeweiligen Phase.

$$\overline{u'^k v'^k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(u_i^k - \bar{u}^k \right) \left(v_i^k - \bar{v}^k \right) \quad 3-3$$

Die turbulenten Schubspannungen oder Reynolds-Schubspannungen können dann als Produkt der Dichte und der korrelierten Geschwindigkeitsschwankungen dargestellt werden (Gleichung 3-4).

$$\tau = -\rho \cdot \overline{u'v'} \quad 3-4$$

Bei der Untersuchung einer Zweiphasenströmung unterscheidet sich die Betrachtung der statistischen Messwertstreuung für dieses Messverfahren von der für eine einphasige Messung. Die Messung kann nur in dem Fluid durchgeführt werden, dem zuvor Tracer zugefügt wurden. Das Volumen, das die jeweilige Phase einnimmt, ändert sich jedoch bei Wellenbewegungen in Abhängigkeit der Zeit. Insbesondere im Bereich der Phasengrenzfläche kann daher nicht bei jeder Messung ein Messwert in jedem Suchfenster ermittelt werden, so dass die zugrundeliegende Messwertanzahl korrigiert werden muss. Die Anzahl der bei der Mittelwertbildung zur Verfügung stehenden Messwerte N_{mess} ändert sich daher in Abhängigkeit der Anzahl von Einzelmessungen N_{total} und des Phasenanteils der betrachteten Phase α . Beispielsweise sinkt die Anzahl der Messwerte der flüssigen Phase mit steigendem Gasphasenanteil α_G (Gleichung 3-5). Bei Messungen in einphasiger Strömung gilt hingegen $N_{\text{mess}} = N_{\text{total}}$.

$$N_{\text{mess,L}} = N_{\text{total}} (1 - \alpha_G) \quad 3-5$$

Auf Basis der lokalen turbulenten Schwankungsgeschwindigkeit u_{RMS} und der Anzahl der zur Verfügung stehenden Einzelwerte kann nun entsprechend Gleichung 3-6 das Vertrauensintervall $\delta\bar{u}$ für die Geschwindigkeit \bar{u} unter Berücksichtigung des Phasenanteils α berechnet werden.

$$\delta\bar{u} = 2u_{\text{RMS}} / \sqrt{N_{\text{mess}}} \quad 3-6$$

Die Unsicherheit der turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen ergibt sich, gemäß Gleichung 3-7. Sie hängt ebenfalls von der Anzahl der Messungen und dem Vertrauensintervall der mittleren Geschwindigkeitsschwankung ab.

$$\delta u_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{mess}}}} u_{\text{RMS}} \quad 3-7$$

Die massenbezogene turbulente kinetische Energie k ergibt sich gewöhnlich aus den kinetischen Schwankungsenergien in den drei Raumrichtungen (Gleichung 3-8). Da die Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung bei dem verwendeten zweidimensionalen, zweikomponentigen PIV-Verfahren nicht gemessen wird, muss k mit den Geschwindigkeitsschwankungen in x- und y-Richtung berechnet werden. Voruntersuchungen zeigten, dass die zu untersuchenden Strömungen anisotrope Turbulenz aufweisen, da die Schwankungen in

Hauptströmungsrichtung die Schwankungen entlang der vertikalen Koordinate bei weitem übertreffen. Die Schwankungskomponente $\overline{w'^2}$ wird am besten durch die Komponente $\overline{v'^2}$ approximiert. Die turbulente kinetische Energie wird deshalb im Rahmen dieser Arbeit entsprechend Gleichung 3-9 berechnet.

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad 3-8$$

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + 2 \cdot \overline{v'^2}) \quad 3-9$$

Die Unsicherheit von k muss in Abhängigkeit der Eingangsvariablen $\overline{u'^2}$ und $\overline{v'^2}$ beziehungsweise deren Unsicherheiten δu_{RMS} und δv_{RMS} bestimmt werden. Moffat schlägt für die Fehlerrechnung für Größen, die aus mehreren unabhängigen Variablen berechnet werden, die Root-Sum-Square-Methode gemäß Gleichung 3-10 vor. In Gleichung 3-10 ist N die Anzahl der Eingangsvariablen, R entspricht dem Messergebnis und repräsentiert im vorliegenden Fall die turbulente kinetische Energie und X steht für die Eingangsvariablen $\overline{u'^2}$ und $\overline{v'^2}$ [Moffat 1988, 47].

$$\delta R = \left\{ \sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta R}{\delta X_i} \delta X_i \right)^2 \right\}^{1/2} \quad 3-10$$

Nach Einsetzen der Gleichungen 3-7 und 3-9 in 3-10 ergibt sich das Vertrauensintervall für die turbulente kinetische Energie k entsprechend Gleichung 3-11.

$$\delta k = \sqrt{(\overline{u'} \cdot \delta \overline{u'})^2 + 2 \cdot (\overline{v'} \cdot \delta \overline{v'})^2} \quad 3-11$$

Zu der bisher betrachteten statistischen Messunsicherheit addiert sich noch eine systematische Messunsicherheit, da die Messung des Zeitintervalls Δt und der Ortsänderung Δx nicht beliebig genau ist. Nach Herstellerangaben wird der Laser von der verwendeten PTU (*engl. Programmable Timing Unit*) mit einer Genauigkeit von 1 ns angesteuert. Zusätzlich muss die zeitliche Unsicherheit durch die Steuerelektronik des Lasers mit einem Jitter von +/- 10 ns mit einbezogen werden. Die Emission des Laserstrahls erfolgt daher mit einer Genauigkeit von 11 ns. Die Position eines Tracer Partikels kann laut Herstellerangabe mit einem Auswertefenster der Dimension 32 x 32 Pixel auf bis zu 0,05 Pixel genau bestimmt werden. Durch die erschwerten Versuchsbedingungen in einer instationären Zweiphasenströmung, kann nicht immer eine optimale Bildqualität erreicht werden, daher wird im Rahmen dieser Fehlerbetrachtung von einer Unsicherheit von 0,1 Pixel ($\approx 0,003$ mm) ausgegangen. Die entstehende Messunsicherheit ergibt sich dann entsprechend Gleichung 3-12 nach der Herleitung von Stähler [62]. Unter u wird dabei die Strömungsgeschwindigkeit und unter t der Zeitversatz zwischen den Doppelbildern verstanden.

$$\Delta |u| = \left| \frac{1}{t} \right| \cdot \Delta x + \left| -\frac{x}{t^2} \right| = \frac{\Delta x}{t} + u \cdot \frac{\Delta t}{t} \quad 3-12$$

Demnach beträgt die Messunsicherheit unter Einbeziehung der tatsächlich verwendeten Parameter bei den Messungen in Luft etwa 0,3 m/s und bei den Messungen in Wasser zwischen 0,004 - 0,007 m/s.

3.1.2. PIV-Messungen in der Gasphase

Bei PIV-Messungen in der Gasphase der geschichteten Zweiphasenströmung wird der Laserlichtschnitt wie in Abbildung 3-2 von oben in den Kanal eingekoppelt. Verwendet wird ein grüner Nd:YAG-Laser mit einer maximalen Pulsleistung von 25 mJ und 532 nm Wellenlänge. Als Tracer werden Öltröpfchen mit einem Durchmesser von 1 μm bis 5 μm verwendet. Die Tracer werden in einem Partikelgenerator nach dem Laskin-Nozzle Prinzip [58] erzeugt und direkt nach der Wabenstruktur in die Luftinlaufstrecke eingebracht. Um unerwünschte Einflüsse durch Tageslicht und Laborbeleuchtung auszuschließen, wird die Kamera bei Messungen in Luft mit einem optischen Bandpassfilter versehen, der nur Licht mit Wellenlängen um 532 nm passieren lässt. Auf diese Weise können alle anderen Lichtquellen weitestgehend ausgeblendet werden.

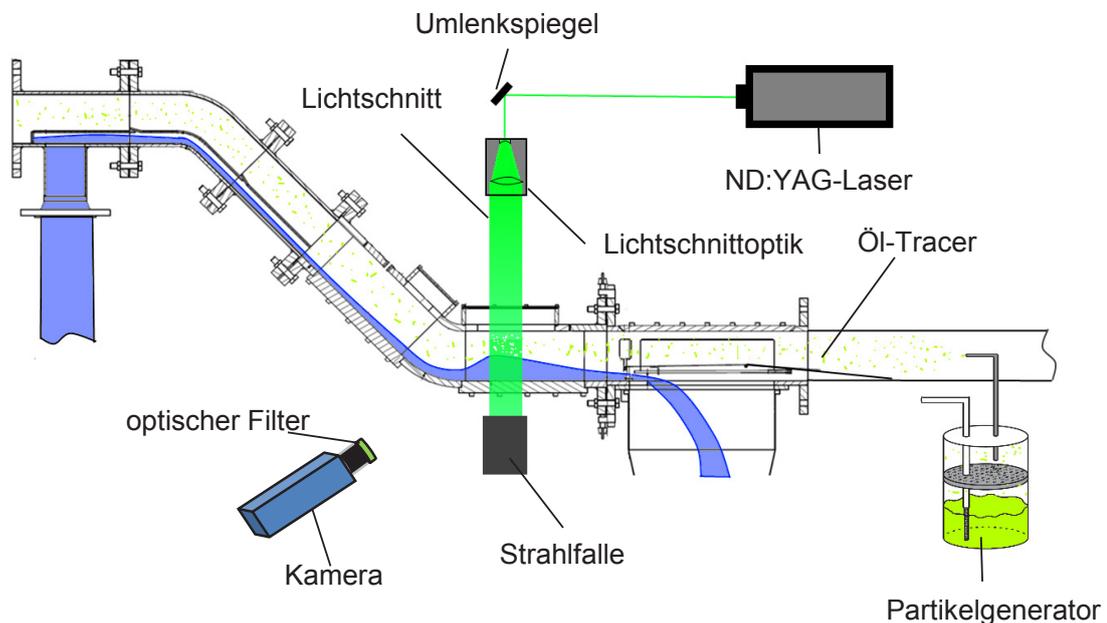


Abbildung 3-2 PIV-Aufbau für Messungen in der Gasphase

Erschwerend wirken optischen Effekte, die Geschwindigkeitsmessungen in der Gasphase der Zweiphasenströmung mit Tropfenablösung behindern. Umherfliegende Tropfen auf dem optischen Pfad, Tropfen und Wasserfilme an den Kanalfenstern und Reflexion des Lasers an den Phasengrenzflächen verfälschen die gewonnenen Geschwindigkeitsinformationen. Artefakte verzerren oder verdecken die Messebene und erzeugen darüber hinaus Fehlinformationen, die bei der Auswertung zu falschen Messwerten führen. Zum Teil können Artefakte durch numerische Bildbearbeitungsmethoden entfernt werden. In Abbildung 3-3 ist links ein Rohbild aus einer Messung zu sehen, auf dem sich mehrere Tropfen im optischen Pfad befinden. Durch Subtraktion eines gleitenden Mittelwerts mehrerer aufeinanderfolgender Bilder können die Signale, die von Tropfen auf dem Kanalfenster ausgehen, eliminiert werden. Durch die Bildung eines gleitenden Mittelwerts wird ein Bild erzeugt, auf dem sehr langsame Objekte abgebildet sind. Schnelle Objekte werden bei der Mittelwertbildung herausgefiltert. Mit der Subtraktion des Mittelwerts von jedem Einzelbild können diese langsamen Objekte aus den Aufnahmen entfernt werden (Abbildung 3-3 rechts).

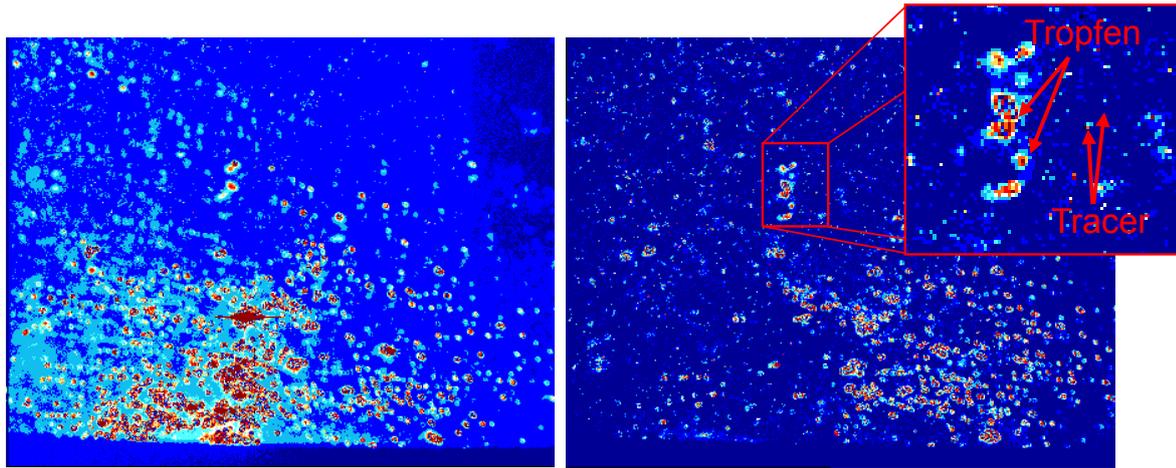


Abbildung 3-3 Entfernung parasitärer Flüssigkeitsanlagerung bei PIV-Messungen mittels Bildaufbereitung. Links vor der Bearbeitung, rechts danach

Dennoch bleiben gerade bei den Strömungen mit intensivem Tropfenabriss viele Artefakte erhalten, beispielsweise Tropfen, die sich gerade von der kontinuierlichen Flüssigphase gelöst haben und noch deutlich langsamer sind als die kontinuierliche Gasströmung. Solche Artefakte können nur schwer durch Bildbearbeitungsverfahren erkannt und ausgeblendet werden, da sie sich zwar ähnlich aber nicht gleich verhalten wie die Strömung. Ein anderer Ansatz ist die Verwendung von fluoreszierenden Tracern. Parasitäre Reflexionen könnten so ausgeblendet werden. Erste Fluoreszenzversuche mit Uranin [Brackmann 1985, 8] erscheinen vielversprechend. Uranin ist ein Farbstoff, der in Ethanol gelöst und zerstäubt werden kann. Um eine ausreichend hohe Intensitätsausbeute zu erreichen, muss er allerdings durch Laserlicht mit einer Wellenlänge von 355 nm angeregt werden. Vorversuche zeigten außerdem, dass Uranin in einer Zweiphasenströmung in hoher Konzentration zur Bildung von Schaum führen kann, so dass bei der Verwendung als Tracer nur geringe Mengen verwendet werden dürfen. Aus diesen Gründen konnte im Rahmen dieser Arbeit keine FPIV-Untersuchungen mehr realisiert werden.

Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung eines Endoskops (Abbildung 3-4, rechts) anstelle des herkömmlichen Objektivbaus der PIV-Kamera. Das Endoskop durchdringt dabei den eventuell vorhandenen Wandfilm. Auch die Distanz zwischen der Linse und der Messebene kann damit deutlich verkleinert werden, so dass weniger Tropfen den optischen Pfad versperren. Die Linse des Endoskops kann durch einen abschirmenden Kragen und kurze Druckluftpulse, die durch eine entsprechende Leitung direkt auf die Linse gerichtet werden, von Tropfen freigehalten werden (Abbildung 3-4, links). Die Druckluftpulse müssen dabei so getaktet sein, dass sie je zwischen den PIV-Messungen ausgelöst werden. Damit könnte eine ungewollte Beeinflussung der Strömung nahezu ausgeschlossen werden. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass die Lichtstärke des verwendeten Endoskops deutlich geringer ist als die eines Objektivbaus. Daher ist ein deutlich stärkerer Laser erforderlich, um Partikelbilder mit vergleichbarer Intensitätsausbeute zu erzeugen. Deshalb konnte diese endoskopische Methode im Rahmen dieser Arbeit auch nicht zur Einsatzreife gebracht werden.

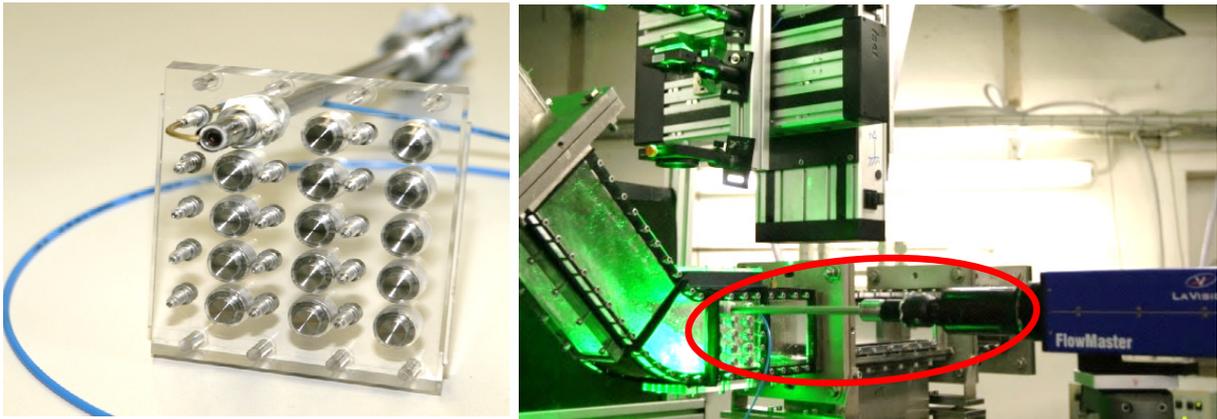


Abbildung 3-4 Endoskop Aufbau für PIV-Messungen in der Gasphase bei teilweise umgekehrter Strömung

3.1.3. PIV-Messungen in der flüssigen Phase

Bei Geschwindigkeitsmessungen in Wasser entsteht eine ähnliche Problematik wie in der Gasphase. Mögliche optische Interaktionen zwischen Laserlicht und Phasengrenzflächen erschweren die Bilderfassung. Um eine ausreichende Qualität des Laserlichtschnitts im Messbereich zu gewährleisten, wird dieser wie in den vorangegangenen Arbeiten von unten eingekoppelt (Abbildung 3-5).

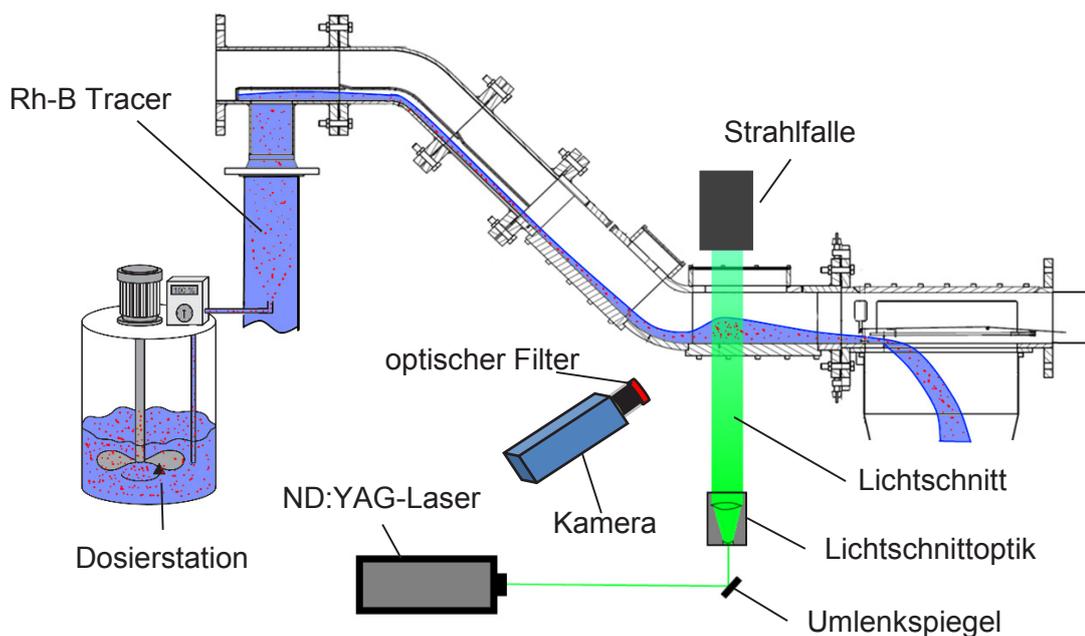


Abbildung 3-5 Schema PIV-Aufbau für Messungen in Wasser

Um parasitäre Reflexionen zu eliminieren, werden bei der Messung in Wasser fluoreszierende Tracer (Rhodamin B volumendotierte PMMA Partikel) benutzt. Diese streuen bei Anregung mit Laserlicht in einer Wellenlänge, die von der des Lasers verschieden ist. Damit kann zwischen dem Messsignal in der Lichtschnittebene und dem an der Phasengrenzfläche reflektiertem Laserlicht unterschieden werden. Die Kamera wird auch bei Messungen in Wasser mit einem optischen Bandpassfilter geschützt. Im Gegensatz zu Messungen in Luft, hält der verwendete Bandpassfilter jedoch Licht der Laserwellenlänge 532 nm (grün) zurück und lässt nur die des Fluoreszenzsignals (594 nm, rot) passieren. Partikel die indirekt, also von reflektiertem Laserlicht, beleuchtet werden, streuen deutlich

weniger intensiv. Das Signal dieser nicht in der Messebene liegenden Tracer hat daher eine geringere Intensität und kann bei der Bildaufbereitung vor der eigentlichen Auswertung entfernt werden. Damit ist bei diesem Verfahren gewährleistet, dass nur Signale aus der Messebene verarbeitet werden.

3.1.4. Kalibrierung und Auswerteverfahren

Die Kalibrierung der Längenmaße erfolgte bei den Messungen in dieser Arbeit semiautomatisch durch die Steuerungssoftware. Für Messungen in Luft wird im trockenen Kanal kalibriert. Um jedoch den veränderten Brechungsindex bei Messungen in Wasser kompensieren zu können, wurde für die Kalibrierung künstlich Wasser im Kanal angestaut. Die Kalibrierung wurde dann unter Wasser durchgeführt (siehe Abbildung 3-6).

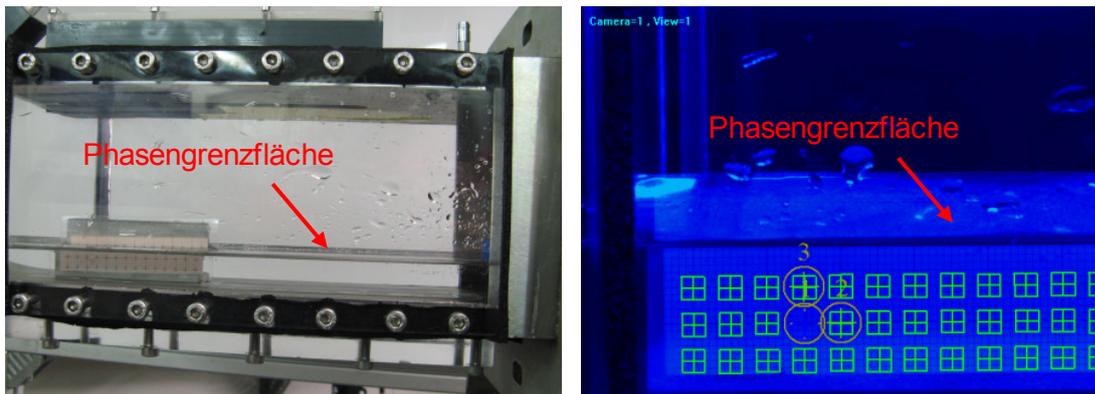


Abbildung 3-6 Kalibrierung für PIV-Messungen in Wasser

Problematisch ist bei dieser Vorgehensweise, dass das Licht auf dem optischen Pfad zwischen Messebene und Kamerachip mehrfach Phasengrenzflächen von Tropfen und Blasen passieren muss und abgelenkt werden kann (Abbildung 3-7). Dies tritt insbesondere bei teilweise umgekehrter Strömung auf. Der dadurch gegenüber der Kalibrierung veränderte Brechungsindex kann zu Messfehlern führen. Entgegengewirkt werden kann diesem Fehler nur durch eine restriktive Selektion der ermittelten Geschwindigkeitsvektoren bei der Auswertung der Messung.



Abbildung 3-7 Momentaufnahme bei teilweise umgekehrter Strömung

Die verwendete Auswertungsroutine besteht aus mehreren Schritten, die von den Doppelbildsequenzen nacheinander durchlaufen werden. Die Bilder werden zunächst, soweit möglich, von Artefakten befreit und so aufbereitet, dass der Kontrast zwischen Tracersignalen und dem Hintergrund (*engl. signal to noise ratio*) möglichst hoch ist. Zur Erhöhung des Kontrastes wird als erstes der Mittelwert aller Bilder bestimmt und jeweils von den Einzelbildern subtrahiert. Unbewegliche Lichtquellen, die auf jedem Bild vorkommen, werden damit entfernt. Als nächstes wird, falls erforderlich, ein gleitender Mittelwert von acht aufeinanderfolgenden Bildern von jedem Bild abgezogen. Zweck dieser Operation ist es die in Abschnitt 3.1.2 beschriebenen, langsam wandernden Objekte, wie Tropfen auf den Kanalfenstern, die nicht der Strömung zuzuordnen sind, aus den Bildern zu entfernen. Als letzter Schritt der Bildaufbereitung wird ein gleitender Mittelwert über mehrere Pixel eines Bildes gebildet und jeweils abgezogen. Dieser Filter wird so eingestellt, dass zur Mittelwertbildung ein Bildbereich herangezogen wird, dessen Kantenlänge etwa zwei bis dreimal größer ist als der Durchmesser eines Tracers. Die Vorgehensweise entspricht der Anwendung eines Hochpass-Filters und sorgt dafür, dass im Idealfall nur noch Tracer zu sehen sind.

Nach der Bildaufbereitung werden die Doppelbilder, wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben, ausgewertet. Dabei durchlaufen sie den Auswertungsalgorithmus mehrere Male. Zunächst erfolgt ein Durchlauf mit einer Suchfenstergröße von 64×64 Pixeln und einer Überlappung der Suchfenster von jeweils 50% der Fenstergröße, bei der die Partikelverschiebung grob ermittelt wird. Danach durchlaufen die Bilder den Algorithmus noch zweimal mit verkleinertem Suchfenster von 32×32 Pixel und einer Überlappung von 75%. Dabei entsteht für jedes Bildpaar ein hochaufgelöster Vektorplot. Die Messung wird während und nach der Auswertung anhand von mehreren Kriterien plausibilisiert. Dabei wird zum einen die Form und Höhe des Korrelationspeaks untersucht. Zum anderen werden auch Betrag und Richtung der Vektoren anhand der Werte benachbarter Vektoren überprüft und gegebenenfalls aussortiert.

Bei Messungen in stark instationären Strömungen, wie in Abbildung 3-7, müssen diese Filter jedoch sehr tolerant eingestellt werden, damit hohe physikalisch vorhandene Geschwindigkeitsschwankungen nicht künstlich unterdrückt werden. Bei Messungen in teilweise umgekehrten Strömungen entsteht damit eine Abhängigkeit des Messergebnisses von den Filtereinstellungen und es wird unmöglich, Schwankungen von zufälligen Messfehlern zu unterscheiden. Als Beispiel zeigt Abbildung 3-8, jeweils über der vertikalen Koordinate aufgetragen, die zeitlich gemittelte Geschwindigkeit, den volumetrischen Gasanteil und die Geschwindigkeitsschwankungen in Hauptströmungsrichtung. Zusätzlich ist mit den Fehlerbalken das 95%-Vertrauensintervall, entsprechend Abbildung 3-6, zu sehen. Wie anhand der Geschwindigkeitskomponente u im Diagramm links zu erkennen ist, ergibt eine tolerante Auswertung eine deutlich niedrigere mittlere Geschwindigkeit als eine Auswertung mit strengen Parametern. Die Differenz zwischen strengem und tolerantem Vektorpostprocessing nimmt mit steigender Geschwindigkeitsfluktuation sowie mit zunehmendem Gasphasenanteil zu. Ursache ist, dass Vektoren, die stark vom Mittelwert abweichen, bei einem sehr restriktiven Postprocessing unterdrückt werden. Im vorliegenden Fall bedeutet dies, dass besonders Vektoren geringer Geschwindigkeit oder Vektoren mit umgekehrten Vorzeichen unterdrückt werden, was zu einer höheren mittleren Geschwindigkeit führt.

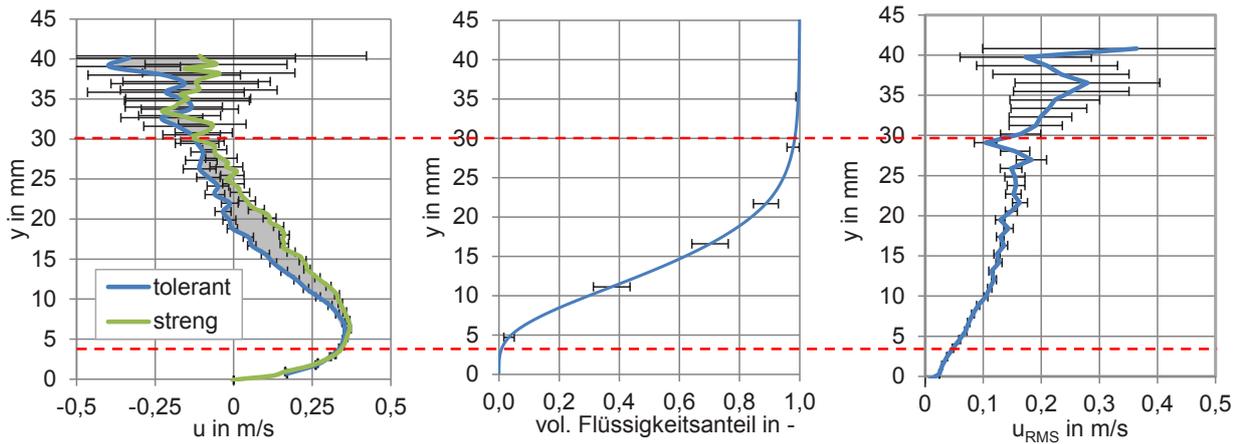


Abbildung 3-8 Abhängigkeit der Ergebnisse Parametersatz bei der softwaregestützten Auswertung von PIV-Messungen in stark fluktuierender Strömung

Die aus diesem Effekt entstehenden Messunsicherheiten schwanken von Messung zu Messung und hängen von den Strömungsbedingungen (Phasenanteil, Geschwindigkeitsschwankungsniveau, Tropfen/Blasen), der Bildqualität (Reflexionen, Tracerdichte) und den Auswerteparametern ab. Der größte Einfluss dieser Messunsicherheit ist bei stark instationären Strömungen in der Mitte des Zweiphasenbereichs zu erwarten, da dort die größten Schwankungen auf eine verhältnismäßig geringe Anzahl valider Messwerte treffen. Die Wahl der Parameter für das Postprocessing orientiert sich an Erfahrungs- und Richtwerten. Sie ist damit in erster Linie vom Nutzer abhängig. Aufgrund ihrer hohen Komplexität kann der Einfluss der daraus entstehenden Messunsicherheit nicht in die Fehlerrechnung mit einbezogen werden. Um dennoch wiederholbare Messergebnisse zu erzielen, wurde dieser Arbeit im Anhang eine vollständige Liste angefügt, aus der die verwendeten Hard- und Softwarekomponenten sowie die Parameter für Auswertung und Postprocessing hervorgehen.

3.2. Messung des Luftvolumenanteils

Neben den Geschwindigkeiten beider Fluide ist auch die Phasenverteilung in der Strömung ein wichtiger Parameter bei der Beschreibung einer entgegengerichteten, geschichteten Zweiphasenströmung. Für die messtechnische Erfassung der Phasenanteile sind bereits mehrere Verfahren entwickelt worden. Dazu zählen stabförmige Tastsonden, die den Kontakt mit der Phasengrenzfläche entweder optisch [Berthold et al. 1994, 7, Yamada und Saito 2010, 75] oder elektrisch kapazitiv [Jaworek und Krupa 2010, 26] erfassen. Wire-Mesh-Sensoren [Pietruske und Prasser 2007, 56, Prasser, 1999, 57] bestehen aus einem Gitter metallischer Drähte, das die Strömung passieren muss, und sind in der Lage, die Phasenverteilung und Geschwindigkeit in einem Kanal entlang eines zweidimensionalen Querschnittes zu ermitteln. Mayinger setzte Gamma-Densitometrie bei Versuchen zur Gegenstrombegrenzung im Maßstab 1:1 in einer Heißstranggeometrie ein [43]. Neuere Entwicklungen bedienen sich dagegen tomographischer Methoden. Ein extrem aufwändiges, jedoch auch sehr ergiebige Messverfahren, stellt in diesem Bereich die ultraschnelle Röntgentomographie dar [Hampel et al. 2007 21, Johansen et al. 2010, 29], bei der die Phasenverteilung in einer Strömung innerhalb sehr kurzer Zeit dreidimensional erfasst werden kann.

Bei intrusiven Messmethoden besteht das Risiko, dass die Strömung durch das Messgerät beeinflusst und die Messung deshalb verfälscht wird. Verfahren mit Gamma- oder Röntgenstrahlung sind jedoch in Bezug auf Abschirmung und Strahlenschutz sehr aufwändig. Vallée et al. 2012 [69] stellten eine bildbasierte Messmethode für die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Wasserstands in einer geschichteten Luft/Wasserströmung vor [69]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neues Verfahren entwickelt, bei dem eine zeitlich gemittelte 2D-Phasenverteilung eines ganzen Kanalabschnitts auf Basis von Kameraaufnahmen ermittelt werden kann. Das Verfahren kommt ohne Einbauten im Kanal aus. Zur Validierung des neuen Messverfahrens wurde die elektrische Kontaktsonde verwendet, die Stäbler in seiner Arbeit entwickelt hat. In diesem Kapitel werden beide Messverfahren erläutert. Zunächst wird kurz die Funktionsweise der Tastsonde diskutiert, um dann ausführlich auf Messprinzip, Aufbau und Validierung des neuen optischen Messverfahrens (engl. Optical Void Measurement, OVM) einzugehen.

3.2.1. Elektrische Kontaktsonde

Das System besteht aus der in Abbildung 3-9 abgebildeten Sonde, die an eine Operationsverstärkerschaltung angeschlossen ist. Durch Zugabe einer kleinen Menge Salz (NaCl) kann der Leitwert des Wassers so weit erhöht werden, dass er sich deutlich von dem der Luft unterscheidet. Die dadurch bedingten Änderungen der Strömungseigenschaften des verwendeten Wassers sind vernachlässigbar, da die Salzmenge minimal (0,05 g/l) ist. Wird nun ein elektrisches Potential zwischen Sondenspitze und der kontinuierlichen Wasserströmung angelegt, fließt ein Strom, wenn die Sondenspitze ins Wasser getaucht ist. Eine Messschaltung registriert die Zeitintervalle, in denen die Sondenspitze Wasserkontakt hat. Gemäß Gleichung 3-13 kann dann der volumetrische Phasenanteil der flüssigen Phase α_L an der Sondenspitze als Verhältnis der Zeit, in der die Sonde sich in der Luft befand, zur Gesamtmesszeit berechnet werden. Die Phasenanteile werden mit dieser Sonde punktweise gemessen. Durch vertikales Verfahren der Sonde kann so ein Profil erstellt werden.

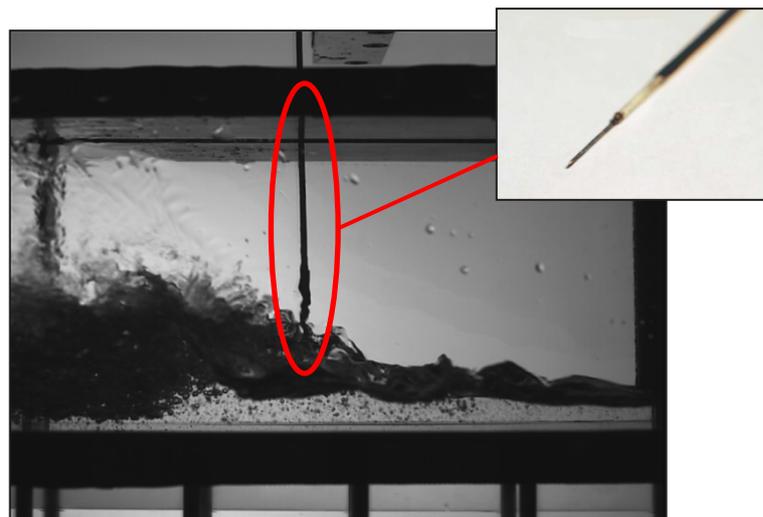


Abbildung 3-9 Leitwertsonde im WENKA-Kanal

$$\alpha_L = \frac{1}{\Delta t_{\text{mess}}} \int_0^{\sigma_{\text{mess}}} \varepsilon^G(\vartheta) d\vartheta \approx \frac{\sum_{i=1}^N \Delta t_{\text{Luft},i}}{\Delta t_{\text{mess}}} \quad 3-13$$

Die Sondenspitze wurde von Stähler [62,63] auf eine möglichst kleine Kontakthysterese beim Be- und Entnetzen durch die Wasseroberfläche optimiert. Die Genauigkeit der Sonde wird mit 2,5 % in schießender Strömung und 1 % bei Messung in teilweise umgekehrter Strömung angegeben. Dieser Fehlerbetrachtung liegt jedoch die Annahme zugrunde, dass ausschließlich kontinuierliche Phasen vorliegen. Frei fliegende Tropfen bleiben unberücksichtigt, da sie keine leitende Verbindung zum Kanal haben. Luftblasen in der kontinuierlichen Flüssigphase bleiben ebenfalls unberücksichtigt, wenn die Sondenspitze dennoch Kontakt mit Wasser hat. In einer Schaumströmung ist dies zum Beispiel der Fall, wenn die Sonde über den Wasserfilm zwischen den Blasen eine elektrische Verbindung zum Kanal hat. Die Sonde ist deshalb nur bedingt in Zweiphasenströmungen mit Tropfen und Blasen einsetzbar. Daher kann diese Kontaktsonde nur zu Validierungszwecken und nur an Stellen eingesetzt werden, an denen Tropfen und Blasen im Strömungsgeschehen vernachlässigbar sind.

3.2.2. Optische Methode zur Messung der volumetrischen Phasenverteilung, OVM

Der zeitlich gemittelte volumetrische Anteil einer Phase in einer Strömung entspricht der Wahrscheinlichkeit, mit der sich eine Phase an einer Raumkoordinate befindet. Wie in Abbildung 3-10 zu sehen ist, sind die beiden kontinuierlichen Phasen Luft und Wasser in einer geschichteten Zweiphasenströmung bei einer Photographie in Durchlichtanordnung hell. Dagegen erscheint das Zweiphasengebiet, aufgrund von Brechung und Reflexion an den zahlreichen Phasengrenzflächen, dunkel. Diese Eigenschaft kann zur Identifizierung des Zweiphasengebietes und infolgedessen zur Berechnung einer zeitlich gemittelten Phasenverteilung genutzt werden.

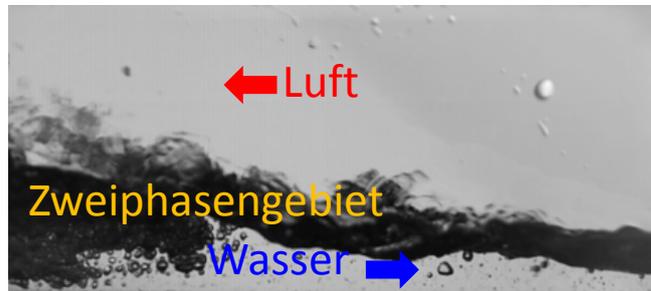


Abbildung 3-10 Schattenaufnahme einer geschichteten Zweiphasenströmung

Für die Messung werden viele Schattenbildaufnahmen ($N > 200$) der Strömung erstellt. Die Bilder werden in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeiten so kurz belichtet, dass alle Objekte in der Strömung scharf abgebildet sind. Am WENKA-Versuchsstand geschieht dies mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera, die mit 3 kHz betrieben wird. Die Beleuchtung erfolgt mit leistungsstarken, flimmerfreien Scheinwerfern. Dies ist notwendig, um eine gleichmäßige und zeitlich invariante Ausleuchtung auch bei höheren Aufnahmezeiten zu erzielen. Die Bilder zeigen die zweidimensionale Projektion der Strömung. Die Auswertung basiert auf einem in der Programmiersprache Python erstellten Code, der von Kaiser 2012 [31] im Hinblick auf Genauigkeit und Robustheit überarbeitet wurde. Die Bildsequenzen werden zur Auswertung in Einzelbilder zerlegt (Abbildung 3-11 links) und dann aufbereitet. Dazu wird die Intensität des Hintergrunds durch Division mit einem Hintergrundbild (*engl. white-image*), einer Aufnahme des leeren Kanals, normalisiert. Zur Erzeugung von Schwarzweißbildern wird ein Farbkanal der Aufnahme ausgewählt. Dieser wird mit logarithmischen und

exponentiellen Kontrastfiltern bearbeitet und anhand einer pixelorientierten Segmentierung in Kombination mit einem Schwellwert in eine Schwarzweißaufnahme gewandelt.

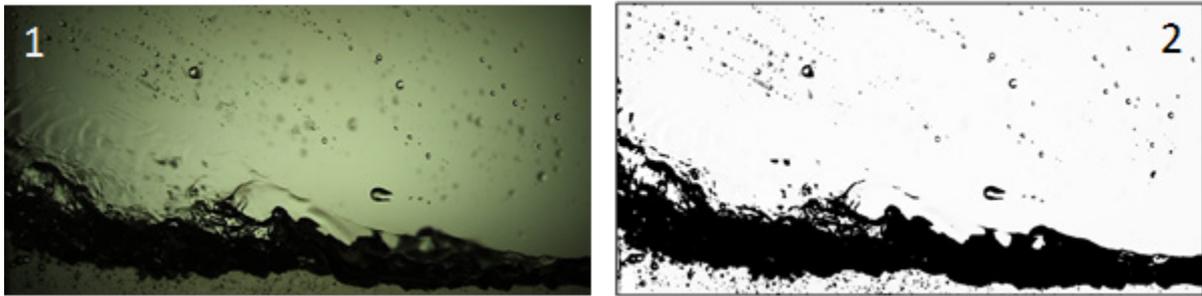


Abbildung 3-11 Optische Messung des Luftvolumenanteils: Rohbild (1) und normalisierte Aufnahme (2)

Im nächsten Schritt werden nun Artefakte, die nicht in die Messung mit einbezogen werden sollen, aus den Aufnahmen entfernt. Diese Objekte können verschiedener Herkunft sein und sowohl durch optische Effekte als auch durch Partikel entstehen. Es handelt sich um vier Kategorien von Artefakten:

1. Kleine Tropfen und Blasen in der Strömung leisten einen vernachlässigbaren Beitrag zum Gasvolumenanteil. Sie erzeugen bei einer Aufnahme in Durchlichtanordnung jedoch einen deutlich sichtbaren Schatten, der in der späteren Auswertung als Zweiphasengemisch über die volle Tiefe des Kanals interpretiert werden würde. Dies kommt einer Überbewertung des Zweiphasenbereichs gleich.
2. An den seitlichen Wänden des Kanals haften Tropfen an, die optisch kaum von fliegenden Tropfen zu unterscheiden sind, faktisch jedoch nicht am Strömungsgeschehen teilnehmen.
3. Bei zunehmender Luftgeschwindigkeiten entsteht an den Fenstern des Kanals aus einzelnen Tropfen ein dünner Wasserfilm. Dieser erscheint ebenfalls dunkel, wenn seine Grenzfläche gekrümmt ist.
4. Glanzpunkte entstehen im Zweiphasengebiet, wenn Licht unter ungünstigen Bedingungen durch Brechung oder Reflexion in das Zweiphasengebiet gelenkt wird. Es entstehen dann helle Bereiche, die bei der Auswertung als einphasig interpretiert werden würden, tatsächlich jedoch dem Zweiphasenbereich zuzuordnen sind.

Wenn diese Objekte im Bild verbleiben, entstehen Messfehler, da die Gebiete im späteren Verlauf der Auswertung falsch zugeordnet werden würden. Um Artefakte, wie kleine Tropfen und Blasen sowie anhaftende Tropfen aus den Bildern (Abbildung 3-12-2) zu entfernen, werden im nächsten Bearbeitungsschritt kleine Strukturen, die sich weit vom Zweiphasengebiet befinden, entfernt. Die Auswertesoftware benutzt dazu die morphologische Funktion Binary Fillholes [Jähne 2005, 27, Kaiser 2012, 31]. Diese wird mehrmals auf das Bild angewendet, wodurch kleine schwarze Objekte verschwinden (Abbildung 3-12-1). Damit enthält das Bild keine Artefakte wie kleine Tropfen und Blasen oder anhaftende Tropfen und Strukturen aus Wandfilmen mehr. Im nächsten Schritt werden Glanzpunkte im Zweiphasengebiet entfernt. Dies geschieht durch eine Invertierung der Bilder und die erneute Anwendung des Fillholes-Operators. Nach der Rückinvertierung ist der Zweiphasenbereich vollständig isoliert (Abbildung 3-12-2).

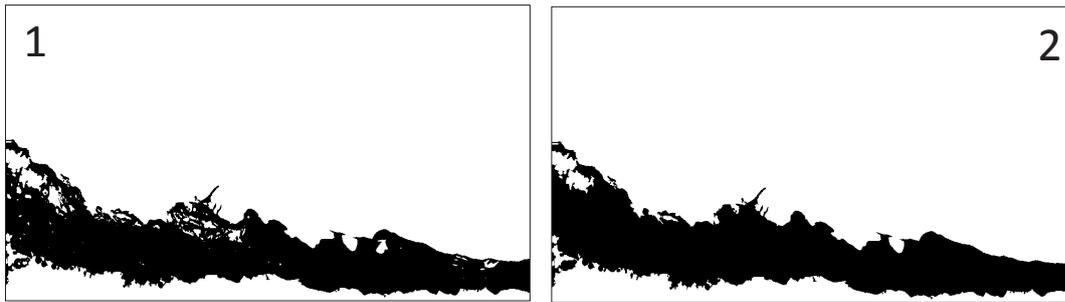


Abbildung 3-12 Aufnahme nach Entfernung kleiner Objekte (1) und Entfernung von Glanzpunkten (2)

Die Genauigkeit dieses Verfahrens lässt sich qualitativ anhand von Abbildung 3-13 beurteilen. In der dargestellten Aufnahme wurden die Grenzen des identifizierten Zweiphasenbereichs durch die Anwendung eines Sobel-Filters [Tönnies 2005, 65] ermittelt und über das zugrundeliegende Originalbild gelegt. Die identifizierte Grenze zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem subjektiv zu erwartenden Gebiet. Wichtig ist an dieser Stelle, dass Tropfen- und Blasenansammlungen nur dann mit in den Zweiphasenbereich einbezogen werden, wenn sie entweder nahe an dem durch die Wellen entstehenden Zweiphasenbereich liegen oder über eine hohe optische Dichte verfügen. Nur dann kann davon ausgegangen werden, dass sie tatsächlich einen signifikanten Anteil an der Phasenverteilung ausmachen.

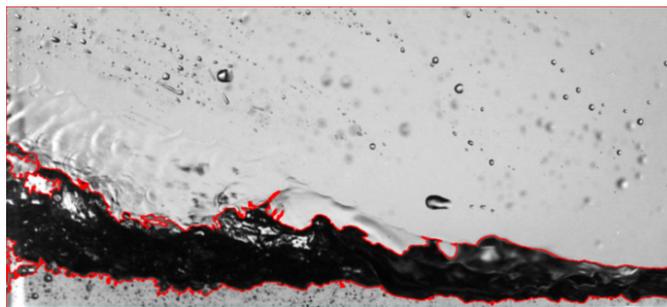


Abbildung 3-13 optische Messung des Luftvolumenanteils: Erfassung des Zweiphasenbereichs

Dieses Verfahren wird auf alle Bilder einer Bildsequenz angewendet. Dann werden alle Bilder einer Sequenz gemäß 3-14 addiert und mit der Bildanzahl N normiert. Resultat ist eine zeitlich gemittelte, mathematische Projektion des Zweiphasengebiets im betrachteten Kanalabschnitt.

$$\bar{I}(y) = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T I(y, t) dt \approx \frac{\sum_{n=1}^N I_n(y)}{N} \quad 3-14$$

Abbildung 3-14 repräsentiert damit die Wahrscheinlichkeit, mit der an einer Koordinate im Kanal das Zweiphasengebiet vorliegt. In der Falschfarbendarstellung sind Gebiete, die immer im Zweiphasenbereich liegen, rot und stets einphasig durchströmte Bereiche werden blau dargestellt. Die spaltenweise Integration aus der flüssigen Phase in die Gasphase (Gleichung 3-15) führt, nach Normierung mit dem Höchstwert, zu einer Verteilung, die zeigt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Punkt oberhalb des Zweiphasengebietes liegt. Diese Eigenschaft ist gleichbedeutend mit der Wahrscheinlichkeit, dass sich der Punkt in der einphasigen Gasströmung befindet und entspricht dem Luftvolumenanteil.

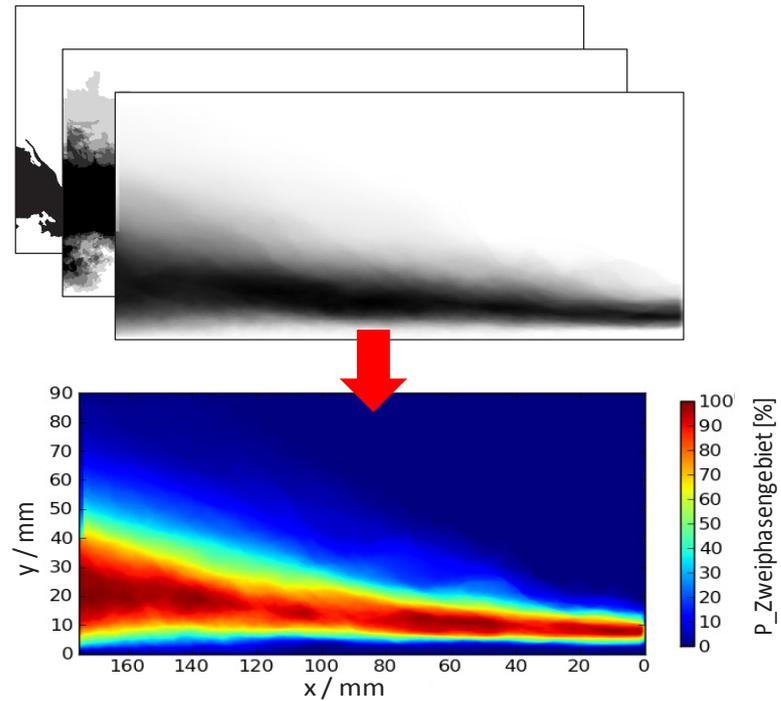


Abbildung 3-14 Überlagerung von 200 Schattenaufnahmen des 2-Phasengebiets

Die Gleichung gilt allerdings nur dann, wenn angenommen werden kann, dass der Luftvolumenanteil stets am oberen Bildrand 100% und am unteren Bildrand 0% beträgt. Diese Bedingung ist in einer geschichteten Zweiphasenströmung erfüllt. Unter der Bedingung, dass sich an einem Ort im Kanal entweder Wasser oder Luft befindet (Gleichung 3-16), ergibt sich damit eine vollständige Phasenverteilung. Gibt man die ermittelten Phasenanteile aus einer Spalte aus, erhält man für eine Koordinate x den Verlauf des Luftvolumenanteils.

$$\bar{\alpha}_L(y) = \frac{\int_{\text{unterer Bildrand}}^{y'} \bar{I}(y) dy}{\int_{\text{unterer Bildrand}}^{\text{oberer Bildrand}} \bar{I}(y) dy} \quad 3-15$$

$$\bar{\alpha}_G(y) = 1 - \alpha_L(y) \quad 3-16$$

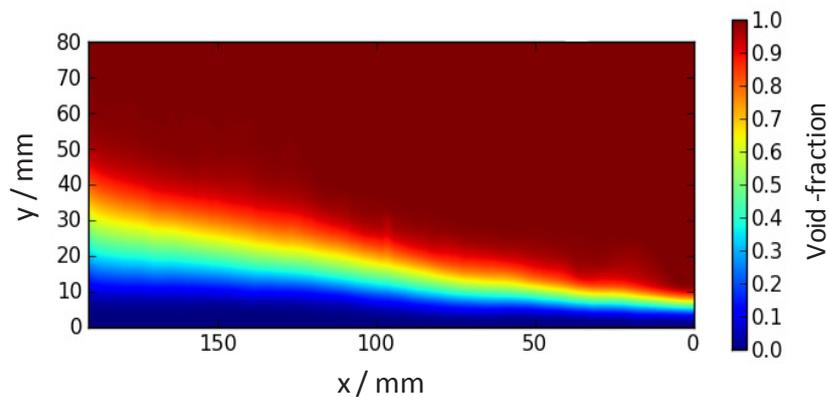


Abbildung 3-15 Ergebnis der OVM-Messung: 2D-Phasenverteilung für den gewählten Bildausschnitt

3.2.3. Validierung und Fehlerbetrachtung

Zur Validierung des Verfahrens wurden umfangreiche Vergleichsmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse der neuen optischen Messmethode wurden mit Messungen der in Kapitel 3.2.1 vorgestellten Kontaktsonde verglichen. Wie in Abbildung 3-16 zu sehen ist, wurden dafür beide Messmethoden am Kanal aufgebaut und simultan Messungen durchgeführt. Durch den kombinierten Aufbau ist der Schatten der Kontaktsonde auf den Bildern der optischen Methode zu sehen.

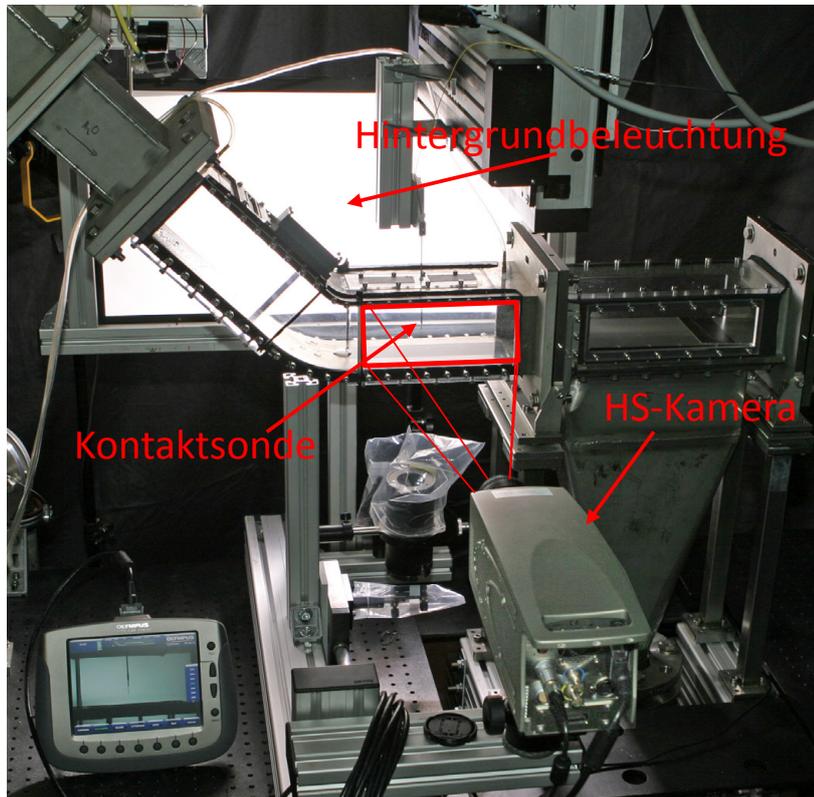


Abbildung 3-16 Versuchsaufbau zur Validierung der neuen optischen Messmethode

Da der Schatten der Kontaktsonde auf den Bildern für die optische Auswertung die Messposition verdeckt, wurden die Vergleichswerte der optischen Messung aus Werten, die rechts und links der eigentlichen Messposition gemessen wurden, linear interpoliert. Die dadurch entstehende, maximale Abweichung liegt deutlich unter 1%, und kann daher vernachlässigt werden. Die Messmethoden wurden bei vier verschiedenen Volumenstromkombinationen verglichen. Die Messdauer der optischen Messmethode lag zwischen 16 und 40 Sekunden, die der Kontaktsonde bei 260 Sekunden. In Abbildung 3-17 ist eine Gegenüberstellung der Ergebnisse zu sehen. Grundsätzlich kann eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse beider Messverfahren festgestellt werden.

Bei genauerer Betrachtung wird sichtbar, dass die neue Methode den Luftanteil der Strömung unterhalb von $\alpha = 0,5$ im Vergleich zur Kontaktsonde häufig überschätzt. Im Bereich $0,5 < \alpha < 1,0$ detektiert sie hingegen bei allen Messungen einen zu geringen Luftanteil. Die genauere Analyse zeigt bei allen Volumenströmen eine ähnliche Tendenz. Die absoluten Beträge der Abweichung sind aber stets verschieden. Der Fehler kann daher nicht als systematischer Fehler betrachtet und kompensiert werden. Vielmehr muss die Abweichung als die untrennbare Überlagerung aller Unsicherheiten betrachtet werden. Eine der Hauptursachen besteht vermutlich darin, dass die Kontaktsonde, wie im

vorangegangenen Abschnitt beschrieben, weder Tropfen noch Blasen erfassen kann. Damit wird der Luftanteil in Blasenströmungen durch die Kontaktsonden systematisch unterschätzt und in Tropfenströmungen überschätzt. Die Messstelle wurde so gewählt, dass vergleichsweise wenig Tropfen und Blasen vorhanden sind, ein Einfluss erscheint dennoch vorhanden zu sein.

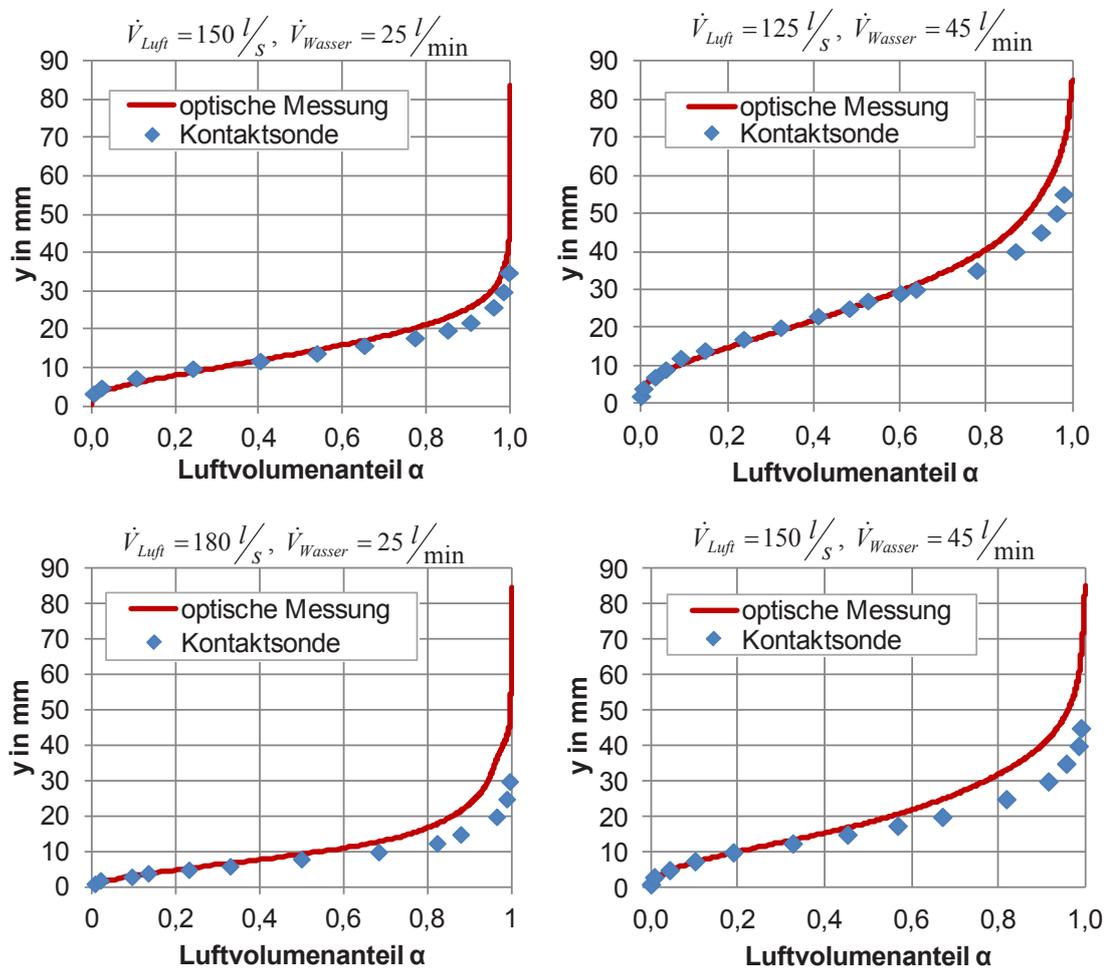


Abbildung 3-17 Gegenüberstellung der Ergebnisse von Kontaktsonde und videometrischer Messung bei unterschiedlichen Strömungsbedingungen

Weiterhin stellt die Gegenüberstellung der gemessenen Werte des lokalen Luftvolumenanteils α_G , in Abbildung 3-17 einen Vergleich zwischen einer integralen Messung über die gesamte Kanaltiefe und einer lokalen Messung an der Messstelle der Kontaktsonde dar. Unter der Annahme, dass das Zweiphasengebiet im zeitlichen Mittel über die gesamte Raumtiefe gleich groß ist, können die Verfahren aber verglichen werden.

Durch den optischen Aufbau der Kamera kann sich außerdem ein Projektionsfehler ergeben (Abbildung 3-18), der Wellen, die weit von der Kamera entfernt sind (b), kleiner erscheinen lässt als Wellen gleicher Amplitude (a), die im Vordergrund liegen. Dies ist dann der Fall, wenn der Strahlengang vom Objekt zur Kamera nicht parallel ist. Da die Kamera nur endlich weit vom Objekt aufgebaut werden kann und keine Kompensationsmaßnahmen getroffen wurden, ist dies bei den in dieser Arbeit vorgestellten Messungen gegeben. Die daraus entstehende Messunsicherheit durch den Projektionsfehler hängt von der Position und der

Höhe des Zweiphasengebiets ab. Unter der Annahme, dass sich die beobachtete Strömung im zeitlichen Mittel annähernd als zweidimensional beschreiben lässt, verschwindet dieser Fehler allerdings bei einer ausreichend langen Messdauer. Der Zweiphasenbereich ist dann auf der der Kamera zugewandten Seite genauso groß wie auf der abgewandten Seite.

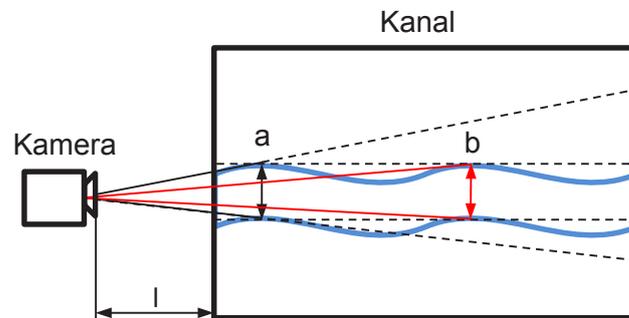


Abbildung 3-18 Projektionsfehler bei endlichem Kameraabstand l

Bei der Messung mit einer digitalen Kamera entstehen Digitalisierungsfehler durch das Pixelraster des Kamerachips, sowie durch die Bittiefe der Kamera, da die Intensitätswerte bei der Aufnahme einer Skala mit endlich vielen Werten zugeordnet werden. Diese Unsicherheit ist, bei Verwendung einer hochauflösenden Kamera mit einer entsprechenden Ausleuchtung jedoch um Größenordnungen kleiner als die anderen Fehlerquellen. Sie wird daher vernachlässigt.

Insgesamt zeigen die Validierungsmessungen, dass die optische Messung der Phasenverteilung ein effektives Messverfahren ist. Die Messabweichung ergibt sich unter Einbeziehung aller Werte der Validierungsmessungen zu einem mittleren Wert von 8,5 %. Die Standardabweichung dieser Messunsicherheit beträgt 7,9 %. Die Unsicherheit liegt somit in der gleichen Größenordnung wie die der Kontaktsonde.

3.3. Messung des Tropfenmassenstroms mit einer Nulldrucksonde

Für die Bestimmung des Tropfenmassenstroms einer dispersen Zweiphasenströmung kommen mehrere optische Messverfahren in Frage. Beispiele sind das Schattenverfahren [Pfeifer 2010, 54] oder die Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA) [Mayinger und Feldmann 2001, 44]. Diese Verfahren können die Größenverteilung und Geschwindigkeit der dispersen Phase einer Zweiphasenströmung ermitteln [Löffler-Mang 2012, 41]. In Mehrphasenströmungen treten jedoch auch häufig Strömungszustände auf, die für optische Messmethoden unzugänglich sind, da sie durch Brechung, Beugung und Reflexion an den Grenzflächen nicht von gerichteten optischen Signalen durchdrungen werden können. Des Weiteren sind Verfahren wie Schattenverfahren und PDA nur in Strömungen mit annähernd kugelförmigen oder wenigstens ellipsoiden Partikeln bis etwa 3 mm Durchmesser anwendbar [41]. Da diese Bedingungen jedoch bei der Untersuchung der entgegengerichteten, geschichteten Zweiphasenströmung in der vorliegenden Arbeit nicht gegeben waren, musste auf eine intrusive Messmethode zurückgegriffen werden.

Für die Bestimmung des Flüssigkeitsanteils im Zweiphasenbereich wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Nulldrucksonde zur isokinetischen Probestromentnahme entwickelt. Das Prinzip der Nulldrucksonde wird seit langem erfolgreich in der Partikelmesstechnik verwendet. Dafür finden sich auch in der Literatur zahlreiche Beispiele [Eschrich 1999, 17, Lee 2010, 39, Rheinhardt et al. 1999, 59, Zhang und Ishii 1995, 77].

3.3.1. Messprinzip

Um den Tropfenmassenstrom mit einer Nulldrucksonde zu bestimmen, muss der zu untersuchenden Strömung kontinuierlich ein Teil entnommen werden. Die Strömung wird dann auf ihre Bestandteile untersucht. Dafür wird die disperse Phase von der kontinuierlichen abgetrennt. Beide Massenströme können im Weiteren getrennt voneinander quantifiziert werden. Voraussetzung für eine exakte Messung ist eine repräsentative Probe der Strömung. Da das Partikelfolgevermögen jedoch von der Größe des jeweiligen Partikels abhängt, ist dies nicht trivial. Die Sonde muss so eingestellt werden, dass der Tropfenmassenstrom nicht durch die Strömungsbedingungen an der Absaugöffnung fraktioniert und somit verfälscht wird. In Abbildung 3-19 sind die drei denkbaren Fälle skizziert.

Im ersten Fall wird zu viel Zweiphasengemisch abgesaugt, kleine Tropfen folgen der Strömung und werden angesaugt, obwohl ihre ungestörte Trajektorie nicht in die Sonde führen würde. Große Tropfen, deren Stromlinie nicht im Öffnungsquerschnitt der Sonde liegt, werden dagegen nicht angesaugt, da sie der Strömung der kontinuierlichen Phase nicht folgen können. Dieser Zustand wird als hyperkinetische Anströmung bezeichnet. Der Messwert überschätzt den tatsächlichen Tropfenmassenstrom, da zu viele kleine Tropfen angesaugt werden.

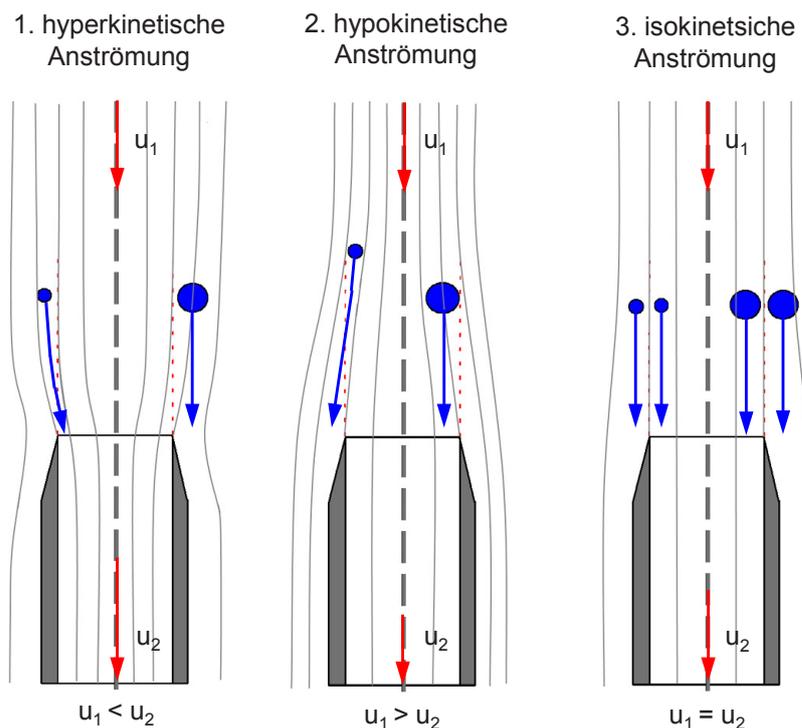


Abbildung 3-19 Anströmung des Sondenkopfes einer Nulldrucksonde: 1. hyperkinetische, 2. hypokineticische, 3. isokineticische Anströmung in Anlehnung an Zhang [77]

Der zweite Fall wird als hypokineticische Anströmung bezeichnet und repräsentiert das andere Extrem. Der abgesaugte Volumenstrom ist zu niedrig, kleine Tropfen folgen der Strömung und werden von der Sonde verdrängt, große Tropfen können wiederum nicht der Strömung folgen. Dies führt zu einem zu niedrigen Messwert, da kleine Tropfen in der Messung unterrepräsentiert sind. Um einen korrekten Messwert zu erhalten, ist es notwendig, dass das abgesaugte Volumen der kontinuierlichen Phase genau so groß ist, dass die Strömungs-

geschwindigkeit im Inneren der Sonde der der umgebenden Strömung entspricht. Bei der isokinetischen Anströmung, dem dritten Fall, entsteht keine Geschwindigkeitskomponente quer zur Hauptströmungsrichtung, so dass es nicht zu einer Fraktionierung zwischen kleinen und großen Tropfen kommt. Nur in diesem Fall kann der Tropfenmassenstrom korrekt ermittelt werden.

In einer realen turbulenten Strömung ist es unmöglich, während einer Messung permanent isokinetische Bedingungen einzuhalten, da der abgesaugte Volumenstrom bei schwankender Anströmgeschwindigkeit nur bedingt nachgeführt werden kann. Die Änderung des Messwertes in Abhängigkeit des Geschwindigkeitsverhältnisses $u_{\text{innen}}/u_{\text{außen}}$, ist bei hypokinetischen Verhältnissen deutlich größer als bei hyperkinetischer Anströmung [17]. Da besonders in einer turbulenten Strömung leichte Abweichungen vom isokinetischen Messbetrieb zu erwarten sind, kann die Messunsicherheit durch einen geringfügig erhöhten Absaugvolumenstrom verringert werden. Eine Messung bei leicht hyperkinetischer Einstellung ist daher anzustreben.

3.3.2. Aufbau und Funktion

Eine Nulldrucksonde besteht aus mehreren Baugruppen, die entsprechend ihrer Funktion angeordnet werden. Die Probestromentnahme geschieht am Sondenkopf, der meist aus mehreren Teilen besteht. Der Sondenkopf sollte einen kleinen Materialquerschnitt aufweisen, damit die Beschleunigung der Strömung durch das verdrängte Volumen minimal bleibt. Er enthält zwei Druckmessbohrungen zur Messung des statischen Drucks im Inneren und außerhalb der Absaugöffnung. Durch die Messung der Druckdifferenz kann, anhand der Bernoulli-Gleichung für reibungsfreie inkompressible Medien, gemäß 3-17 ein Zusammenhang mit den Anströmbedingungen hergestellt werden.

$$\Delta p_{\text{stat}} = p_{\text{stat, innen}} - p_{\text{stat, außen}} = \frac{\rho}{2} (u_{\text{außen}}^2 - u_{\text{innen}}^2) \quad 3-17$$

Die Differenz der statischen Drücke vom Inneren gegenüber dem Äußeren der Sonde verschwindet genau dann, wenn die Sonde isokinetisch angeströmt wird. Dies ist somit der anzustrebende Betriebspunkt der Sonde.

Ist die Probeentnahme erfolgt, muss die disperse Flüssigphase von der kontinuierlichen Gasphase separiert werden. Dazu können, je nach Messaufgabe, Filter oder Trägheitsabscheider verwendet werden. Die Dimensionierung des Abscheidesystems muss so geschehen, dass das kleinste disperse Partikel, das in der zu untersuchenden Strömung vorkommt, gerade noch zuverlässig abgeschieden wird. Wenn dies, beispielsweise wegen des hohen Partikelfolgevermögens kleiner Partikel, nicht möglich ist, entsteht ein Messfehler. Nach der Abscheidung wird die disperse Phase gesammelt und quantifiziert. Die kontinuierliche Phase, die bis dahin auch dem Transport der dispersen Phase diente, wird aus dem Abscheidesystem abgesaugt, quantifiziert und dann der Umgebung zugeführt. Dabei muss das treibende Aggregat (Pumpe oder Lüfter) genau den Druckverlust des SONDENSYSTEMS kompensieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Nulldrucksonde entwickelt und für die Randbedingungen bei der Untersuchung der Zweiphasenströmungen im WENKA-Kanal angepasst. Wie in Abbildung 3-20 zu sehen ist, wurde das gesamte SONDENSYSTEM auf einen beweglichen Wagen montiert.

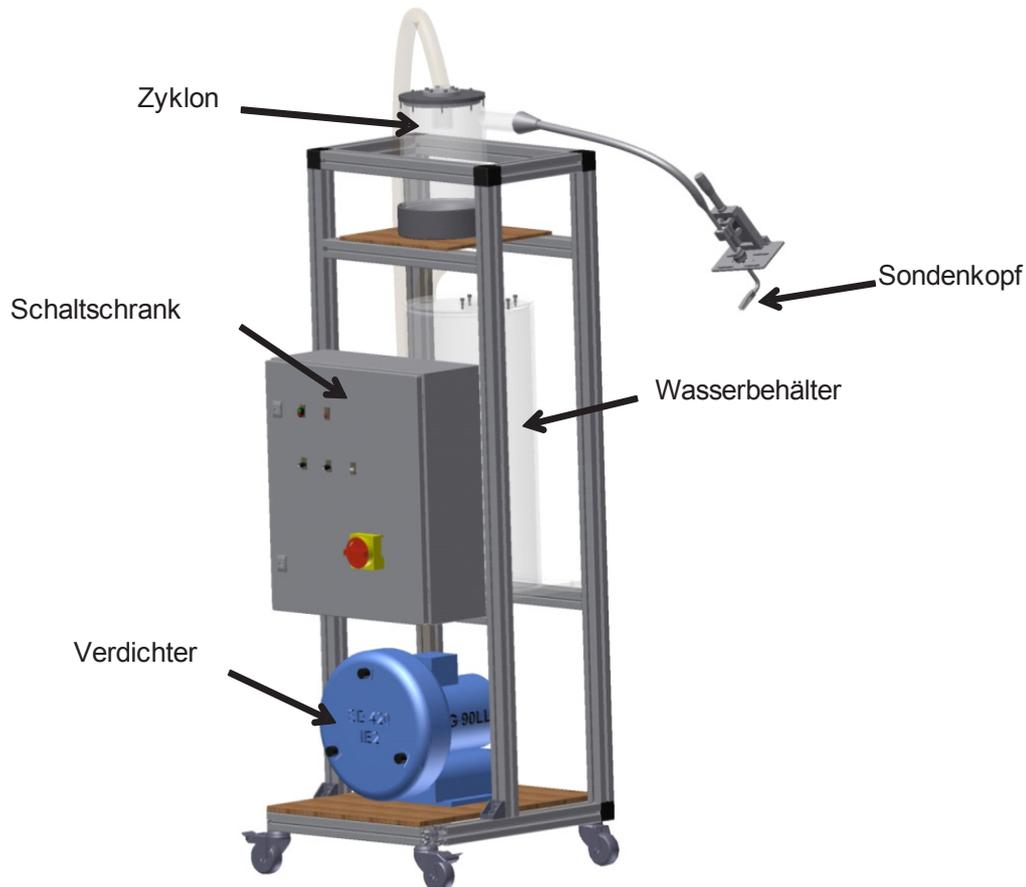


Abbildung 3-20 CAD-Modell der Nulldrucksonde

Wie auch in dem dazugehörigen Schaltbild der Sonde in Abbildung 3-22 zu erkennen ist, kann der Sondenkopf der Nulldrucksonde im Kanal über der vertikalen Koordinate traversiert werden. Die Probe wird durch eine Rohrleitung und einen Schlauch in einen Zyklon geleitet. Dort wird der disperse Tropfenmassenstrom von der kontinuierlichen Gasphase getrennt und schwerkraftgetrieben in einen Messbehälter geleitet. Der Messbehälter ist so dimensioniert, dass er die maximal zu erwartende Wassermenge bei einer Messdauer von 500 s gerade aufnehmen kann. Mit einem Füllstandsmessgerät wird der ansteigende Pegel erfasst und daraus der Tropfenmassenstrom errechnet. Der Luftmassenstrom wird mit einem Heißfilmanemometer quantifiziert. Das Sondensystem wird mit einem Seitenkanalverdichter betrieben, dessen Ansaugvolumen in einem weiten Bereich variiert werden kann. Die Messwerterfassung und Steuerung der Sonde erfolgt rechnergestützt, dazu werden die Mess- und Steuersignale der Sonde in einem Schaltschrank gesammelt und an den Steuerrechner der WENKA-Anlage weitergegeben.

Der verwendete Sondenkopf hat einen Öffnungsquerschnitt von $10 \times 12 \text{ mm}^2$. Die zu erwartende Tropfengröße wurde anhand von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen auf Durchmesser zwischen 0,2 und 9 mm geschätzt. Die Öffnung des Sondenkopfes ist damit größer als die größten erwarteten Tropfen und Ligamente. Die Druckdifferenz zwischen dem Inneren der Sonde und deren Umgebung wird an zwei Druckmessbohrungen mit einem Durchmesser von 0,5 mm gemessen. Eine Eigenschaft dieses Systems besteht darin, dass eine verfälschte Druckdifferenz gemessen wird, wenn die Sonde seitlich angeströmt wird. Der Messfehler entsteht, wenn die der Strömung zugewandte Druckmessbohrung zusätzlich mit Staudruck beaufschlagt wird und sich die abgewandte Bohrung in einem Ablösegebiet

befindet. Die gemessene Druckdifferenz ist dann größer als die tatsächliche Differenz der statischen Drücke. Um dem vorzubeugen, wurde der Sondenkopf (Abbildung 3-21) mit zwei Druckdifferenzmessstellen an den gegenüberliegenden Seiten der Sonde ausgestattet.

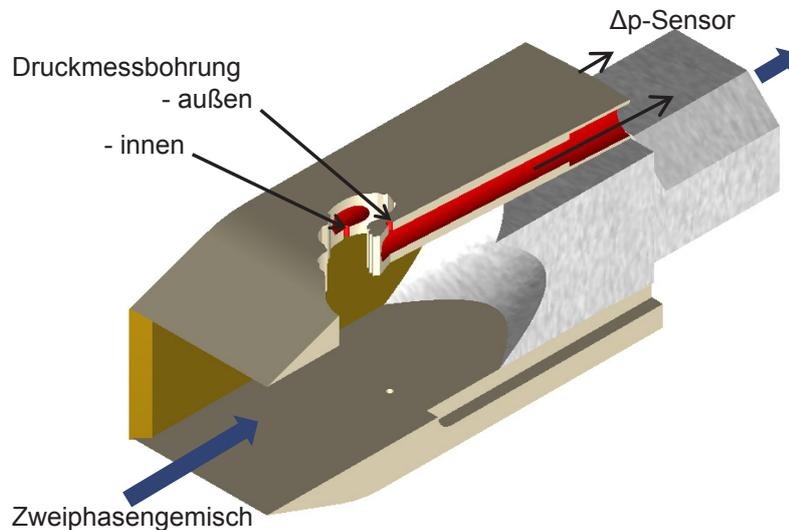


Abbildung 3-21 Sondenkopf der Nulldrucksonde

Mit Hilfe dieser zusätzlichen Druckmessbohrungen kann der Druckmessfehler kompensiert werden. Da sich der Fehler auf der einen Seite addiert (3-18) und auf der anderen Seite subtrahiert (3-19), ist gemäß Gleichung 3-20 eine Fehlanströmung ausgeschlossen, wenn beide Messwerte übereinstimmen.

$$\Delta p_1 = \Delta p_{\text{statisch}} + \Delta p_{\text{Fehler}} \quad 3-18$$

$$\Delta p_2 = \Delta p_{\text{statisch}} - \Delta p_{\text{Fehler}} \quad 3-19$$

$$\text{aus } \Delta p_1 = \Delta p_2 \text{ folgt } \Delta p_{\text{Fehler}} = 0 \quad 3-20$$

Entsprechend muss die Sonde vor jeder neuen Messreihe so ausgerichtet werden, dass diese Bedingung erfüllt ist. Da die Sonde in einer Zweiphasenströmung, bestehend aus Gas und Flüssigkeit, eingesetzt wird, besteht zudem die Gefahr, dass die Druckmessbohrungen der Sonde durch Flüssigkeit blockiert werden. Aufgrund des Kapillareffekts kann das Wasser in die Messleitung eindringen und die Messung verfälschen. Wie im Flussdiagramm in Abbildung 3-22 zu sehen ist, wurde die Sonde deshalb mit einem Druckluftsystem ausgestattet, durch das die Messleitungen mit Druckluft gespült werden können. Die Spülungen werden durch die Steuerungssoftware ausgelöst und können entweder in regelmäßigen Abständen oder auf Anforderung des Nutzers erfolgen. Während einer Spülung werden die Ventile vor den Druckdifferenzsensoren verschlossen, damit selbige nicht beschädigt werden. Das Flussdiagramm zeigt auch die Anordnung der anderen Komponenten. Die wichtigsten technischen Daten der Einzelkomponenten der verwendeten Nulldrucksonde sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

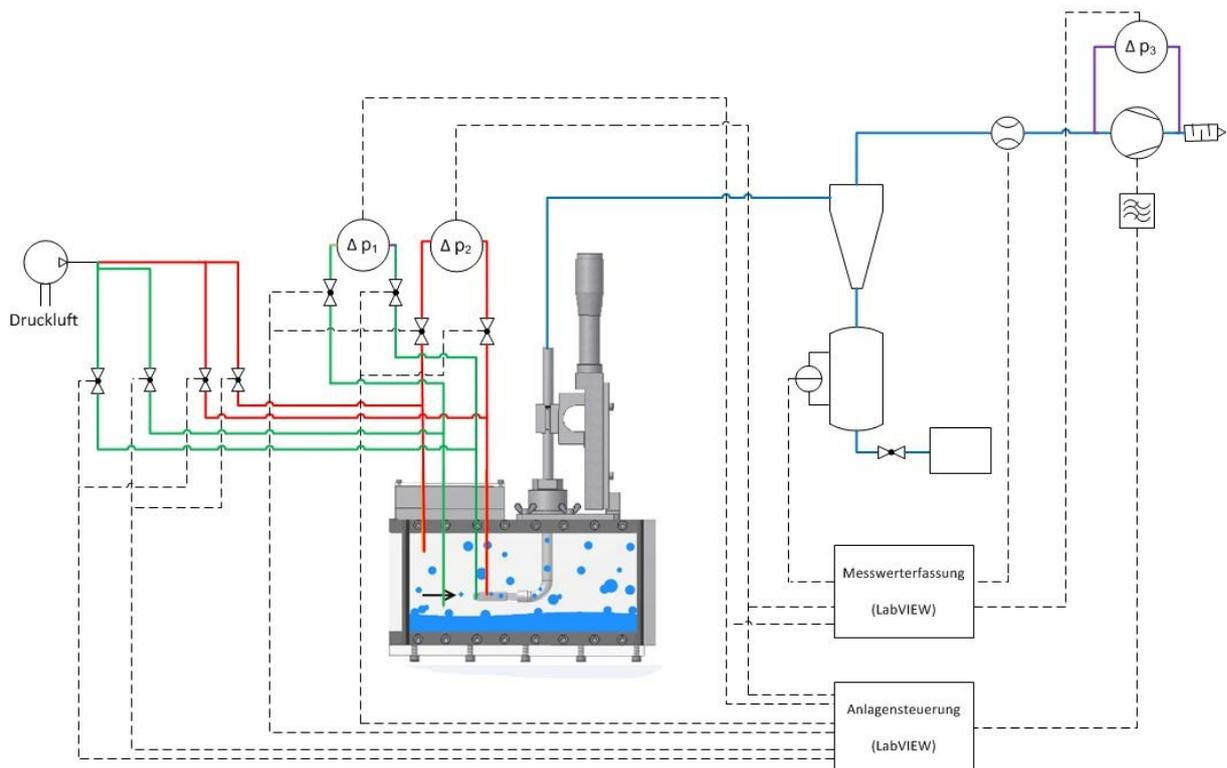


Abbildung 3-22 Flussdiagramm der Nulldrucksonde

Da die Einhaltung isokinetischer Bedingungen am Sondenkopf direkt mit der Genauigkeit der Sonde zusammenhängt, ist es naheliegend zu prüfen, ob dieses Kriterium eingehalten werden kann. Zu diesem Zweck wurden bei der Inbetriebnahme der Sonde mehrere Versuche durchgeführt, bei denen das Geschwindigkeitsfeld vor dem Sondenkopf während des Sondenbetriebs mit Particle Image Velocimetry gemessen wurde. Die Versuche wurden einphasig in Luft durchgeführt. In Abbildung 3-23 sind die Geschwindigkeitsprofile einer Messung zu sehen. Der durch die Sonde abgesaugte Luftmassenstrom wurde im konstant einphasig durchströmten Kanal variiert. Die Sondenposition blieb während des Versuchs unverändert und ist in den Diagrammen in 40 mm Höhe zu sehen. Die Geschwindigkeitsprofile zeigen die Luftgeschwindigkeiten 6 mm vor dem Sondenkopf. Im Diagramm links sind die Profile der Geschwindigkeitskomponente in Hauptströmungsrichtung zu sehen. Es wird deutlich, dass ein abgesaugter Luftmassenstrom von 6,3 kg/s zu einer isokinetischen Anströmung führt, da bei diesem Volumenstrom ein beinahe ungestörtes Geschwindigkeitsprofil beobachtet werden kann. Die Profile der Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Hauptströmungsrichtung (Abbildung 3-23, rechts) bestätigen diese Beobachtung. Wie an den charakteristischen S-Profilen zu sehen ist, wird für größere Luftmassenströme Luft zur Sonde hin gesaugt (hyperkinetische Anströmung), was sich in einer negativen vertikalen Geschwindigkeit oberhalb und einer positiven Geschwindigkeit unterhalb äußert. Für Luftmassenströme kleiner als 6,3 kg/s tritt das S-Profil in invertierter Form auf, was einer Verdrängung entspricht (hypokinetische Anströmung).

Tabelle 3.1 Technische Daten der eingesetzten Nulldrucksonde

Größe	Wert	Einheit
Sondenkopf		
Ansaugquerschnitt	120	mm ²
Parasitärer Querschnitt	92	mm ²
Messbereich Drucksensoren	+/- 10	mbar
Zyklonabscheider		
Innendurchmesser	180	mm
Höhe	250	mm
Abscheidegrad	>99%	-
Messbehälter		
Innendurchmesser	180	mm
Messvolumen	15	l
Gebläse (Bauart: Seitenkanalverdichter)		
max. Druckdifferenz	400	mbar
max. Ansaugvolumen	23	m ³ /min

Wenn dieser Versuch bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten wiederholt wird, kann die Druckdifferenz am Sondenkopf über dem Absaugmassenstrom aufgetragen werden (siehe Abbildung 3-24). Verbindet man die Messpunkte, die mittels PIV als isokinetisch identifiziert werden können, dann ergibt sich ein näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen dem abgesaugten Luftvolumenstrom und der am Sondenkopf gemessenen Druckdifferenz. Entgegen der Theorie zeigt sich jedoch, dass sich die isokinetischen Zustände nicht bei verschwindender Druckdifferenz ergeben, sondern dass ein Zusammenhang mit der Anströmgeschwindigkeit der zu untersuchenden Strömung besteht. Ursache dieser Abweichung ist vermutlich die parasitäre Verdrängung des Sondenkopfes. Die anströmende Luft wird durch den Materialquerschnitt gezwungen, ihre Strömungsrichtung zu ändern. Die Strömung im Inneren der Sonde wird durch die vier Wände des Sondenkopfes geleitet, dagegen wird die Strömung außerhalb nur durch je eine Außenwand beeinflusst. Daher ergibt sich, abhängig von der Anströmgeschwindigkeit, innerhalb und außerhalb eine unterschiedliche Druckverteilung, die zu dem abgebildeten Druckverlauf führt.

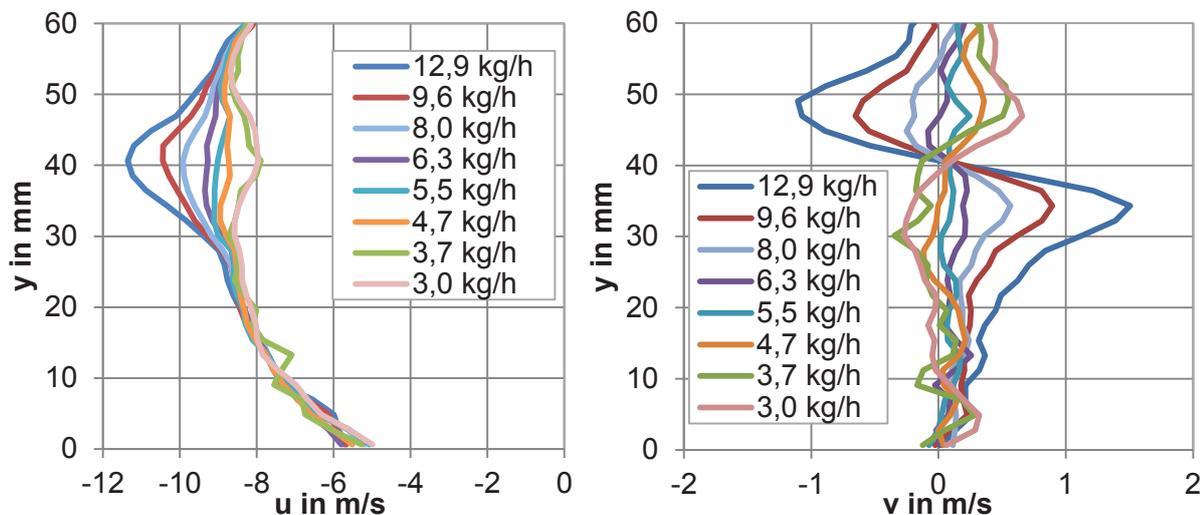


Abbildung 3-23 Geschwindigkeitsprofile 6 mm vor dem Sondenkopf bei variablem Luftmassenstrom durch die Sonde. Links Geschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung, rechts Geschwindigkeit senkrecht dazu. Die Sonde befindet sich in einer Höhe von 40 mm.

Um eine Messung mit isokinetischer Anströmung zu erreichen, muss für niedrige Anströmgeschwindigkeiten (um 9 m/s) eine Druckdifferenz von ca. 1 mbar am Sondenkopf eingestellt werden. Für höhere Anströmgeschwindigkeiten (um 15 m/s) führt eine Druckdifferenz bis etwa 1,5 mbar zu isokinetischen Bedingungen. Eine Messunsicherheit entsteht nun dadurch, dass die Messungen im Zweiphasenbereich stattfinden, wo, wie in Kapitel 3.1 erläutert wurde, die Strömungsgeschwindigkeit bisher nicht mit akzeptabler Unsicherheit gemessen werden kann. Der notwendige Luftmassenstrom durch die Sonde kann somit nur auf 0,5 mbar genau eingestellt werden. Diese Unsicherheit bezüglich der anzustrebenden Druckdifferenz ist gleichbedeutend einer Unsicherheit der Ansauggeschwindigkeit. Durch diese Abhängigkeit entsteht ein direkter Einfluss auf das Messergebnis, der bei der Fehlerbetrachtung mit einkalkuliert werden muss.

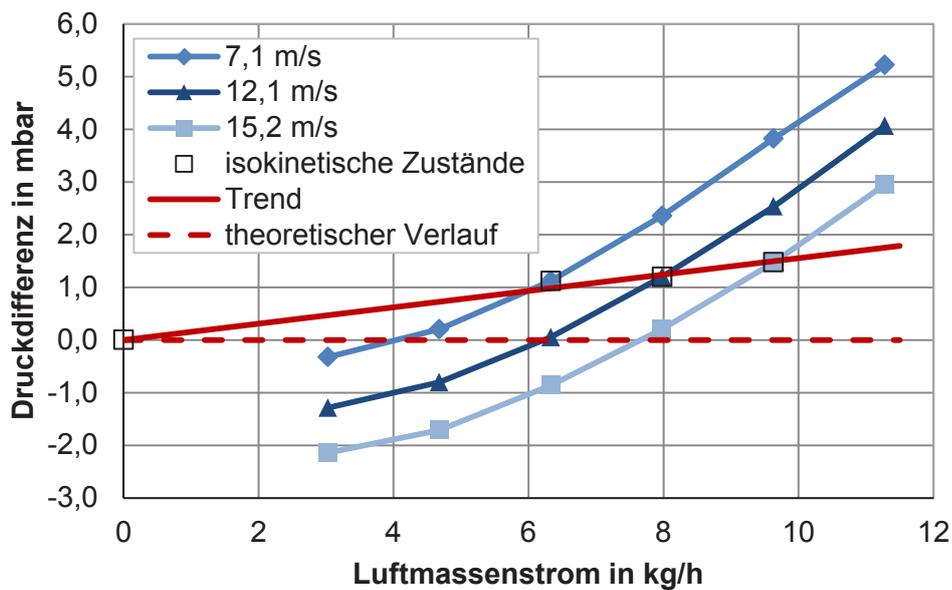


Abbildung 3-24 Druckdifferenz bei isokinetischen Bedingungen bei variablen Leerrohrgeschwindigkeiten im Kanal. Die Sonde befindet sich in einer Höhe von 40 mm.

Wenn im Rahmen der möglichen Genauigkeit isokinetische Bedingungen am Sondenkopf herrschen, kann der Strömung mit der Sonde eine repräsentative Probe entnommen werden. Die Tropfenphase wird dann im Zyklon von der kontinuierlichen Phase abgeschieden, so dass der Pegel im Messbehälter zu steigen beginnt. Der Tropfenmassenstrom lässt sich gemäß Gleichung 3-21 in Abhängigkeit der Höhenänderung des Wasserniveaus $h(t)$ im Messbehälter, der Zeitänderung Δt , des Radius R des Messbehälters und der Dichte von Wasser ρ_L berechnen.

$$\dot{m}_{\text{Tropfen}} = \frac{(h(t + \Delta t) - h(t)) \cdot R^2 \cdot \pi}{\Delta t} \cdot \rho_L \quad 3-21$$

Die mit Gleichung 3-21 ermittelbaren momentanen Tropfenmassenströme schwanken durch das instationäre Verhalten der zu untersuchenden Strömung und der Wellenentstehung im Messbehälter. Um den Einfluss dieser Schwankungen auf das Messergebnis zu minimieren, ist eine möglichst lange Messdauer anzustreben, so dass Δt möglichst groß gewählt werden kann. Wenn Δt jedoch genau der Messdauer entspricht, stützt sich das Messergebnis nur auf den ersten und letzten Wert der Messung, die ihrerseits mit einer Messungenauigkeit behaftet sind. Um eine ausreichend hohe Genauigkeit zu erreichen, wurde die Messdauer

der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Messungen auf 500 s festgesetzt. Die einzelnen Pegelwerte wurden dann mit einem gewählten Δt von 60 s ausgewertet.

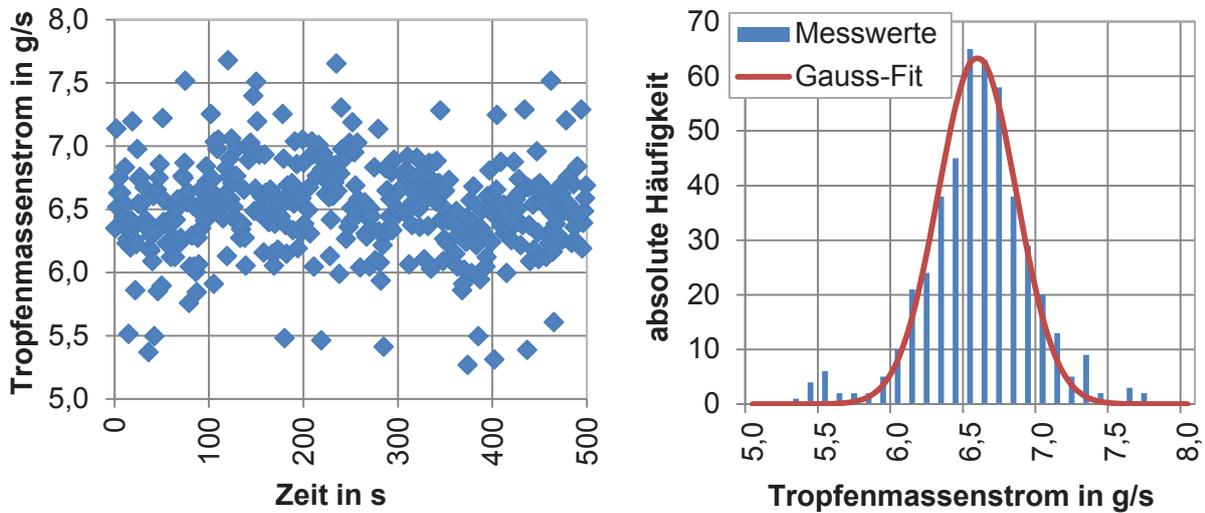


Abbildung 3-25 Zeitverlauf und Histogramm des Tropfenmassenstroms einer Messung

Das Ergebnis einer solchen Messung ist in Abbildung 3-25 zu sehen. Das Diagramm links zeigt eine deutliche Streuung der Werte. In der Häufigkeitsverteilung rechts zeigt sich jedoch, dass die Messwerte mit guter Näherung einer Gauss-Verteilung entsprechen. Anhand der charakteristischen Merkmale dieser Häufigkeitsverteilung kann damit ein genaues Ergebnis der Messung ermittelt werden [Coleman und Steel 1989, 11].

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen wird der Maximalwert μ der Verteilung als Messergebnis interpretiert. Die Streuung des Messwertes geht in Form der Standardabweichung, innerhalb deren Grenzen 68,3 % der Messwerte liegen, in die Fehlerangabe des jeweiligen Messpunktes ein. Die Zuordnung der Messwerte erfolgt bei der Klassifizierung in Abständen von 0,1 g/s. Dieser Wert entspricht damit dem Diskretisierungsfehler der Messung und wird ebenfalls bei der Berechnung der Messunsicherheit mit einbezogen.

Ein Beleg dafür, dass eine Messdauer von 500 s ausreichend ist, um einen statistisch signifikanten Wert zu erbringen, ist in Abbildung 3-26 zu sehen. Im Diagramm ist der Variationskoeffizient, also das Verhältnis von Standardabweichung $\sigma(N)$ und Mittelwert $\mu(N)$, einer Messung über der Anzahl der Messwerte N aufgetragen. Ähnliche Untersuchungen wurden in der Strömungsmesstechnik auch bereits durch Kriegseis 2011 [34] veröffentlicht. Der Variationskoeffizient strebt in etwa dem Wert 0,94 zu. Im Rahmen einer Abweichung von $\pm 10\%$ ist die statistische Signifikanz somit nach etwa 200 s Messzeit gegeben. Bedingt durch das instationäre Verhalten der Strömung entstehen zwar immer wieder kleine Sprünge in der Kurve, die Werte schwanken jedoch um deutlich weniger als 10 %. Die Kurve endet nach 450 s, da die verbleibenden 60 s bei einer Messdauer von 510 s und einem $\Delta t=60$ s nicht mehr ausgewertet werden können.

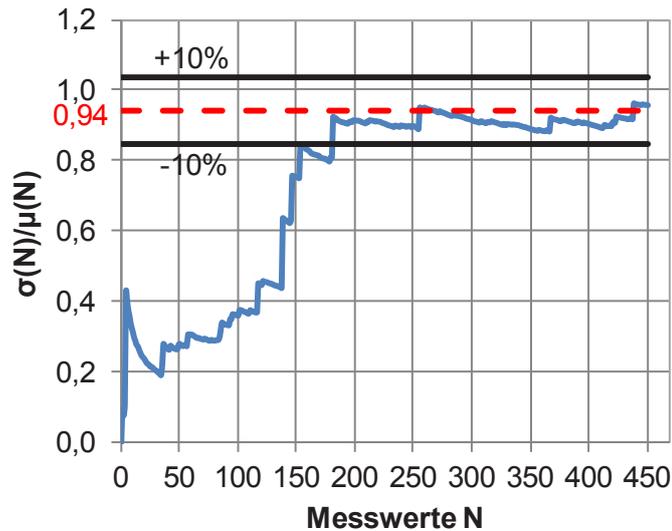


Abbildung 3-26 Statistische Signifikanz einer Sondenmessung: Variationskoeffizient während einer Messung von 500 s bei einem Δt von 60s

3.3.3. Betriebsgrenzen der Nulldrucksonde

Außer den in Kapitel 3.3.2 genannten Messunsicherheiten ergeben sich noch einige Betriebsgrenzen, die aufgrund des Funktionsprinzips der Nulldrucksonde entweder aus technischen oder physikalischen Gründen nicht überschritten werden können oder sollten.

Räumlicher Geschwindigkeitsgradient

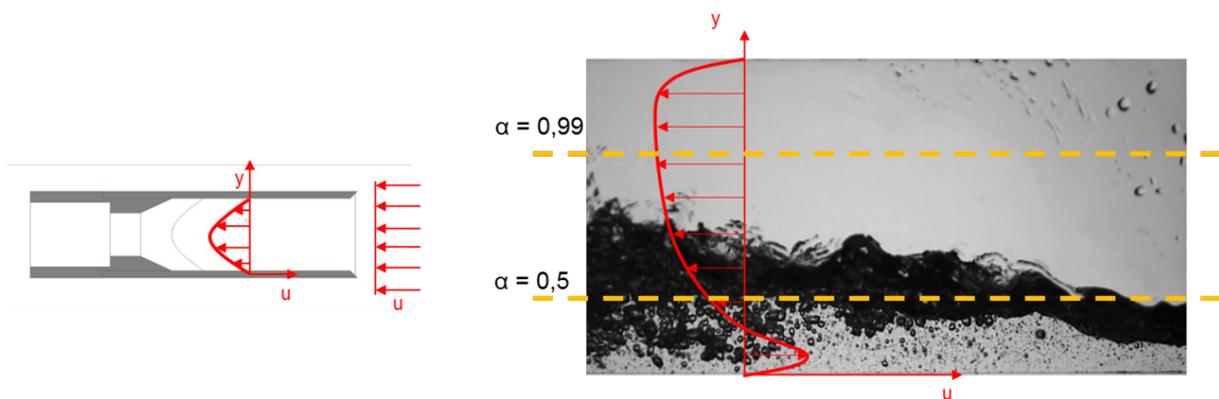


Abbildung 3-27 Strömungsprofil am Sondenkopf einer Nulldrucksonde im Vergleich zu dem zu erwartenden Strömungsprofil in einer entgegengerichteten, geschichteten Zweiphasenströmung

Zweck einer Nulldrucksonde ist es, trotz der Anwesenheit des Sondenkopfes, an der Messstelle ein näherungsweise unbeeinflusstes Messergebnis zu erhalten. Bei Strömungen, die einen starken örtlichen Geschwindigkeitsgradienten aufweisen, ist dies jedoch nur eingeschränkt möglich, da die Sonde über dem gesamten Öffnungsquerschnitt ein symmetrisches Geschwindigkeitsprofil erzeugt (Abbildung 3-27). Somit kann das Geschwindigkeitsprofil als Mittelwert über dem Öffnungsquerschnitt angenähert werden. Prinzipiell könnte dieses Problem durch einen kleineren Sondenquerschnitt vermindert werden, allerdings sollte der Öffnungsquerschnitt in etwa so gewählt werden, dass der größte zu erwartende Tropfen gerade aufgenommen werden kann. Ist dies nicht

gewährleistet, interagiert die Sonde sehr häufig mit den Tropfen, was wiederum zu Messabweichungen führen kann.

Minimale und maximale Luftmenge

Der Transport der Tropfen vom Sondenkopf zum Messbehälter geschieht in einer Nulldrucksonde vorwiegend durch die Interaktion mit der kontinuierlichen Phase. Damit dieser Transport funktioniert, muss der Luftvolumenstrom ausreichend groß sein, um die Flüssigkeit in den Rohrleitungen mitzureißen. Liegt die Geschwindigkeit der zu untersuchenden Strömung unter diesem Wert, muss zwangsläufig im hyperkinetischen Betriebsbereich gemessen werden, da das SONDENSYSTEM sonst nicht funktioniert. Die minimale Ansauggeschwindigkeit der Sonde wird also nicht von der zu untersuchenden Strömung definiert, sondern von dem verwendeten SONDENSYSTEM. Das maximale Ansaugvolumen wird dagegen durch den Druckverlust im SONDENSYSTEM und die Leistung des verwendeten Antriebs begrenzt.

Maximale Flüssigkeitsmenge

Ein anderer Extremfall liegt vor, wenn sich der Sondenkopf für längere Zeit vollständig in der kontinuierlichen Flüssigphase befindet. Da das Messsystem für eine Zweiphasenströmung, mit einer dispersen Flüssigphase, die durch eine kontinuierliche Gasphase transportiert wird, ausgelegt ist, entsteht bei vollständigem Fehlen der Gasphase ein Unterdruck im SONDENSYSTEM. Durch diesen Effekt wird das angesaugte Volumen mehr und mehr von der Antriebsleistung entkoppelt, die Sonde kann dann nicht mehr isokinetisch betrieben werden.

Grenzen der korrekten Druckdifferenzmessung

Voraussetzung für den korrekten Betrieb der Sonde ist eine fehlerfreie Messung der Druckdifferenz am Sondenkopf. Die Messbohrungen im Sondenkopf müssen zugunsten eines kleinen parasitären Querschnitts einen kleinen Durchmesser (0,5 mm) aufweisen. Wenn sich Flüssigkeit in den Bohrungen ansammelt, lässt sich diese nur durch eine Druckluftspülung aus den Messbohrung entfernen. Dies lässt sich auch anhand der Bond-Zahl (Gleichung 3-22) veranschaulichen. Diese repräsentiert das Verhältnis zwischen Gravitationskräften und Oberflächenkräften.

$$Bo = \frac{\text{Gravitationskraft}}{\text{Oberflächenkraft}} = \frac{\rho \cdot g \cdot R^2}{2 \cdot \sigma} \quad 3-22$$

Die Bond-Zahl für einen Wassertropfen, der sich in einer Bohrung von 0,5 mm befindet, beträgt $Bo = 0,168$. Das Verhalten des Tropfens wird also stark von den Oberflächenkräften dominiert. Somit ist selbst für den Fall, dass die Bohrung in Richtung des Gravitationsvektors zeigt, nicht zu erwarten, dass die Flüssigkeit die Druckmessbohrung wieder verlässt, wenn sie sich einmal darin befindet. Die Spülung der Druckmessbohrungen mit Druckluft kann dem entgegenwirken. Allerdings muss mit einbezogen werden, dass der Druck in den Messleitungen nach dem Spülen abklingen muss, bevor die nächste Messung ausgelöst wird. Wird die Messbohrung innerhalb dieser Abklingzeit erneut benetzt, gibt es keinen Zeitpunkt mehr, zu dem die Bohrung frei und eine korrekte Messung möglich ist. Deshalb limitiert auch dieser Effekt das Einsatzspektrum der Nulldrucksonde. Die Grenze wird erreicht, wenn der Tropfenmassenstrom zu groß wird oder die Sonde über längere Zeit in die kontinuierliche Wasserströmung getaucht wird.

4. Ergebnisse

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden umfangreiche Untersuchungen an entgegengerichteten, geschichteten Luft-/Wasserströmungen durchgeführt. Zur Charakterisierung des verwendeten Kanals wurden zunächst anhand von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wesentliche Strömungsphänomene und Strömungsformen identifiziert. Diese geben Aufschluss über Mechanismen, die das Strömungsgeschehen beeinflussen und zu Tropfenablösungen führen können.

Die zur Validierung von Turbulenzmodellen für die numerische Simulation benötigten Geschwindigkeitsverteilungen sowie die Verteilungen der turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen wurden mit *Particle Image Velocimetry (PIV)* gemessen. Für die Messungen in Wasser wurden der Strömung, wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben, fluoreszierende Tracerpartikel zugefügt, um parasitäre optische Effekte zu unterbinden. Bei den Messungen in Luft konnte nicht auf diese Technik zurückgegriffen werden, da keine geeigneten Tracer zur Verfügung standen. Die stattdessen als Tracer verwendeten Öl-Tröpfchen erlaubten umfangreiche Messungen in einphasiger Strömung. Die optischen Interaktionen des Lasers mit der Phasengrenzfläche führten jedoch zu starken Einschränkungen bei Messungen in der zweiphasig durchströmten Teststrecke. Dadurch wurden besonders die Messungen in der Teststrecke bei Strömungszuständen mit intensiven Phasenwechselwirkungen und Tropfenabriss beeinträchtigt.

Bei der Untersuchung der Phasenverteilung kam das in Kapitel 3.2 vorgestellte neue optische Messverfahren OVM zum Einsatz. Die Phasenverteilung kann dabei anhand von Schattenaufnahmen ermittelt werden. Das Verfahren basiert auf der computergestützten Auswertung einer großen Bilderanzahl und ermöglicht es, in kurzer Zeit einen umfassenden Datensatz zur Phasenverteilung zu generieren.

Schließlich wurde die zur Validierung der Phasenwechselwirkungsmodelle benötigte Tropfenmassenstromdichte mit einer Nulldrucksonde (Kapitel 3.3) untersucht. Eine entsprechende Messsonde wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und kann, im Gegensatz zu optischen Messverfahren, auch in verhältnismäßig dichten Tropfenströmungen eingesetzt werden.

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen dargestellt. Im ersten Teil werden die im Knickkanal beobachteten Strömungszustände beschrieben. Darauf aufbauend werden die dimensionsbehafteten Strömungskarten vorgestellt, die die auftretenden Strömungsformen im verwendeten Knickkanal darstellen. Der zweite Teil beschäftigt sich mit ausgewählten Messergebnissen und den Erkenntnissen, die bei den Versuchen gewonnen werden konnten. Die Messergebnisse werden dabei getrennt für schießende und für fließende, teilweise umgekehrte Strömungen diskutiert. Neben den eigentlichen Messergebnissen wird auch auf die Messunsicherheit der jeweiligen Messmethoden eingegangen.

4.1. Charakterisierung der Strömungsformen

Die Erscheinungsform einer entgegengerichteten und geschichteten Zweiphasenströmung hängt stark von der durchströmten Geometrie und den Volumenströmen beider Phasen ab. Durch Beobachtung, unter anderem mit Hochgeschwindigkeitskameras, können im

verwendeten Knickkanal vier verschiedene Strömungsformen identifiziert und voneinander abgegrenzt werden, die nun eingehend diskutiert werden sollen.

4.1.1. Schießende Strömung

Bei geringen Leerrohrgeschwindigkeiten beider Fluide stellt sich im gesamten Kanal eine schießende Strömung ein. Diese Strömungsform ist durch eine hohe Fließgeschwindigkeit und eine verhältnismäßig geringe Schichtdicke der flüssigen Phase charakterisiert. Die Schichtdicke hängt direkt mit der Geschwindigkeit zusammen und nimmt in Strömungsrichtung des Wassers kontinuierlich zu. Für einen Wasservolumenstrom von 20 l/min liegt sie zwischen 4 mm und 6 mm, wohingegen bei einem Volumenstrom von 55 l/min eine Höhe zwischen 6 mm und 8 mm zu beobachten ist.

In Abbildung 4-1 ist eine schießende Strömung bei einem Wasservolumenstrom von 30 l/min und einem Luftvolumenstrom von 100 l/s zu sehen. Die Gasphase nimmt unter diesen Bedingungen den überwiegenden Teil des Kanalquerschnitts ein. Im Bild rechts ist deutlich zu erkennen, dass sich an der Phasengrenzfläche kleine Kapillarwellen ausbilden und mit der Strömung bewegen. Die Wellenlänge dieser Kapillarwellen liegt bei wenigen Millimetern. Die in der Abbildung sichtbaren Tropfen haften auf dem Fenster des Kanals und nehmen nicht am Strömungsgeschehen teil.

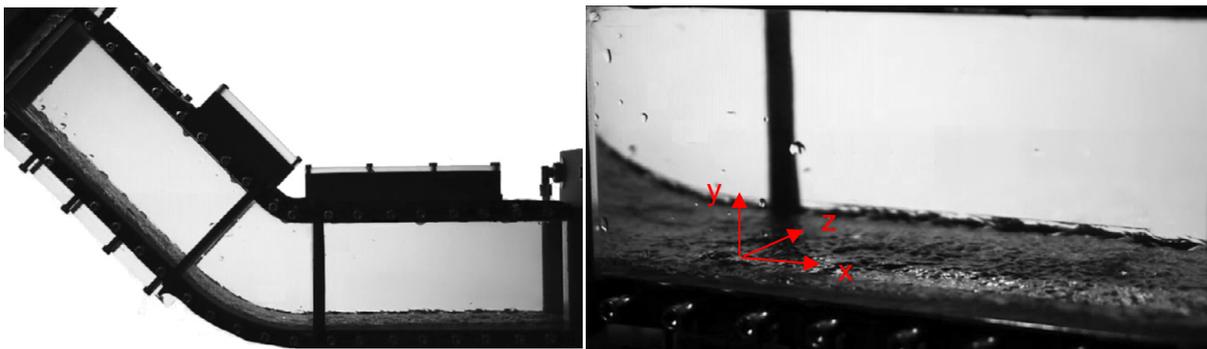


Abbildung 4-1 Schießende Strömung im Knickkanal

Der Wasserfilm hat, abgesehen von den Kapillarwellen, einen beinahe zweidimensionalen Charakter. Die Höhe ändert sich nicht entlang der Tiefenkoordinate z . Dies bezieht sich jedoch nicht auf die seitlichen Ränder, denn die Seitenfenster sind stets mit einem dünnen Wasserfilm benetzt. Die Höhe dieses Wandfilms wächst mit zunehmendem Wasservolumenstrom und ist zum Teil deutlich größer als 10 mm. Senkt man den Flüssigkeitsdurchsatz, fließt das Wasser in einem immer dünner werdenden Film. Unterhalb von etwa 12 l/min benetzt die Flüssigkeit den Kanal nicht mehr über die volle Breite. Der Abfluss kann dann nicht mehr als zweidimensional betrachtet werden.

4.1.2. Schießende Strömung mit Tropfenabriss

Wird der Luftvolumenstrom, ausgehend von einer schießenden Strömung, erhöht, wird die Oberflächenstruktur unruhiger und zunehmend lösen sich bei weiterhin schießender Strömung auch Tropfen aus der kontinuierlichen Flüssigphase. Durch die Umlenkung der Luftströmung im Knick und die damit intensivere Interaktion der Phasen lösen sich die Tropfen zuerst im geneigten Teil des Kanals. Wenn der Luftvolumenstrom weiter erhöht wird, kann auch im horizontalen Kanalabschnitt zunehmend Tropfenablösung beobachtet werden. Wie in Abbildung 4-2 anhand der zahlreichen Tropfen im Kanal zu erkennen ist, befindet sich

die disperse Flüssigphase überwiegend in der unteren Hälfte des durchströmten Kanalquerschnittes. Außerdem befinden sich zahlreiche Tropfen an den Kanalfenstern. Da diese jedoch nicht am Strömungsgeschehen teilnehmen, werden sie an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Die abgelösten Tropfen und Ligamente weisen bei diesem Strömungszustand nur eine geringe vertikale Geschwindigkeit auf, so dass sie sich nicht weit von der Phasengrenzfläche entfernen.



Abbildung 4-2 Schießende Strömung mit Tropfenabriss im Knickkanal

Wie schon in Kapitel 1.2 angeklungen ist, kann die Entstehung der Tropfen nach Ishii und Grolmes [25] drei verschiedenen Mechanismen zugeordnet werden. Durch die steigende Relativgeschwindigkeit zwischen den Fluiden steigt auch die Höhe einzelner Kapillarwellen. Die Flüssigkeit wird dann, wie von Ishii und Grolmes als Typ 1 beschrieben, von der Luftströmung erfasst. Durch die, auf die Flüssigkeitsmenge bezogen, vergrößerte Oberfläche kann die Luftströmung aus der Welle ein langes Flüssigkeitsligament formen. Dieses zerfällt dann unter dem Einfluss der Gasphase in Tropfen von unterschiedlicher Größe (siehe Abbildung 4-3) und löst sich so von der Flüssigphase.

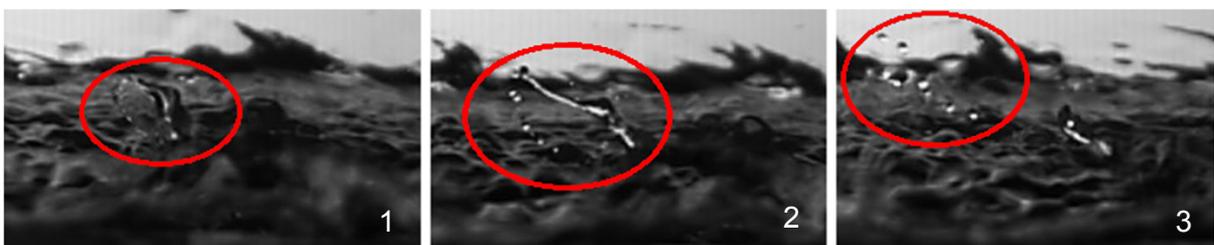


Abbildung 4-3 Tropfenentstehung bei schießender Strömung nach Ishii und Grolmes Typ 1

Die Tropfen beschleunigen in der Luftströmung und werden, abhängig von ihrem Folgevermögen, entweder mit der Gasphase weiter transportiert oder treffen auf die Phasengrenzfläche. Dies findet insbesondere auch im Knick des Kanals statt, wo große Tropfen der Luftströmung durch ihre Trägheit nicht folgen können. Wie in Abbildung 4-4 zu sehen ist, können durch die Interaktion zwischen Phasengrenzfläche und dem auftreffenden Tropfen weitere Tropfen erzeugt werden. Die Bildfolge zeigt einen Tropfen mit einem Durchmesser von etwa 2,5 mm, der mit hoher Relativgeschwindigkeit auf die kontinuierliche Wasserströmung trifft. Die dadurch entstehenden Strukturen interagieren wiederum mit der

Gasphase, so dass sich neue Ligamente und Tropfen bilden, die sich von der kontinuierlichen Phase ablösen und der Gasströmung folgen. Dieser Entstehungsprozess wird von Ishii und Golmes als Typ 4 kategorisiert.

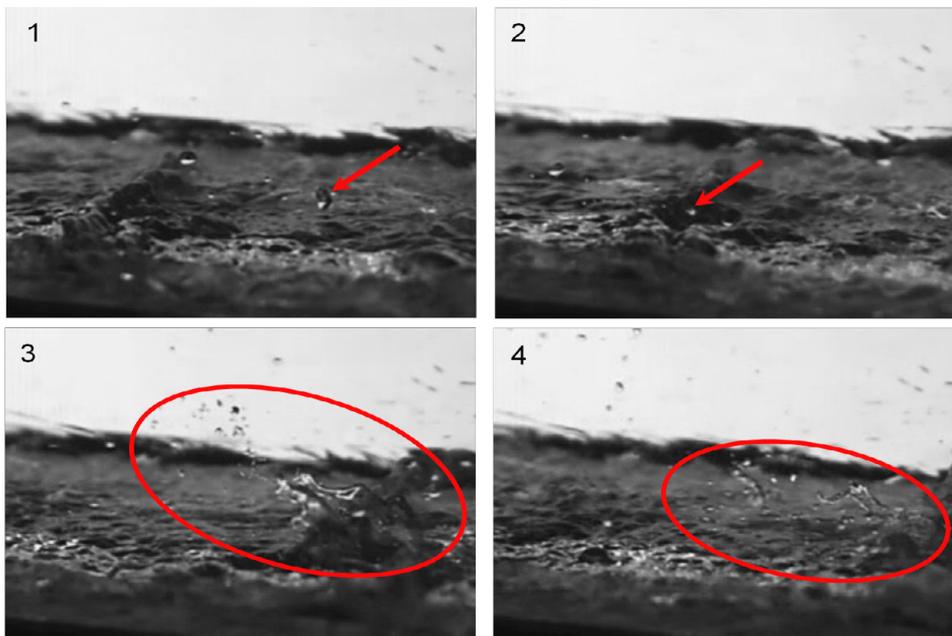


Abbildung 4-4 Tropfenentstehung bei schießender Strömung nach Ishii und Golmes Typ4

Bei einer hohen Relativgeschwindigkeit zwischen den Phasen wachsen die Amplituden der Kapillarwellen auf der Strömung. Durch den Einfluss der Luftströmung bilden sich Rollwellen quer zur Hauptströmungsrichtung. Die Wellen verlaufen wie in Abbildung 4-5 über die vollständige Breite des Kanals. Durch den intensiven Impulsaustausch mit der Gasphase entstehen an den Rollwellen auch Tropfen. Außerdem sind die zu beobachtenden Rollwellen oft stark mit Luftblasen durchmischt.

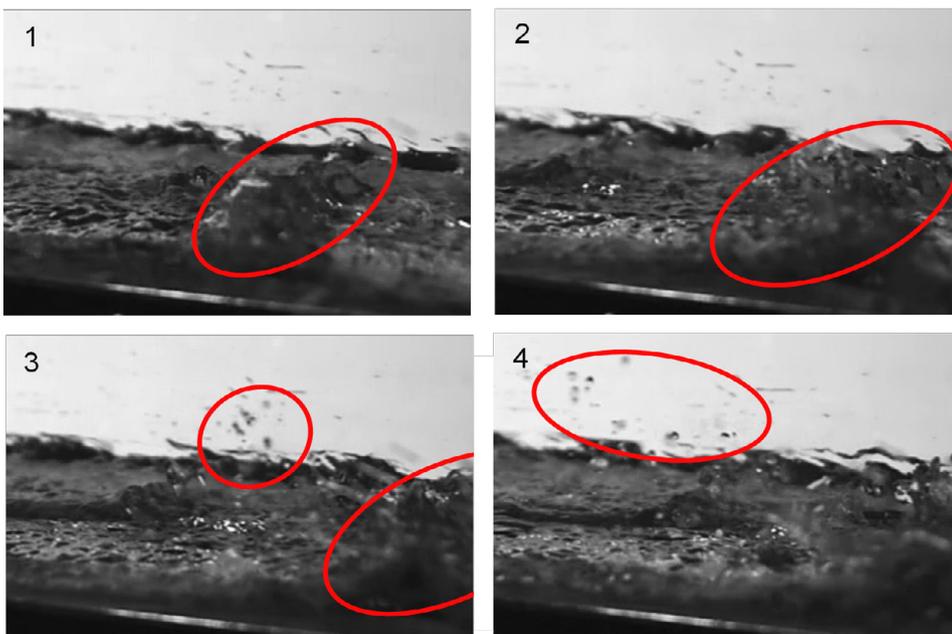


Abbildung 4-5 Tropfenablösung von wandernden Wellen bei schießender Strömung

Erreichen diese Wellen- und Schaumstrukturen eine kritische Höhe, können ebenfalls Tropfen herausgelöst werden (Typ 1). Da Rollwellen auf der sonst überwiegend flachen Oberfläche deutlich erhaben sind, entstehen auch neue Tropfen durch Auftreffen bereits vorhandener Tropfen (Typ 4) und Aufplatzen von Luftblasen in der Rollwelle (Typ 3).

4.1.3. Teilweise umgekehrte Strömung

Mit zunehmender Relativgeschwindigkeit zwischen den Fluiden steigt die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Rollwelle auf der schießenden Strömung stabilisieren kann und sich zunehmend mehr Flüssigkeit in ihr ansammelt. Ist dies der Fall, kommt es, wie in Abbildung 4-6, zur Bildung eines hydraulischen Sprungs. Der rote Pfeil im ersten Bild markiert die initiale Welle, die sich in den beiden folgenden Bildern stromaufwärts bewegt und zusehends an Volumen gewinnt, so dass das in der Welle gebundene Wasservolumen auf Bild 3 deutlich größer ist als auf dem ersten Bild.



Abbildung 4-6 Entstehung des hydraulischen Sprungs in einer schießenden Strömung

Die Grenze, bei deren Überschreitung eine teilweise umgekehrte Strömung entsteht, ist von stochastischem Charakter, es handelt sich also nicht um eine scharfe Grenze, da der Strömungswechsel durch Kumulation kleiner Störungen entsteht. Die Strömung der flüssigen Phase ist turbulent, dreidimensional und instationär. Durch Tropfenmitriss und Scherkräfte an der Phasengrenzfläche entsteht im Gebiet hinter dem hydraulischen Sprung der namensgebende Strömungszustand, mit einer teilweise umgekehrten Strömungsrichtung. In Abbildung 4-7 sind drei Momentaufnahmen einer ausgebildeten, teilweise umgekehrten Strömung zu sehen. Die Aufnahmen sind bei gleichbleibenden Volumenströmen in einem zeitlichen Abstand von je etwa 0,5 Sekunden entstanden. Die Dynamik dieses Strömungszustandes ist, anhand der unterschiedlichen Phasenverteilung in den drei Momentaufnahmen, deutlich zu erkennen.



Abbildung 4-7 Teilweise umgekehrte Strömung im Knickkanal

Der hydraulische Sprung befindet sich bei dieser Strömungsform überwiegend im unteren Abschnitt des Kanals. Er wandert mit zunehmendem Luftvolumenstrom zum Knick und in den geneigten Teil des Kanals. Stromaufwärts des hydraulischen Sprungs herrscht dann weiterhin eine schießende Strömung, stromabwärts eine fließende Strömung. Durch die

Interaktion der beiden Fluide bilden sich, vor und am hydraulischen Sprung, Tropfen und Blasen. Ein gut durchmischter Zweiphasenbereich entsteht, da sich die Fluide nie vollständig separieren können. Die entstehenden Tropfen werden zum Teil von der Gasströmung mitgerissen. Dies wird auch dadurch unterstützt, dass die Strömungsgeschwindigkeit der Gasphase durch den höheren Flüssigkeitspegel zunimmt. Ein Teil der dispersen Flüssigphase wird durch den geneigten Teil aus der Teststrecke transportiert. Die übrigen Tropfen treffen im geneigten Teil auf den Flüssigkeitsfilm und werden von diesem stromabwärts mitgerissen.

Die Flüssigkeitsablösung aus der kontinuierlichen Phase verläuft sehr komplex. Die von Ishii und Grolmes beschriebenen Ablösemechanismen von Typ 1 bis 4 können alle beobachtet werden. Eine Differenzierung fällt jedoch schwer, da sich die verschiedenen Phänomene überlagern. In Abbildung 4-9 ist ein typischer Ablösevorgang zu sehen. Durch eine große Anzahl aufsteigender Blasen entsteht ein Schaumgebiet, das zum Teil von der Luftströmung erfasst und mitgerissen wird. Die entstehenden Ligamente zerfallen zum Teil bei der Ablösung, zum Teil auch erst danach, in Tropfen unterschiedlichster Größe. Viele der so entstandenen Tropfen wechselwirken bereits kurz nach ihrer Entstehung erneut mit anderen Tropfen und dem fließenden Wasser. Es entsteht ein Zweiphasenbereich, in dem die Phasengrenzfläche, Schaumgebiete, Tropfen und Blasen visuell nur schwer voneinander unterschieden werden können.

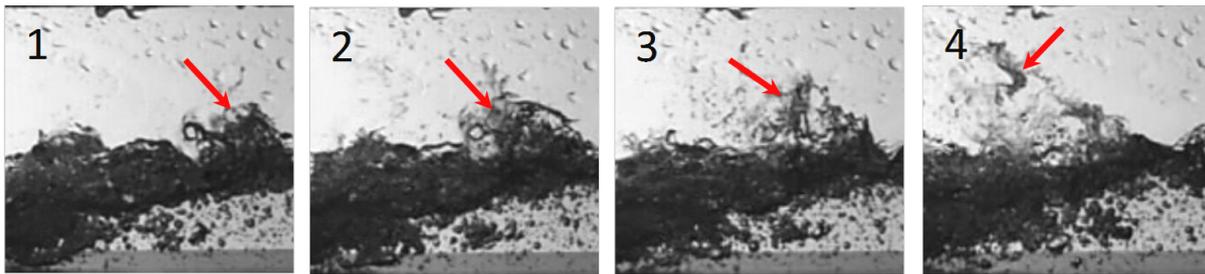


Abbildung 4-8 Flüssigkeitsablösung bei teilweise umgekehrter Strömung

Im Zweiphasengebiet führt die disperse Gasphase zu einer größeren Höhe der kontinuierlichen Flüssigkeitsschicht und setzt die lokale Dichte des Zweiphasengemisches herab. Es ist daher anzunehmen, dass das Vorhandensein von Blasen die Tropfenablösung fördert. Unterstützt wird diese Annahme dadurch, dass bei den Untersuchungen in Bereichen, in denen die kontinuierliche Flüssigphase wenig Gasblasen enthält, auch weniger Tropfenablösungen zu beobachten sind. Dies ist beispielsweise beim Vergleich der Bilder 1 und 3 in Abbildung 4-7 zu erkennen.

Wie bereits in Kapitel 1.2 ausführlich erläutert wurde, kann sich eine teilweise umgekehrte Strömung auch bei sinkenden Gasvolumenströmen erhalten, da die im Vergleich zur schießenden Strömung deutlich höhere Wasserschicht eine höhere Strömungsgeschwindigkeit der Luft erzwingt. Der damit einhergehende intensivere Impulsaustausch zwischen den Fluiden stabilisiert wiederum den Strömungszustand und den hydraulischen Sprung. Die globalen Strömungsbedingungen, unter denen eine teilweise umgekehrte Strömung vorliegt, sind damit für steigende und sinkende Luftvolumenströme verschieden voneinander. Dies wird in der Literatur als Hysterese bezeichnet [2]. Wie in Abbildung 4-9 zu sehen ist, ist die Wechselwirkung der beiden Phasen bei niedrigen Luftdurchsätzen auch deutlich geringer. Dies äußert sich zum einen in der Anzahl der entstehenden Tropfen und Blasen im horizontalen Teil des Kanals, zum anderen werden aber auch deutlich weniger

Tropfen von der Luft mitgerissen. Nahe der Grenze zur schießenden Strömung verlässt das eingespeiste Wasser die Strecke fast vollständig durch den unteren Wasserablauf. Die Wasserlieferungsrate geht dann gegen eins ($LR \approx 1$). Der hydraulische Sprung verlagert sich bei sinkenden Luftvolumenströmen mehr und mehr vom Knick in den horizontalen Abschnitt und es kommt zur Bildung einer Schaumwalze am hydraulischen Sprung. Der Drehsinn der selbigen ist in Abbildung 4-9 mit Pfeilen markiert.

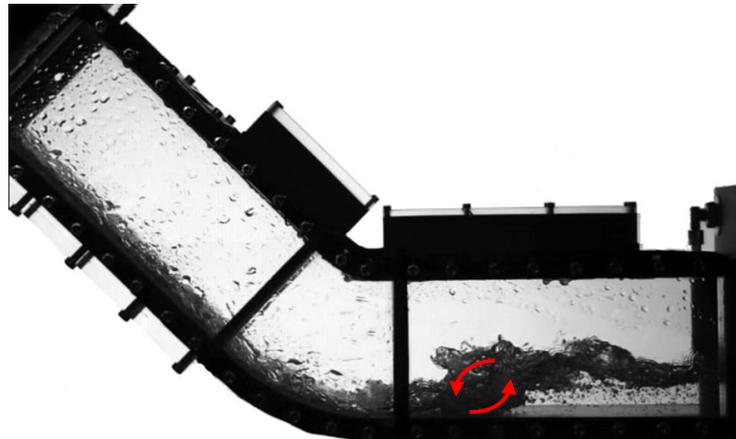


Abbildung 4-9 Teilweise umgekehrten Strömung mit Schaumwalze

4.1.4. Vollständig umgekehrte Strömung

Steigt der Gasdurchsatz, ausgehend von einer teilweise umgekehrten Strömung, weiter an, entsteht eine vollständig umgekehrte Strömung (Abbildung 4-10). Dabei wird das eingebrachte Wasser vollständig von der Luftströmung mitgerissen ($LR=0$). Die Grenze der benetzten Bodenfläche im horizontalen Kanalabschnitt bewegt sich, wie auch der hydraulische Sprung, mit weiter zunehmendem Luftvolumenstrom immer weiter stromauf. Die Strömung pulsiert dann heftig, wobei die Grenze zwischen benetztem und trockenem Kanal bei konstanten Leerrohrgeschwindigkeiten jedoch nahezu ortsfest bleibt.

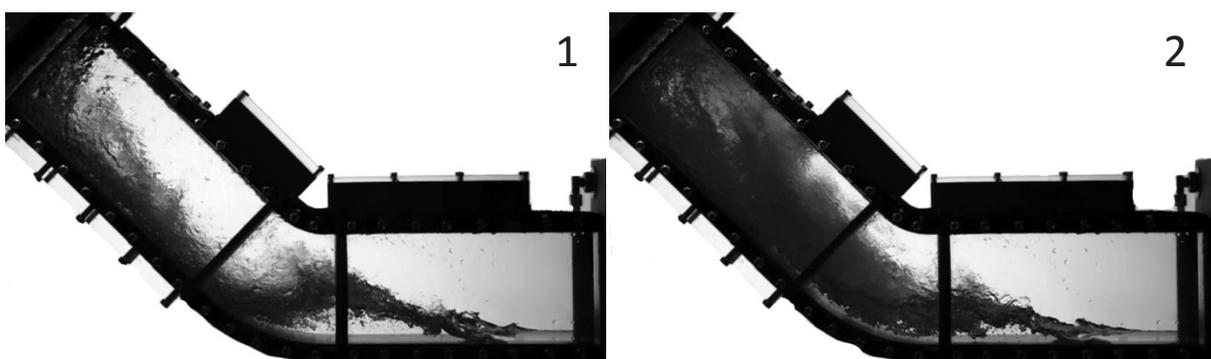


Abbildung 4-10 Vollständig umgekehrte Strömung

4.2. Strömungsformenkarten

Die in Abschnitt 4.1 dargestellten Strömungsformen können in Abhängigkeit der Leerrohrgeschwindigkeit beider Fluide (Gleichung 4-1) in einer Strömungskarte festgehalten werden. Die Leerrohrgeschwindigkeit u_{ks} versteht sich dabei als das Verhältnis des

Volumenstroms \dot{V}_k eines Fluides bezogen auf die gesamte Querschnittsfläche A der Teststrecke. Sie wird auch als Volumenstromdichte bezeichnet. Diese dimensionsbehaftete Darstellung der Strömungsformkarten ist geometrieabhängig und gilt ausschließlich für den in dieser Arbeit verwendeten Zweiphasenkanal.

$$u_{ks} = \frac{\dot{V}_k}{A} \quad 4-1$$

Die Strömungsform kann am besten durch visuelle Beobachtung bewertet werden. Daher ist eine subjektive Komponente in den Ergebnissen nicht auszuschließen. Um dem entgegenzuwirken und die Strömungsform auf Basis genauer Beobachtungen identifizieren zu können, wurde beim Erstellen der Strömungskarten eine Hochgeschwindigkeitskamera von der Seite auf den Kanal gerichtet. Die Strömung wurde dann mit einer Aufnahme­frequenz von 3-5 kHz betrachtet, so dass Tropfenablösungen eindeutig identifiziert werden konnten. Um die Unsicherheit subjektiver Beurteilung zu minimieren, wurden außerdem die nachfolgend genannten Kriterien definiert, anhand derer die Grenzen zwischen den verschiedenen Strömungsformen erkannt werden können. Während des zweijährigen Versuchszeitraums wurden die Grenzen zwischen den Strömungsformen wiederholt anhand dieser Kriterien untersucht.

- Die Grenze von schießender Strömung zur schießenden Strömung mit Tropfenablösung wird durch Beobachtung der betroffenen Zone mit einer Hochgeschwindigkeitskamera ermittelt. Die Grenze ist erreicht, wenn in mindestens vier von fünf Stichproben mit jeweils fünf Sekunden Aufnahmezeit insgesamt mehr als zwei Ablöseereignisse beobachtet werden können.
- Der Übergang von schießender Strömung mit Tropfenablösung zu einer teilweise umgekehrten Strömung ist erreicht, wenn der Strömungswechsel bei konstanten Leerrohrgeschwindigkeiten innerhalb von fünf Minuten eintritt.
- Als vollständig umgekehrte Strömung wird eine Strömung bezeichnet, bei der der Kanal an wenigstens einer Messstelle über die gesamte Tiefe unbenetzt ist. Dies wird auch dann noch als gegeben betrachtet, wenn bei stark pulsierender Strömung kurzfristig geringe Wassermengen in diese Gebiete vorstoßen.
- Bei sinkenden Luftvolumenströmen ist die Grenze zwischen teilweise umgekehrter Strömung und schießender Strömung erreicht, wenn sich innerhalb eines Zeitraums von fünf Minuten eine schießende Strömung einstellt.

Da zwischen den Strömungsformen mit schießender Strömung und der teilweise umgekehrten Strömung eine Hysterese besteht, werden zwei Strömungskarten benötigt, um das Anlagenverhalten abzubilden. Eine Strömungskarte zeigt die Verhältnisse bei steigendem Luftvolumenstrom und eine weitere charakterisiert die Strömung bei sinkenden Luftvolumenströmen. Bei der Ermittlung der Strömungskarten wurden alle Grenzen mehrfach, mindestens aber viermal, unabhängig voneinander überprüft. Die Grenzen wurden durch Erhöhung des Luftvolumenstroms in ständig kleiner werdenden Schritten von zunächst 5 l/s und dann 2 l/s ermittelt. Die Unsicherheit der Grenzen liegt bei maximal 7,5 l/s, das entspricht einer Änderung der Leerrohrgeschwindigkeit der Luft um 0,8 m/s. Die Unsicherheit entsteht, weil die Volumenströme im Kanal durch schwankenden Gegendruck nicht konstant gehalten werden können. Dies ist insbesondere bei den Strömungsformen mit teilweise oder vollständig umgekehrter Strömung der Fall.

Die Übergänge zwischen den Strömungsformen hängen von der Intensität der Interaktion zwischen beiden Fluiden ab. Sie sind daher von der Einstellung des Luftleitblechs vor der Teststrecke abhängig. Dieses war während der gesamten Versuchsphase horizontal ausgerichtet. Das Blech war in einer Höhe von 20 mm über dem Kanalboden befestigt. Der von der Luft durchströmte Querschnitt hatte daher eine Größe von $70 \times 100 \text{ mm}^2$. Die genauen Abmessungen der Messstrecke können der technischen Zeichnung in Anhang A entnommen werden.

In Abbildung 4-11 ist die Strömungskarte für steigende Luftvolumenströme zu sehen. Ausgehend von einem Luftdurchsatz unterhalb einer Volumenstromdichte von etwa 11 m/s kann eine schießende Strömung ($Fr > 1$) beobachtet werden. Im Gegensatz zu den Untersuchungen von Stähler [62] und Gargallo [19] im horizontalen Kanal, kann in diesem Gebiet kein Übergang mehr zu einer fließenden Strömung ohne Strömungsumkehr beobachtet werden.

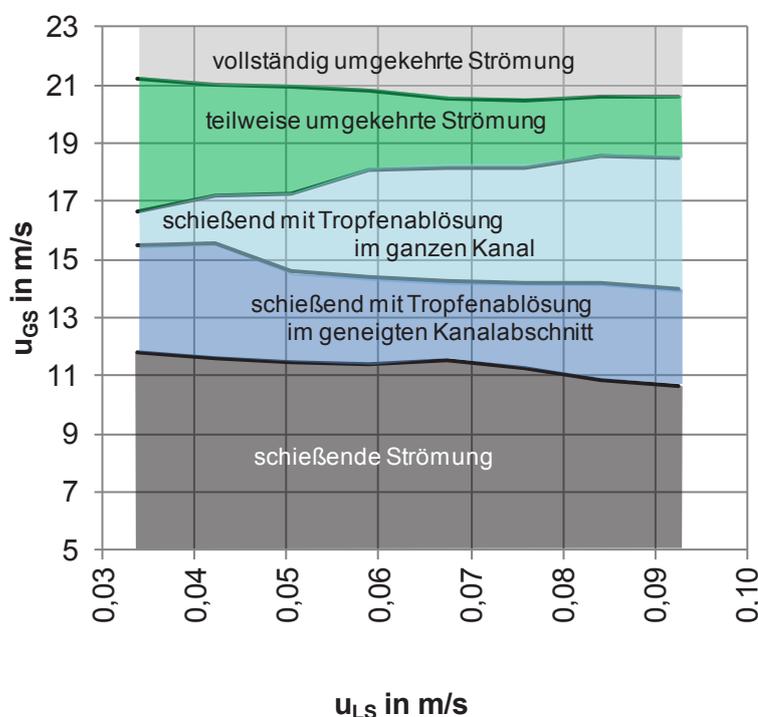


Abbildung 4-11 Strömungskarte für steigende Luftvolumenströme

Wird der Luftdurchsatz gesteigert, lösen sich ab etwa 11 m/s zunehmend Tropfen aus der Flüssigkeitsoberfläche. Dies ist bis zu einer Luftvolumenstromdichte von 14 m/s nur im geneigten Teil des Kanals zu beobachten. Steigt die Volumenstromdichte weiter an, können auch im horizontalen Abschnitt der Teststrecke Tropfenablösungen beobachtet werden. Zwischen 17 m/s und 19 m/s wird, abhängig von der Wasservolumenstromdichte, die Grenze zur teilweise umgekehrten Strömung erreicht (*onset of flooding*). Diese Grenze ist von stochastischem Charakter und steigt mit zunehmendem Wasservolumenstrom leicht an. Die Grenze zur vollständig umgekehrten Strömung, bei der die gesamte Wassermenge entgegen ihrer ursprünglichen Flussrichtung mitgerissen wird, liegt oberhalb einer Luftvolumenstromdichte von 20 m/s. Dort ist die Wasserlieferungsrate gleich null ($LR=0$). Oberhalb dieser Grenze treten keine neuen Strömungsformen mehr auf, deshalb wurden die Strömungsformen oberhalb von 23 m/s auch nicht weiter untersucht.

Senkt man die Luftvolumenstromdichte, ausgehend von 23 m/s, tritt ab etwa 21 m/s wieder eine teilweise umgekehrte Strömung ($0 < LR < 1$) auf. Wie bereits zuvor beschrieben, entsteht durch den höheren Pegel bei teilweise umgekehrter Strömung eine Hysterese, die diese Strömungsform bei sinkendem Luftvolumenstrom bis zu einer Volumenstromdichte von 9 m/s stabilisiert. In Abhängigkeit des Wasservolumenstroms geht die Strömung, unterhalb dieser Grenze, in eine schießende Strömung mit Tropfenablösung im geneigten Teil, oder bei Wasservolumenstromdichten oberhalb 0,056 m/s, direkt in eine schießende Strömung über. Diese Grenze entspricht dem *deflooding point*.

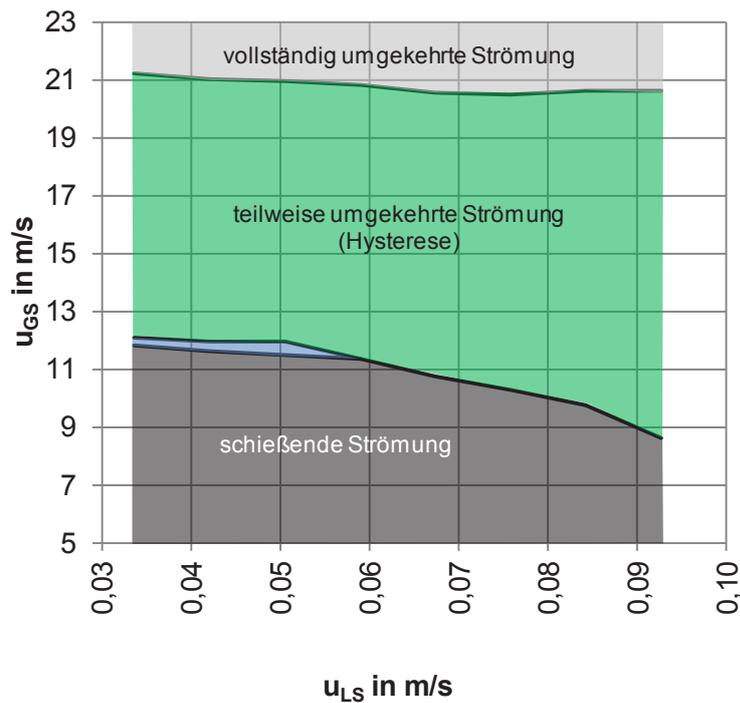


Abbildung 4-12 Strömungskarte für sinkende Luftvolumenströme

In beiden Strömungskarten verlaufen die Grenzen annähernd horizontal. Damit wird deutlich, dass das Auftreten der beobachteten Strömungsformen in erster Linie von der Luftvolumenstromdichte abhängt. Die Wasservolumenstromdichte spielt hingegen eine eher untergeordnete Rolle.

Wie eingangs bereits erwähnt, sind die hier präsentierten Strömungskarten dimensionsbehaftet und nur im verwendeten Kanal gültig. Um die korrekte Funktion des Kanals zu belegen, wurde die Flutgrenze bei vielen bereits durchgeführten Experimenten zur Gegenstrombegrenzung in das Wallis-Diagramm eingezeichnet. Dazu wird die Flutgrenze des Kanals anhand von Gleichung 4-2 dimensionslos gemacht und dem Wallis-Kriterium (Gleichung 4-3) gegenübergestellt. Abbildung 4-13 zeigt diese Gegenüberstellung mit den im WENKA-Kanal experimentell ermittelten Werten. Wie erwartet, liegt die Flutgrenze des verwendeten Knickkanals zum Teil oberhalb des zu erwartenden Bereichs (in Abbildung 4-13 grau hinterlegt). Um die grundsätzliche Tauglichkeit der Messdaten zu belegen und die einwandfreie Funktion des Kanals zu demonstrieren, wurde die Flutgrenze ein zweites Mal mit entferntem Luftleitblech ermittelt. Es zeigt sich, dass die Flutgrenze bei entferntem Leitblech deutlich tiefer und damit im erwarteten Bereich liegt.

$$j_k^{*2} = \frac{\rho_k u_{ks}^2}{(\rho_L - \rho_G)gd} \quad 4-2$$

$$\sqrt{j_G^*} + m \cdot \sqrt{j_L^*} = C \quad 4-3$$

Die Verschiebung der Flutgrenze nach oben ist demnach lediglich auf das Luftleitblech zurückzuführen. Zweck dieses Leitbleches ist es, die Luft so in die Teststrecke zu führen, dass im Wasserauslass-/Luftteinlasssegment keine Störungen entstehen. Das führt zu einer gut ausgebildeten Anströmung der Testsektion und vereinfacht die Verwendung der Messdaten zu Validierungszwecken, da parasitäre Effekte in den Ein- und Ausströmsegmenten unterdrückt werden. Dies mindert zwar die direkte Vergleichbarkeit der Versuchsdaten mit den Resultaten anderer Experimente, die Qualität der Untersuchungsergebnisse und deren Tauglichkeit im Hinblick auf die Validierung von CFD-Codes wird jedoch nicht beeinträchtigt. Deshalb wurden die Messungen in der vorliegenden Arbeit in der Konfiguration mit den Leitblechen durchgeführt.

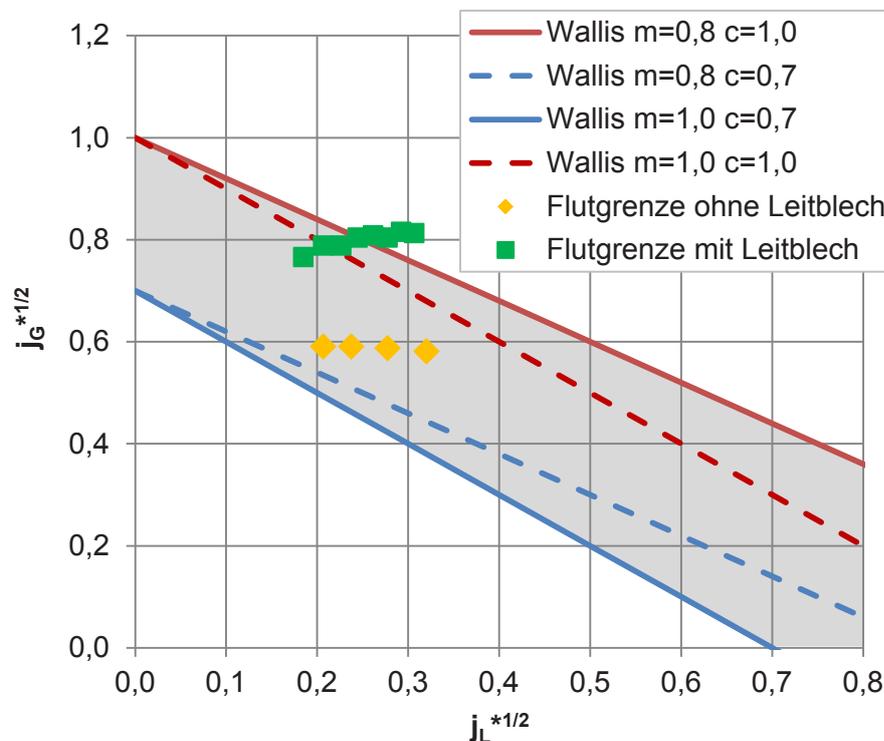


Abbildung 4-13 WENKA-Flutgrenze im Wallis-Diagramm

4.3. Messpositionen und Messmatrix

Für die quantitative Untersuchung der Zweiphasenströmungen im WENKA-Kanal wurden fünf Messpositionen (Orte) definiert, an denen Messungen mit den in Kapitel 3 vorgestellten Messverfahren durchgeführt wurden. Die Messpositionen (Abbildung 4-14) wurden so definiert, dass sich sowohl im geneigten wie auch im horizontalen Kanalabschnitt jeweils zwei Messpositionen befinden. Zusätzlich wurde eine Messposition für einphasige PIV-Messungen in Luft in der Lufteinlauf-/Wasserablaufsektion eingerichtet. Eine vollständig bemaßte Zeichnung des Kanals befindet sich in Anhang A. Eine Zeichnung, aus der auch die Messpositionen hervorgehen, befindet sich in Anhang C.

Die Messungen mit den optischen Messmethoden konzentrieren sich auf die Positionen 0, 1 und 2, da die Positionen 3 und 4 bei den meisten Messpunkten für diese Verfahren unzugänglich sind. Messposition 3 diente zur Kalibrierung der Isokinetischen Sonde und wurde im Zuge der Messungen nicht weiter verwendet. Messposition 4 bietet im Gegensatz zu den anderen Messpositionen keinen optischen Zugang. Hier wurde, wie auch an Position 2, die Nulldrucksonde appliziert.

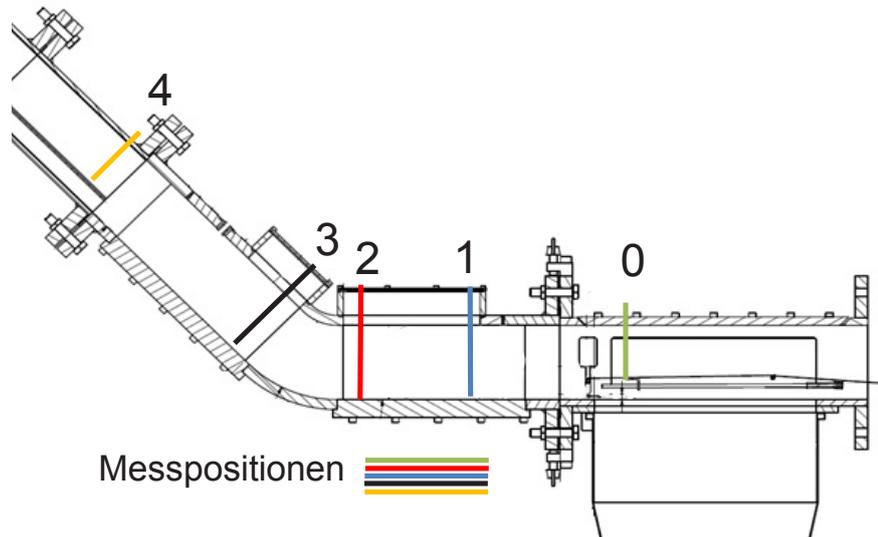


Abbildung 4-14 Messpositionen im WENKA-Kanal

Basierend auf den Strömungskarten (Abschnitt 4.2) wurde eine Messmatrix mit 31 Messpunkten (Strömungszustände) bei ausgewählten Volumenstromkombinationen definiert (Abbildung 4-15). Die Messpunkte wurden so auf den Strömungskarten verteilt, dass sowohl in schießender als auch in teilweise umgekehrter Strömung, sowohl bei konstanter Luftvolumenstromdichte als auch bei konstanter Wasservolumenstromdichte immer mindestens drei Punkte innerhalb der Grenzen einer Strömungsform liegen.

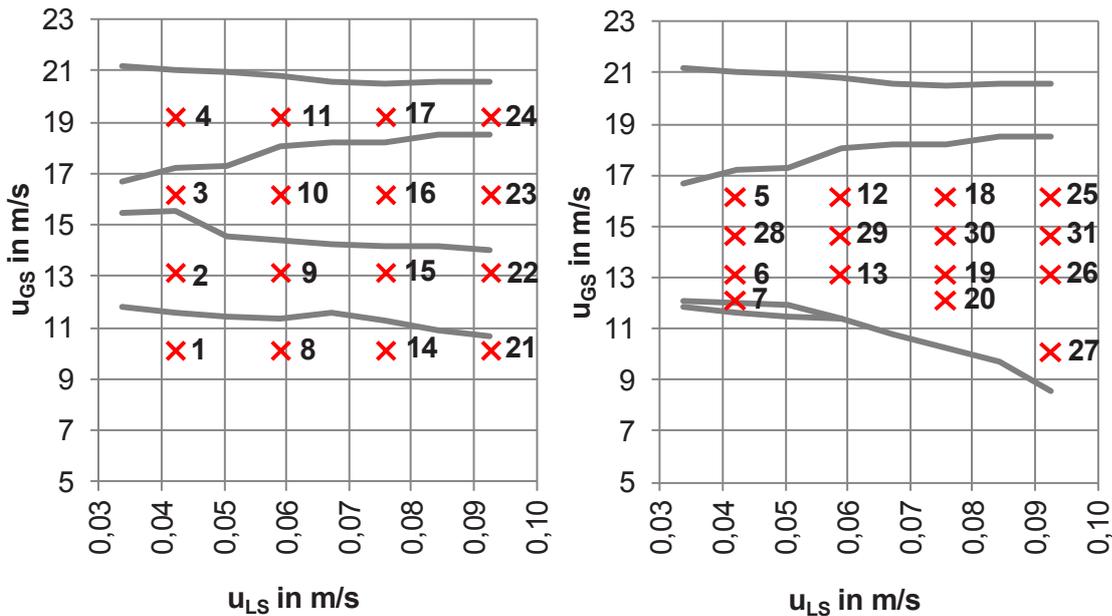


Abbildung 4-15 Messmatrix der Untersuchungen

Aufgrund des Hysterese- Effektes wurden unterschiedliche Messpunkte für steigende und sinkende Luftvolumenströme definiert. Oberhalb der Grenze zur vollständig umgekehrten Strömung wurden keine Messungen durchgeführt, da bei diesen Strömungsbedingungen, aufgrund des stark instationären Strömungsverhaltens und des intensiven Wassermittresses, keine Messungen mehr möglich waren. In Anhang B ist eine vollständige Liste zu finden, aus der die Parameter aller Messpunkte hervorgehen. In den folgenden Abschnitten wird das Strömungsverhalten, anhand ausgewählter Versuchsergebnisse, in Abhängigkeit verschiedener Versuchsparameter diskutiert. Darüber hinaus findet sich in Anhang D eine vollständige Zusammenstellung aller Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit absolvierten Messungen. Dort sind auch die Kurven zur turbulenten kinetischen Energie und der Reynoldsschubspannungen beider Phasen zu finden.

4.4. Schießende Strömung

Bei geringen Luftvolumenströmen stellt sich eine stabil geschichtete, schießende Strömung im Kanal ein. Abbildung 4-16 zeigt links das Strömungsbild, wie es bei Messpunkt 1 im horizontalen Teil der Messstrecke beobachtet werden kann. Das Bild zeigt eine Momentanaufnahme der Strömung und kann deshalb nur als eingeschränkt repräsentativ betrachtet werden. Es sind jedoch einige wesentliche Merkmale der Strömung darauf zu sehen. Es wurde mit einer Kamera aufgenommen, die mittig auf das Kanalsegment und in einer Ebene mit dem horizontalen Kanalboden auf die Strömung ausgerichtet war. Dem gegenüber steht die optisch gemessene, zeitlich gemittelte Phasenverteilung der gleichen Strömung. Angaben zu den Strömungsbedingungen können Tabelle 4.1 entnommen werden. Im Bild eingezeichnet sind auch die beiden Messpositionen. Der Abstand zwischen Position 1 und 2 beträgt genau 130 mm.

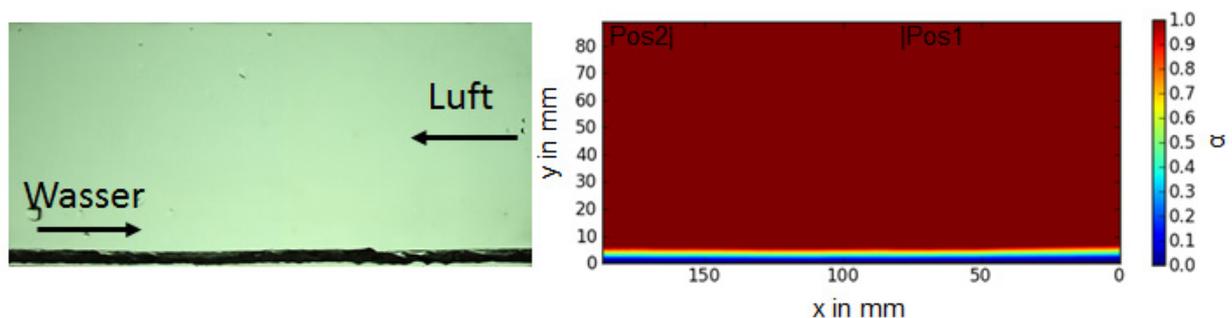


Abbildung 4-16 Strömungsbild bei Messpunkt 1

Das Strömungsbild zeigt einen gleichmäßigen, dünnen Wasserfilm. Ein Anstieg der Filmdicke in Wasserflussrichtung, wie er theoretisch zu erwarten wäre, ist nicht zu erkennen. Die Strömung zeigt an diesem Messpunkt, abgesehen von kleinen Kapillarwellen, kaum Anzeichen einer Interaktion zwischen den Fluiden. Die sichtbaren Tropfen befinden sich auf den Kanalfenstern und sind nicht der Strömung zuzuordnen.

Tabelle 4.1 Strömungsbedingungen bei Messpunkt 1

Messpunkt	u_{GS} in m/s	\dot{V}_G l/s	u_{LS} in m/s	\dot{V}_L l/min	Strömungsform
1	10,1	100	0,042	25	schießend

In Abbildung 4-17 sind die an den Messpositionen entnommenen Phasenprofile zu sehen. Im Diagramm ist der Phasenanteil in Abhängigkeit der vertikalen Koordinate aufgetragen.

Aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeit zeigt sich ebenfalls nur ein minimaler Unterschied zwischen den Phasenverläufen an Position 1 und 2. Der in erster Linie von Kapillarwellen dominierte Zweiphasenbereich beginnt ab einer Höhe von ca. 1 mm und endet bei 6 mm. Die eingezeichneten Fehlerbalken repräsentieren die Standardabweichung der 10 ausgewerteten Einzelsequenzen. Der Fehlerbalken entspricht somit dem Bereich, innerhalb dessen 68,2 % aller Messwerte liegen. Die Größe dieses Bereichs steigt mit zunehmender Höhe, was auf die Wechselwirkungen mit der Gasphase zurückzuführen ist.

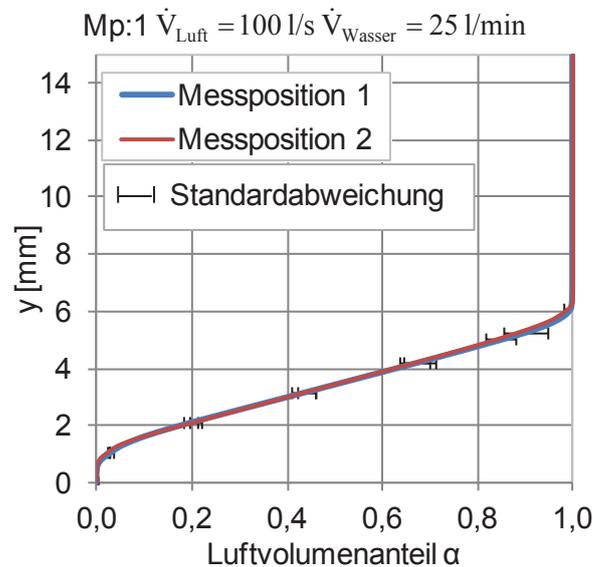


Abbildung 4-17 Phasenverteilung bei Messpunkt 1

Die zeitlich gemittelten Luftgeschwindigkeiten u und v sowie die mittleren turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen u_{RMS} und v_{RMS} sind in Abbildung 4-18 dargestellt. In diesem, wie auch in den folgenden Diagrammen, sind die Farben der Kurven den Messpositionen zugeordnet und entsprechen der Codierung in Abbildung 4-14. Sie wurden an Position 0 über dem Luftleitblech und an Position 2, vor dem unteren Knick des Kanals gemessen. Auf der Ordinatenachse ist dabei die vertikale Koordinate y^* aufgetragen, sie entspricht der Höhe über dem Luftleitblech. Das Geschwindigkeitsprofil von Position 0 (rechts) ist an der Oberseite unvollständig, da der optische Zugang aufgrund der Rahmenkonstruktion des Lufteinlassmoduls nicht gegeben war. Durch die Umlenkung der Luftströmung ist an Messposition 0 jedoch ein leicht asymmetrisches Geschwindigkeitsprofil zu sehen. Stromauf dieser Position, vor dem Leitblech in der Lufteinlaufstrecke, ist jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass sich ein symmetrisches Geschwindigkeitsprofil einstellt. Das Profil von Messposition 0 zeigt eine Maximalgeschwindigkeit von etwa 14 m/s und hat turbulenten Charakter. Die Geschwindigkeitskomponente v , senkrecht zur Hauptströmungsrichtung, beträgt an dieser Messposition über die gesamte Höhe des Profils näherungsweise 0 m/s. Die Schwankungen beider Geschwindigkeitskomponenten haben mit Werten unterhalb von 1 m/s ein recht geringes Niveau. Sie sind im Bereich der Wandgrenzschicht über dem Luftleitblech und an der Oberseite des Kanals maximal.

Aufgrund des größeren zur Verfügung stehenden Strömungsquerschnittes ist die Luftgeschwindigkeit an Messposition 2 (im Diagramm links) geringer. Die Maximalgeschwindigkeit beträgt dort etwa 13 m/s. Das Strömungsprofil ist asymmetrisch und weist einen Geschwindigkeitsgradienten unterhalb von 40 mm auf. Neben der Wechselwirkung mit dem Wasserfilm kommt hier auch die Querschnittserweiterung am Eintritt in die Teststrecke

von 70 mm auf 90 mm Höhe als Ursache in Frage. Als Orientierungshilfe ist in den Diagrammen die Koordinate markiert, an der der Gasphasenanteil 99% beträgt. Dies entspricht näherungsweise der Oberkante des Zweiphasenbereichs. Die Phasengrenzfläche befindet sich dementsprechend unmittelbar unterhalb der eingezeichneten Linie. Um Reflexionen des Laserlichts und damit Schäden an den Messgeräten zu vermeiden, endet der Messbereich, in dem das Geschwindigkeitsprofil erfasst wurde, bei einer Höhe von 9 mm. Die Geschwindigkeitsschwankungen u_{RMS} und v_{RMS} sind an Messposition 2 deutlich höher als zuvor. Die Maximalwerte werden im Bereich der oberen Kanalwand und der Phasengrenzfläche erreicht. Wobei der Einfluss der Wasserströmung, wie schon im Geschwindigkeitsprofil, bis zu einer Höhe von 40 mm erkennbar ist. Sowohl bei den Geschwindigkeiten wie auch bei den Geschwindigkeitsschwankungen sind die Vertrauensintervalle an beiden Messpositionen sehr klein.

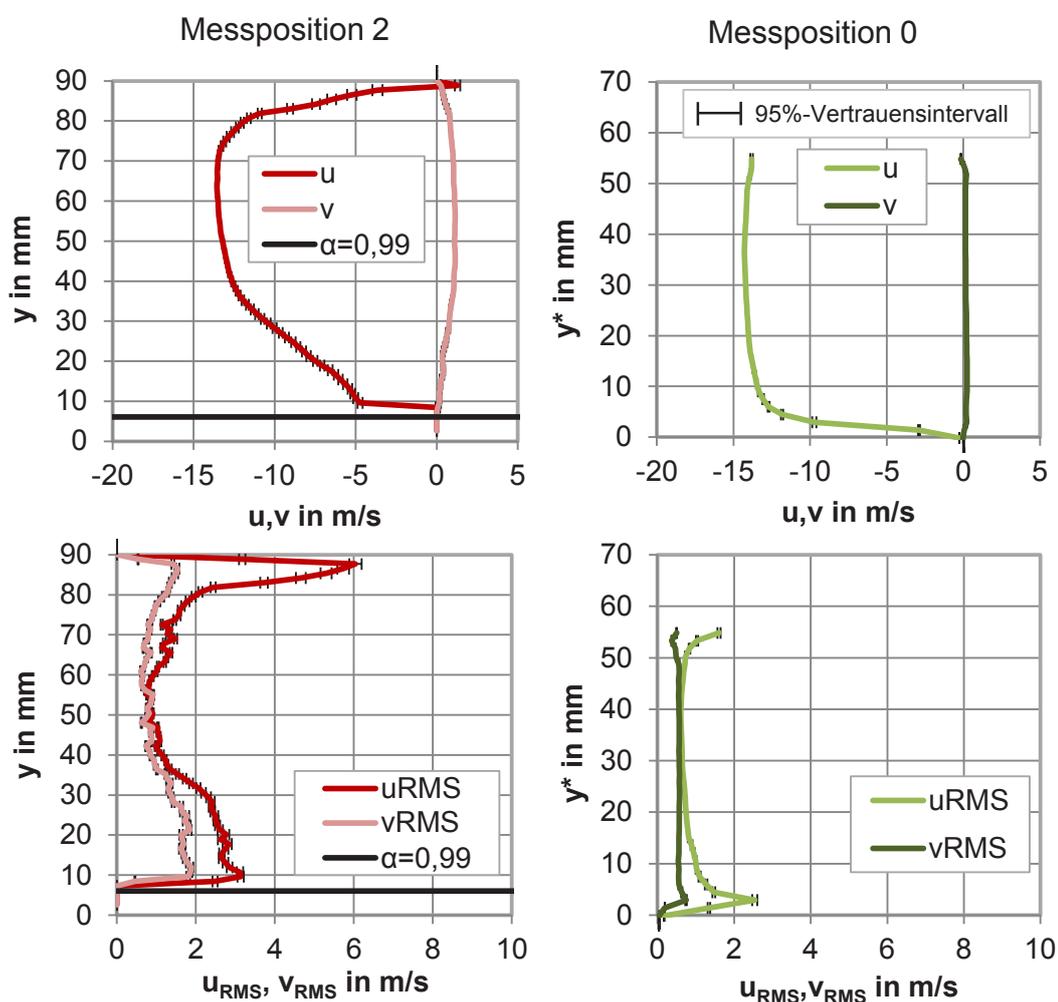


Abbildung 4-18 Zeitlich gemittelte Luftgeschwindigkeit und Geschwindigkeitsfluktuation bei Messpunkt 1

Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsschwankung der Flüssigphase sind in Abbildung 4-19 aufgetragen. Zusätzlich ist die Höhenkoordinate markiert, bei der der Luftvolumenanteil 99% beträgt. Wie schon bei den Messungen zur Luftgeschwindigkeit, ist die Geschwindigkeitskomponente v auch bei den Wassergeschwindigkeiten nahezu ohne Einfluss auf das Strömungsgeschehen. Die Geschwindigkeitskomponente u weist an Messposition 1 einen Maximalwert von 1,5 m/s auf. Die Maximalgeschwindigkeit wird kurz unterhalb der 99%-Marke erreicht, was auf einen geringen Einfluss der Luftströmung an dieser Stelle

hinweist. Das Strömungsprofil hat unterhalb von $y=1$ mm einen Knick, der höchstwahrscheinlich nicht physikalisch sondern aufgrund einer Spiegelung im unteren Kanalfenster entstanden ist. Die Vertrauensintervalle sind im Bereich des Kanalbodens sehr gering und wachsen mit zunehmendem Luftanteil auf einen Betrag von etwa 0,2 m/s an. Die Geschwindigkeitsschwankungen beider Komponenten u und v sind im Bereich der Phasengrenzfläche und in der Wandgrenzschicht am Kanalboden maximal. Der anisotrope Charakter der Turbulenz dieser Strömung wird im direkten Vergleich beider Kurven anhand der unterschiedlichen Werte von u_{RMS} und v_{RMS} deutlich. Die Geschwindigkeitsschwankungen u_{RMS} in Hauptströmungsrichtung sind immer etwa doppelt so groß wie die der v -Komponente, die senkrecht dazu verläuft.

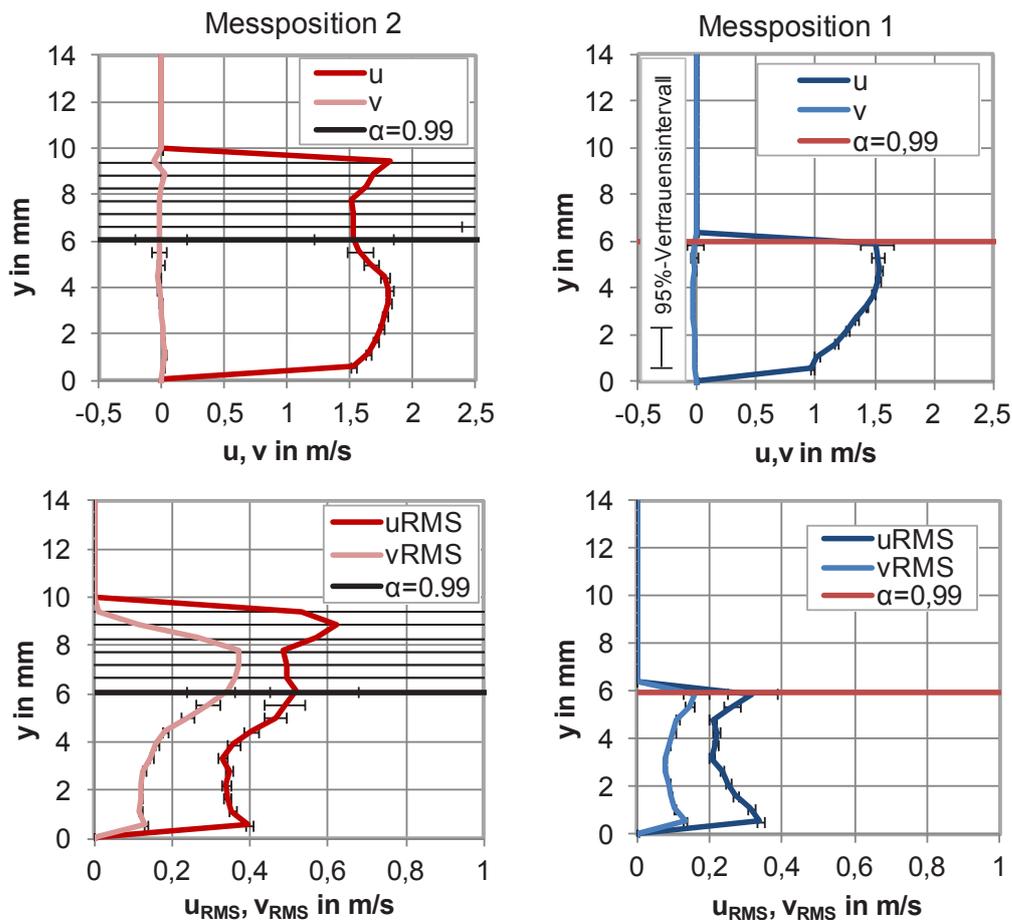


Abbildung 4-19 Zeitlich gemittelte Wassergeschwindigkeit und Geschwindigkeitsfluktuation bei Messpunkt 1

Das Strömungsprofil von Messposition 2 weist höhere Werte der Komponente u auf, als an Position 1. Die Verzögerung zwischen beiden Messpunkten ist durch die Reibung innerhalb der Flüssigphase und vor allem auch durch den Impulsaustausch mit der überströmenden Gasphase zu erklären. Dieser Einfluss wird auch anhand der reduzierten mittleren Geschwindigkeiten im Bereich um $\alpha = 0,99$ deutlich, wo die Strömung um etwa 0,25 m/s unter der Höchstgeschwindigkeit liegt. Die Vertrauensintervalle weisen unterhalb der 99%-Markierung geringe Beträge auf. Sie steigen jedoch durch den geringer werdenden Phasenanteil mit zunehmender Höhe an. Oberhalb von 6 mm werden die Vertrauensintervalle sehr groß und liegen daher außerhalb des auf der Abszisse dargestellten Wertebereichs. Die Messwerte können in diesem Bereich nicht mehr als repräsentativ betrachtet werden, da aufgrund des geringen Wasseranteils nur wenige Vektoren zur

Mittelwertbildung herangezogen werden können. Die mittleren Geschwindigkeitsschwankungen sind an dieser Messposition höher als an der ersten Messposition. Dies ist zum einen auf die höhere Strömungsgeschwindigkeit und zum anderen auf den stärkeren Einfluss der Gasphase zurückzuführen. Dies ist auch an den höheren Werten im Bereich $4 \text{ mm} < y < 6 \text{ mm}$ erkennbar.

4.4.1. Entwicklung bei variablem Luftvolumenstrom

Ausgehend von der vorangegangenen Betrachtung eines einzelnen Messpunktes, soll nun betrachtet werden, wie sich die Strömung bei einer Änderung der Versuchsparameter verhält. Dazu werden im Folgenden die Ergebnisse der Messpunkte 1, 2 und 3 miteinander verglichen. Das Strömungsbild und die mittlere Phasenverteilung der Messpunkte ist in Abbildung 4-20 zu sehen. Die Strömungsbedingungen an diesen Messpunkten können auch Tabelle 4.2 entnommen werden.

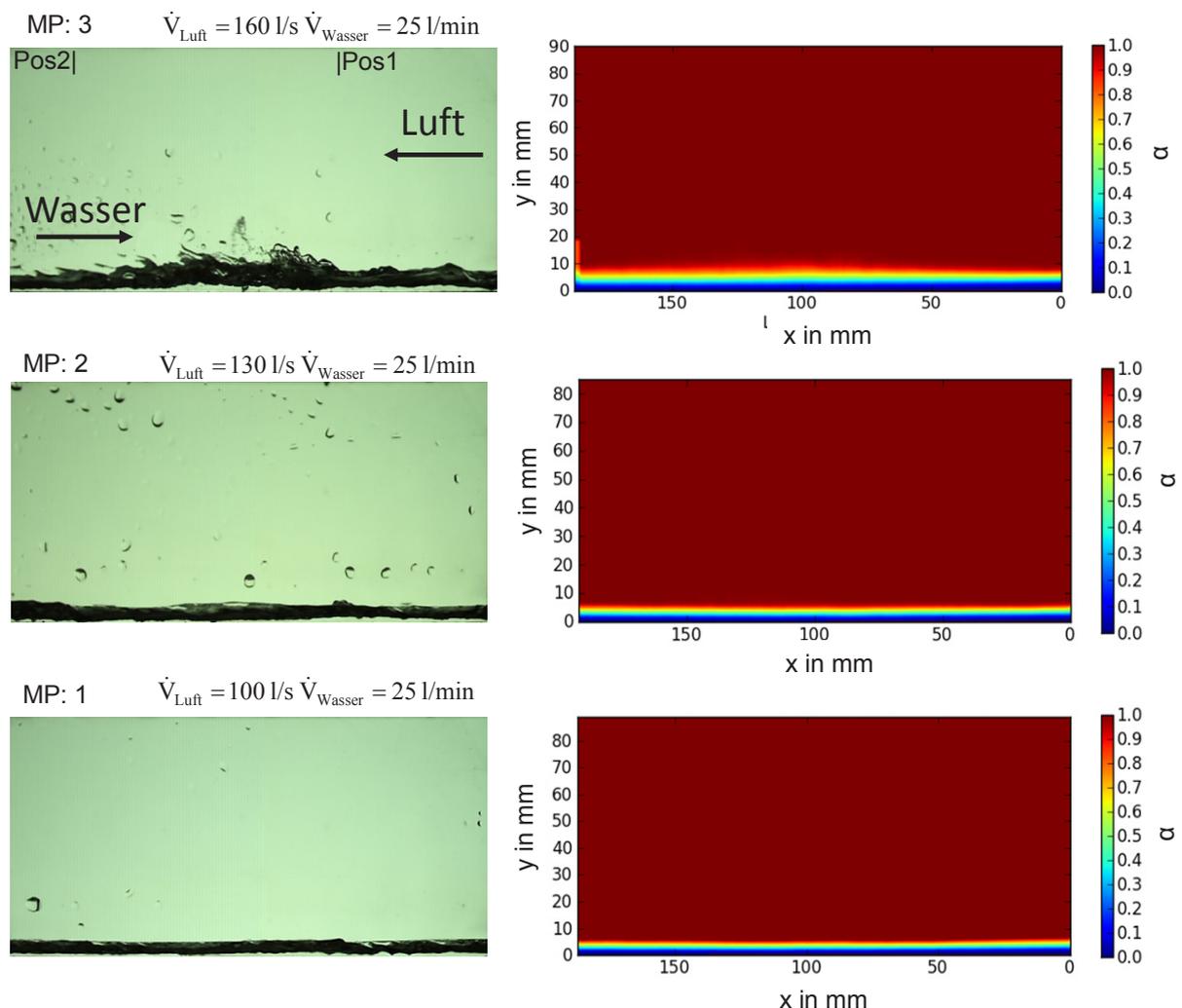


Abbildung 4-20 Strömungsbild bei steigendem Luftvolumenstrom

Es ist erkennbar, dass als Folge der erhöhten Luftvolumenstromdichte immer intensivere Wechselwirkungen zwischen den beiden Fluiden stattfinden. Die Schichtdicke des Wasserfilms nimmt mit dem Luftvolumenstrom deutlich sichtbar zu.

Tabelle 4.2 Strömungsbedingungen bei steigender Luftvolumenstromdichte

Messpunkt	u_{GS} in m/s	\dot{V}_G l/s	u_{LS} in m/s	\dot{V}_L l/min	Strömungsform
1	10,1	100	0,042	25	schießend
2	13,1	130	0,042	25	schießend mit Tropfen
3	16,2	160	0,042	25	schießend mit Tropfen

Das Strömungsbild ändert sich auch im Hinblick auf die Beschaffenheit der Phasengrenzfläche. Mit steigender Relativgeschwindigkeit zwischen den Fluiden werden auch die Amplituden der Kapillarwellen bzw. Rollwellen höher. Die Grenzfläche wird deshalb rau und es kommt bei den Messpunkten 2 und 3 zur Ablösung von Tropfen. Bei Messpunkt 3 können auch erste Rollwellen beobachtet werden.

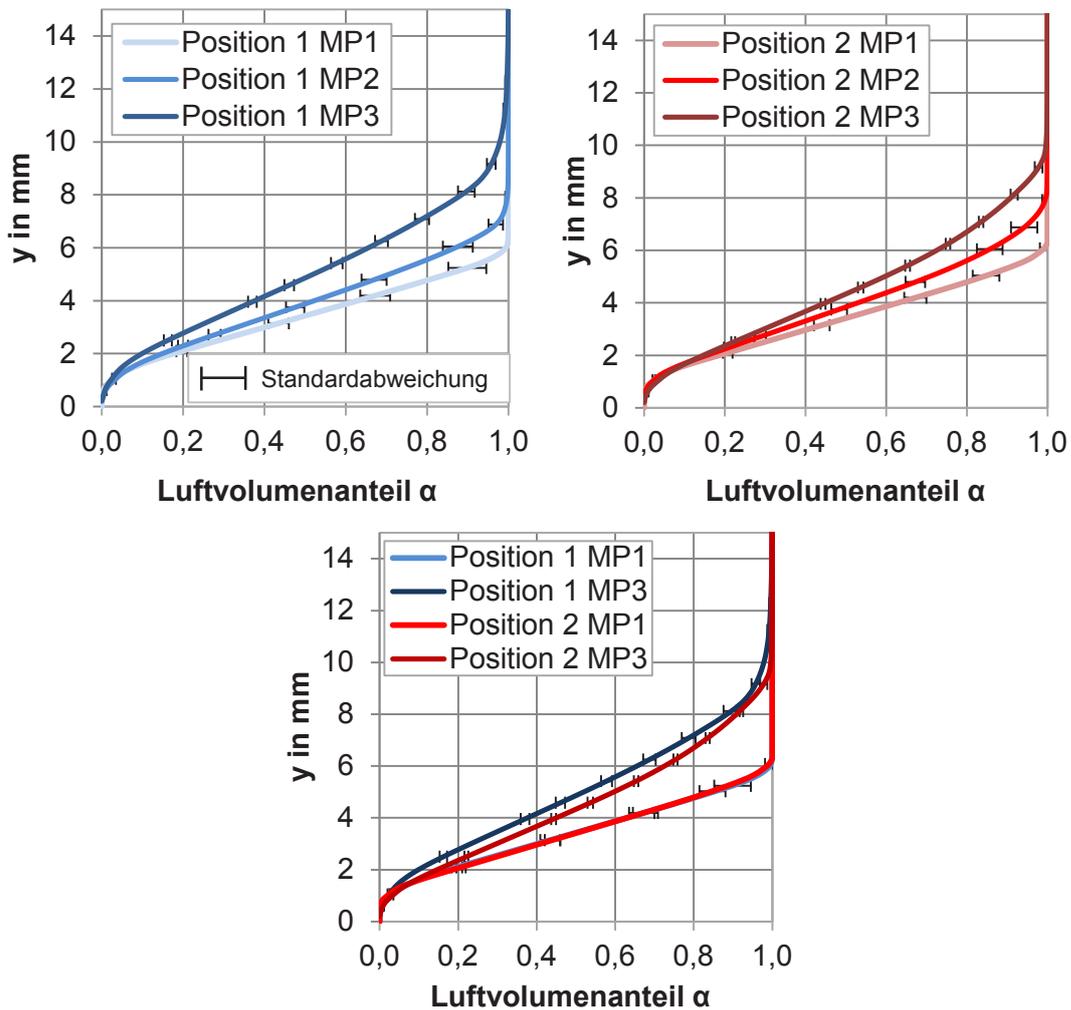


Abbildung 4-21 Phasenverteilung bei steigendem Luftvolumenstrom

Abbildung 4-21 zeigt die Phasenverteilungen der drei Messpunkte. Die steigende Schichtdicke des Wasserfilms ist deutlich zu erkennen. Beispielsweise erreicht die Kurve bei Messpunkt 1 in einer Höhe von 6 mm einen Luftvolumenanteil von 100 %, wohingegen bei Messpunkt 3 derselbe Zustand erst oberhalb von 10 mm erreicht wird. Vergleicht man die Ergebnisse eines Messpunktes jeweils an beiden Messpositionen miteinander (Abbildung 4-21 unten), zeigt sich ein zunehmender Abstand zwischen den Kurven. Während die beiden Kurven von Messpunkt 1 noch beinahe deckungsgleich übereinander liegen, zeigt sich bei

Messpunkt 3 eine gut sichtbare Differenz zwischen den Profilen. Die Ursache sind die mit zunehmendem Wasservolumenstrom in Strömungsrichtung wachsenden Wellen. Die Standardabweichung der Messungen weist verhältnismäßig kleine Werte zwischen 0,02 und 0,05 auf. Sie nimmt durch die Wellenbewegungen in der oberen Hälfte der Profile deutlich zu.

Die Luftgeschwindigkeiten konnten bei den Messpunkten 2 und 3 nur an Messposition 0, über dem Luftleitblech vor der Teststrecke gemessen werden. Zwar wurden Messungen in der Teststrecke durchgeführt, die starke Tropfenbeladung an den Fenstern der Teststrecke verhinderte jedoch eine verlässliche Auswertung der Geschwindigkeitsprofile an Messposition 2. Die Ergebnisse der PIV-Messungen an Position 0 sind in Abbildung 4-22 zu sehen. Wie erwartet, steigt die Geschwindigkeitskomponente u mit zunehmender Volumenströmdichte von einer Bulkgeschwindigkeit von etwa 14 m/s bei Messpunkt 1 auf etwa 22 m/s bei Messpunkt 3.

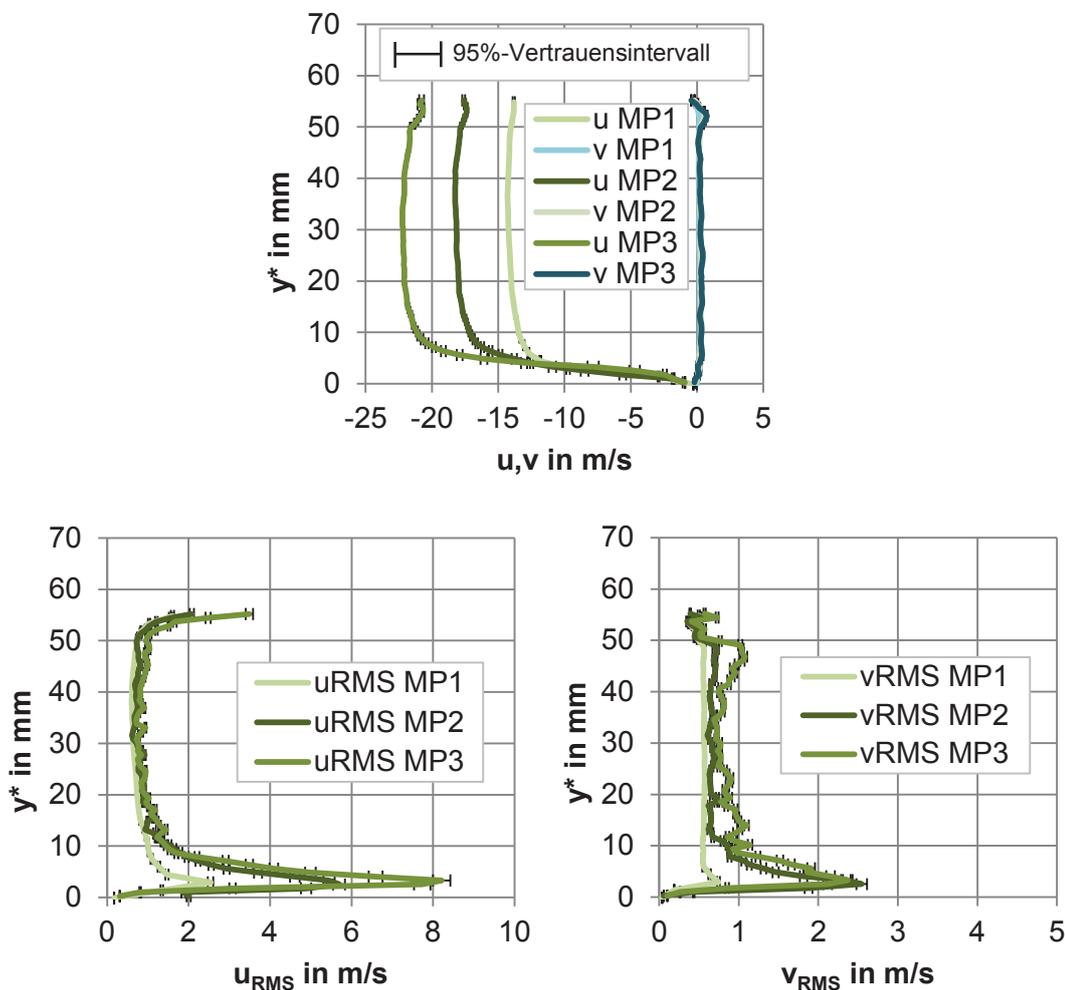


Abbildung 4-22 Luftgeschwindigkeit und Geschwindigkeitsfluktuation bei schießender Strömung und steigendem Luftvolumenstrom

Die Komponente v bleibt nahezu unverändert bei Werten um 0 m/s. Die Vertrauensintervalle weisen im Verhältnis zur Strömungsgeschwindigkeit sehr geringe Werte auf. Sie steigen nur im Bereich der unteren Grenzschicht auf Werte bis 0,4 m/s an. Auch die Charakteristiken der turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen u_{RMS} und v_{RMS} ändern sich wie erwartet. Die Schwankung in Hauptströmungsrichtung u_{RMS} bleibt in der Kernströmung auf dem gleichen

Niveau von 1 m/s. Die Schwankungspeaks im Bereich der unteren Wandgrenzschicht steigen im Wert von ca. 2,5 m/s bei Messpunkt eins, auf etwa 8 m/s bei Messpunkt drei. Die Vertrauensintervalle bleiben dabei unter 0,5 m/s. Die Werte der vertikalen Geschwindigkeitsschwankungen bleiben bei Messpunkt zwei und drei der gleichen Größenordnung wie bei Messpunkt eins. Der Grenzschichtpeak steigt von 0,8 m/s bei Messpunkt eins auf 2,5 m/s bei Messpunkt drei. Messpunkt zwei reiht sich zwischen den Messpunkten eins und drei in den Verlauf mit ein. Genau wie bei den Geschwindigkeiten und u_{RMS} sind die Vertrauensintervalle verhältnismäßig klein.

Durch den Impulsaustausch mit der Luft sinkt die Wassergeschwindigkeit an Messposition 1 (Abbildung 4-23) mit zunehmendem Luftvolumenstrom. Die Maximalgeschwindigkeit sinkt bei Messpunkt 1 von 1,5 m/s auf 1,25 m/s. Wie auch aus Abbildung 4-21 hervorgeht, steigt die Marke, an der der Gasphasenanteil 99% beträgt, von 6 auf etwa 11 mm. Wie schon im zuvor betrachteten Geschwindigkeitsprofil von Messpunkt 1, treten auch hier im Bereich der unteren Wand geringfügige Unregelmäßigkeiten im Geschwindigkeitsprofil auf, da die Messungen in Wandnähe fehlerbehaftet sind. Die Geschwindigkeitskomponente v ist zugunsten der Lesbarkeit nicht im Diagramm dargestellt. Sie liegt bei allen drei Messpunkten über die gesamte Höhe des Flüssigkeitsfilms stets nahe null (siehe Anhang D). Das Geschwindigkeitsprofil von Position 2 zeigt ein ähnliches Strömungsverhalten. Jedoch zeigen sich bei den Messpunkten jeweils eine höhere Maximalgeschwindigkeit und ein stärkerer Einfluss durch die Luftströmung als bei Messposition 1. Die intensiveren Wechselwirkungen mit der Luft können durch den größeren Abstand zwischen der Messposition und dem Luftleitblech erklärt werden.

Der Impulsaustausch mit der Luftströmung ist intensiver, weil der Einfluss des Luftleitblechs an dieser Stelle geringer ist. Wie schon bei den Messungen an Messposition 1, treten auch hier im Wandbereich ($y < 1$ mm) unplausible Werte auf. Die Geschwindigkeitsschwankungen zeigen bei beiden Positionen einen gleichbleibenden Verlauf. Die Fluktuationen im Bereich der Wandgrenzschicht bleiben betragsmäßig in etwa gleich. Es bleibt jedoch fraglich, ob die Ortsauflösung des Messverfahrens hoch genug war, um die Grenzschicht vollständig aufzulösen. Darüber hinaus können auch hier Messfehler durch Spiegelungen und andere optische Effekte nicht vollständig ausgeschlossen werden. Im Bereich der Phasengrenzfläche zeigt sich mit zunehmendem Luftvolumenstrom eine höhere Geschwindigkeitsfluktuation. Bei der Betrachtung ist jedoch zu beachten, dass die Vertrauensintervalle der Kurven oberhalb der 99%-Markierungen schnell große Werte annehmen, da dort zu wenige Messwerte ermittelt werden konnten. Die gemessenen Werte dürfen deshalb nur bis maximal zu dieser Markierung als physikalisch gewertet werden. Unter dieser Voraussetzung kann davon ausgegangen werden, dass die Geschwindigkeitsfluktuationen an der Phasengrenzfläche mit der Luftvolumenstromdichte steigen.

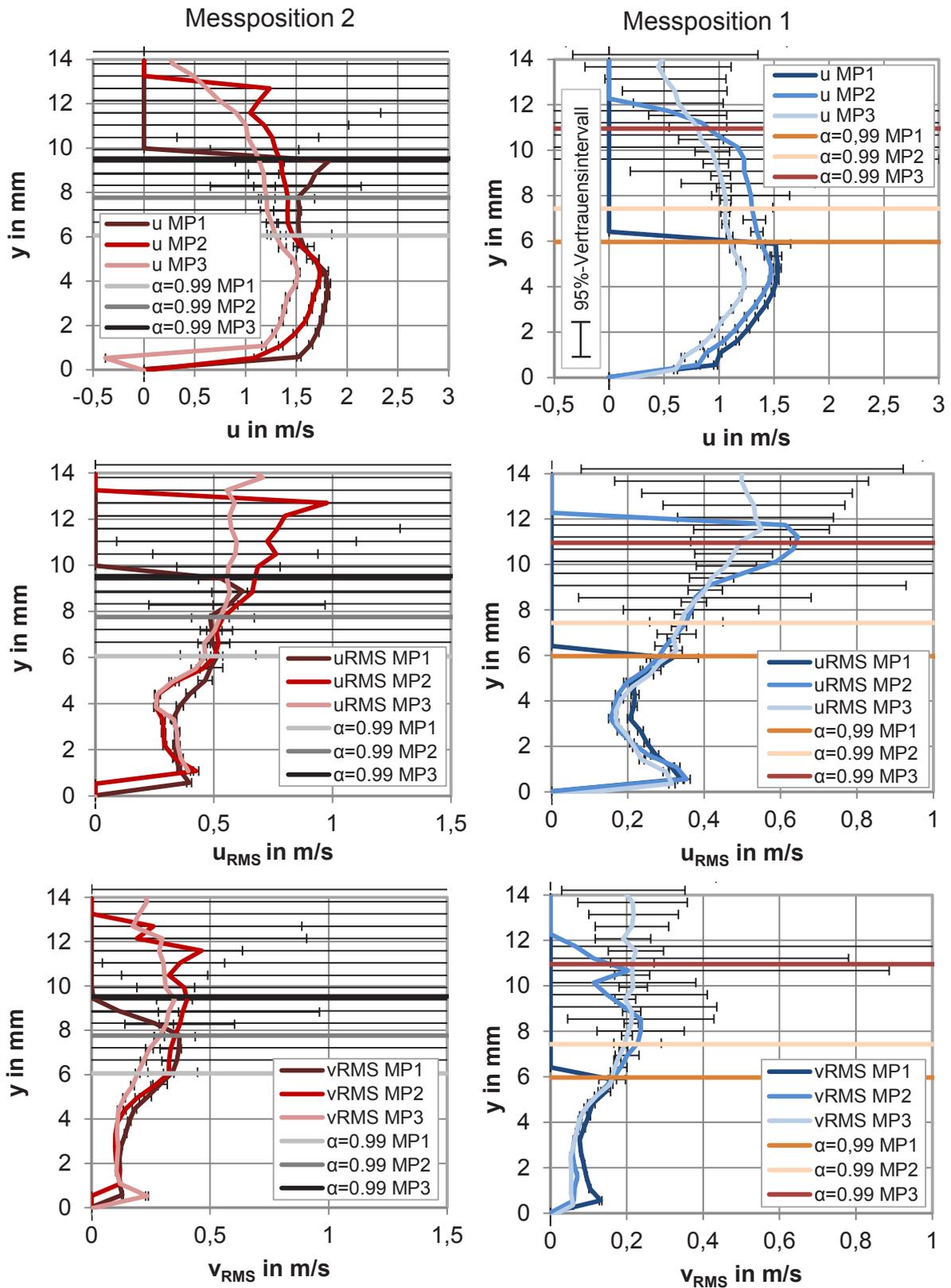


Abbildung 4-23 Wassergeschwindigkeit und Geschwindigkeitsfluktuation in schießender Strömung bei steigendem Luftvolumenstrom

4.4.2. Entwicklung bei variablem Wasservolumenstrom

Das Strömungsverhalten bei steigender Wasservolumenstromdichte kann anhand der Ergebnisse von den Messpunkten 2, 9, 15 und 22 betrachtet werden. Wie in Tabelle 4.3 zu sehen ist, decken die Messpunkte einen Bereich der Volumenstromdichte von 0,042 m/s bis 0,093 m/s ab. Der Luftvolumenstrom bleibt bei dieser Betrachtung über alle genannten Messpunkte gleich. Die an den Punkten vorherrschende Strömungsform wurde als „schießend mit Tropfenablösung“ eingeordnet. Strömungsbild und Phasenverteilung (Abbildung 4-24) zeigt eine deutliche Zunahme der Wasserschichtdicke bei steigendem Wasservolumenstrom. Außerdem ist eine Vergrößerung des Zweiphasenbereiches festzustellen.

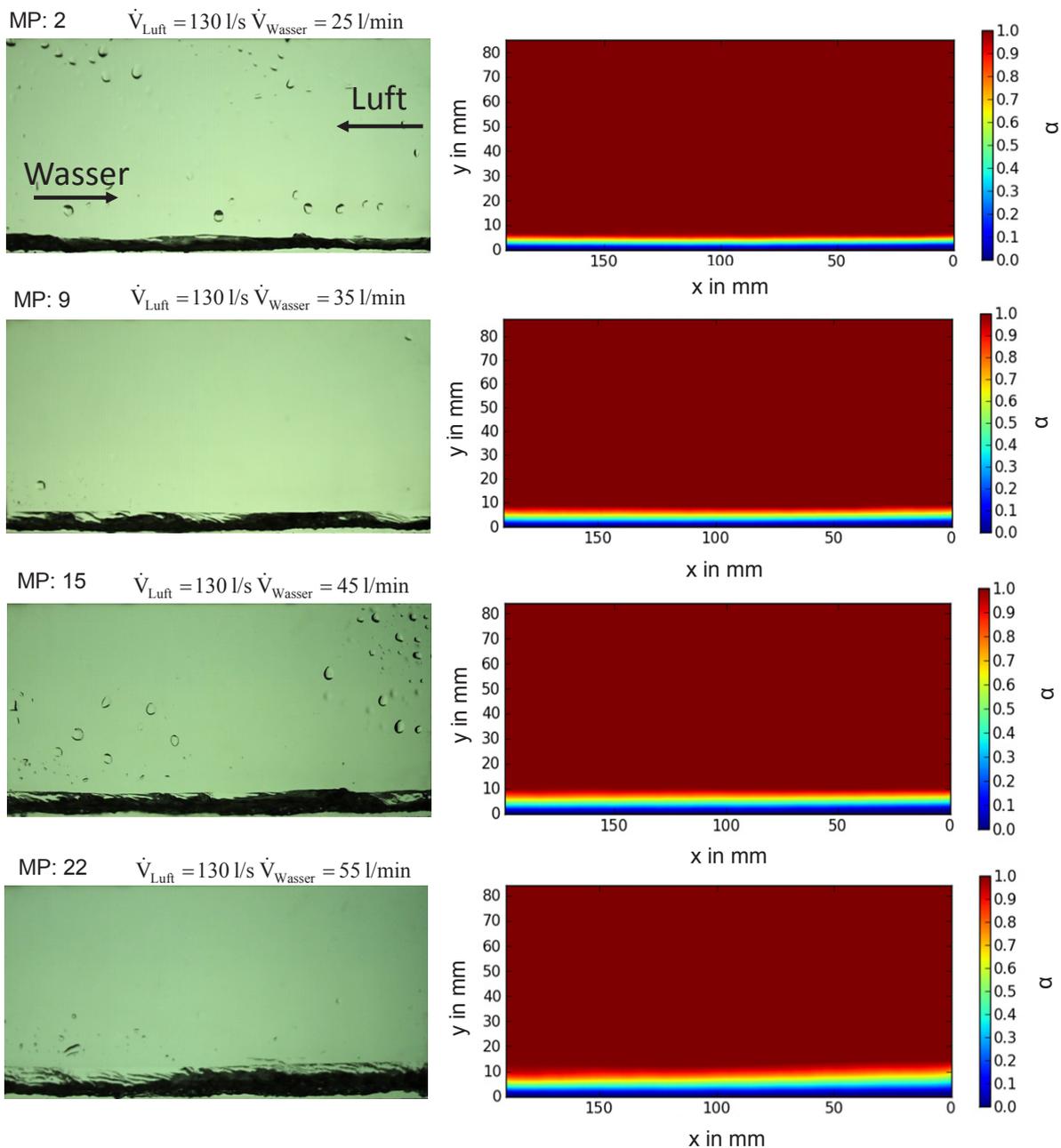


Abbildung 4-24 Strömungsbild bei steigendem Wasservolumenstrom

Tabelle 4.3 Strömungsbedingungen bei steigender Luftvolumenstromdichte

Messpunkt	u_{GS} in m/s	\dot{V}_G l/s	u_{LS} in m/s	\dot{V}_L l/min	Strömungsform
2	13,1	130	0,042	25	schießend mit Tropfen
9	13,1	130	0,059	35	schießend mit Tropfen
15	13,1	130	0,075	45	schießend mit Tropfen
22	13,1	130	0,093	55	schießend mit Tropfen

Beide Beobachtungen werden durch die Phasenverteilungen in Abbildung 4-25 bestätigt. In den Diagrammen sind die Phasenverteilungen für die betrachteten Punkte jeweils nach der Messposition sortiert. Es ist mit zunehmendem Wasservolumenstrom eine deutliche Erhöhung des Zweiphasenbereichs zu erkennen. Dieser Effekt ist an Messposition 1 stärker ausgeprägt als bei Messposition 2, da die Strömung dort bereits länger der verzögernden Luftströmung ausgesetzt ist.

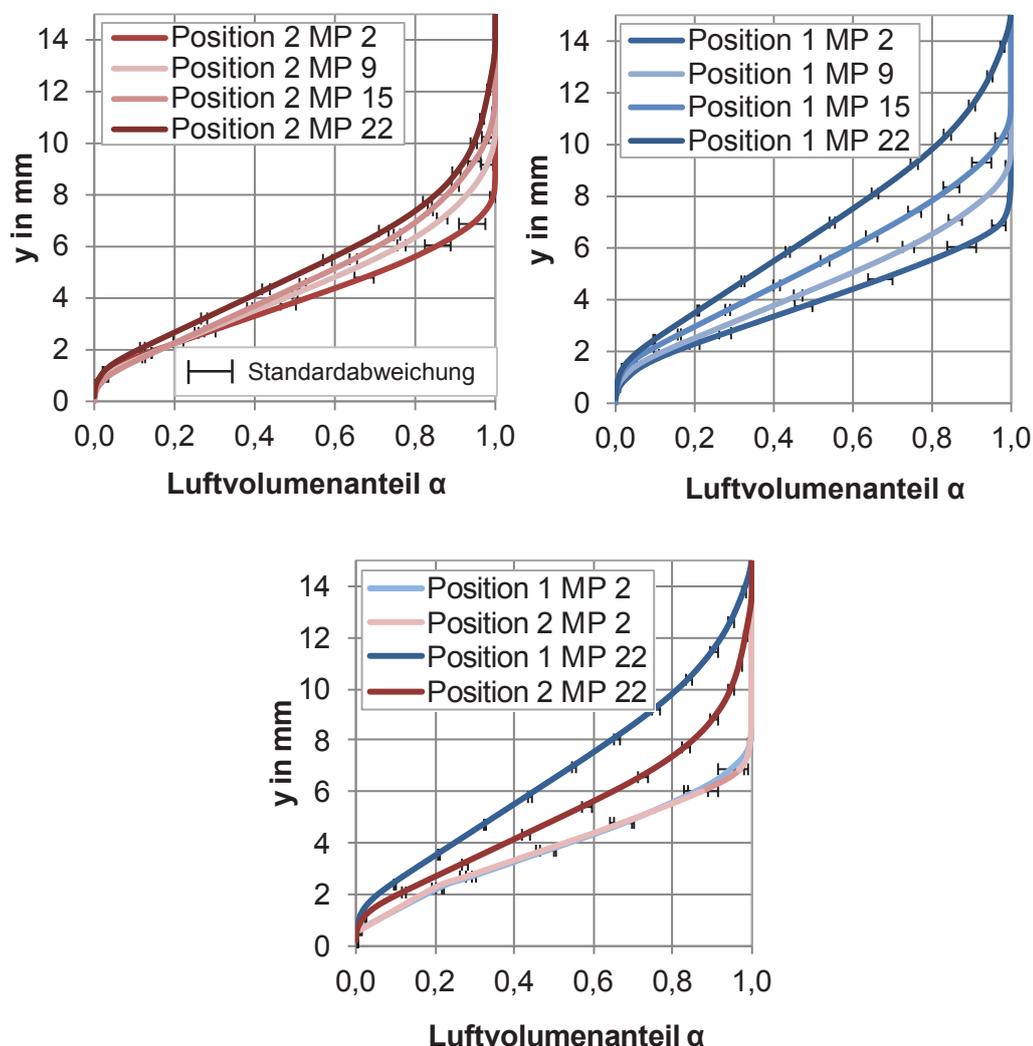


Abbildung 4-25 Phasenverteilung für steigenden Wasservolumenstrom

In Abbildung 4-25 sind unten die Phasenverteilungen beider Messpositionen, jeweils von Messpunkt 2 und 22, aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass sich die beiden Kurven von Messpunkt 22 deutlich unterscheiden, während diese bei Messpunkt 2 noch beinahe deckungsgleich übereinander liegen. Die Ergebnisse zeigen damit, dass die Wasserfilmdicke

bei steigendem Wasservolumenstrom größer wird und auch der Höhenunterschied in Strömungsrichtung mit steigendem Wasservolumenstrom zunimmt. Die Verteilungen von Messpunkt 9 und 15 werden hier zugunsten der Übersichtlichkeit nicht gezeigt, sie sind im Anhang zu finden. Die Standardabweichung der Phasenverteilungen ist im Verhältnis zu den Messwertänderungen bei allen Verteilungen klein.

Die Luftgeschwindigkeiten konnten auch bei dieser Betrachtung nur an Position 0 gemessen werden, da die Tropfenbeladung an den seitlichen Fenstern zu massiven Messfehlern führen. In Abbildung 4-26 sind die gemessenen Geschwindigkeitsprofile zu sehen. Auch hier wurden die Kurven von Messpunkt 9 und 15 weggelassen. Die Geschwindigkeiten ändern sich zwischen Messpunkt 2 und Messpunkt 22, wie erwartet, nur sehr geringfügig. Die Geschwindigkeitskomponente u hat, wie auch schon in den vorangegangenen Beispielen, eine turbulente Charakteristik. Die vertikale Komponente leistet nahezu keinen Beitrag. Die Geschwindigkeitsschwankungen u_{RMS} und v_{RMS} nehmen bei steigendem Wasservolumenstrom in der unteren Wandgrenzschicht deutlich zu.

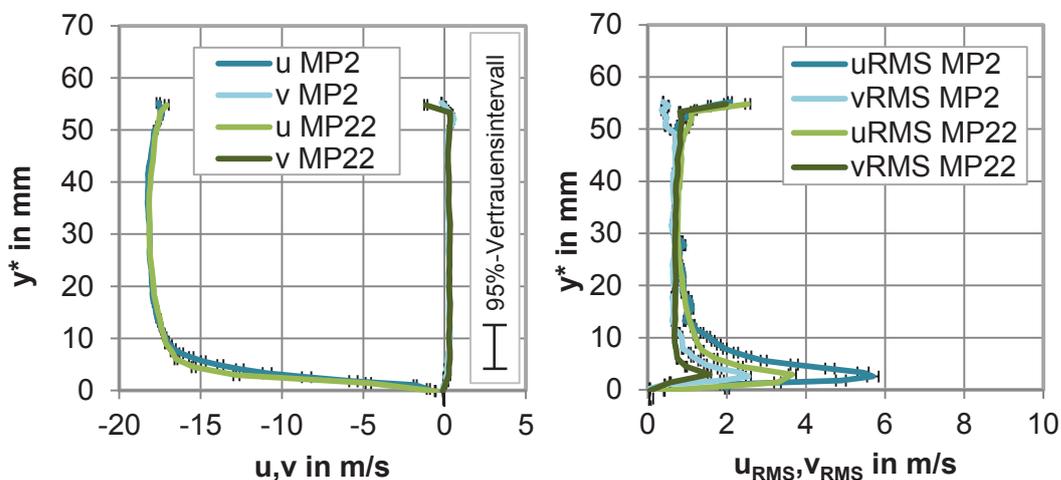


Abbildung 4-26 Luftgeschwindigkeit und Geschwindigkeitsfluktuation bei schießender Strömung und steigendem Wasservolumenstrom an Messposition 0

Die Geschwindigkeiten in der flüssigen Phase wurden, wie schon zuvor, an den Messpositionen 1 und 2 gemessen. Die Profile der Geschwindigkeitskomponente u in Hauptströmungsrichtung sind in Abbildung 4-27 zu sehen. Anhand der dargestellten Messpunkte wird deutlich, dass die Strömungsgeschwindigkeit steigt, wenn die Wasservolumenstromdichte erhöht wird. Bei Messposition 1 kann die Maximalgeschwindigkeit unabhängig vom Wasservolumenstrom etwa 5 mm über dem Kanalboden beobachtet werden. Sie beträgt, abhängig vom Wasservolumenstrom, zwischen 1,5 m/s und 2,1 m/s. Da die Geschwindigkeitskomponente v in vertikaler Richtung im betrachteten Gebiet immer Beträge nahe null aufweist, wird sie auch hier nicht näher diskutiert. Die Profile sind jedoch in Anhang D zu finden.

Wie schon bei der Untersuchung zum Strömungsverhalten bei steigendem Luftvolumenstrom, ergibt sich auch hier ein Geschwindigkeitsprofil mit turbulentem Charakter. Oberhalb des Geschwindigkeitsmaximums sinkt die Flüssigkeitgeschwindigkeit durch die Interaktion mit dem darüberströmenden Gas. Auch in Abbildung 4-27 ist deutlich zu erkennen, dass die Vertrauensintervalle oberhalb der $\alpha=0,99$ -Marke deutlich größer werden, da dort nur noch selten Strömungsgeschwindigkeiten ermittelt werden können. Die

Profile weisen im Bereich $0 \text{ mm} < y < 1 \text{ mm}$ ebenfalls Unregelmäßigkeiten auf, die durch optische Effekte am Kanalboden entstanden und deshalb als Messfehler zu bewerten sind.

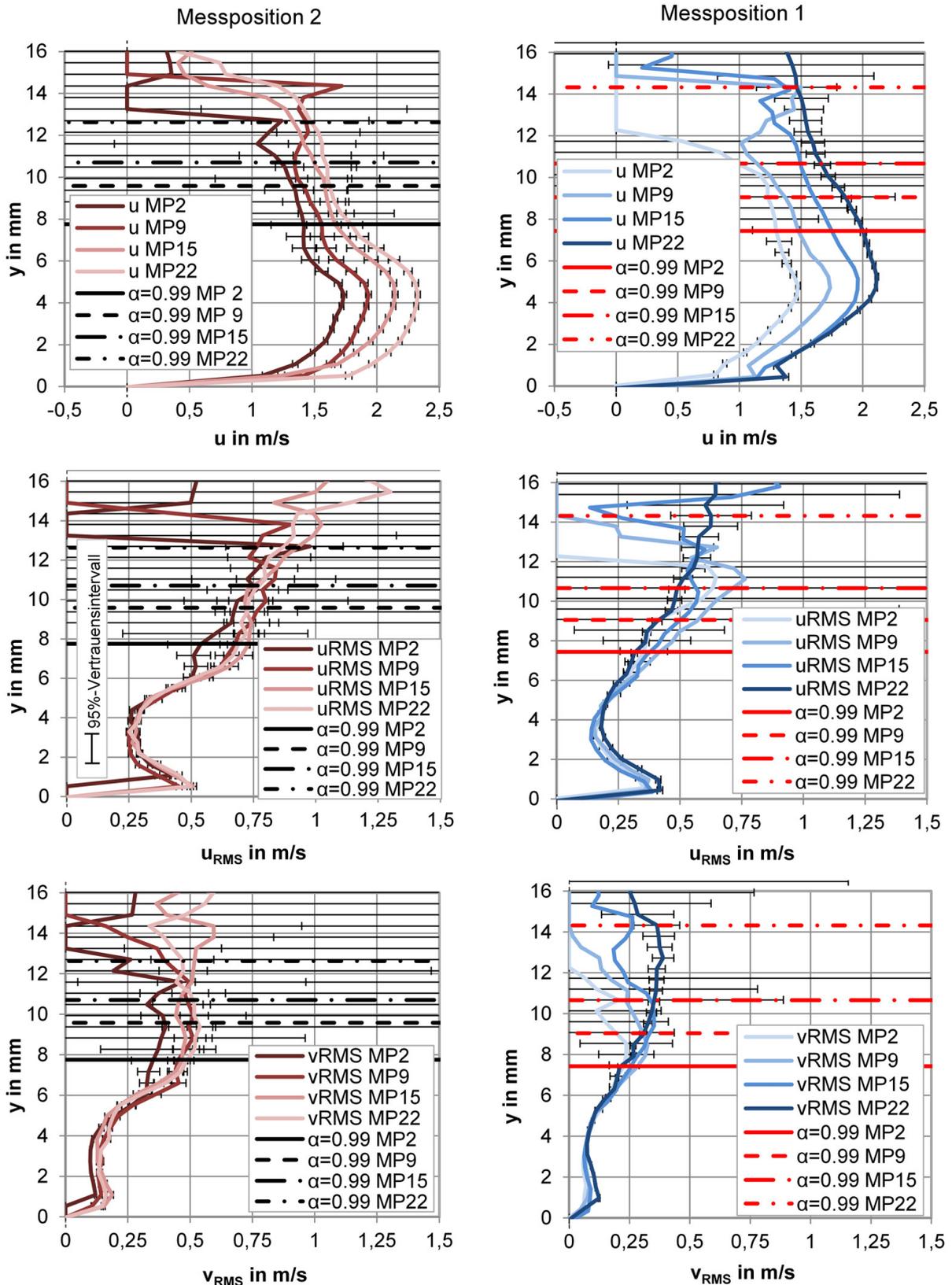


Abbildung 4-27 Wassergeschwindigkeit und Geschwindigkeitsfluktuation in schießender Strömung bei steigendem Wasservolumenstrom

Da sich die Vertrauensintervalle der Messungen oberhalb von 8 mm gegenseitig stark überlagern, sind die Verläufe der selbigen nur schwer nachvollziehbar. Einzeldarstellungen der Messwerte sind deshalb in Anhang D zu finden. Abbildung 4-27 zeigt außerdem die Geschwindigkeitsschwankungen u_{RMS} und v_{RMS} an Position 1. Der Grenzschichtpeak in der Nähe des Kanalbodens ist bei beiden Komponenten deutlich zu sehen. Es fällt auf, dass sich die Schwankungswerte der einzelnen Messpunkte unterhalb von 4 mm nur geringfügig unterscheiden. Bei Messpunkt 9, 15 und 22 treten die betragsmäßig höchsten Geschwindigkeitsschwankungen im Zweiphasengebiet unterhalb der $\alpha=0,99$ -Marke auf. Messpunkt 2 unterscheidet sich von den zuvor genannten, da die Flüssigkeitsfilmdicke bei diesem Messpunkt so gering ist, dass der Einfluss der Gasphase deutlich reduziert wird. Dies ist vor allem auf das Luftleitblech vor der Teststrecke zurückzuführen.

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, wie erwartet, eine Verzögerung der Fließgeschwindigkeit zwischen Messposition 1 und 2. Außerdem sinken die Geschwindigkeiten nahe der $\alpha=0,99$ -Marke deutlich stärker als noch bei Position 1. Auch die Geschwindigkeitsschwankungen weisen bei den abgebildeten Messpunkten durchweg höhere Werte auf. Verursacht wird dies zum einen durch die höhere Wassergeschwindigkeit, aber auch durch die intensivere Phasenwechselwirkung an dieser Messposition. Es zeigt sich jedoch auch hier, dass sich das Niveau der Geschwindigkeitsschwankungen, bei steigender Wasservolumenstromdichte entlang der vertikalen Koordinate, nicht wesentlich ändert.

4.5. Teilweise umgekehrte Strömung

Wenn die Luftvolumenstromdichte über 19 m/s erhöht wird, stellt sich eine teilweise umgekehrte Strömung im Kanal ein. Wesentliche Merkmale dieser Strömung sind die Änderung der Strömungsrichtung eines Teils der kontinuierlichen Flüssigphase, sowie die Bildung von Tropfen und Blasen. Im Gegensatz zu den schießenden Strömungsformen treten in teilweise umgekehrten Strömungen auch Wellen mit großer Wellenlänge und Amplitude auf. Im Rahmen dieser Arbeit wurden auch umfangreiche Untersuchungen dieser Strömungsform durchgeführt. Neben den bereits bei den schießenden Strömungsformen angewendeten Messverfahren Particle Image Velocimetry (PIV) und der optischen Ermittlung des Phasenanteils, wurde hier auch die Tropfenvolumenstromdichte mit der in Kapitel 3.3 vorgestellten Nulldrucksonde gemessen. Durch die starken Wellenbewegungen und die Tropfenablösung konnten in der Teststrecke keine Luftgeschwindigkeiten gemessen werden. Weiterhin war es nicht möglich die Wassergeschwindigkeit bei Messpunkten oberhalb einer Luftvolumenstromdichte von 16,2 m/s zu messen, da die Strömung dort stark pulsiert und nur noch wenig Wasser im horizontalen Teil der Teststrecke vorzufinden ist. Die Untersuchungen konzentrieren sich deshalb in erster Linie auf die Messpunkte unterhalb der Volumenstromdichte von 16,2 m/s.

Abbildung 4-28 zeigt links ein Strömungsbild bei Messpunkt 5. Die Strömungsbedingungen dieses Punktes sind in Tabelle 4.4 aufgeführt. Der Messpunkt wurde, ausgehend von einem höheren Luftvolumenstrom, angefahren und liegt in der Hysterese. Die Schattenaufnahme zeigt eine fließende Strömung mit einem großen Zweiphasenbereich. Dieser umfasst sowohl die wellige, dreidimensional ausgeprägte Phasengrenzfläche als auch Tropfen und Blasen in den sonst kontinuierlichen Phasen. Der Bereich wächst von rechts nach links an. Unterhalb des Zweiphasengebiets ist eine Wasserschicht erkennbar, die ebenfalls links größer ist als rechts. Die Beobachtungen aus der Momentaufnahme setzen sich auch im zeitlichen Mittel fort, wie in der Phasenverteilung in Abbildung 4-28 rechts zu erkennen ist.

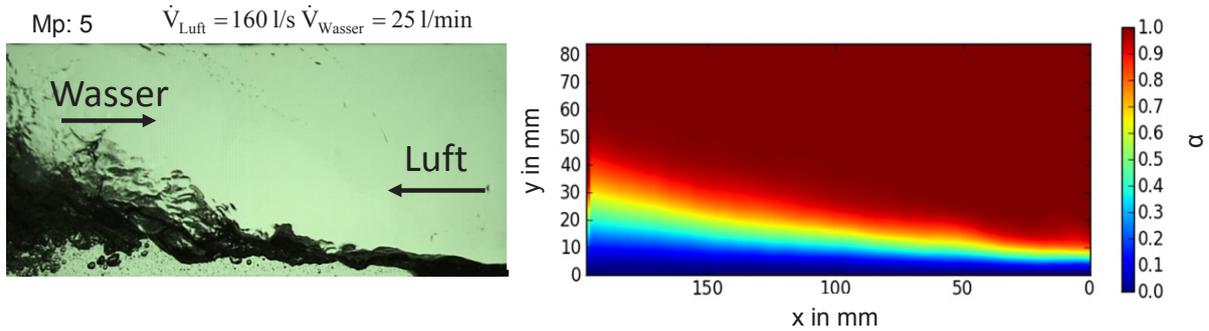


Abbildung 4-28 Strömungsbild bei teilweise umgekehrter Strömung

Die Profile der volumetrischen Phasenverteilung (Abbildung 4-29) zeigen nochmals, dass der Wasserpegel an Position 2 im zeitlichen Mittel größer ist als an Position 1. Dies ist charakteristisch für eine fließende Strömung. Die einphasige Flüssigkeitsschicht unter dem Zweiphasenbereich ist an Position 1 nicht erkennbar und an Position 2 auch nur sehr dünn.

Tabelle 4.4 Strömungsbedingungen in teilweise umgekehrter Strömung

Messpunkt	u_{GS} in m/s	\dot{V}_{G} l/s	u_{LS} in m/s	\dot{V}_{L} l/min	Strömungsform
5	16,2	160	0,042	25	teilweise umgekehrte Strömung (Hysterese)

Damit wird sichtbar, dass der Zweiphasenbereich bis kurz über den Kanalboden reicht. Auf den Hochgeschwindigkeitssequenzen zur optischen Messung der Phasenanteile lassen sich außerdem auch intermittierend auftretende Blasenschwärme in diesem Gebiet beobachten. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung zwischen den zehn ausgewerteten Bildsequenzen an. Die Beträge sind im Zweiphasenbereich größer als bei der Untersuchung der schießenden Strömung.

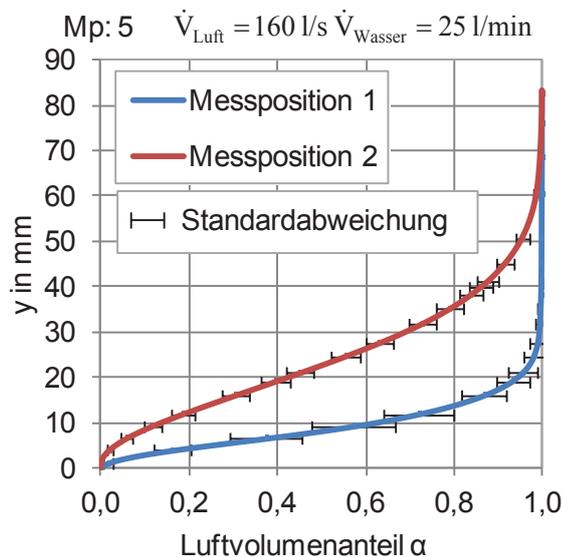


Abbildung 4-29 Phasenverteilung in teilweise umgekehrter Strömung bei Messpunkt 5

Luftgeschwindigkeiten

Das Geschwindigkeitsprofil der einströmenden Luft an Position 0 (Abbildung 4-30) zeigt keine wesentlichen Änderungen gegenüber den Profilen der untersuchten schießenden Strömungen. Auch die Geschwindigkeitsschwankungen bleiben in der gleichen Größenordnung wie zuvor bei schießender Strömung. In Abbildung 4-30 ist zu sehen, dass die Schwankungen nur im Bereich der unteren Wandgrenzschicht ($0 \text{ mm} < y < 15 \text{ mm}$) und nahe der oberen Wand ($y > 50 \text{ mm}$) Werte über 2 m/s erreicht. Die statistische Messabweichung bleibt, wie an den 95%-Vertrauensintervallen in beiden Darstellungen zu erkennen ist, klein im Verhältnis zu den gemessenen Größen.

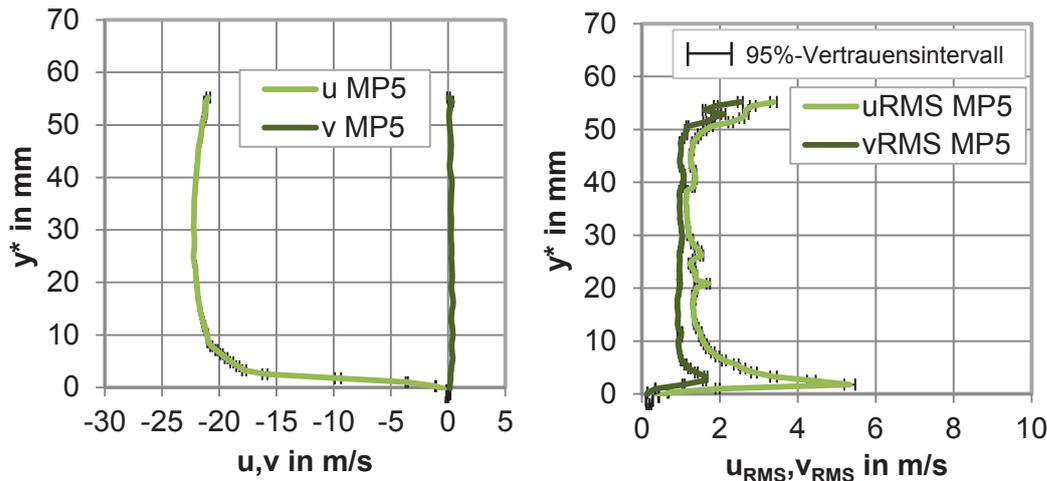


Abbildung 4-30 Luftgeschwindigkeit und Geschwindigkeitsfluktuation an Messposition 0 in teilweise umgekehrter Strömung

Wassergeschwindigkeit

Die Geschwindigkeiten und Geschwindigkeitsschwankungen der flüssigen Phase sind in Abbildung 4-31 zu sehen. Sie wurden ebenfalls mit Particle Image Velocimetry (PIV) gemessen und konnten durch die Verwendung fluoreszierender Tracer (siehe Kapitel 3.1) und ausreichend langer Messintervalle bis weit in den Zweiphasenbereich ermittelt werden.

Die Geschwindigkeit u zeigt bei Messposition 1 ein annähernd parabelförmiges Profil, mit einem Maximum von etwa $0,35 \text{ m/s}$. Die Strömungsgeschwindigkeit steigt, ausgehend vom Kanalboden, bis zu einer Kanalhöhe von knapp 5 mm . Darüber sinkt sie wieder, bis zu einer Höhe von $y = 20 \text{ mm}$. Bei dieser Höhe beträgt der volumetrische Wasseranteil entsprechend Abbildung 4-29 bereits weniger als 90% . Was im Umkehrschluss bedeutet, dass die ermittelten Werte schon hier auf eine sehr kleine Messwertanzahl zurückgehen. Darüber strömt das Wasser in die entgegengerichtete Richtung. Die Strömungsgeschwindigkeit steigt im Bereich $20 \text{ mm} < y < 27 \text{ mm}$ mit zunehmender Höhe. Bei $y = 27 \text{ mm}$ erreicht der Luftanteil 99% . Die darüber liegenden Messwerte können damit nicht mehr als repräsentativ für die Strömung bewertet werden. Die vertikale Geschwindigkeitskomponente weist über die gesamte Kanalhöhe Werte nahe null auf.

Im direkten Vergleich zeigt sich auch an Messposition 2 ein ähnliches Strömungsverhalten bei einer höheren Maximalgeschwindigkeit der Strömung. Die Strömungsumkehr tritt an dieser Messposition erst etwas höher, bei $y = 24 \text{ mm}$, auf. Der Anteil der flüssigen Phase beträgt dort ebenfalls weniger als 10% . Wegen der intensiven Phasenwechselwirkungen und

der damit verbundenen starken Durchmischung der Fluide in diesem Bereich, wird die $\alpha = 99\%$ -Marke allerdings erst bei etwa 60 mm erreicht. Die senkrechte Komponente v weist im unteren Teil des Kanals negative Geschwindigkeiten auf, da sich die flüssige Phase dort entgegengerichtet zu den aufsteigenden Luftblasen bewegt.

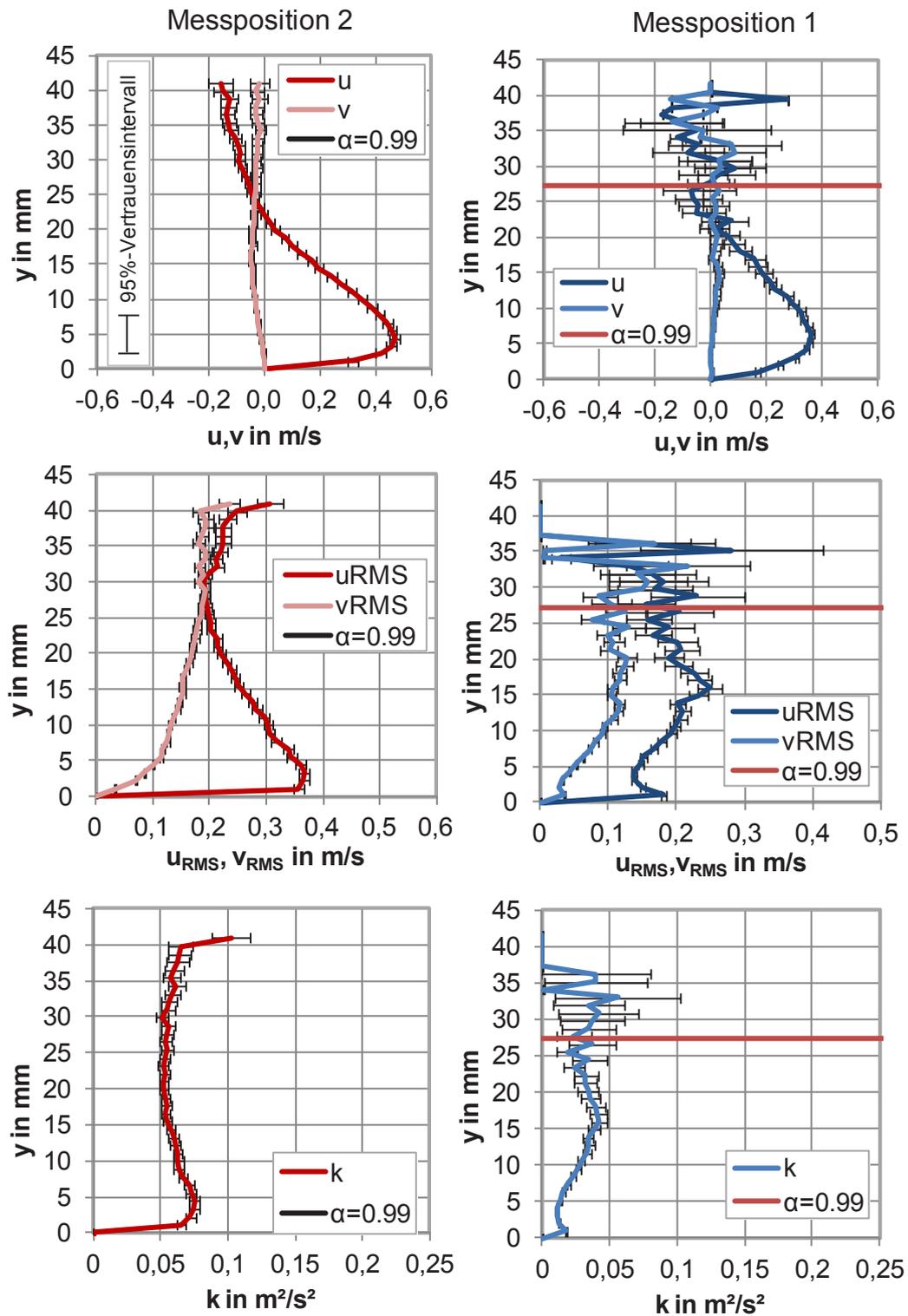


Abbildung 4-31 Wassergeschwindigkeit und Geschwindigkeitsfluktuation in teilweise umgekehrter Strömung

Die höchsten Werte der Schwankungskomponente u_{RMS} finden sich nahe der unteren Wand, das Minimum befindet sich im Bereich der Strömungsumkehr, in einer Höhe von etwa 30 mm. Darüber steigt die Geschwindigkeitsfluktuation in Hauptströmungsrichtung durch den Einfluss der Luftströmung. Auch an Position 2 ist die Geschwindigkeitsschwankung u_{RMS} zum Teil höher als die Geschwindigkeit u , was zu kurzzeitigen Richtungswechseln der Strömung führen kann. Die Schwankungskomponente v wächst mit der vertikalen Koordinate. Die Geschwindigkeitsfluktuationen weisen an dieser Messposition ein Maximum im Bereich der unteren Wandgrenzschicht auf und steigen nach einem Minimum bei $y = 4$ mm in Richtung der Phasengrenzfläche an. Das hohe Niveau der Geschwindigkeitsschwankungen führt zum Teil auch dazu, dass die Strömung auch unterhalb einer Höhe von 20 mm zum Teil für kurze Zeit die Strömungsrichtung ändert. Diese Beobachtung konnte auch durch die Analyse der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen für die Ermittlung der Phasenverteilung bestätigt werden. Im zeitlichen Mittel ist dies jedoch nicht zu erkennen. Der anisotrope Charakter der Turbulenz wird auch in teilweise umgekehrten Strömungen anhand der stark unterschiedlichen Beträge von u_{RMS} und v_{RMS} deutlich.

Die turbulente kinetische Energie k weist an beiden Messpositionen Maximalwerte an der unteren Kanalwand und im Grenzflächenbereich bei niedrigen Flüssigkeitsanteilen $\alpha = 90\%$ auf. Die Vertrauensintervalle bewegen sich auf recht geringem Niveau, da nur bei einem hohen Wasseranteil gemessen wurde. Die Berechnung der statistischen Messunsicherheit durch die Messwertschwankung erscheint jedoch gerade im gut durchmischten Zweiphasengebiet nur bedingt verlässlich, da die Anzahl der zur Verfügung stehenden Messwerte gemäß Gleichung 3-5 über den volumetrischen Phasenanteil approximiert wird. Im Postprocessing der Messauswertung wird jedoch eine hohe Anzahl unplausibler Vektoren aussortiert und nicht zur Mittelwertbildung herangezogen. Dies führt möglicherweise zu einer geringeren Vektorenanzahl im Zweiphasengebiet der teilweise umgekehrten Strömung. Dem entsprechend kann es sein, dass das Vertrauensintervall tatsächlich größer sein müsste. Eine ortsabhängige Ermittlung der tatsächlich zur Mittelwertbildung herangezogenen Vektorenanzahl würde anstelle der Annäherung über den Phasenanteil zu einer genaueren Fehlerangabe führen. Die Ermittlung dieser Anzahl war aber mit der verwendeten PIV-Software noch nicht möglich.

Tropfenvolumenstromdichte

Die Tropfenvolumenstromdichte wurde an Messposition 2, unmittelbar am unteren Knick der Teststrecke, und an Messposition 4, über dem Wasserleitblech am oberen Ende der Teststrecke, gemessen. Abbildung 4-32 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchungen. Die Höhenangaben beziehen sich jeweils auf das Zentrum des Sondenkopfes. Der unterste Rand der Sonde befand sich dementsprechend 6 mm unter der angegebenen Position.

Die Verteilung ergibt sich erwartungsgemäß. Entlang der Höhenkoordinate sind an den niedrigsten Punkten die höchsten Volumenstromdichten zu finden. Die Herkunft der gemessenen Flüssigkeitsmenge ist bei den Messungen an Position 2 nicht eindeutig der dispersen oder der flüssigen Phase zuzuordnen, da die Probe gleichermaßen aus beiden Phasen stammen kann. Die Fehlerbalken setzen sich aus der Standardabweichung (Messwertstreuung), dem Messfehler der Druckmessung und dem Diskretisierungsfehler der Auswertung zusammen. Die Messunsicherheit wird mit zunehmender Höhe kleiner, da sowohl die Messwertschwankungen als auch der Fehler durch die Druckmessungen mit geringer werdender Tropfenvolumenstromdichte kleiner werden.

An Messposition 4 wurden mit hoher Wahrscheinlichkeit ausschließlich Tropfen gemessen, da die kontinuierliche und disperse Flüssigphase dort durch das Wasserleitblech im geneigten Teil des Kanals separiert werden. Der höchste Tropfenvolumenstrom wurde bei etwa 32 mm unmittelbar über dem Leitblech gemessen. Die gemessenen Werte sind deutlich niedriger als an Position 2. Dies kann einerseits dafür sprechen, dass nur wenig Tropfenmasse bis zu dieser Position transportiert wird, andererseits kann die Ursache auch darin liegen, dass an Position 2 zu viel Wasser aus der kontinuierlichen Phase gemessen wurde. Die Messunsicherheit ändert sich hier nicht mehr so stark wie zuvor, da die Schwankungen der Werte an Position 4 wesentlich geringer sind.

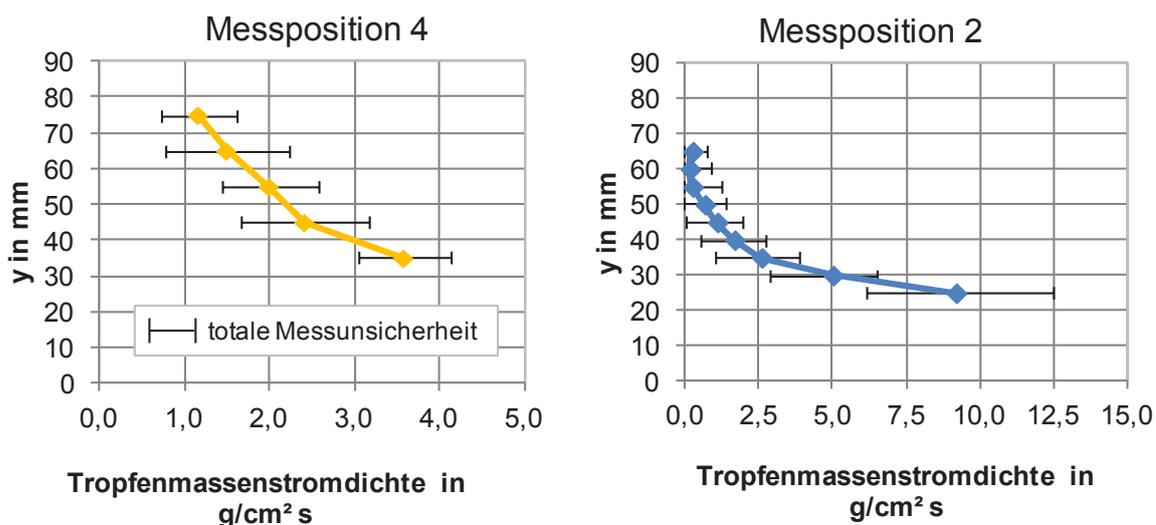


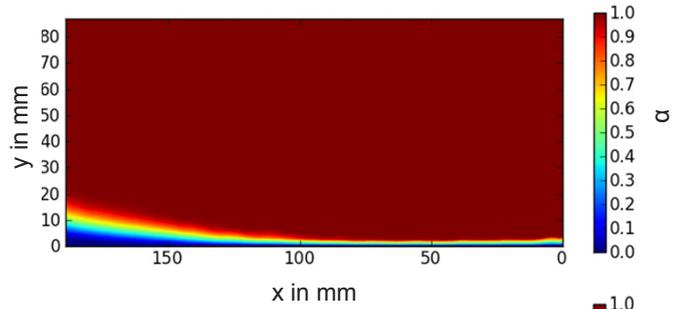
Abbildung 4-32 Tropfenmassenstromdichte in teilweise umgekehrter Strömung

4.5.1. Entwicklung bei variablem Luftvolumenstrom

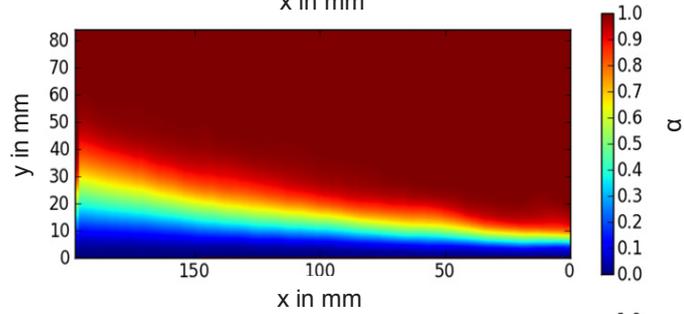
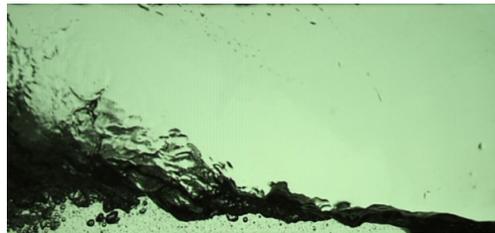
Das Strömungsverhalten einer teilweise umgekehrten Strömung hängt unter anderem von der Luftvolumenstromdichte im Kanal ab und kann anhand der in Tabelle 4.5 genannten Messpunkte untersucht werden. Die Punkte weisen verschiedene Luftvolumenströme auf und decken einen Bereich von 190 l/s bis 120 l/s ab. Die Messungen wurden bei einem konstanten Wasservolumenstrom von 25 l/min durchgeführt. Der Strömungszustand mit der höchsten untersuchten Luftvolumenstromdichte ist Messpunkt 4. Er liegt mit 19,2 m/s knapp unter der Grenze zu einer vollständig umgekehrten Strömung. Aufgrund des niedrigen Wasseranteils an beiden Messpositionen und dem gleichzeitig stark instationären Strömungsverhalten konnten an diesem Messpunkt nicht alle Messverfahren angewendet werden.

In Abbildung 4-33 sind fünf Momentaufnahmen der Strömung und die dazu gehörenden zeitlich gemittelten Phasenverteilungen zu sehen. Der Vergleich der Bilder zeigt, insbesondere an Messposition 1, die mit abnehmendem Luftvolumenstrom steigende Wasserschichtdicke. Außerdem ist zu erkennen, dass das Zweiphasengebiet zunächst von Messpunkt 6 zu Messpunkt 7 größer wird und bei weiter steigendem Luftvolumenstrom wieder schrumpft. Die Region, in der die stärksten Phasenwechselwirkungen stattfinden, verlagert sich dann zunehmend in den geneigten Teil des Kanals.

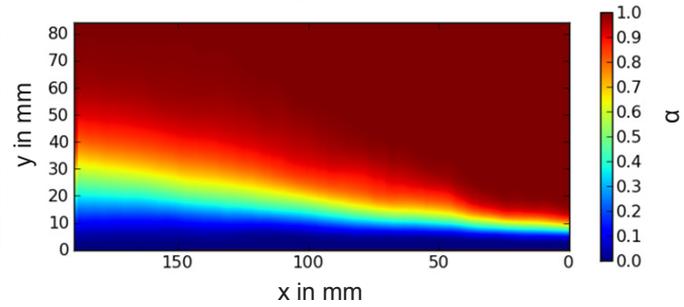
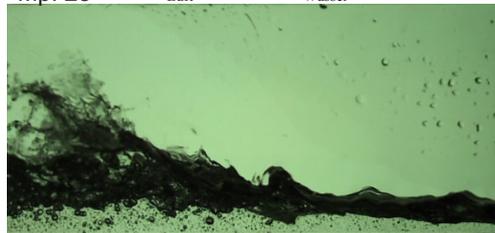
Mp: 4 $\dot{V}_{Luft} = 190 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{Wasser} = 25 \text{ l/min}$



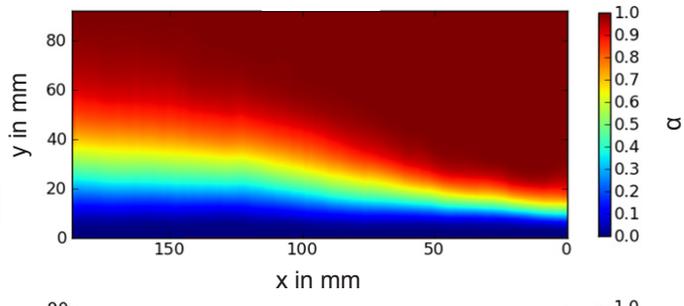
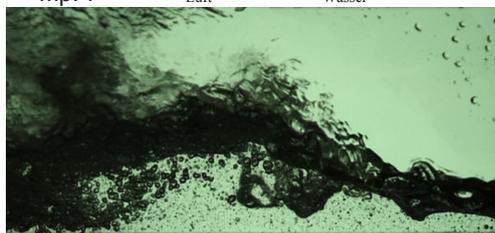
Mp: 5 $\dot{V}_{Luft} = 160 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{Wasser} = 25 \text{ l/min}$



Mp: 28 $\dot{V}_{Luft} = 145 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{Wasser} = 25 \text{ l/min}$



Mp: 7 $\dot{V}_{Luft} = 130 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{Wasser} = 25 \text{ l/min}$



Mp: 6 $\dot{V}_{Luft} = 120 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{Wasser} = 25 \text{ l/min}$

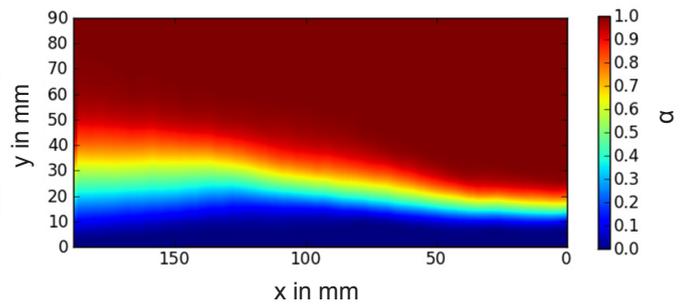
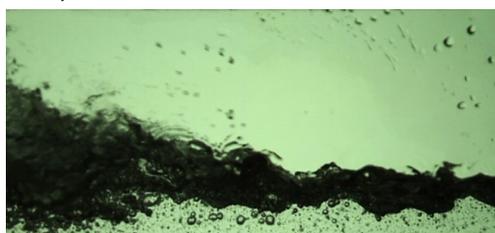


Abbildung 4-33 Strömungsbild bei teilweise umgekehrter Strömung und variablem Luftvolumenstrom

Tabelle 4.5 Strömungsbedingungen bei teilweise umgekehrter Strömung und variablem Luftvolumenstrom

Messpunkt	u_{GS} in m/s	\dot{V}_G l/s	u_{LS} in m/s	\dot{V}_L l/min	Strömungsform
4	19,2	190	0,042	25	teilweise umgekehrte Strömung
5	16,2	160	0,042	25	teilweise umgekehrte Strömung
28	14,6	145	0,042	25	teilweise umgekehrte Strömung
7	13,1	130	0,042	25	teilweise umgekehrte Strömung
6	12,1	120	0,042	25	teilweise umgekehrte Strömung

Bei Messpunkt 4 ist sowohl in der Momentaufnahme als auch in der 2D-Phasenverteilung nur ein sehr dünner Wasserfilm am Kanalboden zu sehen. Der hydraulische Sprung befindet sich bei dieser Strömung weit links von Position 2. Bei den Messpunkten 5, 28 und 7 ist im horizontalen Teststreckenabschnitt eine heftig pulsierende Strömung zu sehen, in der eine große Anzahl Tropfen und Blasen entstehen. Bei Messpunkt 7 sind zum Teil große Wellen zu beobachten, deren Wellenkämme fast die Kanaloberseite berühren. An Messpunkt 6 wird die Strömung deutlich gleichmäßiger als noch zuvor. Es bildet sich ein hydraulischer Sprung mit Deckwalze im unteren Kanalknick.

Phasenverteilung

Die zeitlich gemittelten Phasenverteilungen beider Messpositionen sind in Abbildung 4-34 zu sehen. Wie erwartet wurde die geringste Wasserschichtdicke an Messpunkt 4 gemessen. Das Phasenprofil beider Messpositionen zeigt den kleinsten Zweiphasenbereich und den niedrigsten Verlauf. An Messposition 1 verschiebt sich der Zweiphasenbereich mit abnehmendem Luftvolumenstrom nach oben. Der Zweiphasenbereich bleibt dabei mit einer Höhe von etwa 35 mm immer gleich groß.

An Messposition 2 zeigt der Vergleich der Profile der Messpunkte 5, 28, 7 und 6 hingegen nur geringe Unterschiede in der Phasenverteilung. Bei sinkendem Luftvolumenstrom ist zwischen Messpunkt 5 und Messpunkt 7 zunächst ein Höhenzuwachs des Zweiphasenbereichs zu verzeichnen. Der Zweiphasenbereich wird dann bei Messpunkt 6 wieder kleiner, da die Wellenbewegungen und die Tropfenablösung durch den niedrigeren Luftvolumenstrom wieder geringer werden. Die Fehlerbalken weisen Maximalbeträge um 0,8 auf. Die Gegenüberstellung der Phasenprofile beider Messpositionen im unteren Diagramm zeigt, dass der Höhenunterschied der Profile von Messpunkt 2 zu Messpunkt 28 zunimmt, da die Flüssigkeitsmenge im betrachteten Gebiet größer wird und dann wieder schrumpft, da das Zweiphasengebiet durch den sinkenden Luftvolumenstrom kleiner wird.

Gasphase

Die Geschwindigkeit der Gasphase konnte, wie eingangs erwähnt, lediglich an Messposition 0 vor dem Einströmen in die Teststrecke gemessen werden. Erwartungsgemäß ergeben sich für die fünf verschiedenen Luftvolumenströme hauptsächlich Geschwindigkeitsunterschiede bei den Profilen der Komponente u in Hauptströmungsrichtung. In Abbildung 4-35 ist deutlich zu sehen, dass die Geschwindigkeit von über 25 m/s bei Messpunkt 4 (190 l/s) auf etwa 17 m/s bei Messpunkt 6 fällt. Die Geschwindigkeitskomponente v spielt, wie schon bei den zuvor betrachteten Punkten, keine wesentliche Rolle und liegt im Rahmen der Messgenauigkeit bei 0 m/s.

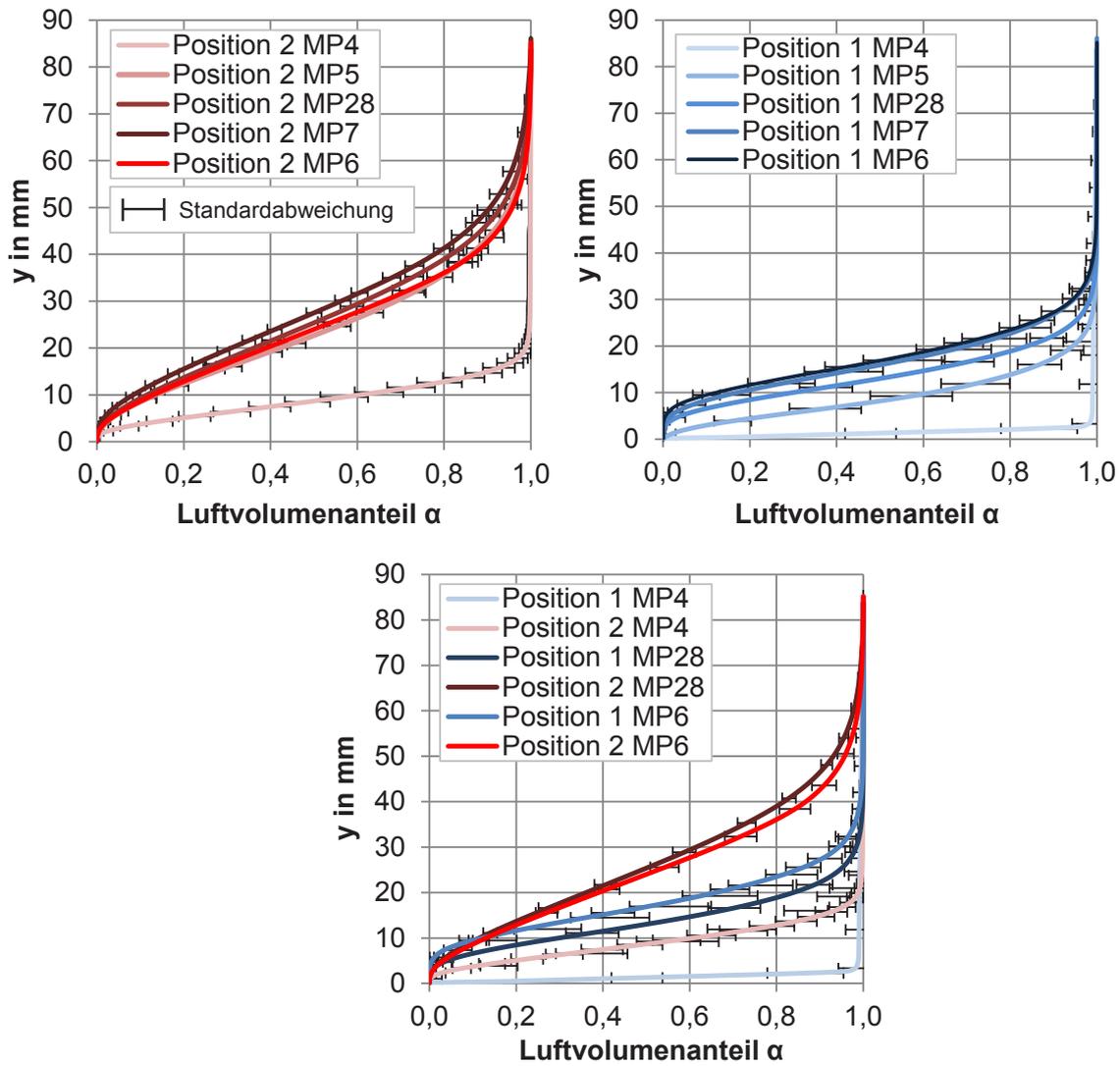


Abbildung 4-34 Phasenverteilung bei teilweise umgekehrter Strömung und variablem Luftvolumenstrom

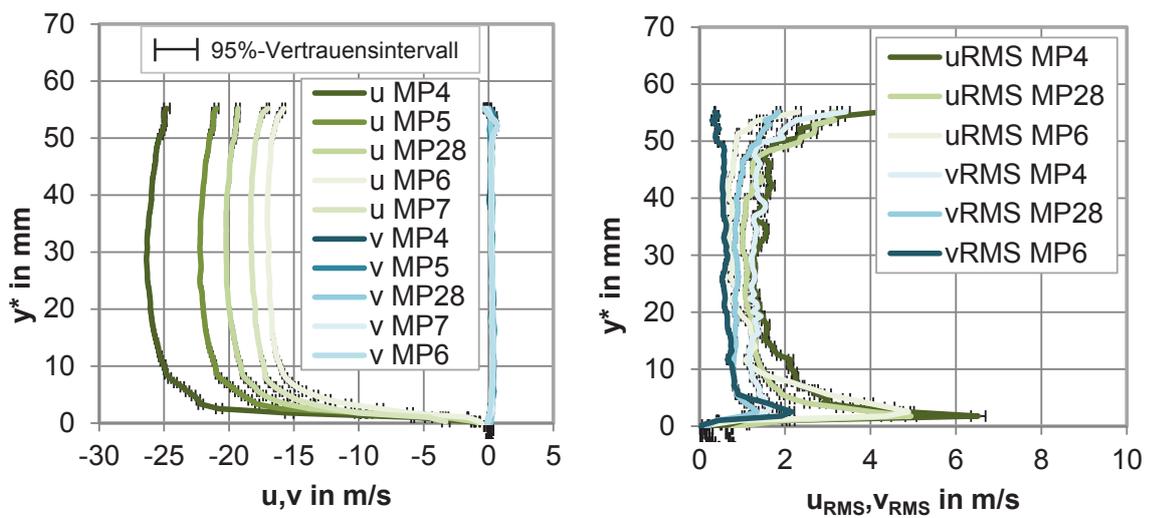


Abbildung 4-35 Geschwindigkeit der Gasphase an Position 0 bei teilweise umgekehrter Strömung und variablem Luftvolumenstrom

Die Geschwindigkeitsschwankungen u_{RMS} und v_{RMS} weisen erwartungsgemäß im Bereich der unteren und oberen Grenzschicht die charakteristischen Peaks auf. Dabei werden die höchsten Werte bei Messpunkt 4 erreicht. Die Geschwindigkeitsschwankungen in Hauptströmungsrichtung sind erneut deutlich höher als die der Komponente v . Die Beträge der Vertrauensintervalle bewegen sich auch hier auf gewohnt niedrigem Niveau.

Flüssige Phase

Die Geschwindigkeitsmessungen in der flüssigen Phase konnten bei allen Messpunkten bis auf Messpunkt 4 durchgeführt werden, da der hohe Luftvolumenstrom von 190 l/s, wie eingangs erwähnt, zu inakzeptabel hohen Messunsicherheiten führte. Die Profile in Abbildung 4-36 zeigen die typische Geschwindigkeitscharakteristik einer fließenden, teilweise umgekehrten Strömung.

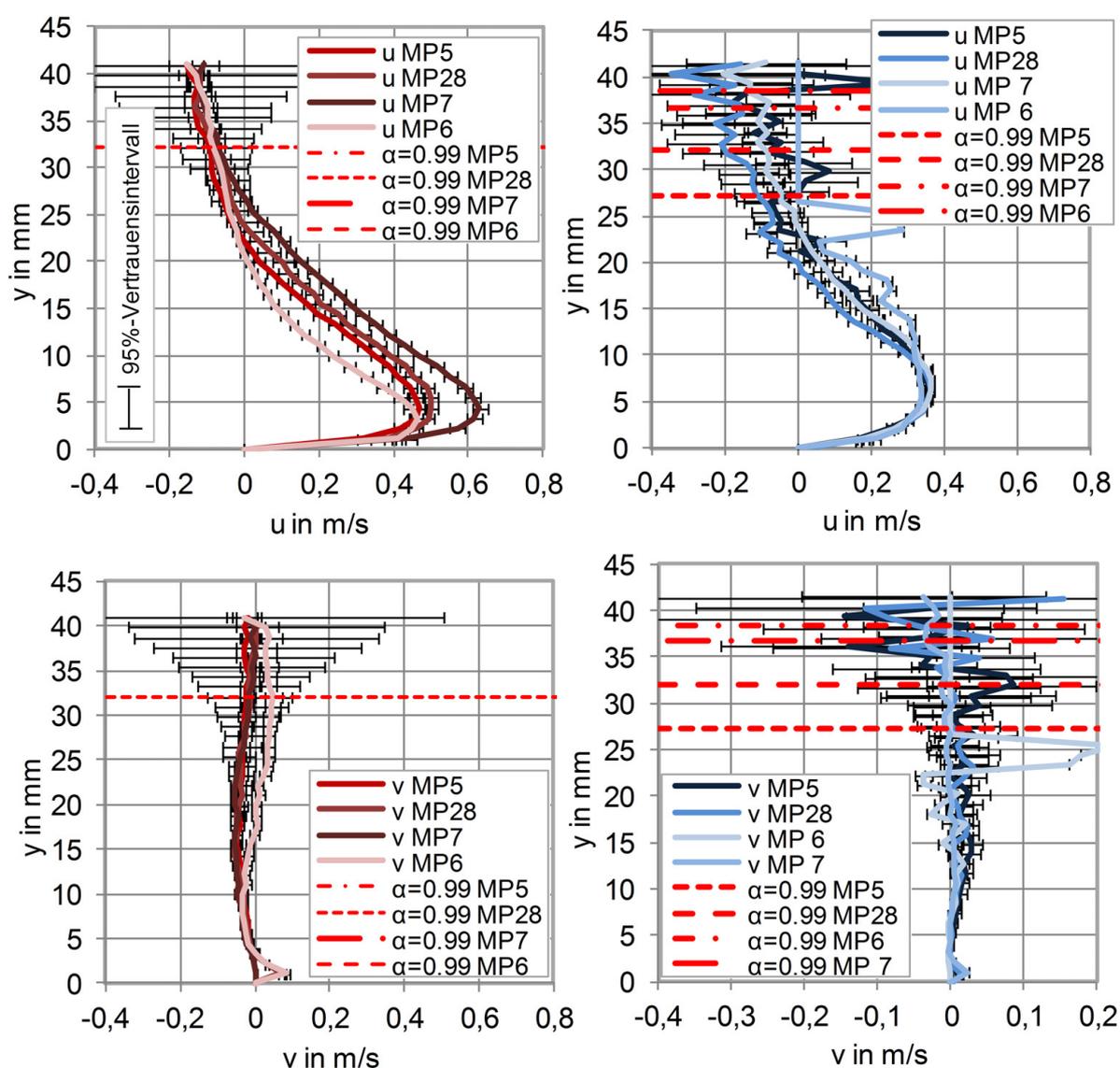


Abbildung 4-36 Geschwindigkeitsverteilung bei teilweise umgekehrter Strömung und variablem Luftvolumenstrom

An Messposition 1 überschneiden sich die Kurven bis zu einer Höhe von 10 mm. Darüber weichen die Wassergeschwindigkeiten zunehmend voneinander ab. Die höchsten Geschwindigkeiten wurden in diesem Gebiet bei Messpunkt 6 ($U_G = 12,1$ m/s) gemessen, die

niedrigsten bei Messpunkt 28 ($U_G = 14,6 \text{ m/s}$). Die Messpunkte 5 und 7 liegen zwischen den zuvor genannten Punkten. Die Geschwindigkeitskomponente v weist an dieser Messposition keine signifikanten Werte auf, die größer als null sind.

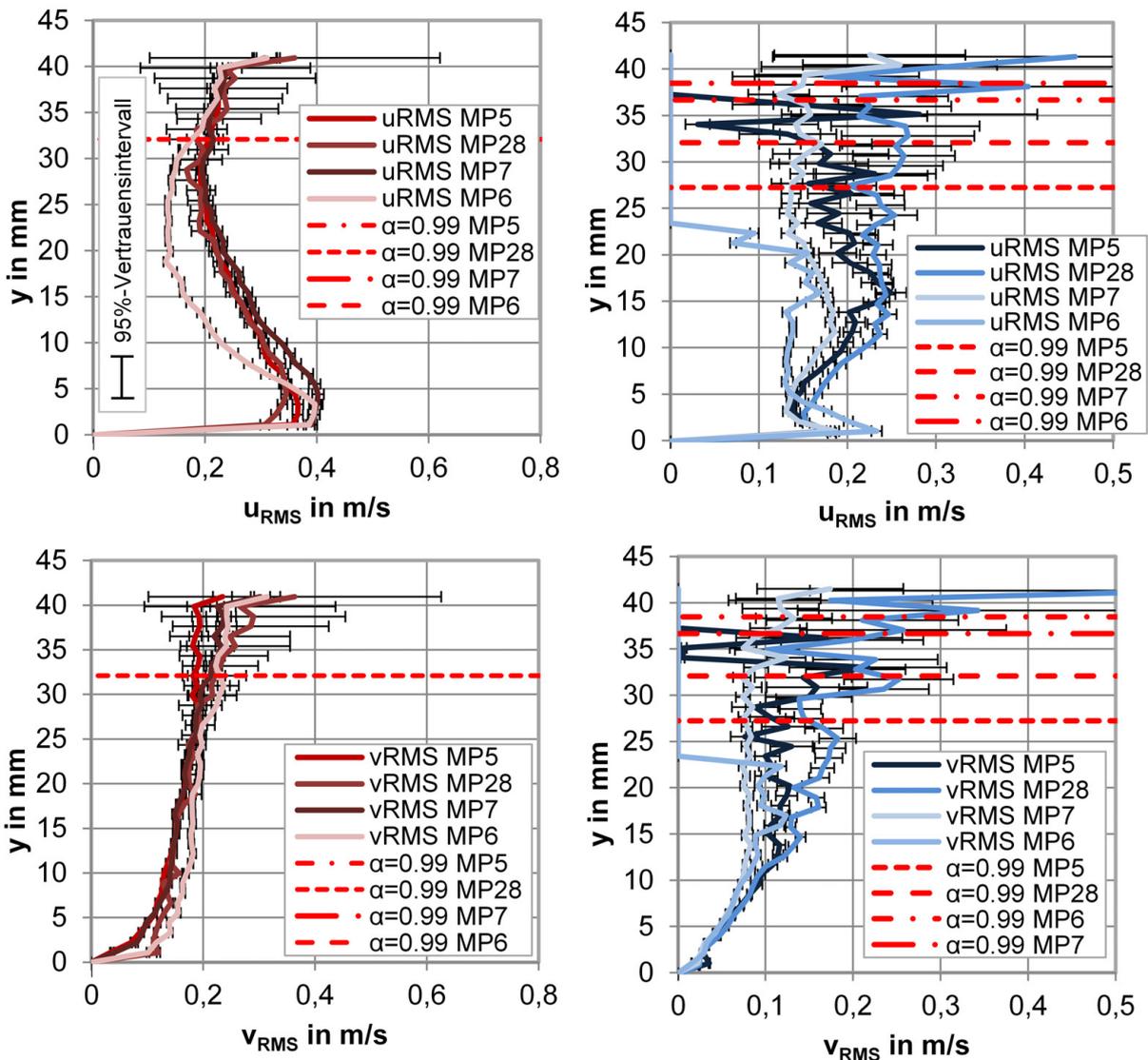


Abbildung 4-37 Geschwindigkeitsschwankungen bei teilweise umgekehrter Strömung und variablem Luftvolumenstrom

Die Messungen an Position 2 zeigen, ebenso wie schon diese an Position 1, eine Geschwindigkeitszunahme bei sinkendem Luftvolumenstrom von Messpunkt 5 zu den Messpunkten 28 und 7. Zwischen Messpunkt 7 und 6 kann dagegen eine Geschwindigkeitsabnahme beobachtet werden. Die Strömung fließt bei allen betrachteten Volumenströmen oberhalb von 25 mm entgegengerichtet zur ursprünglichen Strömungsrichtung. Die Maximalgeschwindigkeiten der Komponente u sind bei allen Messpunkten an Position 2 höher als an Position 1. Die Komponente v weist an Position 2 bei allen Messpunkten kleine negative Werte auf. Diese abwärtsgerichtete Bewegung entsteht als Reaktion auf die aufsteigenden Luftblasen. Die vertikale Geschwindigkeit sinkt mit zunehmender Höhe. Bei Messpunkt 6 tritt an beiden Messpositionen in Bodennähe ein positiver Geschwindigkeitspeak auf. Zwar ist nicht auszuschließen, dass dieser tatsächlich durch eine Fluidbewegung entstanden ist,

beispielsweise durch einen stationären Bodenwirbel, wahrscheinlicher ist jedoch, dass es sich wiederum um einen Messfehler infolge eines optischen Effektes in Wandnähe handelt.

Die Geschwindigkeitsfluktuationen der Komponente u (Abbildung 4-37) weisen an Position 1 im Bereich $0 \text{ mm} < y < 5 \text{ mm}$ einen Grenzschichtpeak auf. Dieser tritt mit einem Wert von $0,23 \text{ m/s}$ besonders ausgeprägt bei Messpunkt 6 in Erscheinung. Die Fluktuationen sinken mit zunehmender Höhe unter $0,12 \text{ m/s}$ und steigen bei allen untersuchten Punkten ab einer Höhe von 5 mm wieder. Bei den Messpunkten 5 und 28 wurden mit $u_{\text{RMS}} > 0,23 \text{ m/s}$ die höchsten Werte im Zweiphasenbereich gemessen. Die Schwankungen der Messpunkte 7 und 6 sind beide geringer als dieser Wert. Die Geschwindigkeitsschwankungen v_{RMS} aller Messpunkte wachsen gleichermaßen entlang der vertikalen Koordinate bis zu einer Höhe von 10 mm über dem Kanalboden. Darüber verlaufen die Profile der Messpunkte, genau wie bei den Geschwindigkeitsprofilen, unterschiedlich. Die höchsten Werte werden bei Messpunkt 28 erreicht, da das Profil weiter bis 25 mm ansteigt. Die Schwankung an den Messpunkten 5, 6 und 7 sind kleiner. Die Vertrauensintervalle der Geschwindigkeitsschwankungen weisen unterhalb der $\alpha=0,99$ -Markierung kleine Beträge auf. Darüber werden durch den niedrigen Phasenanteil schnell große Werte erreicht, so dass die Messwerte nicht mehr als repräsentativ bewertet werden können. Bei Messpunkt 6 steigen die Vertrauensintervalle im Bereich von $0 \text{ mm} < y < 20 \text{ mm}$ monoton mit der vertikalen Koordinate. Darüber schrumpfen sie jedoch wieder. Ursache ist hier nicht ein Rückgang der zufälligen Messfehler, sondern die Tatsache, dass durch Artefakte im Bereich $20 \text{ mm} < y < 25 \text{ mm}$ nur eine sehr geringe Anzahl gültiger Vektoren zur Mittelwertbildung zur Verfügung standen. Dies und der mit $\alpha \approx 0,65$ verhältnismäßig hohe Flüssigkeitsanteil führen zu einem zu kleinen Vertrauensintervall. Oberhalb von 25 mm verschwinden die Vertrauensintervalle, da dort keine gültigen Vektoren mehr ausgewertet und somit auch kein Schwankungswerte mehr bestimmt werden konnten. Eine Fehlerauswertung, die an Stelle einer Abschätzung der Vektoranzahl über den Flüssigkeitsanteil auf der Anzahl der tatsächlich verwendeten Vektoren beruht, würde hier genauere Werte ergeben.

An Position 2 ist der wandnahe Schwankungspeak von u_{RMS} mit Werten bis $0,4 \text{ m/s}$ deutlich größer als an Messposition 1. Die Maximalwerte liegen in diesem Bereich dicht zusammen und unterscheiden sich zwischen den vier Messpunkten um weniger als $0,1 \text{ m/s}$. Dabei werden die höchsten Beträge wie auch bei der Strömungsgeschwindigkeit bei Messpunkt 7 erreicht. Die Geschwindigkeitsfluktuationen sinken bei allen Messpunkten oberhalb von 5 mm deutlich und steigen durch den zunehmenden Impulsaustausch mit der Gasphase oberhalb von $y = 30 \text{ mm}$ wieder an. Die Geschwindigkeitsschwankungen in vertikaler Richtung v_{RMS} steigen, ausgehend von der unteren Wand, bei allen Messpunkten monoton an. Im Vergleich zu Messposition 1 werden allerdings deutlich höhere Werte gemessen. Die Vertrauensintervalle weisen bei den gemessenen Geschwindigkeitsschwankungen nur kleine Werte auf, da überwiegend bei hohem volumetrischen Flüssigkeitsanteil gemessen wurde.

Tropfenphase

Die Tropfenmassenstromdichte wurde bei einem konstanten Wasservolumenstrom von 25 l/min bei drei unterschiedlichen Messpunkten gemessen. Dafür wurde die Nulldrucksonde erneut an den Messpositionen 2 unmittelbar vor dem Teststreckenknick und an Position 4 am oberen Teststreckenende appliziert. Die Ergebnisse dieser Messungen bei den Messpunkten 5, 7 und 28 sind in Abbildung 4-38 zu sehen.

An Messposition 2 nimmt die Flüssigkeitsmassenstromdichte zwischen Messpunkt 5 und 28 trotz abnehmendem Luftmassenstrom zu, da sich durch den geringeren Luftdurchsatz Flüssigkeit in den horizontalen Kanalabschnitt verlagert. Die Massenstromdichten von Messpunkt 5 und 28 unterscheiden sich nur geringfügig. Unter Berücksichtigung der Messunsicherheit kann unterhalb von 40 mm gar kein Unterschied festgestellt werden. Im Bereich $40 \text{ mm} < y < 70 \text{ mm}$ weist das Profil von Messpunkt 28 eine höhere Flüssigkeitsmassenstromdichte auf. Dies ist höchstwahrscheinlich auf die intensiveren Phasenwechselwirkungen bei höheren Luftdurchsätzen zurückzuführen. Es kann jedoch auch hier nicht ausgeschlossen werden, dass ein Teil der Flüssigkeit direkt aus der kontinuierlichen Flüssigphase angesaugt wurde.

An Messposition 4, unmittelbar über dem Wasserleitblech, nimmt der gemessene Tropfen-
volumenstrom mit steigendem Luftvolumenstrom und zunehmender Höhe kontinuierlich zu. Es ergeben sich jedoch unterhalb von 40 mm bei allen betrachteten Messpunkten deutlich kleinere Beträge als an Messposition 2. Die Messunsicherheit der betrachteten Profile nimmt bei allen Messpunkten mit zunehmender Kanalhöhe ab, da die statistische Messwertstreuung dort geringer und zusätzlich die Messunsicherheit durch nicht-isokinetische Strömungsbedingungen am Sondenkopf kleiner ist.

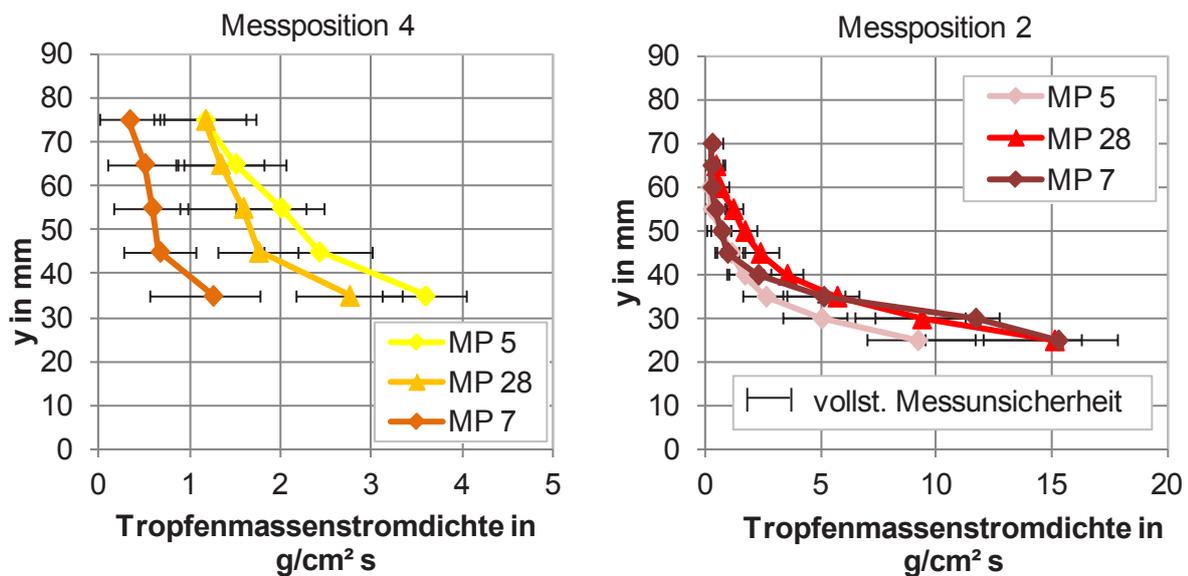


Abbildung 4-38 Tropfen volumenströmdichte bei teilweise umgekehrter Strömung und variablem Luftvolumenstrom

4.5.2. Entwicklung bei variablem Wasservolumenstrom

Neben dem Luftmassenstrom als Haupteinflussgröße hat auch der Wasservolumenstrom einen Einfluss auf die Strömung. Die Strömungskarten (Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12) zeigen zwar, dass die Strömungsform in erster Linie vom Luftmassenstrom abhängt, der Wasservolumenstrom hat dennoch maßgeblichen Einfluss auf die lokalen Strömungsgrößen. Die Tabelle 4.6 genannten Messpunkte 28, 29, 30 und 31 decken bei konstantem Luftvolumenstrom einen Wasservolumenstrombereich von 25 l/min bis 55 l/min ab. Anhand dieser Punkte soll nun das Strömungsverhalten der teilweise umgekehrten Strömung bei variablem Wasservolumenstrom betrachtet werden.

Tabelle 4.6 Strömungsbedingungen bei teilweise umgekehrter Strömung und variablem Wasservolumenstrom

Messpunkt	u_{GS} in m/s	\dot{V}_G l/s	u_{LS} in m/s	\dot{V}_L l/min	Strömungsform
28	14,6	145	0,042	25	teilweise umgekehrte Strömung
29	14,6	145	0,059	35	teilweise umgekehrte Strömung
30	14,6	145	0,075	45	teilweise umgekehrte Strömung
31	14,6	145	0,093	55	teilweise umgekehrte Strömung

Strömungsbild

Die Messpunkte 28 bis 31 liegen, mit einem Luftvolumenstrom von 145 l/s und Wasservolumenströmen zwischen 25 l/min und 55 l/min, zentral im Hysterese-Bereich der Strömungskarte. In Abbildung 4-39 und Abbildung 4-40 sind jeweils vier Bilder des horizontalen Abschnitts von Messpunkt 28 und 31 zu sehen. Die Bilder wurden im Abstand von knapp 0,5 s bei konstanten globalen Strömungsbedingungen aufgenommen. Die Strömung ist an diesen Punkten dreidimensional und stark instationär. Zusätzlich ist darunter die zeitlich gemittelte Phasenverteilung des Messpunktes abgebildet. Die Strömungsbilder der Messpunkte 29 und 30 sind in Anhang D zu sehen.

Messpunkt 28

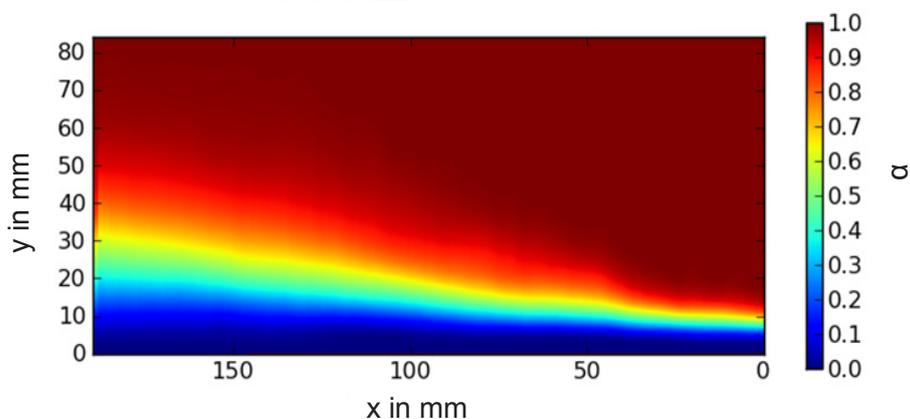
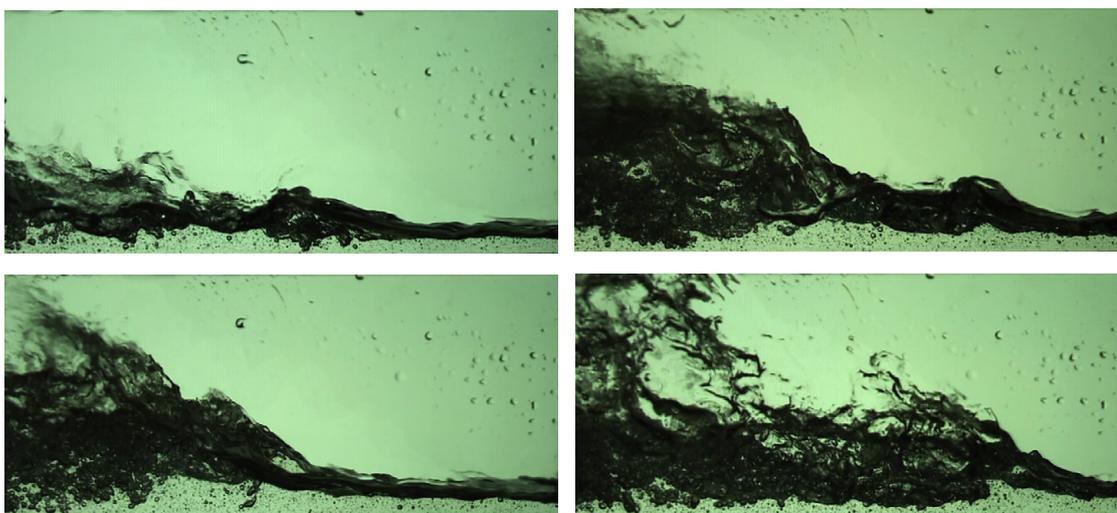


Abbildung 4-39 Strömungsbild bei Messpunkt 28

Das transiente Verhalten der Strömung und die Änderung von Größe und Ort des Zweiphasenbereichs sind bei beiden Messpunkten gut zu erkennen. Selbstverständlich können diese Momentaufnahmen nicht als repräsentativ betrachtet werden, allerdings vermitteln sie einen direkten Eindruck von der Dynamik dieser Strömungszustände.

Bei Messpunkt 28 ändert der Zweiphasenbereich fortwährend seine Größe und nimmt an Messposition 2 zwischen 30% und 80% der Kanalhöhe ein. Die Wasserschicht unter dem Zweiphasenbereich hat auf allen vier Bildern eine Höhe von mindestens 7 mm. Die kontinuierliche Flüssigkeitsschicht ist dabei stets mit Blasen durchsetzt. Es ist zu erkennen, dass die Luftblasen an Position 2 sehr viel größer sind als an Position 1. Dies gilt im Übrigen auch für den Zweiphasenbereich.

Messpunkt 31

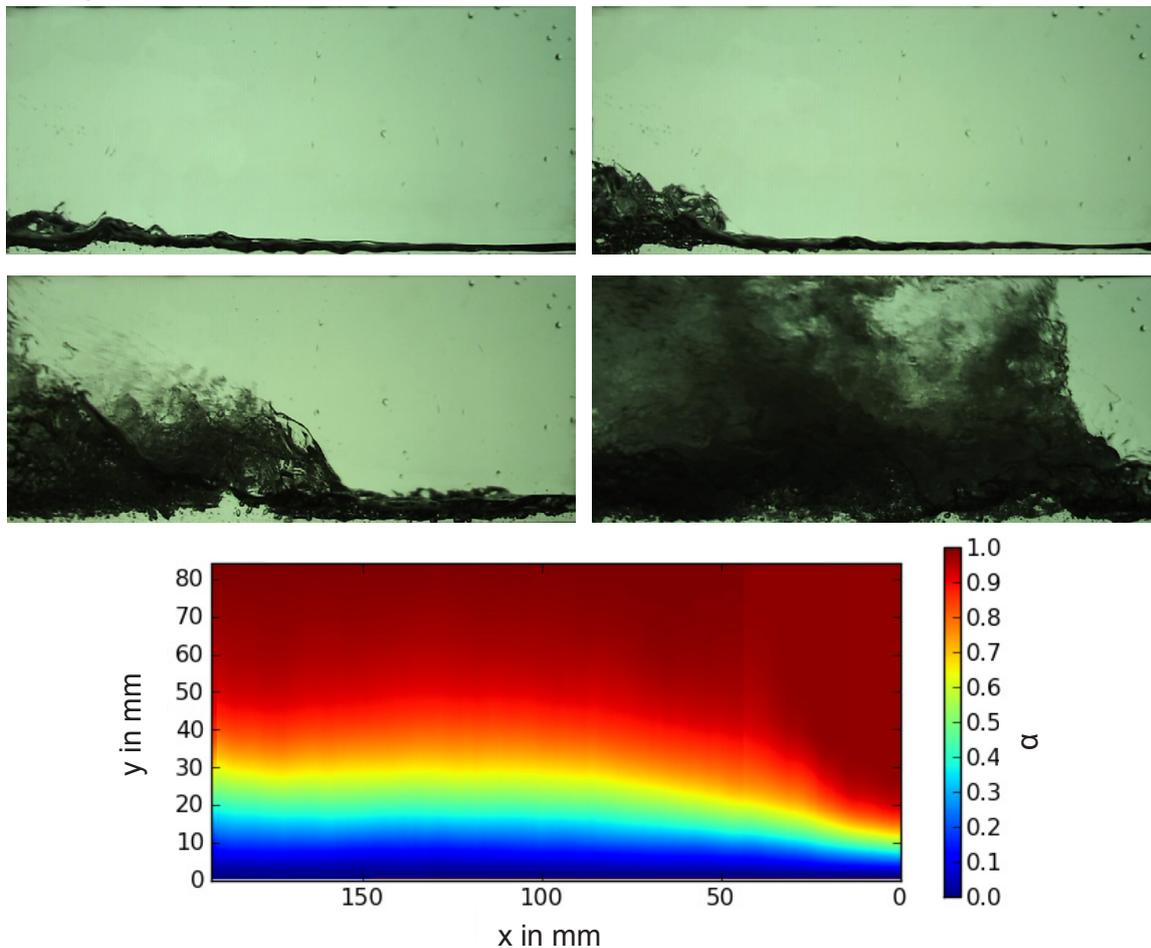


Abbildung 4-40 Strömungsbild bei Messpunkt 31

Die Bilder von Messpunkt 31 zeigen eine noch dynamischere Strömung, bei der sich in Abhängigkeit der Zeit sehr unterschiedliche Strömungsbilder ergeben. Es ist erkennbar, dass sich der hydraulische Sprung bei diesem Messpunkt ständig zwischen dem geneigten und dem horizontalen Kanalabschnitt hin und her verlagert. Dabei entstehen im horizontalen Teil einerseits Strömungszustände, bei denen nur noch ein sehr dünner Wasserfilm am Kanalboden zurückbleibt, und andererseits Zustände, bei denen das Zweiphasengebiet im horizontalen Abschnitt schnell wächst und schließlich fast den ganzen Querschnitt des Kanals einnimmt.

Phasenverteilung

Die Phasenverteilungen der Messpunkte 28, 30 und 31 sind in Abbildung 4-41 zu sehen. Auf die Darstellung von Messpunkt 29 wurde zugunsten der Übersichtlichkeit verzichtet. Die Messwerte sind aber in Anhang D zu finden. Der Vergleich der Profile zeigt, dass sich der Kurvenverlauf mit zunehmendem Wasservolumenstrom immer weiter absenkt. Sie bestätigen damit die Beobachtungen aus den Strömungsbildern. Im Gegenzug zeigt sich jedoch, dass der Zweiphasenbereich im zeitlichen Mittel mit zunehmendem Wasservolumenstrom immer größer wird. Wie beim Vergleich der Kurven von Messpunkt 30 und 31 deutlich wird, wirkt sich dies in erster Linie im Bereich $0,7 < \alpha < 1,0$ aus. Bei Messposition 2 zeigt sich die gleiche Tendenz. Auch hier verschieben sich die Profile mit zunehmendem Wasservolumenstrom immer weiter in Richtung des Kanalbodens. Messpunkt 31 weist dort ebenfalls den größten Zweiphasenbereich auf.

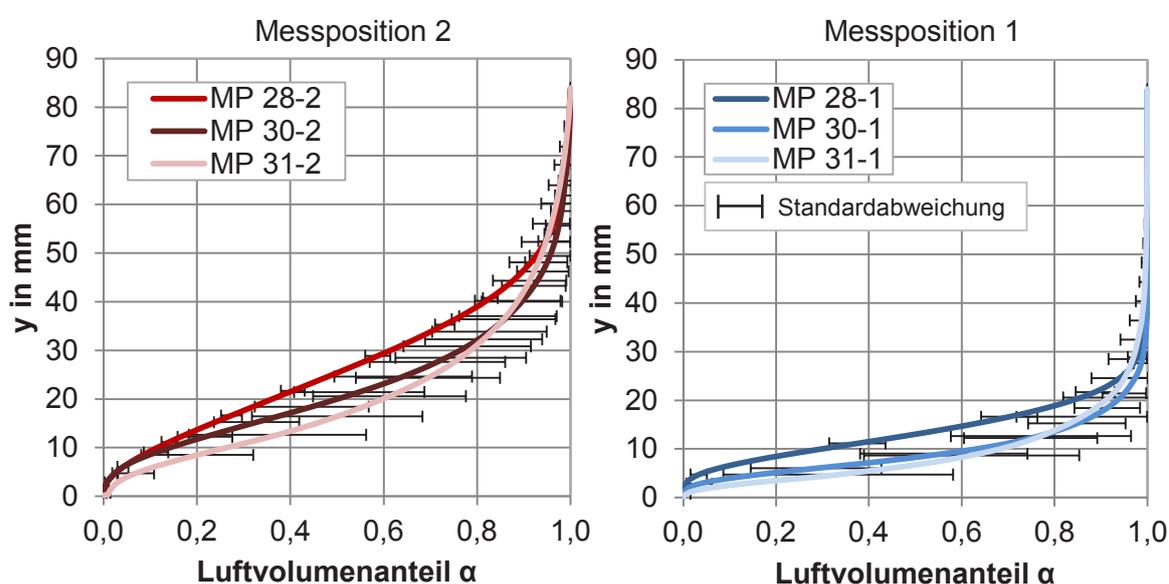


Abbildung 4-41 Phasenverteilung bei teilweise umgekehrter Strömung und variablem Wasservolumenstrom an Messposition 1 und 2

Die zunehmende zeitliche Schwankung der Phasenverteilungen führt außerdem bei höheren Wasservolumenströmen zu größeren Standardabweichungen zwischen den ausgewerteten Bildsequenzen. Dies ist bei den Ergebnissen von beiden Messpositionen gut zu erkennen. Bei der Betrachtung der zeitlich gemittelten Phasenprofile in Abbildung 4-41 ist daher zu beachten, dass die momentane Phasenverteilung zum Teil stark von den dargestellten Mittelwerten abweichen kann.

Gasphase

Das Verhalten der Gasphase an Messposition 0 bleibt bei allen Messpunkten unverändert. Wie in Abbildung 4-42 zu sehen ist, sind die Geschwindigkeiten und Schwankungswerte der Messpunkte 28 und 31 im Rahmen der Messgenauigkeit gleich. Selbiges gilt für die Messpunkte 29 und 30, die wiederum in Anhang D zu finden sind.

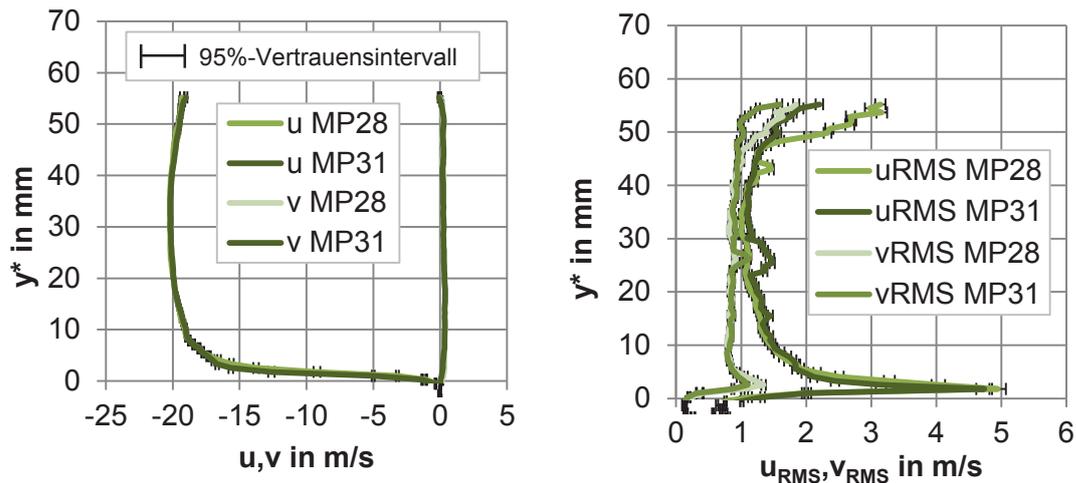


Abbildung 4-42 Luftgeschwindigkeit bei teilweise umgekehrter Strömung und variablem Wasservolumenstrom

Flüssige Phase

Dagegen ändern sich die Bewegungen der flüssigen Phase stark in Abhängigkeit des Wasservolumenstroms. In Abbildung 4-43 sind die Geschwindigkeitsprofile der Komponenten u und v an den Messpunkten 28, 30 und 31 zu sehen. Die Messergebnisse von Messpunkt 29 sind auch bei dieser Betrachtung nicht dargestellt und stattdessen im Anhang zu finden. An Messposition 1 zeigt sich unterhalb von $y = 15$ mm das typische parabelförmige Strömungsprofil einer fließenden Strömung. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Betrag der Komponente u mit zunehmendem Wasservolumenstrom abnimmt und die Höhe des Geschwindigkeitsprofils zudem immer niedriger wird. Die Profile zeigen keine eindeutige Umkehrung der Strömungsrichtung. Die Messwerte oberhalb von 15 mm weisen zwar überwiegend negative Vorzeichen auf, aber die Vertrauensintervalle wachsen oberhalb dieser Position so stark an, dass die gemessenen Geschwindigkeiten nicht mehr als repräsentativ betrachtet werden können.

Wie schon in den Strömungsbildern zu sehen ist, liegt die Ursache dieser stark anwachsenden Messunsicherheit in dem niedrigen Flüssigkeitsanteil, der bei gleichzeitig hohem Fluktuationsniveau zu großen Vertrauensintervallen führt. Die Messunsicherheit der senkrechten Geschwindigkeitskomponente steigt ebenso oberhalb von 17 mm schnell an. Die Geschwindigkeitsprofile der dargestellten Punkte zeigen, dass im zeitlichen Mittel im Bereich $0 \text{ mm} < y < 17 \text{ mm}$ nahezu keine vertikalen Fluidbewegungen stattfinden.

Sinkende Maximalgeschwindigkeiten in Hauptströmungsrichtung lassen sich auch an Messposition 2 unmittelbar vor dem unteren Knick des Kanals beobachten. Wie schon aus den Phasenverteilungen in Abbildung 4-41 hervorgeht, ist der mittlere Flüssigkeitsanteil dort höher, so dass Geschwindigkeitsmessungen in der kontinuierlichen Flüssigkeitsphase bis zu einer Höhe von etwa 30 mm möglich sind. Im Vergleich zeigt sich erneut, dass zwischen den Messpositionen eine signifikante Verzögerung der Fließgeschwindigkeit stattfindet, der auf die Phasenwechselwirkungen zurückzuführen ist. Mit zunehmendem Wasservolumenstrom, und daher sinkender Maximalgeschwindigkeit, nimmt dieser Effekt allerdings ab. Während der Geschwindigkeitsunterschied bei Messpunkt 28 noch über 0,1 m/s beträgt, weist Messpunkt 31 nur noch eine Differenz von weniger als 0,02 m/s auf. Die Wasserlieferungsrate sinkt also trotz steigender eingespeister Wassermenge. Die Strömungsumkehr ist bei allen drei Messpunkten an Messposition 2 bei etwa 23 mm zu sehen. Oberhalb dieser

Koordinaten verlaufen alle Geschwindigkeitsprofile, im Rahmen der Messgenauigkeit, gleich. Die Geschwindigkeitskomponente v weist auch bei zunehmendem Wasservolumenstrom negative Werte an Position 2 auf. Allerdings verdeutlichen die Ergebnisse der Messpunkte 30 und 31, im Vergleich zu 28 und 29, die geringeren abwärts gerichteten Geschwindigkeiten. Die Strömungsbilder weisen darauf hin, dass die Verlagerung des Gebiets mit den stärksten Phasenwechselwirkungen in den geneigten Teil des Kanals dazu führt, dass der Einfluss der dispersen Gasphase reduziert wird.

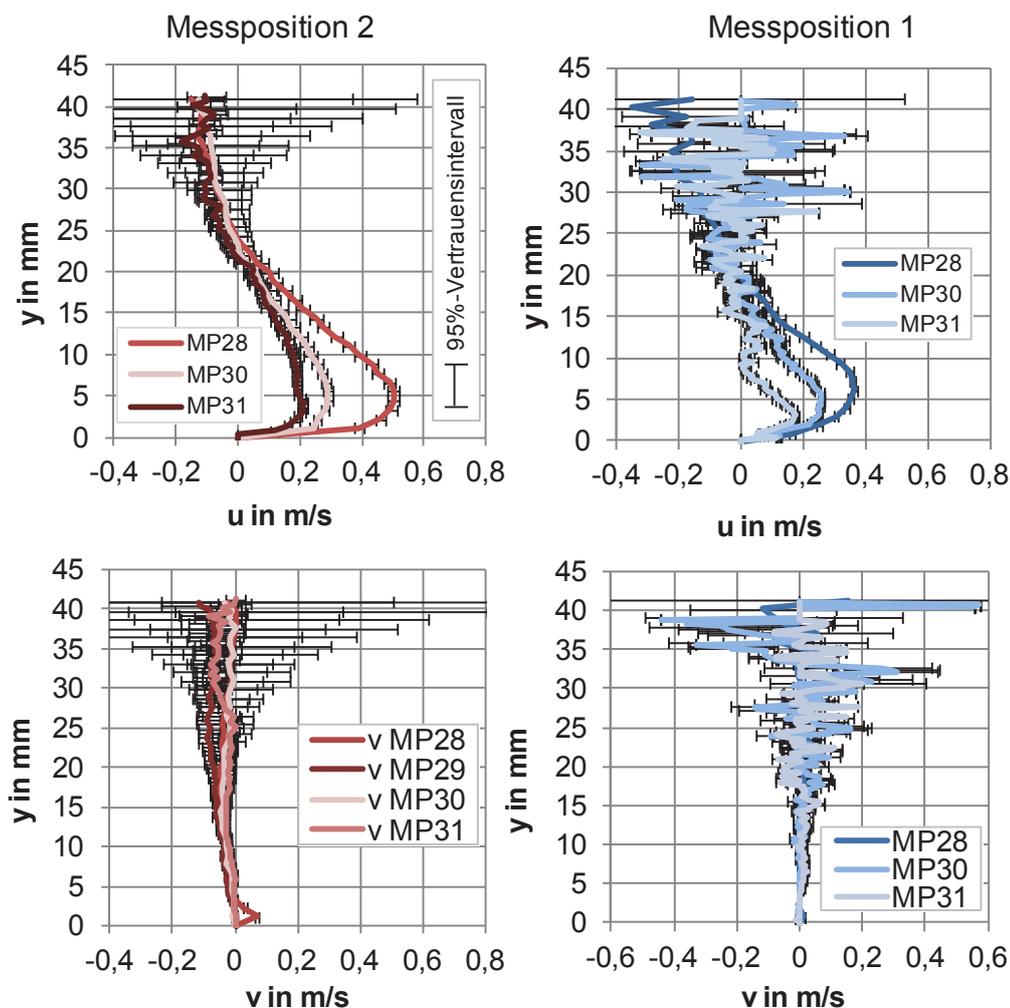


Abbildung 4-43 Wassergeschwindigkeit bei teilweise umgekehrter Strömung und variablem Wasservolumenstrom

Die Geschwindigkeitsschwankungen u_{RMS} (Abbildung 4-44) zeigen bei Messpunkt 28 an beiden Messpositionen ein Maximum im Bereich der unteren Wand und des oberen Zweiphasenbereichs. Bei den Messpunkten 30 und 31 ist dieser Peak hingegen nicht zu sehen. Dies deutet darauf hin, dass sich mit zunehmendem Wasservolumenstrom eine Entwicklung von einer gerichteten Strömung mit Grenzschicht im wandnahen Bereich zu einer homogen durchmischten Strömung mit fast konstantem Fluktuationniveau entwickelt. Die Geschwindigkeitsschwankung v_{RMS} verläuft monoton mit der Höhe steigend. An Messposition 2 ist im Bereich $0 \text{ mm} < y < 20 \text{ mm}$ ein leichter Rückgang zu sehen. Aufgrund des niedrigen Phasenanteils wachsen die Vertrauensintervalle bei Messposition 1 ab 20 mm und bei Messposition 2 ab 30 mm stark an, so dass die Werte oberhalb nicht mehr als repräsentativ betrachtet werden können. Messpunkt 29 wurde auch hier zugunsten der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

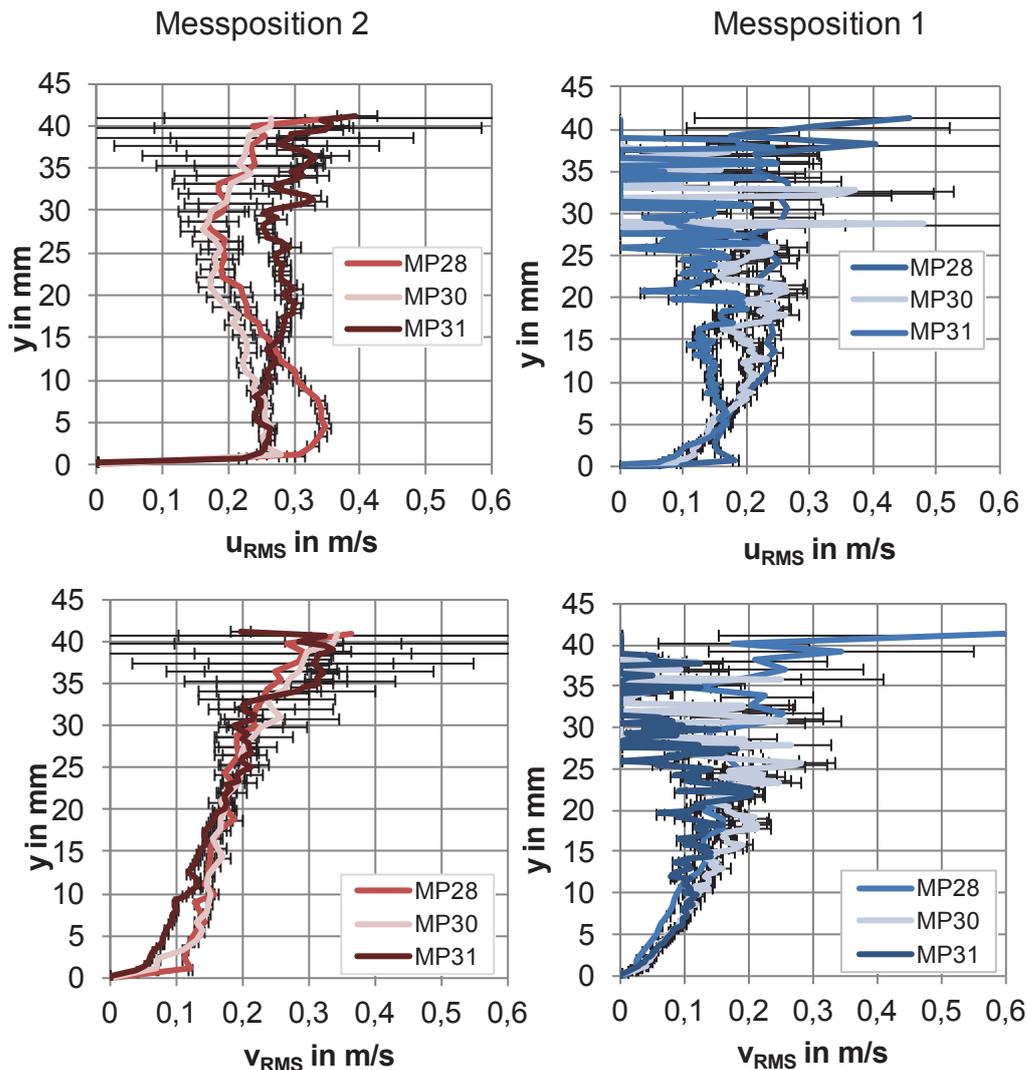


Abbildung 4-44 Geschwindigkeitsfluktuation der flüssigen Phase bei teilweise umgekehrter Strömung und variablem Wasservolumenstrom

Tropfenmassenstromdichte

Die Änderung der Phasenwechselwirkungen mit zunehmendem Wasservolumenstrom wirken sich auch auf die Tropfenentstehungsrate beziehungsweise Tropfendepositionsrates aus. In Abbildung 4-45 sind die Ergebnisse der Sonden-Messungen an Messposition 2 und 4 zu sehen, die an Messpunkt 28 und Messpunkt 30 durchgeführt wurden. Die Profile von Position 2 zeigen eindeutig einen Rückgang der Tropfenmassenstromdichte mit zunehmendem Wasservolumenstrom.

Dies erscheint zunächst unerwartet, da die Geschwindigkeitsmessungen eine sinkende Wasserlieferungsrate von Messpunkt 28 nach Messpunkt 30 erwarten lässt. Der Rückgang kann jedoch durch die zeitweise Verlagerung des hydraulischen Sprungs in den geneigten Teil des Versuchskanals erklärt werden. Dies führt dazu, dass ein Großteil der Tropfen bei Messpunkt 30 schon oberhalb von Messposition 2 entsteht, was zu einer sinkenden Tropfenmassenstromdichte an dieser Stelle führt. Die Ergebnisse von Position 4 unterstützen diese Vermutung. Die Messergebnisse vom oberen Ende der Teststrecke zeigen eine deutliche Zunahme der Tropfenvolumenstromdichte bei steigendem Wasservolumenstrom.

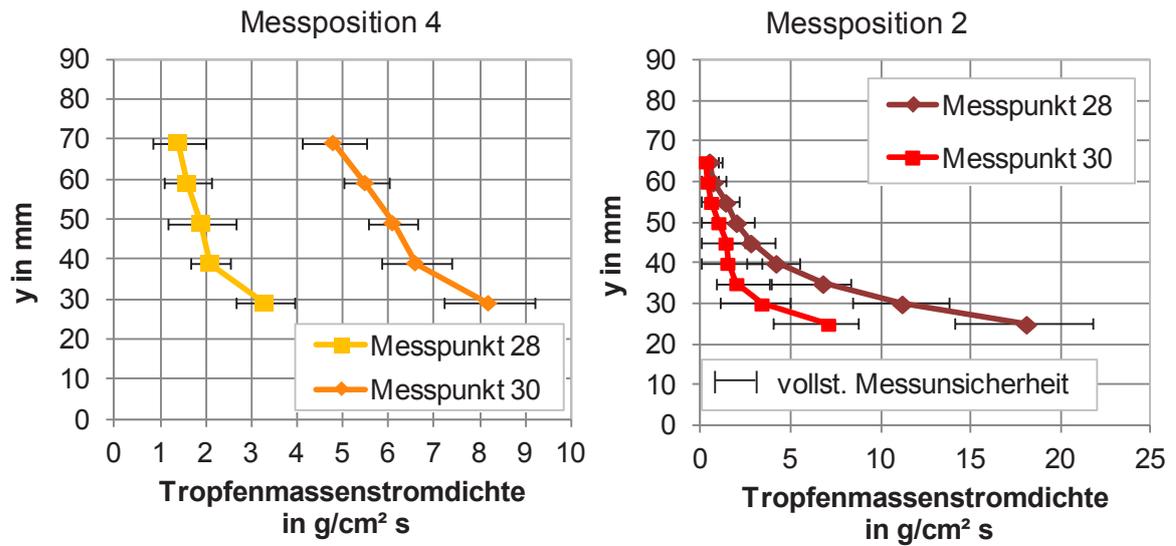


Abbildung 4-45 Tropfenmassenstromdichte bei teilweise umgekehrter Strömung und variablem Wasservolumenstrom

5. Zusammenfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung von entgegengerichteten, geschichteten Zweiphasenströmungen mit Tropfenablösung in einem Strömungskanal. Ziel der Untersuchungen war es, die in diesen Strömungen auftretenden Phänomene in einer definierten Kanalgeometrie zu erzeugen und mit lokal hochauflösenden Messmethoden zu untersuchen. Dabei wurden die wesentlichen Merkmale der Strömung, Strömungsformen und auftretende Phänomene, identifiziert und beschrieben. Außerdem wurde ein umfangreicher Datensatz angelegt, der als Basis für die Modellierung und die Validierung numerischer Codes, insbesondere für CFD-Codes in Dreifluid-Formulierung, verwendet werden kann.

Die Arbeit umfasst in erster Linie die Untersuchung mehrerer Strömungsformen, insbesondere von schießender Strömung mit und ohne Tropfenablösung, sowie teilweise und vollständig umgekehrte Strömungen. Zu diesem Zweck wurde die WENKA-Anlage am Karlsruher Institut für Technologie¹ mit einem neuen Knickkanal ausgerüstet. Dieser verfügt über einen rechteckigen Querschnitt und ist zur Vermeidung von parasitären Effekten an den Einströmöffnungen mit Strömungsleitblechen ausgerüstet, die die Fluide vor und nach der Teststrecke separieren. Die Anlage arbeitet unter atmosphärischen Bedingungen mit Luft und Wasser. Vorteil der gewählten Kanalgeometrie ist, dass ein eventuell vorhandener hydraulische Sprung und das Gebiet der stärksten Phasenwechselwirkungen, durch den intensiven Impulsaustausch zwischen den Phasen in der Umlenkung, in einem großen Parameterbereich ortsfest gehalten werden können. Der neue Knickkanal wurde im Bereich der Teststrecke an allen Seiten mit Fenstern und Zugängen für intrusive Messmethoden ausgestattet. Die instationären Strömungszustände, bei teilweise umgekehrter Strömung, machten es außerdem nötig, die Steuerungs- und Datenerfassungsprogramme sowie die Regelung des Gebläses vollständig zu überarbeiten, um sie an die Messaufgaben anzupassen. Die Auswahl der Messverfahren orientierte sich zum einen an den Erfahrungen aus den beiden vorangegangenen Arbeiten von M. Gargallo [19] und T. Stäbler [62] und zum anderen an den neuen Erfordernissen, die bei der Untersuchung der Tropfenablösung am neuen Knickkanal entstanden sind. Das Messziel bestand in der Ermittlung der zeitlich gemittelten volumetrischen Phasenverteilung, der Geschwindigkeitsverteilungen, der turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen sowie der Tropfenmassenstromdichte.

Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsfluktuation wurden mit Particle Image Velocimetry (PIV) gemessen. Dabei konnte teilweise auf das zweidimensionale Messsystem aus der Arbeit von Stäbler zurückgegriffen werden. Bei den Messungen in der flüssigen Phase wurden, zur Vermeidung von Artefakten durch Laser-Reflexionen, an den Phasengrenzflächen fluoreszieren Tracer eingesetzt. Dieses als Fluorescent Particle Image Velocimetry (FPIV) bekannte Messverfahren konnte in Ermangelung geeigneter Tracer nicht für die Messungen in der Gasphase eingesetzt werden. In der Gasphase wurde daher mit herkömmlichen Öl-Tracern gemessen. Deshalb konnte bei Messpunkten, bei denen große Wellen oder Tropfenablösungen auftraten, nur in den einphasig durchströmten Kanalabschnitten gemessen werden. Die Auswertung der Geschwindigkeitsmessungen erwies sich teilweise als schwierig, da das hohe Fluktuationsniveau einiger Strömungs-

¹Institute for Nuclear and Energy Technologies (IKET)

zustände eine Trennung des zufälligen Messfehlers von den physikalisch begründeten Geschwindigkeitsschwankungen teilweise unmöglich machten. Um dennoch belastbare Messergebnisse zu erhalten, wurde der Mittelwertbildung bei allen Messungen eine vergleichsweise hohe Anzahl von 1500 Doppelbildern zugrunde gelegt.

Für die Messungen der Tropfenmassenstromdichte konnte aufgrund der zu untersuchenden dichten Tropfenströmungen nicht auf ein optisches Messverfahren zurückgegriffen werden. Daher wurde eine Nulldrucksonde entwickelt, die eine isokinetische Probestromentnahme ermöglicht. Wie bei Nulldrucksonden üblich, wird die disperse Flüssigphase von der Gasphase abgeschieden und getrennt quantifiziert. Im Rahmen der Fehlerbetrachtung konnte anhand von einphasig durchgeführten PIV-Messungen isokinetische Entnahmebedingungen an der Entnahmestelle nachgewiesen werden. Neben verschiedenen anderen Fehlerquellen konnte auch der Einfluss des parasitären Verdrängungsquerschnitts der Entnahmesonde ermittelt und in die Fehlerangaben mit einbezogen werden.

Die Phasenverteilungen wurden mit einem neuen optischen Verfahren gemessen, das ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde. Es zeichnet sich durch einen verhältnismäßig einfachen Messaufbau aus und liefert dabei ohne Einbauten in den Strömungskanal eine hochaufgelöste, zweidimensionale Phasenverteilung eines kompletten Kanalabschnitts. Für die Messung werden im Schattenverfahren mehrere Aufnahmen der Schichtenströmung erzeugt, die einer zweidimensionalen mathematischen Projektion des gesamten Zweiphasengebiets entsprechen. Aufgrund von Brechung und Reflexion erscheint der Zweiphasenbereich darauf dunkler als kontinuierliche Fluide. Nach der Bildaufbereitung, bei der in erster Linie Artefakte entfernt werden, wird durch die Überlagerung vieler Schattenbilder eine zeitliche Mittelung erstellt, die die Wahrscheinlichkeit wiedergibt, mit der sich an einer Stelle das Zweiphasengebiet befindet. Die gerichtete Integration dieses Bildes, aus der Flüssigkeit in die Gasphase, ergibt nach Normierung die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Gasphase an einer Stelle befindet. Dies gilt unter der Annahme, dass sich Flüssigkeit am Kanalboden und nur Gas am oberen Bildrand befindet. Die Messung ergibt damit die zeitlich gemittelte Phasenverteilung im gesamten Bildausschnitt. Die Messmethode wurde anhand von Vergleichsmessungen mit einer Kontaktsonde validiert. Dabei ergab sich zwischen den beiden Messmethoden eine mittlere Abweichung von 8,6%.

Für die Charakterisierung des Knickkanals und der modifizierten Anlage wurde die Strömung mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen untersucht und für steigende sowie für sinkende Luftvolumenströme jeweils eine dimensionsbehaftete Strömungskarte erstellt. Dabei fällt besonders auf, dass die Grenzen, innerhalb derer eine teilweise umgekehrte Strömung beobachtet werden kann, eine enorme Hysterese aufweisen. Neben der Identifizierung der vier verschiedenen Strömungsformen konnten anhand der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen auch mehrere unterschiedliche Typen der Tropfenentstehung in schießender Strömung identifiziert und zugeordnet werden. Die Strömungskarten dienen außerdem als Vorlage für eine Messmatrix. Diese enthält 31 Messpunkte, anhand derer die Strömung an jeweils bis zu vier Messpositionen, mit den zuvor beschriebenen Messmethoden, systematisch untersucht wurde.

Die Messergebnisse zeigen, wie intensiv die Fluide gegenseitigen Einfluss aufeinander nehmen. Bei schießender Strömung fließt ein dünner Wasserfilm am Kanalgrund entlang. An der Phasengrenzfläche sind dann kleine Kapillarwellen zu sehen. Aufgrund des Impulsaustausches mit der Luft ist in Strömungsrichtung eine geringe Verzögerung des Wasserfilms zu beobachten. Die Profile der Geschwindigkeitsschwankungen u_{RMS} und v_{RMS}

zeigen Maximalwerte im Bereich der Wandgrenzschicht am Kanalboden und unterhalb der Phasengrenzfläche. Die Messergebnisse belegen den anisotropen Charakter der Turbulenz in dieser Strömung. Zunehmende Luftgeschwindigkeiten verstärken die Verzögerung und führen zu einem steigenden Wasserfilm. Bei schießender Strömung kann auch die Ablösung einzelner Tropfen beobachtet werden. Die Luftströmung formt Flüssigkeitsligamente aus den Wellen, die dann in Tropfen zerfallen. Die Variation des Wasservolumenstroms führt dazu, dass Fließgeschwindigkeit und Wasserfilmdicke mit dem Wasservolumenstrom zunehmen, wobei die Geschwindigkeitsschwankungen nahezu konstant bleiben.

Auch die Untersuchungen der teilweise umgekehrten Strömungen ergaben ein umfassendes Bild dieser instationären und dreidimensionalen Strömungsform. Sie tritt auf, wenn sich eine Rollwelle bei hohem Luftvolumenstrom auf der schießenden Strömung stabilisieren kann. Die Rollwelle bewegt sich dann, getrieben durch die Luftströmung, entgegen der eigentlichen Wasserfließrichtung und nimmt dabei stetig an Volumen zu, bis sich ein hydraulischer Sprung entwickelt. Die sich daraus entwickelnde fließende Strömung beinhaltet Kapillarwellen, Schwerewellen und die Entstehung von Tropfen und Blasen. Die Strömung weist einen großen Zweiphasenbereich auf. Die Tropfenentstehung verläuft deutlich komplexer als bei den schießenden Strömungszuständen. Da sich im Zweiphasengebiet verschiedene Tropfenentstehungsmechanismen überlagern, kann häufig die Ablösung von großen Flüssigkeitsligamenten und Schaumstrukturen beobachtet werden. Anhand der Messergebnisse lässt sich sowohl bei Erhöhung der Luft- wie auch des Wasservolumenstroms eine deutliche Zunahme der Tropfenmassenstromdichte beobachten. Durch den Lufteintrag am hydraulischen Sprung entsteht außerdem eine disperse Gasphase, deren Einfluss auf die Strömung nicht zu vernachlässigen ist. Besonders erwähnenswert ist, dass eine blasendurchsetzte Flüssigkeitsströmung ein größeres Volumen einnimmt und dabei eine geringere mittlere Dichte aufweist. Bei niedrigem Luftvolumenstrom bleibt die Strömungsform zunächst unverändert, da der hohe Flüssigkeitspegel im horizontalen Teststreckenabschnitt die Gasströmung zu einer höheren Strömungsgeschwindigkeit zwingt. Der so entstehende intensivere Impulsaustausch stabilisiert diese Strömungsform bis zu sehr niedrigen Luftvolumenströmen (Hysterese).

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit gewonnenen Ergebnisse ergänzen die bisherigen Erkenntnisse zu entgegengerichteten, geschichteten Zweiphasenströmungen um einen umfangreichen Datensatz an experimentellen Ergebnissen. Erstmals wurden neben zeitlich gemittelten Geschwindigkeitsprofilen und Geschwindigkeitsfluktuationen auch zweidimensionale Phasenverteilungen, sowohl bei schießenden wie auch in teilweise umgekehrten Strömungszuständen, gemessen. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen der Tropfenmassenstromdichte erweitern die Datenbasis zur Validierung von CFD-Codes nun auch auf das Gebiet entgegengerichteter Schichtenströmungen mit Tropfenablösung. Die Untersuchungen zur Phänomenologie der Tropfenablösung geben Aufschluss über die ablaufenden Teilprozesse. Damit ergibt sich nun ein umfassendes Bild dieser komplexen Zweiphasenströmungen. Die Arbeit trägt somit zur Erweiterung des Verständnisses entgegengerichteter, geschichteter Zweiphasenströmungen bei und unterstützt damit die Entwicklung neuer, umfassender und physikalisch fundierter Rechenmodelle.

6. Literaturverzeichnis

1. Abbott, C.E.: A Survey of Waterdrop Interaction Experiments, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Band 15, 363-374, 1977
2. Al Issa, S.; Macian, R.: A review of CCFL Phenomenon, *Annals of Nuclear Energy*, 38, 1795-1819, 2011
3. Baer, H.D.; Stephan, K.: *Heat and Mass Transfer*, Springer Verlag, Berlin, 1998
4. Bankoff, S.; Lee, S.C.: A Critical Review of the Flooding Literature, *Multiphase Science and Technology* 2, 95-180, 1986
5. Bankoff, S.G.; Lee, S.C.: Flooding and hysteresis effects in nearly horizontal countercurrent stratified steam-water flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 30, 581-588, 1987
6. Ben Hadj Ali, A.; Laurien, E.: Three-Fluid Model for the Simulation of Counter-Current Two-Phase Flow, *Proc. Int. Conf. Advances on Nuclear Power Plants, ICAPP'12, Chicago, USA, 24.-28. Juni, 2012*
7. Berthold, J.W.; Reed, S.E.; Nash, C.A.: Fibre Optic sensor system for void fraction measurement in aqueous two-phase fluids, *Flow Measurement and Instrumentation*, Band 5, 3-13, 1994
8. Brackmann, U.: *Lambdachrome® Laser Dyes Data Sheets*, 2nd revised Edition, Lambda Physik Lasertechnik, Göttingen, 1985
9. Choi, K. Y.; No, H.C.: Experimental Studies of Flooding in Nearly Horizontal Pipes, *Int. J. Multiphase flows*, 21, 419-436, 1995
10. Clift, R.; Grace, J.R.; Weber, M.E.: *Bubbles Drops and Particles*, Academic Press, New York, 1978
11. Coleman, H. W.; Steel JR, W.G.: *Experimentation and uncertainty analysis for engineers*, John Wiley & Sons, New York, 1989
12. De Bertodano, M.L.: Countercurrent Gas-Liquid Flow in a Pressurized Water Reactor Hot Leg, *Nuclear Science and Engineering*, 117, 126-133, 1994
13. Deendarlianto; Vallée, C.; Lucas, D.; Beyer, M.; Pietruske, H.; Carl, H.: Experimental study on the air/water counter-current flow limitation in a model of the hot leg of a pressurized water reactor, *In: Nuclear Engineering and Design*, 238, 3389-3402, 2008
14. De Sampiano, P.A.B; Faccini, J.L.H.; Su, J.: Modeling of stratified gas-liquid two-phase flow in horizontal circular pipes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 2752-2761, 2008
15. Drew, D.A.: Mathematical Modeling of Two-Phase Flow, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 15, 261-291, 1983

16. Dukler, A.E.; Taitel, Y.: Flow Pattern Transitions in Gas-Liquid Systems: Measurement and Modeling, *Multiphase Science and Technology*, 2, 1-93, 1986
17. Eschrich, R.: Die Probestromentnahme zur Bestimmung der dispersen Phase in einer Zweiphasenströmung / Wissenschaftlich-Technische Berichte, Forschungszentrum Rossendorf FZR-281, 1999
18. Gargallo, M.; Schulenberg, T.; Meyer, L.; Laurien, E.: Counter-current flow limitations during hot leg injection in pressurized water reactors, *Nuclear Engineering and Design*, 235, 785-804, 2005
19. Gargallo Gallego, M.: Countercurrent Flow Limitations in Horizontal Stratified Flows of Air and Water, *Scientific Reports FZKA 7018*, Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, 2004
20. Guo Jia-Hong; Dai Shi-Qiang: Research on stability of liquid film on hot solid surface impinged by small droplets, *Journal of Hydrodynamics, Ser.B*, 19, 264-271, 2007
21. Hampel, U.; Speck, M.; Koch, D.; Menz, H.-J.; Mayer, H.-G.; Fietz, J.; Hoppe, D.; Schleicher, E.; Zippe, C.; Prasser, H.-M.: Experimental ultra fast X-ray computed tomography with a linearly scanned electron beam source, *Flow Measurement and Instrumentation*, 16, 65-72, 2007
22. Hanratty, T. J.; Hershman, A.: Initiation of Roll Waves, *A.I.Ch.E. Journal*, 7, 488-497, 1961
23. Hashmi, A.A.: Oil Film Dynamics in Aero Engine Bearing Chambers – Fundamental Investigations and Numerical Modelling, *Dissertation, Logos-Verlag, Forschungsbericht des ITS, Band 50*, 2012
24. Hsiang, L.-P.; Faeth, G.M.: Drop Deformation and Breakup due to shock wave and steady disturbances, *International Journal of Multiphase Flow*, 21, 545-560, 1994
25. Ishii, M.; Grolmes, M.A.: Inception Criteria for Droplet Entrainment in Two-Phase Concurrent Film Flow, *A.I.Ch.E Journal*, 21, 308-318, 1975
26. Jaworek, A.; Krupa, A.: Phase-shift detection for capacitance sensor measuring void fraction in two-phase flow, *Sensors and Actuators A*, 160, 78-86, 2010
27. Jähne, B.: *Digitale Bildverarbeitung*, 6. Auflage, Springer, Heidelberg, 2005
28. Jirka, G.H.; Lang, C.: *Einführung in die Gerinnehydraulik*, Universitätverlag Karlsruhe, Karlsruhe, 2009
29. Johansen, G.A.; Hampel, U.; Hjiertaker, B.T.: Flow imaging by high speed transmission tomography, *Applied Radiation and Isotopes*, 68, 518-524, 2010
30. Kadri, U.; Mudde, R.F.; Oliemans, R.V.A.; Bonizzi, M.; Andreussi, P.: Prediction of the transition from stratified to slug flow or roll-waves in gas-liquid horizontal pipes, *International Journal of Multiphase Flow*, 35, 1001-1010, 2009

31. Kaiser, F.: Experimentelle Untersuchung der Geschwindigkeits und Phasenverteilung in einer geschichteten Zweiphasenströmung, Diplomarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Kern- und Energietechnik (IKET), 2012
32. Kaene, R.D.; Adrian, R.J.: Theory of cross-correlation analysis of PIV images. *Journal of Applied Scientific Research*, 49, 191-215, 1992
33. Kataoka, I.; Ishii, M.; Nakayamac, B. A.: Entrainment and Desposition Rates of Droplets in Annular Two-Phase Flow, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 1573–1589, 2000
34. Kriegseis, J.: Performance Characterization and Quantification of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators, Dissertation, RWTH-Aachen, Aachen, 2011
35. Kumara, W.A.S.; Elseth, G.; Halvorsen, B.M.; Melaaen, M.C.: Comparison of Particle Image Velocimetry and Laser Doppler Anemometry Measurement Methods applied to the Oil-Water Flow in Horizontal Pipe, *Flow Measurement and Instrumentation*, 21, 105-117, 2010
36. Lahey Jr., R.T.; Drew, D.A: The analysis of two-phase flow and heat transfer using a multidimensional, four field, two fluid model, *Nuclear Engineering and Design*, 204, 29-44, 2001
37. Laurien, E.; Oertel jr., H.: *Numerische Strömungsmechanik: Grundgleichungen und Modelle – Lösungsmethoden – Qualität und Genauigkeit*, 4. Auflage, Vieweg und Teubner, Wiesbaden, 2011
38. Lee, S.C.; Bankoff, S.G.: Stability of Steam-Water Countercurrent Flow in an Inclined Channel: Flooding, *Journal of Heat Transfer*, 105, 713-719, 1983
39. Lee, E.H.: Freezing technique for measuring and predicting the size of droplets in a horizontal annular flow, *Nuclear Engineering and Design*, 240, 1795-1802, 2010
40. Lighthill, M.J.; Whitham, G.B.: On kinematic waves flood movement in long rivers, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 229, 1178, 281-316, 1955
41. Löffler-Mang, M.: *Optische Sensorik*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012
42. Mandhane, J.M.; Gregory, G.A.; Aziz, K.: A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes, *International Journal of Multiphase Flow* 1, 537–553, 1974
43. Mayinger, F.; Weiss, P.; Wolfert, K.: Two-phase flow phenomena in full-scale reactor geometry, *Nuclear Engineering and Design*, 145, 47-61, 1993
44. Mayinger, F.; Feldmann, O.: *Optical Measurements, Techniques and Applications*, Springer, Heidelberg, 139-152, 2001
45. Minami, N.; Nishiwaki, D.; Nariai, T.; Tomiyama, A.; Murase, M.: Countercurrent Gas-Liquid Flow in a PWR Hot Leg under Reflux Cooling (1) Air-Water Tests for 1/15-Scale Model of a PWR Hot Leg , *Journal of Nuclear Science and Technology*, 47, 142-148, 2010

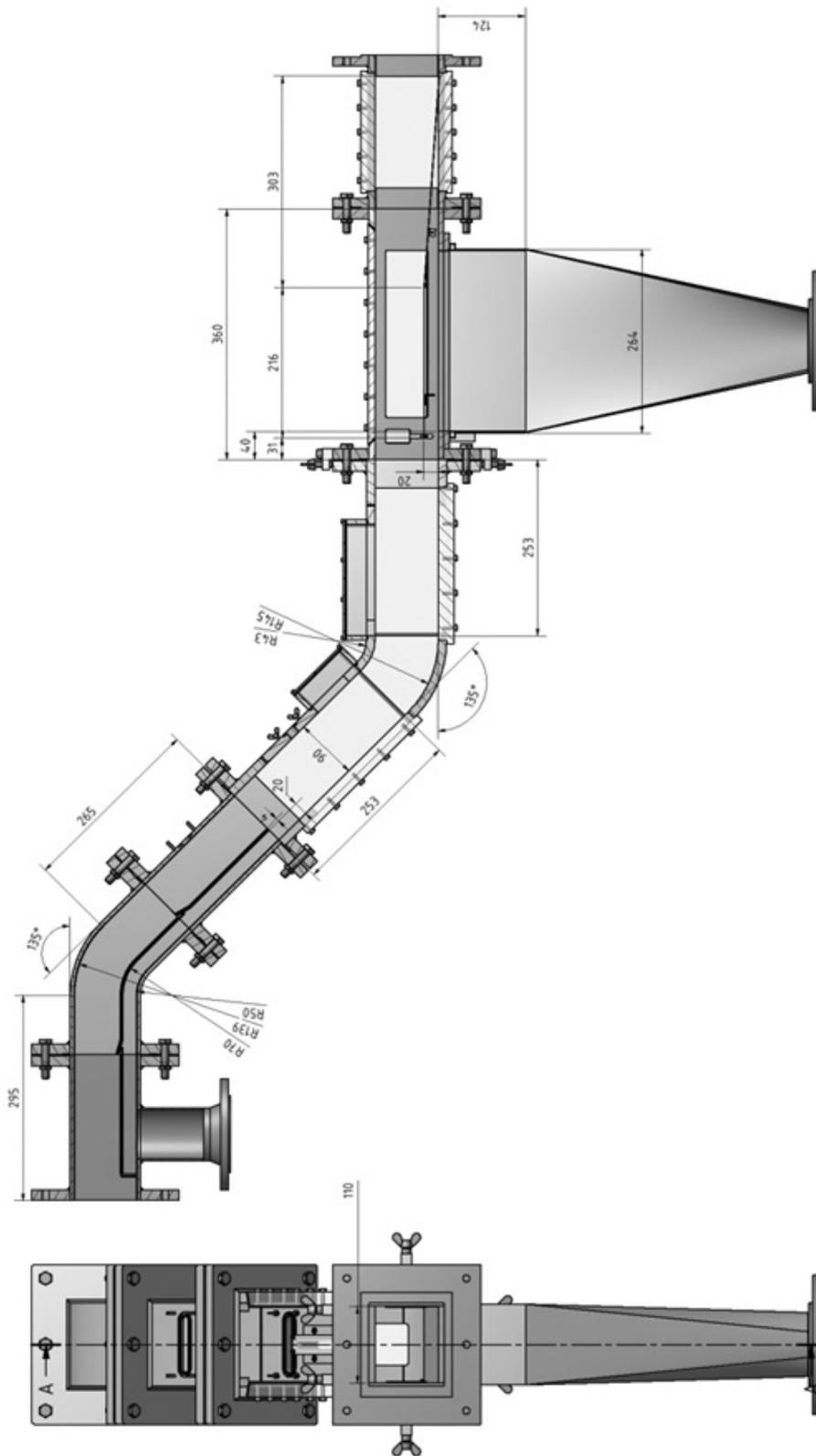
46. Mishima, K.; Ishii, M.: Theoretical Prediction of Onset of Horizontal Slug Flow, *J. Fluids Eng.* 102, 441–445, 1980
47. Moffat, R.J.: Describing the Uncertainties in Experimental Results, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 3-17, 1988
48. Navarro, M.A.: Study of countercurrent flow limitation in a horizontal pipe connected to an inclined one, *Nuclear Engineering and Design*, 235, 1139-1148, 2005
49. Nigmatulin, R.I.: *Dynamics of Multiphase Media*, Hemisphere, New York, 1991.
50. Ohnuki, A.: Experimental study of counter-current two-phase flow in horizontal tube connected to inclined riser, *J. Nucl. Sc. And Technol.*, 23, 219-232, 1986
51. Ohnuki, A.; Adachi, H.; Murao, Y.: Scale effects on countercurrent gas-liquid flow in a horizontal tube connected to an inclined riser, *Nuclear Engineering and Design*, 107, 283-294, 1988
52. Orme, M.: Experiments on Droplet Collisions, Bounce, Coalescence and Disruption, *Progress in Energy and Combustion Science*, 23, 65-79, 1997
53. Prayitno, S.; Santoso; Deendarlianto; Höhne, T.; Lucas, D.: Counter Current Flow Limitation of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Nearly Horizontal Pipe, *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2012, Article ID 513809, 2012
54. Pfeifer, C.: Experimentelle Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Selbstzündung von gasförmigen und flüssigen Brennstoffreistrahlen, Dissertation, KIT Scientific reports, KIR-SR 7555, Kit Scientific Publishing, 2010
55. Pilch, M.; Erdman, C.A.: Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid Drop, *International Journal of Multiphase Flow*, 13, 741-757, 1987
56. Pietruske, H.; Prasser, H.-M: Wire mesh sensors for high-resolving two-phase flow studies at high pressures and temperatures, *Flow Measurement and Instrumentation*, 18, 87-94, 2007
57. Prasser, H.-M: Geschwindigkeits- und Durchflussmessung mit Gittersensoren, *Wissenschaftlich-Technische Berichte, Forschungszentrum Rossendorf FZR-281*, 1999
58. Raffel, M.; Willert, C.; Kompenhans, J.: *Particle Image Velocimetry – A Practical Guide*, Springer, Heidelberg, 1998
59. Rheinhardt, B.; Cordonnier, A.; Florent, P.: Isokinetic sampling probe. Results in a cyclone. *Powder techn.* 101, 81-90, 1999
60. Richter, H.J.; Wallis, G.B.; Carter, K.H.; Murphy, S.L.: De-entrainment and countercurrent air-waterflow in a PWR-hot leg, *NRC-0193-9*, Thayer School of Engineering, 1978
61. Ruck, B.: *Laser-Doppler-Anemometrie - Eine berührungslose optische Strömungsgeschwindigkeitsmeßtechnik*, AT-Fachverlag GmbH, Stuttgart, 1987

62. Stäbler, T.D.: Experimentelle Untersuchung und physikalische Beschreibung der Schichtenströmung in horizontalen Kanälen, Universität Stuttgart, Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE), Stuttgart, FZKA 7296, 2007
63. Stäbler, T.D.; Meyer, L.; Schulenberg, T.; Laurien, E.: Turbulence and Void Distribution in Horizontal Counter-current Stratified Flow, Proc. Seventeenth International Symposium on Transport Phenomena, Toyama, 4.-8 September, Japan, 2006
64. Siddiqui, H.; Banerjee, S.; Ardon, K.H.: Flooding in an elbow between a vertical and a horizontal or near-horizontal pipe. Part I: Experiments, International Journal of Multiphase Flow, 12, 531-541, 1986
65. Tönnies, K. D.: Grundlagen der Bildverarbeitung, Pearson Studium, München, 2005
66. Tropea, C.; Scarano, F.; Westerweel, J.; Cavone, A.A.; Meyers, J.F.; Lee, J.W.; Schodl, R.: Particle-Based Techniques, Tropea C., Yarin, A.L., Foss J.F., editors, Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics, 287-362, Springer, Heidelberg, 2007
67. Vallée, C.; Höhne, T.; Prasser, H.-M.; Sühnel, T.: Experimental investigation and CFD simulation of horizontal stratified two-phase flow phenomena, Nuclear Engineering and Design, 238, 637-646, 2007
68. Vallée, C.; Lucas, D.; Beyer, M.; Pietruske, H.; Schütz, P.; Carl, H.: Experimental CFD grade data for stratified two-phase flows, Nuclear Engineering and Design, 240, 2347-2356, 2010
69. Vallée, C.: Dynamics of the free surface of stratified two-phase flows in channels with rectangular cross-sections, Dissertation, HZDR Wissenschaftlich Technische Berichte, HZDR-018, 2012
70. Vallée, C.; Lucas, D.; Tomiyama, A.; Murase, M.: Experimental investigation of stratified two-phase flows in the hot leg of a PWR for CFD-validation, ATW International Journal for Nuclear Power, 57, 742-749, 2012
71. Wallis, G.B.; Dobson, J.E.: The onset of slugging in horizontal stratified air-water flow, International Journal of Multiphase Flow, 1, 173-193, 1973
72. Weiss, P.A.; Hertlein, R.J.: UPTF Results: First Three Separate Effect Tests, Nuclear Engineering and Design, 108, 249-263, 1988
73. Wintterle, T.: Modellentwicklung und numerische Analyse zweiphasig geschichteter horizontaler Strömungen), Universität Stuttgart, Institut für Kernenergetik und Energiesysteme, IKE8-107, 2008
74. Wongwises, S.: Two-phase countercurrent flow in a model of a pressurized water reactor hot leg, Nuclear Engineering and Design, 166, 121-133, 1996

75. Yamada, M.; Saito, T.: A newly developed photoelectric optical fiber probe for simultaneous measurements of CO₂ bubble chord length, velocity, and void fraction and the local CO₂ concentrations in the surrounding liquid, *Flow Measurement and Instrumentation*, 27, 8-19, 2010
76. Zapke, A.; Kröger, G.: The influence of fluid properties and inlet geometry on flooding in vertical and inclined tubes, *Int. Journal of Multiphase Flow*, 22, 461-472, 1996
77. Zhang, G.J.; Ishii, M.: Isokinetic sampling probe and image processing system for droplet size measurement in two-phase flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38, 2019-202, 1995

Anhang

Anhang A - Abmessungen der Teststrecke



Anhang B - Messmatrix

Tabelle 0.1 Messpunkte der experimentellen Untersuchung bei steigender Luftgeschwindigkeit

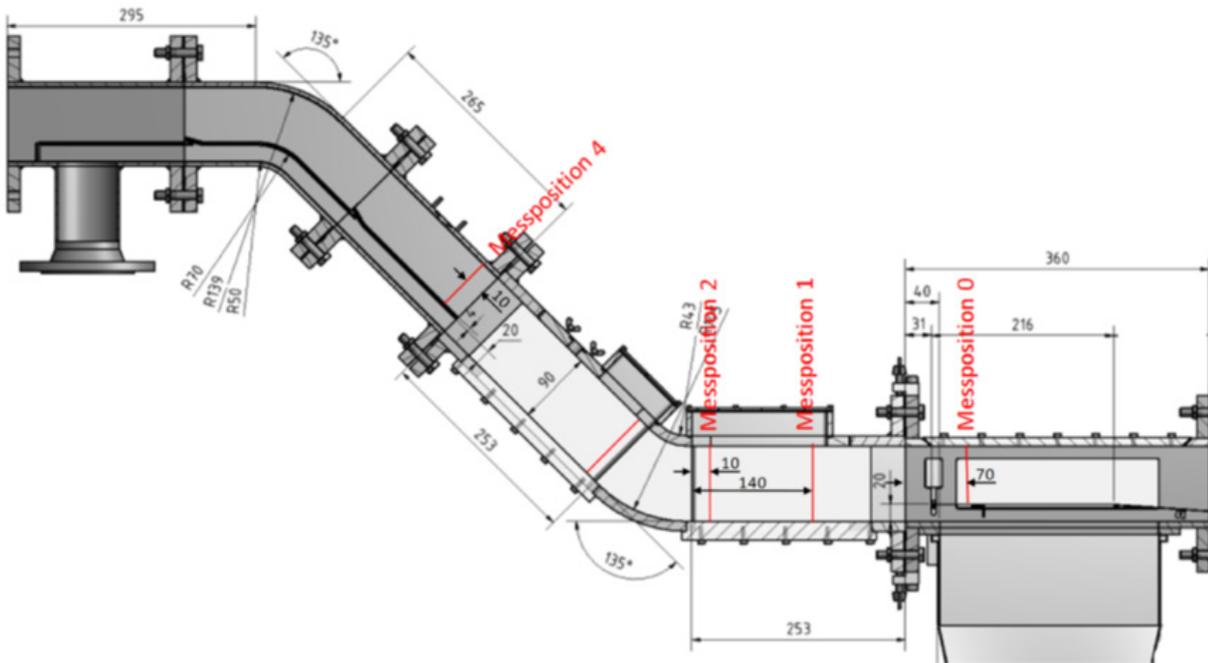
Punkt	U_G m/s	\dot{V}_G l/s	U_L m/s	\dot{V}_L l/min	Strömungsform
1	10,1	100	0,042	25	schießend
2	13,1	130	0,042	25	schießend mit Tropfen
3	16,2	160	0,042	25	schießend mit Tropfen
8	10,1	100	0,059	35	schießend
9	13,1	130	0,059	35	schießend mit Tropfen
10	16,2	160	0,059	35	schießend mit Tropfen
14	10,1	100	0,075	45	schießend
15	13,1	130	0,075	45	schießend mit Tropfen
16	16,2	160	0,075	45	schießend mit Tropfen
21	10,1	100	0,093	55	schießend
22	13,1	130	0,093	55	schießend mit Tropfen
23	16,2	160	0,093	55	schießend mit Tropfen

Tabelle 0.2 Messpunkte der experimentellen Untersuchung bei sinkender Luftgeschwindigkeit

Punkt	U_G m/s	\dot{V}_G l/s	U_L m/s	\dot{V}_L l/min	Strömungsform
4	19,2	190	0,042	25	teilweise umgekehrte Strömung
5	16,2	160	0,042	25	teilweise umgekehrte Strömung
6	12,1	120	0,042	25	teilweise umgekehrte Strömung
7	13,1	130	0,042	25	teilweise umgekehrte Strömung
11	19,2	190	0,059	35	teilweise umgekehrte Strömung
12	16,2	160	0,059	35	teilweise umgekehrte Strömung
13	13,1	130	0,059	35	teilweise umgekehrte Strömung
17	19,2	190	0,075	45	teilweise umgekehrte Strömung
18	16,2	160	0,075	45	teilweise umgekehrte Strömung
19	13,1	130	0,075	45	teilweise umgekehrte Strömung

Punkt	U_G m/s	\dot{V}_G l/s	U_L m/s	\dot{V}_L l/min	Strömungsform
20	12,1	120	0,075	45	teilweise umgekehrte Strömung
24	19,2	190	0,093	55	teilweise umgekehrte Strömung
25	16,2	160	0,093	55	teilweise umgekehrte Strömung
26	13,1	130	0,093	55	teilweise umgekehrte Strömung
27	10,1	100	0,093	55	teilweise umgekehrte Strömung
28	14,6	145	0,042	25	teilweise umgekehrte Strömung
29	14,6	145	0,059	35	teilweise umgekehrte Strömung
30	14,6	145	0,075	45	teilweise umgekehrte Strömung
31	14,6	145	0,093	55	teilweise umgekehrte Strömung

Anhang C - Messpositionen



Anhang D - Messergebnisse

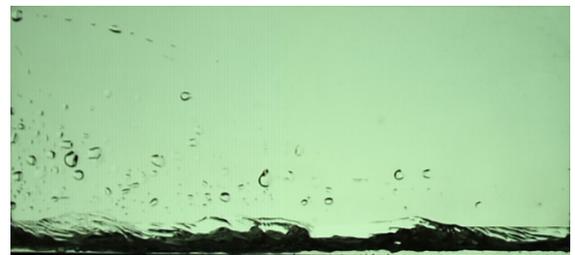
Strömungsbild und Phasenverteilung

Strömungsbild in schießender Strömung

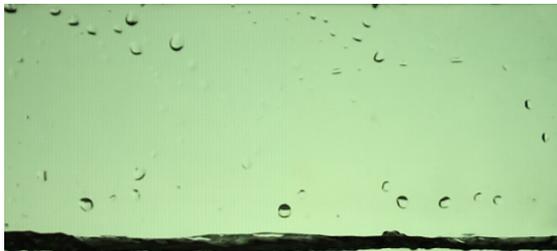
MP: 3 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 160 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 25 \text{ l/min}$



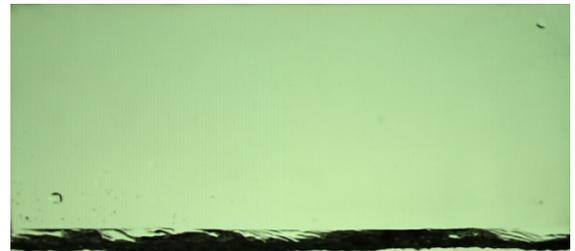
MP: 10 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 160 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 35 \text{ l/min}$



MP: 2 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 130 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 25 \text{ l/min}$



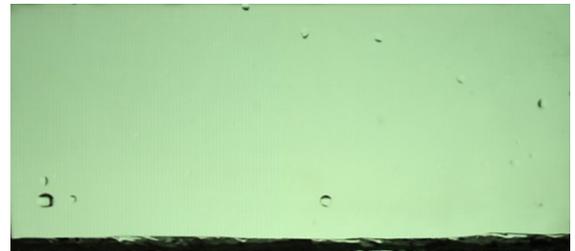
MP: 9 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 130 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 35 \text{ l/min}$



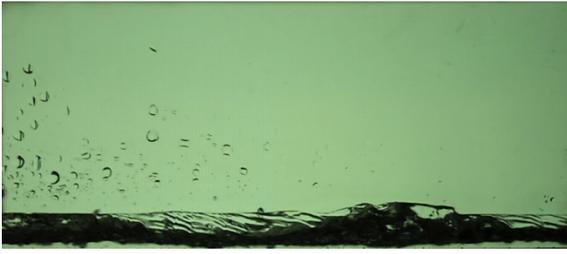
MP: 1 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 100 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 25 \text{ l/min}$



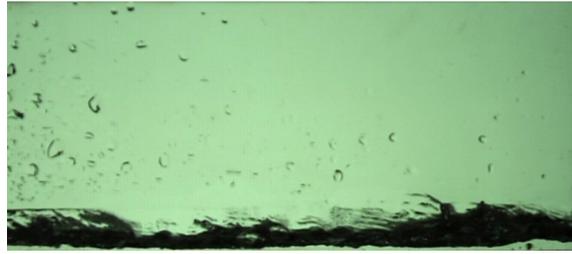
MP: 8 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 100 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 35 \text{ l/min}$



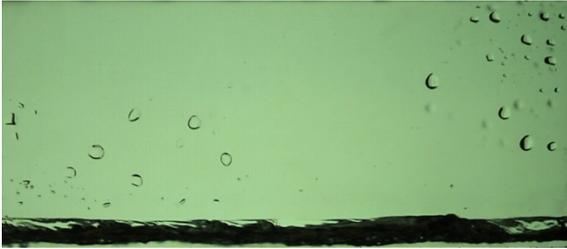
MP: 16 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 160 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 45 \text{ l/min}$



MP: 23 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 160 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 55 \text{ l/min}$



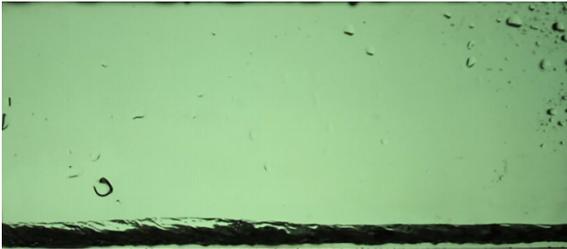
MP: 15 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 130 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 45 \text{ l/min}$



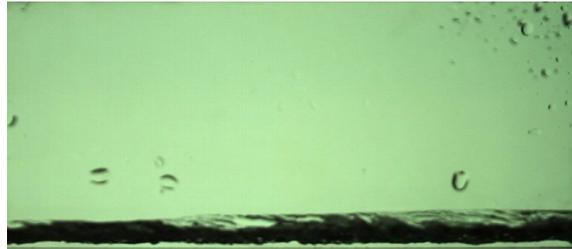
MP: 22 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 130 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 55 \text{ l/min}$



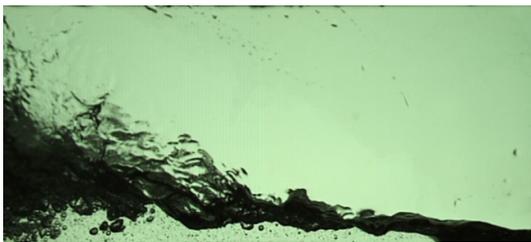
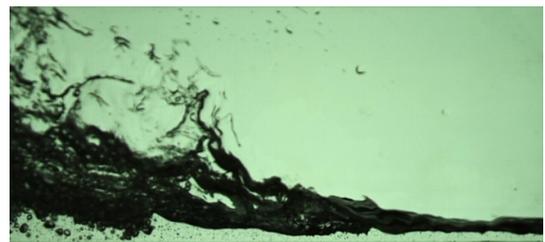
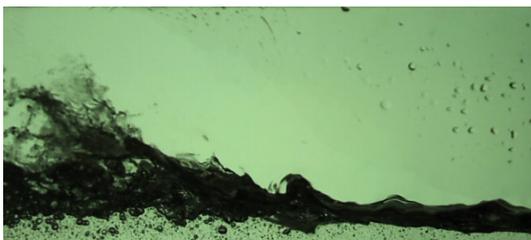
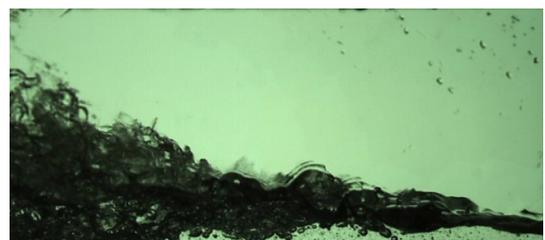
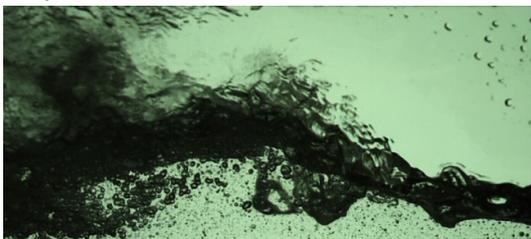
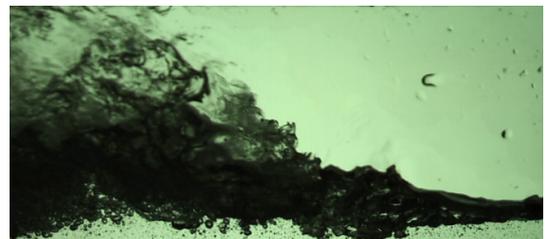
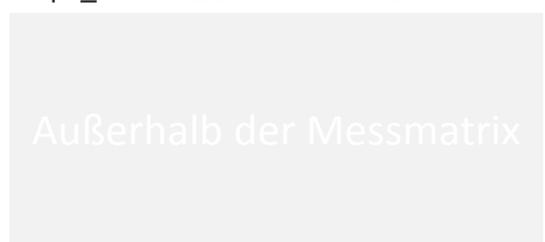
MP: 14 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 100 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 45 \text{ l/min}$



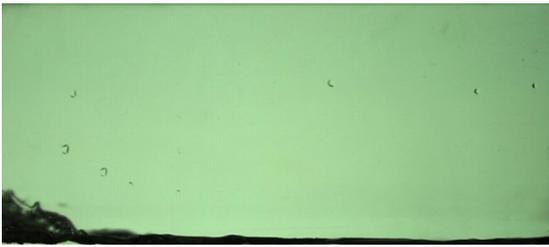
MP: 21 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 100 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 55 \text{ l/min}$



Strömungsbild in teilweise umgekehrter Strömung

Mp: 4 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 190 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 25 \text{ l/min}$ Mp: 11 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 190 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 35 \text{ l/min}$ Mp: 5 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 160 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 25 \text{ l/min}$ Mp: 12 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 160 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 35 \text{ l/min}$ Mp: 28 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 145 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 25 \text{ l/min}$ Mp: 29 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 145 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 35 \text{ l/min}$ Mp: 7 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 130 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 25 \text{ l/min}$ Mp: 13 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 130 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 35 \text{ l/min}$ Mp: 6 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 120 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 25 \text{ l/min}$ Mp: _ $\dot{V}_{\text{Luft}} = 120 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 35 \text{ l/min}$ 

Mp: 17 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 190 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 45 \text{ l/min}$



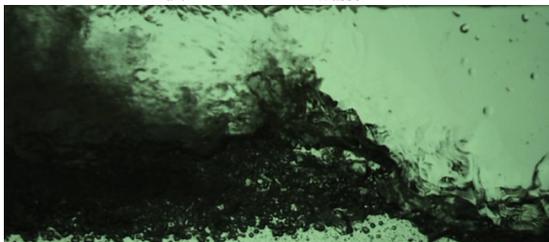
Mp: 18 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 160 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 45 \text{ l/min}$



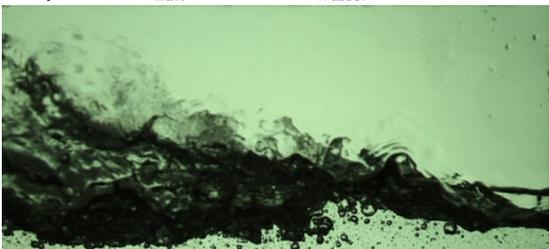
Mp: 30 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 145 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 45 \text{ l/min}$



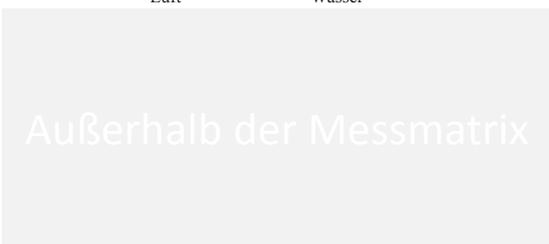
Mp: 19 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 130 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 45 \text{ l/min}$



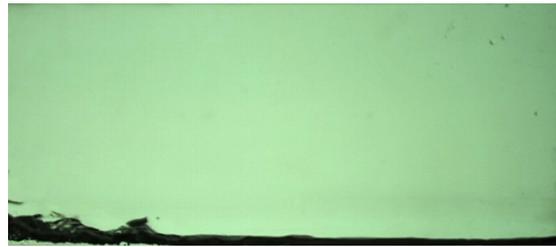
Mp: 20 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 120 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 45 \text{ l/min}$



$\dot{V}_{\text{Luft}} = 100 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 45 \text{ l/min}$



Mp: 24 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 190 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 55 \text{ l/min}$



Mp: 25 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 160 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 55 \text{ l/min}$



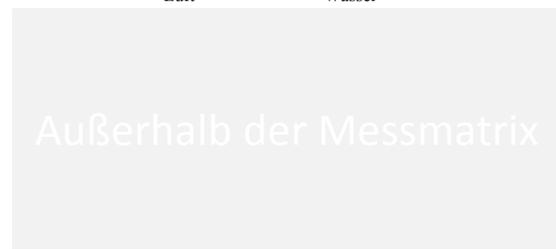
Mp: 31 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 145 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 55 \text{ l/min}$



Mp: 26 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 130 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 55 \text{ l/min}$



$\dot{V}_{\text{Luft}} = 120 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 55 \text{ l/min}$

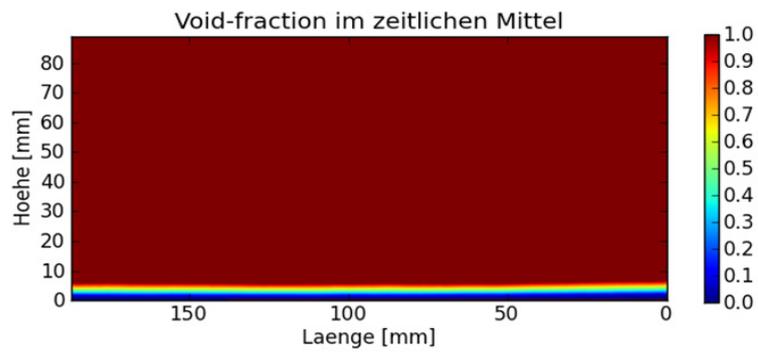


Mp: 27 $\dot{V}_{\text{Luft}} = 100 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 55 \text{ l/min}$

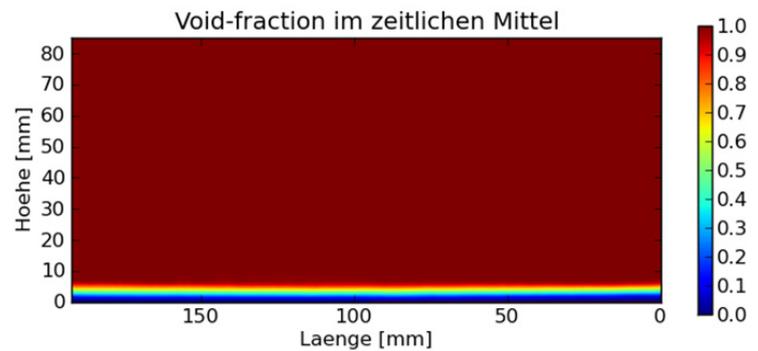


Phasenanteil bei schießender Strömung

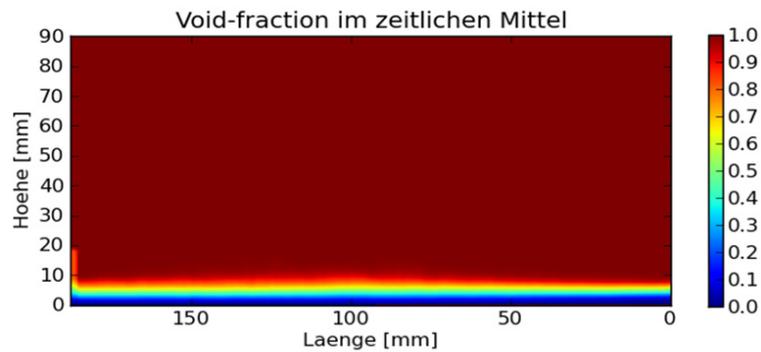
Messpunkt:1 Luft: 100 l/s Wasser: 25 l/min



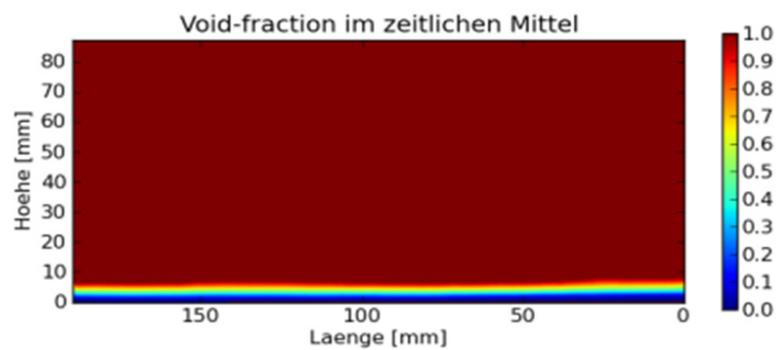
Messpunkt:2 Luft: 130 l/s Wasser: 25 l/min



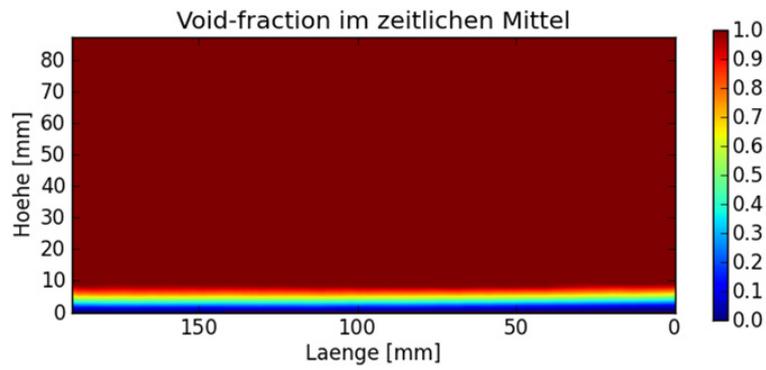
Messpunkt:3 Luft: 160 l/s Wasser: 25 l/min



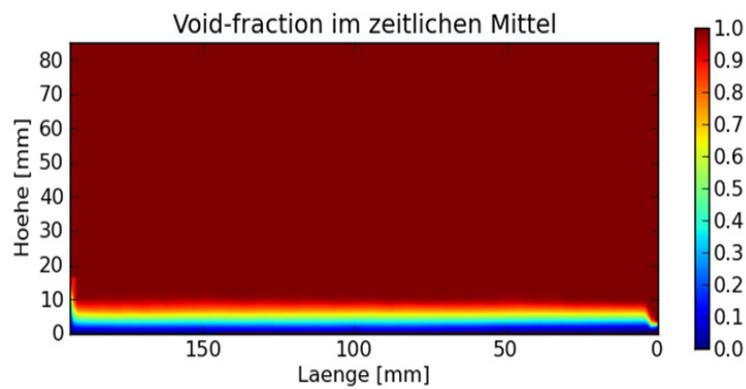
Messpunkt:8 100 Luft: l/s Wasser: 35 l/min



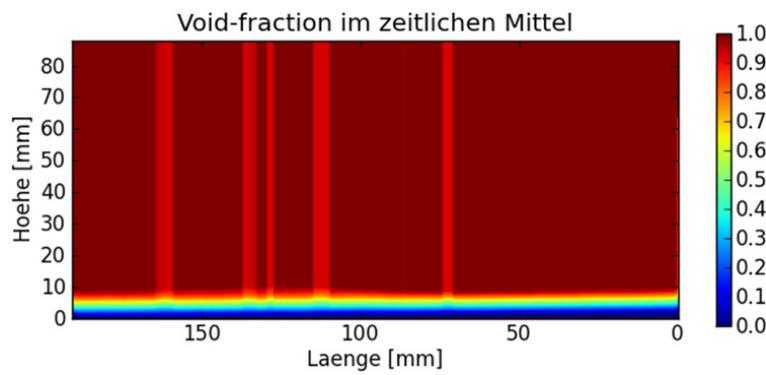
Messpunkt:9 Luft: 130 l/s Wasser: 35 l/min



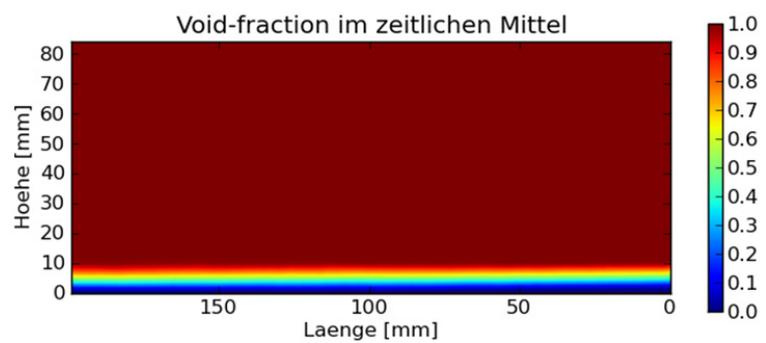
Messpunkt:10 Luft: 160 l/s Wasser: 35 l/min



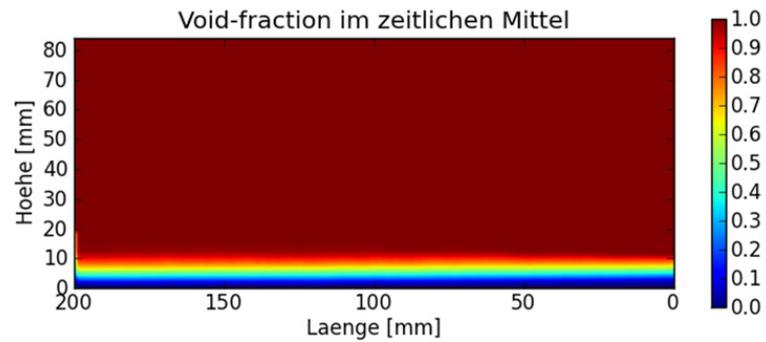
Messpunkt:14 Luft: 100 l/s Wasser: 45 l/min (Normierungsfehler)



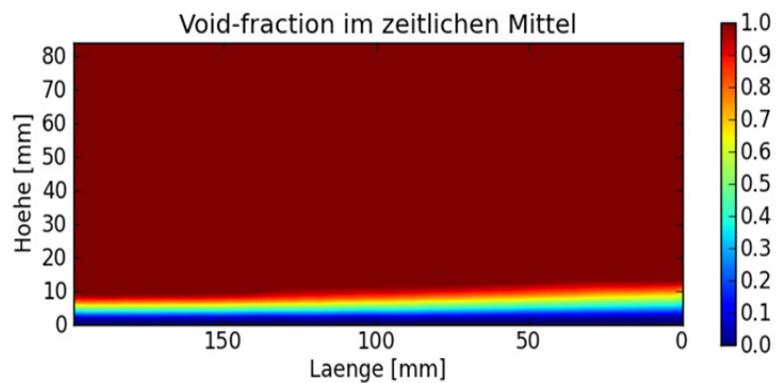
Messpunkt:15 Luft: 130 l/s Wasser: 45 l/min



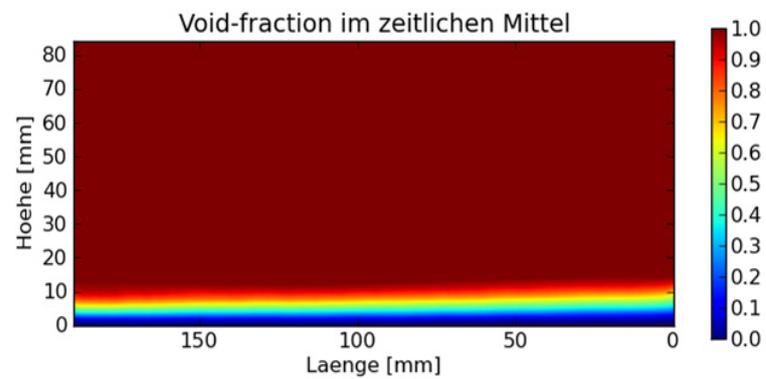
Messpunkt:16 Luft: 160 l/s Wasser: 45 l/min



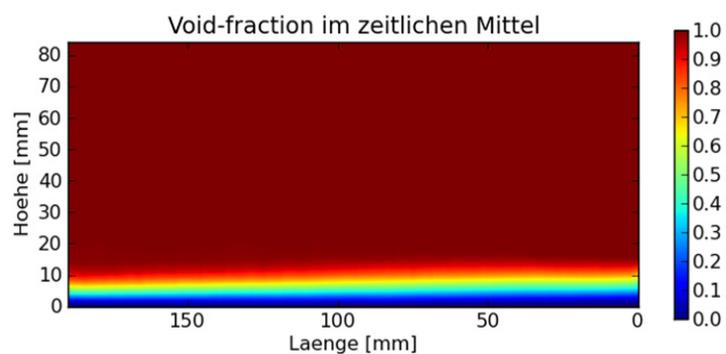
Messpunkt:21 Luft: 100 l/s Wasser: 55 l/min



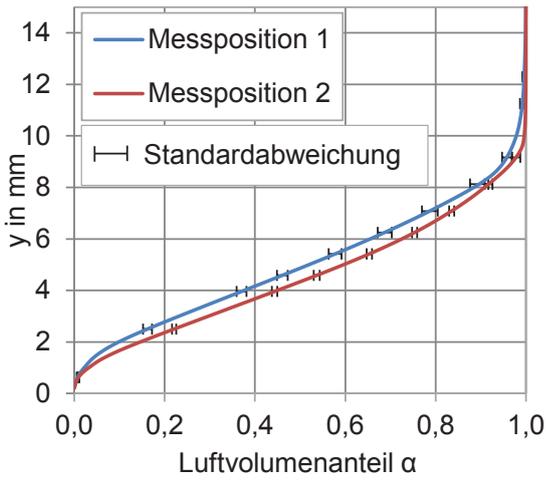
Messpunkt:22 Luft: 130 l/s Wasser: 55 l/min



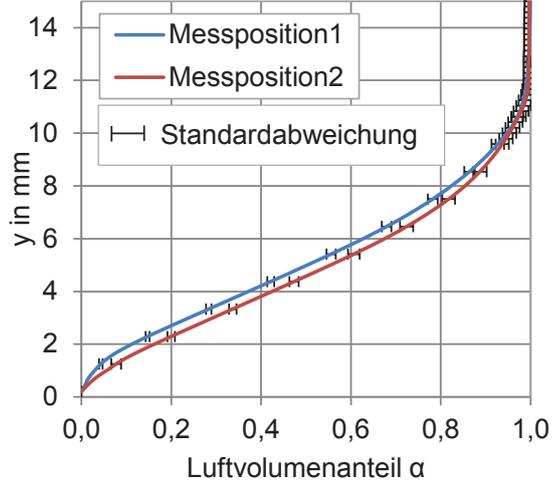
Messpunkt:23 Luft: 160 l/s Wasser: 55 l/min



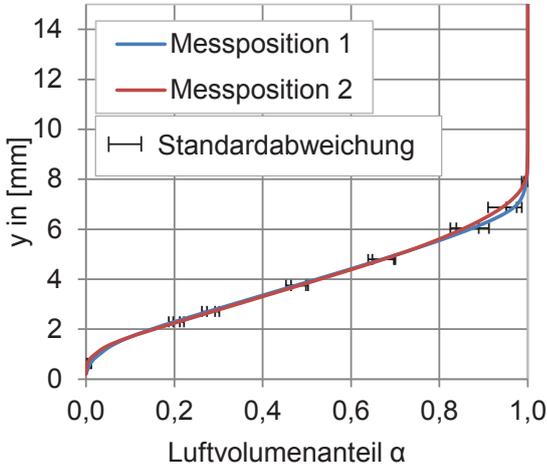
Mp: 3 $\dot{V}_{Luft} = 160 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{Wasser} = 25 \text{ l/min}$



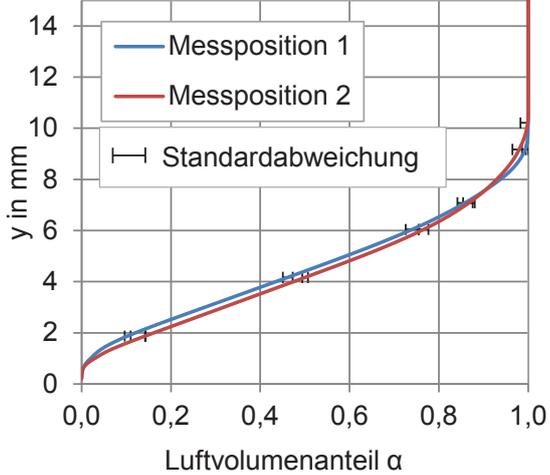
Mp: 10 $\dot{V}_{Luft} = 160 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{Wasser} = 35 \text{ l/min}$



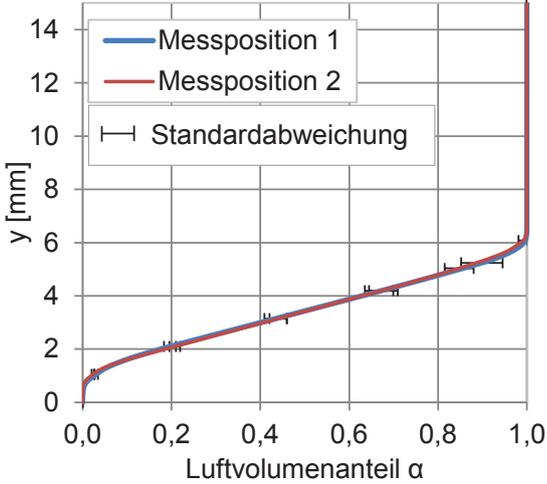
Mp: 2 $\dot{V}_{Luft} = 130 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{Wasser} = 25 \text{ l/min}$



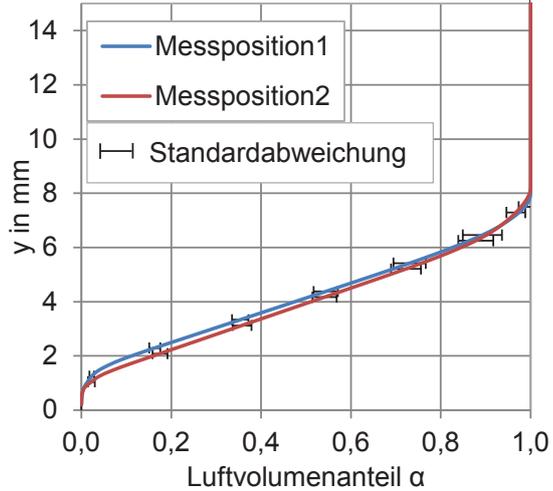
Mp: 9 $\dot{V}_{Luft} = 130 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{Wasser} = 35 \text{ l/min}$

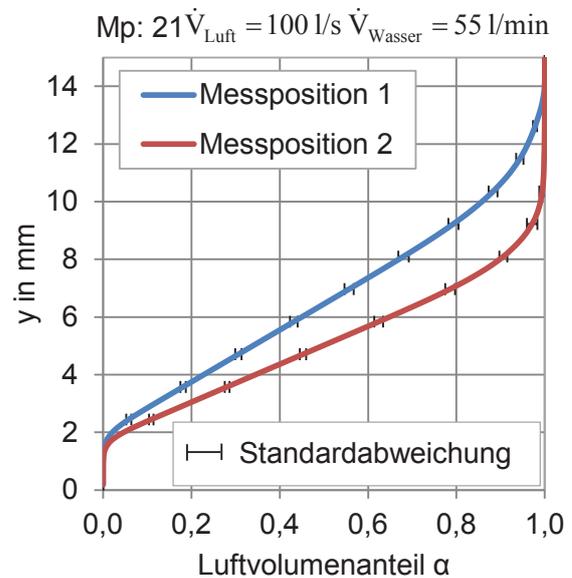
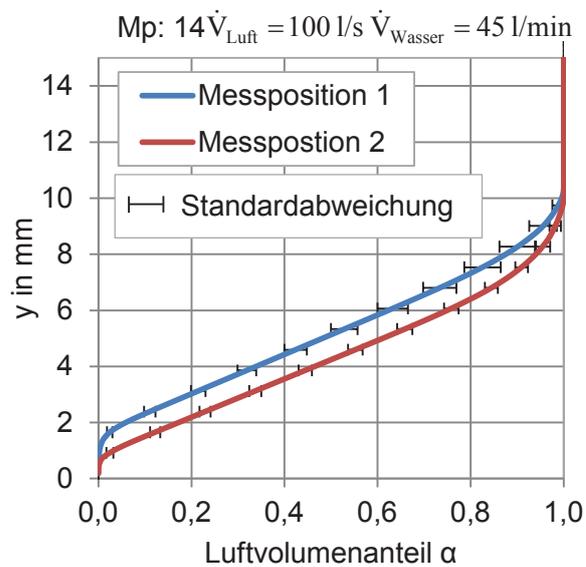
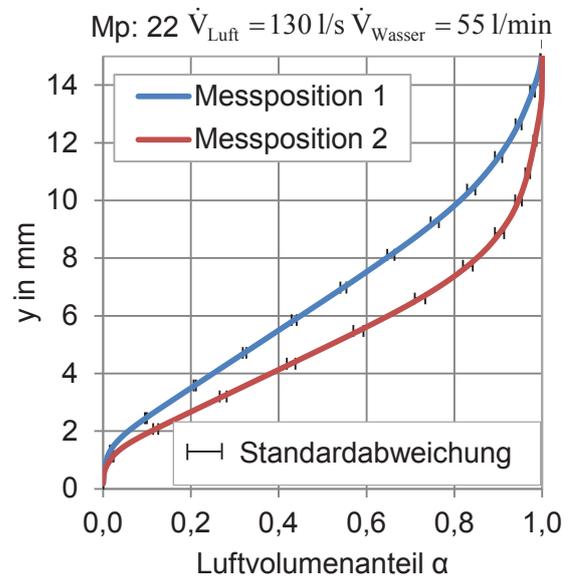
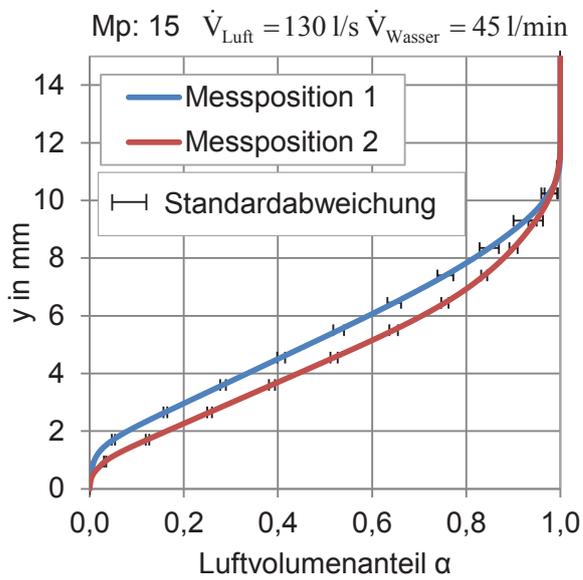
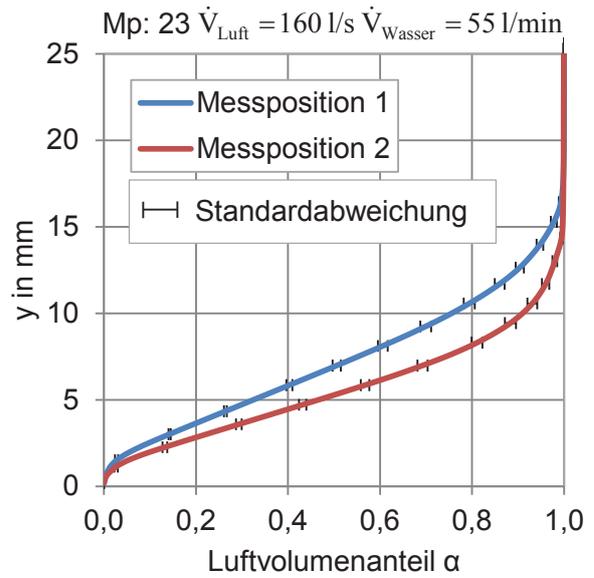
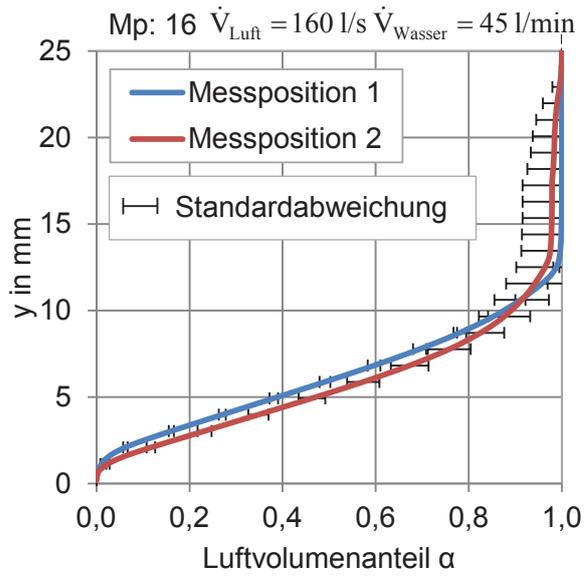


Mp: 1 $\dot{V}_{Luft} = 100 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{Wasser} = 25 \text{ l/min}$



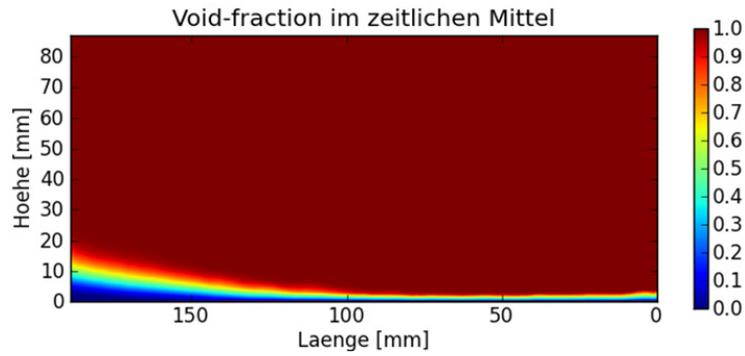
Mp: 8 $\dot{V}_{Luft} = 100 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{Wasser} = 35 \text{ l/min}$



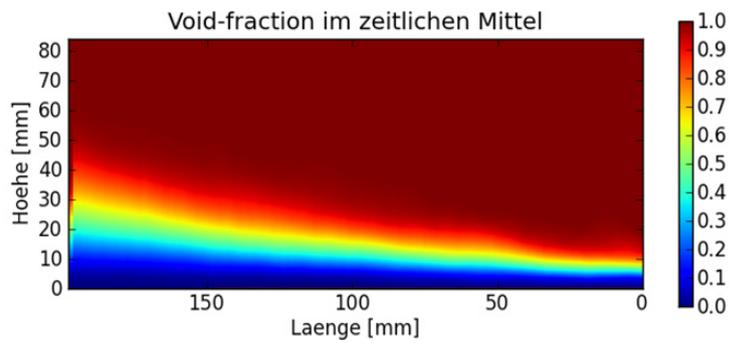


Phasenanteil bei umgekehrter Strömung

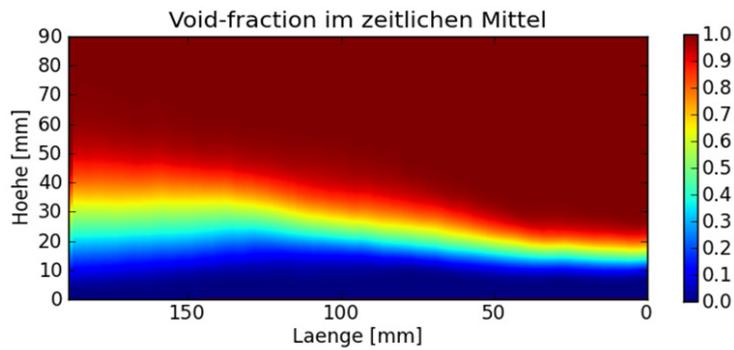
Messpunkt:4 Luft: 190 l/s Wasser: 25 l/min



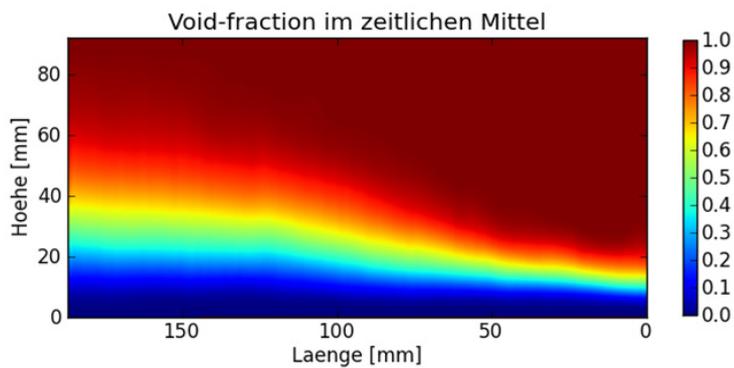
Messpunkt:5 Luft: 160 l/s Wasser: 25 l/min



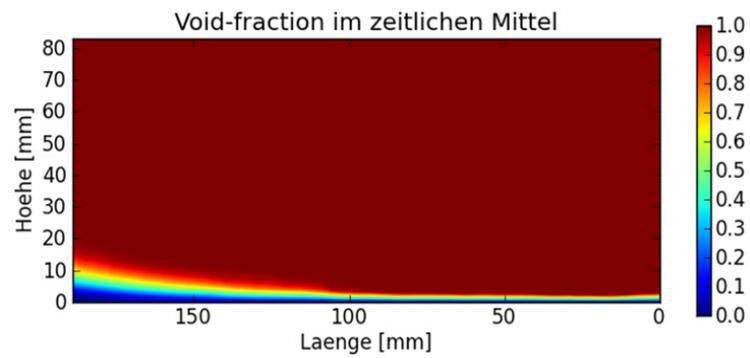
Messpunkt:6 Luft: 130 l/s Wasser: 25 l/min



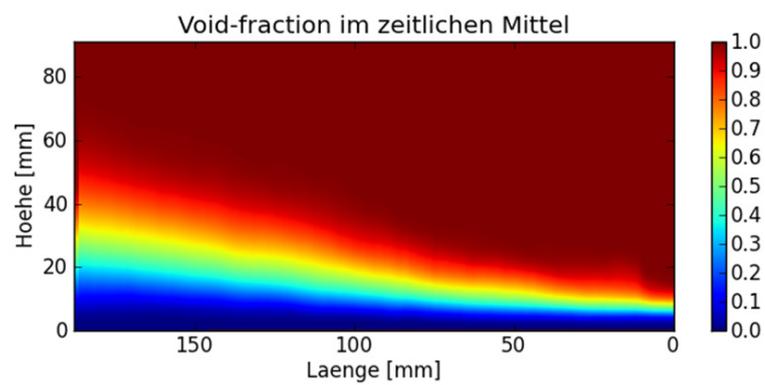
Messpunkt:7 Luft: 120 l/s Wasser: 25 l/min



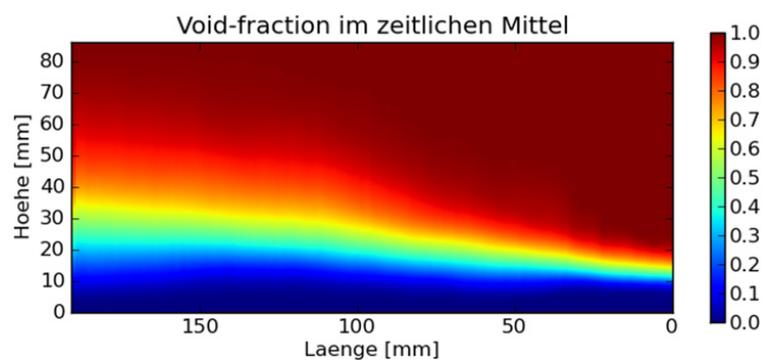
Messpunkt:11 Luft: 190 l/s Wasser: 35 l/min



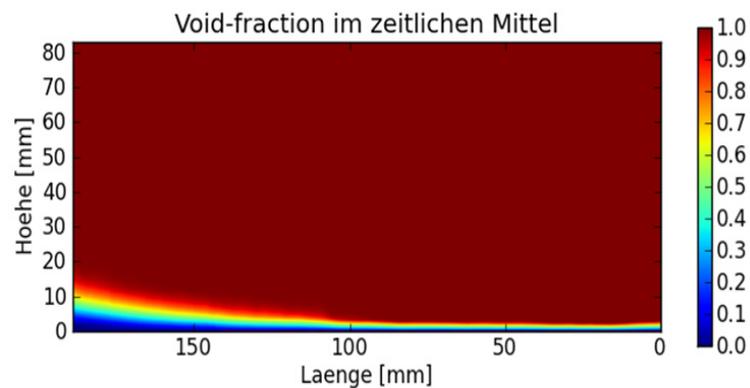
Messpunkt:12 Luft: 160 l/s Wasser: 35 l/min



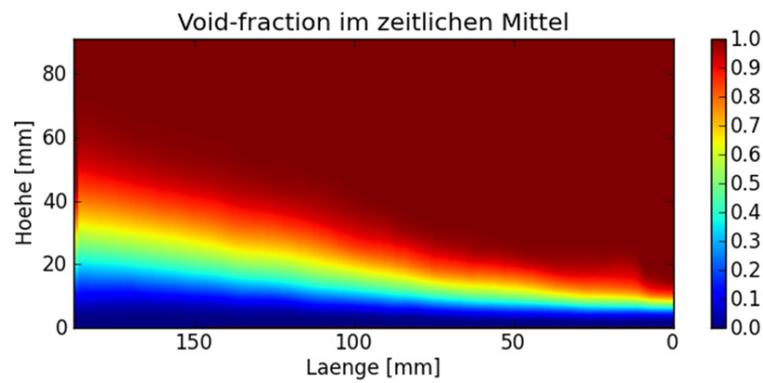
Messpunkt:13 Luft: 130 l/s Wasser: 35 l/min



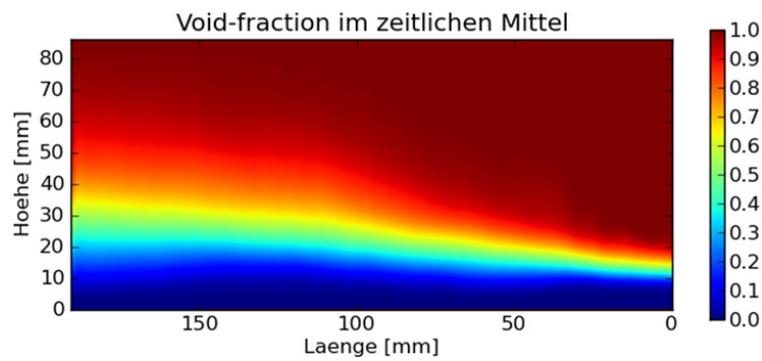
Messpunkt:11 Luft: 190 l/s Wasser: 35 l/min



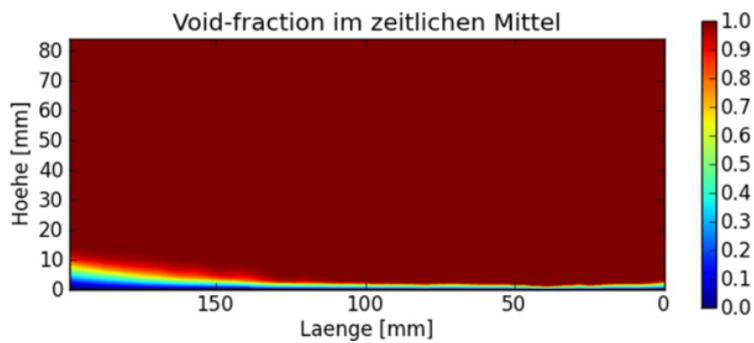
Messpunkt:12 Luft: 160 l/s Wasser: 35 l/min



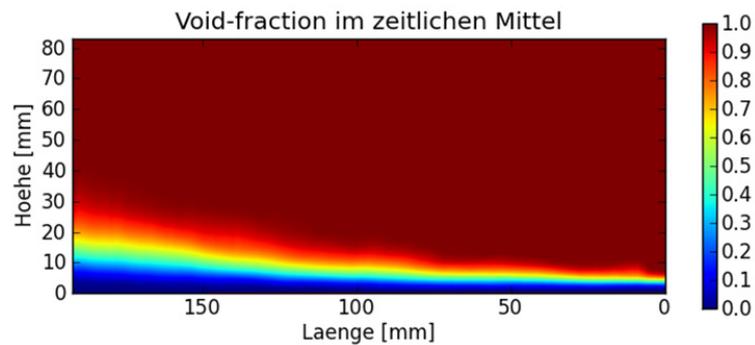
Messpunkt:13 Luft: 130 l/s Wasser: 35 l/min



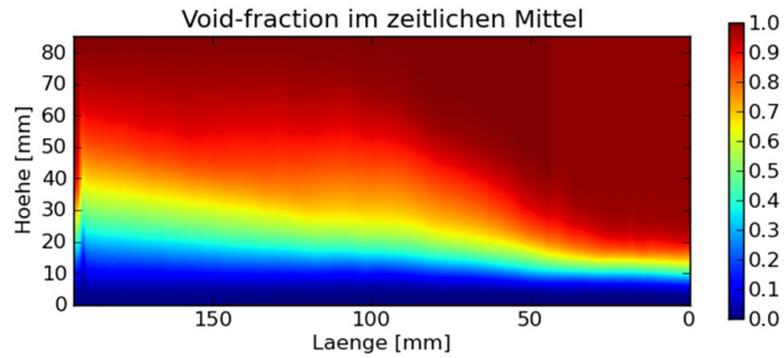
Messpunkt:17 Luft: 190 l/s Wasser: 45 l/min



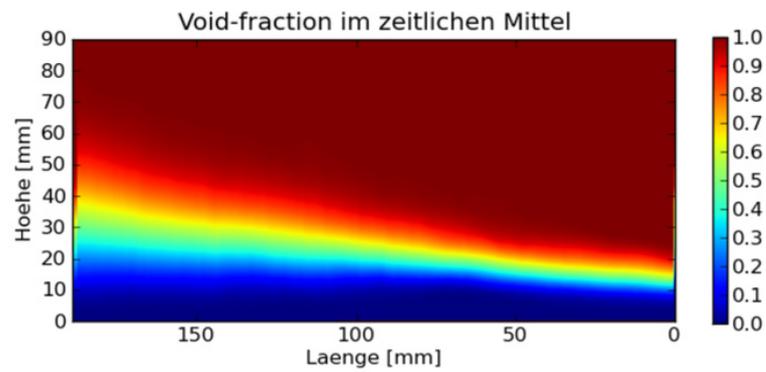
Messpunkt:18 Luft: 160 l/s Wasser: 45 l/min



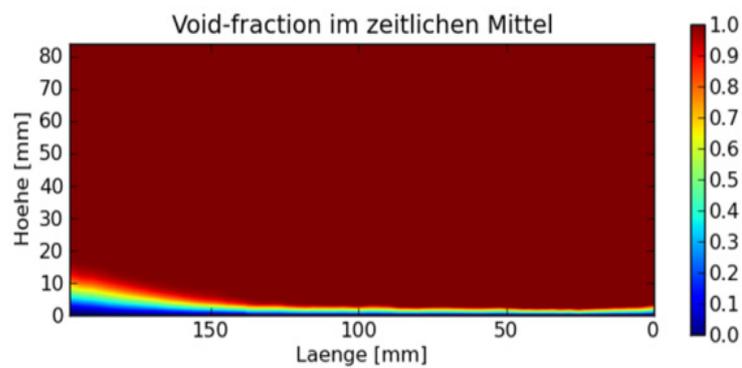
Messpunkt:19 Luft: 130 l/s Wasser: 45 l/min



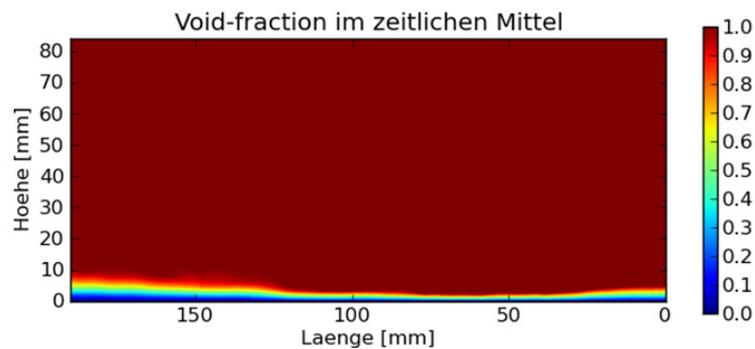
Messpunkt:20 Luft: 120 l/s Wasser: 45 l/min



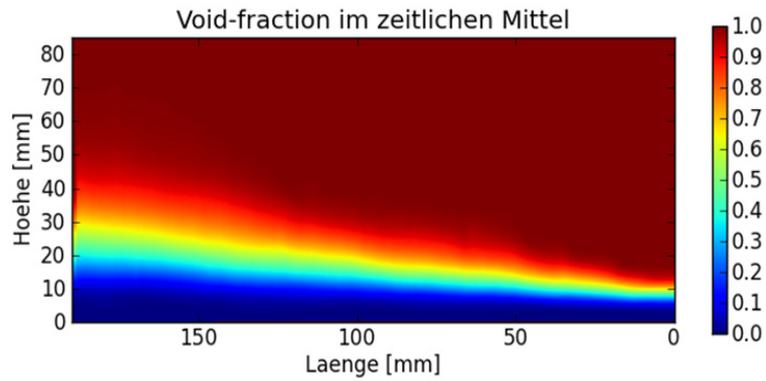
Messpunkt:24 Luft: 190 l/s Wasser: 55 l/min



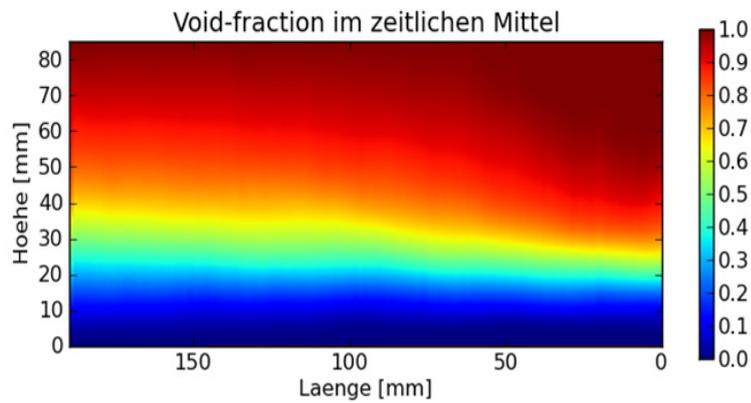
Messpunkt:25 Luft: 160 l/s Wasser: 35 l/min



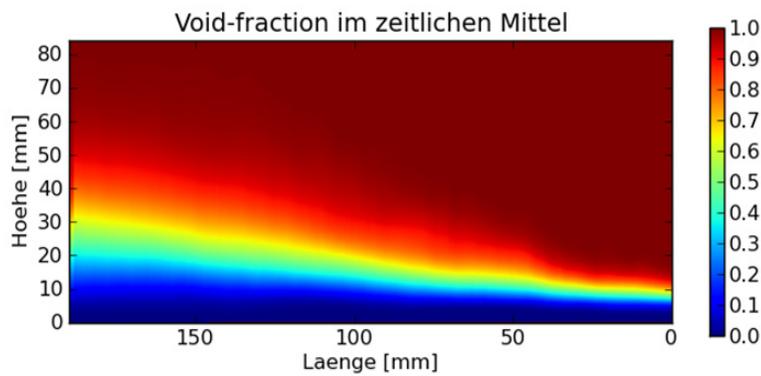
Messpunkt:26 Luft: 130 l/s Wasser: 55 l/min



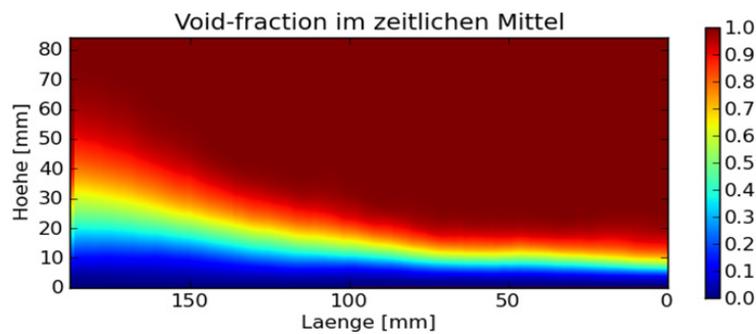
Messpunkt:27 Luft: 100 l/s Wasser: 55 l/min



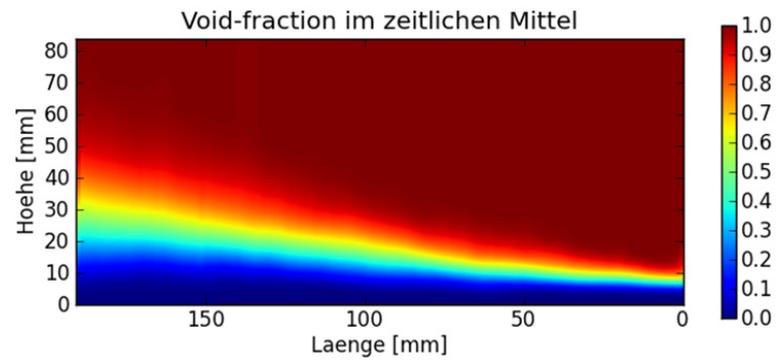
Messpunkt:28 Luft: 145 l/s Wasser: 25 l/min



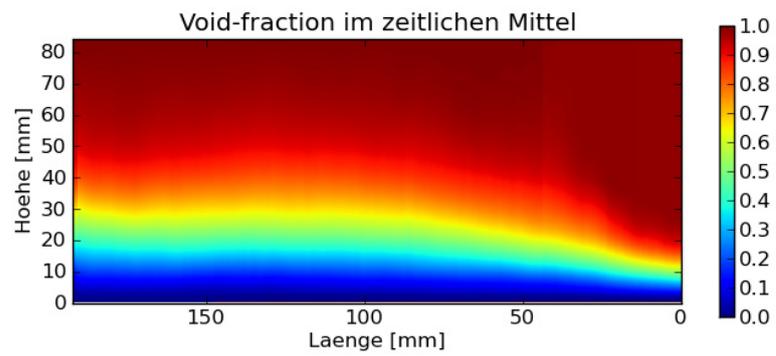
Messpunkt:29 Luft: 145 l/s Wasser: 35 l/min

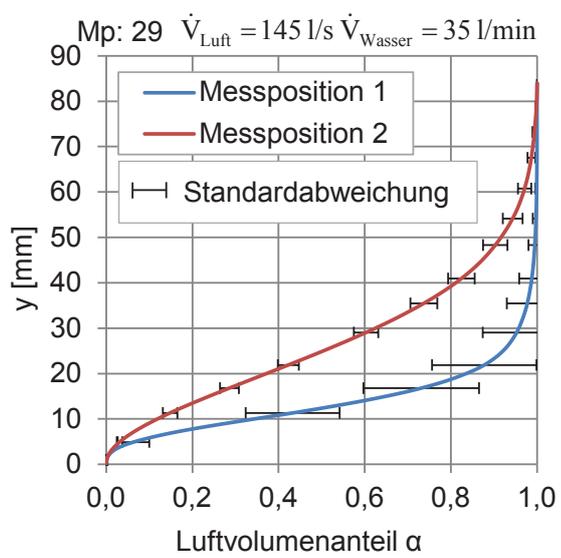
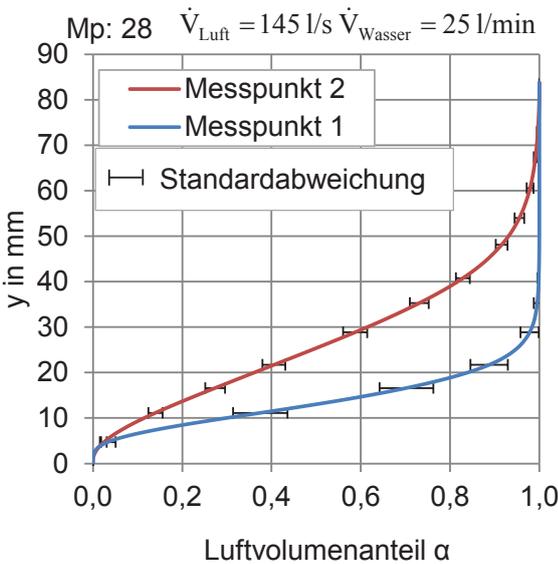
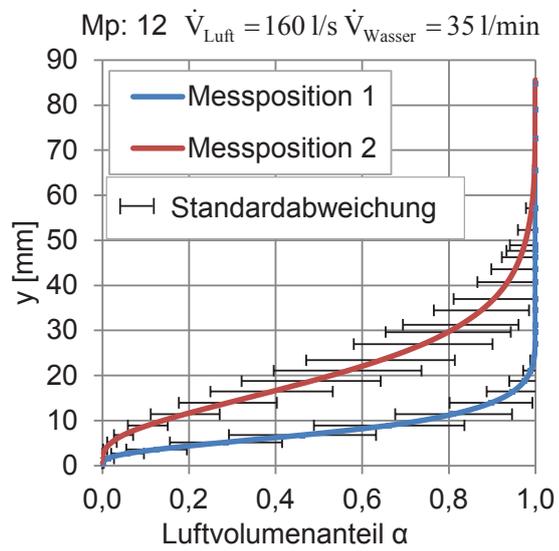
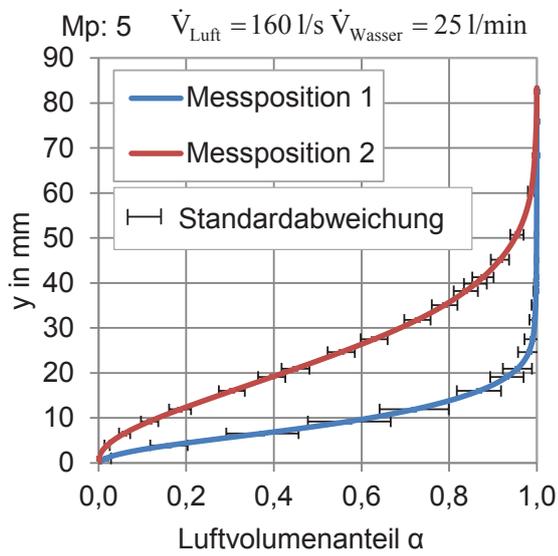
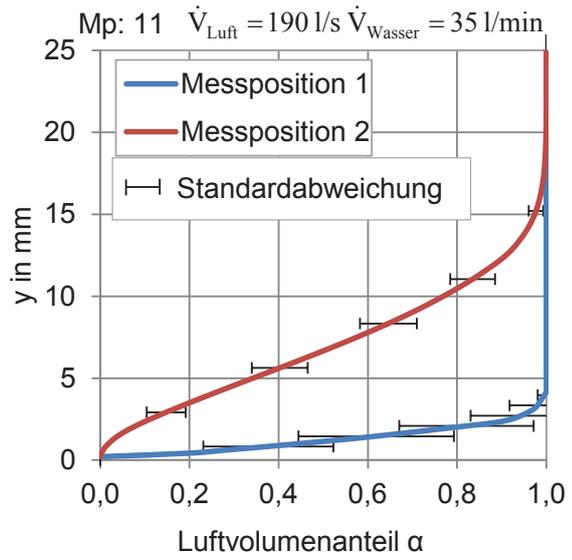
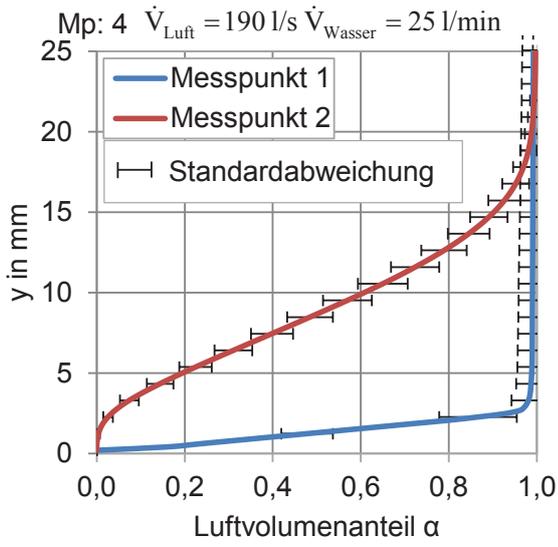


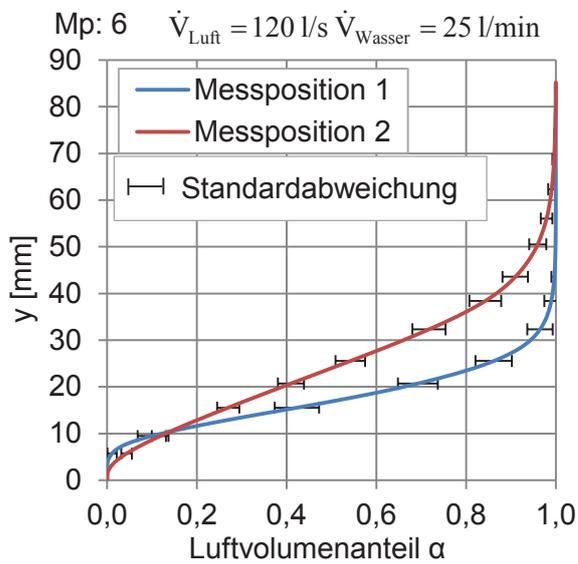
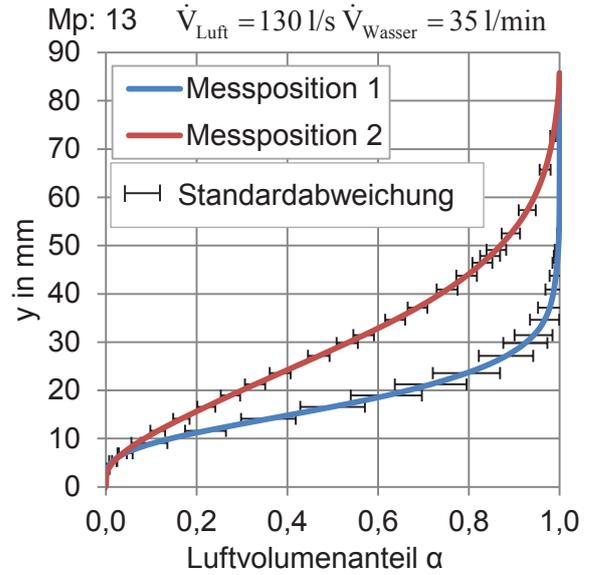
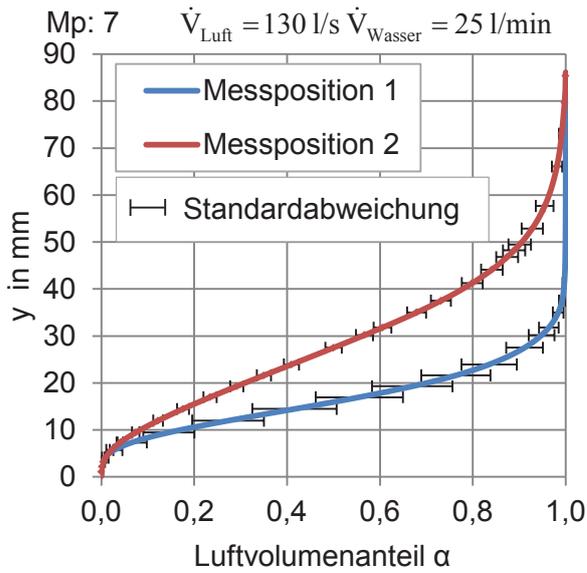
Messpunkt:30 Luft: 145 l/s Wasser: 45 l/min



Messpunkt:31 Luft: 145 l/s Wasser: 55 l/min

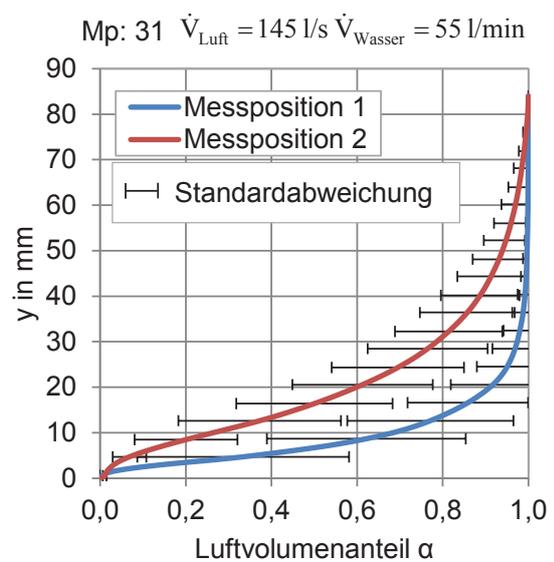
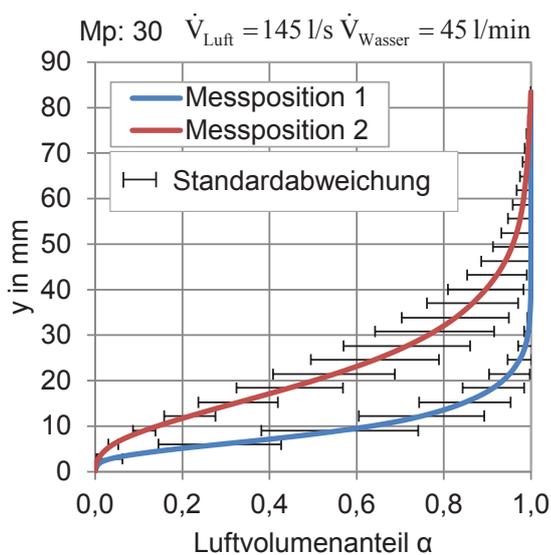
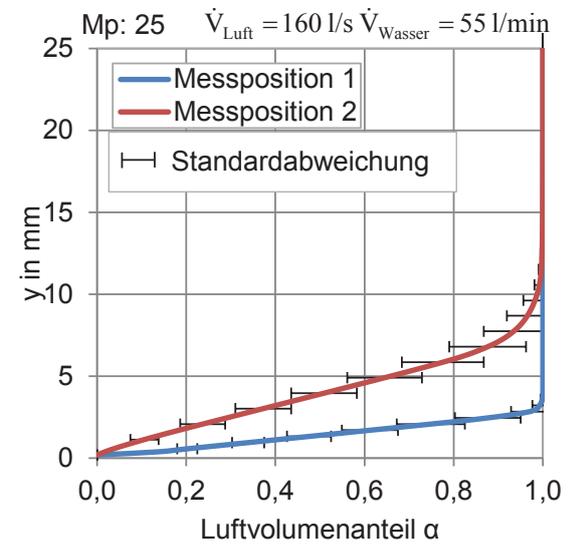
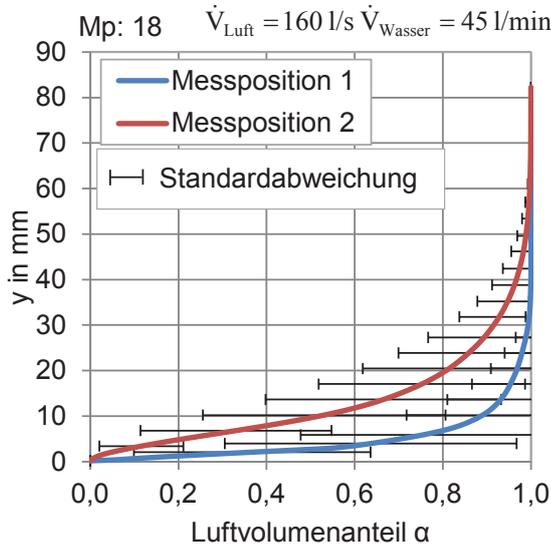
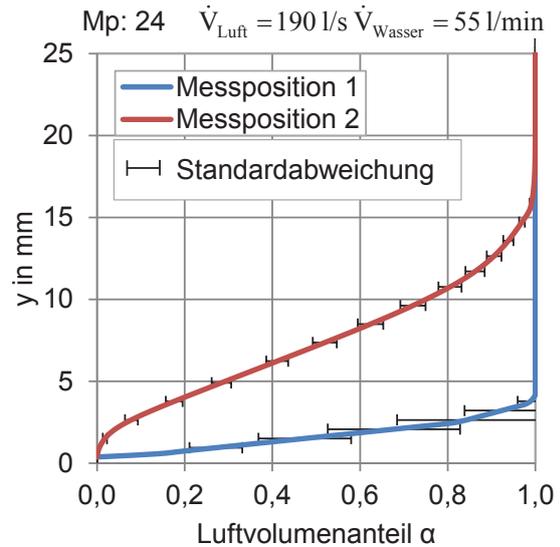
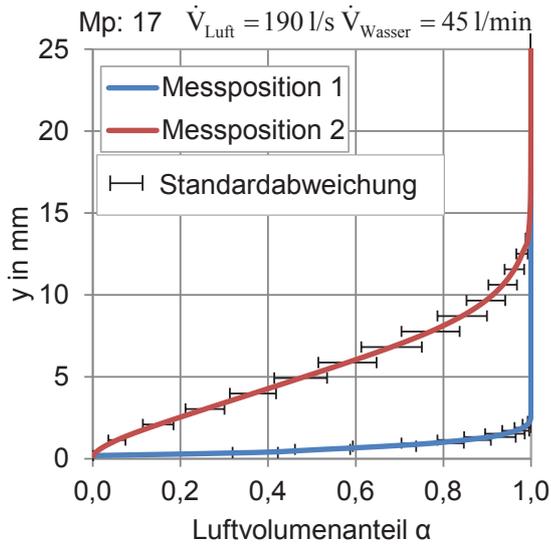


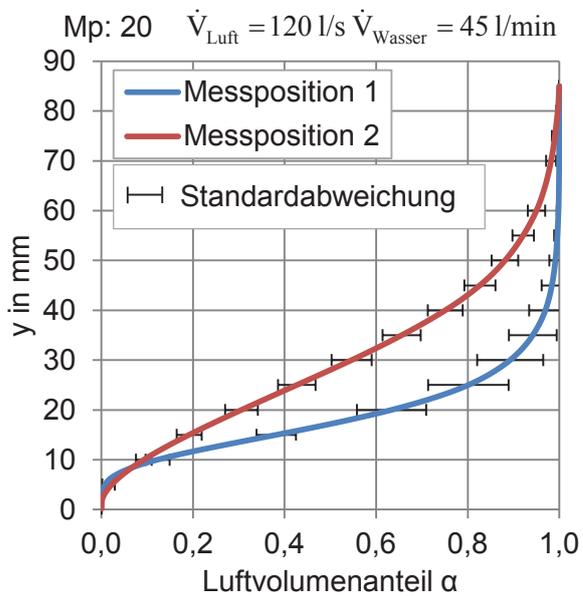
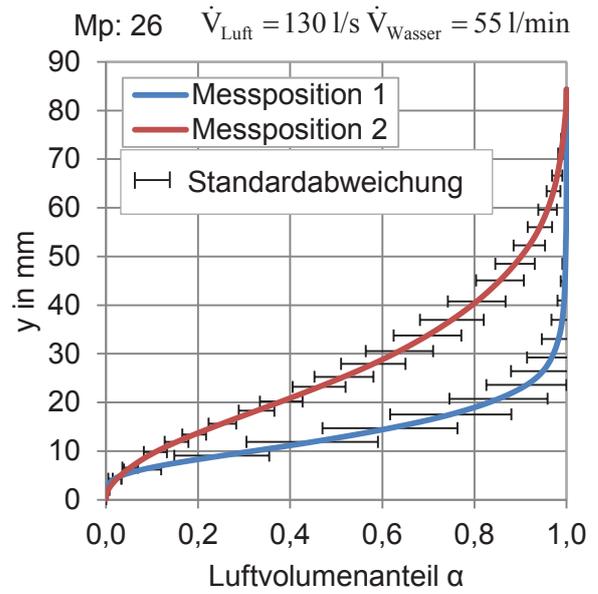
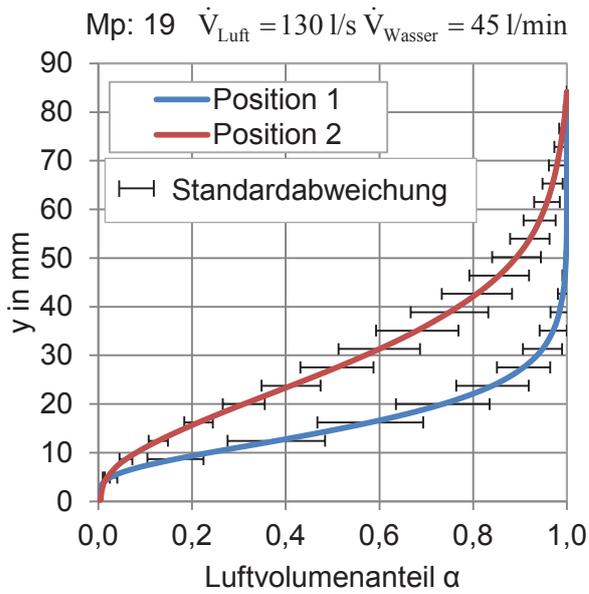




Mp: _ $\dot{V}_{\text{Luft}} = 120 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 35 \text{ l/min}$

Außerhalb der
Messmatrix



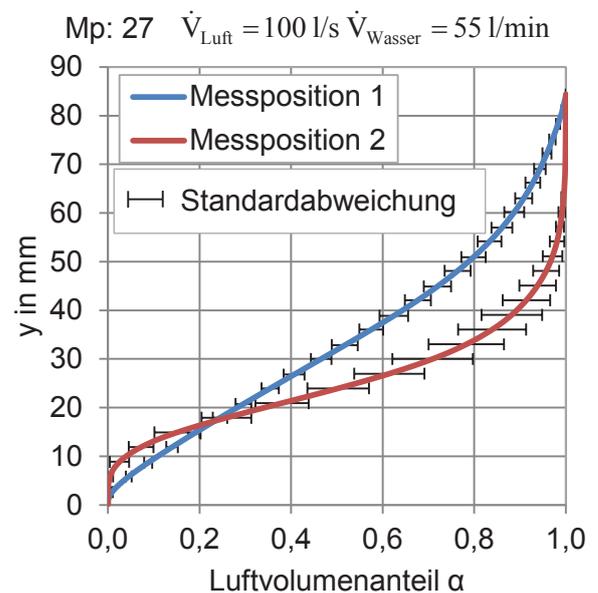


Mp: _ $\dot{V}_{\text{Luft}} = 120 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 55 \text{ l/min}$

Außerhalb der Messmatrix

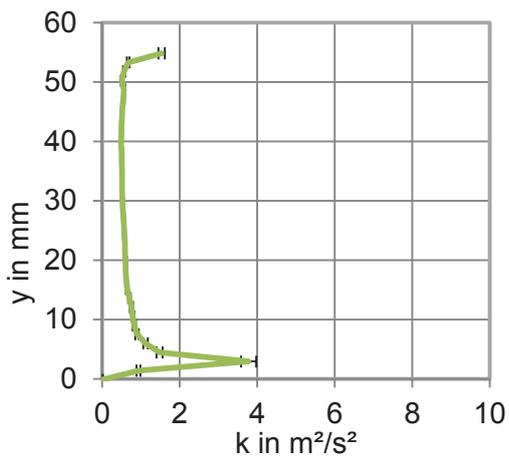
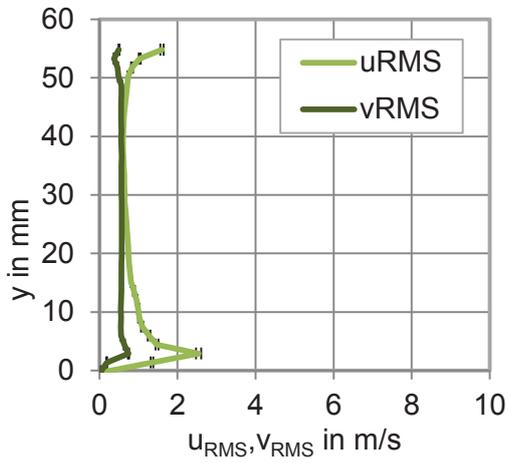
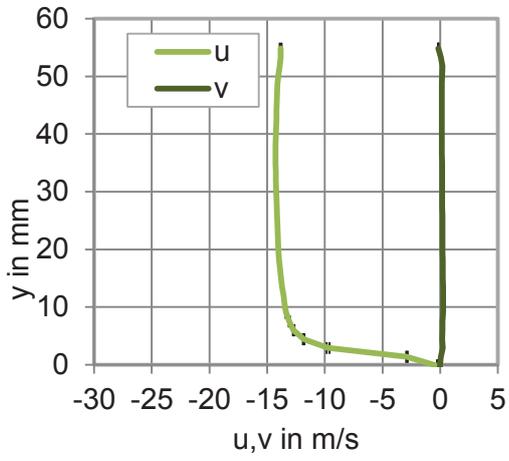
Mp: _ $\dot{V}_{\text{Luft}} = 100 \text{ l/s}$ $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 45 \text{ l/min}$

Außerhalb der Messmatrix

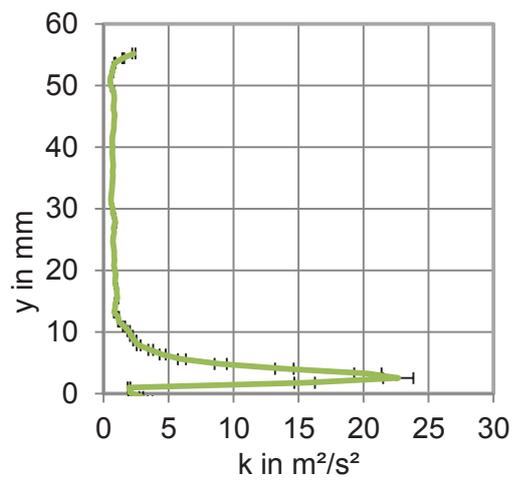
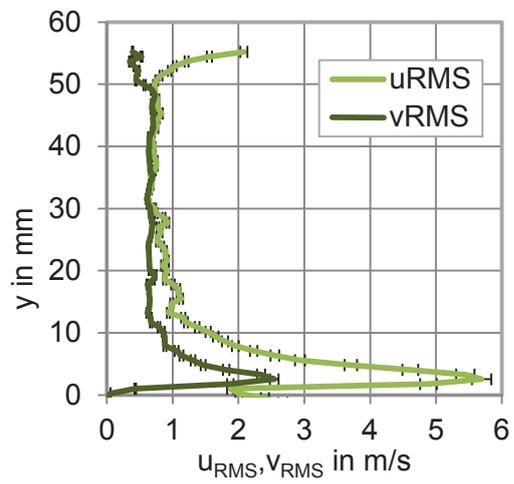
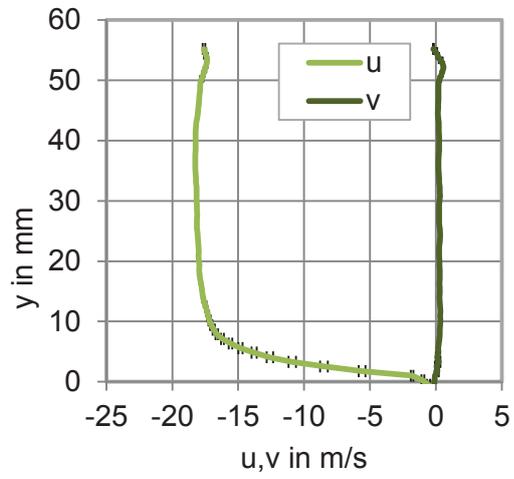


Luftgeschwindigkeit bei schießender Strömung

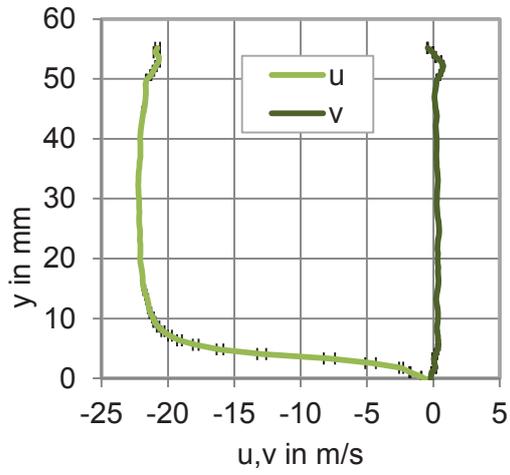
Messpunkt 1 Messposition 0



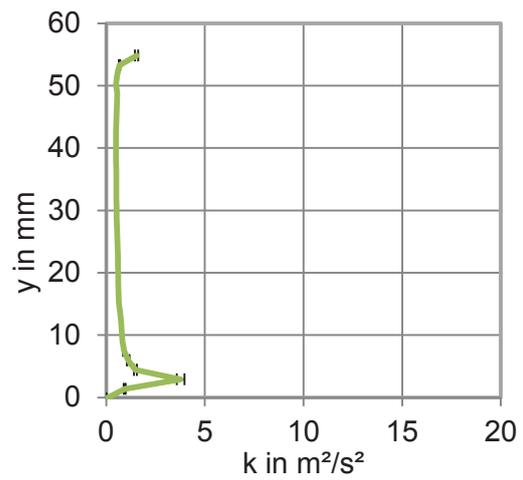
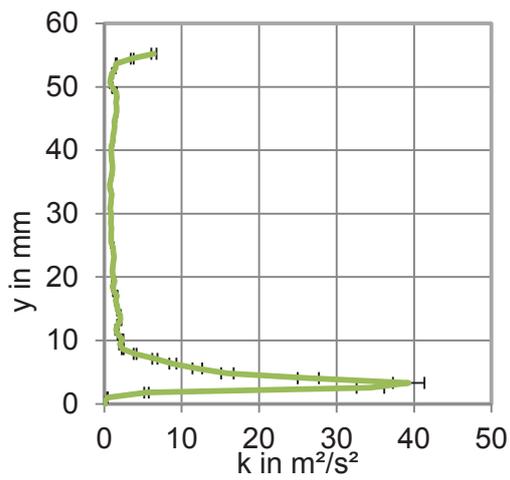
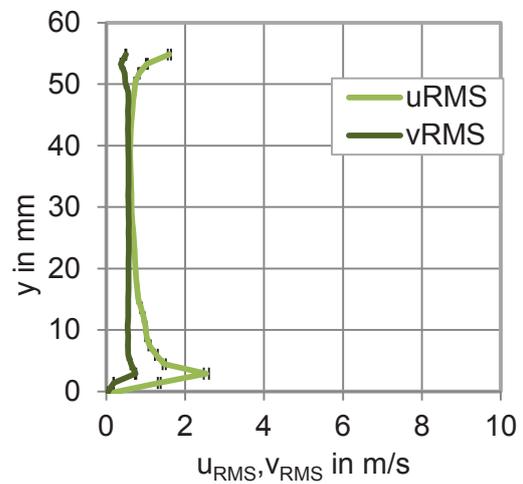
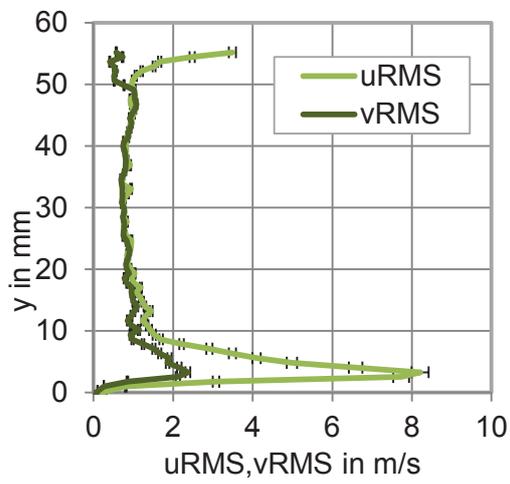
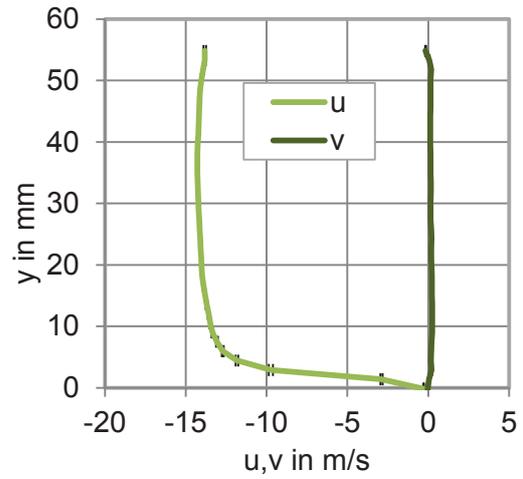
Messpunkt 2 Messposition 0



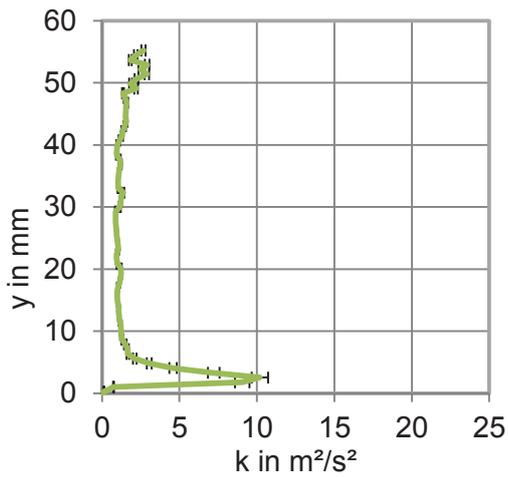
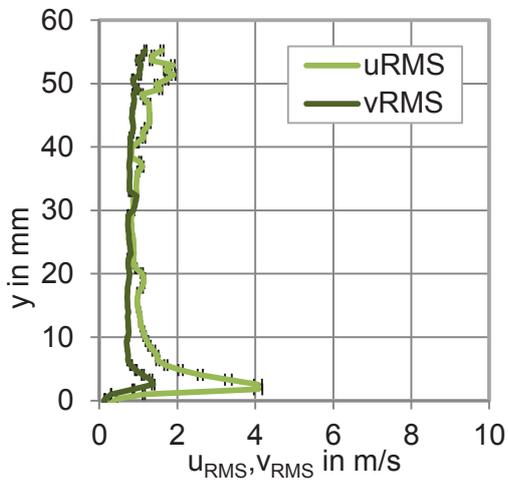
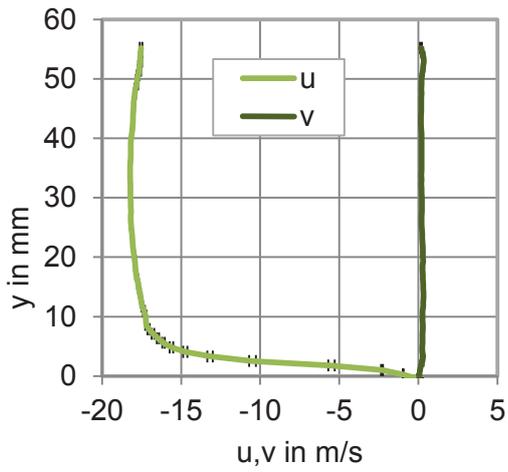
Messpunkt 3 Messposition 0



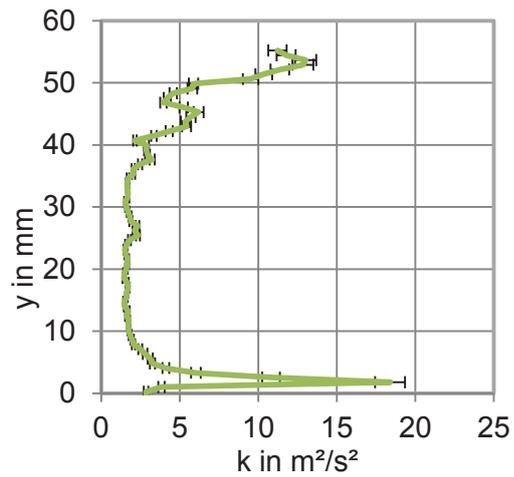
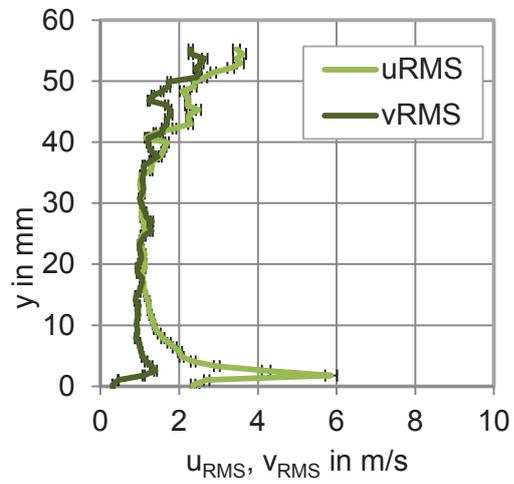
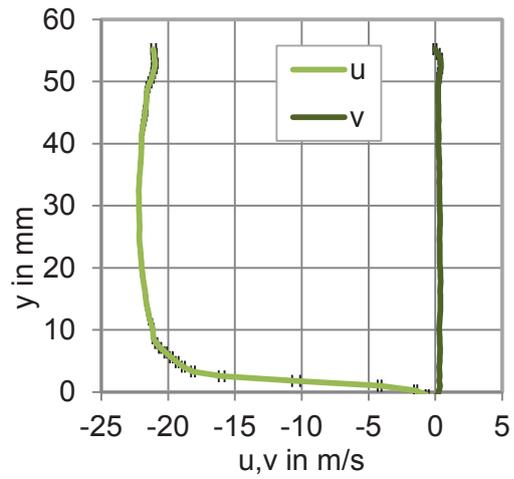
Messpunkt 8 Messposition 0

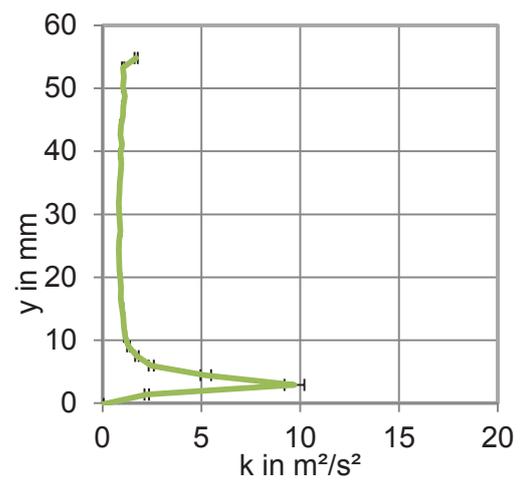
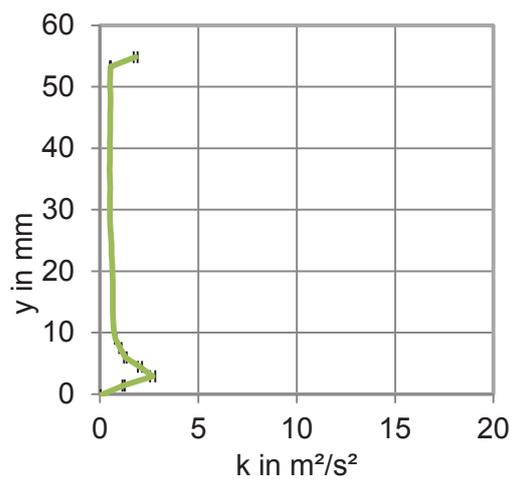
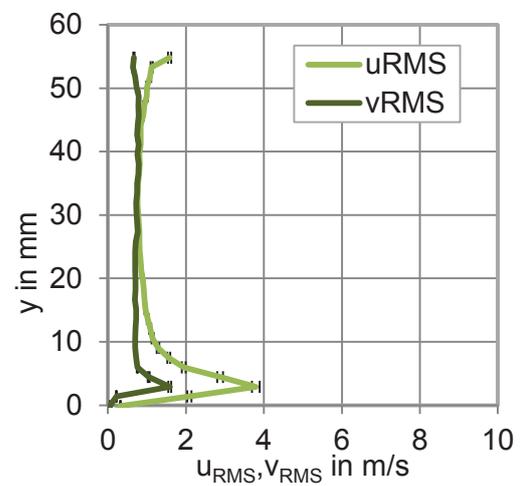
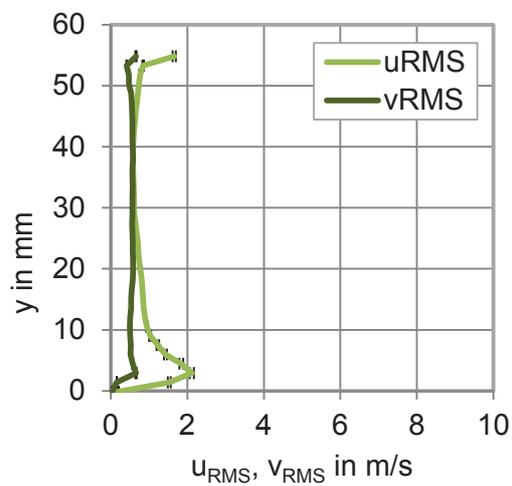
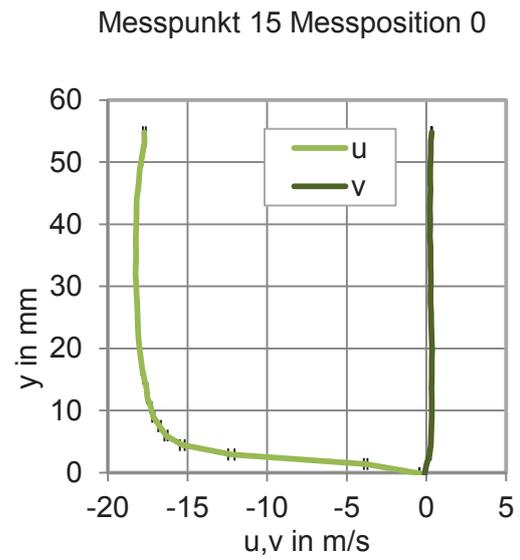
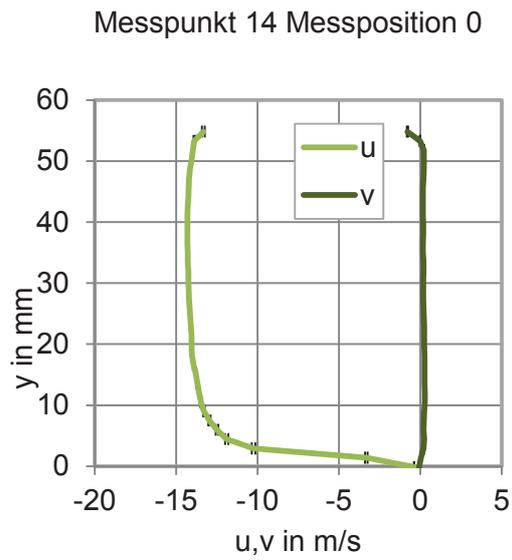


Messpunkt 9 Messposition 0

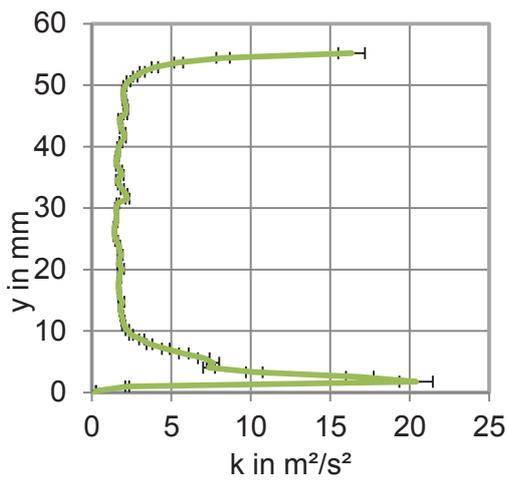
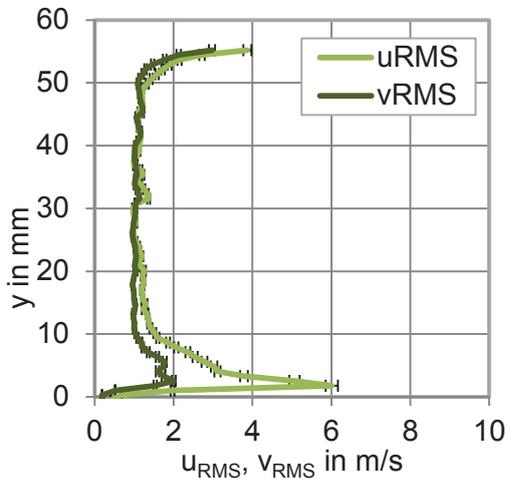
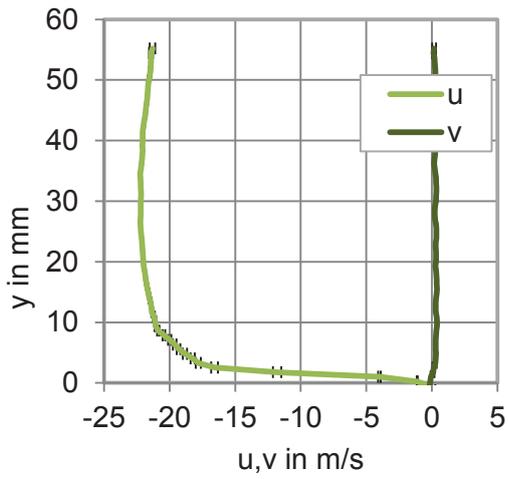


Messpunkt 10 Messposition 0

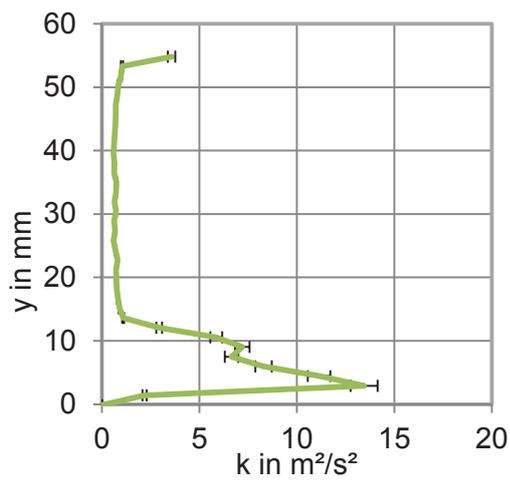
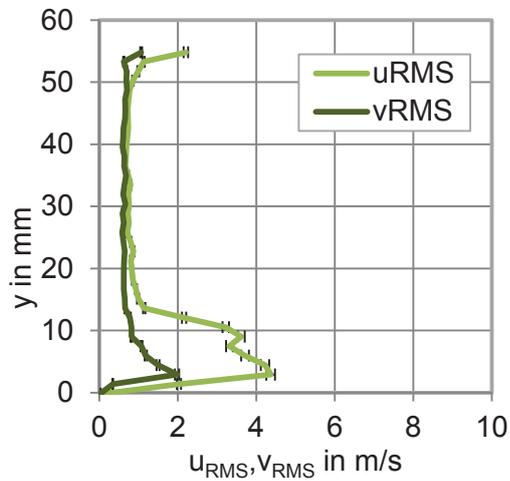
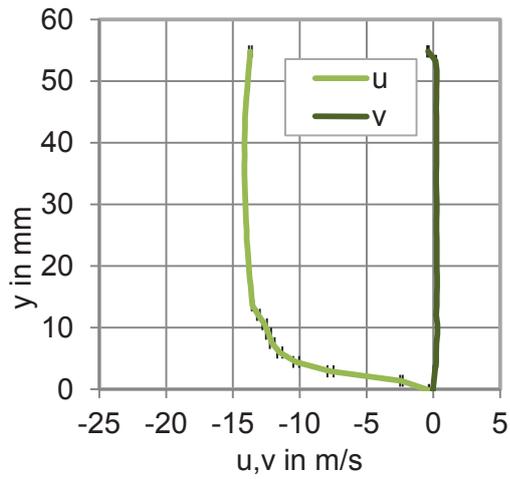




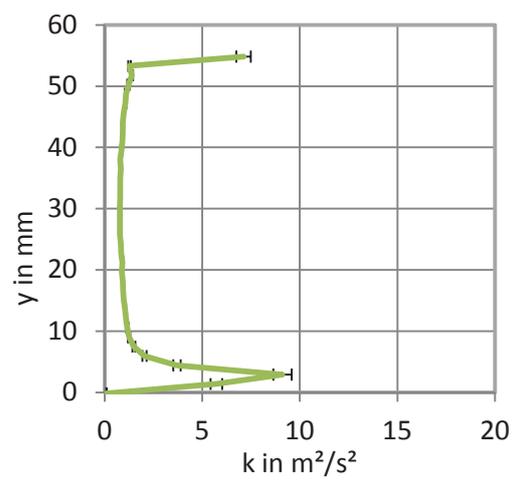
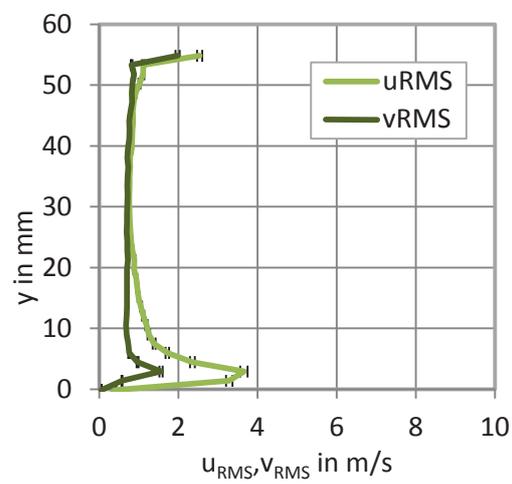
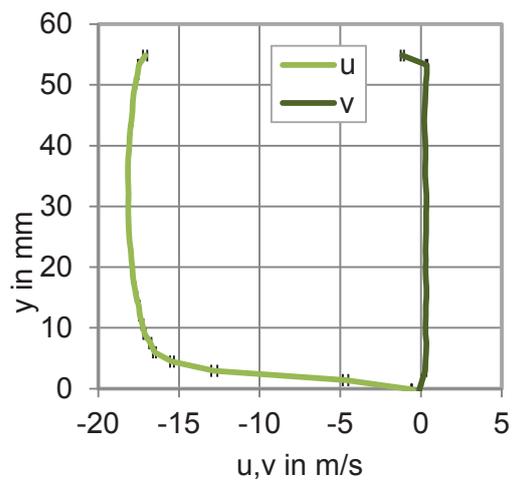
Messpunkt 16 Messposition 0



Messpunkt 21 Messposition 0



Messpunkt 22 Messposition 0



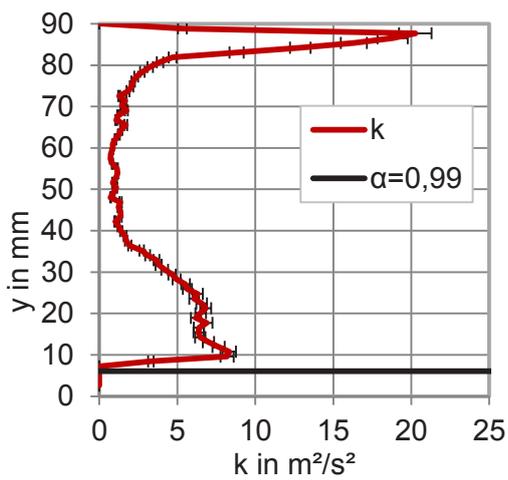
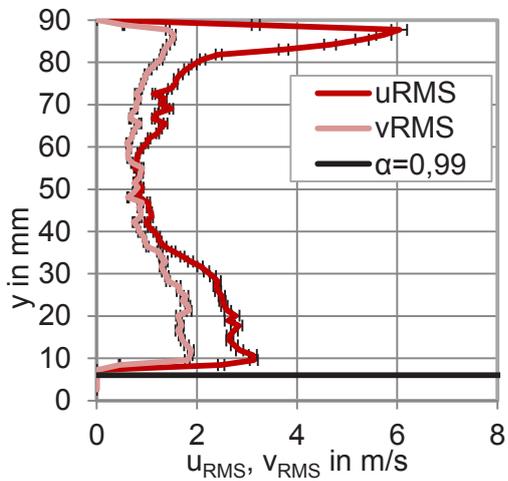
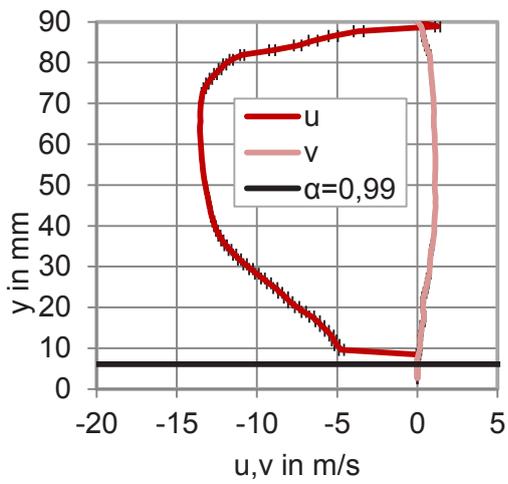
Messpunkt 23 Messposition 0

Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

Messpunkt 1 Messposition 2



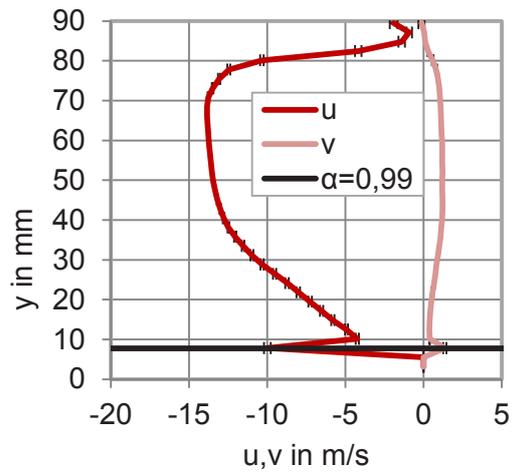
Messpunkt 2 Messposition 2

Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

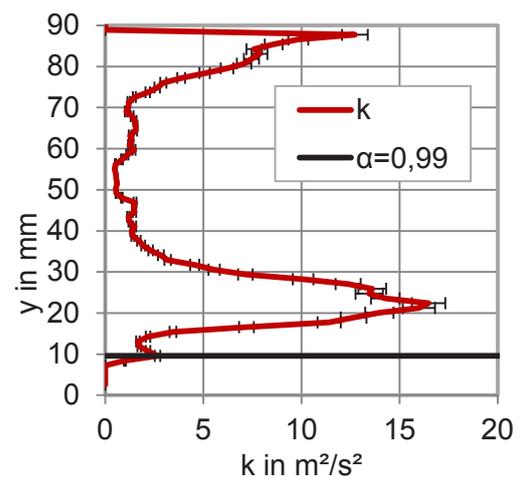
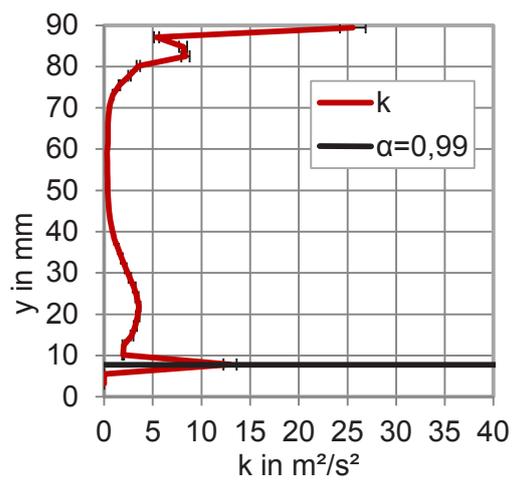
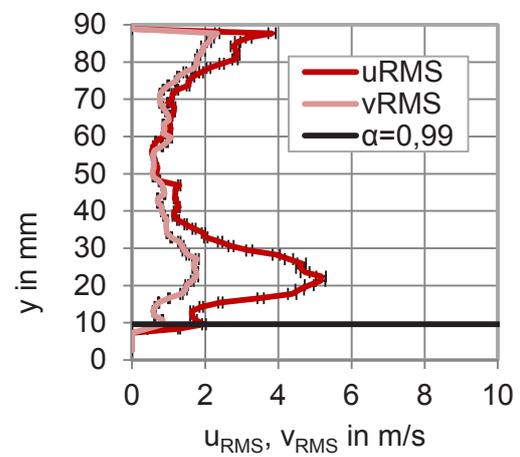
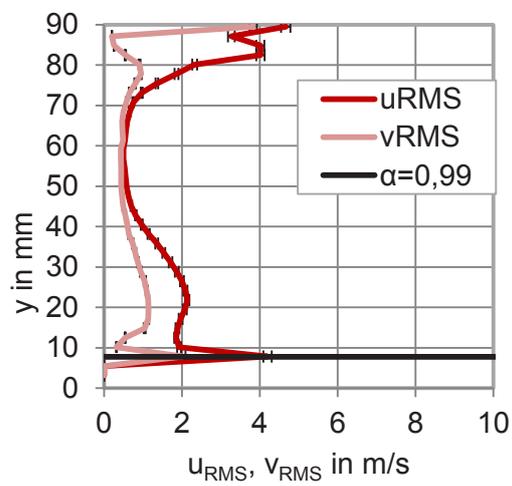
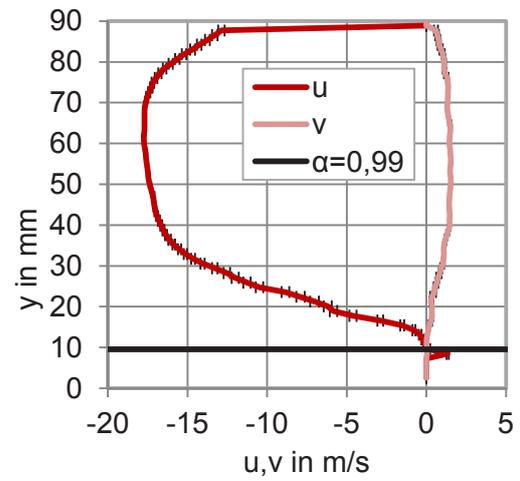
Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

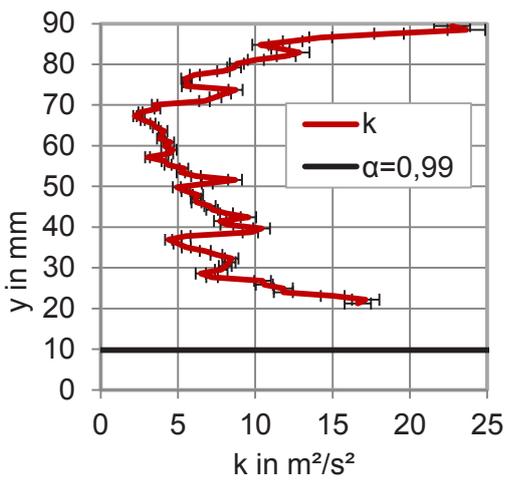
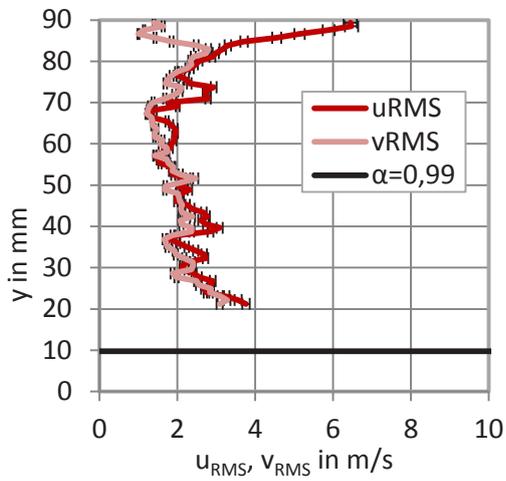
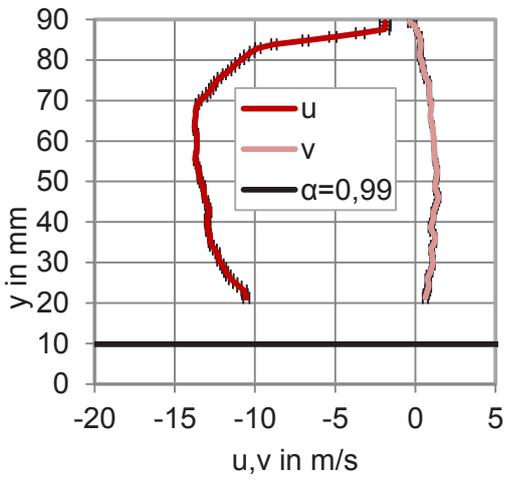
Messpunkt 8 Messposition 2



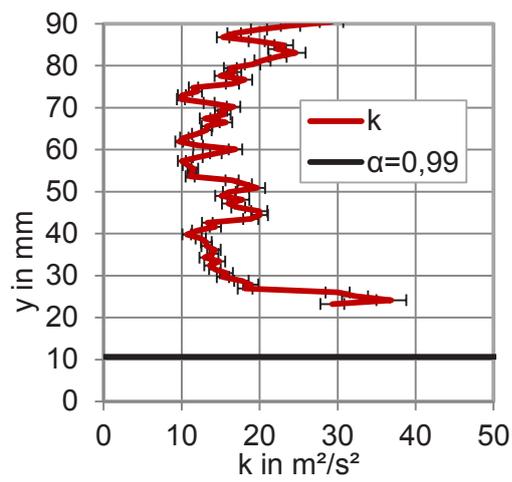
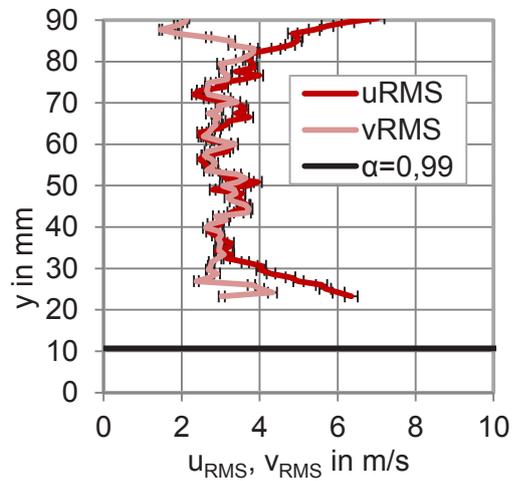
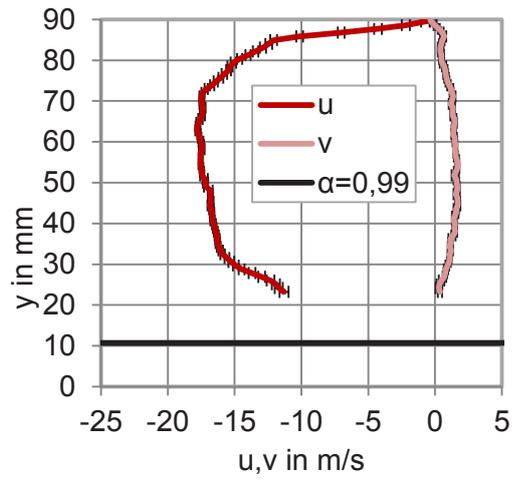
Messpunkt 9 Messposition 2



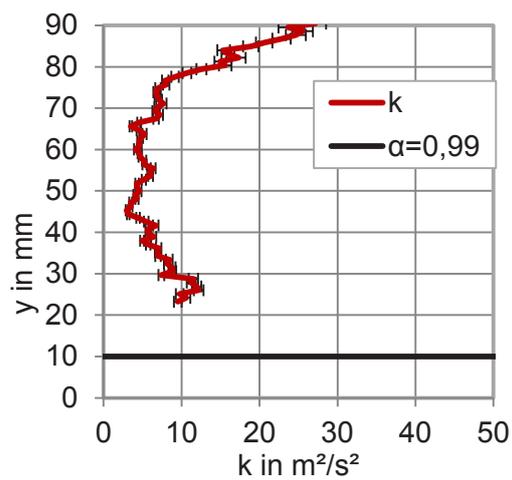
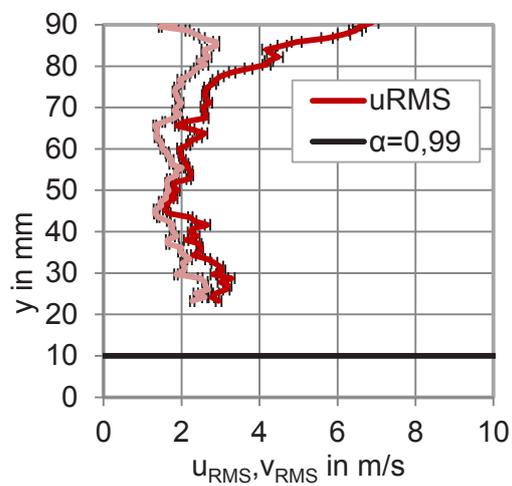
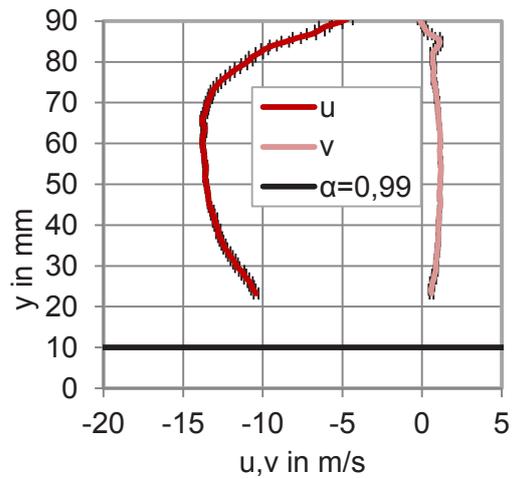
Messpunkt 14 Messposition 2



Messpunkt 15 Messposition 2



Messpunkt 21 Messposition 2



Messpunkt 22 Messposition 2

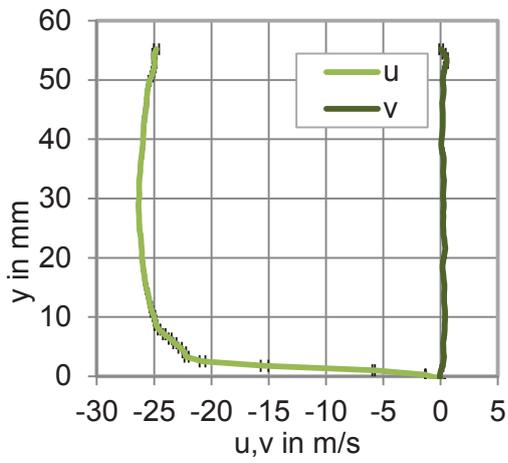
Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

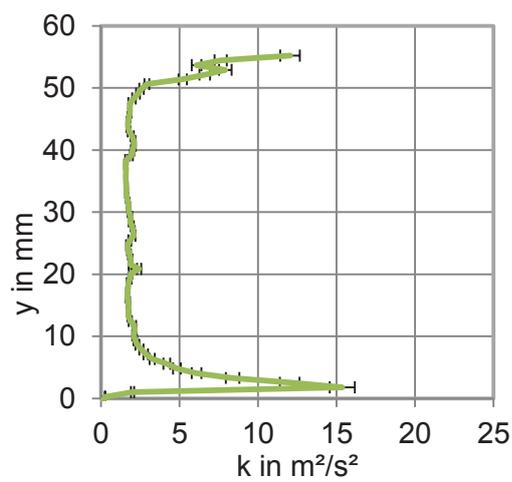
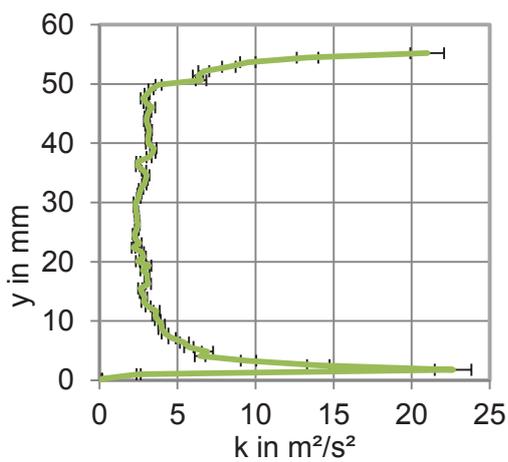
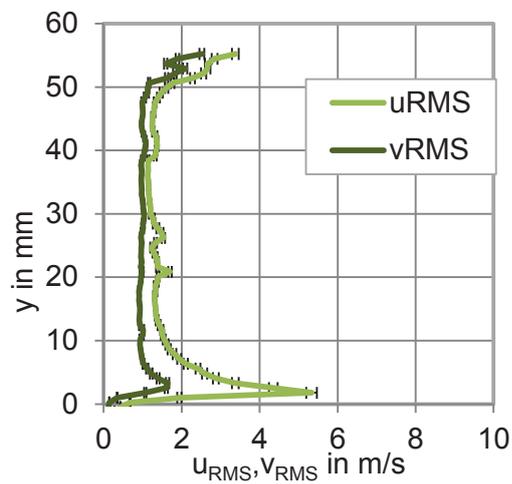
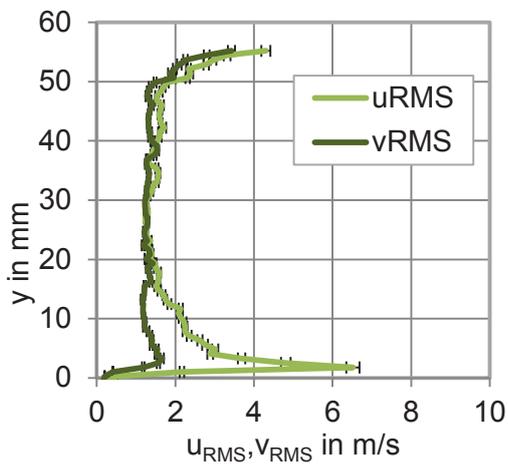
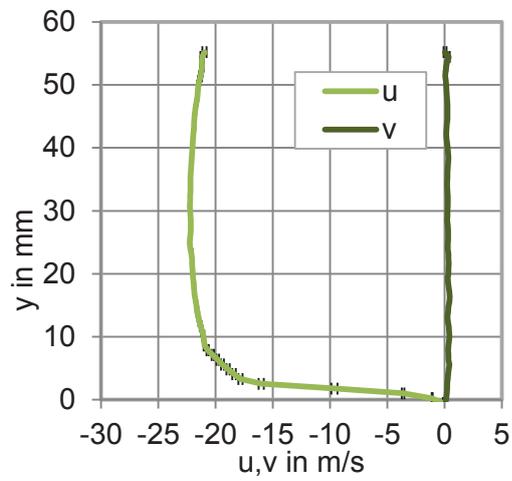
Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

Luftgeschwindigkeit bei umgekehrter Strömung

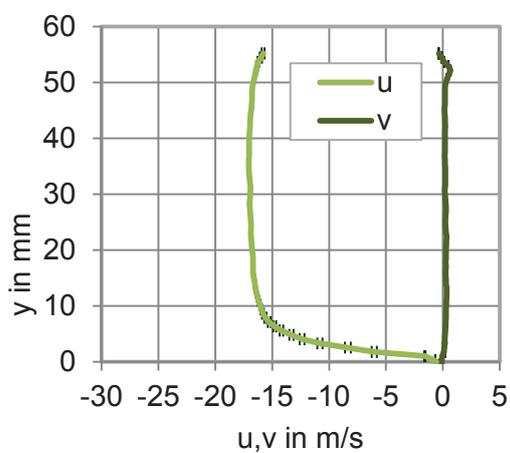
Messpunkt 4 Messposition 0



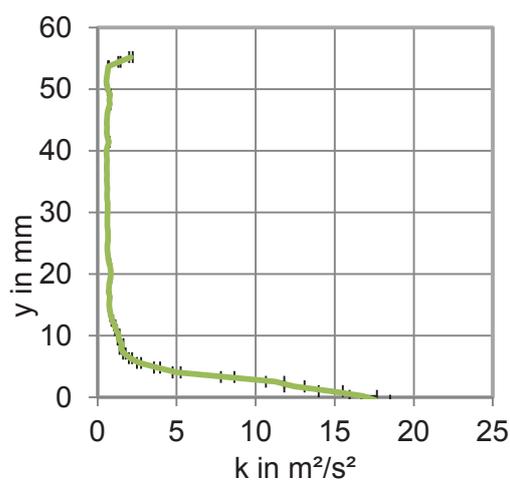
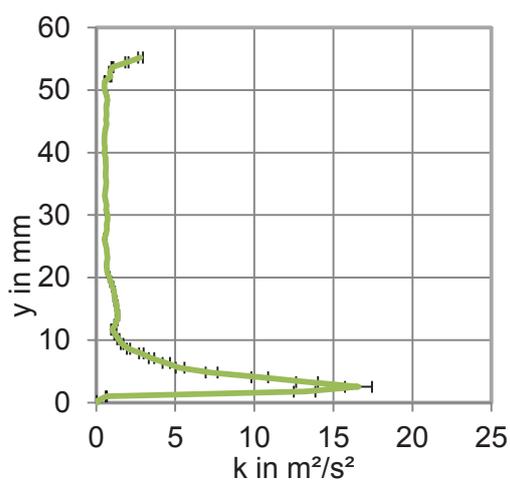
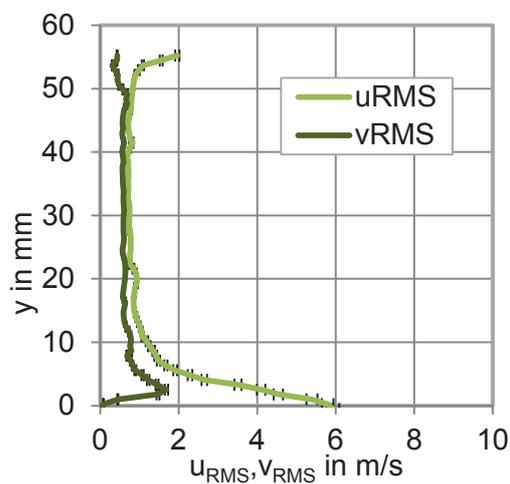
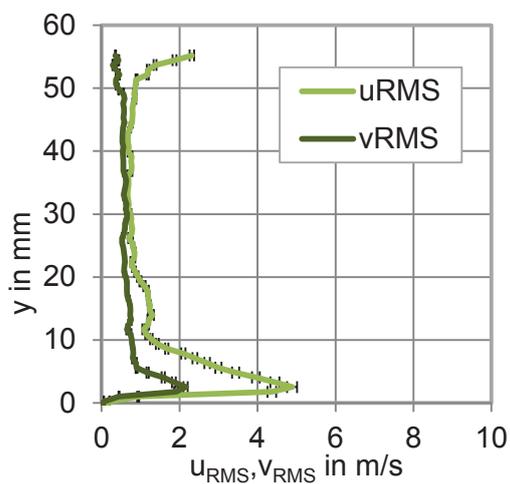
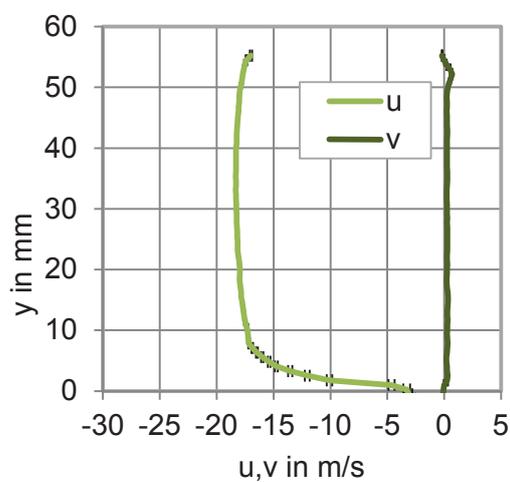
Messpunkt 5 Messposition 0



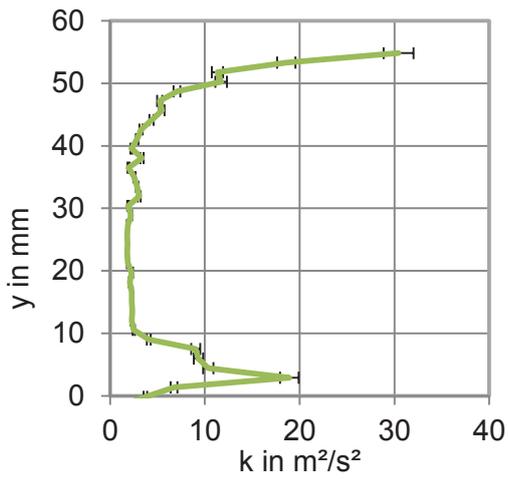
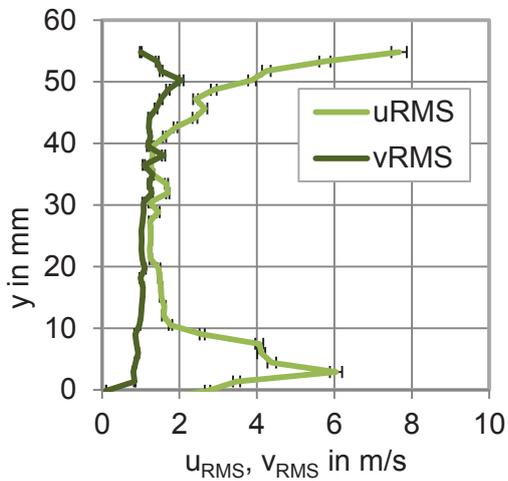
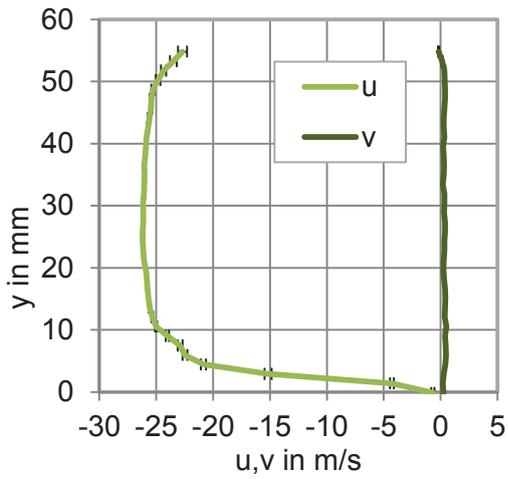
Messpunkt 6 Messposition 0



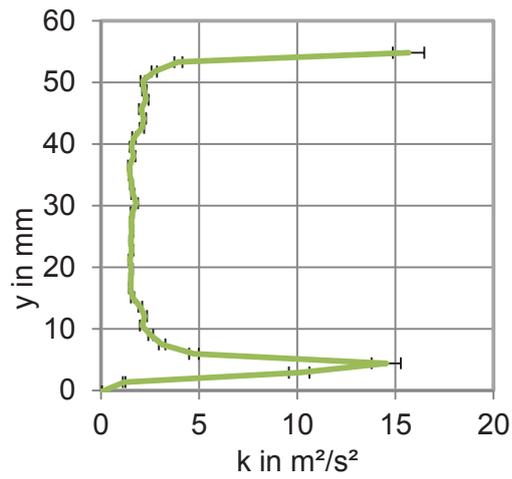
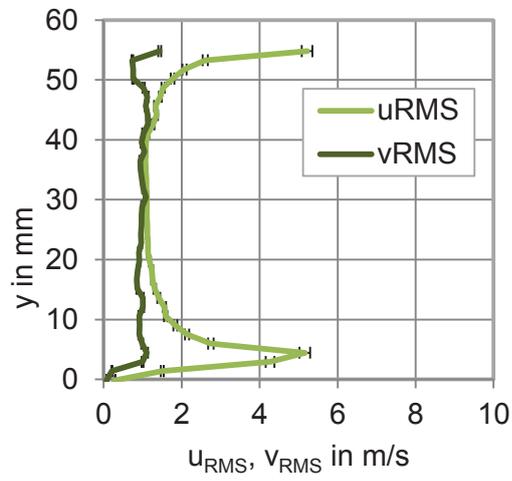
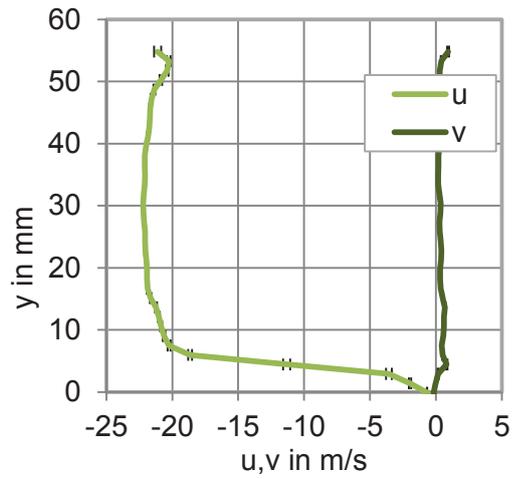
Messpunkt 7 Messposition 0

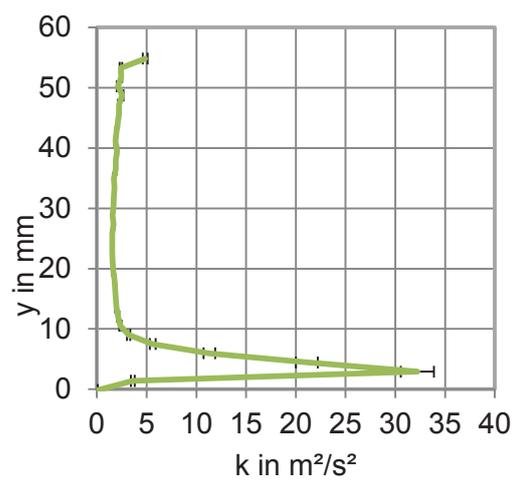
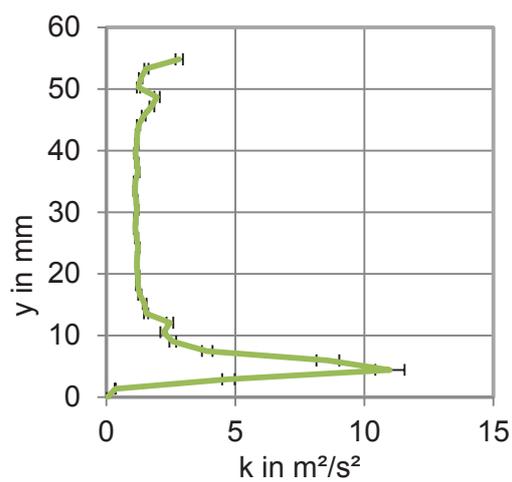
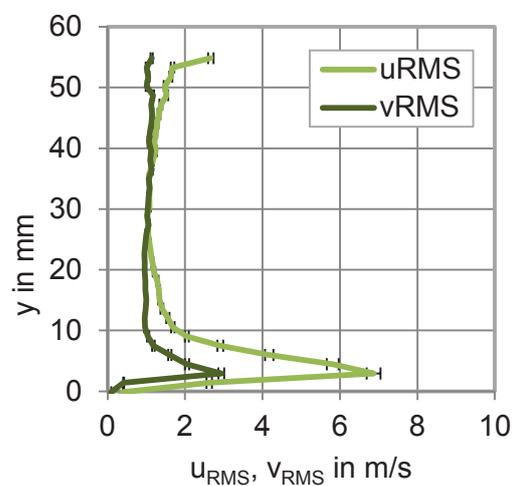
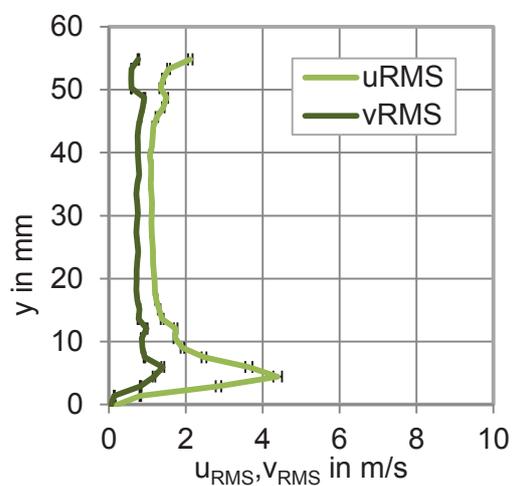
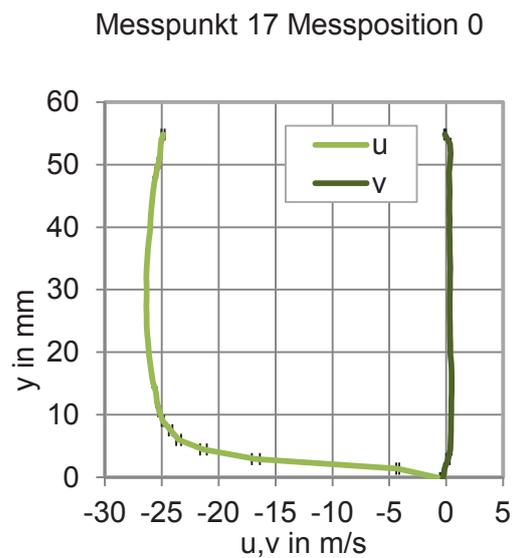
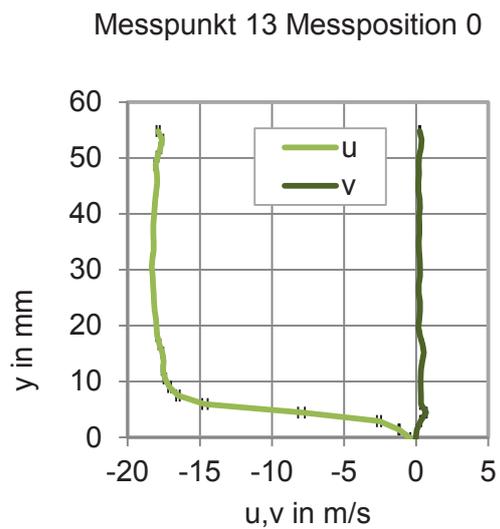


Messpunkt 11 Messposition 0

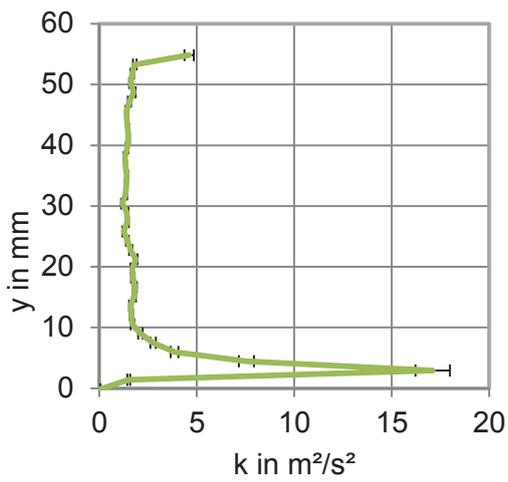
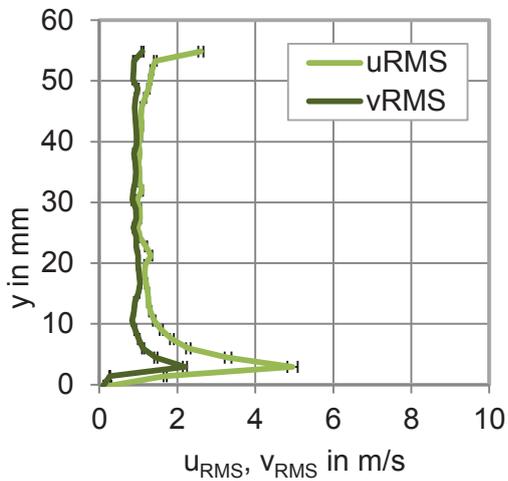
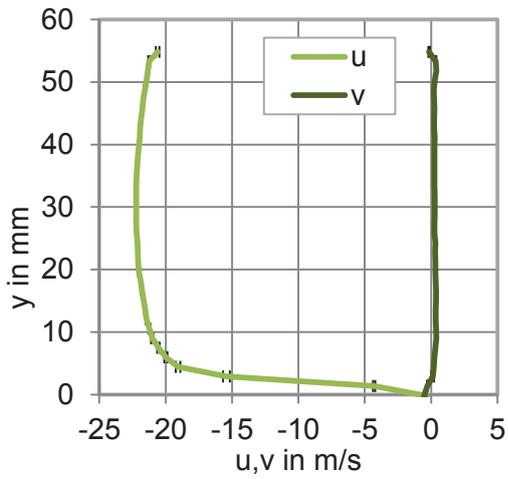


Messpunkt 12 Messposition 0

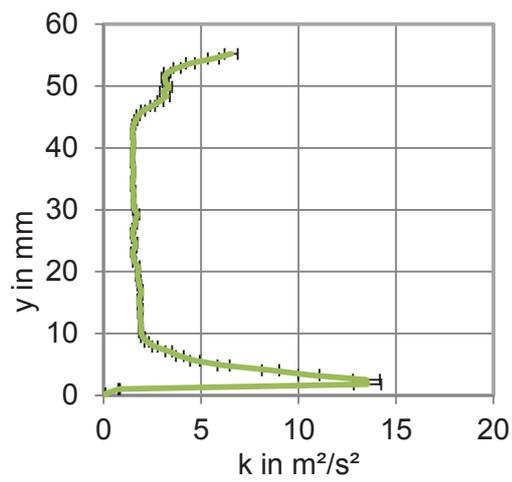
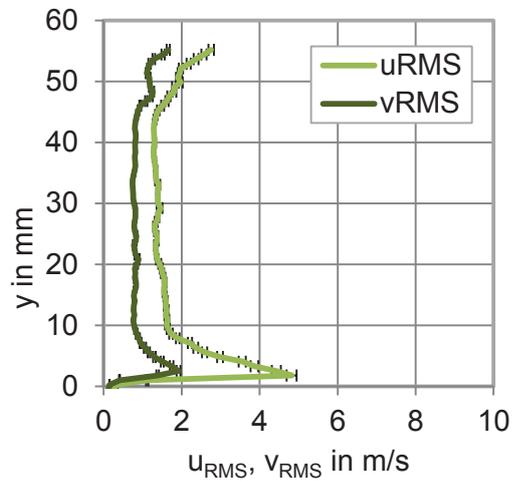
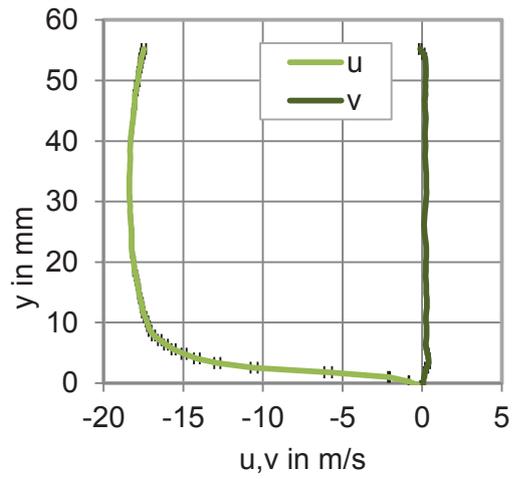


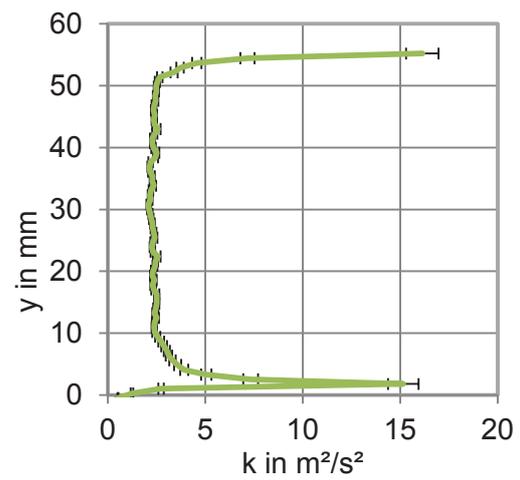
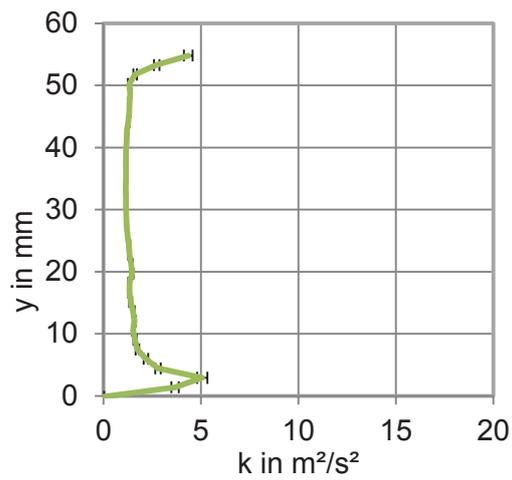
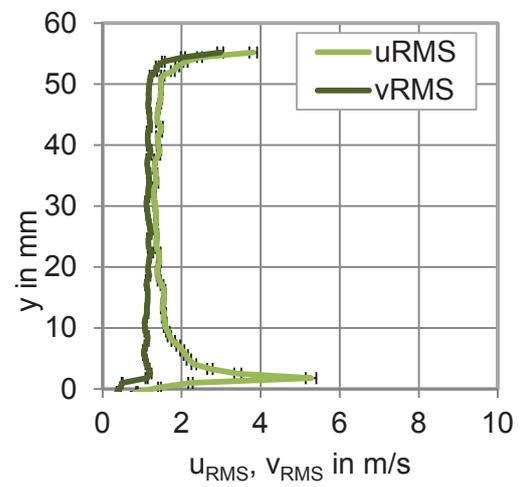
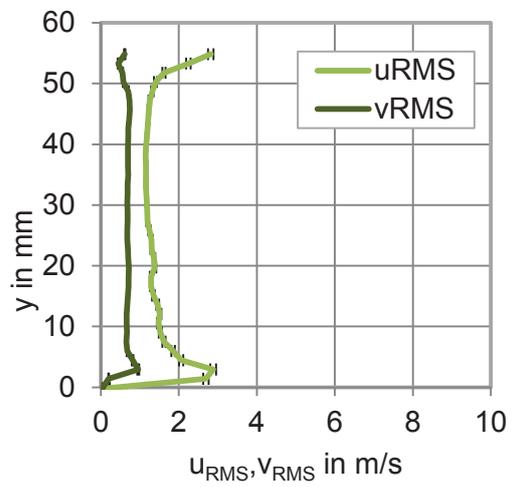
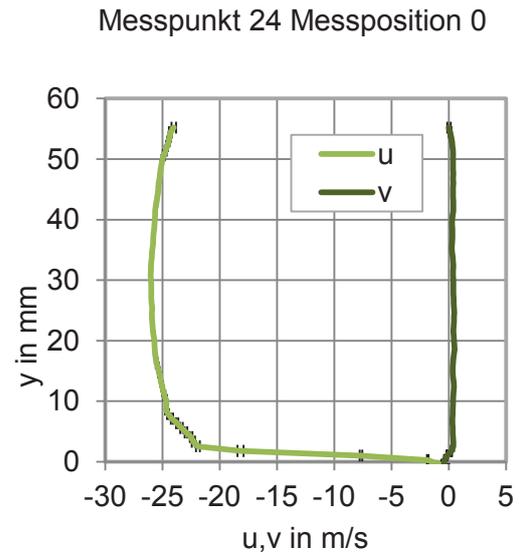
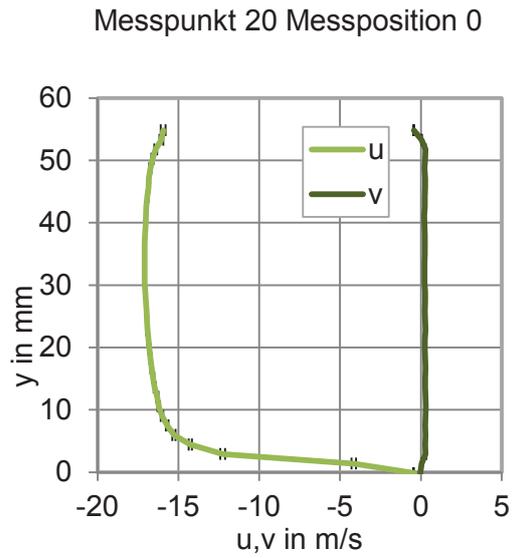


Messpunkt 18 Messposition 0

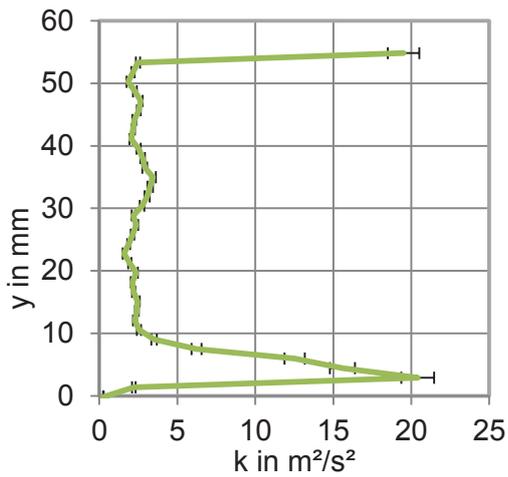
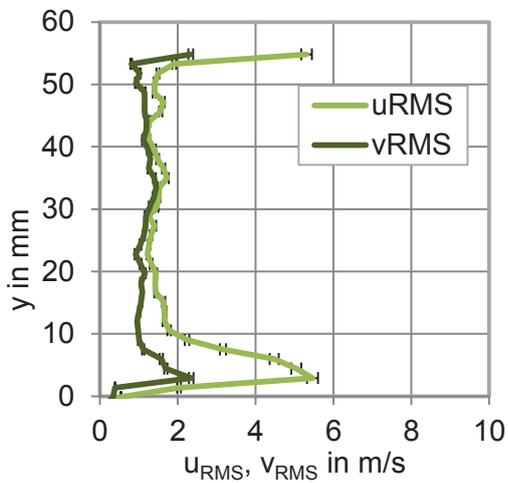
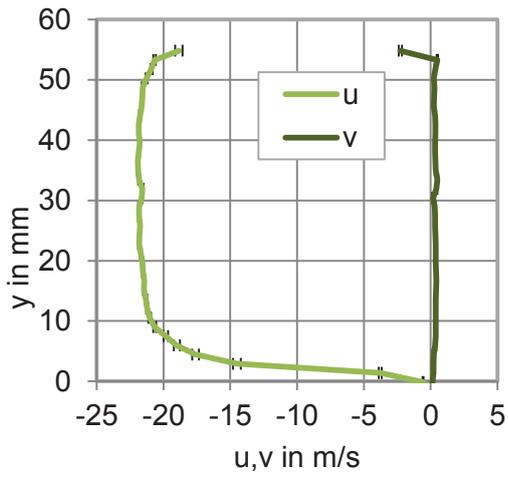


Messpunkt 19 Messposition 0

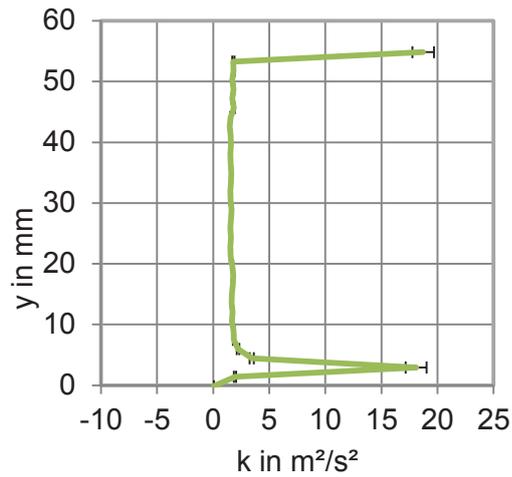
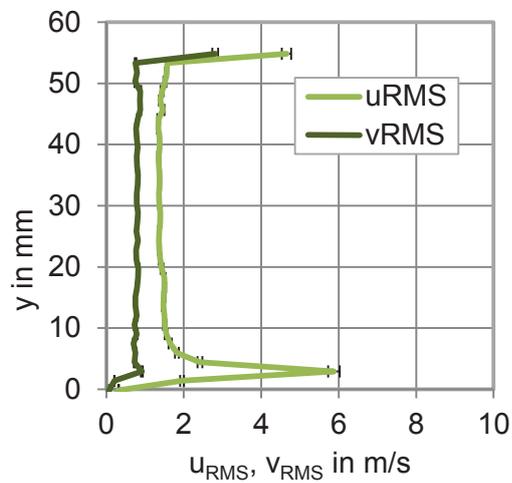
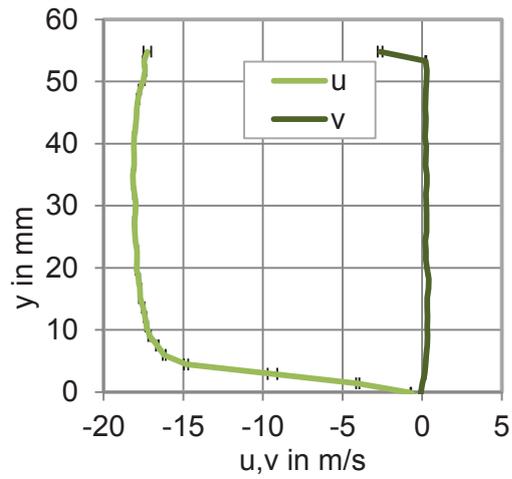


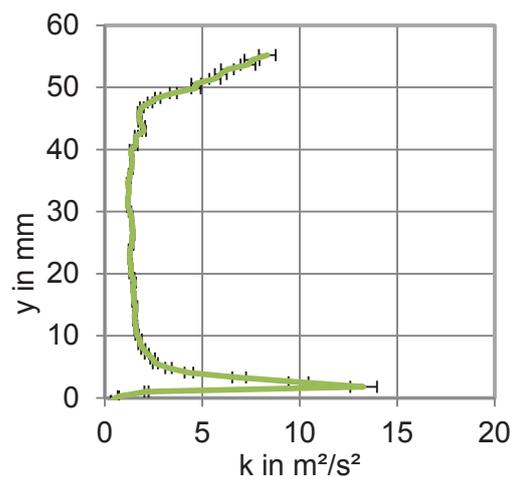
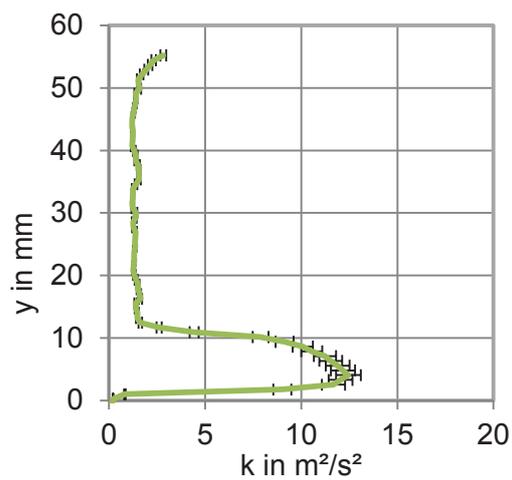
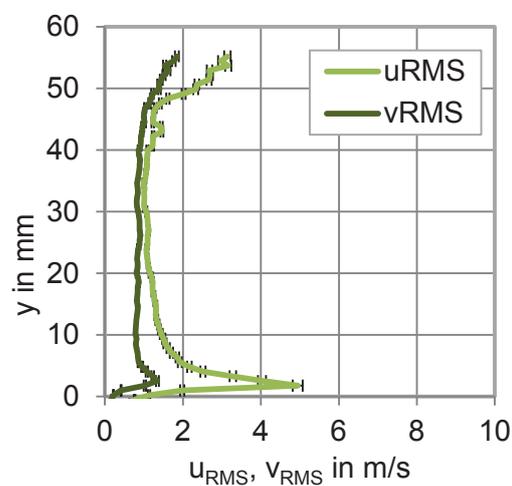
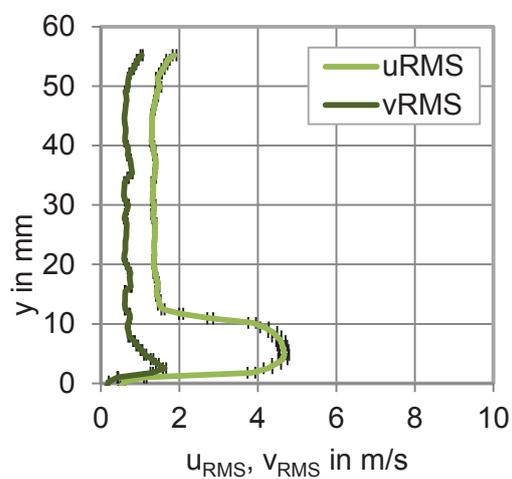
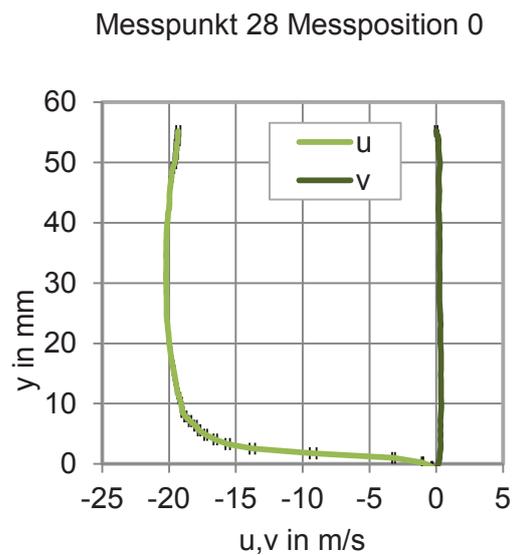
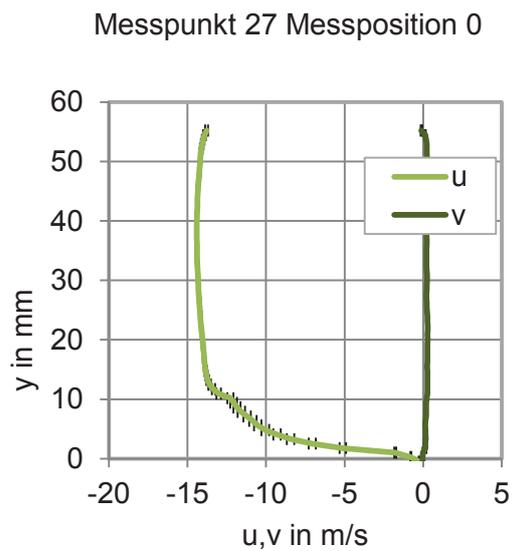


Messpunkt 25 Messposition 0

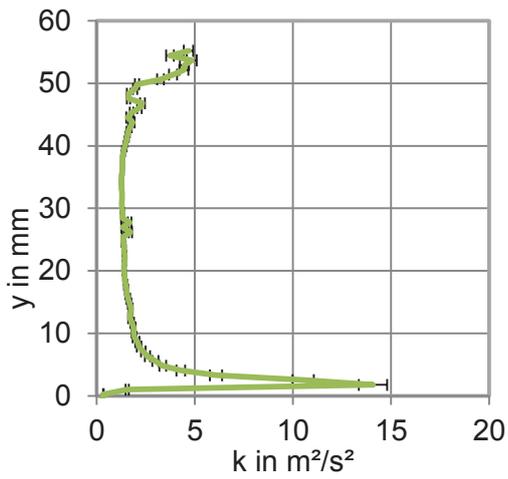
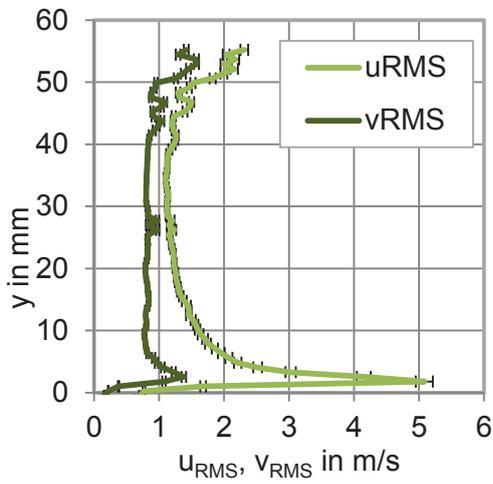
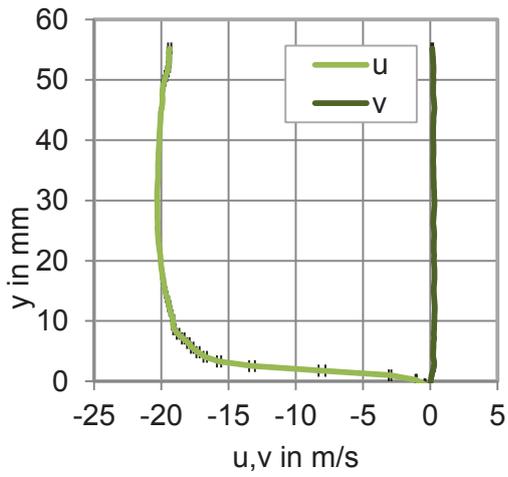


Messpunkt 26 Messposition 0

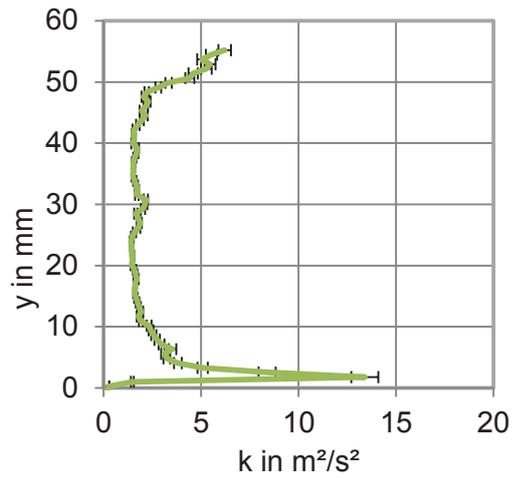
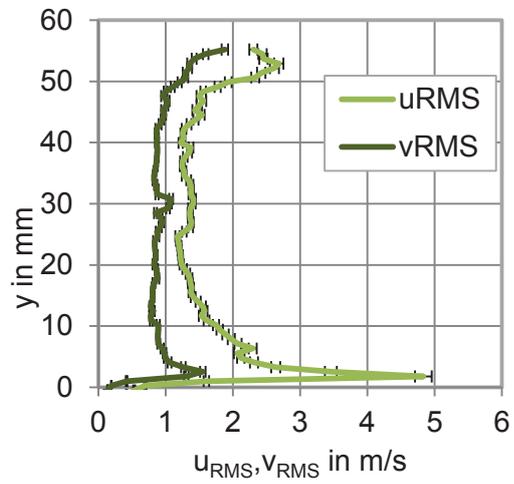
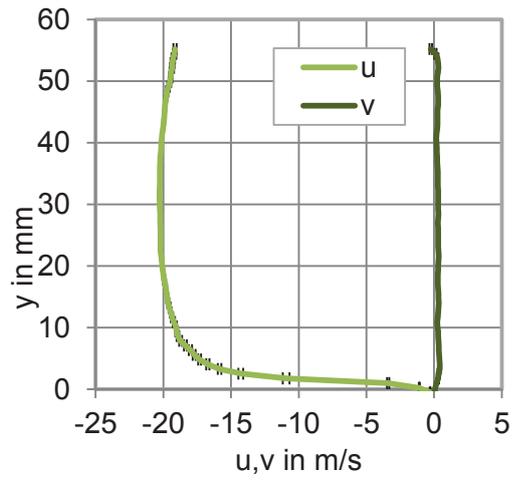




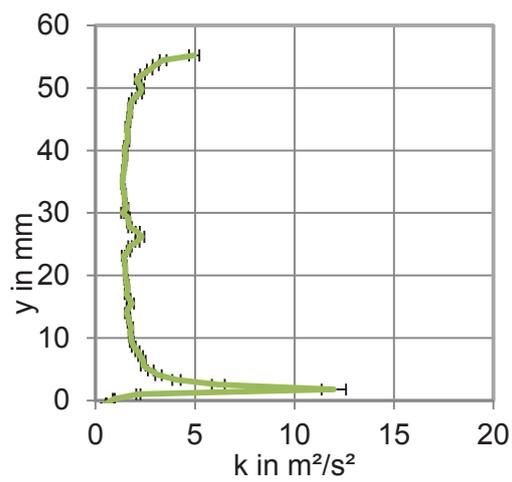
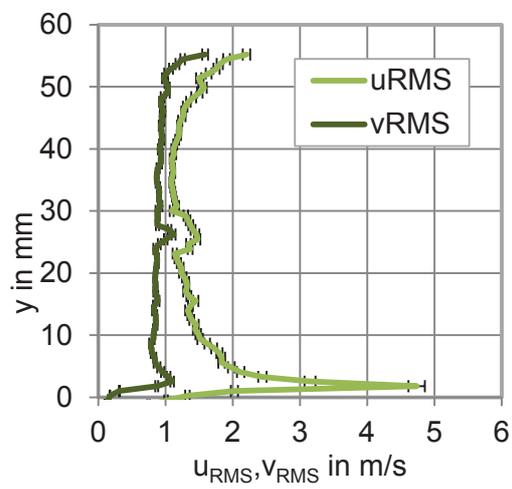
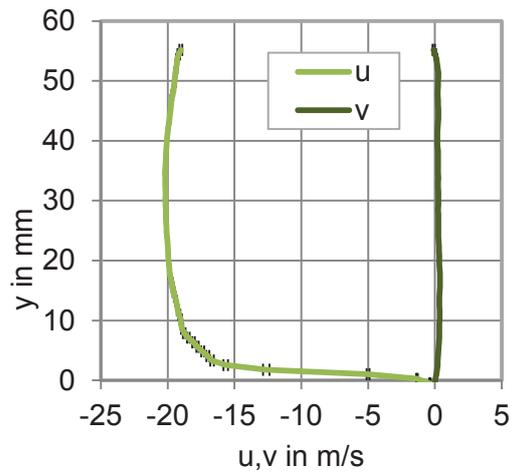
Messpunkt 29 Messposition 0



Messpunkt 30 Messposition 0

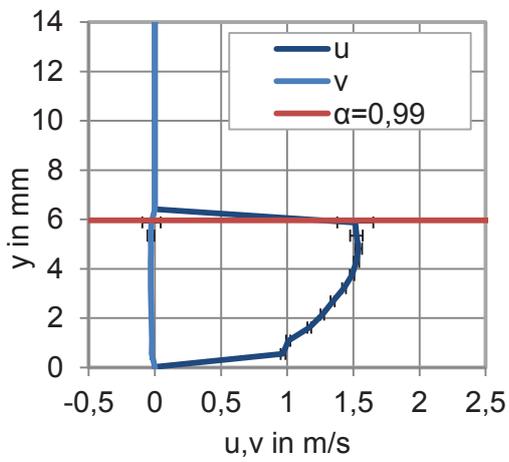


Messpunkt 31 Messposition 0

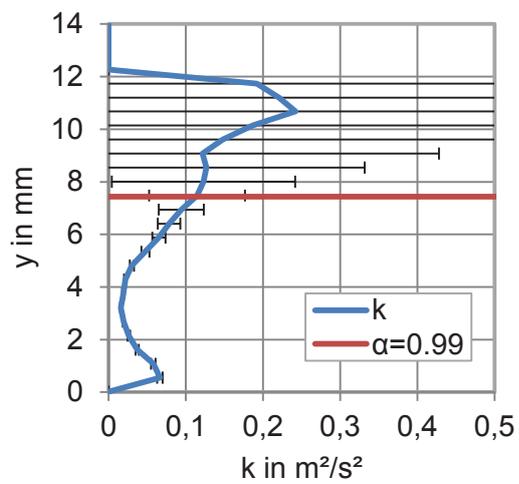
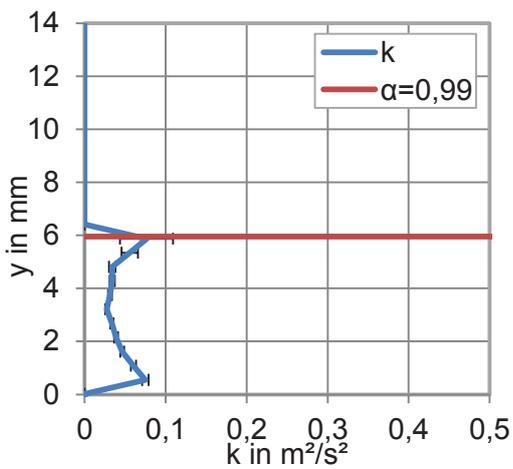
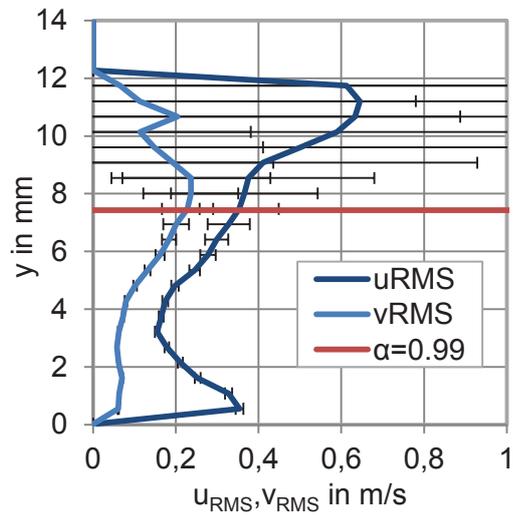
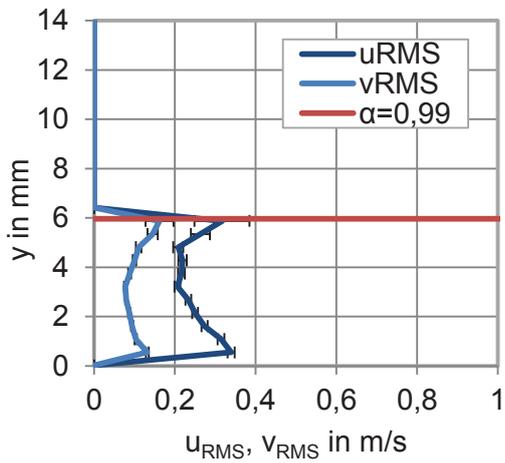
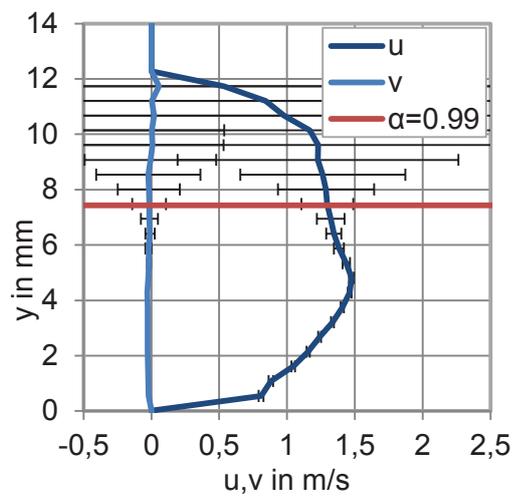


Wassergeschwindigkeit bei schießender Strömung

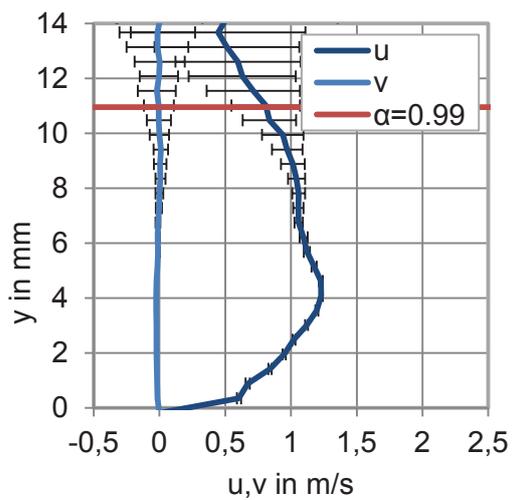
Messpunkt 1 Messposition 1



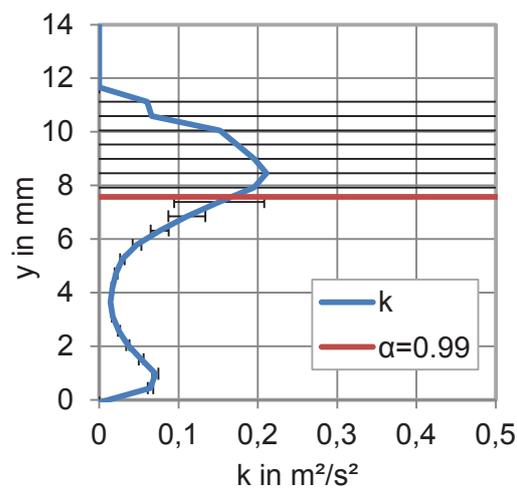
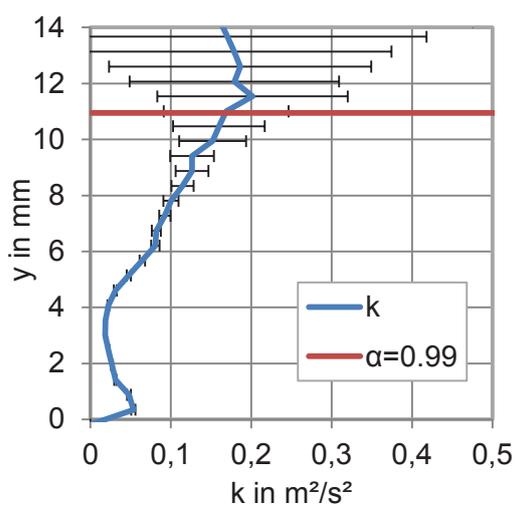
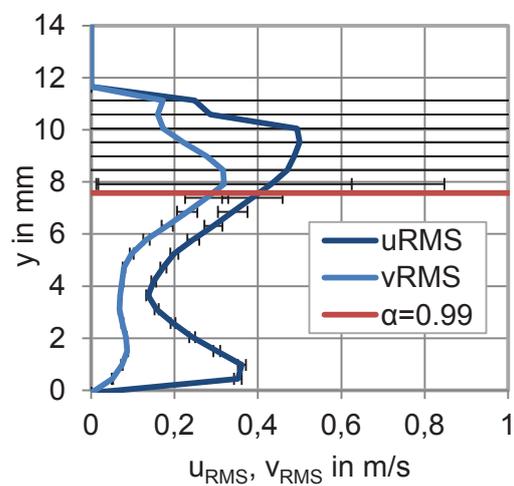
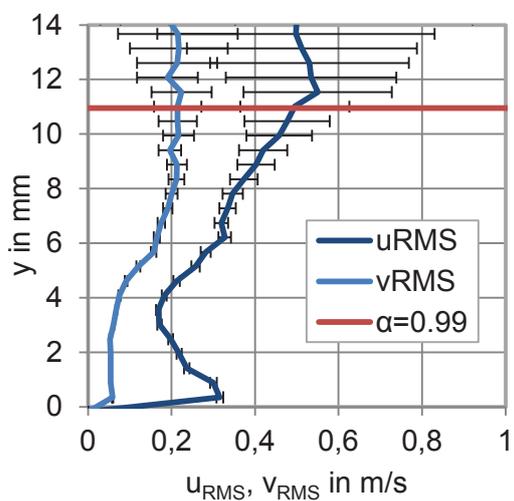
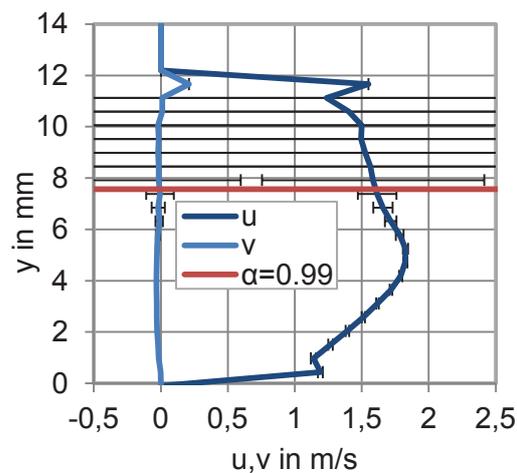
Messpunkt 2 Messposition 1



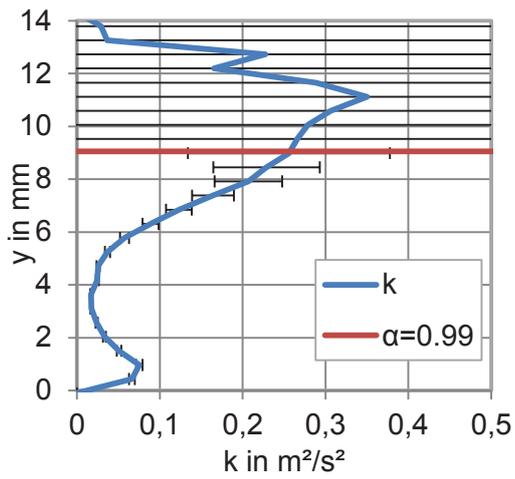
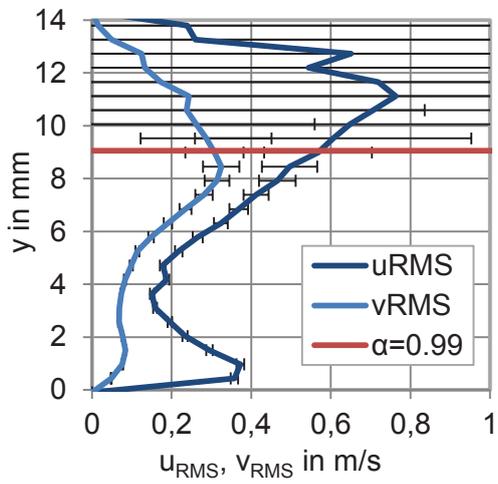
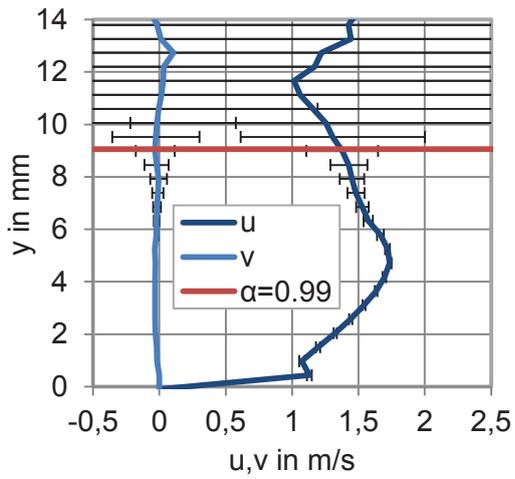
Messpunkt 3 Messposition 1



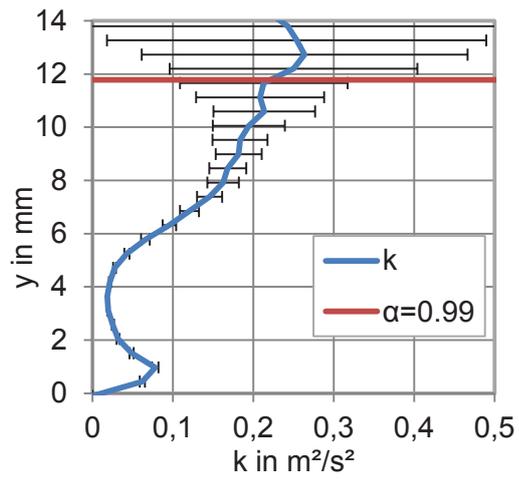
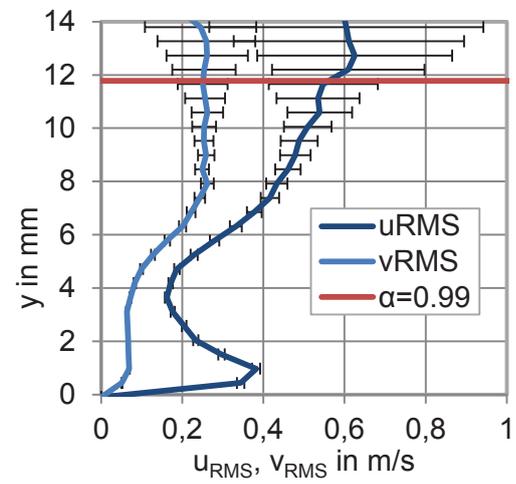
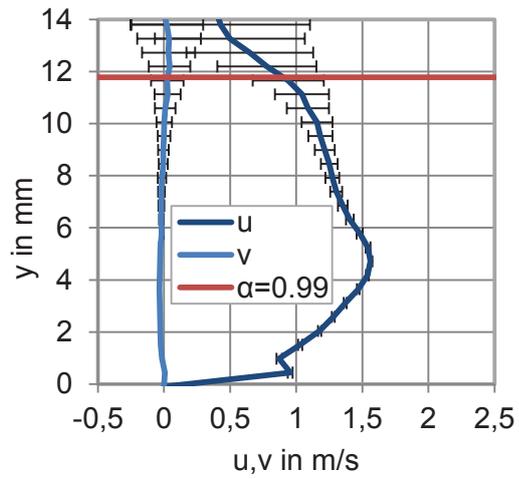
Messpunkt 8 Messposition 1

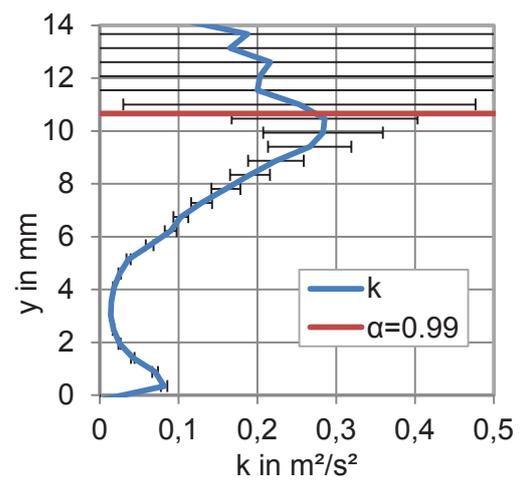
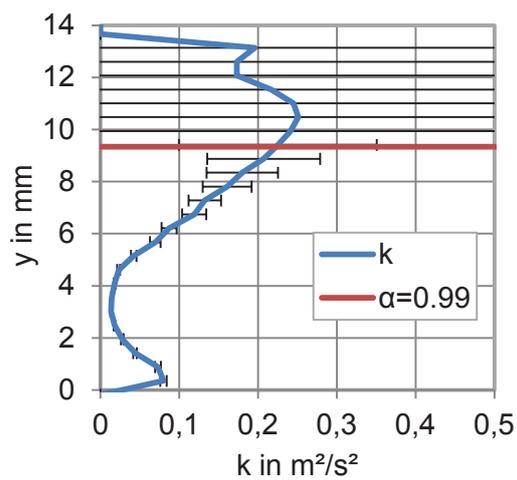
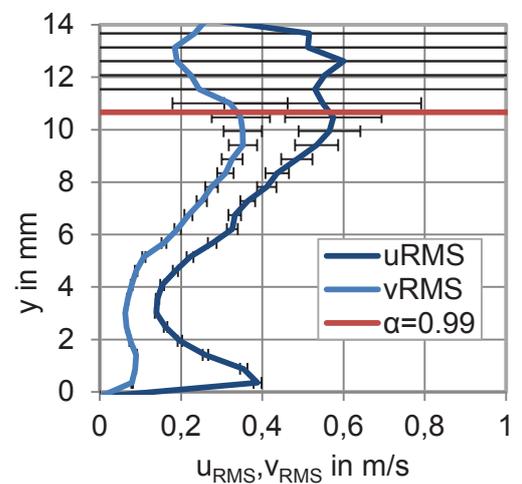
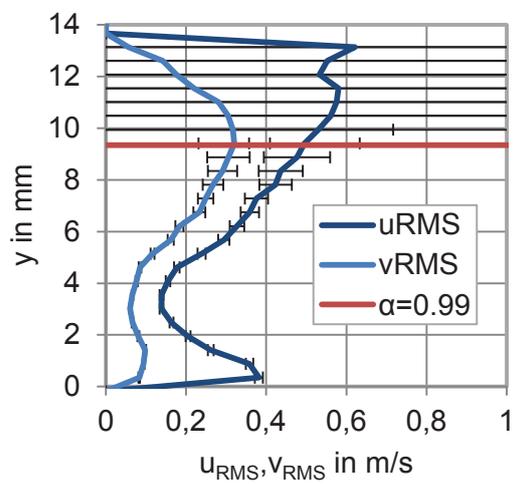
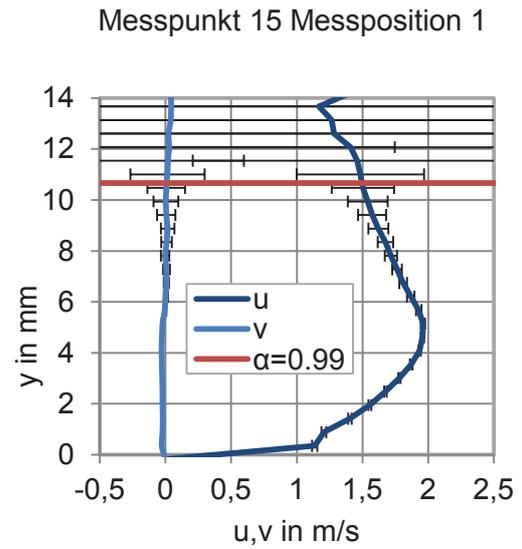
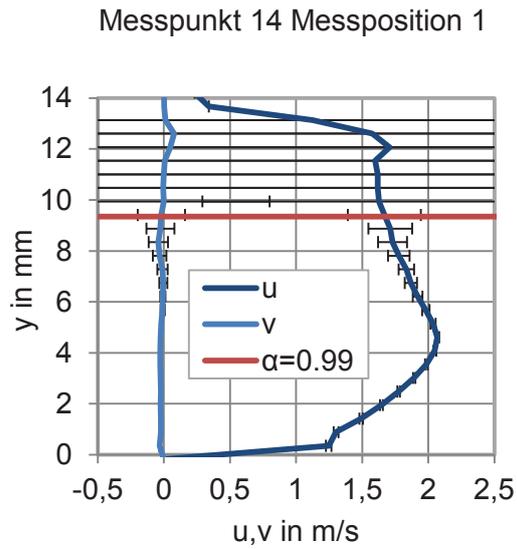


Messpunkt 9 Messposition 1

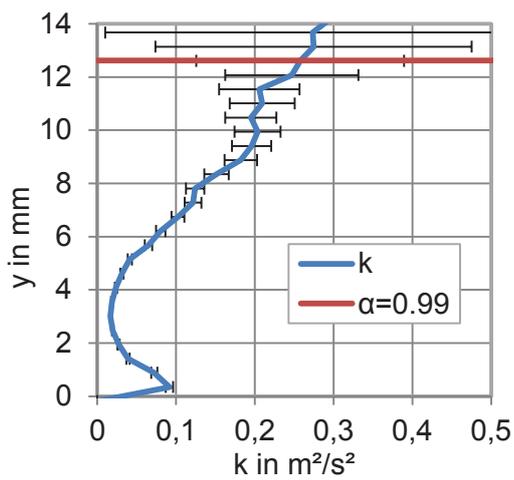
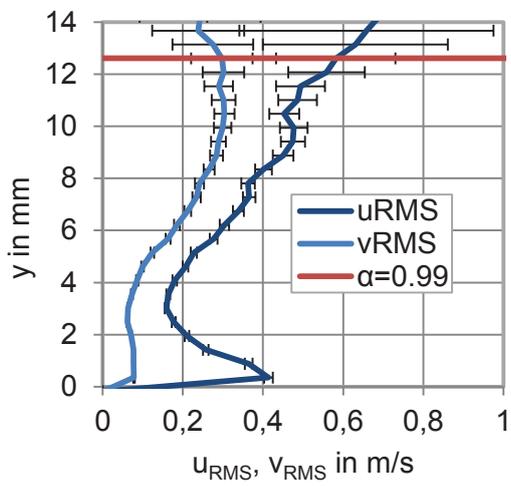
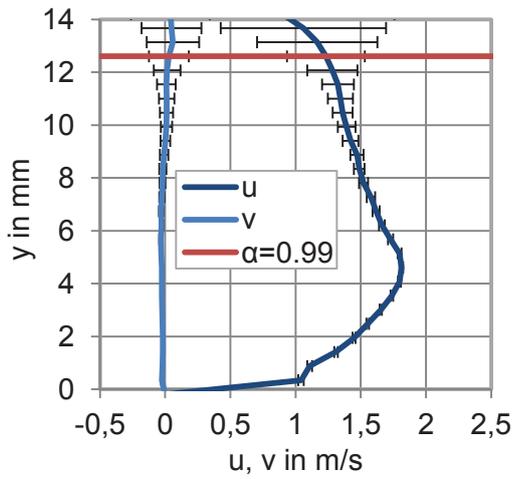


Messpunkt 10 Messposition 1

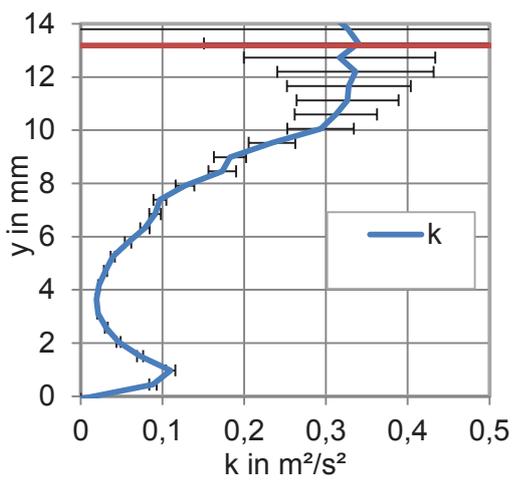
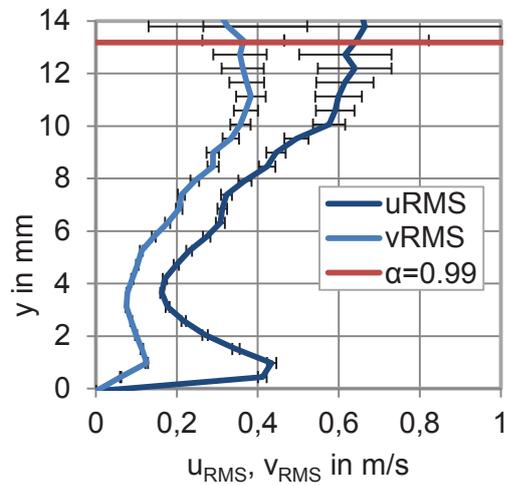
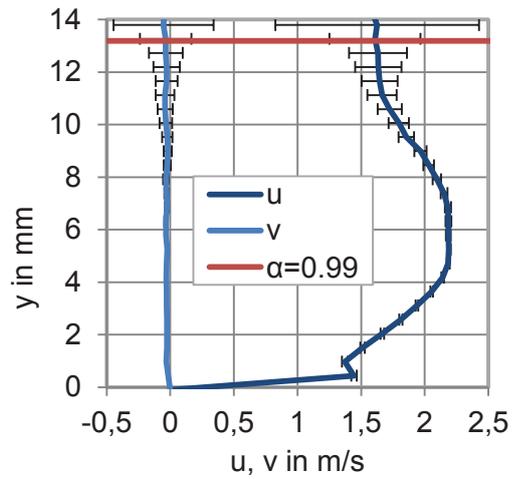


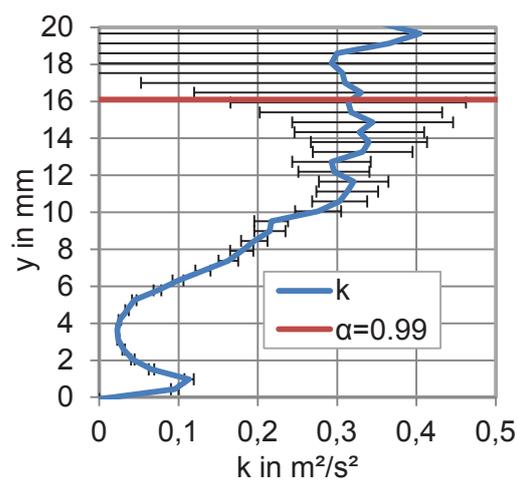
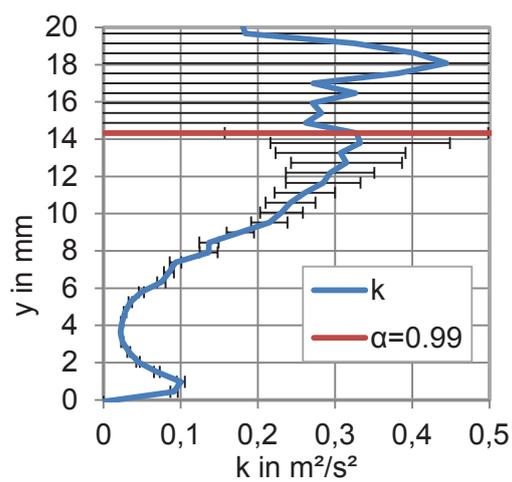
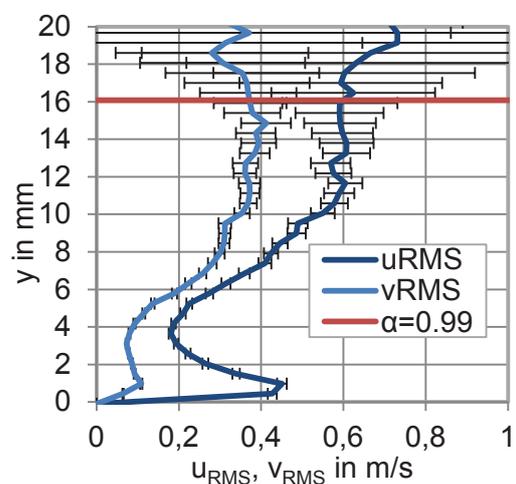
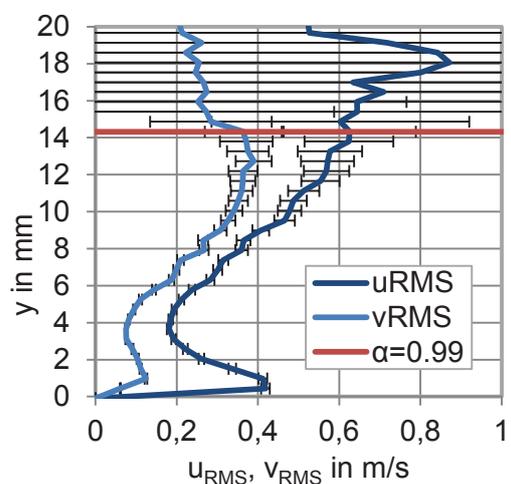
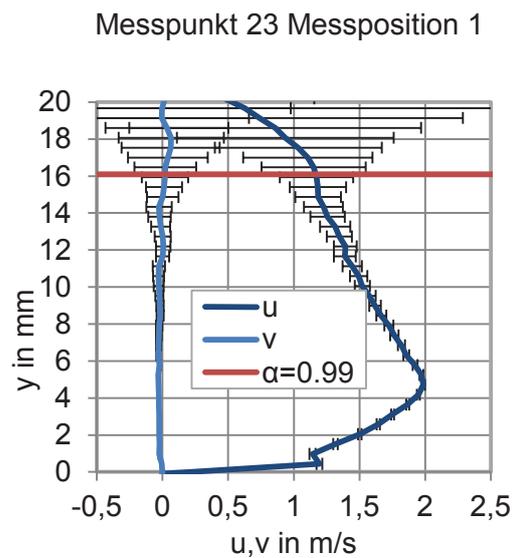
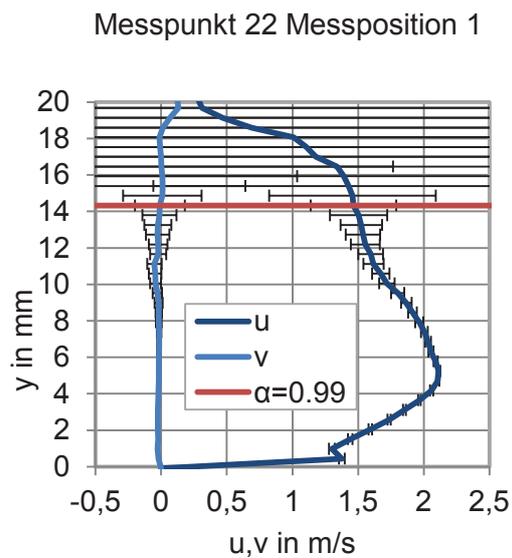


Messpunkt 16 Messposition 1

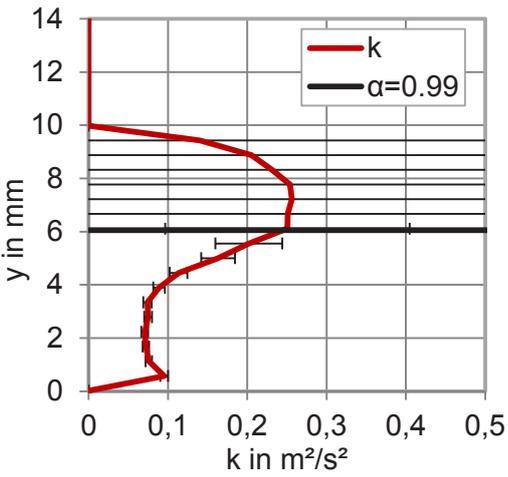
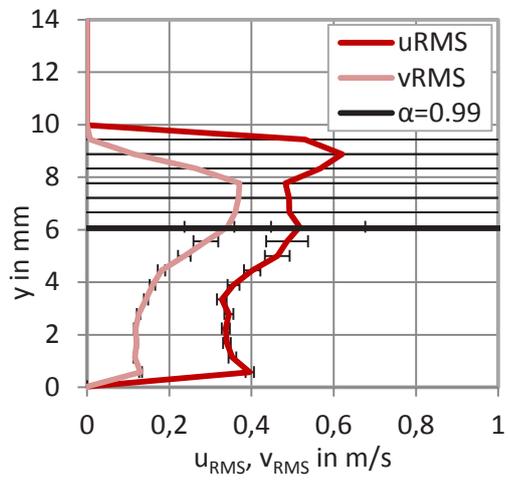
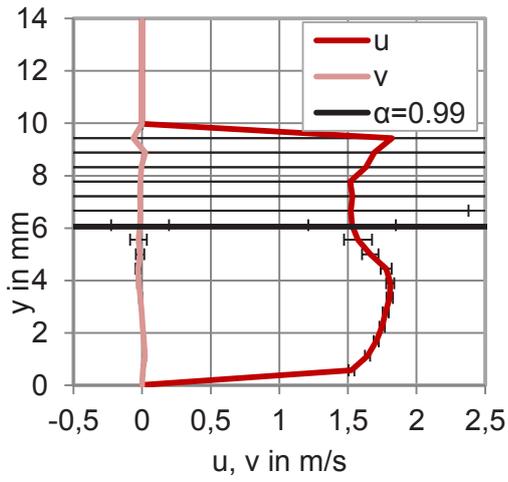


Messpunkt 21 Messposition 1

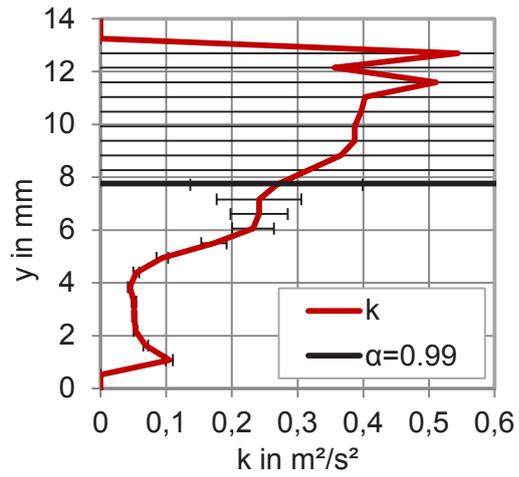
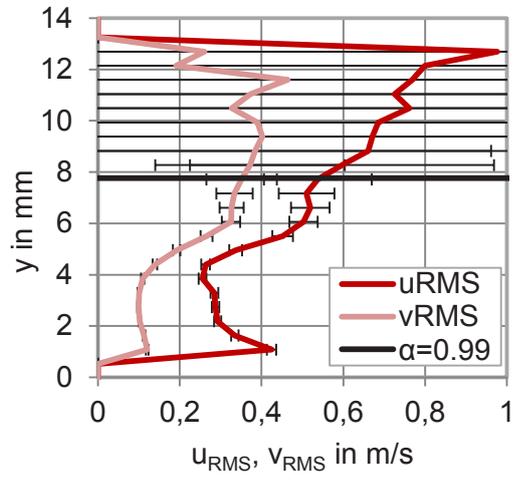
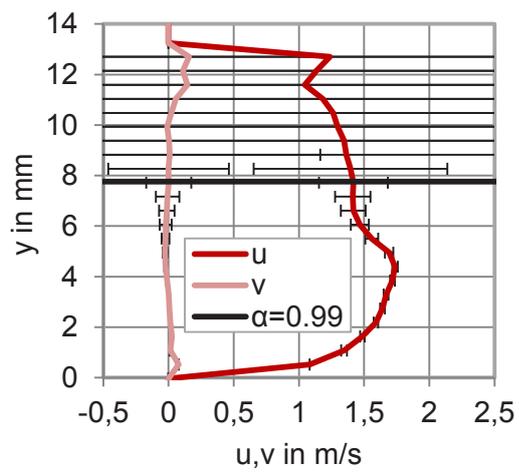




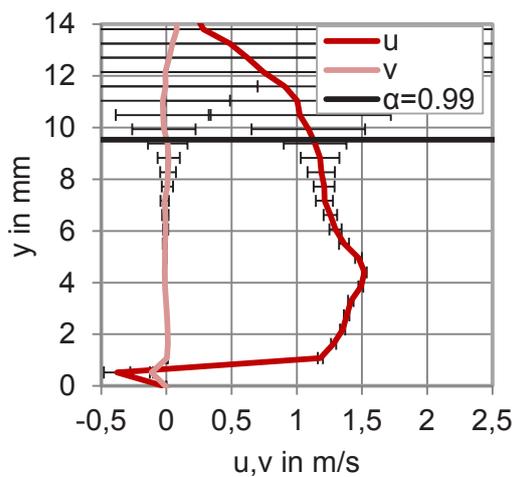
Messpunkt 1 Messposition 2



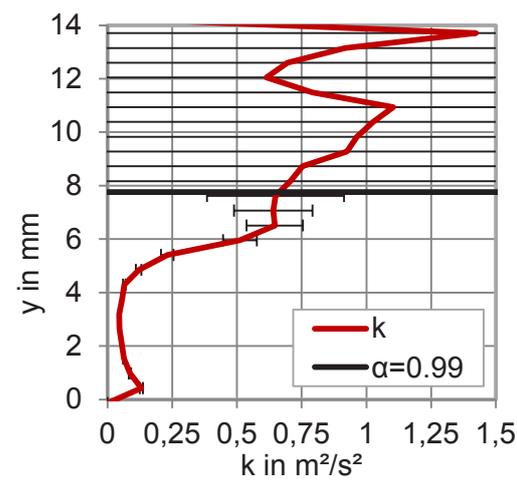
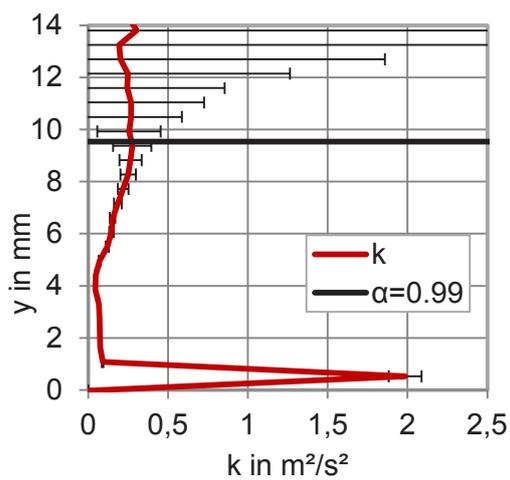
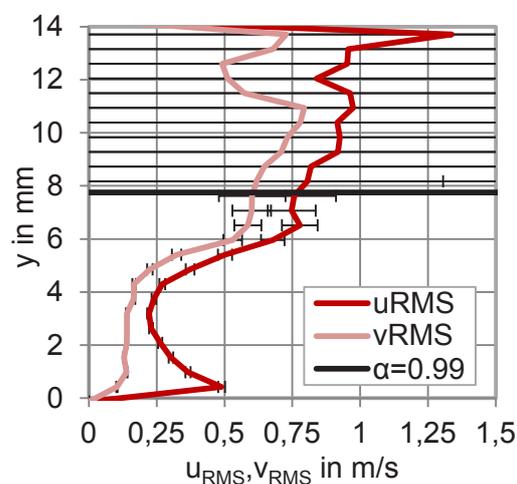
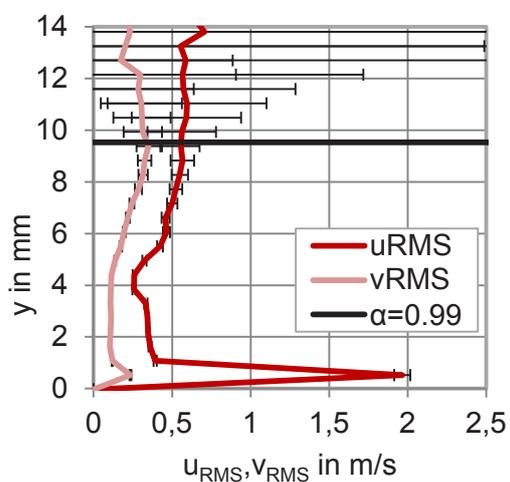
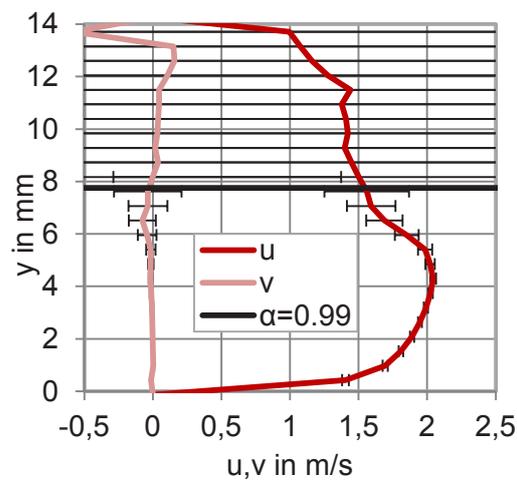
Messpunkt 2 Messposition 2



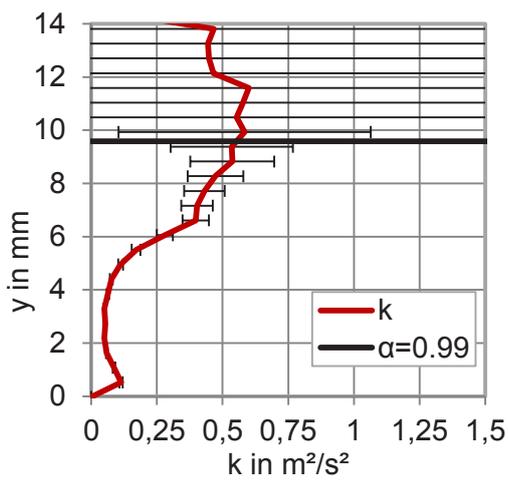
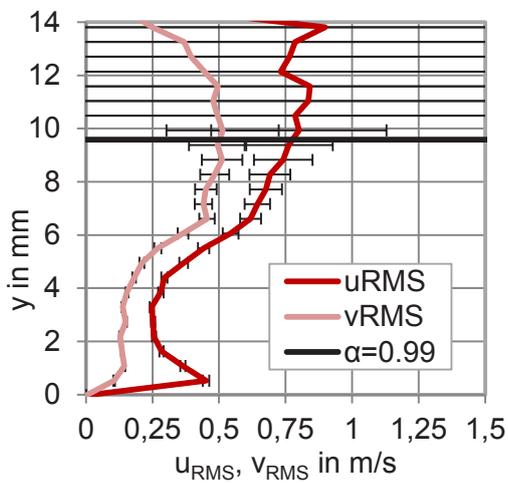
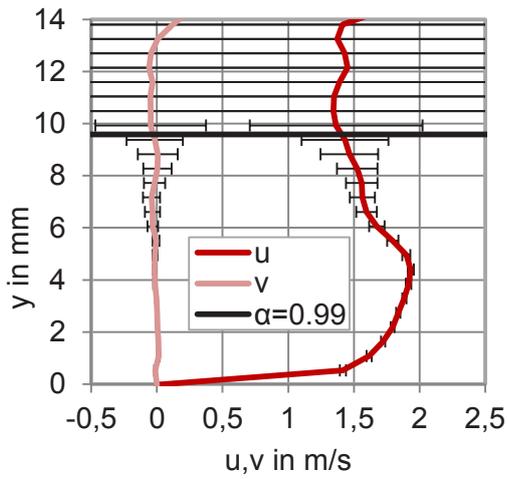
Messpunkt 3 Messposition 2



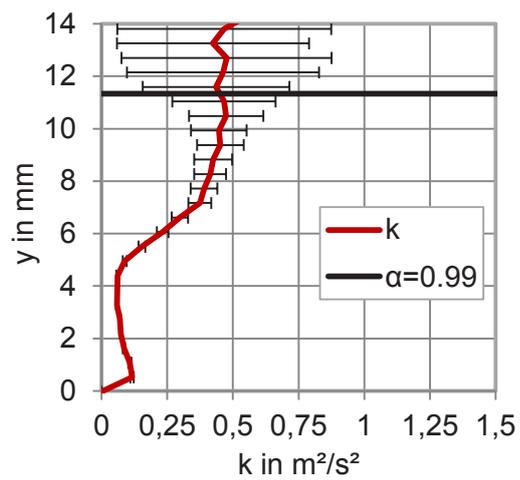
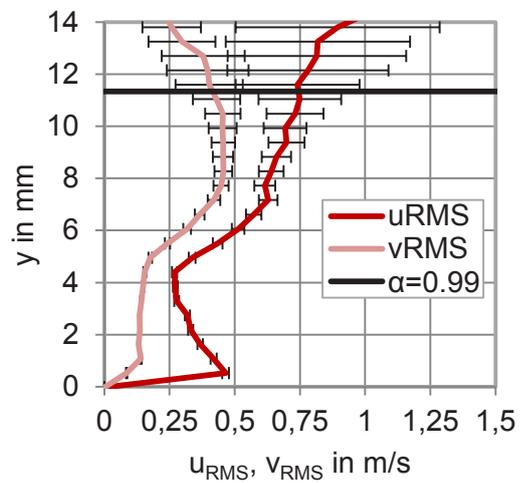
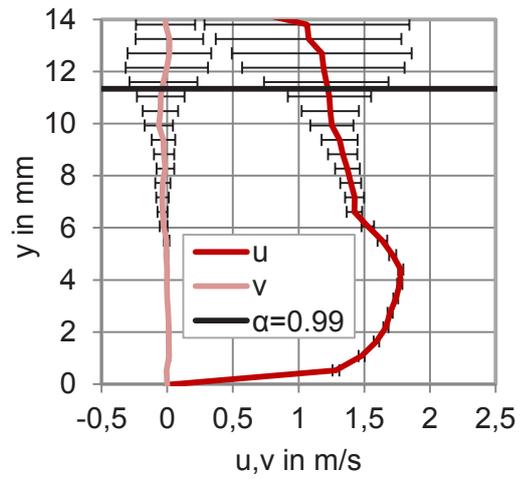
Messpunkt 8 Messposition 2



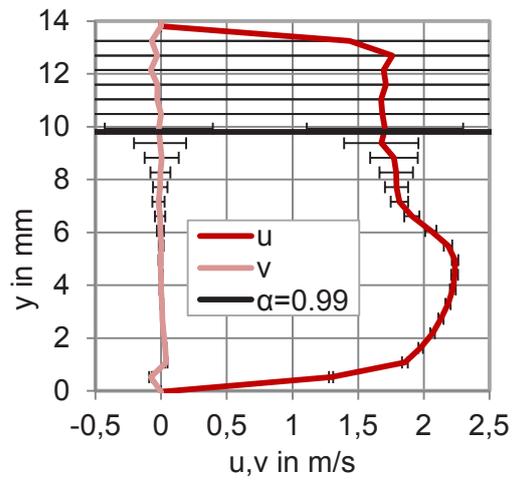
Messpunkt 9 Messposition 2



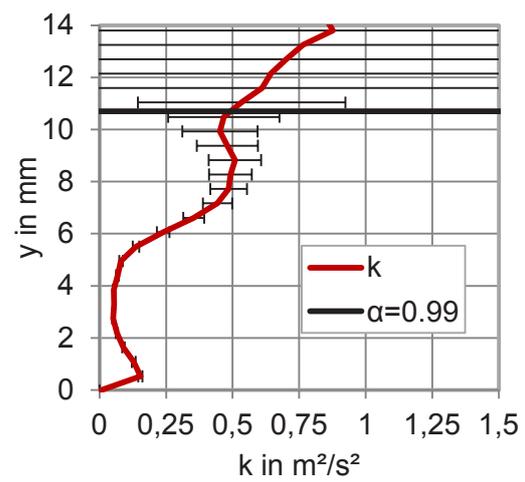
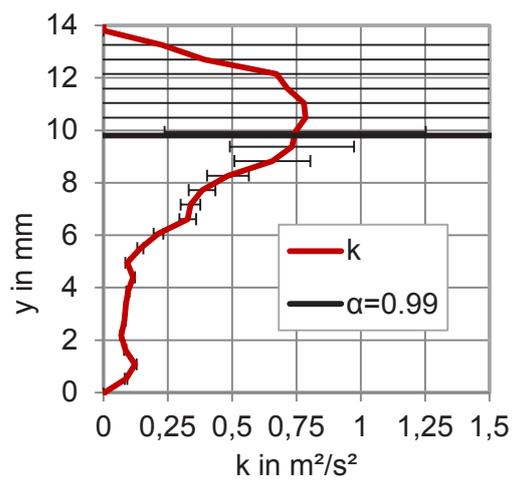
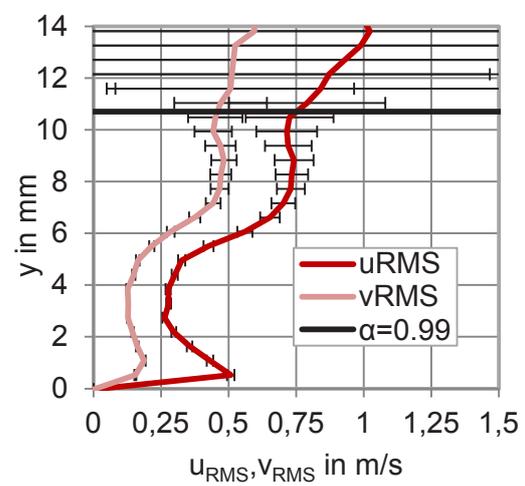
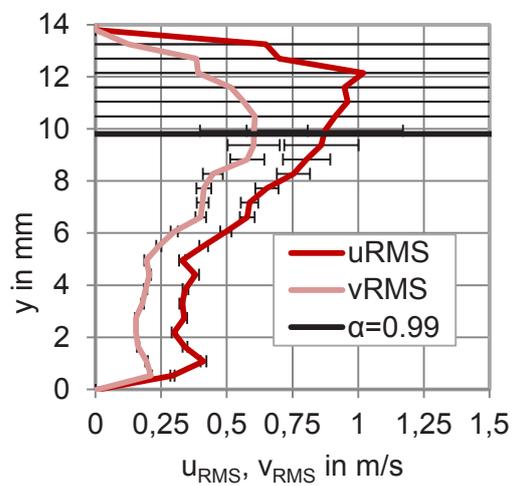
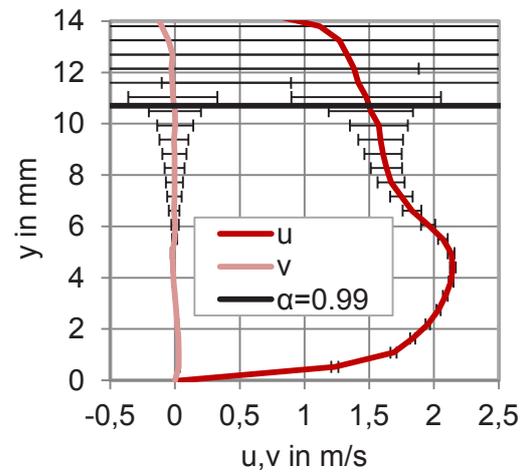
Messpunkt 10 Messposition 2



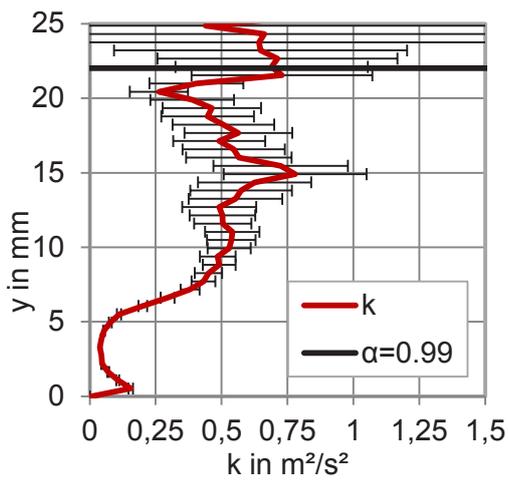
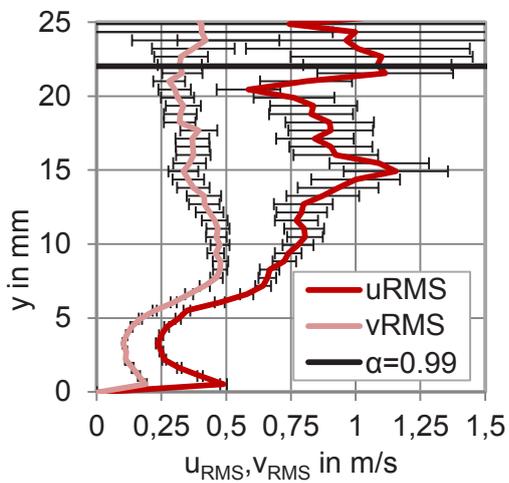
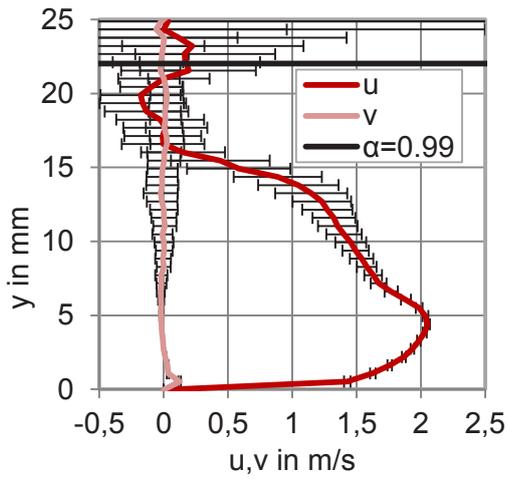
Messpunkt 14 Messposition 2



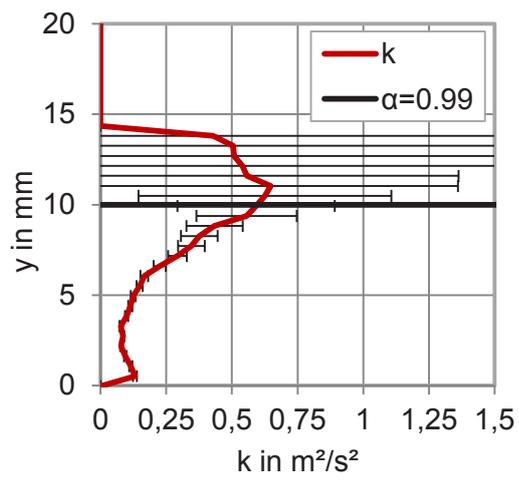
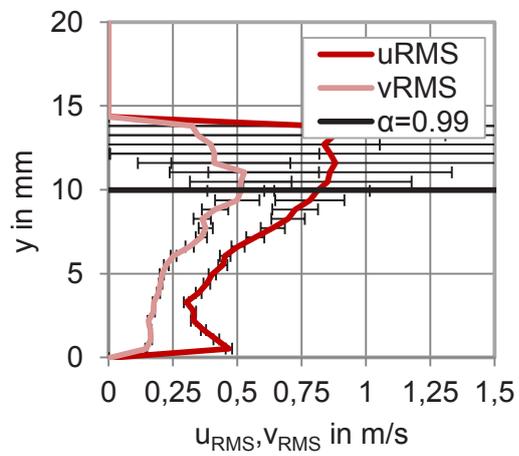
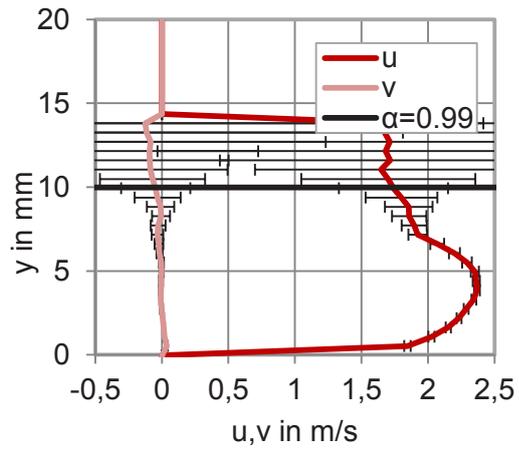
Messpunkt 15 Messposition 2

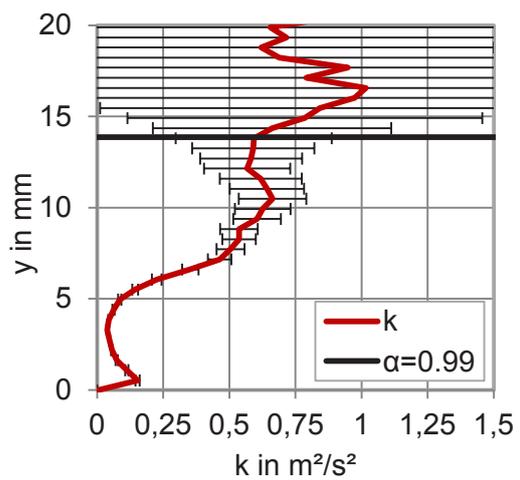
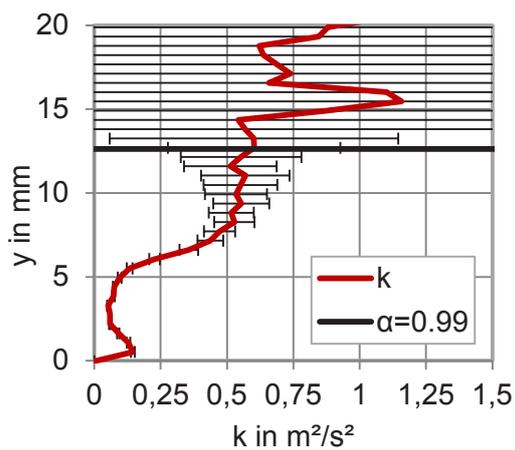
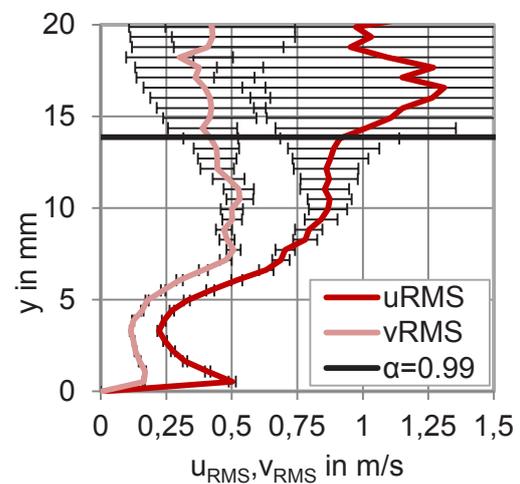
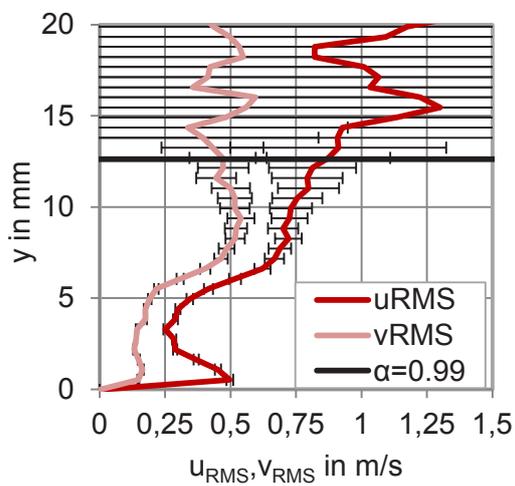
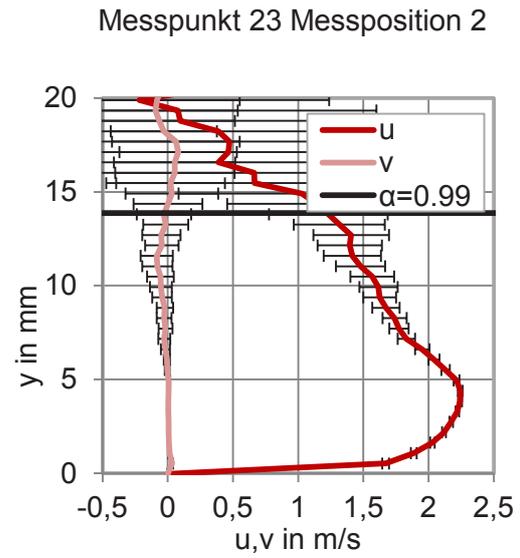
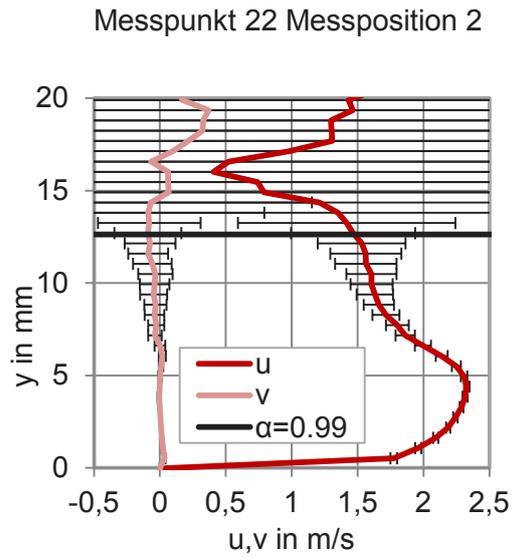


Messpunkt 16 Messposition 2



Messpunkt 21 Messposition 2



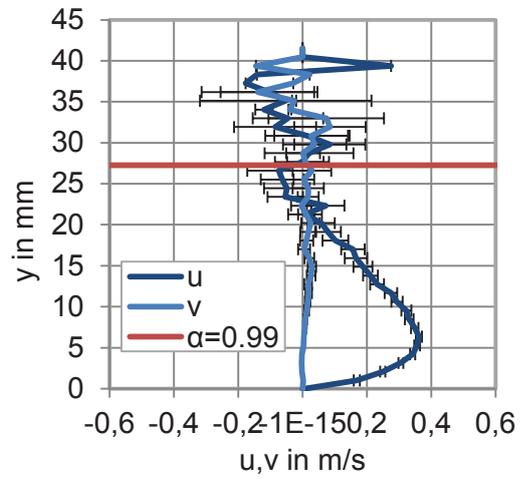


Wassergeschwindigkeit bei teilweise umgekehrter Strömung

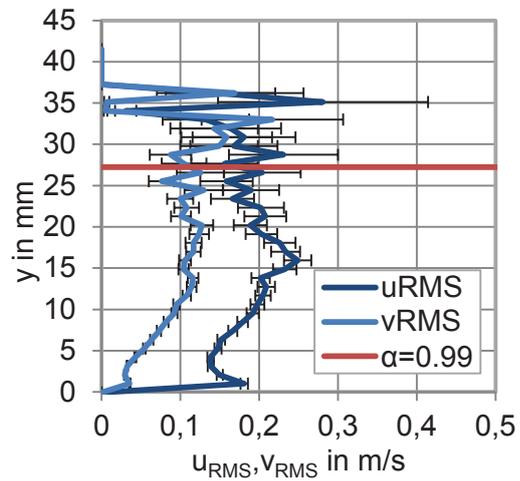
Messpunkt 4 Messposition 1

Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

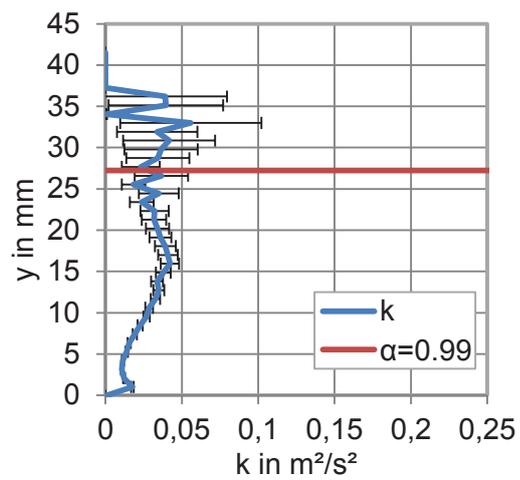
Messpunkt 5 Messposition 1



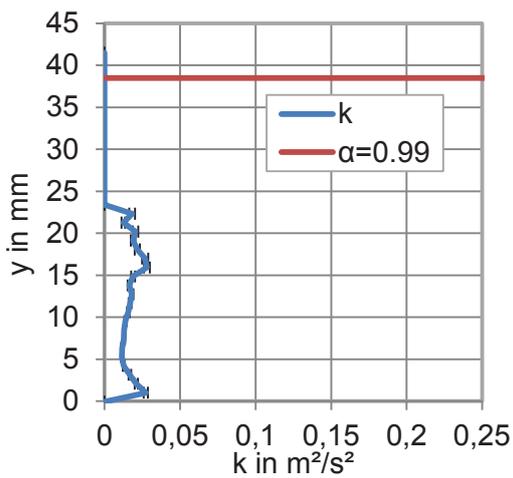
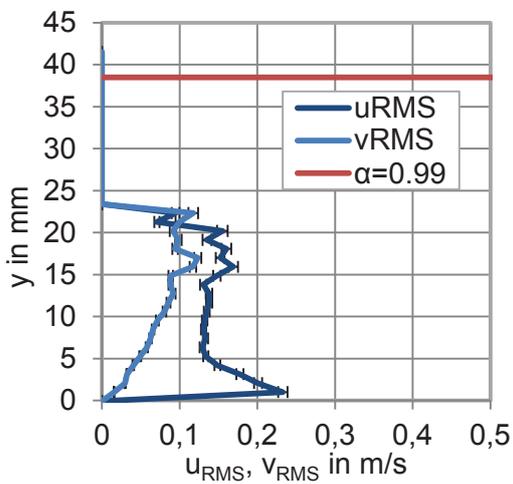
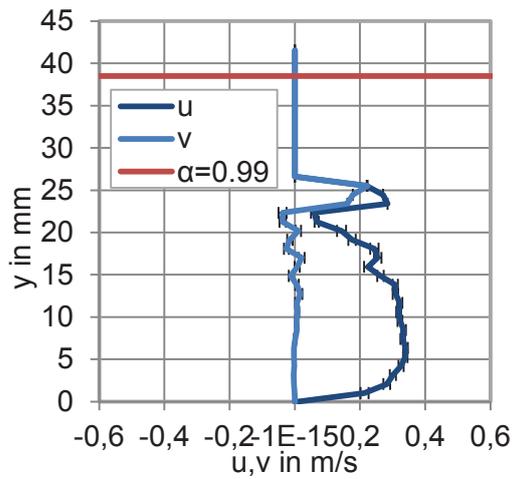
Zu viele Artefakte – keine Messung möglich



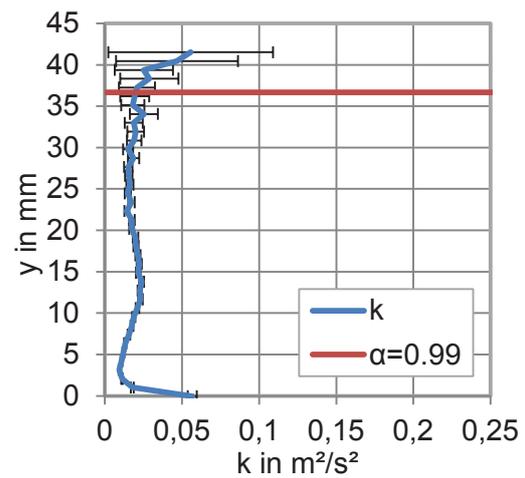
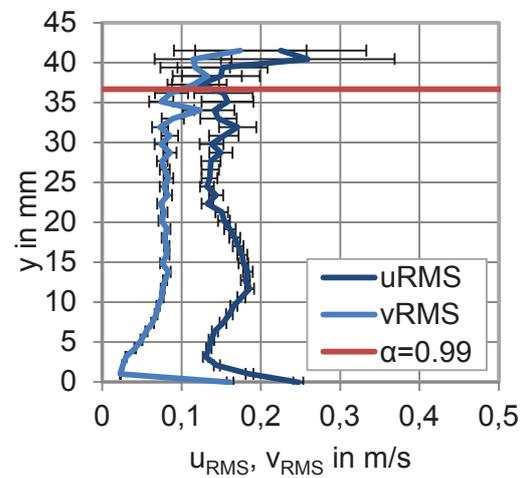
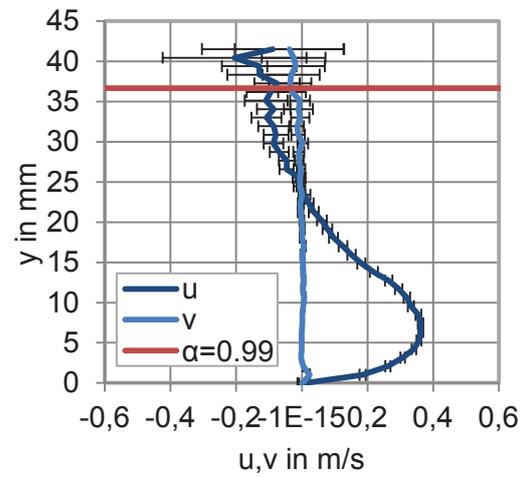
Zu viele Artefakte – keine Messung möglich



Messpunkt 6 Messposition 1



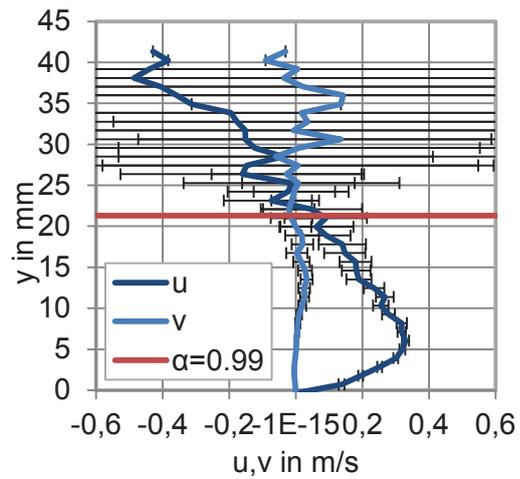
Messpunkt 7 Messposition 1



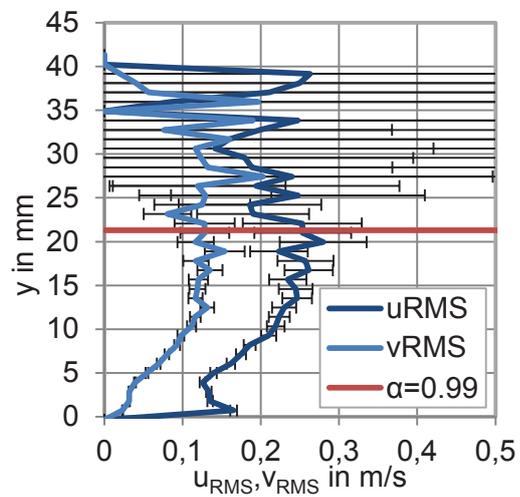
Messpunkt 11 Messposition 1

Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

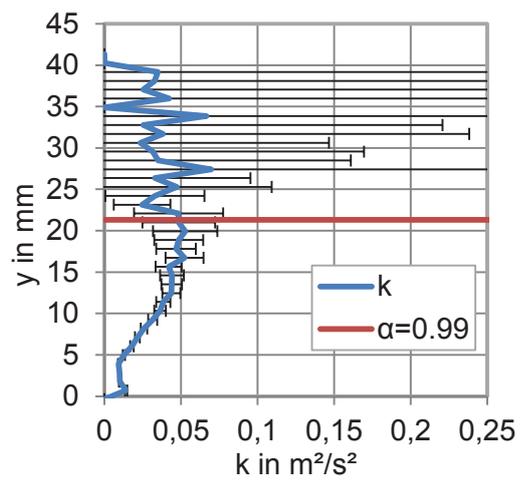
Messpunkt 12 Messposition 1

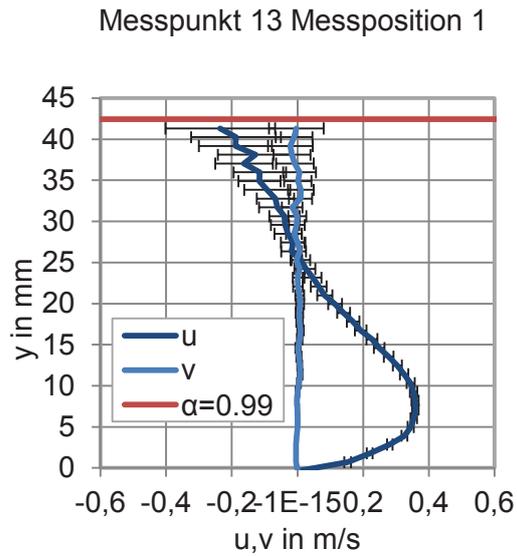


Zu viele Artefakte – keine Messung möglich



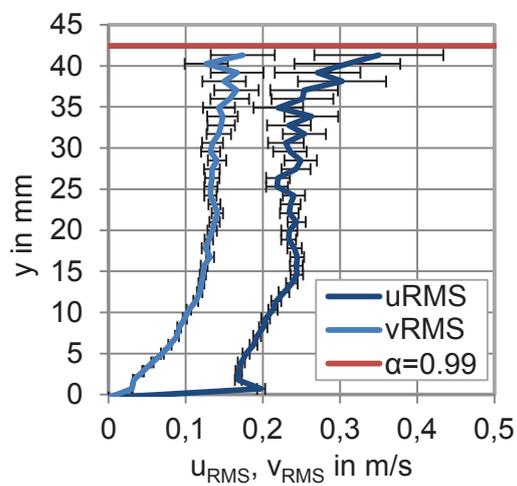
Zu viele Artefakte – keine Messung möglich



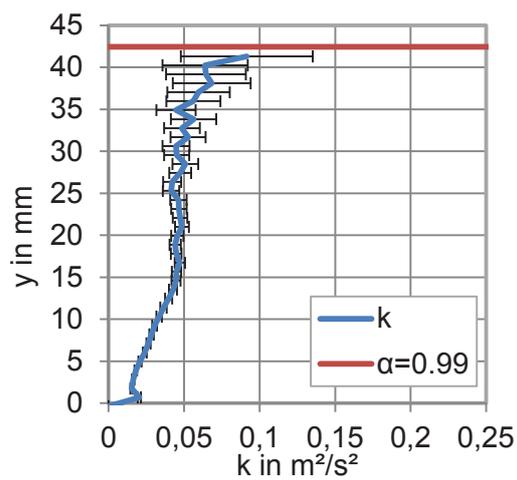


Messpunkt 17 Messposition 1

Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

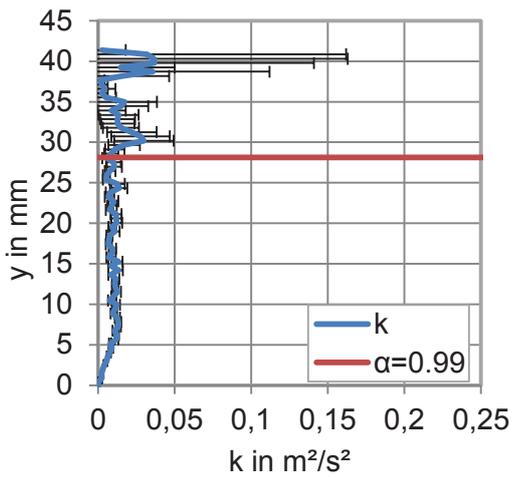
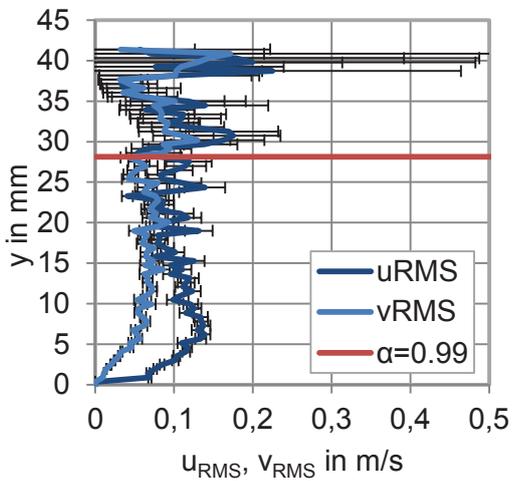
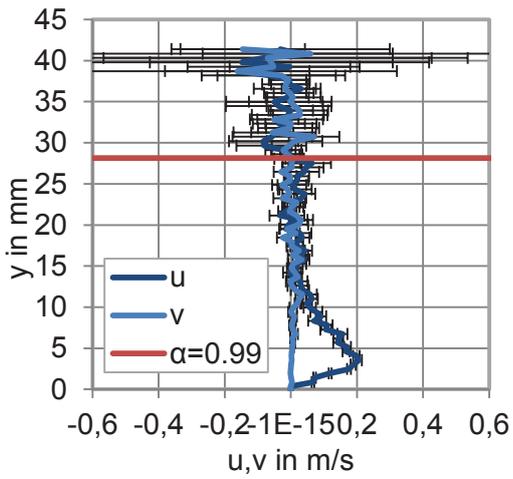


Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

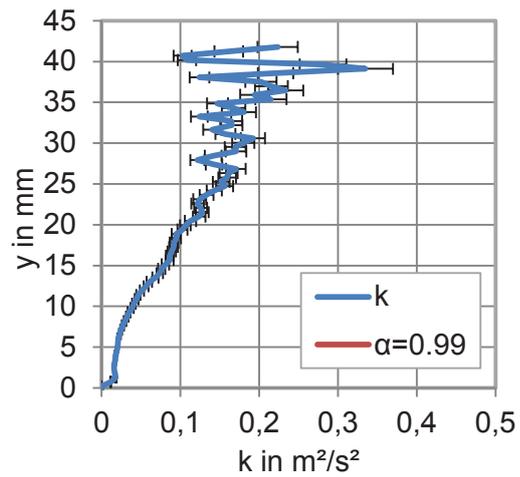
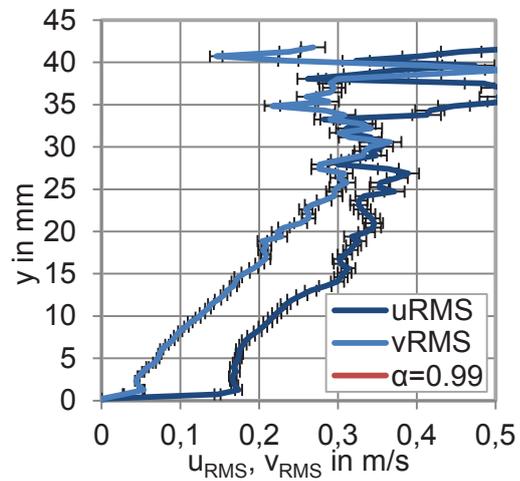
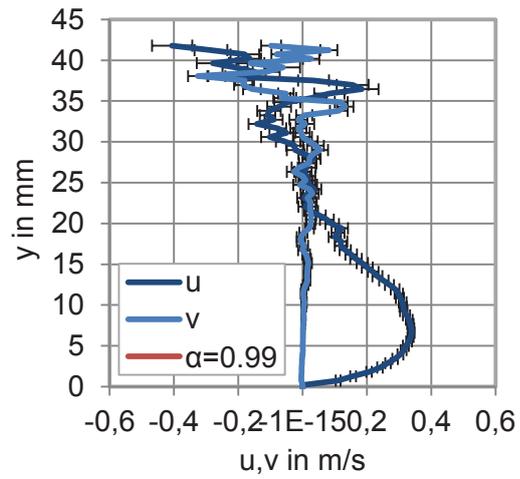


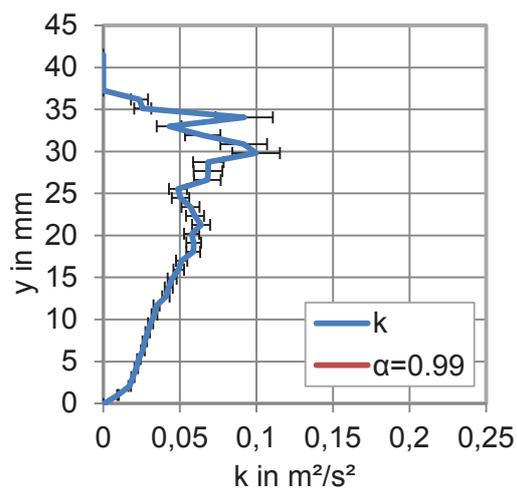
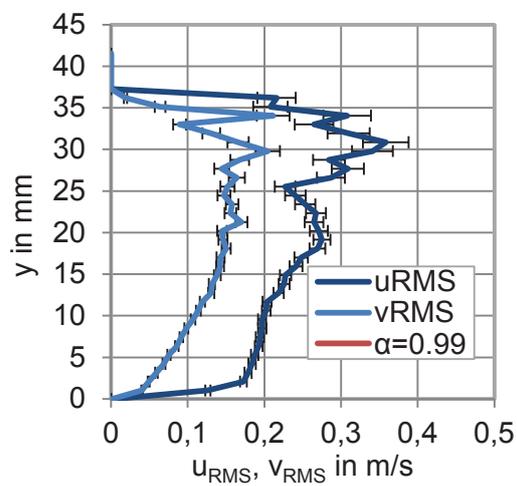
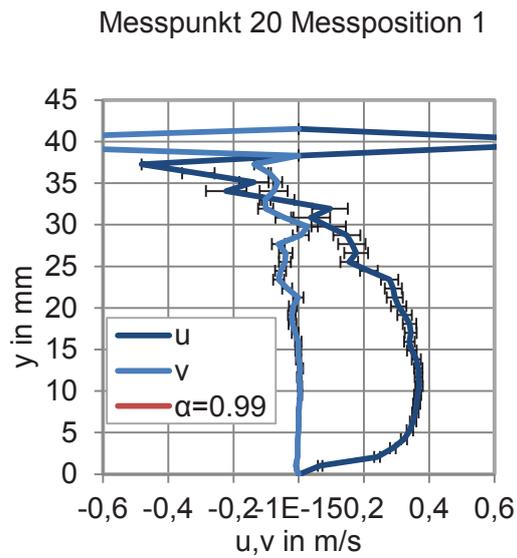
Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

Messpunkt 18 Messposition 1



Messpunkt 19 Messposition 1





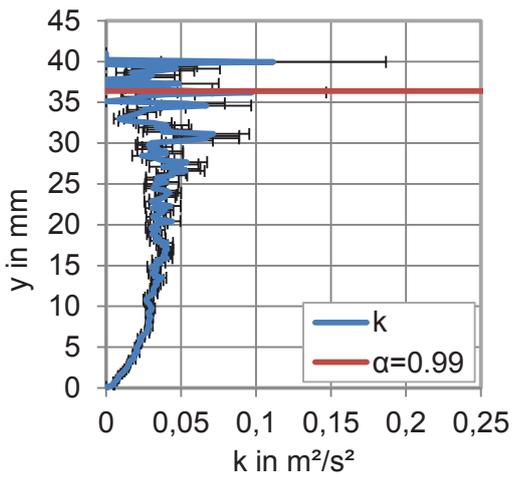
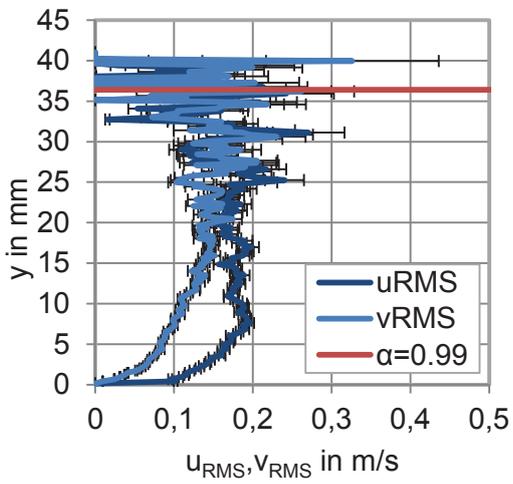
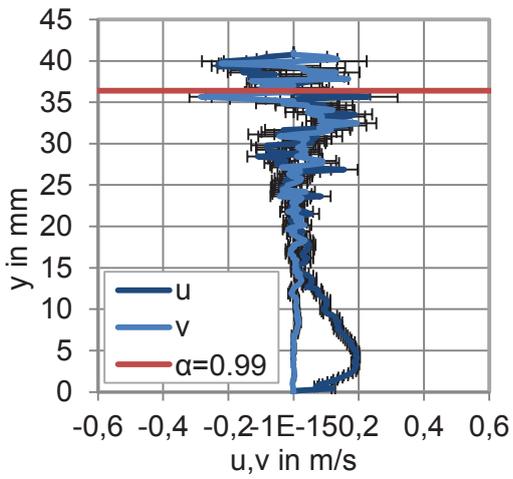
Messpunkt 24/25 Messposition 1

Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

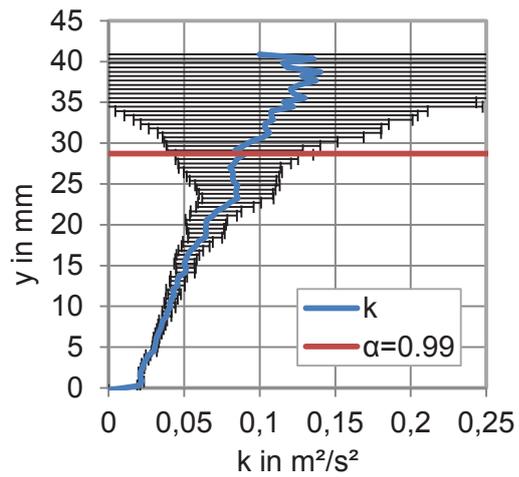
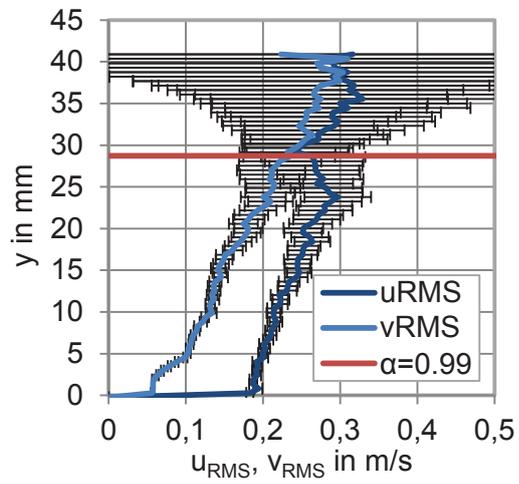
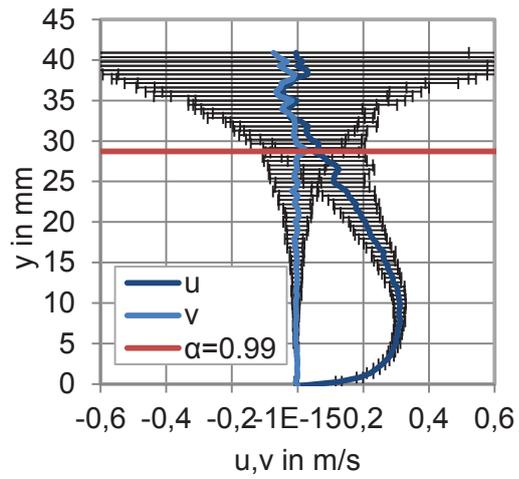
Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

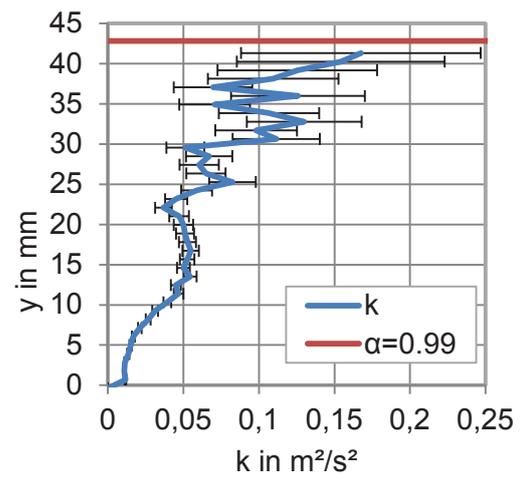
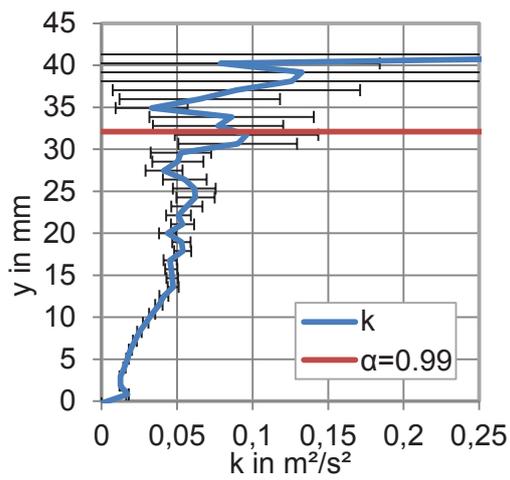
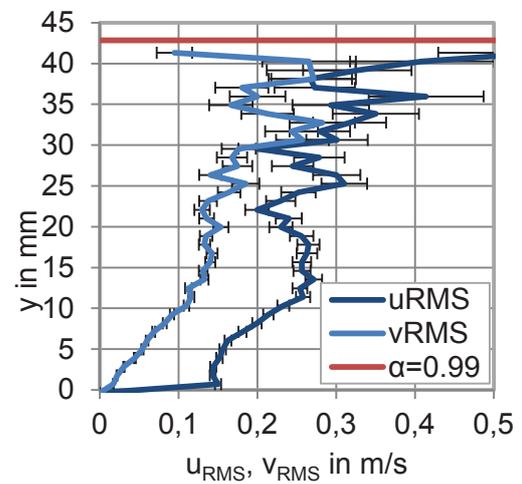
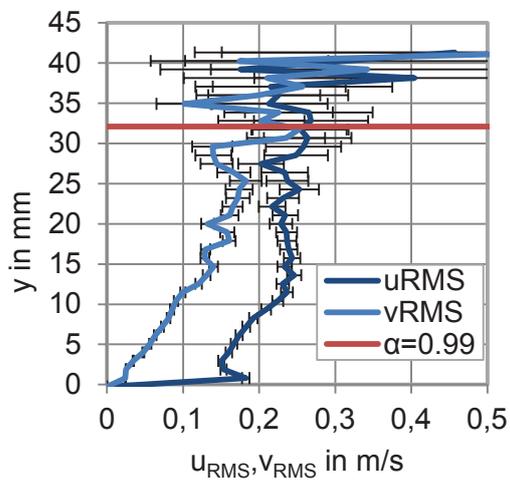
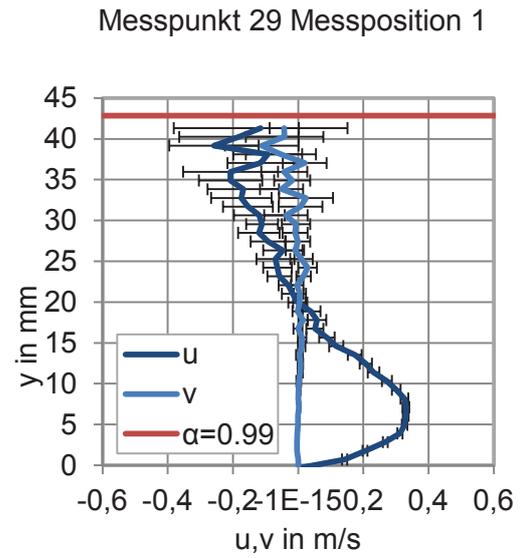
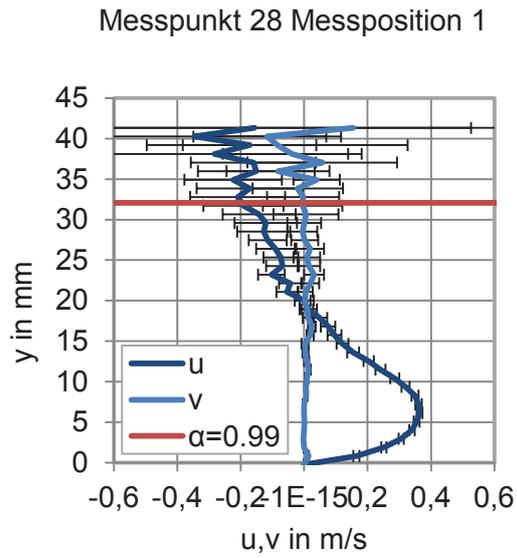
Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

Messpunkt 26 Messposition 1

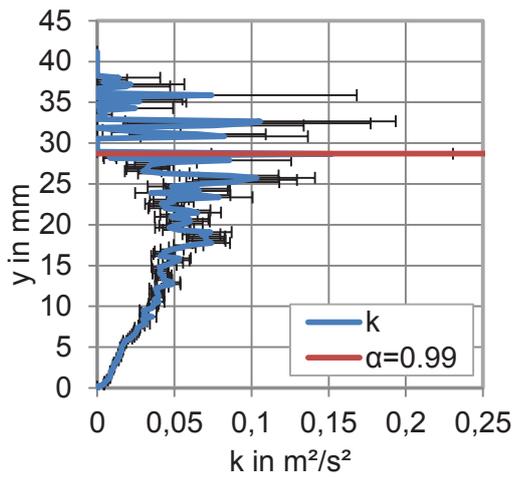
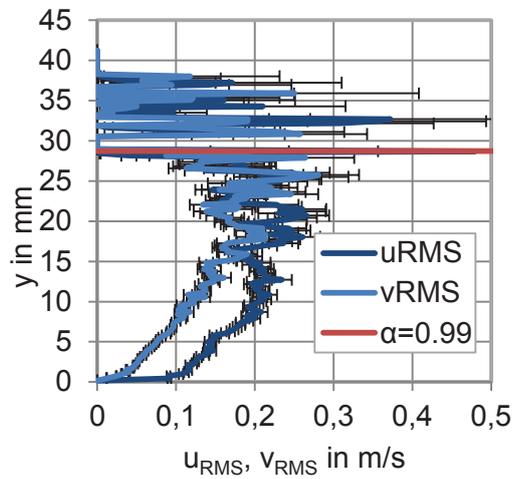
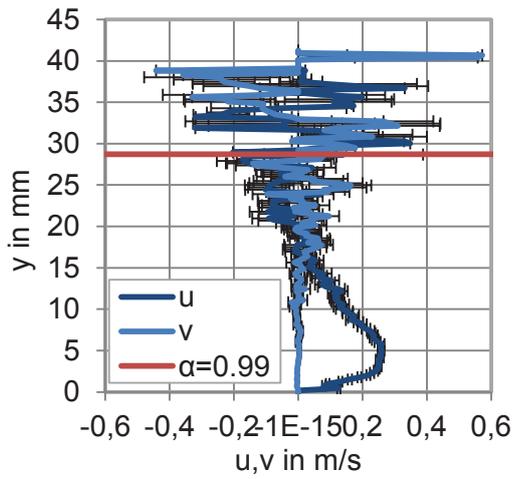


Messpunkt 27 Messposition 1

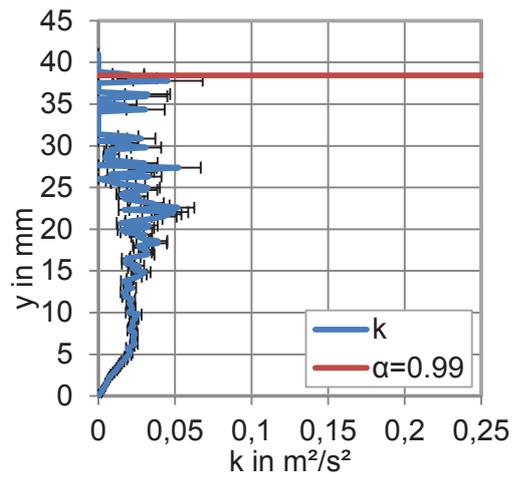
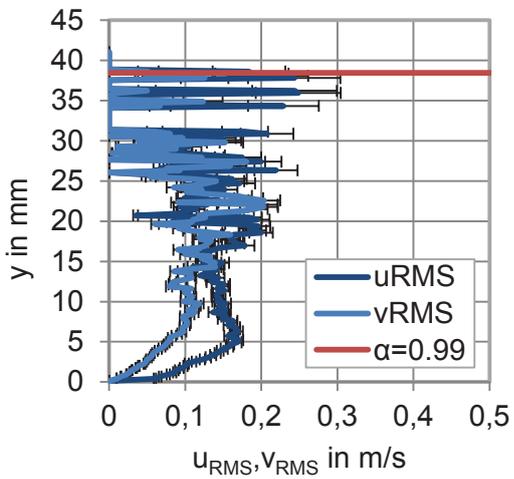
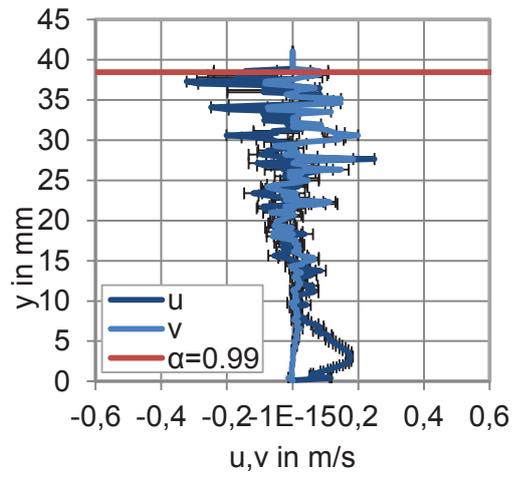




Messpunkt 30 Messposition 1



Messpunkt 31 Messposition 1



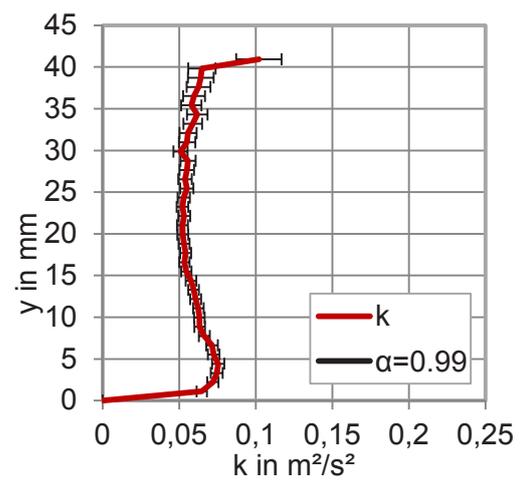
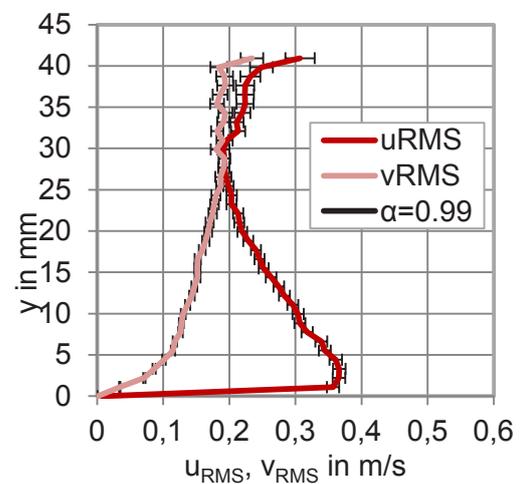
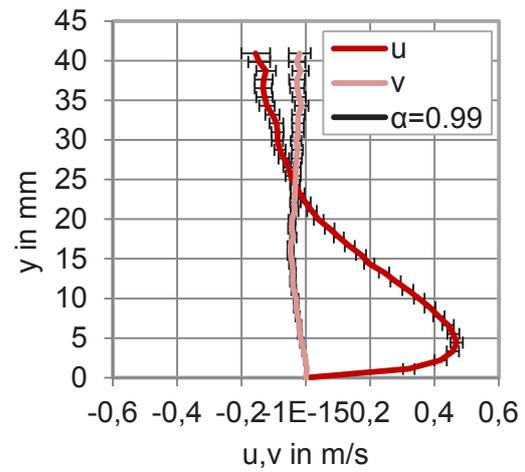
Messpunkt 4 Messposition 2

Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

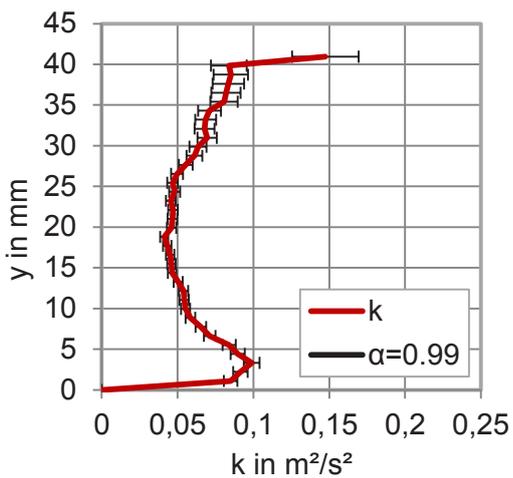
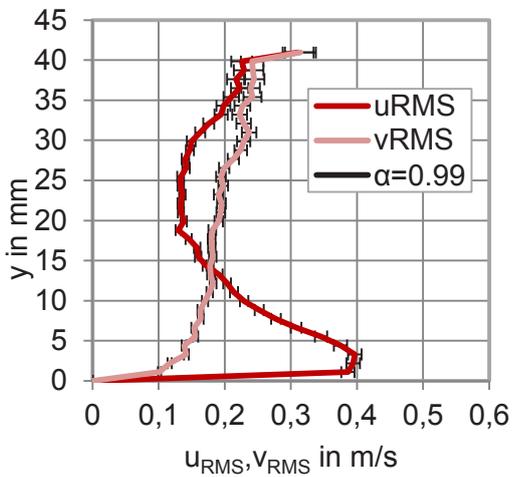
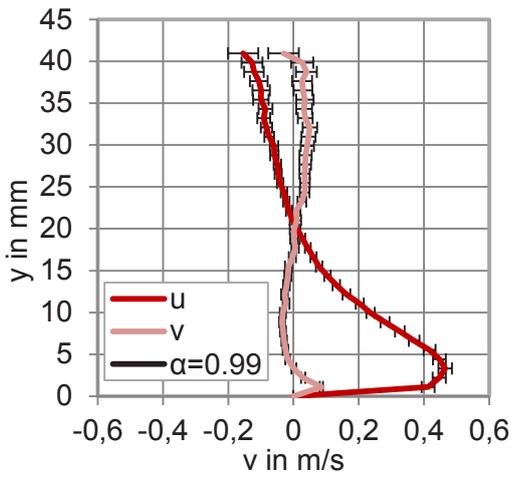
Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

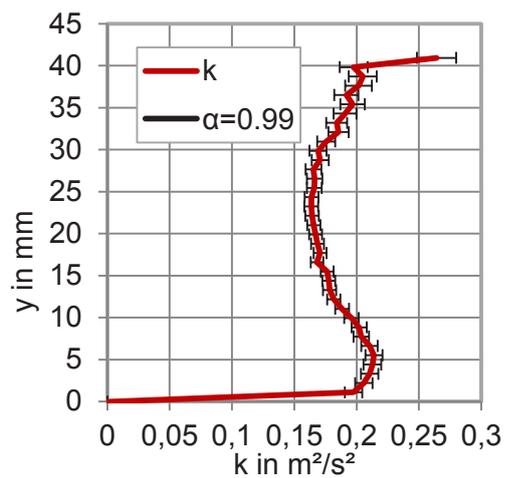
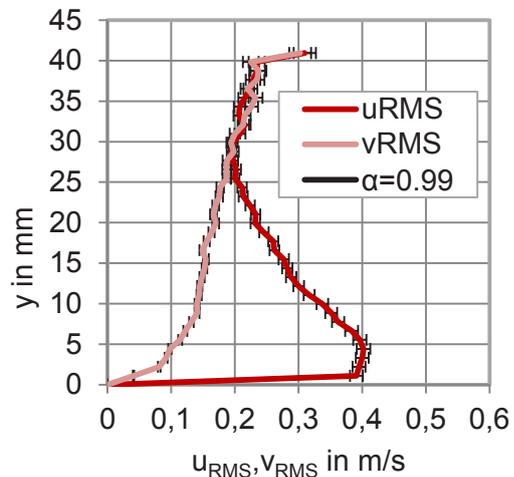
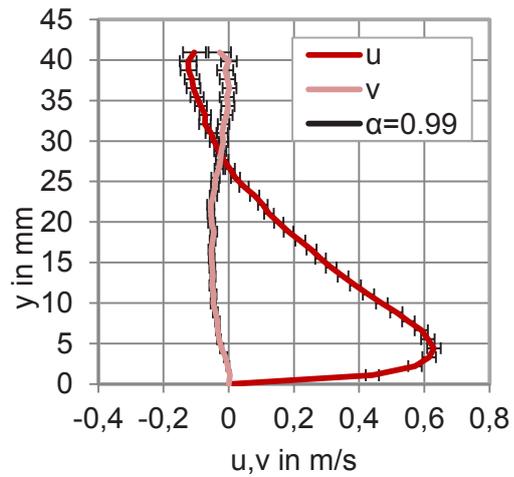
Messpunkt 5 Messposition 2



Messpunkt 6 Messposition 2



Messpunkt 7 Messposition 2



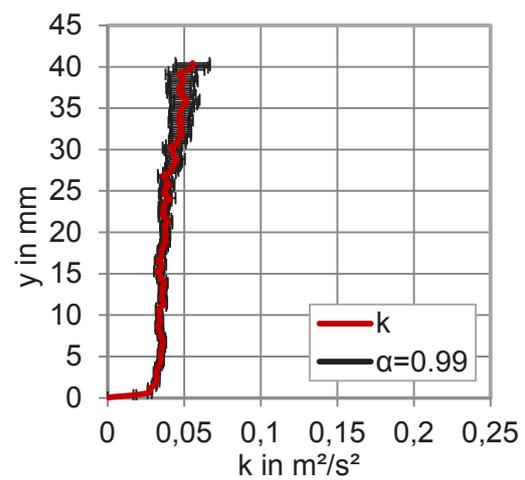
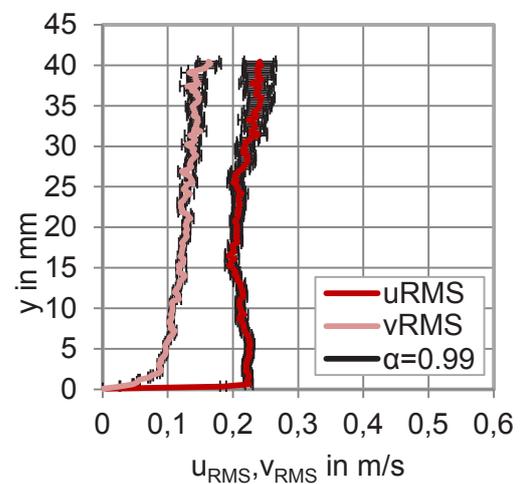
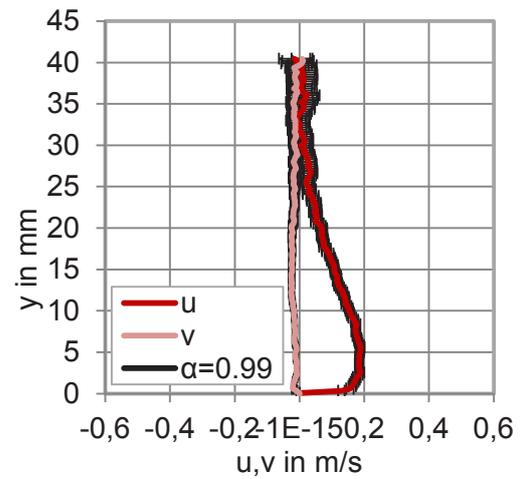
Messpunkt 11 Messposition 2

Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

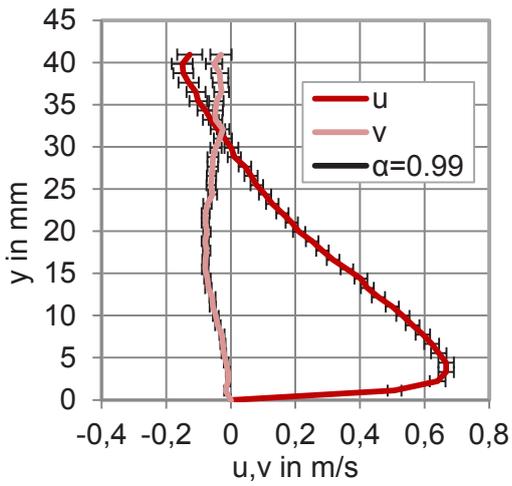
Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

Messpunkt 12 Messposition 2

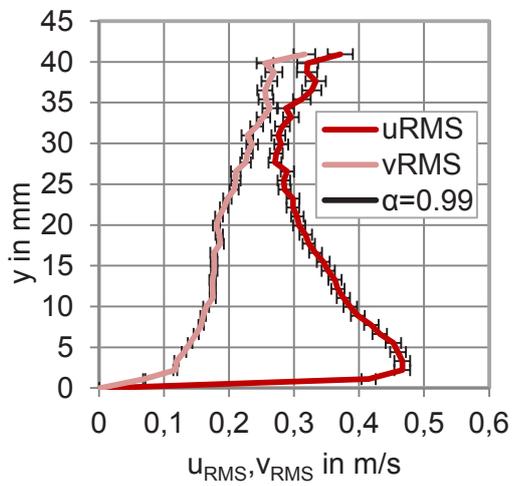


Messpunkt 13 Messposition 2

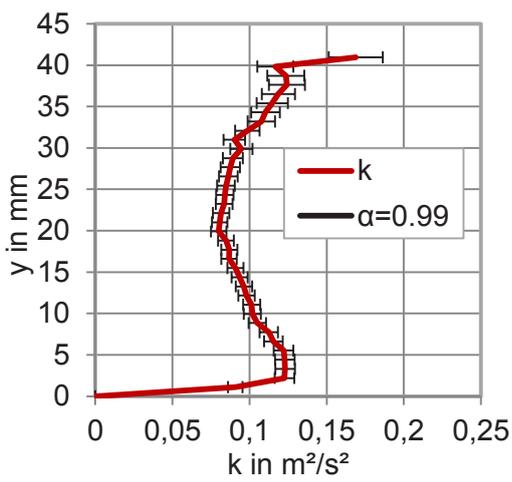


Messpunkt 17 Messposition 2

Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

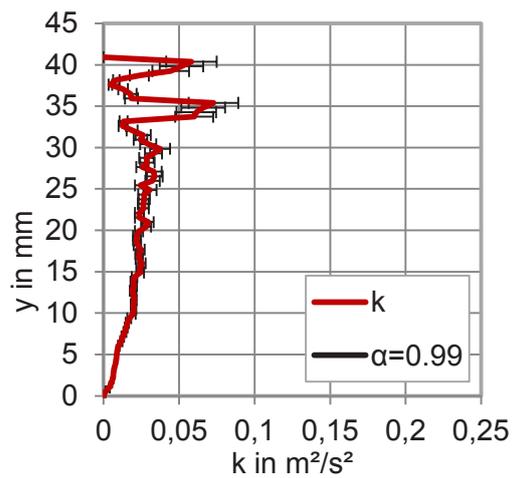
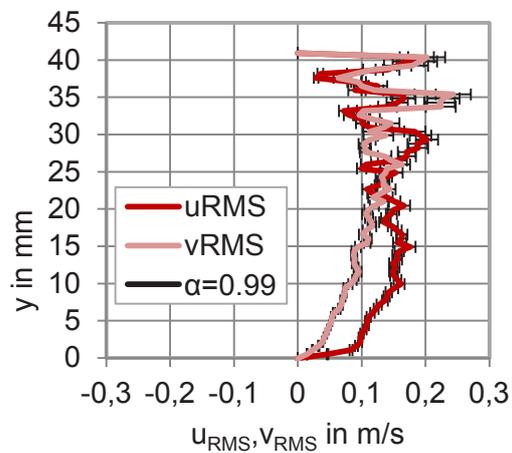
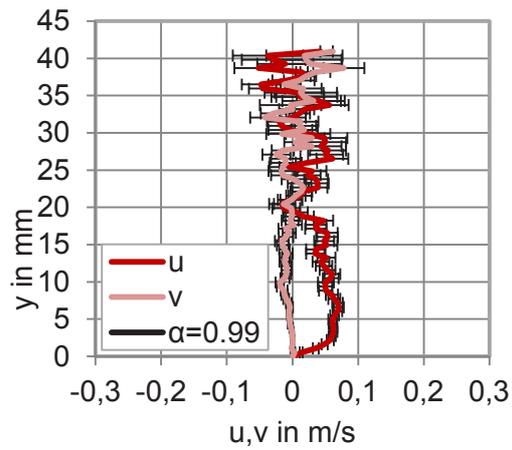


Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

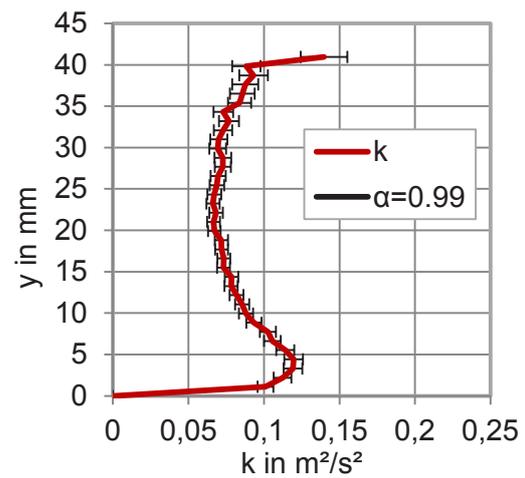
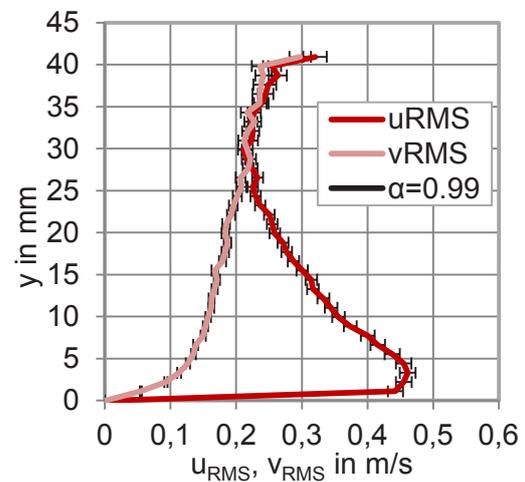
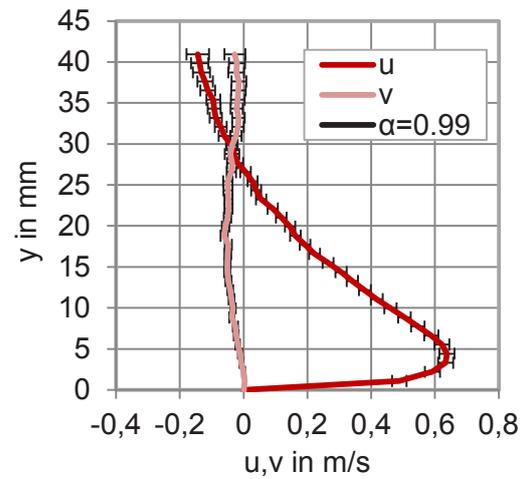


Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

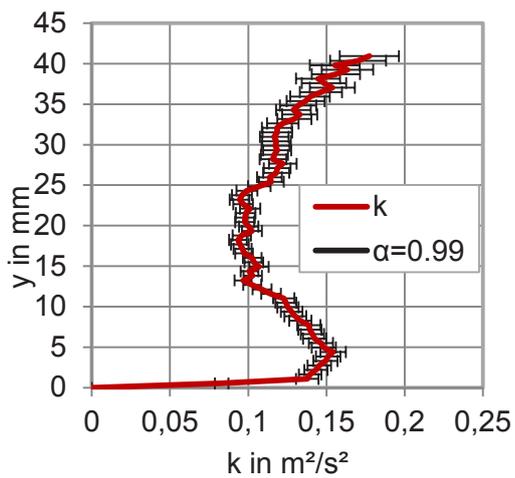
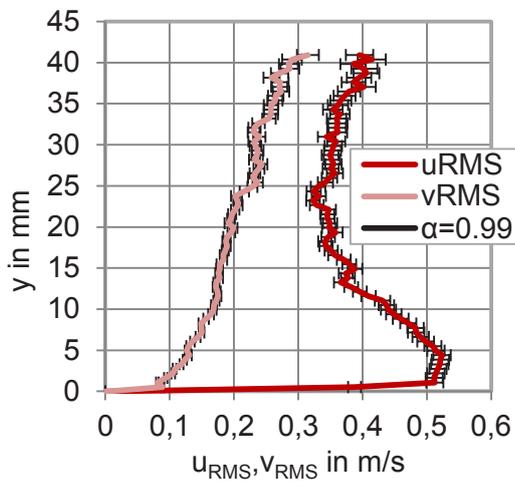
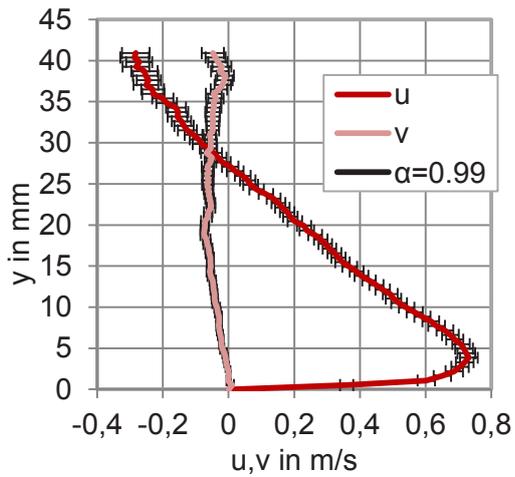
Messpunkt 18 Messposition 2



Messpunkt 19 Messposition 2



Messpunkt 20 Messposition 2



Messpunkt 24

Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

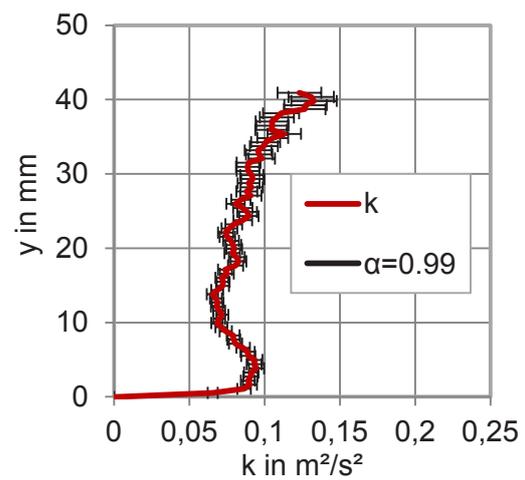
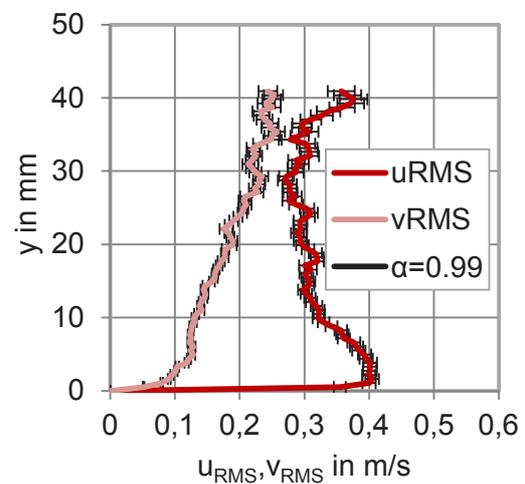
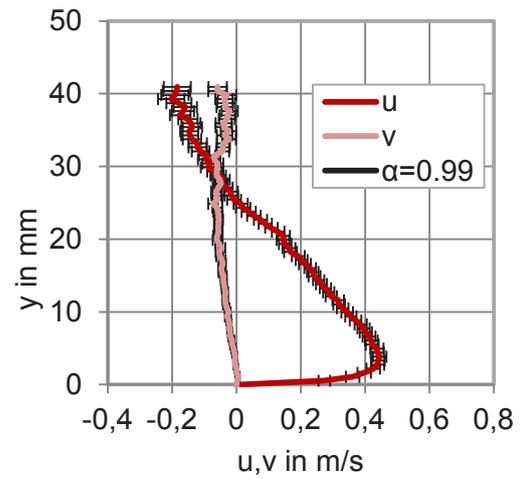
Messpunkt 25 Messposition 2

Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

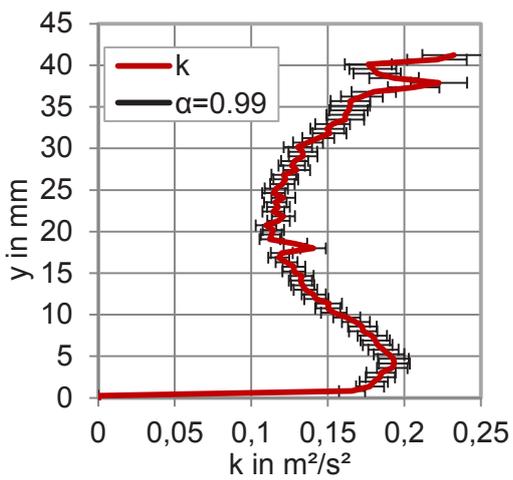
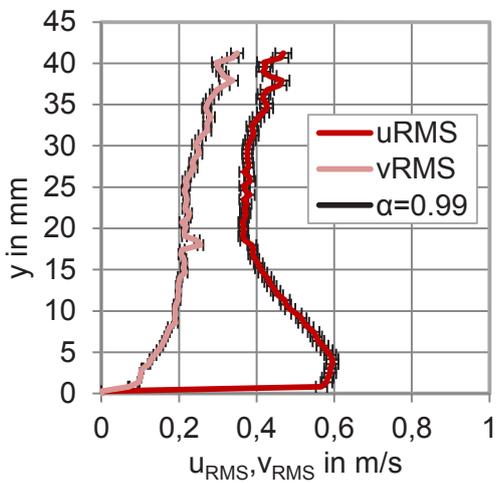
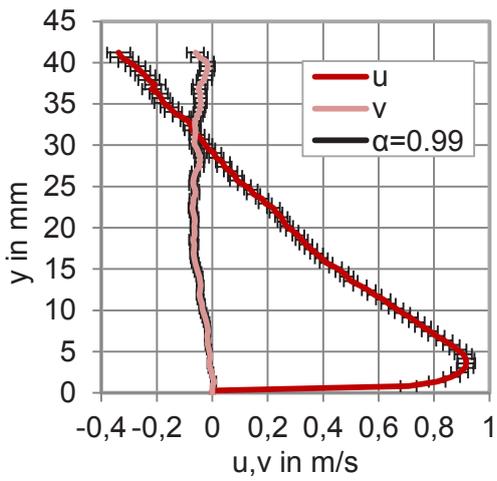
Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

Zu viele Artefakte – keine Messung möglich

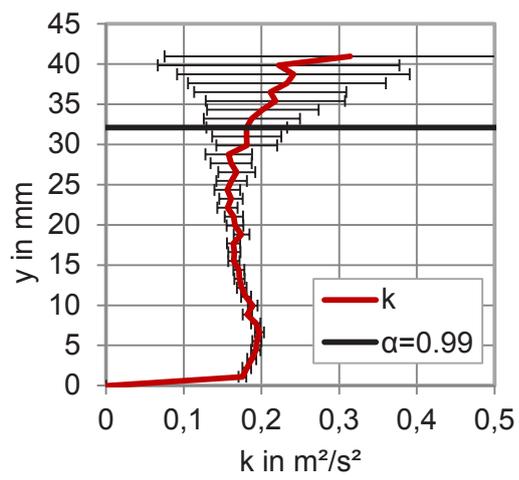
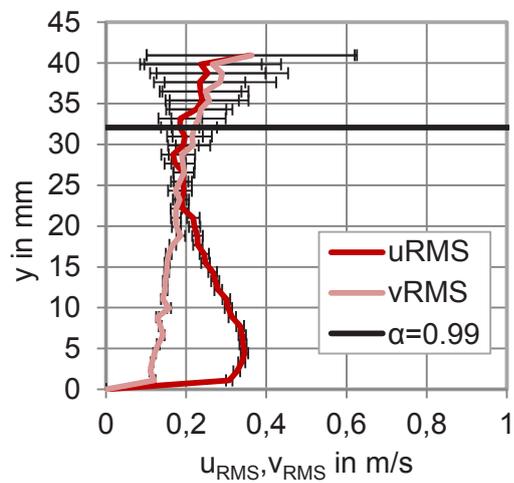
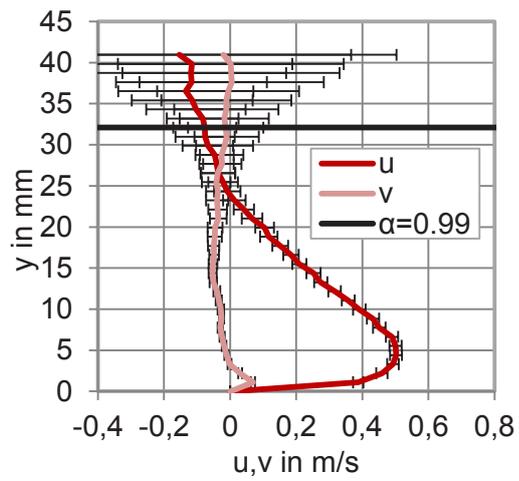
Messpunkt 26 Messposition 2

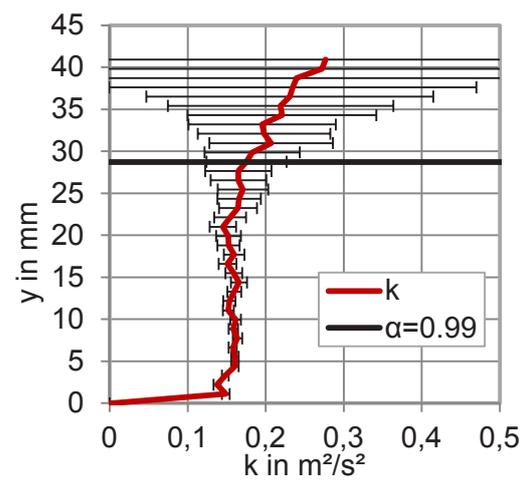
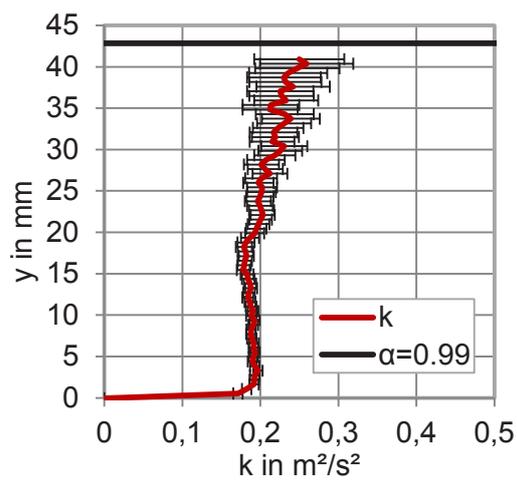
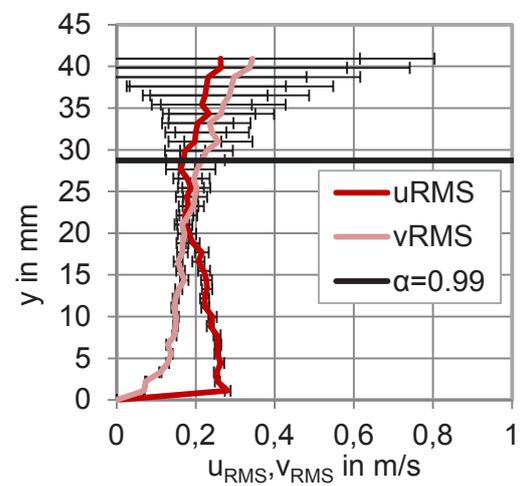
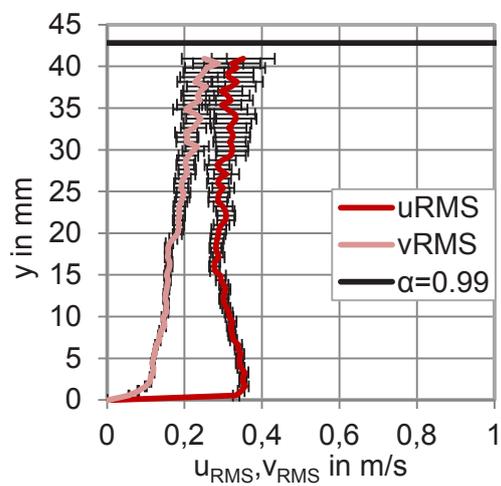
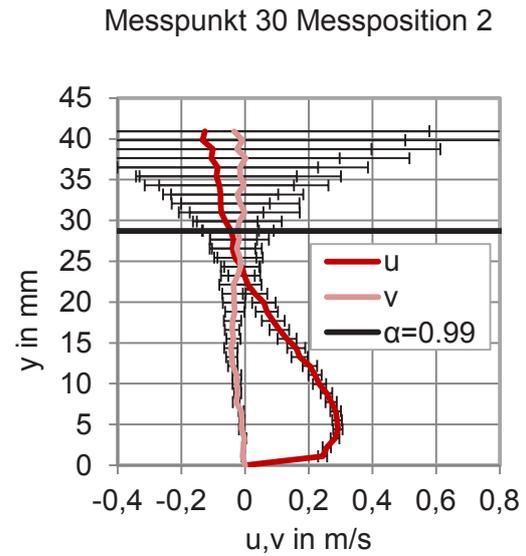
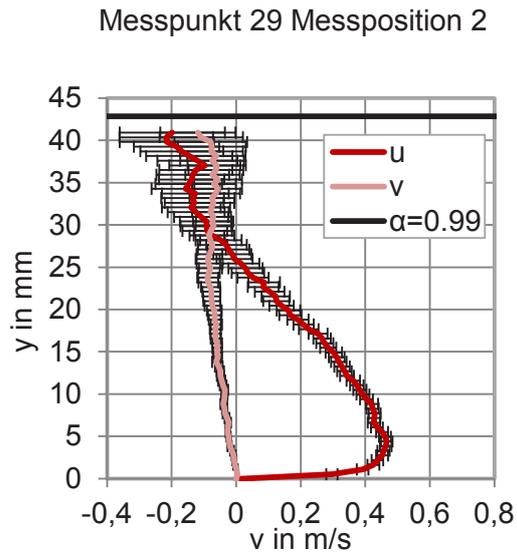


Messpunkt 27 Messposition 2

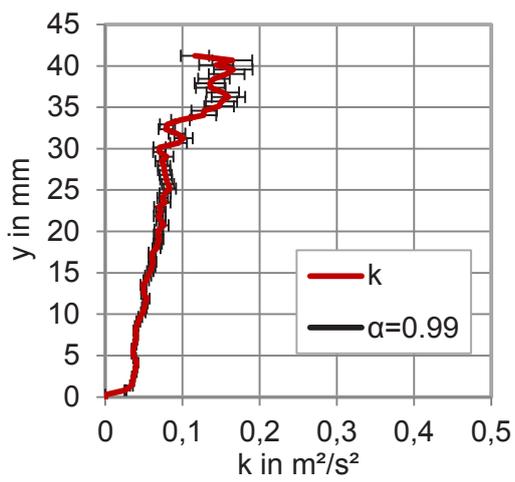
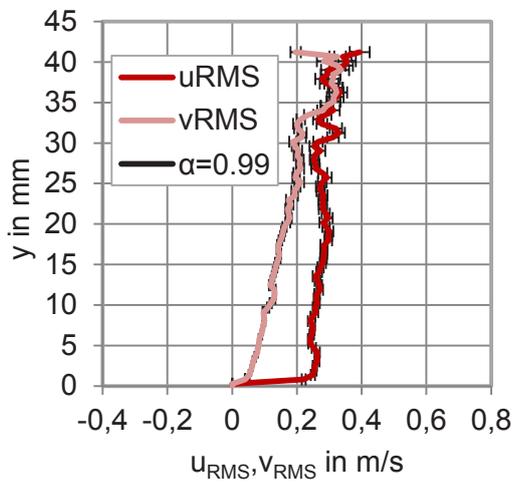
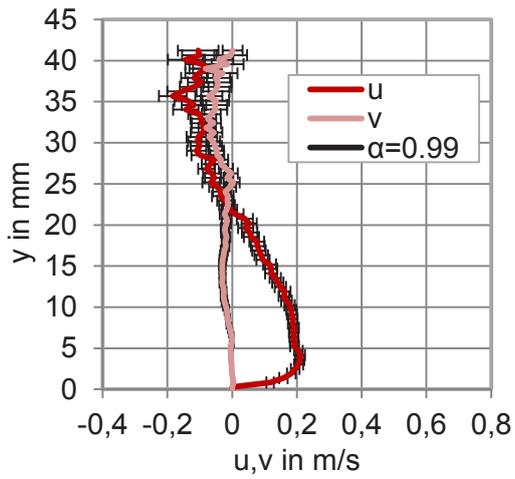


Messpunkt 28 Messposition 2



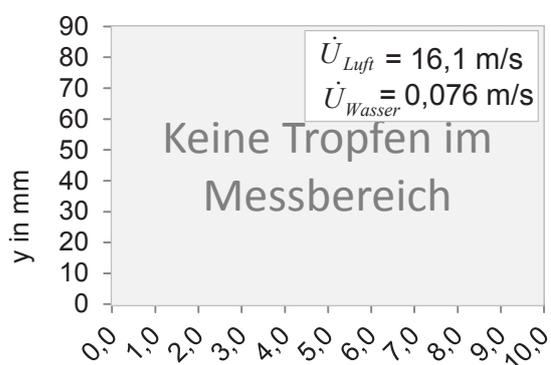
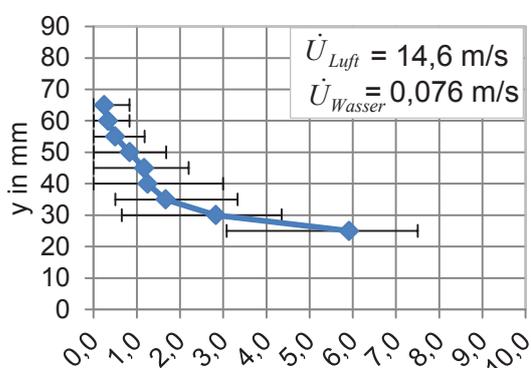
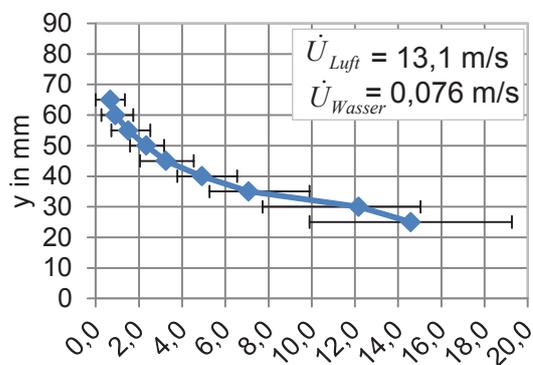


Messpunkt 31 Messposition 2

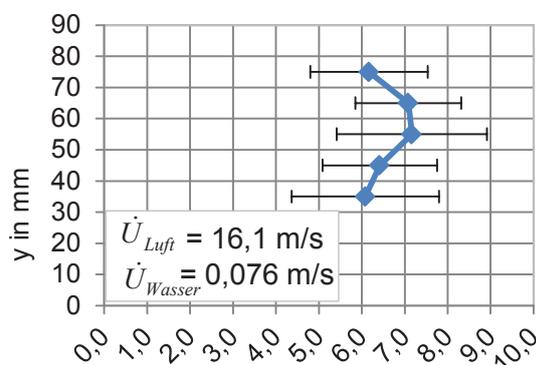
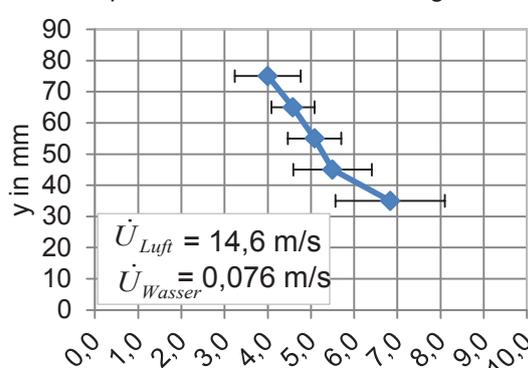
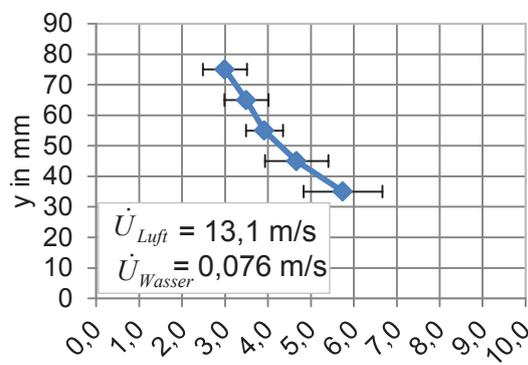


Tropfenmassenstromdichte bei teilweise umgekehrter Strömung

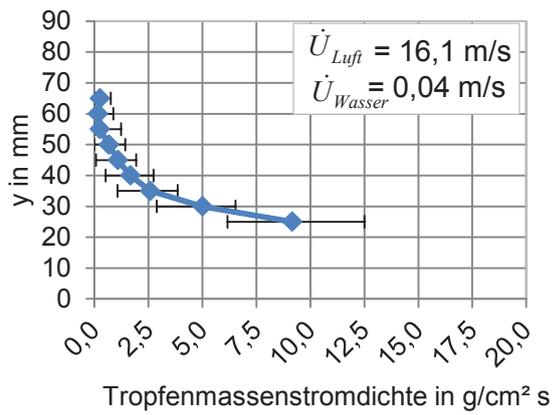
Messposition 2

Tropfenmassenstromdichte in $\text{g/cm}^2 \text{ s}$ Tropfenmassenstromdichte in $\text{g/cm}^2 \text{ s}$ Tropfenmassenstromdichte in $\text{g/cm}^2 \text{ s}$

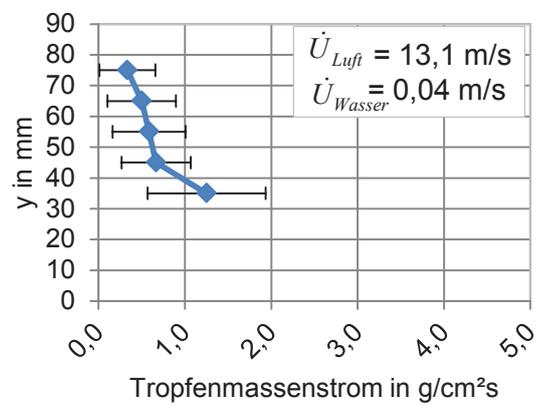
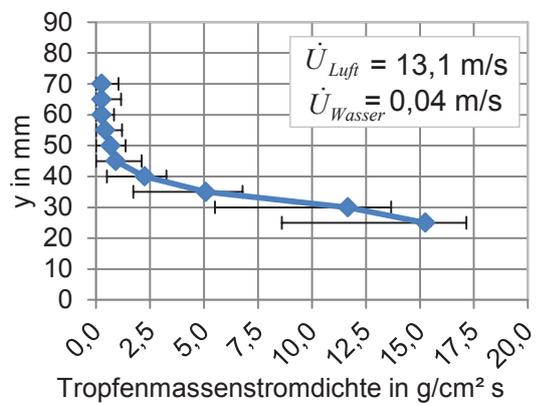
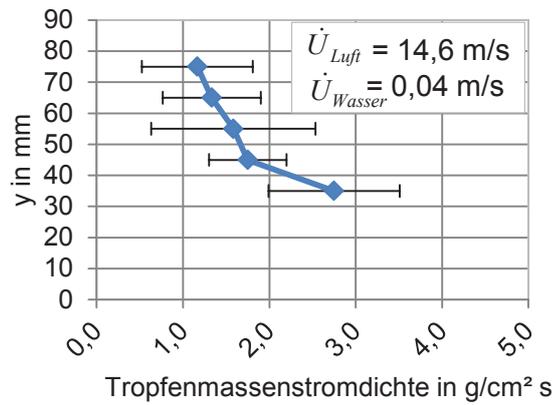
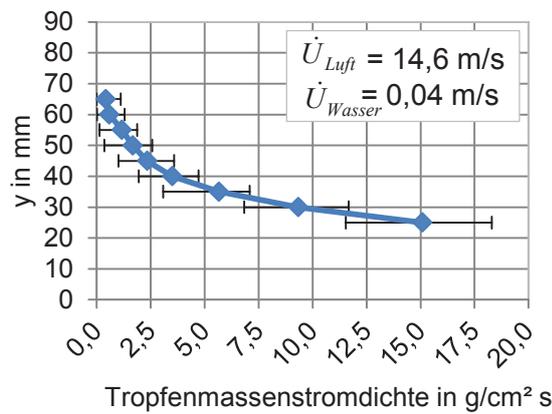
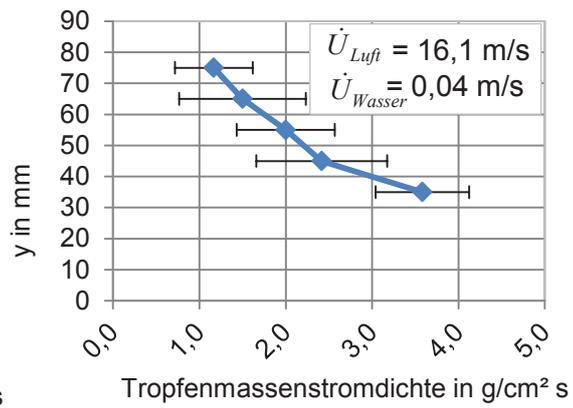
Messposition 4

Tropfenmassenstromdichte in $\text{g/cm}^2 \text{ s}$ Tropfenmassenstromdichte in $\text{g/cm}^2 \text{ s}$ Tropfenmassenstromdichte in $\text{g/cm}^2 \text{ s}$

Messposition 2

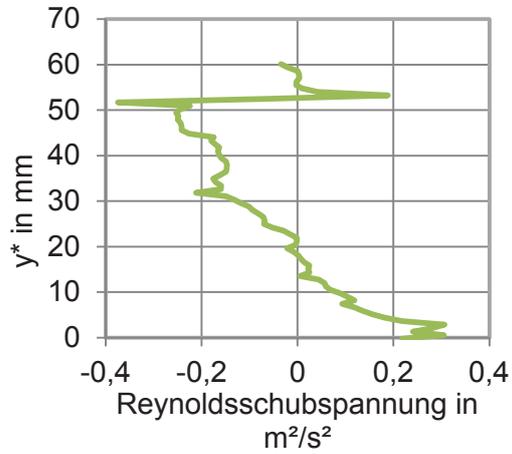


Messposition 4

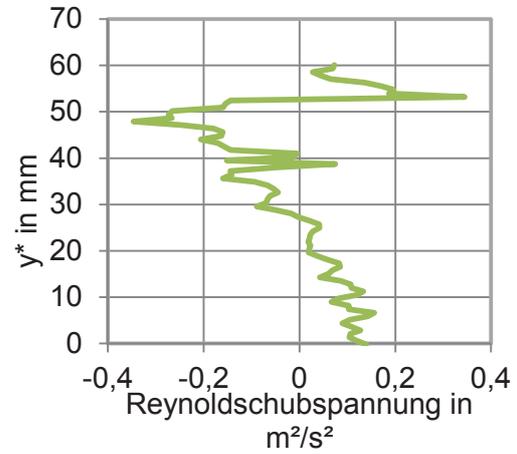


Reynoldsschubspannungen in Luft**Messposition 0**

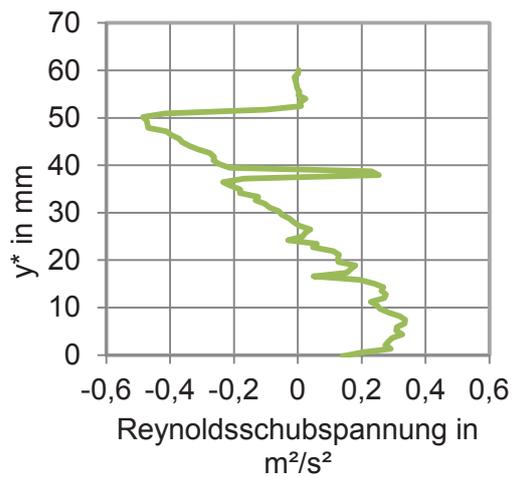
Messpunkt 1 - Messposition 0



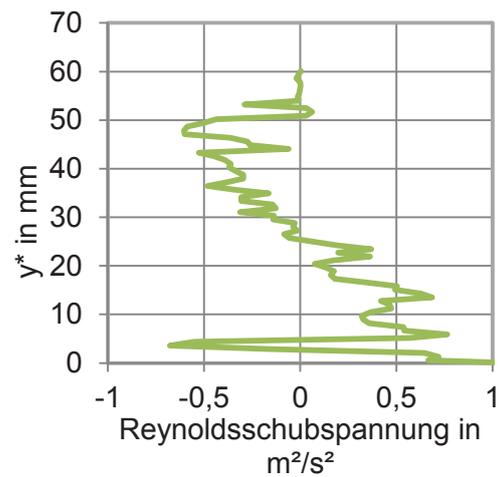
Messpunkt 2 - Messposition 0



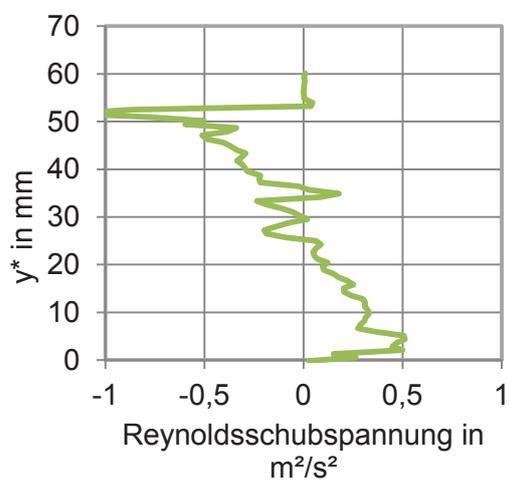
Messpunkt 3- Messposition 0



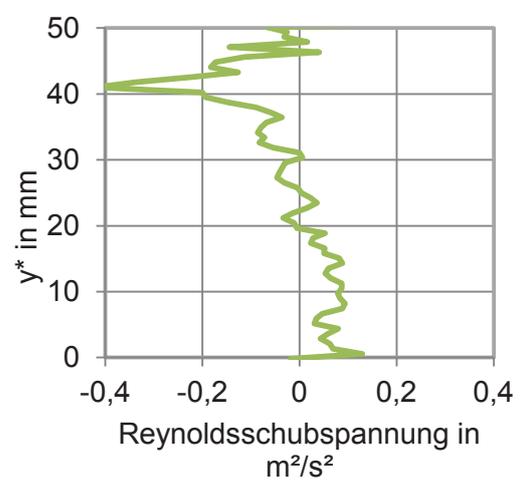
Messpunkt 4- Messposition 0



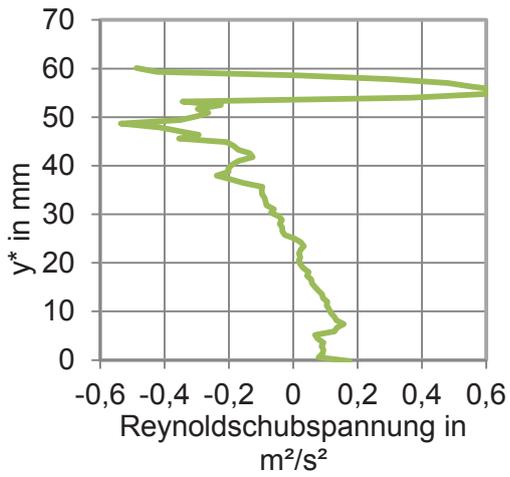
Messpunkt 5- Messposition 0



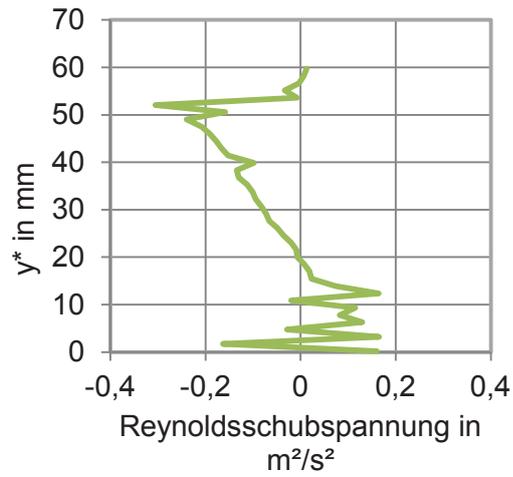
Messpunkt 6- Messposition 0



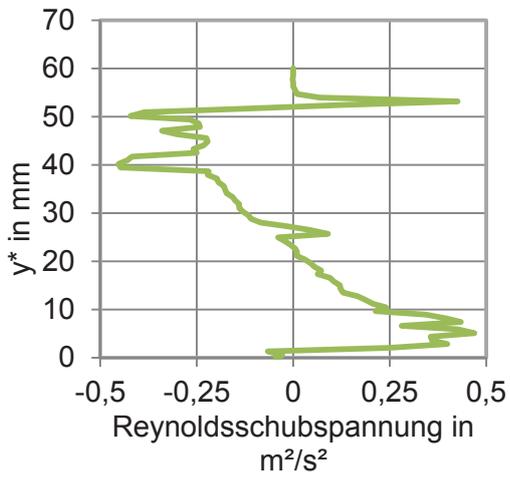
Messpunkt 7- Messposition 0



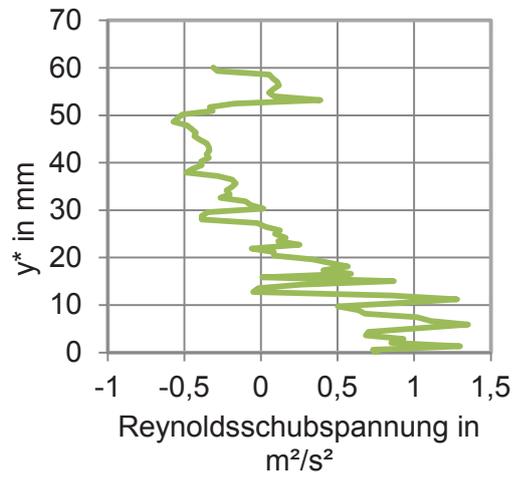
Messpunkt 8- Messposition 0



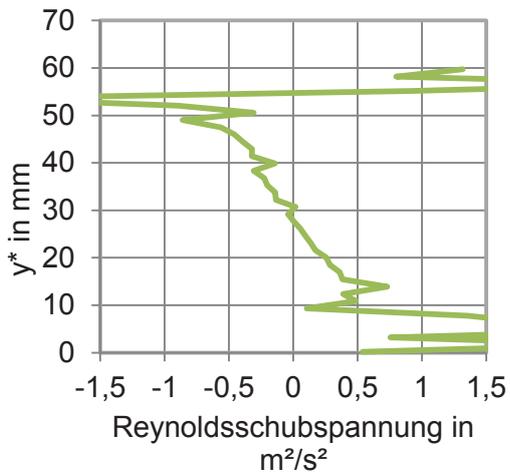
Messpunkt 9- Messposition 0



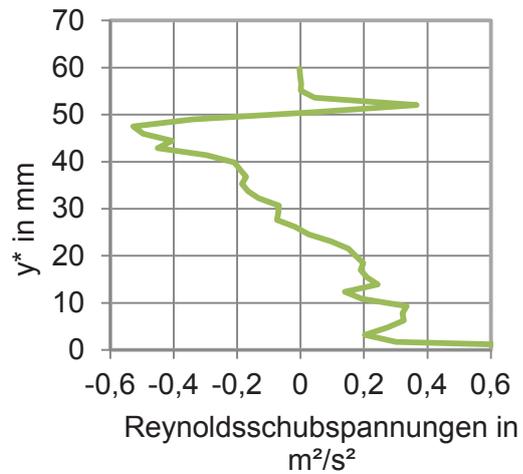
Messpunkt 10- Messposition 0



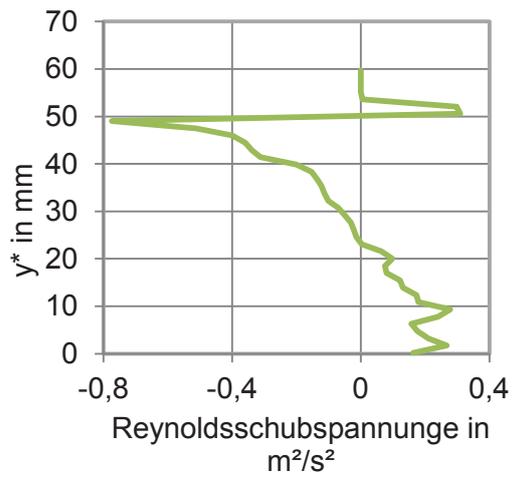
Messpunkt 11 - Messposition 0



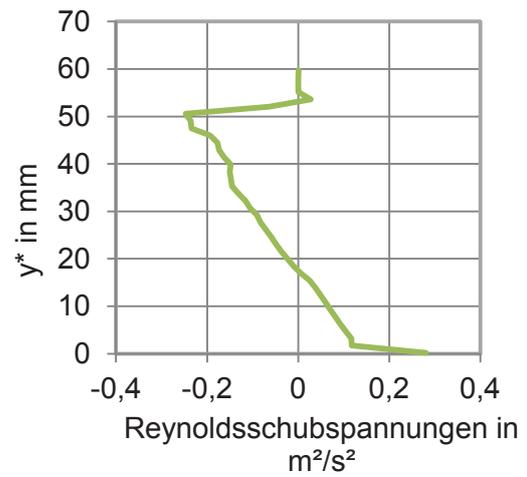
Messpunkt 12- Messposition 0



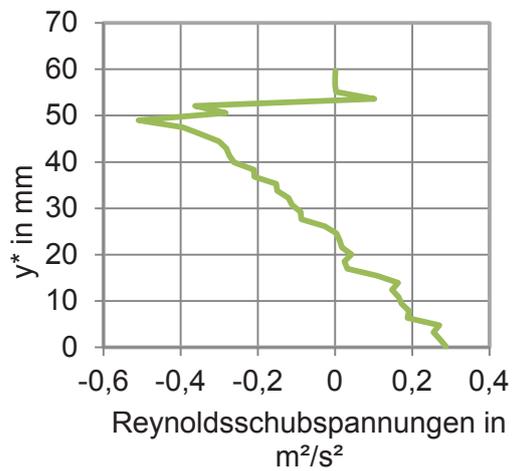
Messpunkt 13 - Messposition 0



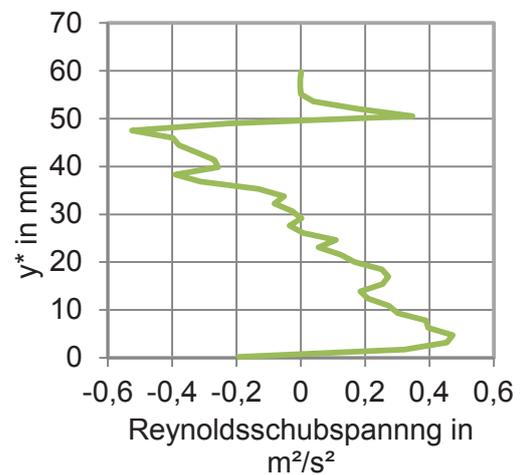
Messpunkt 14- Messposition 0



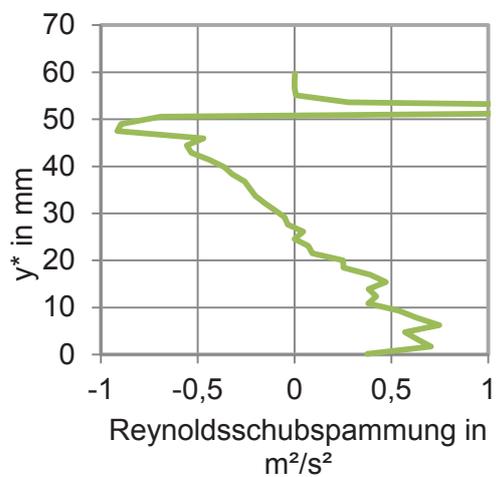
Messpunkt 15- Messposition 0



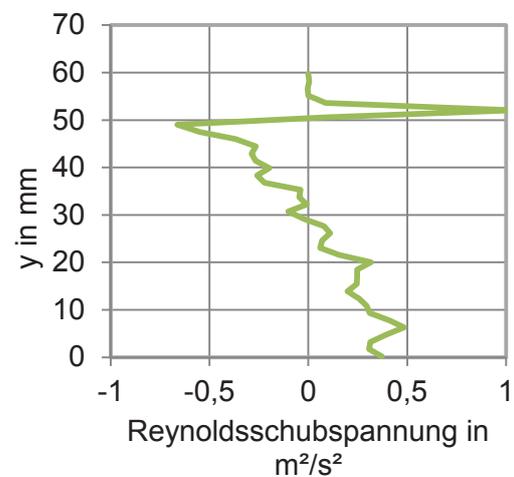
Messpunkt 16- Messposition 0



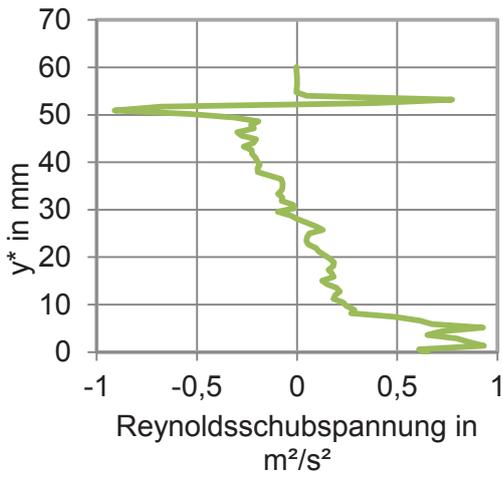
Messpunkt 17- Messposition 0



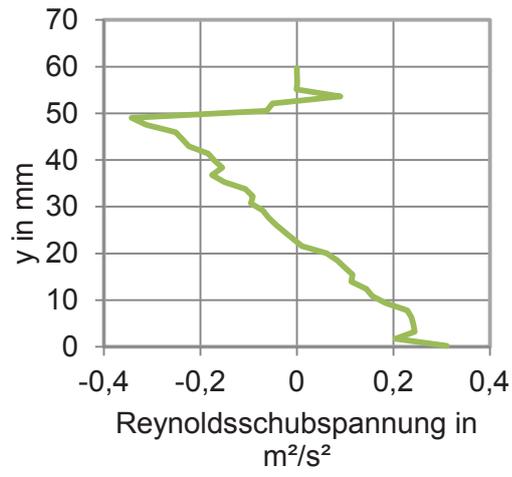
Messpunkt 18- Messposition 0



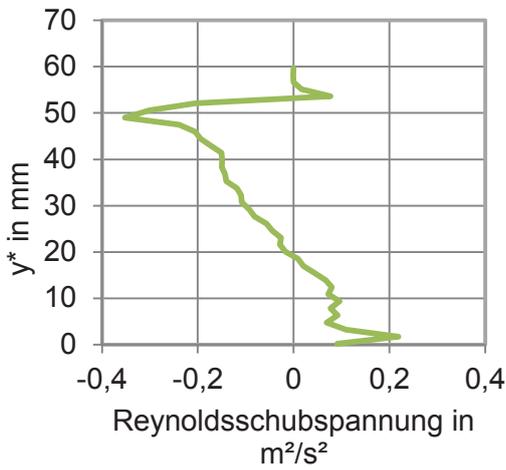
Messpunkt 19- Messposition 0



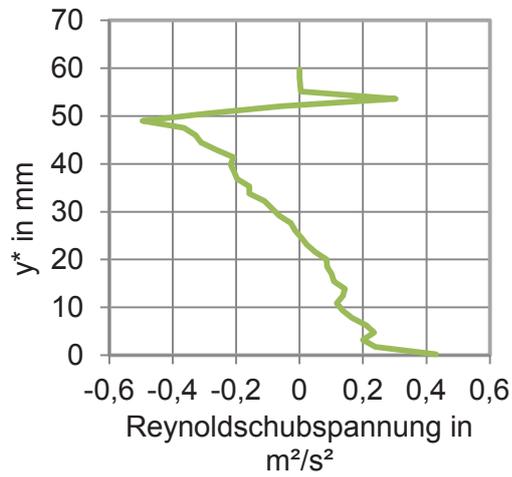
Messpunkt 20- Messposition 0



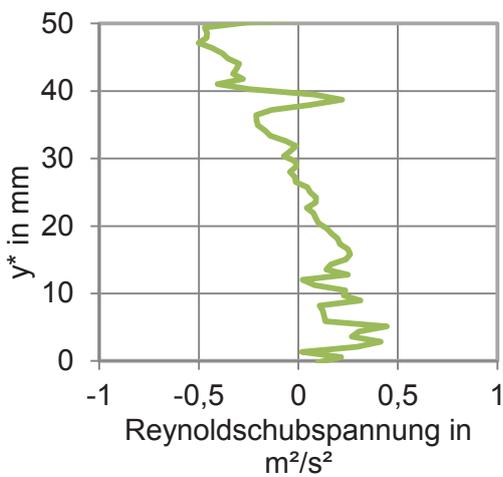
Messpunkt 21- Messposition 0



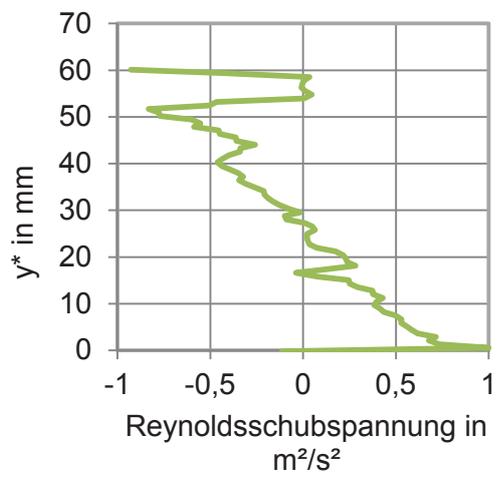
Messpunkt 22- Messposition 0



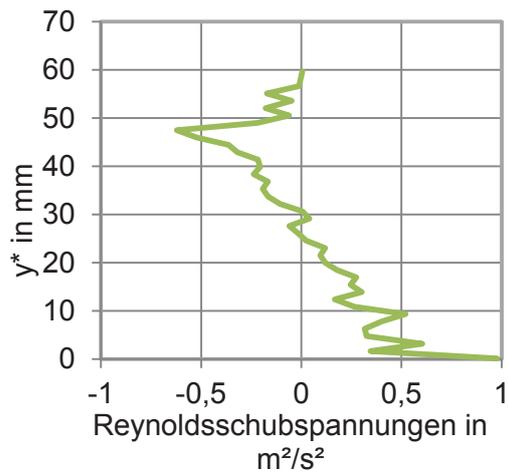
Messpunkt 23- Messposition 0



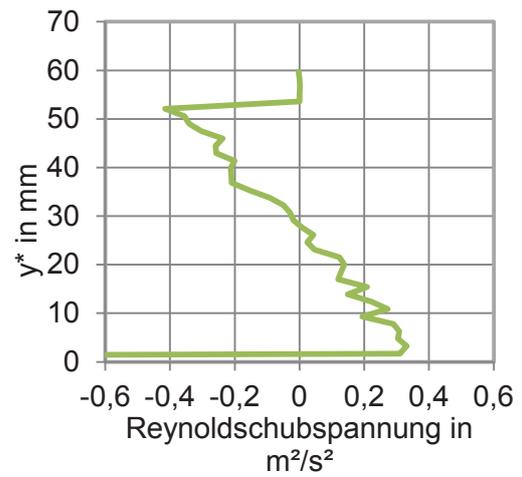
Messpunkt 24- Messposition 0



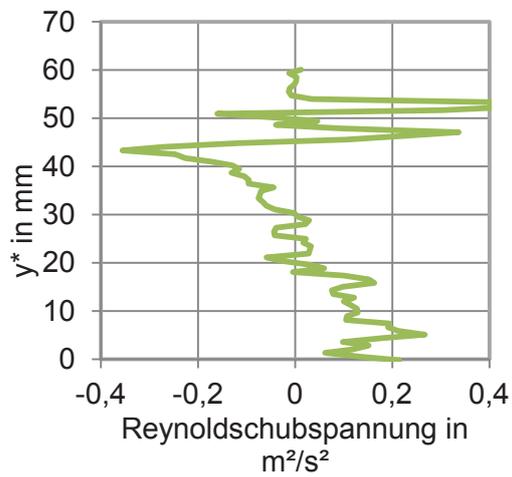
Messpunkt 25- Messposition 0



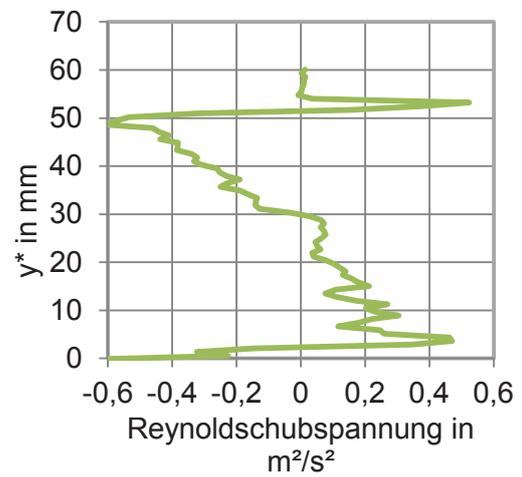
Messpunkt 26- Messposition 0



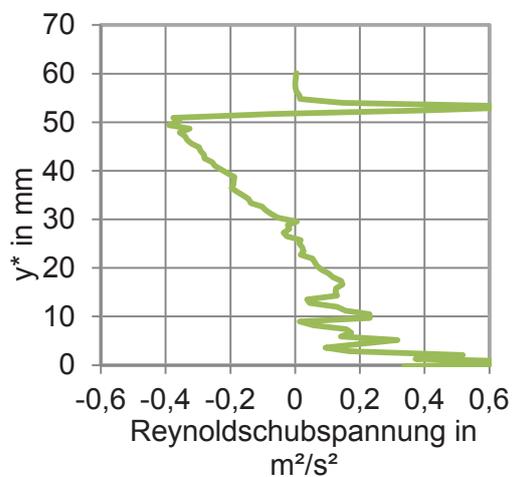
Messpunkt 27- Messposition 0



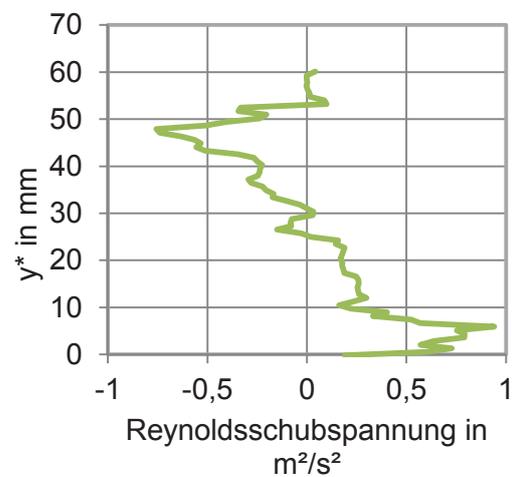
Messpunkt 28- Messposition 0



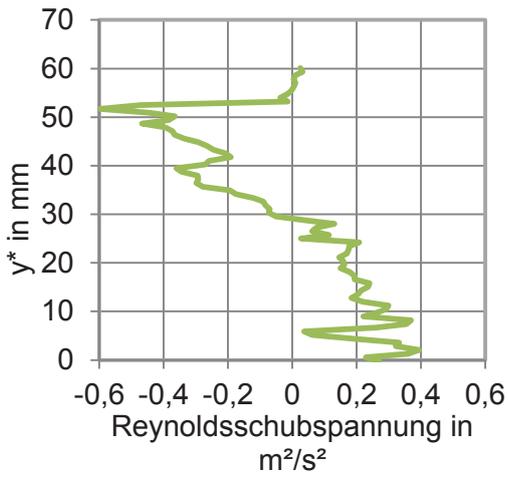
Messpunkt 29- Messposition 0



Messpunkt 30- Messposition 0

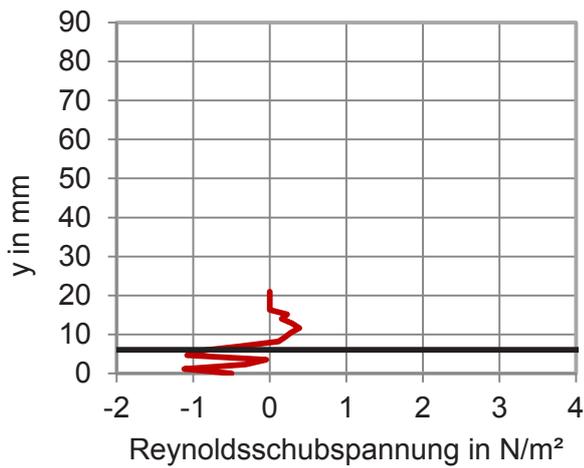


Messpunkt 31- Messposition 0

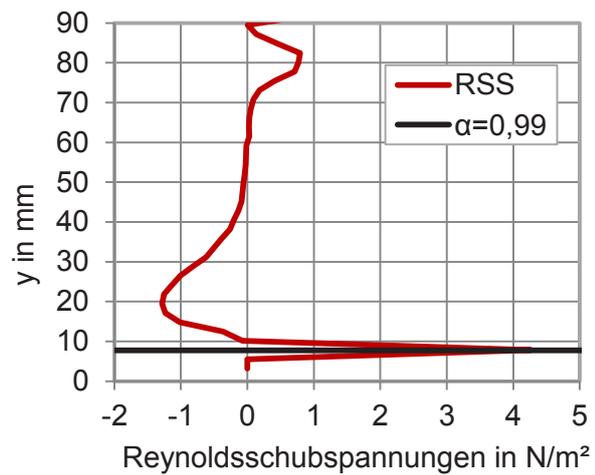


Messposition 2 – Ausgewählte Punkte

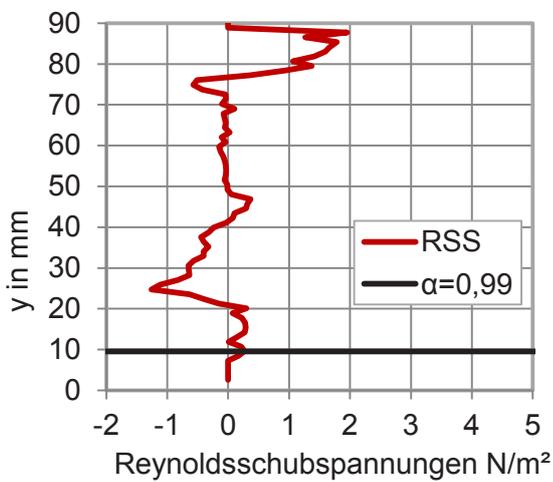
Messpunkt 1- Messposition 2



Messpunkt 8- Messposition 2



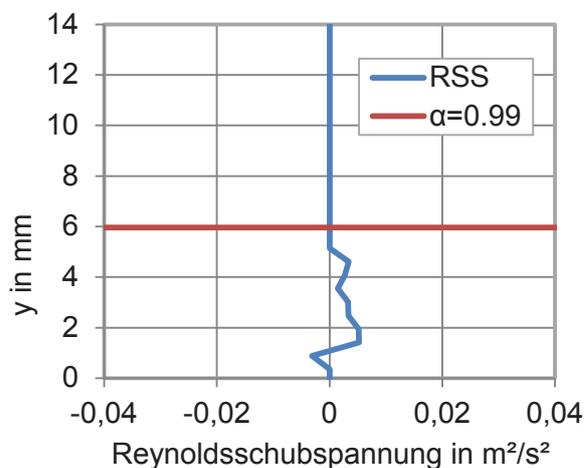
Messpunkt 9- Messposition 2



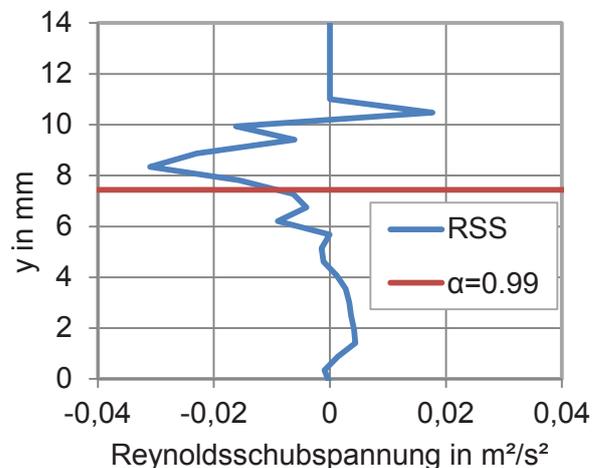
Reynoldsschubspannungen in Wasser

Messposition 1

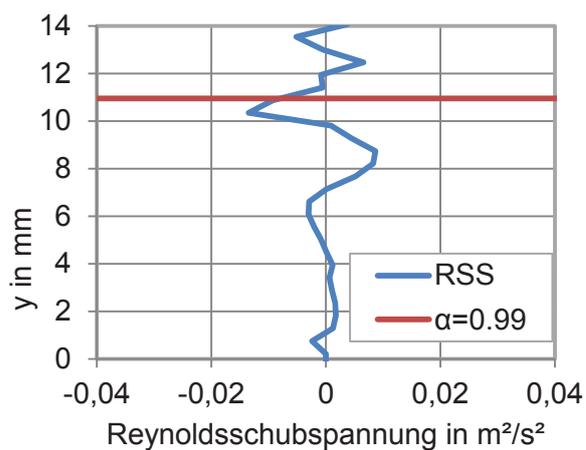
Messpunkt 1



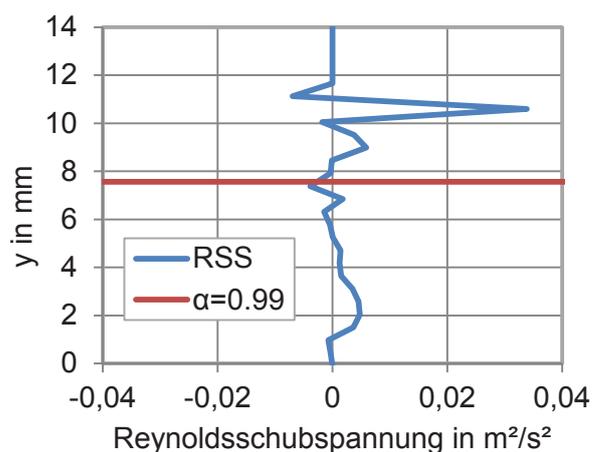
Messpunkt 2



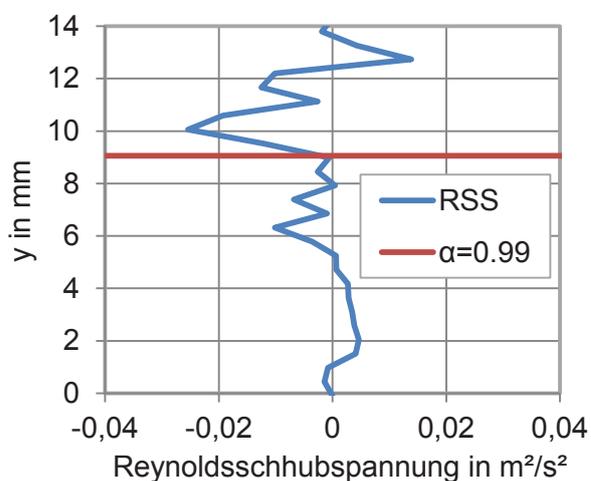
Messpunkt 3



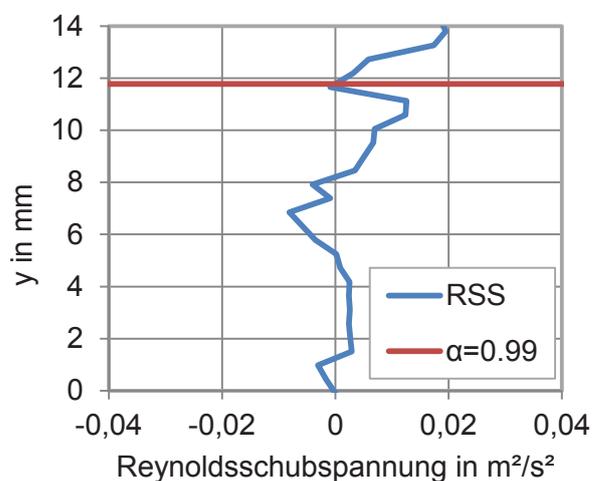
Messpunkt 8



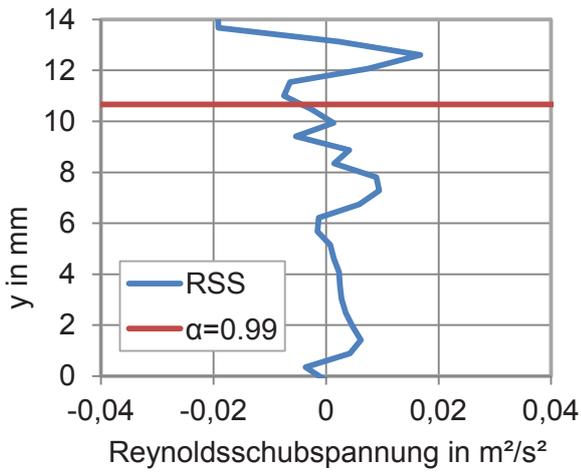
Messpunkt 9



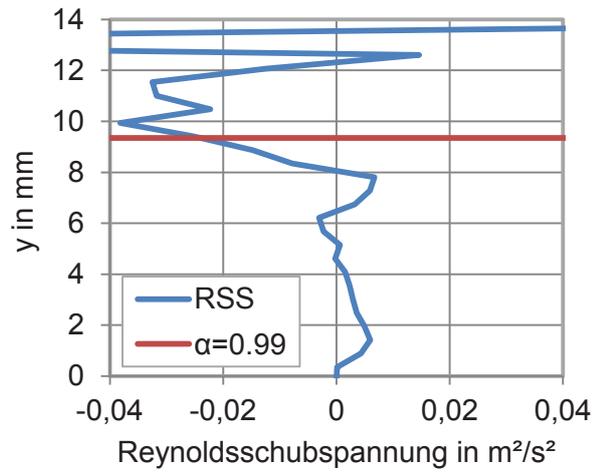
Messpunkt 10



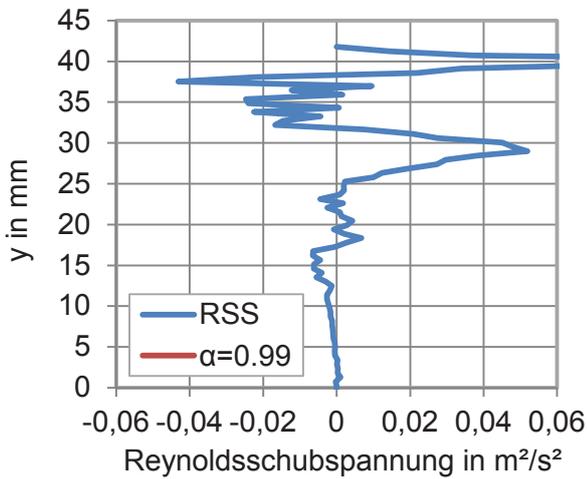
Messpunkt 15



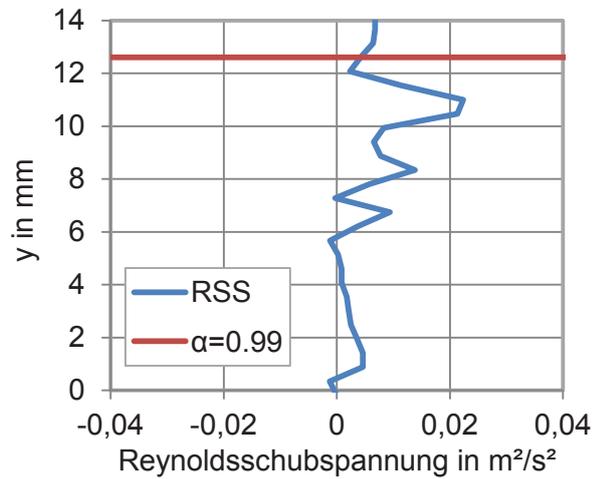
Messpunkt 14



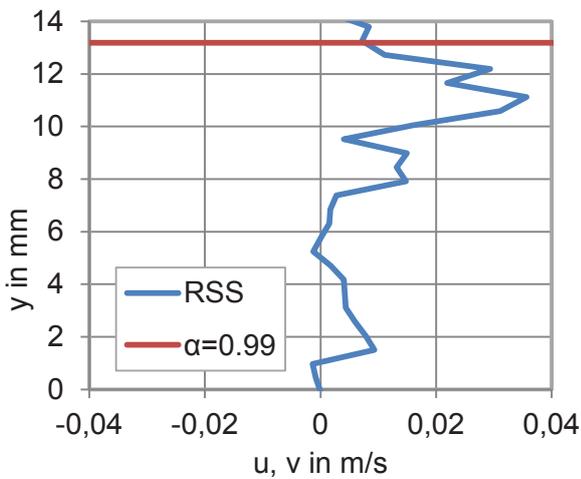
Messpunkt 19



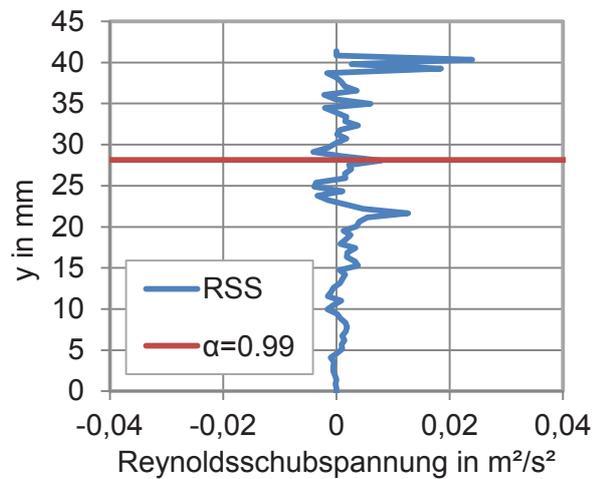
Messpunkt 16



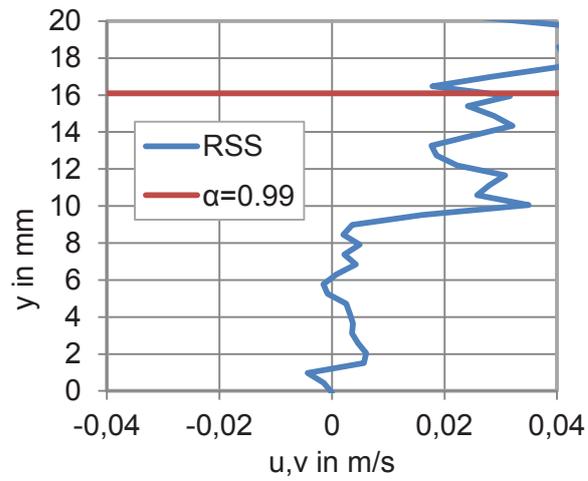
Messpunkt 21



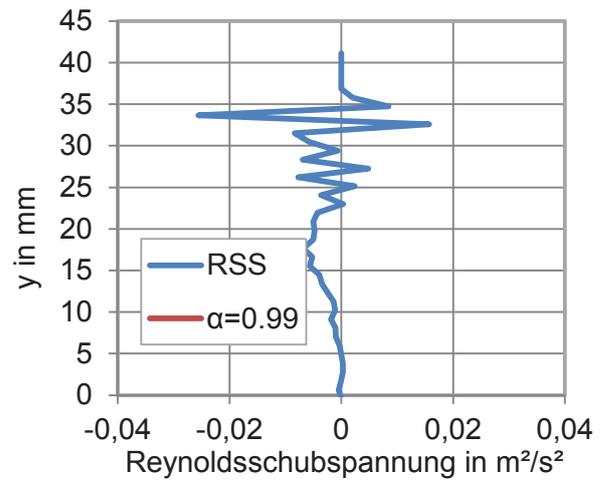
Messpunkt 18



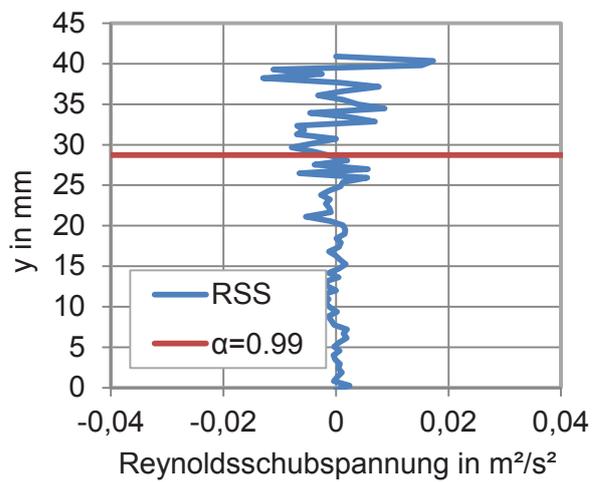
Messpunkt 23



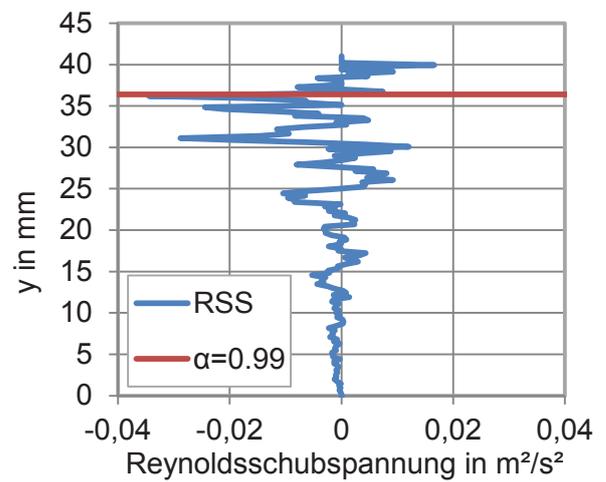
Messpunkt 20



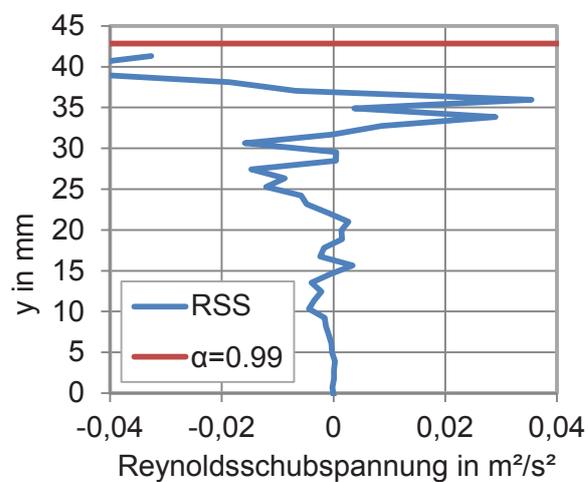
Messpunkt 27



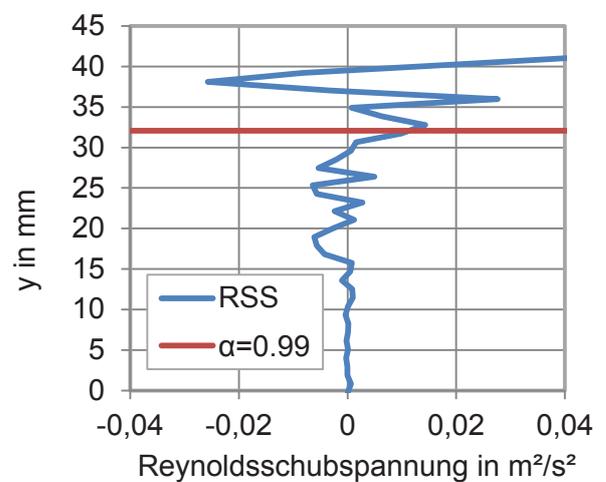
Messpunkt 26



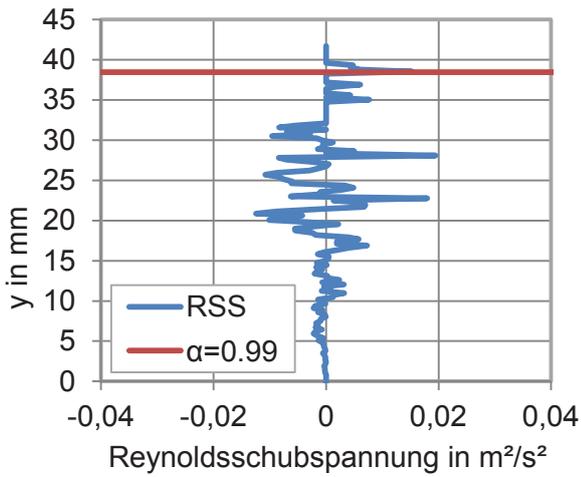
Messpunkt 29



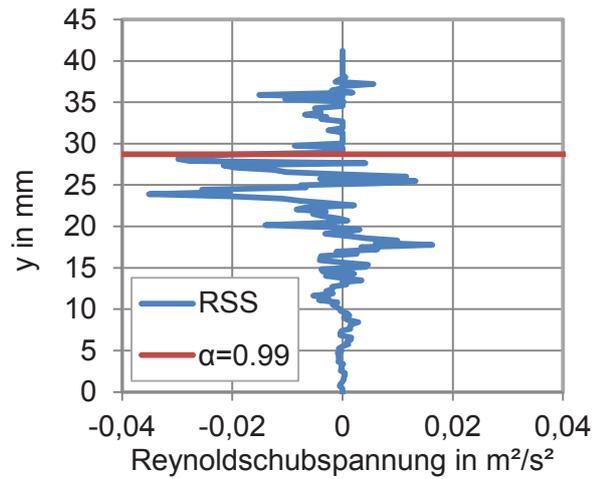
Messpunkt 28



Messpunkt 31

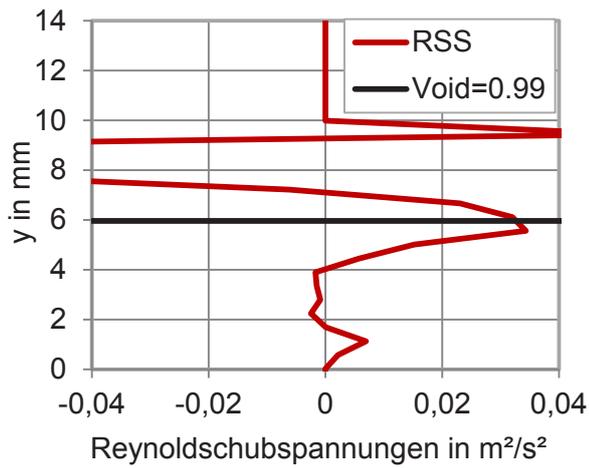


Messpunkt 30

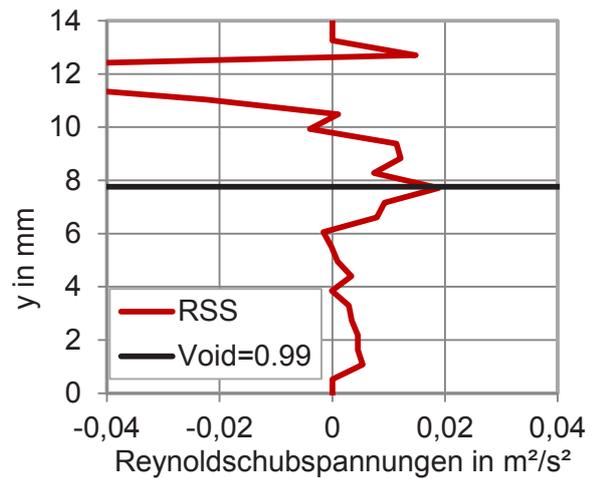


Messposition 2

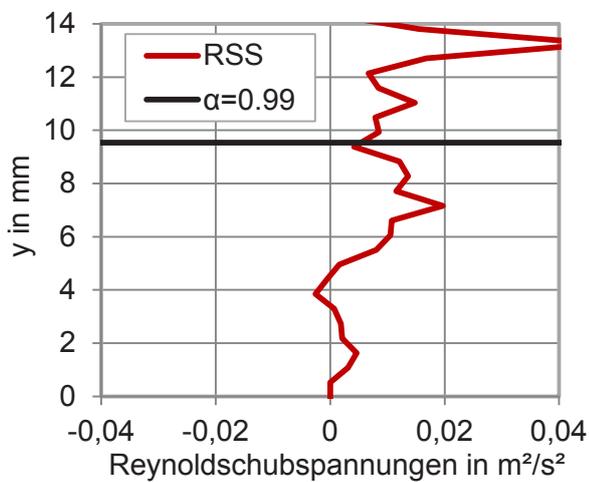
Messpunkt 1



Messpunkt 2



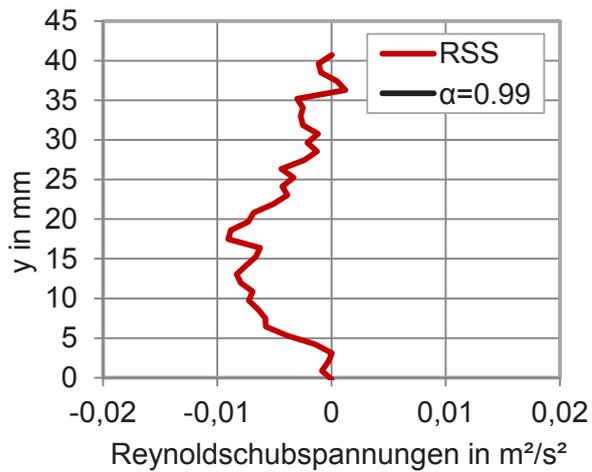
Messpunkt 3



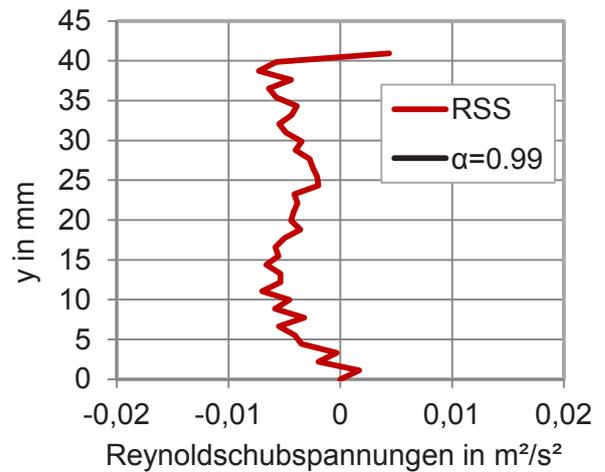
Messpunkt 4

nicht Messbar

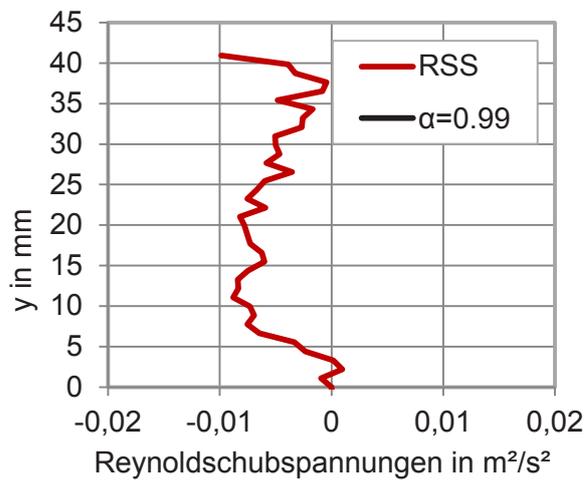
Messpunkt 5



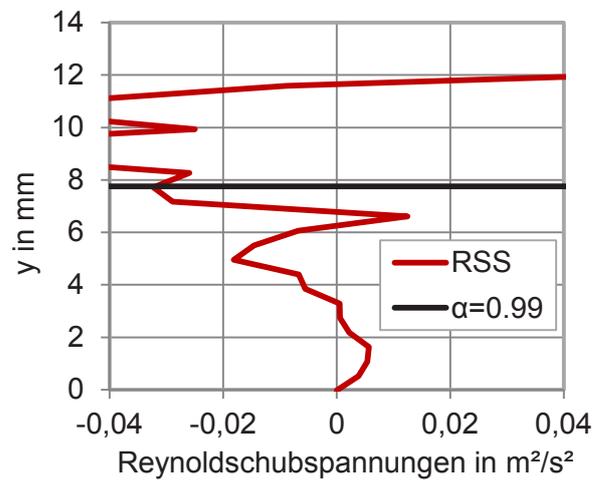
Messpunkt 6



Messpunkt 7



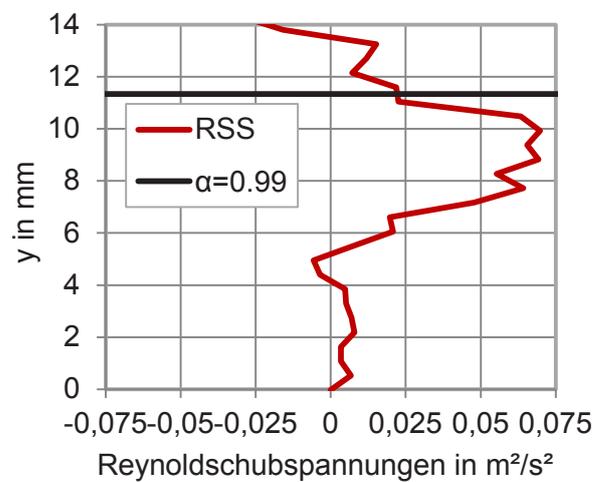
Messpunkt 8



Messpunkt9

Nicht Messbar

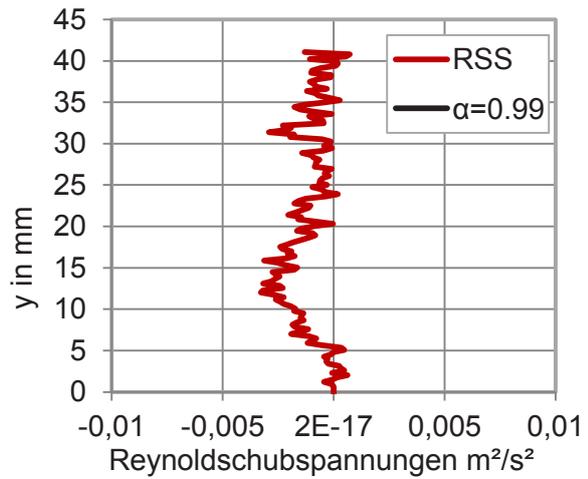
Messpunkt 10



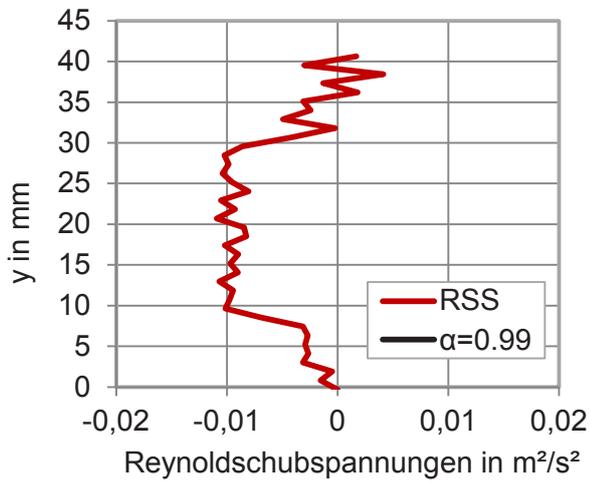
Messpunkt 11

nicht Messbar

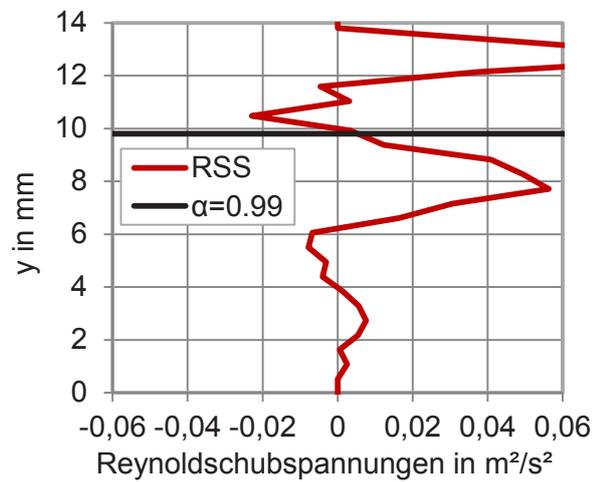
Messpunkt 12



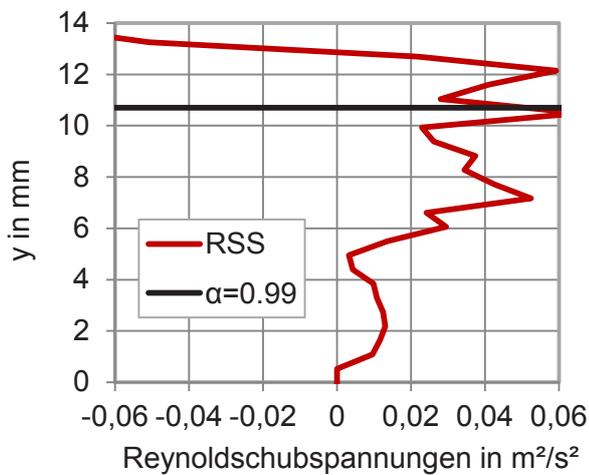
Messpunkt 13



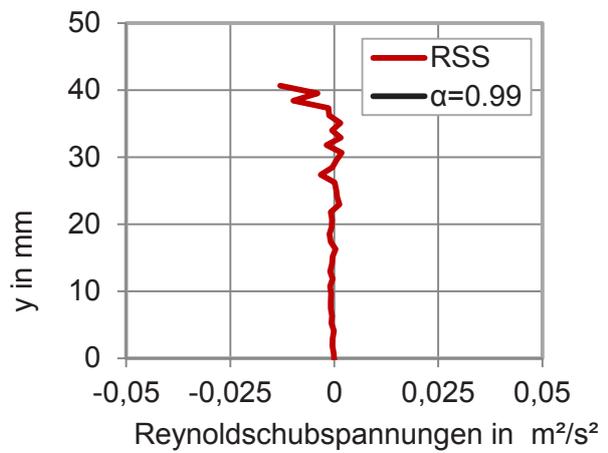
Messpunkt 14



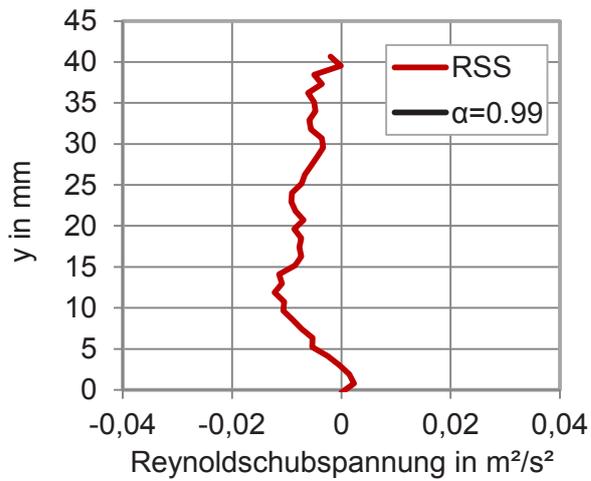
Messpunkt 15



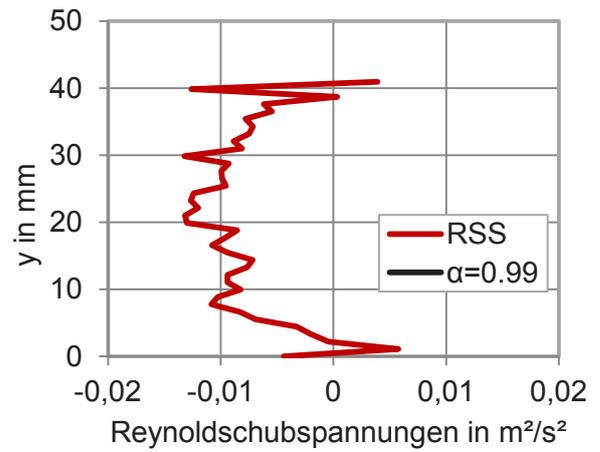
Messpunkt 18



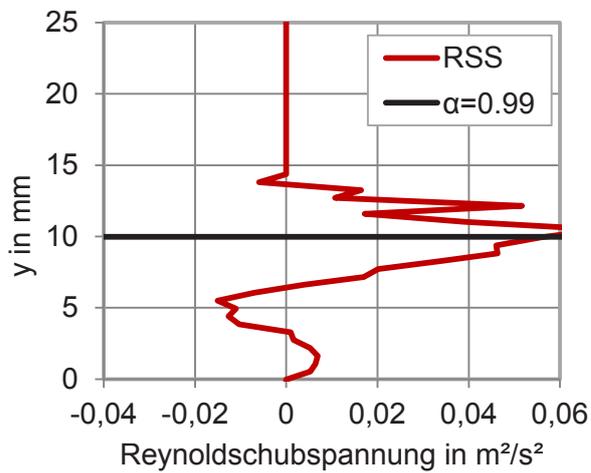
Messpunkt 19



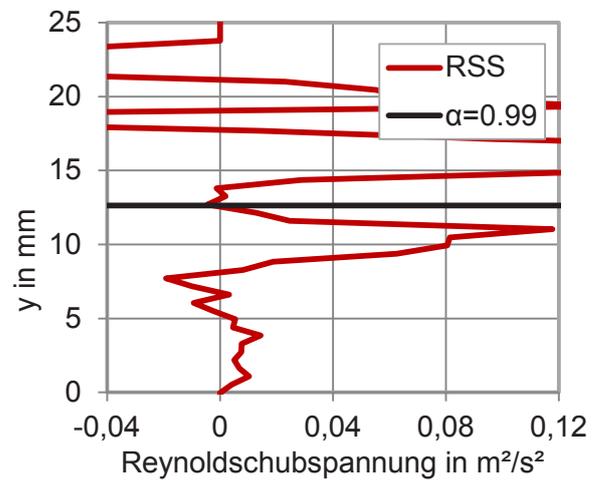
Messpunkt 20



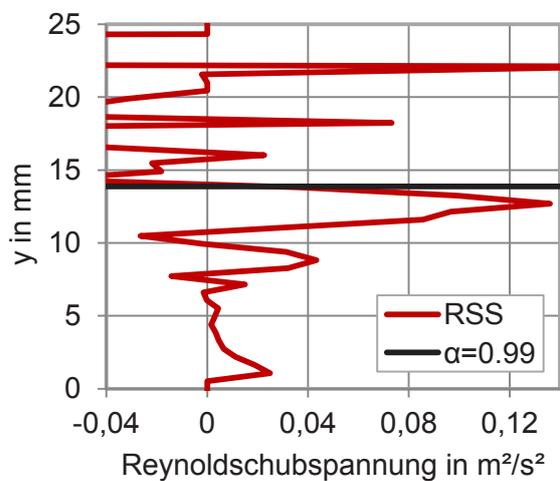
Messpunkt 21



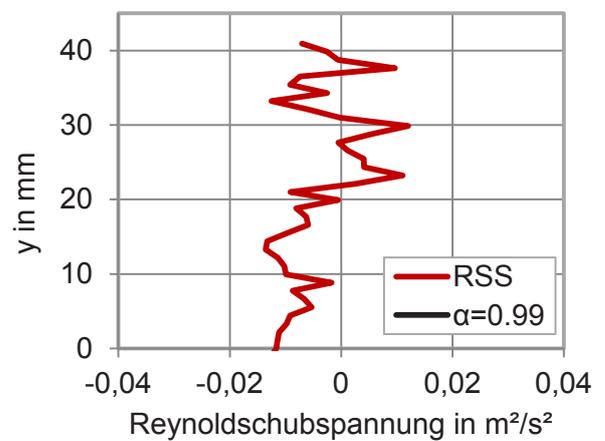
Messpunkt 22



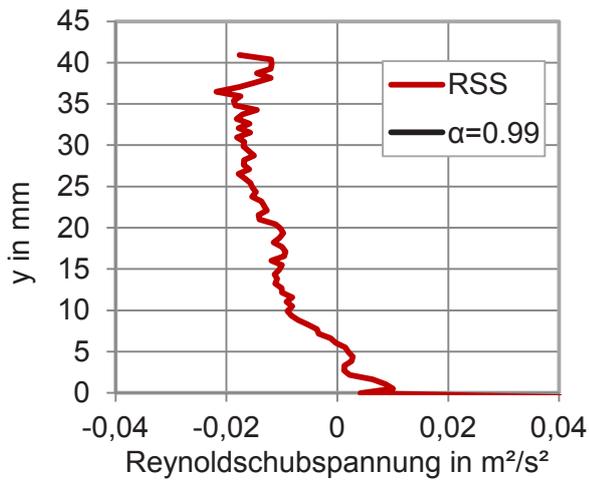
Messpunkt 23



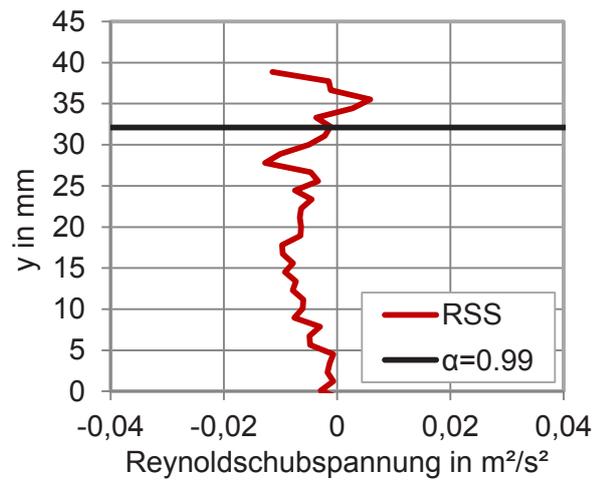
Messpunkt 26



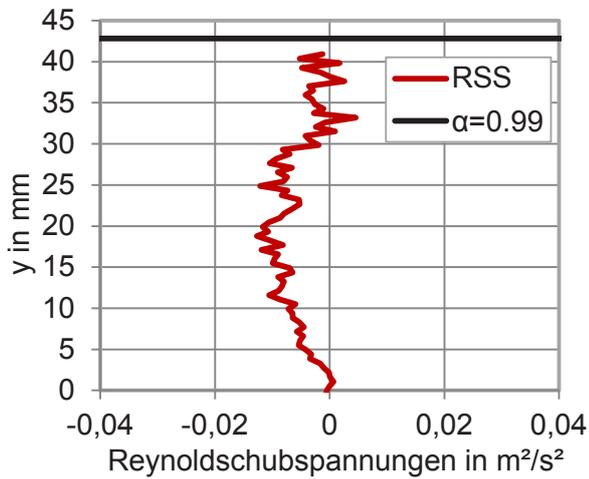
Messpunkt 27



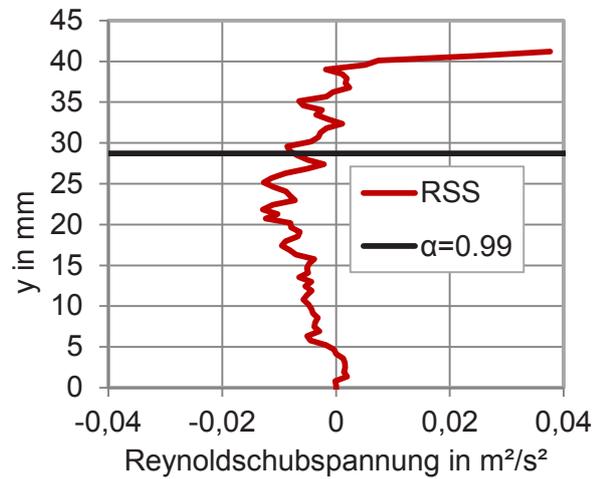
Messpunkt 28



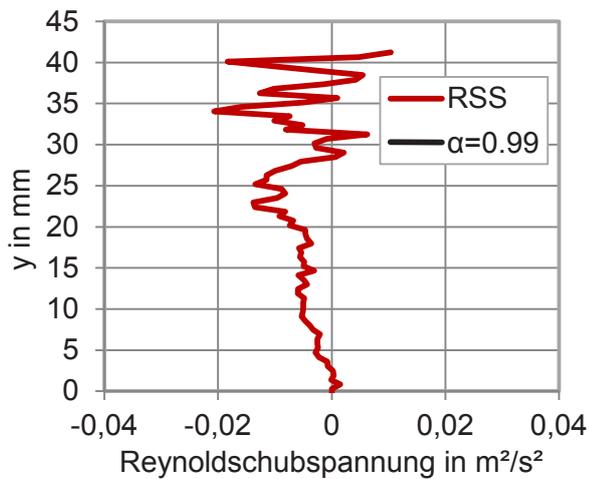
Messpunkt 29



Messpunkt 30



Messpunkt 31



Anhang E - Einstellungen PIV Post processing

Verwendete Hard-/Software:

Kategorie	Produktbezeichnung	Hersteller
Kamera 1 (Wasser)	Imager Intense	La Vision
Kamera 2 (Luft)	Flowmaster	La Vision
PTU	PTU 8	La Vision
Laser	PIV Minilite	Continuum
Mess-/Auswertesoftware	Davis 7.2	La Vision

Messung in Wasser

Messung bei schießender Strömung (wichtigste Parameter)

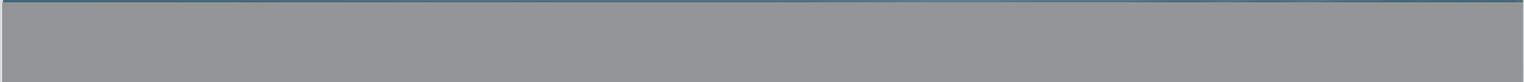
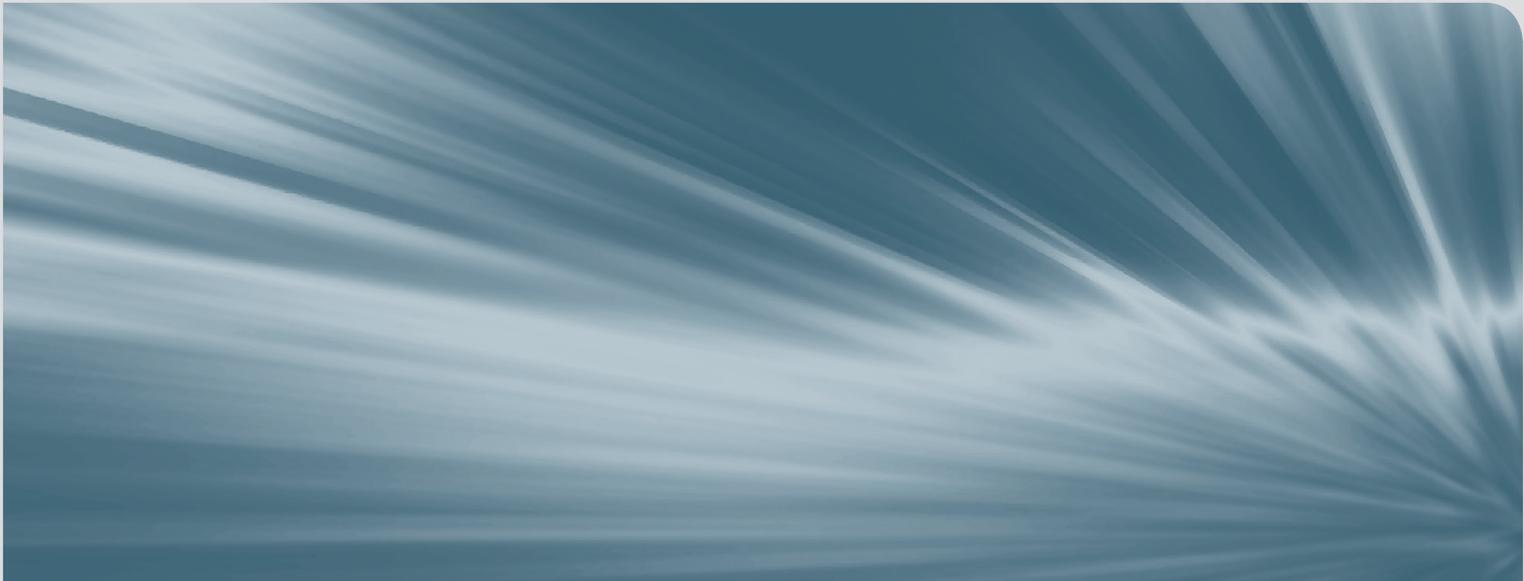
Kategorie	Einstellung
Bildaufbereitung	SubLocalMinOfSeriesSubLocalAvg count(x,y)- average count(x,y) of time series PIV(Particle Image Processing): Subtract sliding background, scale length: 15 Subtract offset counts: 6
PIV-Auswertung	Vector calculation parameter Multi pass Window size, Overlap, Passes 64 × 64 50 1 32 × 32 75 2
Vector Postprocessing	Multi-pass postprocessing: Delete vectors with peak ration $Q < 1,3$ strongly remove & iteratively replace remove if diff to avg $> 2^* \text{ r.m.s. o.n.}$ reinsert if diff to avg $> 3^* \text{ r.m.s. o.n.}$ Remove groups with < 5 vetors

Messung bei teilweise umgekehrter Strömung

Kategorie	Einstellung
Bildaufbereitung	PIV(Particle Image Processing): Subtract offset counts 100
PIV-Auswertung	Vector calculation parameter Multi pass Window size, Overlap, Passes 64 × 64 50 1 32 × 32 50 2
Vector postprocessing	Multi-pass post processing: Delete vectors with peak ration $Q < 1,3$ remove & replace remove if diff to avg $> 1 * \text{r.m.s. o.n.}$

Messung in Luft

Kategorie	Einstellung
Bildaufbereitung	SubLocalMinOfSeriesSubLocalAvg count(x,y)- average count(x,y) of time series PIV(Particle Image Processing): Subtract sliding background, scale length 15 Subtract offset counts 6
PIV-Auswertung	Vector calculation parameter Multi pass Window size, Overlap, Passes 64 × 64 50 1 32 × 32 75 2
Vector postprocessing	Multi-pass postprocessing: Delete vectors with peak ration $Q < 1,3$ strongly remove & iteratively replace remove if diff to avg $> 2 * \text{r.m.s. o.n.}$ reinsert if diff to avg $> 3 * \text{r.m.s. o.n.}$ Remove groups with < 5 vetors



ISSN 1869-9669
ISBN 978-3-7315-0283-8

