

Experimentelle Untersuchungen mehrphasiger Filmströmungen

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Ilja Ausner
aus Berlin

von der Fakultät III - Prozesswissenschaften
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Prüfungsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. M. Kraume

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. G. Wozny

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. F. Ziegler

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 27.10.2006

Berlin 2006

D 83

Vorwort

Eine wissenschaftliche Arbeit in diesem Rahmen und in einem Zeitraum von 3 Jahren zu verfassen, bedarf viel Unterstützung und Diskussion von anderen Personen und Organisationen, denen ich an dieser Stelle danken möchte.

Mein größter Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Günter Wozny, der mich stets durch Diskussionen und Ratschläge in meiner täglichen Arbeit unterstützt hat und der immer ein offenes Ohr für mich hatte. Des Weiteren möchte ich den Herren Prof. Dr.-Ing. Felix Ziegler und Prof. Dr.-Ing. Matthias Kraume für ihre bereitwillige Teilnahme am Prüfungsausschuss danken, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Hein Auracher, der mich als Mentor innerhalb des Graduiertenkollegs 827 „*Transportvorgänge an bewegten Phasengrenzflächen*“ betreut hat und mir die HFI-Vergleichsmessungen ermöglicht hat.

Für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Graduiertenkollegs 827 möchte ich der *Deutschen Forschungsgemeinschaft* sowie dem *Forschungsschwerpunkt Fluidsystemtechnik* und dem *PIPES-Programm* danken. Weiterer Dank gilt der Fa. *Capsulation Nanoscience AG*, die mir für fluoreszenzspektroskopische Messungen die erforderliche Messtechnik zur Verfügung gestellt hat, und den Mitarbeitern des *Stranski-Laboratoriums für Physikalische und Theoretische Chemie* für die Möglichkeit der Kontaktwinkelmessungen. Ferner danke ich der *ILA GmbH* für die Ermöglichung eines dreiwöchigen Forschungsaufenthalts am Firmenstandort Jülich und die gute Zusammenarbeit bei der Entwicklung optischer Messtechnik.

Außerdem geht mein Dank an die Kollegen und Freunde am Fachgebiet *Dynamik und Betrieb technischer Anlagen* sowie im Graduiertenkolleg 827, durch die ich häufig Anregungen, viel Unterstützung und eine sehr angenehme Arbeitsatmosphäre erfahren habe. Ganz besonders möchte ich mich hier bedanken bei Dr.-Ing. Jens-Uwe Repke für die vielen lebhaften und interessanten Diskussionen sowie bei meinem langjährigen Zimmerkollegen und Projektpartner Andreas Hoffmann für die hervorragende Zusammenarbeit zwischen CFD-Simulation und Experiment.

Meinen studentischen Mitarbeitern Florent Fontaine und Zbigniew Kijak möchte ich danken für ihre ausdauernde Tätigkeit bei der manuellen Bildauswertung, ebenso für ihr Engagement und ihre sehr gute Zuarbeit im Rahmen ihrer Diplomarbeiten.

All dies wäre jedoch niemals möglich gewesen ohne die Unterstützung meiner Familie, die mir stets den Rücken frei gehalten hat. Insbesondere meiner Frau Stephanie gilt hierfür mein herzlichster Dank.

Berlin, Juni 2006

Abstract

In chemical engineering processes, liquid film flows are of special interest due to a small volume compared to a large surface. Single-liquid film flows were and are the focus of past and current research and are quite well understood so far. But the flow behavior becomes more complex with the appearance of a second liquid phase as it can be observed e.g. in the distillation of heterogeneous azeotropic mixtures in packed towers - also known as three-phase distillation. The occurrence of a second liquid phase changes the liquid flow behavior, which has a strong influence on the separation performance of the tower and that makes the modeling of the three-phase distillation process much more difficult. The multiphase flow behavior is a very complex system of rivulet and droplet flows for one liquid phase and film flow for the second liquid phase on structured sheets of the packing, in addition to the vapor phase in counter-current flow. For a better understanding of this process, it is necessary to investigate the multiphase flow behavior, which is the objective of this thesis.

First of all, established measurement methods have to be checked for the applicability to this multiphase flow behavior. Optical measurement methods are preferred, since they do not disturb the thin liquid flow. First flow investigations of a single-liquid flow over inclined steel plates without forced gas or vapor flow are carried out. Therefore, the optical measurement methods particle-tracking-velocimetry (PTV) and light-induced-fluorescence (LIF) are developed further and applied to the measurements of surface velocity, liquid spreading and fluid thickness. The applied methods are compared to data taken from the literature, which show good agreements and the applicability of the used methods. Subsequent, the experimental results are used to validate CFD-simulations, which are carried out in a partner project and are published in the literature.

After that, the flow behavior becomes more complex due to the addition of a second liquid phase. The co-current flow of the immiscible liquids water and toluene on inclined steel plates is measured and analyzed. Experimental results show that both phases overlay and influence each other. The influencing effect is found in a decrease of the multiphase flow velocity compared to the single-liquid flow. On the other hand, the interaction between the liquids leads to a stabilization of the whole liquid flow. The published CFD-simulations show a good qualitative and quantitative agreement with the experiments. Additionally, the interactions between the liquid phases are observed in the simulations as well. Finally, the observed fluid dynamic effects and behaviors are discussed regarding their application on packed towers.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Physikalische Grundlagen	3
2.1	Filmströmung	3
2.2	Aufreißen der Filmströmung	6
2.3	Rinnsal- und Tropfenströmung	7
2.4	Ergänzungen zur Flüssigkeitsbelastung	11
3	Statistische Grundlagen	13
3.1	Statistische Grundbegriffe	13
3.2	Faktorielle Versuchsplanung	14
3.3	Auswertung von Versuchsplänen	15
3.4	Vorhersagegleichungen	19
4	Methoden	21
4.1	Messmethoden	22
4.1.1	Schattenflächenmessung	23
4.1.2	Dickenmessung	24
4.1.3	Geschwindigkeitsmessung	26
4.2	Erweiterung auf die Mehrphasenströmung	29
4.2.1	Dickenmessung	30
4.2.2	Geschwindigkeitsmessung	30
4.3	Simulationen mittels CFD	31
5	Einphasige Strömung	33
5.1	Beschreibung des Versuchsaufbaus	33
5.2	Implementierung der Messtechnik	36
5.2.1	Geschwindigkeitsmessung	36
5.2.2	Dickenmessung	37
5.3	Plattenbenetzung	40
5.4	Oberflächengeschwindigkeiten	43
5.4.1	Veränderung bei Filmaufreißen	45
5.4.2	Vergleich mit HFI-Messungen	49
5.5	Fluiddicken	53
5.5.1	Wasserfilmströmung	53
5.5.2	Toluolfilmströmung	58
5.5.3	Aufreißende Wasserströmung	60
5.6	Strukturierte Platten	65

6	Zweiphasige Strömung	69
6.1	Erweiterung des Versuchsaufbaus	69
6.2	Erweiterung der Messtechnik	70
6.2.1	Geschwindigkeitsmessung	70
6.2.2	Dickenmessung	72
6.2.3	Plattenbenetzung	74
6.3	Oberflächengeschwindigkeit und Schattenfläche	75
6.3.1	Versuchsplan	76
6.3.2	Vorhersagegleichungen	79
6.3.3	Auswertung	80
6.4	Fluidicken	82
6.4.1	Wasserphase	83
6.4.2	Vergleich MNPH zu Rhodamin B	86
6.4.3	Toluolphase	87
6.4.4	Stabilisierung der Strömung	90
6.5	Automatische Bildauswertung	91
6.5.1	Geschwindigkeiten	91
6.5.2	Fluiddicke und Schattenfläche	98
7	Zusammenfassung und Ausblick	99
A	Aufstellung der verwendeten Messtechnik	101
A.1	Ausbreitungs/Geschwindigkeitsmessung	101
A.2	Fluoreszenzmessung	101
B	Programmcode	103
C	Betreute Studien- und Diplomarbeiten	107
	Literaturverzeichnis	109

Abbildungsverzeichnis

2.1	Definition des Kontaktwinkels	6
2.2	Schematische Darstellung des Filmaufreißens	8
2.3	Veränderung der Morphologie	8
2.4	Auftreten dynamischer Kontaktwinkel	10
3.1	Normalverteilung einer Messgröße x	14
3.2	Beispiel für die Durchführung eines faktoriellen Versuchsplanes	16
4.1	Mögliche Form einer mehrphasigen Filmströmung	21
4.2	Bestimmung der Schattenfläche anhand von Momentaufnahmen der Strömung.	23
4.3	Energieübergänge bei Molekülen.	24
4.4	Absorptions- und Emissionsspektrum von Fluoreszein	25
4.5	Problem der Partikelprojektion	27
4.6	Schematische Darstellung des Phasendiagramms für Wasser-Toluol	29
5.1	Schematische Darstellung des einphasigen Versuchsaufbaus	34
5.2	Varianten der Flüssigkeitsaufgabe	35
5.3	Partikel und Wellen als Tracer	36
5.4	Gemessene Fluoreszenzspektren von Rhodamin B	38
5.5	Prinzip der Fluidickenmessung	39
5.6	Schattenfläche als Funktion der Re-Zahl	41
5.7	Gemessene Tracergeschwindigkeiten einer Wasserströmung	43
5.8	Partikelgeschwindigkeiten im Vergleich zur Oberflächengeschwindigkeit	45
5.9	Oberflächengeschwindigkeit u_s einer Wasserströmung in Abhängigkeit der Re-Zahl	46
5.10	Oberflächengeschwindigkeit als Funktion der Schattenfläche.	46
5.11	Oberflächengeschwindigkeit $\times$ Schattenfläche als Funktion der Re-Zahl.	47
5.12	Oberflächengeschwindigkeit eines Rinnsals	48
5.13	Prinzip der Geschwindigkeitsmessung mit HFI	50
5.14	Vergleich der gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen zwischen HFI und PTV.	51
5.15	Dreidimensionale Gestalt einer abströmenden Wellenfront	52
5.16	Fehlerhafte Geschwindigkeitsbestimmung durch punktuelle Sondenmessung.	53
5.17	Fluoreszenzaufnahme einer Wasserströmung	54
5.18	Gemessene Pixelintensitäten in der Keilküvette	55
5.19	Gemessene Filmdicken des Basisfilms	55
5.20	Filmdickenprofil entlang der Plattenbreite	56
5.21	Mit LIF gemessene Wellenprofile	58
5.22	Kalibrationsmessung der Rhodamin B-Toluollösung	59

5.23	Gemessene Toluol-Basisfilmdicke im Vergleich zur Nusselt-Filmdicke	59
5.24	LIF-Messung an einer Wasserrinnalströmung	61
5.25	Gemessenes Dickenprofil eines Rinnsals in z -Richtung.	61
5.26	Prinzip von Transmission und Reflexion	62
5.27	Prinzipskizze zur Annahme, das Rinnsalprofil entspräche einem Kreissegment. .	63
5.28	Vergleich der gemessenen Rinnsaldicke mit Literaturdaten	65
5.29	Schattenbildung durch Plattenstruktur	66
5.30	Fluoreszenzfarbstoffe erhöhen den Kontrast	67
6.1	Schematische Darstellung des mehrphasigen Versuchsaufbaus	70
6.2	Unterschiedliche Tracer bei der mehrphasigen PTV-Messung.	71
6.3	Fluoreszenzspektrum der MNPH-Toluollösung	72
6.4	Gesamtes verwendetes Fluoreszenzspektrum	73
6.5	Phasentrennung durch Fluoreszenzfarbstoffe	74
6.6	Variation der Aufgabereihenfolge der Flüssigkeiten	75
6.7	Parametereinflüsse auf die Zielgrößen	81
6.8	Kalibrationsfunktion der MNPH-Toluollösung.	83
6.9	Mehrphasige Fluidickenmessung	84
6.10	Zusammenhang zwischen Rinnsalbreite und Rinnsalhöhe	85
6.11	Vergleich der Rinnsaldicke unter Anwesenheit von Toluol	86
6.12	MNPH-Intensitätsprofil eines Wasserrinnsals im Querschnitt.	89
6.13	Stabilisierung der Wasserrinnalströmung durch Zugabe von Toluol.	90
6.14	Karte der Tracerverschiebungen aus dem Mittelpunkt durch Autokorrelation .	92
6.15	Gesamtverteilungen der mehrphasigen Tracerabstände	94
6.16	Flussdiagramm für die Gaußanpassung	96
6.17	Anpassung der Gesamtverteilungen durch zwei Gaußkurven	97

Tabellenverzeichnis

4.1	Überblick über einige veröffentlichte Messmethoden	22
4.2	Stoffparameter für die CFD-Simulationen	32
5.1	Mittlere statische Kontaktwinkel	42
5.2	Bereiche gemessener kritischer Flüssigkeitsbelastungen	42
5.3	Vergleich der Tracergeschwindigkeiten auf einem Wasserfilm	44
5.4	Gemessene a_P und u_s auf verschiedenen Plattenstrukturen	66
6.1	Variationsniveaus der Einflussparameter	76
6.2	Faktorieller Versuchsplan	77
6.3	Gemittelte Messwerte aus dem Versuchsplan	77
6.4	Auswertungstabelle des Versuchsplans.	78
6.5	Variationsbereich der Flüssigkeitsbelastungen	83
6.6	Vergleich charakteristischer Fluidickenparameter eines Toluolfilms	87
6.7	Messwerte für die Meniskusbildung an Wasserrinnsalen	88
6.8	Vergleich der angepassten mit den gemessenen Verteilungen	95

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

a, b, c	Prozessvariablen im Versuchsplan	
a_P	spezifische Schattenfläche	m^2/m^2
A_{ben}	benetzte Plattenfläche	m^2
A_P	gesamte Plattenfläche	m^2
A_{quer}	Kolonnenquerschnittsfläche	m^2
A, B, C	Faktor bzw. Hauptwirkung im Versuchsplan	
AB, AC, BC	Wechselwirkung erster Ordnung im Versuchsplan	
ABC	Wechselwirkung höherer Ordnung im Versuchsplan	
b	Plattenbreite	m
B	Flüssigbelastung in Kolonnen bezogen auf die Querschnittsfläche	m^3/m^2h
c	Lichtgeschwindigkeit (im Vakuum: $3 \cdot 10^8 m/s$)	m/s
c_F	Farbstoffkonzentration	mol/m^3
d	Schichtdicke	m
E	Gesamtenergie (Summe aus kinetischer Energie und Oberflächenbildungsenergie)	J
E_i	Energieniveau	J
ΔE	Betrag eines Energieübergangs	J
f	Freiheitsgrad	-
F	Wert der theoretischen F -Verteilung	-
g	Fallbeschleunigung ($9,81 m/s$)	m/s
h	Planksches Wirkungsquantum ($6,625 \cdot 10^{-34} Js$)	Js
h	Höhenparameter	-
i, j	transformierte Bildkoordinaten	m
I_0	Intensität des Anregungslichts	W/m^2
I_{abs}	absorbierte Lichtintensität	W/m^2
I_F	Intensität des Fluoreszenzlichts	W/m^2
L_i	Einlauflänge	m
m	Mittelwert der normalverteilten Stichprobe	
n	Anzahl der Versuchsparameter	-
N	Anzahl der Versuche	-

p	relative Häufigkeit	-
p_l	Rinnsalinnendruck	N/m^2
p_v	Rinnsalumgebungsdruck	N/m^2
r	Kreisradius	m
$1/r$	Krümmung der Phasengrenzfläche	$1/m$
R	Korrelationsfunktion	
s	Standardabweichung der normalverteilten Stichprobe	
t	Zeit	s
Δt	Zeitintervall	s
u	Geschwindigkeit	m/s
$\bar{u}$	arithmetisches Mittel der Geschwindigkeit	m/s
u_{max}	maximale Geschwindigkeit	m/s
u_s	Oberflächengeschwindigkeit	m/s
u_τ	Wandschubspannungsgeschwindigkeit	m/s
u_{Welle}	lokale Wellengeschwindigkeit	m/s
u^+	dimensionslose Wandgeschwindigkeit	-
U	Umfangsbelastung	m^3/mh
$\dot{V}$	Volumenstrom	m^3/s
x	Raumkoordinate in Strömungsrichtung	m
x	normalverteilte Größe	
$\bar{x}$	arithmetischer Mittelwert der normalverteilten Größe x	
Δx	Verschiebung in x -Richtung	m
X	transformierte Parameter für die Vorhersagegleichung	
y	Raumkoordinate normal zur Platte	m
y^+	dimensionsloser Wandabstand	-
z	Raumkoordinate quer zur Strömungsrichtung	m
z_i	gemessene Größe im Versuchsplan	
$\bar{z}$	arithmetisches Mittel der gemessenen Größe z_i	
Δz	Verschiebung in z -Richtung	m

Griechische Buchstaben

$(1 - \alpha)$	Signifikanzniveau	-
α	Plattenneigungswinkel	°
β	Winkel der Richtungsabweichung von der Hauptströmungsrichtung	°
δ	Filmdicke	m
ϵ	dekadischer molarer Extinktionskoeffizient	$m^3/mol \cdot m$
θ	statischer Kontaktwinkel	°

θ_1	voranschreitender Kontaktwinkel	°
θ_2	zurückziehender Kontaktwinkel	°
κ	Verhältnis der emittierten zur absorbierten Lichtintensität	-
λ_{em}	Emissionswellenlänge	nm
λ_{ex}	Anregungswellenlänge	nm
μ	Mittelwert der normalverteilten Grundgesamtheit	
ν	kinematische Viskosität	m ² /s
π	Kreiszahl (3,1416)	-
ρ	Massendichte	kg/m ³
σ	Oberflächenspannung	N/m
σ	Standardabweichung der normalverteilten Grundgesamtheit	
τ_w	Wandschubspannung	N/m ²
ϕ	Rinnsaldickenprofil	m
ϕ_0	maximale Rinnsaldicke	m

Tiefgestellte Indizes

$A, B, C, AB, \dots$	bezüglich der Wirkung im Versuchsplan
f	flüssig
gl	Phasengrenze gas-flüssig
i, j	Zählervariablen
I	Summe der einzelnen Wirkungen im Versuchsplan
$krit$	kritisch
max	maximal
P	Partikel
R	Rest
sg	Phasengrenze fest-gasförmig
sl	Phasengrenze fest-flüssig
t	transformiert
tot	gesamt
T	Toluolphase
w	Wirkung
W	Wasserphase

Dimensionslose Kennzahlen

K_F	Filmkennzahl	$\frac{\sigma^3}{g\nu^4\rho^3}$
Ka	Kapitza-Zahl	$\sqrt[3]{K_F}$
Re	Reynoldszahl	$\frac{\dot{V}}{b \cdot \nu}$

Abkürzungen

<i>avg.</i>	gemittelte Werte
BF	Basisfilm
CFD	Computational Fluid Dynamics
ES	evolutionsstrategischer Algorithmus
FC	Aufgabevariante
g	gasförmig
<i>gem</i>	gemessen
HFI	Hochfrequenz-Impedanz-Sonden-Methode
Hg	Quecksilber
IR	infrarote Strahlung
l	flüssig
LIF	Light Induced Fluorescence
M	Meniskus
<i>max.</i>	Maximalwert
MNPH	Fluoreszenzfarbstoff 1-(4'-Nitrophenyl)-6-Phenyl-Hexa-1,3,5-triene
MP	Mittelpunkt
PTV	Particle Tracking Velocimetry
R	Rinnsal
s	fest
Sim	Simulation
UV	ultraviolette Strahlung
v	dampfförmig
VIS	sichtbares Licht
VP	Versuchsplan

1 Einleitung

In vielen verfahrenstechnischen Prozessen finden Filmströmungen ihre Anwendung. Filmströmungen bieten dem Energie- und Stofftransport eine große Oberfläche bei einem vergleichsweise geringen Volumen. Häufig trifft man in den Prozessen auf eine flüssige Phase, die als Film strömt und mit einer Gas- oder Dampfphase in Kontakt tritt. Daneben existieren aber auch spezielle Anwendungsfälle, in denen mehrere flüssige Phasen auftreten und eine mehrphasige Filmströmung ausbilden. Als Beispiel sei hier die heterogene Azeotroprektifikation in Packungskolonnen genannt, bei der durch Zugabe eines Hilfsstoffes die Trennung engsiedender Stoffsysteme möglich wird ([Gmehling und Brehm, 1996](#); [Pucci et al., 1986](#)). Innerhalb der Kolonne existieren dabei Bereiche, in denen zwei flüssige Phasen im Gegenstrom zur Dampfphase auftreten. Aus diesem Grund spricht man hier auch von der Dreiphasenrektifikation.

Werden für die Dreiphasenrektifikation Packungskolonnen eingesetzt, so haben die Hydrodynamik sowie der Strömungszustand der flüssigen Phasen innerhalb der Packung einen signifikanten Einfluss auf das Betriebsverhalten und die Trennleistung der Kolonne ([Repke und Wozny, 2002](#)). Bei der Modellierung von Rektifikationsprozessen mit Hilfe eines Stoffübergangsmodells ([Repke, 2002](#)) wurde die Fluidodynamik bisher meist über halbempirische Korrelationen für Phasengrenzfläche und Stoffübergangskoeffizient berücksichtigt. Für ein besseres physikalisches Verständnis der Strömungsvorgänge innerhalb der Packung sowie eine genaue Modellierung des Stofftransports ist daher ein umfangreiches Wissen über die Strömung der einzelnen Phasen sowie deren spezifische Phasengrenzflächen zwingend erforderlich.

Vor Beginn dieser Arbeit war nur ein geringes Detailwissen über die einzelnen Strömungsvorgänge in Packungskolonnen, speziell im Fall der Dreiphasenrektifikation, vorhanden. Im Bereich der Zweiphasenrektifikation kann zur Vereinfachung in einigen Fällen angenommen werden, dass die Flüssigkeit die gesamte zur Verfügung stehende Packungsoberfläche als Film benetzt und somit eine recht große Phasengrenzfläche für den Stoffaustausch zur Verfügung stellt ([Soare et al., 2001](#)). Abhängig vom Stoffsystem bildet die flüssige Phase jedoch meistens eher Rinnsale, was zu einer signifikanten Änderung der Phasengrenzfläche zwischen Flüssigkeit und Dampf führt ([Shi und Mersmann, 1985](#)). Kommt wie bei der Dreiphasenrektifikation eine weitere flüssige Phase hinzu, so werden je nach Stoffsystem sehr komplexe Strömungsformen, bestehend aus Film-, Rinnsal- und Tropfenströmungen, erzeugt ([Mitrovic und Reimann, 2001](#)). Dabei wird meistens beobachtet, dass eine flüssige Phase Rinnsale und Tropfen auf der Packungsoberfläche bildet, während die andere Phase als geschlossener Film strömt ([Krämer und Stichlmair, 1995](#); [Repke und Wozny, 2002](#)).

Derartige Strömungen sind bisher nur qualitativ untersucht worden, systematische Analysen solch mehrphasiger Filmströmungen wurden bislang nicht durchgeführt. Einen ersten Ansatz zum Verständnis dieser Strömungsform sowie deren Verhalten bei bestimmten Parametervariationen soll die vorliegende Arbeit liefern. Anhand der drei Parameter Oberflächengeschwindigkeit, Fluiddicke und Flüssigkeitsausbreitung wird die mehrphasige Filmströmung charakterisiert und analysiert, was die Weiterentwicklung herkömmlicher Messverfahren notwendig macht. Mit Hilfe der Messdaten können dann Einflüsse verschiedener Parameter auf die Strömung identifiziert und in Zusammenhang mit den im Rektifikationsprozess beobachteten Effekten (Villain et al., 2005a) gebracht werden.

Allerdings erfordert die Strömungsmessung in Packungen einen hohen experimentellen Aufwand, da die Strömung von außen nur schwer zugänglich ist. Daher werden grundlegende Untersuchungen am Modellsystem der geneigten Platte unter der Annahme, dass sich die Strömung ähnlich zu der in Packungen verhält, durchgeführt. Die überströmte Platte liefert dabei einen freien Zugang zur Strömung und vereinfacht die Strömungsmessung erheblich. Anhand dieser aufgenommenen Messdaten lassen sich dann CFD-Simulationen validieren, die wiederum die Berechnung und die Visualisierung der Strömung innerhalb von Packungen ermöglichen. Derartige Simulationen werden in einem Parallelprojekt durchgeführt, dessen veröffentlichte Ergebnisse in dieser Arbeit zu Vergleichszwecken herangezogen werden.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich im Wesentlichen in drei Abschnitte: Zu Beginn wird in den Kapiteln 2 bis 4 auf die grundlegende Beschreibung der behandelten Strömungen, auf die anzuwendenden statistischen Methoden sowie auf den Stand der Technik im Bereich optischer Strömungsmessverfahren eingegangen. Kapitel 5 beschreibt dann die gewählten optischen Strömungsmessmethoden sowie deren Anwendung auf eine einphasige Flüssigkeitsströmung. Die Ergebnisse werden im Vergleich zu Literaturdaten diskutiert und mit Ergebnissen aus der CFD-Simulation verglichen. In Kapitel 6 wird anschließend die Weiterentwicklung der Messtechnik für die Anwendung bei mehrphasiger Filmströmung beschrieben. Hierbei sind einerseits die Möglichkeiten der Messmethode zur genauen Analyse der beiden flüssigen Phasen von Interesse. Andererseits werden die Messergebnisse im Vergleich zur einphasigen Flüssigkeitsströmung betrachtet und zusammen mit Ergebnissen aus der CFD-Simulation interpretiert.

2 Physikalische Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen für ein physikalisches Verständnis der Filmströmung und ihrer Besonderheiten wie Aufreißen und Rinnsalbildung geschaffen. Dies ist notwendig, um die Methoden für die Messung entwickeln zu können, die Versuche zu planen sowie die späteren Messergebnisse entsprechend bewerten und vergleichen zu können.

2.1 Filmströmung

Als Filmströmungen werden dünne Flüssigkeitsströmungen an senkrechten oder geneigten Oberflächen verstanden, deren Bewegung durch die Schwerkraft ausgelöst wird. In der Literatur wird dieser Strömungszustand auch als Riesel- oder Fallfilm bezeichnet (Brauer, 1971; Leuthner und Auracher, 1997). Des Weiteren kann eine Filmströmung auch durch das Mitreißen einer Gasphase mit hoher Strömungsgeschwindigkeit erzeugt werden - sogenannte *shear driven film flows* (Plimon, 1991; Wittig et al., 1997). Im Folgenden bezieht sich der Begriff Filmströmung jedoch immer auf die gravitationsgetriebene Strömungsform.

Filmströmungen finden in der Verfahrenstechnik eine breite Anwendung. Insbesondere in Prozessen, bei denen es auf eine schonende Verdampfung der Flüssigkeit ankommt, sind Filmströmungsapparate die erste Wahl (Kraume, 2004). So wird z.B. in der Lebensmittelindustrie der Orangensaft an Fallfilmverdampfern aufkonzentriert, da hier mit wenig Wärmezufuhr sehr viel Wasser aus dem Saft verdampft werden kann, ohne dass die wertvollen Inhaltsstoffe wie z.B. Vitamin C durch einen zu hohen Wärmestrom zerstört werden. Die Filmströmung zeichnet sich durch eine große Oberfläche im Vergleich zu einem kleinen Volumen aus. Dadurch stehen für Wärme- und Stofftransport zwischen Wand und Flüssigkeit bzw. zwischen Flüssigkeit und Dampfphase große Kontaktflächen zur Verfügung.

Wie bei allen Strömungsformen kann auch die Filmströmung zwischen laminar und turbulent unterschieden werden. Ein deutlicher Unterschied z.B. zur Rohrströmung ergibt sich allerdings durch die Anwesenheit der freien Oberfläche, also die Phasengrenzfläche zwischen flüssiger und gasförmiger Phase. Während sich bei kleinen Flüssigkeitsbelastungen ein glatter, laminarer Flüssigkeitsfilm ausbildet, wird die Phasengrenzfläche mit steigender Belastung welliger, bis sich schließlich ein turbulenter Strömungszustand mit starker Wellenbildung und hohem Queraustausch im Film einstellt. Als dimensionslose Kennzahl für den jeweiligen Strömungszustand lässt sich die Reynoldszahl Re als Funktion der Flüssigkeitsbelastung, d.h. Volumenstrom $\dot{V}$ pro berieselter Breite b , auch als Umfangsbelastung U bezeichnet, definie-

ren:

$$Re = \frac{U}{\nu} = \frac{\dot{V}}{b \cdot \nu} \quad (2.1)$$

Laminar glatte Filme bilden sich nur bei sehr kleinen Reynoldszahlen im Bereich bis $Re = 3$ aus. Für diesen Fall hat [Nusselt \(1916\)](#) bereits aus dem Kräftegleichgewicht für ein Newtonsches Fluid unter der Annahme, dass an der Wand $y = 0$ Haftbedingungen vorliegen und an der Phasengrenze $y = \delta$ kein Impulsaustausch mit der Gasphase stattfindet, eine Beziehung für das Geschwindigkeitsprofil u am senkrechten Fallfilm als Funktion der Filmhöhe y aufgestellt:

$$u(y) = \frac{g\delta^2}{\nu} \left(\frac{y}{\delta} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 \right) \quad (2.2)$$

An der Form der Gleichung erkennt man, dass das Strömungsprofil die Form einer halben Parabel besitzt, und an der Phasengrenze die maximale Geschwindigkeit von

$$u_{max} = \frac{1}{2} \frac{g\delta^2}{\nu} \quad (2.3)$$

erreicht wird. u_{max} wird auch als Oberflächengeschwindigkeit u_s bezeichnet. Die Dicke δ des Films kann ferner aus der Flüssigkeitsbelastung respektive der Reynoldszahl bestimmt werden:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{3\nu^2}{g} Re} = \sqrt[3]{\frac{3\dot{V}\nu}{gb}} \quad (2.4)$$

Strömt die Flüssigkeit nicht auf einer senkrechten sondern auf einer zur Horizontalen um α geneigten Oberfläche, so wirkt auf die Strömung die verminderte Schwerkraft ($\sin \alpha \cdot g$).

Im Bereich von $Re = 3$ bis etwa 400 ([Brauer, 1971](#)) beginnen sich erste Wellen an der Phasengrenzfläche zu bilden. In diesem Bereich ist die theoretische Untersuchung der Filmströmung erheblich komplexer, da sich die Filmhöhe und damit die Geschwindigkeitsverteilung ständig ändert. Die Filmströmung besteht nun aus zwei Schichten, der wandnahen Schicht (dem sogenannten Basisfilm) und der oberflächennahen Wellenschicht, in der die Wellen auf dem Basisfilm hinweggleiten. Das Geschwindigkeitsprofil im Inneren des Basisfilms weist weiterhin eine laminare Form auf. [Adomeit und Renz \(2000\)](#) und [Miyara \(1999\)](#) haben gezeigt, dass das Nusseltprofil aus Glg. 2.2 nur im Basisfilm die Geschwindigkeitsverteilung noch gut wiedergeben kann. In der Wellenschicht dagegen weicht die Geschwindigkeitsverteilung signifikant vom Nusseltprofil ab. Solche Strömungen werden als *pseudolaminar* bezeichnet.

Bei einem weiteren Anstieg der Reynoldszahl auf einen Bereich von $Re > 400$ ([Brauer, 1971](#)) nimmt der Queraustausch im Film zu und es kommt zur turbulenten Strömung, wodurch Wärme- und Stoffübergang erheblich verbessert werden ([Kraume, 2004](#)). Für die Beschreibung der Geschwindigkeitsverteilung haben verschiedene Autoren den aus der turbulenten Rohrströmung bekannten Ansatz des logarithmischen Wandgesetzes angewandt ([Stefes, 2003](#)). Das logarithmische Wandgesetz wurde ursprünglich in der numerischen Strömungssi-

mulation entwickelt. Es ermöglicht eine vereinfachte Beschreibung des Geschwindigkeitsprofils im Wandbereich bei grober räumlicher Diskretisierung. Die Geschwindigkeit wird dabei mit Hilfe der Wandschubspannungsgeschwindigkeit u_τ in eine dimensionslose Form gebracht:

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad \text{mit } u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{g\delta} \quad (2.5)$$

wie auch der Abstand y zur Wand:

$$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu} \quad (2.6)$$

Trägt man u^+ als Funktion von $\ln y^+$ (Ferziger und Peric, 2003) auf, kann im wandnahen Bereich ($y^+ \leq 10$) das Geschwindigkeitsprofil zunächst mit $u^+ = y^+$ beschrieben werden. In weiterer Entfernung von der Wand ($y^+ > 10$) nimmt das Geschwindigkeitsprofil dann einen logarithmischen Verlauf in der Form $u^+ = f(\ln y^+)$ an. Auf dieser Grundlage haben Ho und Hummel (1970) und Karimi und Kawaji (1998) Beziehungen für u^+ der turbulenten Filmströmung aufgestellt, mit denen sich das Geschwindigkeitsprofil sogar bei starker Wellenbildung ($Re \geq 2000$) bis $y^+ \leq 100$ darstellen lässt.

Die Entstehung von Wellen beruht auf einer hydrodynamischen Instabilität des Films. Die Oberflächenspannung hat dabei einen entscheidenden Einfluss auf die Wellenbildung. Es konnte beobachtet werden (Brauer, 1971), dass große Oberflächenspannungen den Film stabilisieren, und dadurch selbst bei großen Reynoldszahlen nur eine geringe Neigung der Flüssigkeit zur Wellenbildung besteht. Dieser Einfluss kann durch die dimensionslose Filmkennzahl K_F oder die Kapitza-Zahl Ka angegeben werden:

$$K_F = \frac{\sigma^3}{g\nu^4\rho^3} \quad \text{bzw.} \quad Ka = \sqrt[3]{K_F} = \frac{\sigma}{\rho g^{1/3}\nu^{4/3}} \quad (2.7)$$

Brauer (1971) gibt verschiedene Gleichungen für die Beziehung zwischen der Filmkennzahl K_F und der Reynoldszahl, bei der signifikante Wellen gebildet werden, an. Allgemein kann dabei festgehalten werden, dass die Filmoberfläche bei hohem K_F stabiler ist und somit auch die Reynoldszahl, bei der die erste Wellenbildung beobachtet werden kann, ansteigt.

Zusätzlich hat auch die Einlaufänge einen Einfluss auf die Wellenbildung: Üblicherweise wird auf die zu überströmende Oberfläche ein glatter Film aufgegeben, indem die Flüssigkeit aus einem Reservoir über eine justierbare Spaltöffnung auf die Wand aufgegeben wird. Zuerst stellt sich ein stabiler glatter Film mit einer bestimmten Filmdicke und einem stationären Geschwindigkeitsprofil ein. Wilkes und Nedderman (1962) führten dazu Untersuchungen an einer senkrechten Filmströmung durch und fanden bei $Re \approx 50$ ein ausgebildetes Geschwindigkeitsprofil mit stabiler Filmdicke schon nach einer Einlaufänge von nur 7mm vor. Die Ausbildung eines stabilen Filmes stellt sich demnach innerhalb sehr kurzer Lauflängen ein. Die Bildung von Wellen benötigt dagegen eine deutlich längere Einlaufstrecke L_i . Wie Brauner und Maron (1982) mit Hilfe umfangreicher Messungen gezeigt haben, lassen sich für L_i zwei

Beziehungen in Abhängigkeit der Flüssigkeitsbelastung Re als Funktion der Nusselt-Filmdicke δ aus Glg. 2.4 aufstellen:

$$L_i = 500\delta, \quad Re \leq 500 \quad (2.8)$$

$$L_i = (350 + 0,03Re)\delta, \quad Re > 500 \quad (2.9)$$

Die Einlaufänge für die Wellenbildung liegt demnach je nach Reynoldszahl bei wenigen bis hin zu mehreren Zentimetern entfernt von der Flüssigkeitsaufgabe.

2.2 Aufreißen der Filmströmung

Wird die Flüssigkeitsbelastung abgesenkt, so droht der geschlossene Film bei bestimmten Fluid-Plattenmaterial-Kombinationen aufzureißen. Dieses Phänomen ist in verfahrenstechnischen Strömungsapparaten in der Regel unerwünscht, da hierdurch die zur Verfügung gestellte Plattenoberfläche nicht vollständig genutzt und die für den Stoff- und Wärmetransport notwendige Phasengrenzfläche verkleinert wird. Als physikalische Ursache für das Aufreißen der Filmströmung wird z.B. bei [Ghezzehei \(2004\)](#) eine Verkleinerung der Gesamtenergie E für die Rinnsalströmung im Vergleich zur Filmströmung angegeben: dabei setzt sich die Gesamtenergie E zusammen aus der kinetischen Energie der Strömung und der Oberflächenbildungsenergie. Ist die Gesamtenergie für den Fall der Rinnsalströmung kleiner als für die geschlossene Filmströmung, kommt es zum Aufreißen des Filmes, was im Folgenden näher beschrieben werden soll.

Die Flüssigkeitsbelastung, bei der zum ersten Mal ein Filmaufreißen beobachtet werden kann, wird als kritische Reynoldszahl Re_{krit} definiert. Als Einflussparameter werden in der Literatur unter anderem die Wandgeometrie, das Wandmaterial, die Oberflächenspannung des Fluids bzw. der Stofftransport zwischen Gas- und Flüssigphase angegeben ([Perry und Green, 1998](#)). [Saber und El-Genk \(2004\)](#) geben eine Zusammenstellung verschiedener Korrelationen für die Berechnung der kritischen Reynoldszahl an, in denen neben fluidspezifischen Größen wie Viskosität und Oberflächenspannung der Kontaktwinkel θ einen entscheidenden Einfluss auf die Benetzung der Oberfläche hat.

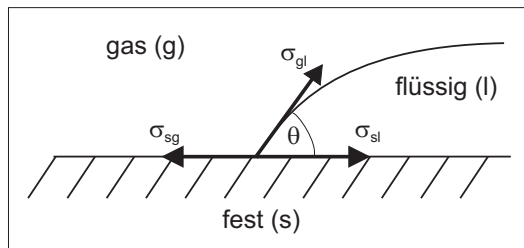


Abbildung 2.1: Definition des Kontaktwinkels θ an einem Dreiphasensystem (gas-flüssig-fest) im statischen Gleichgewicht.

Betrachtet man, wie in Abb. 2.1 dargestellt, eine gasförmige, eine flüssige und eine feste Phase, so treffen sich alle drei Phasen in der sogenannten Kontaktlinie. Der Winkel, den die feste und flüssige Phase im Gleichgewicht miteinander bilden, wird statischer Kontaktwinkel θ genannt (Dussan, 1979). θ setzt sich aus den einzelnen Oberflächenspannungen der jeweiligen Phasengrenzen fest-flüssig (sl), gas-flüssig (gl) und fest-gas (sg) zusammen:

$$\sigma_{sg} - \sigma_{sl} - \sigma_{gl} \cos \theta = 0 \quad (2.10)$$

Der Kontaktwinkel gibt Auskunft über die Benetzungseigenschaften eines bestimmten Fluids auf einer bestimmten Oberfläche und ist damit stark von der Materialkombination abhängig. Ist $\theta < 90^\circ$ so gilt das Fluid auf der Oberfläche als benetzend, ein $\theta > 90^\circ$ bezeichnet eine entnetzende Materialkombination. Die Oberflächenspannungen σ_{sg} und σ_{sl} sind jedoch nicht messbar (Michaelis, 2003). Folglich ist die Bestimmung von θ mit Hilfe von Glg. 2.10 nicht möglich. Stattdessen wird der statische Kontaktwinkel direkt gemessen, indem ein Tropfen der zu untersuchenden Flüssigkeit direkt auf die zu untersuchende Oberfläche gegeben und der Winkel am Kontaktpunkt, wie in Abb. 2.1 gezeigt, gemessen wird.

Mit dieser Information kann nun die kritische Reynoldszahl für das Aufreißen eines Filmes z.B. mit der Beziehung nach Hartley und Murgatroyd (1964), die über eine Bilanz der am Aufreißpunkt angreifenden Kräfte abgeleitet werden kann, mit guter Genauigkeit vorausgesagt werden:

$$Re_{krit} = 1,70 (1 - \cos \theta)^{3/5} K_F^{1/5} \quad (2.11)$$

Das erste Aufreißen des Films geschieht häufig in der Form, wie sie in Abb. 2.2 dargestellt ist. Es bildet sich eine Trockenzone auf der Plattenoberfläche, die von einem parabelförmigen Flüssigkeitsrand begrenzt wird (Podgorski et al., 1999). Dabei werden die laminaren Stromlinien abgelenkt und bilden einen erhöhten Flüssigkeitsrand entlang der trockenen Plattenfläche (s. Filmdickenprofil in Abb. 2.2).

Bei weiterer Absenkung der Flüssigkeitsbelastung, reißt diese Struktur weiter auf und der Scheitelpunkt der Parabel in Abb. 2.2 verschiebt sich aufwärts. Ist der Volumenstrom so klein, dass sich der dünne Film neben der Trockenzone nicht mehr stabil aufbauen kann, reißt dieser wiederum ein. Der dickere Rand, der die Trockenzone umgibt, bleibt dagegen erhalten und fließt nun als einzelnes Rinnsal ab. Diese Entwicklung des Strömungsfeldes von Wasser auf einer Stahlplatte mit abnehmender Flüssigkeitsbelastung ist in Abb. 2.3 qualitativ dargestellt. In der Darstellung nimmt die Flüssigkeitsbelastung kontinuierlich von links nach rechts ab.

2.3 Rinnsal- und Tropfenströmung

In Abbildung 2.3 erkennt man sehr gut wie sich der geschlossene Film in eine Strömung aus mehreren Rinnsalen aufteilt. Diese Rinnsale weisen im Vergleich zum vorherigen Film eine

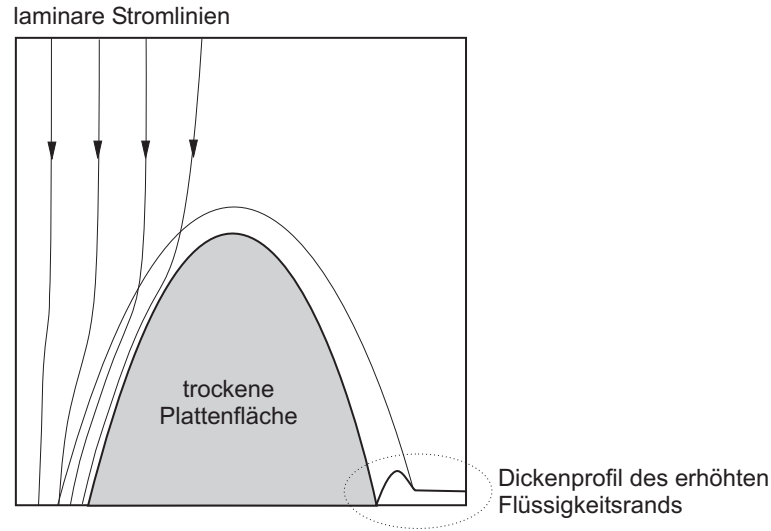


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des Filmaufreißens. Die laminaren Stromlinien verengen sich und bilden einen erhöhten Rand um die Trockenzzone.

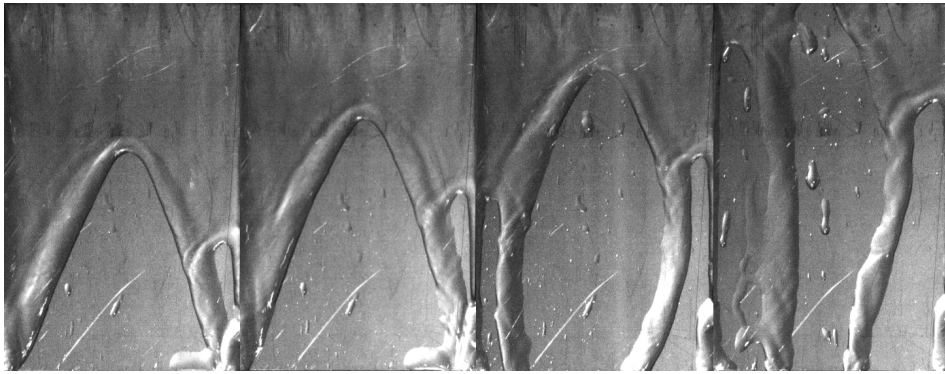


Abbildung 2.3: Veränderung der Morphologie einer Wasserströmung über eine Stahlplatte ($\alpha = 60^\circ$) bei sinkender Flüssigkeitsbelastung ($Re \approx 150 - 80$ von links nach rechts).

andere Form, eine größere Dicke sowie ein verändertes Geschwindigkeitsprofil auf.

Für die Beschreibung der Rinnsalströmung spielt neben der Geschwindigkeitsverteilung im Rinnsal die äußere Form bzw. das Rinnsalprofil eine entscheidende Rolle. Die Geschwindigkeit im Rinnsal kann in Analogie zur Filmströmung durch ein parabolisches Geschwindigkeitsprofil beschrieben werden. Wie die Filmgeschwindigkeit in Glg. 2.2 stellt hier auch die Rinnsalgeschwindigkeit eine Funktion der Fluiddicke dar. Da sich zusätzlich die Rinnsaldicke mit der Breite entlang der z -Koordinate ändert, wird mit $\phi(z)$ das Profil des Rinnsals angegeben. Die Geschwindigkeitsverteilung im Rinnsal kann demzufolge nach [El-Genk und Saber \(2001\)](#) ausgedrückt werden als:

$$u(y, \phi(z)) = \frac{g}{\nu} \left(y\phi(z) - \frac{1}{2}y^2 \right) \quad (2.12)$$

Da das Rinnsalprofil $\phi(z)$ eine gekrümmte Phasengrenze beschreibt, kann mit Hilfe der

Laplace-Gleichung die Druckdifferenz zwischen Innendruck im Rinnsal p_l und Umgebungsdruck p_v berechnet werden:

$$p_l - p_v = \frac{\sigma}{r}, \quad \frac{1}{r} = -\frac{\phi''(z)}{(1 + \phi'^2(z))^{3/2}} \quad (2.13)$$

Die Funktion $1/r$ bezeichnet hier die Krümmung der Phasengrenzfläche.

Des Weiteren wird ein Ausdruck für die beiden Drücke benötigt, wozu in der Literatur unterschiedliche Ansätze verfolgt werden. [Towell und Rothfeld \(1966\)](#) treffen die Annahme, dass das Rinnsal die Form eines Kreissegmentes besitzt, und erhalten mit

$$\frac{\phi''(z)}{(1 + \phi'^2(z))^{3/2}} = \phi_0'' - \frac{\rho g \sin \alpha}{\sigma} (\phi_0 - \phi(z)) \quad \text{wobei } \phi_0'' = -\frac{1}{b} \quad (2.14)$$

eine Gleichung, die vom Kreisradius b abhängig ist und nur iterativ gelöst werden kann. [Ataki und Bart \(2002\)](#) vergleichen die Lösung von Towell mit eigenen Messungen des Rinnsalprofils einer Wasser-Glyzerin-Strömung und finden recht gute Übereinstimmungen mit dem Modell.

[Doniec \(1991\)](#) minimiert die Gesamtenergie E der Rinnsalströmung und erhält nach mehreren Umformungen eine Gleichung für die maximale Rinnsaldicke ϕ_0 , die nur von Stoffparametern und dem Neigungswinkel α abhängig ist:

$$\phi_0 = \left(\frac{45}{7} \frac{\nu^2 \sigma}{\rho (g \sin \alpha)^2} \cdot (1 - \cos \theta) \right)^{1/5} \quad (2.15)$$

Da im Experiment allerdings beobachtet wird, dass sich die Rinnsalhöhe auch mit der Flüssigkeitsbelastung ändert, ist diese Gleichung eher kritisch zu bewerten. [Johnson et al. \(1999\)](#) haben für verschiedene Glyzerin-Wasser-Gemische Rinnsaldicken vermessen und diese mit der aus Glg. 2.4 berechneten maximalen Rinnsaldicke verglichen. Die Ergebnisse von [Johnson et al. \(1999\)](#) zeigen einen Anstieg der Rinnsaldicke mit steigender Flüssigkeitsbelastung und abnehmendem Plattenneigungswinkel. Die mit Glg. 2.4 berechneten Werte liegen zwar alle mit einem Fehler von bis zu 10% unter den gemessenen Rinnsaldicken, jedoch werden die Trends des Dickenanstiegs aufgrund von Flüssigkeitsbelastung bzw. Plattenneigung sehr gut wiedergegeben. Ein Vergleich mit den nach Glg. 2.15 berechneten Werten ergibt dagegen, dass die Rinnsaldicken mit abnehmender Plattenneigung ansteigen, jedoch konstant im Bereich kleiner Flüssigkeitsbelastungen liegen. Daher kann diese Beziehung von [Doniec \(1991\)](#) höchstens zur groben Abschätzung der Rinnsaldicke angewandt und nicht als allgemein gültig angenommen werden.

[El-Genk und Saber \(2001\)](#) haben einen Ausdruck für die Druckdifferenz in Glg. 2.13 ebenfalls über eine Minimierung der Gesamtenergie bestimmt und damit eine Gleichung für das Rinnsalprofil aufgestellt, das eine Funktion der maximalen Rinnsaldicke ϕ_0 darstellt und somit

auch nur iterativ gelöst werden kann:

$$\frac{\phi''(z)}{(1 + \phi'^2(z))^{3/2}} = -\frac{1 - \cos \theta}{\phi_0} \quad (2.16)$$

Insgesamt wird deutlich, dass sich die Modellierung der Rinnsalströmung noch komplexer gestaltet als die ohnehin schon schwierige Modellierung der Filmströmung. Zudem sind die bisher aufgestellten Beziehungen für die Form des Rinnsals auch nur für die Annahme gültig, dass es sich um eine stationäre und symmetrische Rinnsalströmung ohne Wellenbildung und ohne Änderung der Strömungsrichtung (Mäandrieren) handelt. [Young und Davis \(1987\)](#) haben eine Stabilitätsanalyse an Rinnsalströmungen durchgeführt und haben mehrere miteinander gekoppelte Effekte für derartige Instabilitäten von Rinnsalen identifiziert: Zum einen wirkt eine höhere Flüssigkeitsbelastung stabilisierend auf die Rinnsalströmung, da das Rinnsal breiter wird und dadurch Kapillareffekte, die durch die starke Krümmung der Oberfläche destabilisierend wirken, unterdrückt werden. Zum anderen begünstigt ein erhöhter Flüssigkeitsvolumenstrom auch die Wellenbildung an der Oberfläche, die wiederum für Instabilitäten sorgt. Zusätzlich hat der dynamische Kontaktwinkel, der sich durch Querbewegungen des Rinnsals z.B. beim Mäandrieren an den Rinnsalseiten unterschiedlich einstellt, stabilisierenden Einfluss auf die Rinnsalströmung. [Schmuki und Laso \(1990\)](#) haben ebenfalls die Instabilitäten einer Rinnsalströmung untersucht und fanden heraus, dass ein gerades und stationäres Rinnsal bei Erhöhung der Flüssigkeitsbelastung zunächst ein mäandrierendes Rinnsal bildet, dessen Pfad jedoch fest bleibt. Bei weiterer Erhöhung der Flüssigkeitsbelastung beginnt das Rinnsal zu oszillieren, d.h. es ändert ständig die Fließrichtung, und die Strömung wird hochgradig instationär. Durch eine fortgesetzte Erhöhung der Belastung gelangt man dann in einen Bereich, wo das Rinnsal breiter wird und einen Film bildet ([Shetty und Cerro, 1995](#)). Umgekehrt erhält man bei Absenkung der Flüssigkeitsbelastung einen Zustand, bei dem das gerade Rinnsal nicht mehr genügend Energie für einen stabilen Strömungszustand besitzt und in einzelne Tropfen zerfällt.

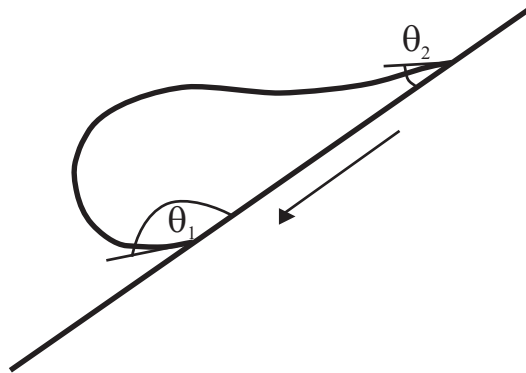


Abbildung 2.4: Auftreten dynamischer Kontaktwinkel θ_i an einem herabströmenden Tropfen.

Tropfen, die über eine geneigte Platte herabströmen, werden maßgeblich durch ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit und damit verbunden durch die dynamischen Kontaktwinkel charakterisiert (Sikalo et al., 2004). Wie in Abb. 2.4 zu erkennen ist, bildet der Tropfen in Strömungsrichtung eine sehr stark gekrümmte Phasengrenze mit einem sehr großen Kontaktwinkel θ_1 . Da es sich hier um die voranschreitende Seite des Tropfens handelt, spricht man vom voranschreitenden Kontaktwinkel oder Vorrückwinkel, der naturgemäß größer als der statische Kontaktwinkel θ ist. Auf der der Strömungsrichtung entgegengesetzten Seite des Tropfens bildet sich eine Schleppe mit sehr kleinem Kontaktwinkel θ_2 aus. Dieser wird zurückziehender Kontaktwinkel oder Schleppwinkel genannt.

Die Tropfenströmung ist sehr stark reibungsbehaftet. Wie Sikalo et al. (2004) zeigen, nimmt die Tropfengeschwindigkeit nach Ablösung des Tropfens vom Rinnsal bzw. nach dem Auftreffen aus freiem Fall stark ab und geht gegen null. Dies kann letztendlich dazu führen, dass kleine Tropfen auf der schrägen Ebene haften bleiben und sich nicht mehr weiterbewegen.

2.4 Ergänzungen zur Flüssigkeitsbelastung

Wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt wurde, besitzt die Flüssigkeitsbelastung einen entscheidenden Einfluss auf die Strömungsform. Durch Variation der Flüssigkeitsbelastung kann somit z.B. die Leistung von Filmströmungsapparaten stark verändert werden, was die Flüssigkeitsbelastung demnach zu einem wichtigen Parameter macht.

Je nach Art und Anwendung der Filmströmungsapparate werden unterschiedliche Begriffe und Definitionen für die jeweilige Belastung mit der flüssigen Phase verwendet. Während die dimensionslose Reynoldszahl Re eine in der Strömungsmechanik weit verbreitete Kenngröße ist, verwendet man bei der Arbeit mit Fallfilmverdampfern eher die Umfangsbelastung U . U ist definiert als Volumenstrom $\dot{V}$ bezogen auf den Umfang des überströmten Rohres bzw. auf die Breite der überströmten Platte b . Industriell eingesetzte Fallfilmverdampfer werden üblicherweise bei Umfangsbelastungen im Bereich $U = 0,5 - 1,5 \text{ m}^3/\text{mh}$ (Kraume, 2004) betrieben, um eine gute Benetzung der zur Verfügung gestellten Heizfläche zu gewährleisten und ein Aufreißen zu vermeiden. Mit Hilfe von Glg. 2.1 lässt sich die Umfangsbelastung U sehr leicht in die dimensionslose Reynoldszahl Re umrechnen. Für eine Wasserströmung läge dann der Betriebsbereich bei $Re = 155 - 466$.

Für das Betreiben von Packungskolonnen wird die Flüssigkeitsbelastung B als Volumenstrom bezogen auf die Querschnittsfläche der leeren Kolonne A_{quer} angegeben und kann je nach Stoffsystem (Kraume, 2004) in einem Bereich von $B = 0,2 - 200 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ (angegebener Bereich z.B. für Mellapak 250 (Ltd., 2003)) liegen. Um die Kolonnenbelastung B in die Reynoldszahl Re umrechnen zu können, muss die Kolonnenquerschnittsfläche in Bezug zur benetzten Kantenlänge, entsprechend der Plattenbreite b , gebracht werden. Betrachtet man eine strukturierte Packung von oben, dann bilden die oberen Blechkanten in der Regel ein Muster aus quadratischen nebeneinander angeordneten Strukturelementen mit einer Kantenlänge

von 10 bis 15mm je nach Packung. Auf einer Fläche von $1m^2$ würden bei einer Elementgröße von $15mm \times 15mm$ (z.B. Mellapak 250, Sulzer Chemtech Ltd.) etwa 4444 Elemente Platz finden und eine Kantenlänge von ca. $132m$ aufweisen. Aus der Flüssigkeitsbelastung B kann dann eine Umfangsbelastung U berechnet werden mit

$$U = \frac{B}{132m/m^2} \quad (2.17)$$

Die Re-Zahlen mit $Re = U/\nu$ lägen damit für den oben angegebenen Kolonnenbelastungsbereich einer Wasserströmung bei $Re = 0,47 - 471,5$.

Man erkennt hierbei, dass sich die Belastungsbereiche von Fallfilmverdampfer und Packungskolonne in gewissem Maße überschneiden. Für die nachfolgenden Messungen werden die jeweiligen Flüssigkeitsbelastungen daher so ausgewählt, dass sie etwa in diesem Schnittbereich der Flüssigkeitsbelastungen liegen. Einerseits bleibt dadurch die Vergleichbarkeit mit Ergebnissen aus Untersuchungen an Packungskolonnen erhalten, andererseits können die Annahmen und Modelle aus der bisher deutlich besser untersuchten Fallfilmverdampfung auf die hier zu untersuchende Strömung übertragen werden. Für die Berechnung der jeweiligen Kolonnenbelastung B wird in den nachfolgenden Abschnitten jeweils die exemplarische Kantenlänge von $132m/m^2$ verwendet.

3 Statistische Grundlagen

Grundsätzlich sind alle Messungen fehlerbehaftet. Werden experimentell ermittelte Daten nicht mit einer Abschätzung ihres Fehlers verglichen, führt dies häufig zu Fehlinterpretationen der Versuche. Als Hilfsmittel hierbei dienen statistische Methoden und Tests, die dabei helfen, statistisch gesicherte Aussagen über Parametereinflüsse und Fehler zu machen, sowie die Anzahl der notwendigen Versuche zu reduzieren. In der vorliegenden Arbeit wird dazu insbesondere die faktorielle Versuchsplanung eingesetzt, deren Methode und Anwendung im folgenden Kapitel näher beschrieben werden sollen.

3.1 Statistische Grundbegriffe

Messdaten oder Ereignisse können als diskrete oder stetige Daten vorliegen. So stellt z.B. die Stellung eines Schalters (an / aus) ein diskretes Ereignis dar, Druck oder Temperatur sind dagegen stetige Messgrößen. Betrachtet man alle möglichen Werte einer Messgröße, so spricht man von der Grundgesamtheit. Bei der Versuchsdurchführung wird jedoch nur eine endliche Teilmenge dieser Grundgesamtheit aufgenommen, die als Stichprobe bezeichnet wird. Dieser Stichprobe wird eine besondere Bedeutung beigemessen, da in den meisten Fällen die Grundgesamtheit einer Größe nicht bekannt ist und erst aufgrund der Kenntnis der Stichprobe auf die Grundgesamtheit geschlossen werden kann (Römis, 2004).

Alle Werte einer Größe stellen in ihrer Grundgesamtheit eine bestimmte Häufigkeitsverteilung dar. So wird man z.B. bei sehr vielen Würfeln eines sechsseitigen Würfels alle sechs Augenzahlen gleich häufig erwürfeln. Um eine Häufigkeitsverteilung aufzustellen, werden die Werte aus der Stichprobe (z.B. alle in einer Zeit t gemessenen Drücke) ihrer Größe nach geordnet. Anschließend werden gleiche Werte zusammengefasst (bei stetigen Messgrößen in Klassen) und deren jeweilige Häufigkeit ermittelt. Das Ergebnis ist eine Häufigkeitsverteilung, die grafisch z.B. als Histogramm aufgetragen werden kann. Verbindet man nun die Häufigkeiten aller Werte bzw. Klassen durch eine Kurve, erhält man die Verteilungskurve der Stichprobe.

In vielen natur- und ingenieurwissenschaftlichen Vorgängen folgen die Verteilungskurven aufgenommener Messgrößen einer Glockenkurve bzw. der sogenannten Gauß'schen Normalverteilung (vgl. Abb. 3.1). Diese wird mit folgender Gleichung beschrieben

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}} \quad (3.1)$$

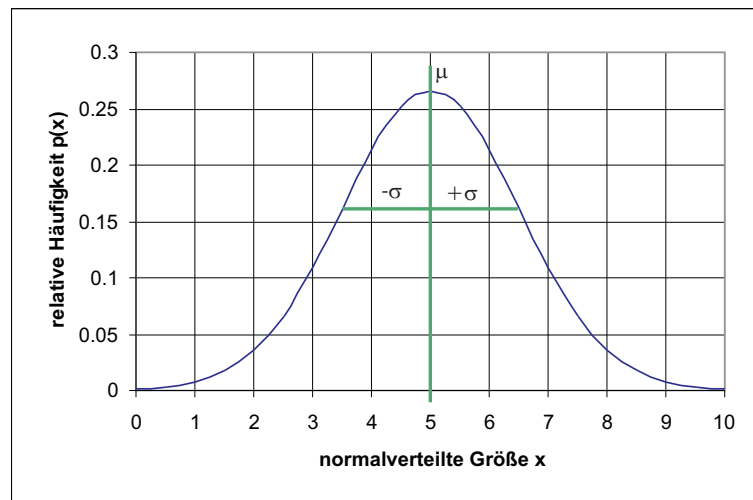


Abbildung 3.1: Normalverteilung einer Messgröße x mit Mittelwert μ und Standardabweichung σ (Wendepunkte)

wobei μ dem Mittelwert der Normalverteilung entspricht und σ^2 die Varianz und damit ein Maß für die Streuung der Verteilung angibt. μ und σ (Wendepunkte der Kurve) werden auch als Lageparameter der Gaußverteilung bezeichnet (Engelmann, 1995). In der Statistik hat sich dabei eine bestimmte Nomenklatur durchgesetzt: griechische Buchstaben bezeichnen die Lageparameter der Grundgesamtheit (μ und σ), lateinische Buchstaben die Lageparameter der Stichprobe (m bzw. $\bar{x}$ und s).

Mit Hilfe verschiedener statistischer Tests kann nun überprüft werden, ob z.B. der Mittelwert einer Stichprobe $\bar{x}$ dem Sollwert einer normalverteilten Grundgesamtheit μ entspricht, oder ob die Varianzen zweier Stichproben s_1^2 und s_2^2 aus derselben Grundgesamtheit stammen, also σ^2 gleichen. Im Rahmen dieser Arbeit wird der sogenannte Signifikanztest verwendet, um für verschiedene Zielgrößen wie die Geschwindigkeit signifikante bzw. nicht-signifikante Einflussparameter zu identifizieren. Dieser Test wird im Folgenden näher erläutert.

3.2 Faktorielle Versuchsplanung

Bei der Durchführung von Prozessen hängt die gewünschte Zielgröße oftmals nicht von einer, sondern von zwei oder mehr Variablen ab. Zur Bestimmung der optimalen Betriebsparameter kann der Prozess zum einen durch geltende chemisch-physikalische Gesetzmäßigkeiten modelliert werden, was einen hohen Arbeitsaufwand erfordert und oftmals aufgrund mangelnder Prozesskenntnisse gar nicht möglich ist. Zum anderen können die optimalen Betriebsparameter bestimmt werden, ohne die funktionellen Zusammenhänge zwischen Eingangsgrößen und Zielgröße genau zu kennen. Notwendig dafür ist nur das Wissen, wie sich die Zielgröße bei Änderung der Prozessvariablen in einem interessierenden Bereich verhält, was mit der Durchführung von Versuchen ermittelt werden kann.

Üblicherweise werden Versuchsreihen so durchgeführt, dass eine Eingangsgröße stufenweise verändert wird und die anderen Prozessvariablen konstant gehalten werden. Die Anzahl der durchgeführten Versuche wird insbesondere bei vielen Variablen dadurch sehr groß. Angestrebt wird demnach eine Versuchsreihe, die mit möglichst wenigen Messungen, bei denen mehrere Variablen gleichzeitig geändert werden, hinreichende Informationen über die funktionellen Zusammenhänge zwischen Eingangsvariablen und Zielgröße liefert, und somit sehr schnell ein Überblick über die Abhängigkeiten der einzelnen Prozessgrößen und damit über den gesamten Prozess gewonnen werden kann.

Dieses Ziel kann durch die Anwendung der faktoriellen Versuchsplanung erreicht werden. In der vorliegenden Arbeit wird dieses Hilfsmittel verwendet, um den Einfluss von drei stetigen bzw. diskreten Parametern auf mehrere Zielgrößen zu untersuchen. Dadurch gelingt es mit sehr wenigen Versuchen, signifikante von nicht-signifikanten Variablen zu unterscheiden und auch deren Wechselwirkungen zu erkennen.

Für die faktorielle Versuchsplanung muss zunächst der interessierende Bereich gewählt werden, in dem die Prozessvariablen in definierten Stufen verändert werden. Diese Stufen werden auch Niveaus genannt. Um die Anzahl der Versuche gering zu halten, werden die Niveaus an die Grenzen des interessierenden Bereichs gelegt. Wird ein Prozess z.B. bei Temperaturen zwischen 300°C und 400°C betrieben, dann wird das untere Niveau des Versuchsplans auf 300°C und das obere Niveau auf 400°C gesetzt.

Der allgemeinen Nomenklatur folgend würde es sich bei diesem Beispiel um einen 2^1 -Versuchsplan handeln, da eine Variable auf zwei Niveaus variiert wird. Daraus kann auch sehr leicht ersehen werden, wie viele Versuche für die vollständige Ausführung des Versuchsplanes nötig sind: ein vollständiger 2^1 -Versuchsplan benötigt 2 Versuche, ein 2^3 -Plan dagegen bereits 8 Versuche. Bei sehr vielen Prozessvariablen ($n > 4$) kann es daher sinnvoll sein, zunächst einen unvollständigen Versuchsplan mit weniger Versuchen als 2^n auszuführen, um daraus die signifikanten Einflussparameter zu ermitteln und von den nicht signifikanten Parametern zu separieren. In einem zweiten kleineren und vollständig ausgeführten Versuchsplan können dann die signifikanten Einflussgrößen genauer untersucht werden. Näheres dazu findet sich bei [Engelmann \(1995\)](#). Da die in dieser Arbeit durchgeführten Versuchspläne alle vollständig ausgeführt sind, soll hier nicht weiter darauf eingegangen werden.

3.3 Auswertung von Versuchsplänen

Abb. 3.2 zeigt ein Beispiel, welches die Durchführung und Auswertung von Versuchsplänen veranschaulicht. Es werden die beiden Prozessvariablen a und b auf jeweils 2 Niveaus variiert. In den 4 Versuchen wird die jeweilige Zielgröße $z(a_i, b_j)$ gemessen. Aus Abb. 3.2 ist ersichtlich, dass sich z mit zunehmendem a und b deutlich erhöht. Für $z(a_1, b_1)$ wird der kleinste Wert gemessen, für $z(a_2, b_2)$ der höchste Wert.

Die Frage ist nun, hat a auf z , ohne b zu berücksichtigen, einen Einfluss und wie groß

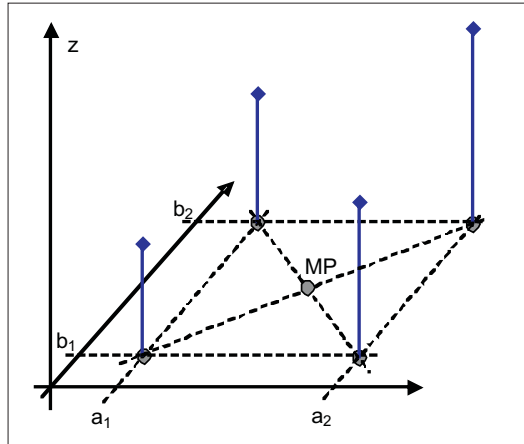


Abbildung 3.2: Beispiel für die Durchführung und Auswertung eines faktoriellen Versuchsplanes.

ist dieser? Dazu vergleicht man alle Messergebnisse bei niedrigem Niveau von a mit denen bei hohem Niveau von a , indem die Mittelwerte beider Niveaus berechnet werden und die Differenz A daraus gebildet wird:

$$\frac{1}{2} (z(a_2, b_1) + z(a_2, b_2)) - \frac{1}{2} (z(a_1, b_1) + z(a_1, b_2)) = A \quad (3.2)$$

Die Differenz beider Mittelwerte wird die Hauptwirkung des Parameters a genannt. Ebenso wird die Hauptwirkung des Parameters b ermittelt:

$$\frac{1}{2} (z(a_1, b_2) + z(a_2, b_2)) - \frac{1}{2} (z(a_1, b_1) + z(a_2, b_1)) = B \quad (3.3)$$

Damit können bereits Aussagen gemacht werden, in welche Richtung sich z ändern wird (verkleinern oder vergrößern), wenn ein bestimmter Parameter vergrößert wird. Es kann jedoch auch vorkommen, dass sich z zwar mit einer Erhöhung von a ändert, diese Änderung von z auf einem höheren Niveau von b aber sehr viel stärker ausfällt als auf niedrigem Niveau von b . In diesem Fall liegt eine Wechselwirkung der Parameter a und b vor, die ebenfalls berechnet werden kann:

$$\frac{1}{2} (z(a_1, b_1) + z(a_2, b_2)) - \frac{1}{2} (z(a_1, b_2) + z(a_2, b_1)) = AB \quad (3.4)$$

Diese Wechselwirkungen können zwischen zwei Parametern (Wechselwirkungen 1. Ordnung) oder auch zwischen mehreren Parametern (Wechselwirkungen höherer Ordnung) auftreten. Hierbei ist jedoch immer zu prüfen, inwieweit Wechselwirkungen zwischen 4 und mehr Parametern noch physikalisch sinnvoll und erklärbar sind.

Im nächsten Schritt muss geprüft werden, ob die Wirkung einer oder mehrerer Variablen einen signifikanten Einfluss auf die Zielgröße besitzt, oder ob die errechnete Differenz zwischen den Mittelwerten nur aufgrund von Messfehlern zustande kommt. Hierzu wird der oben

bereits erwähnte Signifikanztest bzw. die sogenannte Varianzanalyse verwendet. Die Varianzanalyse bedient sich der Streuungszerlegung, d.h. die Gesamtstreuung s_{tot}^2 wird in ihre einzelnen Komponenten - Streuung aufgrund von Messfehlern bzw. rein zufälligen Einflüssen s_R^2 und Streuung aufgrund von Parametervariationen s_I^2 - zerlegt. Die Gesamtstreuung s_{tot}^2 wird demnach mit

$$s_{tot}^2 = s_I^2 + s_R^2 \quad (3.5)$$

berechnet. Die Streuung s_I^2 ist die Summe der Streuungen der einzelnen Wirkungen, also:

$$s_I^2 = s_A^2 + s_B^2 + s_{AB}^2 \quad (3.6)$$

Die Streuungen der einzelnen Wirkungen, auch Quadratsummen genannt, lassen sich mit den in Glg. 3.2-3.4 errechneten Wirkungen - hier beispielhaft für A - wie folgt bestimmen:

$$s_A^2 = \frac{N}{4} A^2 \quad (3.7)$$

wobei N die Anzahl der Versuche angibt. Mit den errechneten Quadratsummen lassen sich nun die mittleren Streuungen für jede Wirkung bzw. die mittleren Quadratsummen bestimmen mit

$$\bar{s}_A^2 = \frac{s_A^2}{f_A} \quad (3.8)$$

wobei f_A den Freiheitsgrad der Wirkung A darstellt und aufgrund dessen, dass die Faktoren auf 2 Niveaus variiert wurden und ein Freiheitsgrad bereits für die Berechnung von A angewendet wurde, wie folgt berechnet wird:

$$f_A = \text{Niveau} - 1 = 2 - 1 = 1 \quad (3.9)$$

Schwieriger dagegen ist die Bestimmung der Streuung aufgrund des Messfehlers s_R^2 . Der einfachste Weg führt über eine aus früheren Messungen schon bekannte Versuchsfehlerstreuung s_0^2 . Mit $f_R = 1$ folgt dann für die mittlere Streuung:

$$\bar{s}_R^2 = \frac{s_0^2}{1} = s_0^2 \quad (3.10)$$

Ist diese Information über die Streuung aus einer früheren Messung nicht verfügbar, besteht die Möglichkeit der Annahme, dass es keine Wechselwirkungen höherer Ordnung gibt. Deren Streuung wird dann als Messfehler angenommen. In diesem Beispiel würde dann gelten:

$$\bar{s}_R^2 = \frac{s_{AB}^2}{1} = s_{AB}^2 \quad (3.11)$$

Diese Methode kann für eine erste Abschätzung des Messfehlers verwendet werden, aller-

dings wird hierbei häufig ein ungenügend genauer Wert für den Versuchsfehler bestimmt. Außerdem gehen dadurch Informationen über die eventuellen Wechselwirkungen verloren. Für eine bessere Abschätzung der Streuung aufgrund von Messfehlern wird daher die Methode der Mittelpunktsmessung empfohlen (Römisch, 2004). Das bedeutet, es werden $n \geq 3$ Versuche im Mittelpunkt (vgl. Abb. 3.2 - Punkt „MP“) durchgeführt und anhand dieser Messungen die Streuung aufgrund von Messfehlern ermittelt:

$$s_{R,MP}^2 = \sum_{i=1}^n (z_{i,MP} - \bar{z}_{MP})^2 \quad (3.12)$$

Der Freiheitsgrad errechnet sich hierbei aus der Anzahl der Mittelpunktversuche minus 1, sodass für die mittlere Streuung gilt:

$$\bar{s}_R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (z_{i,MP} - \bar{z}_{MP})^2}{n - 1} \quad (3.13)$$

Ein Mittelpunkt existiert allerdings nur bei stetigen Parametern. Diskrete Parameter haben keinen Mittelpunkt (z.B. können Daten nur von Sensor 1 oder Sensor 2 empfangen werden), sodass hier der Weg der verbesserten Versuchsfehlerabschätzung über eine Wiederholung von Messungen führt. Dazu werden zwei oder mehr Messungen aus dem Versuchsplan wiederholt, im oberen Beispiel möglicherweise die Messungen $z(a_2, b_1)$ und $z(a_1, b_2)$. An beiden Punkten werden die jeweiligen zwei Messungen gemittelt zu

$$\bar{z}_a = \frac{1}{2} (z_1(a_2, b_1) + z_2(a_2, b_1)) \quad (3.14)$$

und

$$\bar{z}_b = \frac{1}{2} (z_1(a_1, b_2) + z_2(a_1, b_2)) \quad (3.15)$$

Die Streuung s_R^2 wird dann wie folgt bestimmt:

$$s_{R,w}^2 = (z_1(a_2, b_1) - \bar{z}_a)^2 + (z_2(a_2, b_1) - \bar{z}_a)^2 + (z_1(a_1, b_2) - \bar{z}_b)^2 + (z_2(a_1, b_2) - \bar{z}_b)^2 \quad (3.16)$$

Der Freiheitsgrad f_R ist gleich der Anzahl der zusätzlich durchgeführten Versuche und damit errechnet sich die mittlere Streuung zu

$$\bar{s}_R^2 = \frac{s_{R,w}^2}{f_R} \quad (3.17)$$

Mit Hilfe der so bestimmten mittleren Streuungen kann dann der Signifikanztest, in diesem Falle der sogenannte F -Test, durchgeführt werden. Dazu wird für jede Wirkung (hier beispielhaft für A) ein F -Wert berechnet und mit dem dazugehörigen Wert einer theoretischen

F -Verteilung verglichen:

$$F_A = \frac{\bar{s}_A^2}{\bar{s}_R^2} > F_{(1-\alpha)}(f_A, f_R) \quad (3.18)$$

Der Wert der theoretischen F -Verteilung $F_{(1-\alpha)}(f_A, f_R)$ ist für verschiedene Signifikanzniveaus α tabelliert (z.B. in (Engelmann, 1995)) und kann einfach abgelesen werden. Ist die Ungleichung 3.18 zwischen berechnetem und theoretischem F -Wert erfüllt, kann die betrachtete Wirkung mit $(1 - \alpha) \cdot 100\%$ -iger Wahrscheinlichkeit als signifikant eingestuft werden.

3.4 Vorhersagegleichungen

Die so gewonnenen Informationen über signifikante Haupt- und Wechselwirkungen können nun mit Hilfe einer Modellgleichung, auch Vorhersagegleichung genannt (Engelmann, 1995), genutzt werden, um Rückschlüsse auf mögliche Versuchsergebnisse bei geänderten Parametereinstellungen innerhalb der im Versuchsplan gesteckten Grenzen zu ziehen. Dies ist vorteilhaft beispielsweise bei dem Vergleich von Daten einer Simulation, deren gewählte Eingangsparameter innerhalb der Versuchsplangrenzen liegen, mit interpolierten Ergebnissen aus dem Versuchsplan. Zusätzlich bietet eine Vorhersagegleichung auch die Möglichkeit, mögliche Versuchsergebnisse in einem gewissen Bereich über die Versuchsplangrenzen hinaus zu extrapolieren.

Als Bezugspunkt für die Vorhersagegleichung wird üblicherweise der Mittelpunkt des Versuchsplans gewählt, der durch den Mittelwert aller im Versuchsplan durchgeführten Messungen bestimmt wird. Bezogen auf das obige Beispiel in Abb. 3.2 lautet der Mittelwert:

$$\bar{z} = \frac{z(a_1, b_1) + z(a_2, b_1) + z(a_1, b_2) + z(a_2, b_2)}{4} \quad (3.19)$$

Der Wert für z an einer beliebigen Stelle (a, b) kann nun als Änderung von z vom Mittelwert $\bar{z}$ errechnet werden. Dazu ist es günstig eine Koordinatentransformation durchzuführen und den Koordinatenursprung in den Mittelpunkt zu legen. Die transformierten Koordinaten a_t und b_t werden wie folgt bestimmt:

$$a_t = \frac{a - \frac{a_2 + a_1}{2}}{\frac{a_2 - a_1}{2}} \quad (3.20)$$

$$b_t = \frac{b - \frac{b_2 + b_1}{2}}{\frac{b_2 - b_1}{2}} \quad (3.21)$$

Unter der vereinfachenden Annahme, dass zwischen Zielgröße und signifikanten Eingangsgrößen ein linearer Zusammenhang besteht, kann dann für $z(a, b)$ das folgende Modell aufgestellt werden:

$$z(a, b) = \bar{z} + \frac{A}{2}a_t + \frac{B}{2}b_t + \frac{AB}{2}a_t \cdot b_t \quad (3.22)$$

Der letzte Term in Glg. 3.22 stellt einen gemischt-linearen oder auch bilinear genannten Zusammenhang dar. Daher wird hier auch von einem bilinearen Modell gesprochen. Zur Überprüfung der hier gemachten Annahme eines linearen Zusammenhangs können die für die Berechnung von Glg. 3.12 durchgeführten Mittelpunktversuche herangezogen werden. Ein Vergleich zwischen berechnetem und gemessenem Mittelwert gibt Auskunft darüber, ob diese Annahme zulässig ist. Wird hierbei eine starke Abweichung festgestellt, muss eventuell über einen quadratischen Zusammenhang zwischen Ziel- und Eingangsgrößen nachgedacht werden. Um aber ein quadratisches Modell aufstellen zu können, reichen die bisherigen Ergebnisse bei einer Parametervariation auf zwei Niveaus nicht mehr aus. Das bedeutet, es werden weitere Messungen (etwa in einem 3^n -Versuchsplan) notwendig. Da in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht mit quadratischen Vorhersagegleichungen gearbeitet wird, soll für weiterführende Informationen auf die Literatur (z.B. ([Adam, 2004](#))) verwiesen werden.

4 Methoden

Bei der hier zu untersuchenden Strömungsform handelt es sich um eine mehrphasige Strömung zweier nicht mischbarer Flüssigkeiten über eine Ebene, wie sie in Abb. 4.1 schematisch dargestellt ist. Neben der gegenseitigen Beeinflussung stehen die beiden Flüssigkeiten zusätzlich mit einer Gas- bzw. Dampfphase und der festen Plattenfläche in Kontakt. Derartige Strömungen wurden schon früher bei Kondensationsversuchen von Dampfgemischen qualitativ beschrieben. Eine ausführliche Übersicht über mögliche bzw. beobachtete mehrphasige Strömungszustände ist bei [Mitrovic und Reimann \(2001\)](#) gegeben. Je nach Plattenmaterial-Stoffgemisch-Kombination kommt es danach zu verschiedenen Anordnungen der Phasen. Je nach Benetzungseigenschaften der jeweiligen Flüssigkeiten bilden die Phasen Rinnsale, Tropfen oder geschlossene Filme, die sich gegenseitig überlagern. Aufgrund von Grenzflächenphänomenen kann es sogar vorkommen, dass die Phase mit der eigentlich höheren Dichte entgegen der wirkenden Gravitationskraft auf der Phase mit der geringeren Dichte schwimmt ([Krämer und Stichlmair, 1995](#)).

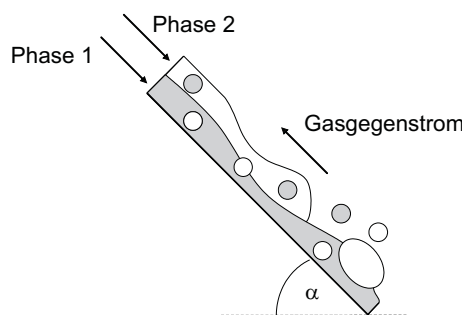


Abbildung 4.1: Mögliche Form einer mehrphasigen Filmströmung über eine um α geneigte Ebene.

Für die Anlagenauslegung zum Betrieb solcher Prozesse ist zum einen die Kontaktzeit, d.h. die Zeit, in der die Phasen zueinander in Kontakt stehen, zum anderen die jeweilige Phasengrenzfläche, über die ein Wärme- bzw. Stofftransport stattfindet, von besonderem Interesse. Die Kontaktzeit zwischen den einzelnen Phasen hängt stark von den einzelnen Strömungsgeschwindigkeiten ab. Die Phasengrenzfläche wird durch die Ausbreitung sowie die Dicke der jeweiligen Phase bestimmt. Um eine mehrphasige Filmströmung quantitativ charakterisieren zu können, müssen also Geschwindigkeiten, Ausbreitungen und Dicken der flüssigen Phasen ermittelt werden.

4.1 Messmethoden

Im Laufe der letzten Jahrzehnte wurden in der Strömungsmesstechnik verschiedene Methoden entwickelt, die je nach Anwendung verschiedene Vor- und Nachteile aufweisen. Eine Übersicht hierzu liefert [Jensen \(2004\)](#). Zunächst kann die Vielzahl der in der Literatur zu findenden Strömungsmessmethoden in intrusive (berührende) und nicht-intrusive (nicht berührende) Methoden unterteilt werden. Unter intrusiven Methoden sind solche Messverfahren zu verstehen, die beispielsweise mit einer Sonde die Strömung berühren bzw. in sie eintauchen. Im Bereich der Geschwindigkeitsmessung zählen dazu z.B. die Hitzdrahtanemometrie ([Hamad und Bruun, 2000](#)), die Hochfrequenzimpedanzsonde ([Leuthner und Auracher, 1997](#)) sowie das Abtasten der Strömung mit einer Nadel ([Ataki und Bart, 2002](#)). Dem gegenüber stehen die nicht-intrusiven Messmethoden. Dazu gehören alle optischen Messverfahren wie Laserdoppleranemometrie (LDA) ([Wittig et al., 1997](#)), Particle Image Velocimetry (PIV) ([Prasad, 2000](#); [Alekseenko et al., 2005](#)), Particle Tracking Velocimetry (PTV) ([Borchers et al., 1999](#); [Veerapaneni et al., 2000](#)) und Light Induced Fluorescence (LIF) ([Ho und Hummel, 1970](#)), aber auch tomografische Methoden wie Kernspintomografie (NMR) ([Gladden und Alexander, 1996](#)) oder Röntgenstrahltomografie ([Reinecke et al., 1997](#)). Ein Überblick über die speziell für Film- und Rinnsalströmungen eingesetzten Messmethoden ist in Tab. 4.1 gegeben.

Tabelle 4.1: Überblick über einige veröffentlichte Messmethoden zur Charakterisierung von Film- und Rinnsalströmungen.

Autor	Methode	Anwendung	Fluid	Plattenmaterial
Alekseenko et al. (2005)	PIV	Rinnsalströmung	Wasser-Glycerin	Stahlrohr
Ataki und Bart (2002)	Nadel	Rinnsalströmung	Wasser-Glycerin	Stahlplatte
Gladden und Alexander (1996)	NMR	Film auf regelloser Schüttung	Wasser	Glaspartikel
Ho und Hummel (1970)	LIF	Fallfilm	Wasser-Alkohol-Gemische	Glasrohr
Leuthner und Auracher (1997)	HFI	Fallfilm	Wasser	Stahlrohr
Veerapaneni et al. (2000)	PTV	Filmströmung	Wasser-Glycerin	Glasplatte
Wittig et al. (1997)	LDA	Scherkraft getriebene Filmströmung	Wasser	Glasplatte

Des Weiteren unterscheiden sich die Messmethoden in der räumlichen Auflösung. So misst z.B. im Bereich der optischen Methoden die LDA Strömungsgeschwindigkeiten in einem sehr

kleinen, punktförmigen Volumen (üblich: $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$), wodurch größere zu untersuchende Volumen in einem Raster abgefahren und vermessen werden müssen. Bei der PIV dagegen wird ein sehr dünner Lichtschnitt aufgespannt und in den zu messenden Strömungsraum eingekoppelt. Dadurch können Strömungsgeschwindigkeiten in einer quasi zweidimensionalen Ebene gemessen werden (Jensen, 2004) und der Messaufwand gegenüber der LDA verringert sich.

Zur Bestimmung der eingangs beschriebenen drei Messgrößen Geschwindigkeit, Ausbreitung und Fluiddicke soll in dieser Arbeit ein optisches Messsystem verwendet werden, um die Strömung nicht zu berühren und dadurch nicht zu beeinflussen. Des Weiteren sollen alle drei Messgrößen mit möglichst geringem Aufwand, d.h. über einen Sensor, erfasst werden. Da es sich zudem bei der zu untersuchenden Strömung um ein zeitlich stark variierendes, dreidimensionales Strömungsfeld handelt, wird die flächige Momentaufnahme über eine normal zur überströmten Platte angeordnete Kamera gewählt.

4.1.1 Schattenflächenmessung

Anhand solcher Momentaufnahmen kann bereits die Ausbreitung einer Flüssigkeit auf einer Platte bestimmt werden. Shi und Mersmann (1984) haben auf diese Weise die Breite von Rinnsalen vermessen, und Podgorski et al. (1999) charakterisierten so das Aufreißverhalten von Filmströmungen. Das einfache Prinzip verdeutlicht Abb. 4.2. Die Abbildung zeigt eine Wasserströmung über eine geneigte Edelstahlplatte, die die zur Verfügung stehende Plattenfläche A_P (durchgezogene Markierung) nicht vollständig ausnutzt. Stattdessen wird eine kleinere Plattenfläche A_{ben} benetzt, die in Abb. 4.2 gestrichelt dargestellt ist.

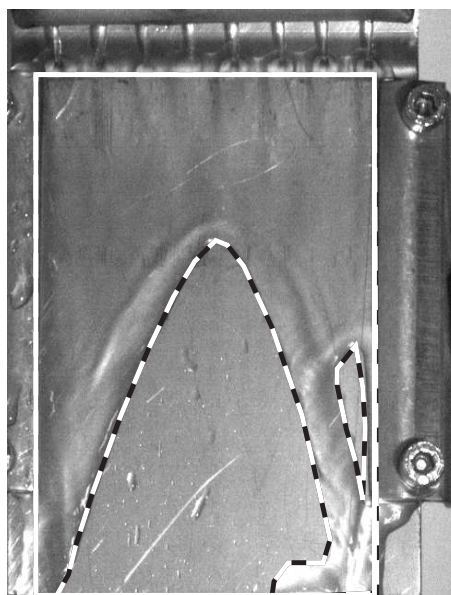


Abbildung 4.2: Bestimmung der Schattenfläche anhand von Momentaufnahmen der Strömung.

Setzt man nun die benetzte Plattenfläche A_{ben} mit der zur Verfügung stehenden Plattenfläche A_P ins Verhältnis, so erhält man ein Maß für die Benetzungseigenschaften der Flüssigkeit auf dem Plattenmaterial:

$$a_P = \frac{A_{ben}}{A_P} \quad (4.1)$$

Da es sich bei der Aufnahme und Messung von A_{ben} um eine Projektion der dreidimensionalen Phasengrenzfläche auf die zweidimensionale Platte handelt, spricht man bei a_P von der spezifischen Schattenfläche. Durch die Aufnahme der projizierten Phasengrenzfläche ist die spezifische Schattenfläche vor allem auch als Bewertungswerkzeug für die Benetzung von strukturierten Oberflächen, wie sie z.B. in strukturierten Packungen zu finden sind, sehr gut geeignet.

4.1.2 Dickenmessung

Ist zusätzlich zur Schattenfläche die Flüssigkeitsdicke an mehreren Stellen auf der zweidimensionalen Strömungsabbildung bekannt, so kann daraus die eigentlich interessante, dreidimensionale Phasengrenzfläche errechnet werden. Informationen über die lokale Flüssigkeitsdicke auf einem Bild lassen sich beispielsweise mittels lichtinduzierter Fluoreszenz (LIF) durch unterschiedliche Helligkeiten im Bild messen ([Adomeit und Renz, 2000](#)).

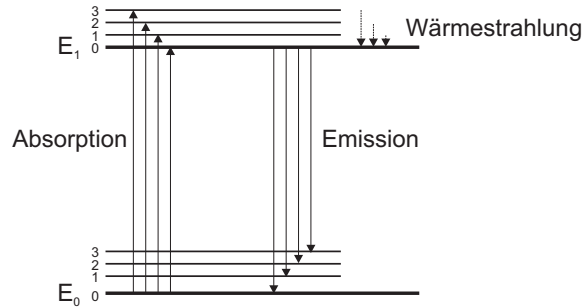


Abbildung 4.3: Energieübergänge bei Molekülen.

Die LIF nutzt die Eigenschaft von Molekülen und Atomen, Energie in Form elektromagnetischer Strahlung absorbieren und wieder abgeben zu können. Mit Licht bestimmter Wellenlängen können die äußeren Elektronen von einem Grundzustand E_0 in den höheren Energiezustand E_1 mit allen seinen Schwingungszuständen gehoben werden. Schematisch ist dies in Abb. 4.3 veranschaulicht. Jedem dieser Energieübergänge entspricht ein eigener Energiebetrag ΔE :

$$\Delta E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (4.2)$$

In Glg. 4.2 sind das Plancksche Wirkungsquantum $h = 6,625 \cdot 10^{-34} Js$ sowie die Lichtgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^8 m/s$ konstant, sodass ΔE nur eine Funktion der Wellenlänge λ darstellt. Große Energieübergänge finden demnach bei kleinen Wellenlängen, üblicherweise im UV-nahen und sichtbaren Wellenlängenbereich (UV-VIS), statt und kleine Übergänge bei großen Wellenlängen als Wärmestrahlung (IR) (Wünsch, 1976).

Bei der Absorption werden die Elektronen auf verschiedene Schwingungszustände des höheren Energieniveaus E_1 angehoben. Den jeweiligen Energiedifferenzen ΔE entsprechen mehrere Wellenlängen (Absorptionsspektrum), die charakteristisch für jedes Atom und Molekül sind und in der Spektroskopie zur Stoffbestimmung genutzt werden. Die Elektronen auf den höheren Schwingungszuständen im Energiezustand E_1 geben schon nach sehr kurzer Zeit einen Teil ihrer Energie in Form langwelliger Wärmestrahlung ab, um auf den niedrigsten, stabileren Schwingungszustand von E_1 zu gelangen. Der weitere Übergang zum energetischen Grundzustand E_0 erfolgt in der Regel ebenfalls durch Emission von Wärmestrahlung. Allerdings existieren Moleküle, die bei diesem Übergang von E_1 nach E_0 elektromagnetische Strahlung in Form von sichtbarem Licht emittieren. Die Emission erfolgt dabei vom niedrigsten Schwingungszustand in E_1 zu verschiedenen Schwingungszuständen in E_0 mit verschiedenen Wellenlängen (Emissionsspektrum). Das Emissionsspektrum ist ebenfalls charakteristisch für ein bestimmtes Molekül und ist im Vergleich zum Absorptions- oder auch Anregungsspektrum, da die Energiedifferenzen der Emission kleiner sind, zu höheren Wellenlängen verschoben (Kiefer, 1977). Zur Veranschaulichung sind in Abb. 4.4 Absorptions- und Emissionsspektrum des häufig eingesetzten Fluoreszenzfarbstoffes Fluoreszein aufgetragen.

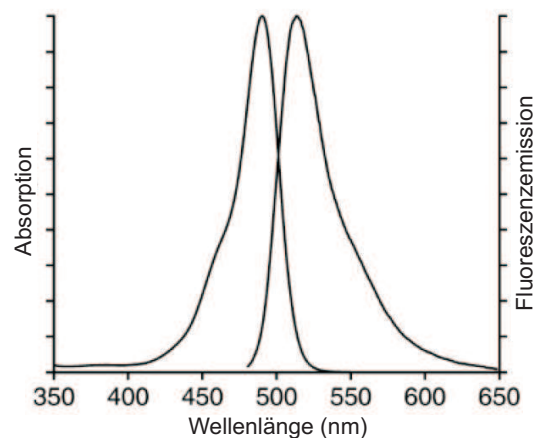


Abbildung 4.4: Absorptions- und Emissionsspektrum von Fluoreszein (Gregory, 2002)

Diese Verschiebung von Absorptions- und Emissionsspektrum ist messtechnisch nutzbar: mit Hilfe geeigneter Filter lässt sich ein Sensor so ausrüsten, dass nur das emittierte Fluoreszenzlicht detektiert wird. Das für die Anregung ausgestrahlte Licht wird vom Filter geblockt, und das Messsignal wird nicht von unerwünschten Reflektionen überlagert. Gemessen wird dabei die Intensität des emittierten Lichts, die von mehreren Parametern abhängig ist. Zum

einen spielt die Anregungswellenlänge eine Rolle, da vom Fluoreszenzfarbstoff verschiedene Wellenlängen unterschiedlich gut absorbiert werden und nur bestimmte Wellenlängen für eine Anhebung der Elektronen auf höhere Energiezustände E_1 sorgen (Gregory, 2002). Des Weiteren hat die Intensität des Anregungslichtes I_0 einen entscheidenden Einfluss auf die Intensität des Fluoreszenzlichtes I_F . Diese kann höchstens so groß sein wie die zuvor vom Farbstoff absorbierte Intensität I_{abs} :

$$I_F \leq I_{abs} \quad \text{bzw.} \quad I_F = \kappa I_{abs} \text{ mit } \kappa \leq 1 \quad (4.3)$$

Die absorbierte Intensität wird aus der Differenz zwischen Intensität des Anregungslichtes I_0 und der vom Farbstoff durchgelassenen Intensität I gebildet, die sich mit Hilfe des Lambert-Beer'schen Gesetzes bestimmen lässt (Wünsch, 1976):

$$I_{abs} = I_0 - I = I_0 \left(1 - 10^{-\epsilon c_F d}\right) \quad (4.4)$$

wobei c_F die Konzentration des Farbstoffs in Lösung, d die Schichtdicke der absorbierenden Lösung und ϵ den wellenlängenabhängigen und stoffspezifischen Extinktionskoeffizienten darstellen. Durch Glg. 4.4 ist nun zusätzlich eine Abhängigkeit der Fluoreszenzintensität I_F von Farbstoffkonzentration und Schichtdicke gegeben. Damit existiert die Möglichkeit, durch Messung der Fluoreszenzintensität indirekt entweder auf die Konzentration bei konstanter Schichtdicke (Grimm et al., 2002; Kling und Mewes, 2003; Gneist et al., 2004) oder auf die Schichtdicke bei konstanter Konzentration (Liu et al., 1993; Le Coz und Baritaud, 1996; Johnson et al., 1999; Al-Sibai, 2004) schließen zu können.

Mit Hilfe von LIF wird in dieser Arbeit die veränderliche Dicke von Filmströmungen während mehrerer Momentaufnahmen räumlich hoch aufgelöst vermessen. Gekoppelt mit der Schattenfläche werden so Informationen über die Phasengrenzfläche erhalten. Die LIF kann zusätzlich dazu verwendet werden, um Geschwindigkeitsprofile in der Filmströmung zu visualisieren (Park et al., 2000), was in dieser Arbeit jedoch keine Anwendung findet. Stattdessen wird die Filmströmungsgeschwindigkeit mit Hilfe einer PTV-Methode gemessen, die im Folgenden näher beschrieben werden soll.

4.1.3 Geschwindigkeitsmessung

Die dritte zu ermittelnde Größe ist die Strömungsgeschwindigkeit, die idealer Weise mit dem gleichen Sensor aufgenommen werden sollte wie schon die Schattenfläche und die Fluiddicke der Strömung, also mit der normal zur Filmoberfläche ausgerichteten Kamera. Dadurch wäre sichergestellt, dass eine gleichzeitige Aufnahme aller drei Messgrößen aus dem gleichen Blickwinkel ohne räumliche Verzerrung des Bildes erfolgt. Solch ein optisches Geschwindigkeitsmessverfahren erfordert in der Regel den zusätzlichen Einsatz von Tracern, die sich mit der Strömung mitbewegen und dadurch Auskunft über lokale Geschwindigkeitsvektoren geben

(Jensen, 2004).

Tracer können z.B. Feststoffpartikel sein, die einer flüssigen Strömung zugegeben werden, oder kleine Flüssigkeitströpfchen, die mit einem Gasstrom mitbewegt werden. Damit die Tracer genau die Geschwindigkeit der Strömung repräsentieren, werden gewisse Anforderungen an sie gestellt. Wird ein Partikel in einer Strömung mitbewegt, greifen an dieses Partikel Gravitations-, Reibungs- und Auftriebskräfte an (Mei, 1996). Damit das Partikel nun optimal dem Strömungsverlauf der kontinuierlichen Phase folgt, sollte die Partikelgröße möglichst klein gewählt werden und das Dichteverhältnis von Partikelmassendichte und Fluidichte ρ_P/ρ_f möglichst nahe bei 1 liegen (Dring, 1982). Ein weiteres Kriterium ist die Detektierbarkeit der Tracer, die neben dem reflektierenden Potenzial des Tracers maßgeblich von der Partikelgröße abhängt (Melling, 1997). Insofern muss für die Partikelgröße ein Kompromiss aus guter Detektierbarkeit und guter Strömungsfeldverfolgung gefunden werden. Empfehlungen geeigneter Tracer für die Messung in Wasserströmungen sind z.B. bei Lone (1998) angegeben. Weitere Aufmerksamkeit sollte nach Meyers (1991) auf die Zugabe von Tracern zur Strömung gelegt werden: feste Partikel werden optimaler Weise über eine Wirbelschicht mit der kontinuierlichen Phase vermischt und ausgetragen, flüssige und gasförmige Tracer gelangen am besten durch Einsprühen bzw. Einblasen in die Strömung.

Die Auswahl geeigneter Tracer ist demnach nicht einfach. Hinzu kommt, dass die wellige Filmströmung ein zeitlich veränderliches und dreidimensionales Strömungsfeld darstellt, das eigentlich nur stereoskopisch mit zwei oder mehr Detektoren aufgenommen und photogrammetrisch vermessen werden kann (Schimpf et al., 2003). Wie Abb. 4.5 zeigt, führt die Aufnahme von Tracern in einer Filmströmung mit nur einem Detektor normal zur Phasengrenzfläche (PGF) zu nicht eindeutigen Geschwindigkeitsmessungen. Die drei Partikel in unterschiedlichen Höhen y des Films bewegen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten $u_{P1} > u_{P2} > u_{P3}$, deren Projektion auf die xz -Ebene von der Kamera aufgenommen wird.

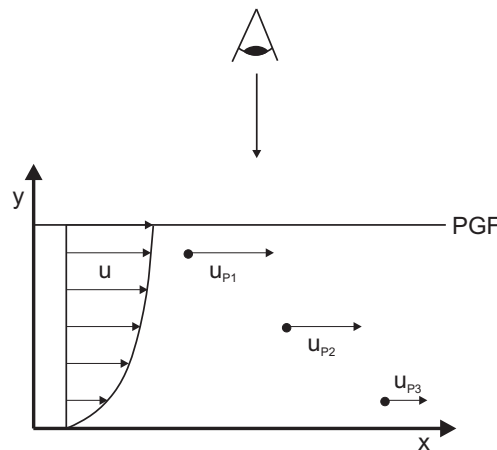


Abbildung 4.5: Problem der Partikelprojektion durch Aufnahme mit nur einem Detektor.

Veerapaneni et al. (2000) haben Untersuchungen zur Partikeldynamik in Filmströmungen durchgeführt und die Partikelgeschwindigkeit mit der Oberflächengeschwindigkeit verglichen. Die Messung der Oberflächengeschwindigkeit erfolgte durch Zugabe und Verfolgung von Hohlpartikeln, die eine sehr geringe Massendichte aufweisen, somit aufschwimmen und an der Filmoberfläche mit der Flüssigkeit mitbewegt werden. Auf diese Weise vereinfacht sich das dreidimensionale Strömungsfeld, und die höhenabhängige Geschwindigkeit im Film wird auf die maximale Geschwindigkeit an der Oberfläche (vgl. Glg. 2.3) reduziert. Somit wird es möglich, durch Aufnahmen der Filmoberfläche mit nur einer einzigen Kamera Aussagen über die Oberflächengeschwindigkeit des Films und mit Hilfe von Glg. 2.2 wiederum Annahmen über die Strömungsgeschwindigkeit im Inneren des Films zu treffen.

Um die Geschwindigkeit der Tracer messen zu können, werden mehrere Aufnahmen der Partikel zu definierten Zeitpunkten benötigt. Diese können nach Adrian (1991) entweder durch einfache Belichtung auf mehreren Aufnahmen (single-exposure multi-frame) oder durch mehrfache Belichtung auf einem Einzelbild (multi-exposure single-frame) abgebildet werden. Dabei ist darauf zu achten, dass der zeitliche Abstand zwischen zwei Belichtungen Δt so an die Strömungsgeschwindigkeit und die Größe des aufgenommenen Bereichs angepasst ist, dass die Mehrfachabbildungen sicher den jeweiligen Partikeln zugeordnet werden können. Keane und Adrian (1992) geben für Strömungsmessungen mit hohen Partikelanzahldichten Empfehlungen, wie die Aufnahmeparameter (z.B. Δt) gewählt werden sollten, um optimale Geschwindigkeitsmessungen zu gewährleisten. Da in dieser Arbeit mit vergleichsweise kleinen Partikelanzahldichten gearbeitet wird, dienen diese Empfehlungen nur als erster Ansatz für die Wahl geeigneter Aufnahmeparameter, die in den folgenden Kapiteln 5 und 6 genauer spezifiziert werden.

Die daran anschließende Auswertung der Partikelbilder kann entweder mit Hilfe der Particle Imaging Velocimetry (PIV) oder der Particle Tracking Velocimetry (PTV) erfolgen. Bei der PIV wird das Bild in mehrere Auswertgebiete (Interrogation Spots) eingeteilt und mittels einer Korrelationsfunktion die mittlere Partikelverschiebung pro Auswertgebiet berechnet (Prasad, 2000). Dieses Verfahren entspricht einer Eulerschen Betrachtungsweise und ist sehr leicht zu automatisieren. Für eine ausreichende Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung ist jedoch eine hohe Partikelanzahl pro Auswertgebiet notwendig. Außerdem ist die Eulersche Geschwindigkeitsmessung im Fall von Mehrphasenströmungen nur dann gesichert möglich, wenn die zu vermessenden Phasen als kontinuierliche Phase vorliegen (z.B. mehrere Schichten). Insbesondere bei dispersen Phasenverteilungen (z.B. Blasenströmung oder Tropfenströmung) bietet sich eher die Lagrang'sche Herangehensweise der PTV an. Hier werden einzelne Tracer auf ihrem Strömungsweg verfolgt und deren lokale Geschwindigkeit gemessen. Um einzelne Tracer und deren zusammengehörende Abbildungen von anderen unterscheiden zu können, sollte die Partikelanzahldichte relativ gering gehalten werden (Jensen, 2004). Die PTV ist das älteste optische Geschwindigkeitsmessverfahren, da Tracer auf Fotografien auch ohne die

Unterstützung von Computern verfolgt und deren Geschwindigkeiten einfach per Hand ausgemessen werden können. Allerdings ist die Automatisierung der Einzelpartikelverfolgung dafür umso komplizierter, wie verschiedene Ansätze in der Literatur zeigen (Cowen und Monismith, 1997; Seeger et al., 2001; Kim und Lee, 2002).

In dieser Arbeit wird die PTV zur Geschwindigkeitsmessung an doppelbelichteten Einzelbildern verwendet. Zum einen kann hierdurch die Partikelverfolgung manuell und ohne großen Aufwand durchgeführt werden. Zum anderen ist die PTV einfacher auf die aufreißende Filmströmung mit anschließender Rinnsal- und Tropfenbildung sowie auf die mehrphasige Filmströmung erweiterbar, die im Folgenden näher beschrieben werden soll.

4.2 Erweiterung auf die Mehrphasenströmung

Die mehrphasige Filmströmung unterscheidet sich von der einphasigen Filmströmung dadurch, dass zwei flüssige Phasen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und unterschiedlichen Dicken im Gleichstrom über die Platte fließen. Als Testsystem wird in dieser Arbeit das Stoffsystem Wasser-Toluol verwendet, dessen prinzipielles Phasendiagramm (T-x-Diagramm) in Abb. 4.6 dargestellt ist. Aufgetragen ist hier der Temperaturverlauf bei konstantem Druck in Abhängigkeit von der Zusammensetzung. Die Kurven geben die Bereiche an, in denen eine Phase (flüssig bzw. dampfförmig) oder zwei Phasen (flüssig-flüssig bzw. flüssig-dampfförmig) vorliegen. Wasser und Toluol bilden zudem ein Azeotrop mit einer Siedetemperatur unterhalb der Siedetemperaturen der Reinstoffe (Lide, 2004). Wird das Stoffgemisch bei Umgebungsbedingungen (Umgebungstemperatur und Umgebungsdruck) verwendet, so ist aus Abb. 4.6 ersichtlich, dass bei beliebiger Zusammensetzung das Gemisch in seine Reinstoffe Wasser und Toluol zerfällt. Es bilden sich zwei flüssige Phasen aus, die stabil nebeneinander vorliegen.

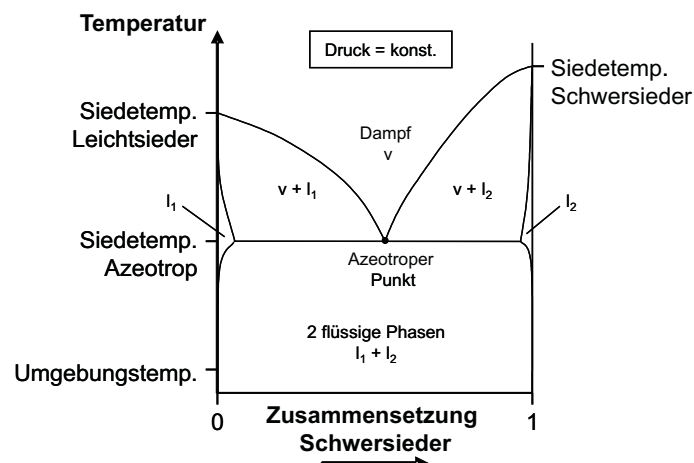


Abbildung 4.6: Schematische Darstellung des Phasendiagramms für das binäre Gemisch Wasser-Toluol mit azeotropem Punkt (Lide, 2004): Temperaturverlauf als Funktion der Gemischzusammensetzung.

Um bei der mehrphasigen Filmströmung Geschwindigkeiten und Dicken separat für jede

flüssige Phase messen zu können, müssen die herkömmlichen Messverfahren erweitert und angepasst werden, was in den folgenden Abschnitten beschrieben werden soll.

4.2.1 Dickenmessung

Zur Messung der mehrphasigen Filmdicke wird LIF so verändert, dass die Dicke jeder Phase einzeln gemessen werden kann. Somit ist gewährleistet, dass mögliche Überlagerungen (Phase *i* bedeckt Phase *j*) erkannt und gemessen werden können. Allerdings müssen dafür Fluoreszenzfarbstoffe ausgewählt werden, die eine Trennung der beiden Phasen durch Filterung des emittierten Lichts ermöglichen.

Zu diesem Zweck können im einfachsten Fall Farbstoffe verwendet werden, die sich in den beiden Flüssigkeiten unterschiedlich lösen. So gibt es z.B. Farbstoffe, die sich in organischen Lösungsmitteln wie Toluol sehr gut lösen, in Wasser dagegen nicht löslich sind. Des Weiteren existieren Farbstoffe, die pH-sensitiv oder abhängig von einer bestimmten Ionenkonzentration in der Lösung sind und damit unterschiedliche Anregungs- und Emissionsspektren aufweisen (Gregory, 2002). Solche Farbstoffe lassen sich gut als Indikatoren oder für Stoffübergangsmessungen einsetzen, finden aber für das hier betrachtete Stoffsystem Toluol-Wasser keine Anwendung. Einen erfolgreicheren Ansatz versprechen dagegen Farbstoffe, die abhängig von der Polarität des Lösungsmittels eine Verschiebung des Emissionsspektrums aufweisen. Cundall et al. (1979) z.B. haben verschiedene Hexatriene (DPH) in unterschiedlichen organischen Lösungsmitteln untersucht und je nach Lösungsmittelpolarität Verschiebungen des Emissionsmaximums von bis zu 200nm gefunden. Dieser Effekt wird als Solvatochromieeffekt bezeichnet (Arici, 2000) und könnte in zukünftigen Untersuchungen zur Identifikation einer bestimmten Lösungsmittelkonzentration in einer Phase benutzt werden, oder auch zur optischen Trennung einzelner Phasen.

Für die Dickenmessungen der mehrphasigen Filmströmung werden in dieser Arbeit zwei Fluoreszenzfarbstoffe verwendet: Der eine ist zwar in beiden Phasen löslich, aber nur in der wässrigen Phase detektierbar, der zweite ist nur in der organischen Phase löslich und besitzt solvatochromatische Eigenschaften. Nähere Informationen bzgl. Anregungs- und Emissionsspektren der verwendeten Farbstoffe sowie zur Kalibration werden im Kap. 6 gegeben.

4.2.2 Geschwindigkeitsmessung

Wie oben bereits erwähnt wird in der optischen Strömungsmesstechnik zur Geschwindigkeitsmessung in mehrphasigen Systemen bevorzugt die PTV verwendet. Es existieren verschiedene Publikationen, in denen Messungen an mehrphasigen Strömungsproblemen mittels PIV durchgeführt wurden. Dabei handelt es sich jedoch meist um zwei kontinuierliche Phasen wie z.B. bei der Öl-Wasser-Schichtströmung in Pipelines (Pulvirenti und Sotgia, 2004; Poseio et al., 2004), die für die PIV-Auswertung vergleichsweise große, räumlich stationäre Messflächen zur Verfügung stellen.

Liegt neben einer kontinuierlichen Phase eine disperse Phase vor, wie etwa die Blasenströmung in Blasensäulen, so führt die reine PIV-Auswertung häufig zu Problemen. Zwar gibt es auch hier mehrere Ansätze, Geschwindigkeiten mit PIV zu messen (z.B. [Lindken et al. \(1999\)](#)), jedoch wird meist nur die Geschwindigkeit der kontinuierlichen Phase gemessen und anschließend darüber auf die Geschwindigkeit der dispersen Phase geschlossen ([Deen et al., 2002](#)). Zur Verfolgung der einzelnen Blasen wird meistens eine PTV-Methode angewandt (z.B. [Seeger et al. \(2001\)](#)), die dann mit PIV-Messungen der kontinuierlichen Phase gekoppelt wird ([Borchers et al., 1999](#)).

Die hier zu untersuchende mehrphasige Filmströmung ähnelt in ihrem Strömungsverhalten eher einem System mit disperser und kontinuierlicher Phase. Wie eingangs erwähnt, kommt es bei der mehrphasigen Filmströmung häufig vor, dass eine Phase einen geschlossenen Film bildet (kontinuierliche Phase) und die andere Phase als Rinnsal- und Tropfenströmung vorliegt (disperse Phase). Die Erweiterung der bei einphasiger Strömung angewandten PTV-Methode ist daher erforderlich.

Auf der Oberfläche beider Phasen befinden sich wie im einphasigen Fall Tracer, die mittels der normal zur Strömung angeordneten Kamera im double-exposure/single-frame Modus aufgenommen werden. Die einzeln vermessenen Tracergeschwindigkeiten werden der jeweiligen Phase zugeordnet und geben somit Aufschluss über die Oberflächengeschwindigkeiten der beiden Phasen.

4.3 Simulationen mittels CFD

Die in dieser Arbeit experimentell ermittelten Daten werden in Zusammenarbeit mit einem Partnerprojekt zur Validierung strömungsmechanischer Simulationen herangezogen. Aus diesem Grund sollen hier einige Angaben zu den durchgeführten Simulationen gemacht werden. Detailliertere Angaben zur Numerik können den gemeinsamen Veröffentlichungen ([Hoffmann et al., 2004](#); [Ausner et al., 2005b](#); [Hoffmann et al., 2006](#)) entnommen werden.

Für die Simulationen wird das kommerzielle CFD-Paket CFX 5 der Firma Ansys Inc. eingesetzt. Für alle Phasen wird ein gemeinsamer Satz an Gleichungen für Geschwindigkeit- und Druckfeld (Euler-Ansatz) gelöst. Die verschiedenen Phasen gehen dabei analog zur Volume-Of-Fluid (VOF) Methode über pro Zelle gemittelte Phasenanteile in die Gleichungen ein. Dabei zählt neben den Flüssigkeiten auch die unbewegte Gasphase als separate Phase. Zur Beschreibung der freien Oberflächen werden die Oberflächenspannungen mit dem Modell von [Brackbill et al. \(1992\)](#) eingebunden. Die Kontaktwinkel werden als Randbedingungen an der Wand (Platte) vorgegeben.

Die Simulationen werden in einem dreidimensionalen Rechengitter ausgeführt, da ein zweidimensionales Modell 3D-Effekte wie Filmaufreißen oder Rinnsal- und Tropfenströmung nicht auflösen könnte. Die räumliche Auflösung des Gitters ist im Bereich der Platte sehr fein

gewählt und wird mit zunehmendem Abstand zur Platte immer größer. Stoffspezifische Parameter, die in der Simulation Verwendung finden, sind in Tab. 4.2 aufgeführt.

Tabelle 4.2: Stoffparameter für die CFD-Simulationen bei 25°C und 1bar .

Stoffparameter	Wasser	Toluol
Dichte $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	997	867
Kin. Viskosität $\nu(\text{m}^2/\text{s})$	$8,926 \cdot 10^{-7}$	$6,817 \cdot 10^{-7}$
Oberflächenspannung $\sigma(\text{N}/\text{m})$	0,0728	0,0285
Stat. Kontaktwinkel $\theta(^{\circ})$	80	8

5 Einphasige Strömung

Zunächst werden einphasige Flüssigkeitsströmungen behandelt, da diese bislang sehr gut untersucht und weithin verstanden sind. Zum einen besteht dadurch die Möglichkeit, die entwickelte Messtechnik zu testen und die Messergebnisse mit Literaturdaten zu vergleichen. Zum anderen stellt die einphasige Filmströmung weniger Ansprüche an die Numerik als die mehrphasige Filmströmung. Somit können leichter Einflüsse von Randbedingungen und Gültigkeiten von Modellannahmen in der CFD überprüft werden.

Im Folgenden werden die Strömungsmessungen einer einphasigen Wasser- bzw. einer einphasigen Toluolströmung über geneigte Edelstahlplatten beschrieben und mit vorhandenen CFD-Simulationen sowie Literaturdaten verglichen. Diese beiden Stoffe wurden ausgewählt, da sie einerseits nicht mischbar sind (vgl. Abschnitt 4.2) und somit beide Phasen als Reinstoffe betrachtet werden können. Zum anderen wird das System Aceton-Toluol-Wasser ([Villain et al., 2005b](#)) als Standardsystem bei der Erforschung der Dreiphasenrektifikation eingesetzt und hat somit auch einen größeren Bezug zur praktischen Anwendung.

5.1 Beschreibung des Versuchsaufbaus

Der für die einphasigen Strömungsmessungen eingesetzte Versuchsaufbau ist schematisch in Abb. 5.1 dargestellt. Die überströmte Platte mit Flüssigkeitsaufgabevorrichtung, ein Sammelbehälter, aus dem die Flüssigkeit zurück in die Aufgabevorrichtung gepumpt wird, sowie Kamera und Beleuchtung für die Strömungsmessungen sind die wichtigen Komponenten des Aufbaus, der im Folgenden näher beschrieben werden soll.

Um alle Komponenten für die Versuchsdurchführung schwingungsarm, standfest und dennoch flexibel installieren zu können, wurde für den Aufbau ein Gerüst aus MayTec®-Aluminiumprofilen realisiert, das alle relevanten Komponenten beinhaltet. Da Toluoldämpfe gesundheitsschädlich sind, wird aus Gründen der Arbeitssicherheit die Versuchsanlage in einem Laborabzug verwendet.

Die überströmte Platte ist im Neigungswinkel flexibel einstellbar und wird seitlich mit Klemmen fixiert. Dadurch ist es möglich, Platten mit unterschiedlichen Dicken bzw. mit Oberflächenstruktur einzuspannen und zu vermessen. Die untersuchten Platten weisen eine Breite von 50mm und eine Länge von 80mm auf. Der Neigungswinkel α wird in den nachfolgenden Untersuchungen auf die zwei Winkel von 45° und 60° zur Horizontalen eingestellt. Diese Winkel entsprechen in etwa den makroskopischen Neigungswinkeln handelsüblicher Blechpackungen

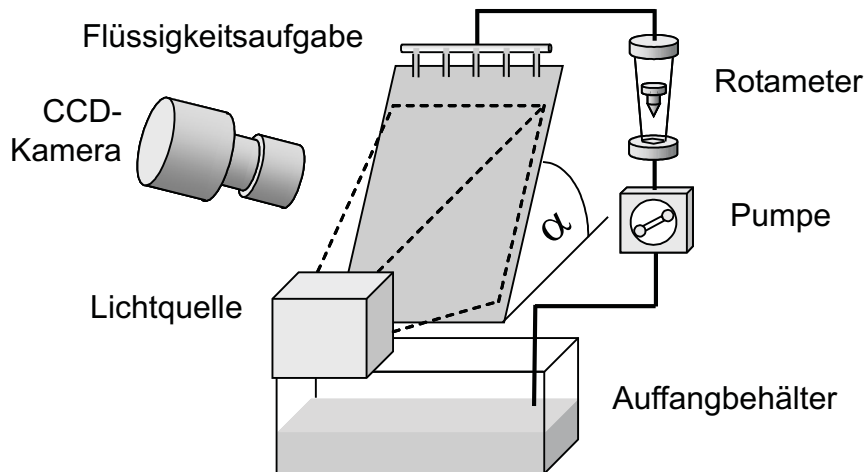


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für die einphasige Strömungsmessung mit Aufgaberohr.

wie z.B. Rombopak[®] der Firma Kühni, Allschwil - Schweiz.

Die Flüssigkeitsaufgabe auf die Platte kann, wie in Abb. 5.2 skizziert, mittels eines Überlaufwehres oder über Aufgaberohre erfolgen. Beim Überlaufwehr handelt es sich um einen Tank, in den die Flüssigkeit kontinuierlich gefördert wird. Erreicht der Füllstand eine gewisse Höhe, überströmt die Flüssigkeit ein Wehr und gelangt idealerweise als geschlossener Film auf die angesetzte Platte. Der geschlossene Film am Plattenanfang hat den Vorteil, dass er sich leicht in der CFD-Simulation als Randbedingung implementieren lässt, bietet jedoch keinerlei Möglichkeit, eine zweite flüssige Phase auf die Platte zu bringen. Die zweite Aufgabevariante verwendet ein dünnes Edelstahlrohr, das quer zur Platte angeordnet und mit mehreren Auslassbohrungen versehen ist. Die eingepumpte Flüssigkeit tritt durch diese Öffnungen als Strahl aus und bildet beim Auftreffen auf die Platte einen geschlossenen Flüssigkeitsfilm. Diese Variante ist zum einen schwerer zu modellieren (Jet-Aufgabe) und zeigt im Vergleich zur Aufgabe mit Überlaufwehr bei gleichem Volumenstrom eine höhere Anfangsgeschwindigkeit, bedingt durch die kleinere Eintrittsfläche. Inwieweit sich dieser Effekt auf die Filmströmung auswirkt, wird in den nachfolgenden Untersuchungen gezeigt. Vorteilhaft ist diese Aufgabevariante aber für die Aufgabe von zwei Flüssigkeiten auf die Platte. Durch Hintereinanderschalten zweier Rohre können auch zwei flüssige Phasen separat voneinander aufgebracht werden, weshalb diese Variante hier im Speziellen zur Anwendung kommt. Zusätzlich ähnelt diese Aufgabevariante sehr stark der Flüssigkeitsberieselung von Packungselementen innerhalb einer Kolonne.

Am unteren Ende der Platte wird die Flüssigkeit in einem Sammelbehälter aufgefangen und über eine Schlauchpumpe wieder in die Aufgabevorrichtung gefördert. Schlauchpumpen sind besonders dafür geeignet, feststoffhaltige Flüssigkeiten (hier: in der flüssigen Phase suspendierte Tracerpartikel) in einem stark veränderlichen Volumenstrombereich zu fördern. Der

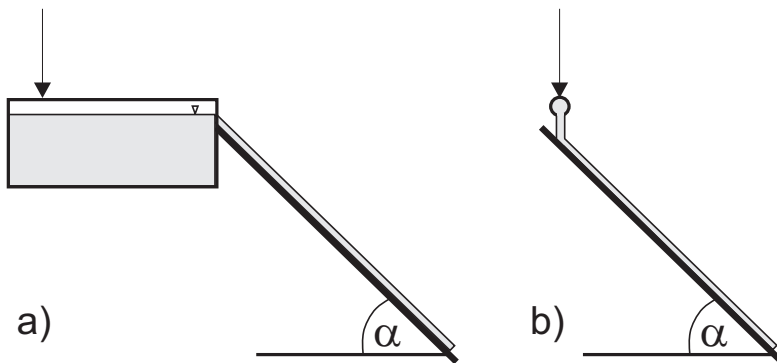


Abbildung 5.2: Varianten der Flüssigkeitsaufgabe: a) Überlaufwehr, b) Aufgaberohr.

Volumenstrom wird durch ein der Pumpe nachgeschaltetes Rotameter ermittelt, was ebenfalls zur Förderung partikelhaltiger Flüssigkeiten geeignet ist.

Die Strömung wird über eine normal zur Platte ausgerichtete Kamera aufgenommen. Dabei wird je nach Messaufgabe eine von insgesamt zwei Kameras eingesetzt, die, wie weiter unten noch beschrieben wird, unterschiedliche Vorzüge aufweisen. Bei den hier verwendeten Kameras handelt es sich um CCD-Kameras, die die Bilddaten elektronisch über einen Framegrabber an einen Computer übermitteln. Die ankommenden, digitalen Bildinformationen werden dort als Bitmaps für die spätere Bildauswertung gespeichert.

Die Beleuchtung des Strömungsfeldes erfolgt aus horizontaler Richtung direkt von vorn. Zur Beleuchtung werden ebenfalls je nach Messaufgabe zwei unterschiedliche Lichtquellen verwendet. Zur Geschwindigkeitsmessung wird eine gepulste Lichtquelle benötigt, um eine Mehrfachbelichtung der Strömung zu erzielen. Die Dickenmessung erfordert bestimmte Spektren mit sehr hoher Intensität, wie sie z.B. eine Quecksilberdampf Lampe erzeugt. Auf die Spezifikationen der verwendeten Lichtquellen wird in den nachfolgenden Beschreibungen zur Implementierung der Messtechnik eingegangen.

Die abschließende Auswertung der Bilddaten erfolgt mit Hilfe der Bildanalysesoftware SigmaScan Pro 5.0[©], SPSS. Die Bilder können hier in verschiedenen Pixelformaten eingelesen und bearbeitet werden. Zahlreiche vorgefertigte Funktionen wie Filter oder Messfunktionen helfen bei der Bildbearbeitung und -auswertung. Zusätzlich ist die Realisierung eigener Funktionen sowie die Automatisierung wiederkehrender Abläufe über eine BASIC-basierte Macrofunktion möglich.

5.2 Implementierung der Messtechnik

5.2.1 Geschwindigkeitsmessung

Zur Geschwindigkeitsmessung wird die Strömung mit einer JAI M40 CCD-Kamera beobachtet. Damit können bis zu 60 Vollbilder pro Sekunde bei einer Auflösung von 640x480 Pixel aufgenommen werden. Die Belichtungszeit kann in mehreren Stufen von $1/12.000s$ bis zu $1/60s$ eingestellt werden. Vor die Kamera ist ein SIGMA-Makroobjektiv mit einer Brennweite von $50mm$ geschaltet, um die überströmte Platte formatfüllend auf dem CCD-Chip der Kamera abzubilden. Die Beleuchtung der Tracer erfolgt über ein ELMED-Stroboskop, das eine maximale Blitzfrequenz von $800Hz$ ermöglicht. Für die hier vorgestellten Strömungsmessungen wird die Blitzfrequenz auf $250Hz$ eingestellt. Nimmt die Kamera dazu Bilder mit einer Belichtungszeit von $1/125s$ auf, so werden mit jeder Aufnahme zwei Lichtblitze mit einem zeitlichen Abstand von $0,004s$ zueinander aufgenommen. Das bedeutet, die Strömung und darin befindliche Tracer werden doppelbelichtet.



Abbildung 5.3: Partikel (gestrichelte Markierung) und Wellen (durchgezogene Markierung) als Tracer für die Oberflächengeschwindigkeit.

Als Tracer kommen bei der Wasserfilmströmung Partikel vom Typ ISOSPHERES SG-300B, Omega Minerals GmbH, zur Anwendung. Hierbei handelt es sich um Keramikpartikel, die einen mittleren Durchmesser von $100\mu m$ und eine Massendichte von etwa $700kg/m^3$ besitzen. Aufgrund des Dichteunterschieds zu Wasser schwimmen die Partikel auf und folgen der Wasserströmung an der Oberfläche mit u_s . Werden diese Partikel angeleuchtet, wird an der Partikeloberfläche das Licht gestreut und von der Kamera aufgenommen. Zusätzlich treten bei der Flüssigkeitsförderung mit einer Schlauchpumpe Druckstöße auf, die zur Wellenbildung

auf dem Film führen und ebenfalls als Tracer dienen. Die Wellenfronten wirken hier wie ein Spiegel und lenken das Licht des Stroboskops auf den Kamerachip um. Reisst der Film auf, finden sich diese Wellen auch auf der Rinnsalströmung und können hier neben den Partikeln zur Geschwindigkeitsmessung der Rinnsaloberfläche herangezogen werden. Lösen sich im weiteren Verlauf vom Rinnsal Tropfen ab, so können auch die voranschreitenden Tropfenfronten als Tracer eingesetzt werden. In Abb. 5.3 werden beispielhaft die Doppelbelichtungen von ISOSPHERES-Partikeln und Wellen auf einer Wasserströmung gezeigt.

Die Bildaufnahme erfolgt mit der Software VisiLab 2.2 ©, Graphikon GmbH, als Bildserie von 120 aufeinander folgenden Bitmap-Bildern. Diese Bilder werden anschließend in SigmaScan geöffnet und kalibriert. Dazu wird eine Strecke mit bekanntem Abstand im Bild markiert und der dazugehörige Abstand in *mm* eingegeben. SigmaScan errechnet daraus automatisch Umrechnungsfaktoren für die Pixelkoordinaten in x- und y-Richtung in Längenkoordinaten. Für die Geschwindigkeitsmessung müssen als Nächstes die Abbildungspaare der Tracer identifiziert und der Abstand zwischen beiden Abbildungen gemessen werden. In den hier vorgestellten Messungen findet die Identifizierung und die Abstandsmessung manuell statt, d.h. der Messende beurteilt, welche Tracerabbildungen zusammengehören, und markiert auf dem Bild diese beiden Abbildungen. SigmaScan ermittelt dann automatisch den Abstand zwischen beiden Markierungen und speichert den Abstand in einem MS-Excel®-Datenblatt, in dem die Korrelation der Messdaten mit der Stroboskopfrequenz und die abschließende Auswertung erfolgt.

5.2.2 Dickenmessung

Für die einphasigen Dickenmessungen wird der Fluoreszenzfarbstoff Rhodamin B eingesetzt. Dieser lässt sich leicht in den verwendeten Lösungsmitteln Wasser und Toluol lösen und zeigt ein nahezu Lösungsmittel unabhängiges Fluoreszenzverhalten. Das Absorptionsmaximum von Rhodamin B liegt bei $\lambda_{ex} = 545nm$, was genau einer Spektrallinie von Quecksilber entspricht (Küster, 1985). Werden die Farbstofflösungen bei dieser Wellenlänge angeregt und spektrometrisch vermessen, ergeben sich die in Abb. 5.4 aufgetragenen Fluoreszenzspektren für die Rhodamin B/Toluol- und Rhodamin B/Wasserlösung.

Für die weitere Betrachtung der Farbstofflösungen ist das Fluoreszenzmaximum eines Spektrums von besonderem Interesse, da bei dieser Wellenlänge λ_{em} die größte Intensität des Farbstoffs gemessen wird. Diese Wellenlänge muss aus dem gesamten vorhandenen Lichtspektrum herausgefiltert werden, damit ausschließlich das Fluoreszenzlicht von der Kamera detektiert wird und keine Überlagerung des Messsignals z.B. mit dem Anregungslicht stattfindet. Um die Intensität von Rhodamin B zu messen, wird hier ein 600nm Langpassfilter vor die Kamera geschaltet. Dieser weist einen genügend großen Abstand zur Anregungswellenlänge auf und lässt ausreichend viel Fluoreszenzlicht passieren.

Zur Anregung wird eine 150W Quecksilber-Xenon-Lampe der Firma Hamamatsu Photo-

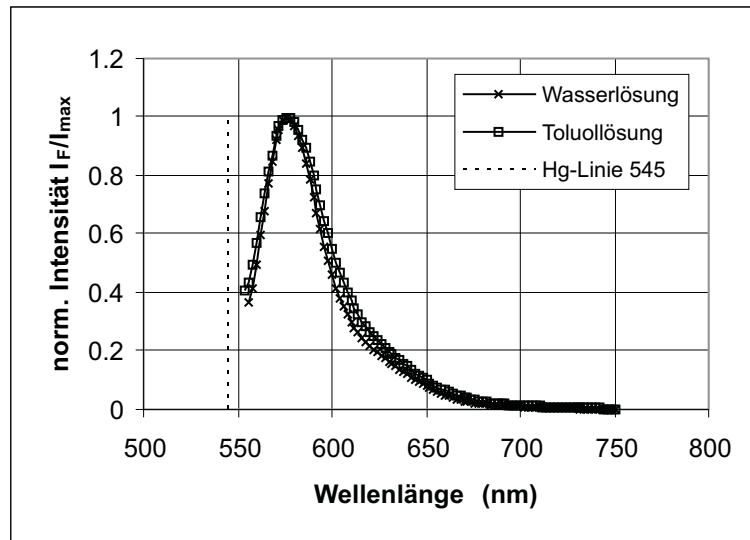


Abbildung 5.4: Gemessene Fluoreszenzspektren von Rhodamin B, gelöst in Wasser und Toluol. Anregung bei Quecksilberlinie 545.

nics Deutschland GmbH verwendet. Solche Lampen zeigen neben dem kontinuierlichen Xenon-Spektrum von Ultraviolett bis Infrarot auch das ausgeprägte Linienspektrum von Quecksilber. Aus diesem breiten Lichtangebot muss nun die Anregungswellenlänge für den Farbstoff herausgefiltert werden. Dazu wird ein 545nm Bandpassfilter mit einer Bandbreite von 10nm und einer hohen Transmission eingesetzt. Zusammen mit dem Emissionsfilter ergibt sich so ein Filtersatz, der kaum Überschneidungen von Anregungslicht und detektiertem Licht aufweist.

Von zentraler Bedeutung für die Fluoreszenzmessung ist die Kalibration der Fluoreszenzintensität sowie die Umrechnung in eine Dickenangabe. Für die Fluoreszenzkalibration werden in der Literatur viele unterschiedliche Verfahren angewandt. [Al-Sibai \(2004\)](#) und [Schagen und Modigell \(2005\)](#) kalibrieren ihre Messungen vorher bzw. nachher mit Hilfe einer mit Farbstofflösung gefüllten Petri-Schale, deren variierender Füllstand durch Wiegen ermittelt wird. Um eine Abhängigkeit der Intensität von der Fluiddicke zu erhalten, sind auf diese Weise mehrere Messvorgänge nötig. [Adomeit und Renz \(2000\)](#) verwenden hingegen eine mit Farbstofflösung gefüllte Keilküvette, die einen definierten Anstieg der Fluiddicke über eine gewisse Länge aufweist. So liefert bereits ein Bild der fluoreszierenden Keilküvette die Intensitäten für viele verschiedene Fluidicken. Dieses Prinzip wurde für die hier vorgestellten Untersuchungen übernommen und angepasst. In Zusammenarbeit mit der Firma Hellma GmbH & Co. KG wurde eine Durchfluss-Keilküvette entwickelt, die über eine Länge von 40mm einen linearen Fluidickenanstieg von 0,2mm auf 1,5mm aufweist. Zusätzlich befinden sich an den äußeren Enden Zu- und Ablaufstutzen, die zum einen ein leichtes Befüllen und Entleeren der Küvette ermöglichen, zum anderen auch die Möglichkeit bieten, die Küvette im Durchflussbetrieb zu nutzen und so z.B. zeitliche Änderungen des Farbstoffs wie das Ausbleichen (Photobleaching) zu erfassen. Die Küvette wird direkt neben der überströmten Platte installiert, sodass zu

jedem aufgenommenen Strömungsbild die Fluoreszenzkalibration verfügbar ist.

Da die Fluoreszenz in der Regel sehr lichtschwach ist, wird zur Detektion eine Kamera mit großer Quantenausbeute benötigt. Hier wird dazu die sehr lichtempfindliche Mintron 12V1EX-Kamera eingesetzt, die sonst vornehmlich im Bereich der Astronomie für die Aufnahme von Sternbildern Verwendung findet. Die Kamera liefert ein analoges S-VHS-Videosignal mit 50 Halbbildern pro Sekunde. Die Videoinformationen werden über einen Framegrabber in digitaler Form auf den Rechner übertragen und mit der Freeware VirtualDub als AVI-Film aufgezeichnet. Anschließend werden aus der AVI-Datei die einzelnen Videoframes extrahiert unter Anwendung eines Deinterlacing-Filters (Umwandlung von Halbbildern in Vollbilder).

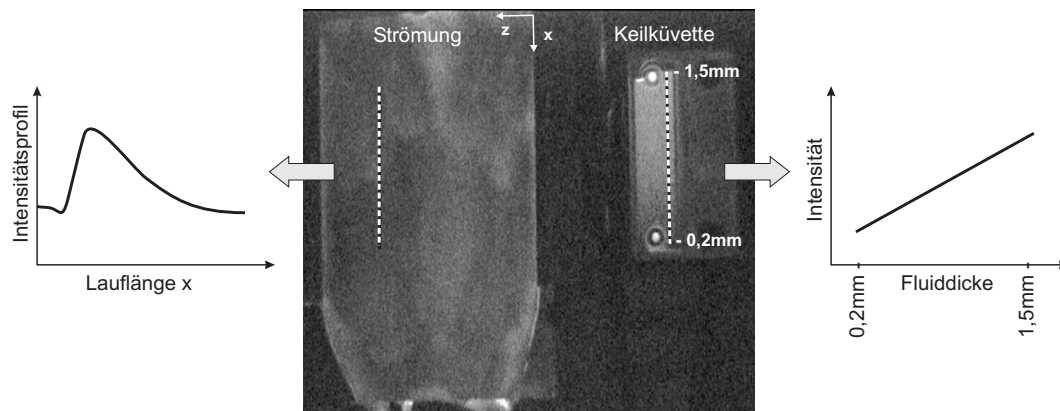


Abbildung 5.5: Prinzip der Fluidickenmessung mit Hilfe von Fluoreszenzintensitätsmessungen und Intensitätskalibration.

Die Auswertung dieser Bildserie erfolgt wieder im Programm SigmaScan und umfasst eine Hintergrundkorrektur, die Intensitätskalibration sowie die Messung charakteristischer Strömungsbereiche auf der Platte. Die Hintergrundkorrektur ist notwendig, um bei der Aufnahme erzeugtes Rauschen herausfiltern zu können. Im Mittel macht dieses Rauschen etwa 20 Intensitätspunkte, also bei einer Grauwertskala von 0 bis 255 Punkten fast 10% aus. Die weiteren Messungen im Bild erfolgen durch Auslesen der Pixelintensität entlang einer Linie. Dafür werden Start- und Endpunkt einer Geraden markiert, die durch den interessierenden Bereich verläuft. SigmaScan ermittelt alle Pixelintensitäten entlang dieser Linie und speichert sie wiederum in einem MS-Excel®-Tabellenblatt ab. Zur Aufnahme der Kalibration wird z.B. eine Linie, beginnend am unteren Rand der Küvette bei $0,2\text{mm}$ Dicke, bis zum oberen Rand der Küvette bei $1,5\text{mm}$ gezogen, sodass die Intensität entlang der linear ansteigenden Fluidicke ausgelesen wird. Ebenso erfolgt die Messung einzelner Dicken- bzw. Intensitätsprofile im Strömungsbild. Die prinzipielle Vorgehensweise ist in Abb. 5.5 skizziert.

5.3 Plattenbenetzung

Wie schon in Abschnitt 2.2 beschrieben wurde, ist aus wirtschaftlicher Sicht immer eine vollständige Benetzung der zur Verfügung gestellten Plattenfläche durch die Flüssigkeit anzustreben. Allerdings kommt es unter ungünstigen Bedingungen immer wieder dazu, dass Filmströmungen aufreißen und der angestrebte Betriebszustand nicht erreicht wird. Die nachfolgenden Untersuchungen zeigen mit Hilfe von Parameterstudien auf, wie sich die eingesetzten reinen Flüssigkeiten im Experiment verhalten. Außerdem werden erste Vergleiche mit entsprechenden CFD-Simulationen durchgeführt.

Die Messungen erfolgen anhand der PTV- bzw. LIF-Aufnahmen und werden ebenfalls in SigmaScan durchgeführt. Nach der bereits beschriebenen Kalibration der räumlichen Koordinaten wird die Kontur der Strömung auf dem Bild mit Hilfe der in SigmaScan implementierten Trace-Funktion nachverfolgt (vgl. dazu Abb. 4.2). Anschließend berechnet SigmaScan automatisch die zwischen den Konturlinien eingeschlossene Fläche. Gemeinsam mit der bekannten, zur Verfügung stehenden Plattenfläche kann nach Glg. 4.1 daraus die spezifische Schattenfläche a_P berechnet werden.

Aus Abschnitt 2.2 ist bereits bekannt, dass für jede Fluid-Platten-Kombination eine kritische Flüssigkeitsbelastung existiert, bei deren Unterschreitung es zum Aufreißen der Strömung kommt. Somit wird als erster wichtiger Parameter der Volumenstrom bzw. die Re-Zahl variiert, um die kritische Belastung von Wasser auf der um 60° geneigten Stahlplatte zu ermitteln. Da Toluol auf Stahl vollbenetzende Eigenschaften besitzt und somit immer ein $a_P = 1$ aufweist, ist die Untersuchung dieser Fluid-Platten-Kombination nicht sinnvoll.

Die bei unterschiedlichen Re-Zahlen gemessenen Schattenflächen der Wasserströmung sind für die zwei Aufgabevarianten mit Überlaufwehr bzw. Aufgaberohr in Abb. 5.6 aufgetragen. Man erkennt zunächst, dass beide Aufgabevarianten zu gleichen Plattenbenetzungen bei ähnlichen Flüssigkeitsbelastungen führen. Dementsprechend zeigen auch beide Messungen gleichwertige kritische Belastungsgrenzen im Bereich von $Re_{krit} \approx 180$.

Zusätzlich sind in Abb. 5.6 die simulierten Schattenflächen einer Wasserströmung bei abgesenkter Flüssigkeitsbelastung und unterschiedlichen Kontaktwinkeln dargestellt (Hoffmann et al., 2004). Wie schon aus Gleichung 2.11 hervorging, besitzt der Kontaktwinkel einen signifikanten Einfluss auf die kritische Belastung. Als Kontaktwinkel für die Simulation wurde zunächst ein Winkel von 80° eingestellt, da dieser Wert häufig in der Literatur (z.B. bei Stein (1999)) für Wasser auf einer ideal glatten Stahlplatte zu finden ist. Wie in Abb. 5.6 jedoch zu erkennen ist, bildet die so simulierte Schattenfläche die Realität nicht genau genug ab und führt, verglichen mit dem Experiment, zu einer größeren kritischen Belastung. Da in der Messung ein gewalztes Stahlblech verwendet wird, ist hier aufgrund der Oberflächenrauigkeit mit einem kleineren Kontaktwinkel für die Wasserphase, also einer besseren Benetzung zu rechnen. Dementsprechend ergibt die Simulation bei $\theta = 70^\circ$ eine sehr viel bessere Vorhersage der Schattenfläche sowie der kritischen Flüssigkeitsbelastung. Diese wird in den Simulationen

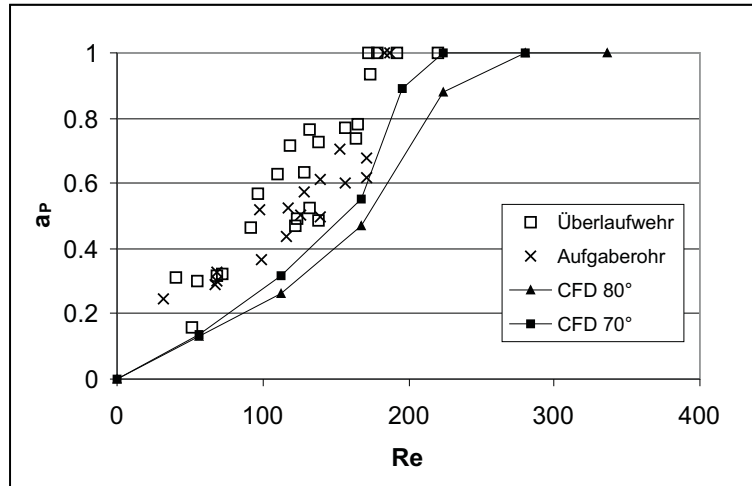


Abbildung 5.6: Schattenfläche als Funktion der Re -Zahl. Messungen bei Flüssigkeitsaufgabe mittels Überlaufwehr bzw. Aufgaberohr, Simulationen bei Kontaktwinkel $\theta = 80^\circ$ und 70° .

etwa mit $Re_{krit} = 200$ bestimmt und liegt damit sehr dicht sowohl an den gemessenen Werten, als auch an dem aus Glg. 2.11 errechneten Wert von $Re_{krit} = 195,1$.

Um den Einfluss der Plattenrauigkeit bzw. des Kontaktwinkels näher zu untersuchen, werden weitere Messungen mit verschiedenen Platten unterschiedlicher Rauigkeit durchgeführt. Es werden das zuvor schon verwendete gewalzte Stahlblech (im Folgenden Platte 2 genannt), ein gewalztes und nachträglich poliertes Stahlblech (Platte 1), sowie ein ab Werk poliertes und von Hand nachpoliertes Stahlblech (Platte 3) getestet. Um die Abhängigkeit des Kontaktwinkels testen zu können, muss dieser für alle drei Platten zunächst gemessen werden. Dazu werden mehrere Tropfen der zu untersuchenden Flüssigkeit auf der jeweiligen Platte abgesetzt und über eine starke Vergrößerungsoptik die Tropfenkontur analysiert und der Randwinkel bestimmt. Die beim Stranski-Laboratorium für Physikalische und Theoretische Chemie an der TU Berlin gemessenen mittleren Kontaktwinkel sowie die gemessene Streuung sind für jede Platte in Tab. 5.1 aufgeführt. Zusätzlich wurde am Stranski-Laboratorium mit Hilfe einer Atomic Force Microscopy (AFM)-Apparatur die Oberflächenrauigkeit an zwei Proben von Platte 3 vermessen. Dabei wurde eine maximale Auslenkung von 200nm auf einer $10 \times 10\mu\text{m}^2$ großen Fläche sowie eine mittlere Rauigkeit von 30nm bestimmt, was einer ideal glatten Platte sehr nahe kommt.

Wie Tab. 5.1 zeigt, sinkt der Kontaktwinkel erwartungsgemäß mit Zunahme der Oberflächenrauigkeit, sodass im Experiment die größte Plattenbenetzung bei gleichbleibender Flüssigkeitsbelastung mit Platte 2 zu erwarten ist. Die Messung der Schattenflächen auf den jeweiligen Platten bestätigt auch diese Annahmen. Während bei Platte 2 mit einem Neigungswinkel von 60° die kritischen Flüssigkeitsbelastungen im Bereich von $Re = 150 - 200$ liegen, reißt der Wasserfilm auf Platte 1 bereits bei höheren Belastungen um $Re = 310 - 320$ auf. Überraschenderweise ließ sich auf Platte 3, obwohl diese den größeren Kontaktwinkel aufweist und

Tabelle 5.1: Mittlere statische Kontaktwinkel und deren Standardabweichung, gemessen für unterschiedliche Plattenrauigkeiten.

	Platten-Nr.	θ	$s(\theta)$
poliert	Platte 1	67.4°	5.7°
gewalzt	Platte 2	63.6°	8.7°
doppelt poliert	Platte 3	69.9°	6.5°

Tabelle 5.2: Bereiche gemessener kritischer Flüssigkeitsbelastungen Re_{krit} für die untersuchten Platten.

Platten-Nr.	$Re_{krit}(\alpha = 45^\circ)$	$Re_{krit}(\alpha = 60^\circ)$
Platte 1	160-240	310-320
Platte 2	120-160	150-200
Platte 3	150-250	250-330

eigentlich schlechter benetzbar sein sollte als Platte 1, zeitweise auch bei niedrigeren Belastungen um $Re = 250$ noch eine stabile Filmströmung aufbauen. In anderen Fällen riss die Strömung auf Platte 3 aber auch schon bei $Re = 330$ auf. Hier konnte zudem beobachtet werden, dass die Strömung besonders auf der polierten Platte 3 sehr instabil verläuft (daher auch der große Variationsbereich der kritischen Re -Zahl). Insbesondere Rinnsale folgen keinem stationären Verlauf, sondern ändern stetig ihre Fließrichtung. Die Strömung auf Platte 1 und 2 dagegen verläuft sehr viel stabiler, was auf das Vorhandensein makroskopischer Unebenheiten - in diesem Fall tiefe Kratzer auf der Oberfläche parallel zur Strömungsrichtung, verursacht durch den Walzprozess bei der Herstellung des Bleches, die auch durch Polieren von Platte 1 nicht entfernt wurden - zurückzuführen ist.

Bei Messungen der Schattenflächen auf den um 45° geneigten Platten 1-3 verschieben sich die Wertebereiche der kritischen Belastung zu kleineren Werten, was ebenfalls den Erwartungen entspricht, da nun die treibende Gravitationskraft vermindert ist. Der geschlossene Film auf Platte 2 reißt nun erst bei Belastungen um $Re = 120 - 160$ auf, und auch bei Platte 1 mit $Re = 160 - 240$ und Platte 3 mit $Re = 150 - 250$ liegen die Werte für die kritische Belastung deutlich niedriger. Eine Übersicht über die erhaltenen Messwerte ist in Tab. 5.2 zusammengestellt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Benetzung einer Oberfläche sehr stark von der Plattenmaterial-Fluid-Kombination und dem dazugehörigen Kontaktwinkel abhängt. Unebenheiten auf der Stahlplatte führen im untersuchten Fall der Wasserströmung zu einer Verkleinerung des Kontaktwinkels und stabilisieren damit die Strömung. Außerdem führt eine geringere Plattenneigung durch die Verringerung der angreifenden Gravitationskräfte zu

einem besseren Benetzungsverhalten.

5.4 Oberflächengeschwindigkeiten

Da zur Bestimmung der Oberflächengeschwindigkeit verschiedenartige Tracer eingesetzt und verfolgt werden, muss zunächst überprüft werden, ob diese auch alle die gleiche Geschwindigkeit besitzen. Nur so kann gewährleistet werden, dass jeder detektierte Tracer auch genau die Oberflächengeschwindigkeit der Strömung repräsentiert. Zuerst wird eine Wasserfilmströmung, die die gesamte Platte benetzt ($Re \approx 190$), vermessen. Als Tracer kommen die oben beschriebenen ISOSPHERES-Partikel sowie Wellen an der Oberfläche zum Einsatz, die auf der gesamten überströmten Plattenfläche detektiert werden. Auf die um 60° geneigte Platte 2 wird die partikelbeladene Flüssigkeit mittels Überlaufwehr bzw. über das Aufgaberohr aufgebracht. Die einzelnen gemessenen Tracergeschwindigkeiten sind beispielhaft für die Flüssigkeitsaufgabe mit Aufgaberohr in Abb. 5.7 aufgetragen.

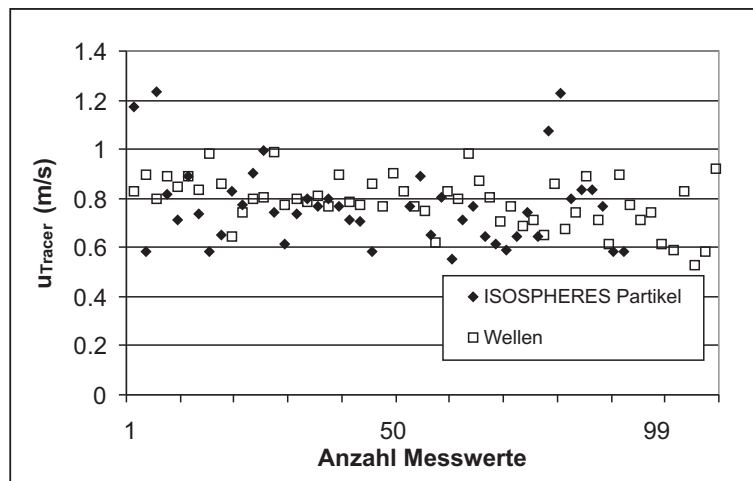


Abbildung 5.7: Gemessene Tracergeschwindigkeiten einer Wasserströmung bei $Re \approx 190$ und $\alpha = 60^\circ$, Aufgabe mittels Aufgaberohr.

Die Ergebnisse dieser Vergleichsmessung sind in Tab. 5.3 als über die gesamte Platte sowie über etwa 50 Tracer (Partikel oder Wellen) gemittelte Oberflächengeschwindigkeit dargestellt. Aus den Werten $\bar{u}_s$ erkennt man, dass sich die Tracer für eine Aufgabeart mit nahezu gleicher Oberflächengeschwindigkeit bewegen. Die minimalen Abweichungen zwischen Partikel- und Wellengeschwindigkeit sind im Vergleich zur Messwertstreuung so gering, dass für die kommenden Oberflächengeschwindigkeitsmessungen der Wasserströmung beide Tracerarten verwendet werden können.

Ein signifikanter Unterschied zwischen den Geschwindigkeiten findet sich in Tab. 5.3 allerdings zwischen den beiden Aufgabevarianten. Während bei Verwendung des Überlaufwehres Geschwindigkeiten um $0,55 \text{ m/s}$ gemessen werden, liegen die Geschwindigkeiten mit Aufga-

Tabelle 5.3: Vergleich der Tracergeschwindigkeiten auf einem Wasserfilm bei unterschiedlicher Aufgabe.

Tracerart	Aufgaberohr		Überlaufwehr		Nusselt-Film $u_s(m/s)$
	$\bar{u}_s$ m/s	$s(u_s)$ m/s	$\bar{u}_s$ m/s	$s(u_s)$ m/s	
ISOSPHERES	0,77	0,17	0,55	0,13	0,67
Wellenfronten	0,78	0,10	0,57	0,13	

berohr deutlich höher. Dieser Geschwindigkeitsunterschied kann durch die unterschiedlichen Austrittsflächen erklärt werden: Während beim Wehr die Flüssigkeitsaufgabe in voller Plattenbreite erfolgen kann, muss bei gleichem Volumenstrom die gleiche Flüssigkeitsmenge pro Zeiteinheit durch die 8 Bohrungen im Rohr gefördert werden. Die Flüssigkeit verlässt dabei mit höherem Druck das Rohr und trifft mit einer größeren Anfangsgeschwindigkeit auf die Platte. Für die Experimente ist diese höhere Anfangsgeschwindigkeit nicht weiter problematisch, im Gegenteil führt diese Initialgeschwindigkeit eher zu einer geringeren Messwertstreuung $s(u_s)$, was auch aus Abb. 5.6 hervorgeht. Insgesamt weisen die Streuungen der Messwerte aber in allen vier Werten ähnliche Größenordnungen auf. Dies deutet auf vergleichbare Verteilungen der Oberflächengeschwindigkeit sowohl für die beiden Aufgabevarianten als auch für die beiden Tracerarten hin, was positiv gewertet wird.

Zusätzlich findet sich in Tab. 5.3 die bei $Re = 190$ berechnete Oberflächengeschwindigkeit nach Nusselt (vgl. Glg. 2.3). Diese errechnete Geschwindigkeit liegt genau zwischen den gemessenen Oberflächengeschwindigkeiten mit Aufgaberohr bzw. Überlaufwehr. Dies bestärkt zum einen die Annahme, dass die Aufgabe mit dem Aufgaberohr zu einer größeren Anfangsgeschwindigkeit als beim Überlaufwehr, was eher vergleichbar ist mit der von Nusselt angenommenen Strömung, führt. Zum anderen zeigt dieser theoretische Geschwindigkeitswert aber auch, dass wellige Filmströmungen bei solchen Belastungen offenbar nicht mehr gut genug mit solchen einfachen Relationen beschrieben werden können (vgl. hierzu auch Adomeit und Renz (2000)).

Werden ISOSPHERES-Partikel in eine Toluolströmung gegeben, so zeigt sich, dass die Partikel stark hydrophil sind. In Abb. 5.8 ist die an Wellenfronten gemessene Oberflächengeschwindigkeit eines Toluolfilms auf der um 60° geneigten Platte 2 für verschiedene Re-Zahlen aufgetragen. Zusätzlich sind die gemessenen Geschwindigkeiten zugegebener ISOSPHERES-Partikel angegeben. Man erkennt zum einen deutlich, dass die Partikel sich mit einer sehr viel größeren Geschwindigkeit als die Toluolwellen bewegen. Da zudem der Film mit zunehmender Flüssigkeitsbelastung dicker wird, steigt auch die Oberflächengeschwindigkeit an. Diesem Trend folgen auch die Partikel, sodass davon ausgegangen werden kann, dass sich die Partikel an der freien Oberfläche der Toluolströmung befinden. Die Partikel werden von der hydropho-

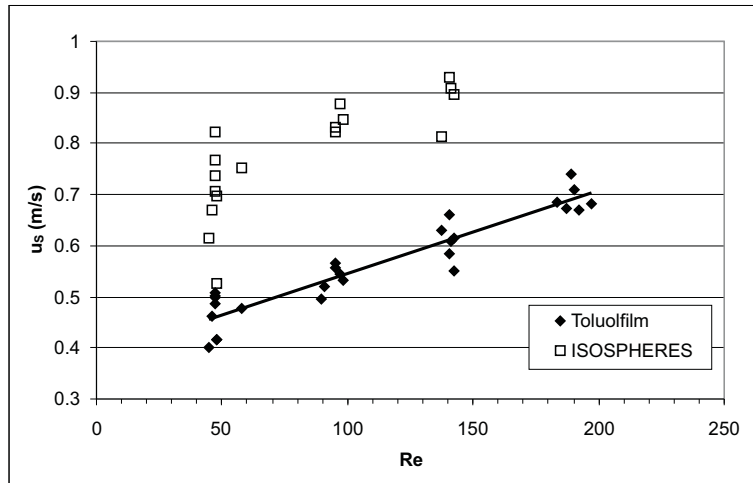


Abbildung 5.8: Partikelgeschwindigkeiten im Vergleich zur Oberflächengeschwindigkeit eines Toluolfilms bei unterschiedlichen Flüssigkeitsbelastungen.

ben Phase abgestoßen und rollen fast unbeeinflusst auf der bewegten Flüssigkeitsoberfläche des Toluolfilms ab. Die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Toluoloberfläche und Partikeln entspricht ungefähr der Geschwindigkeit, mit der sich die Partikel auf einer trockenen Platte 2 herabbewegen, was in separaten Messungen überprüft wurde.

Demzufolge können zur Bestimmung der Toluolgeschwindigkeit also nur Toluolwellen verwendet werden. Da dies jedoch für die zukünftigen Messungen ausreichend ist, wird auf die Verwendung anderer hydrophober Tracer im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

5.4.1 Veränderung bei Filmaufreißen

Wie die Toluolströmung weist auch der geschlossene Wasserfilm eine Abhängigkeit von der Re-Zahl auf, die in Abb. 5.9 (◇ „geschloss. Film“) für die Aufgabe mit Aufgaberohr dargestellt ist. Diese Abhängigkeit lässt sich nach Glg. 2.3 und Glg. 2.4 durch $u_s \sim Re^{2/3}$ ausdrücken. Wie Abb. 5.9 zeigt, ist diese Steigung vergleichbar mit der Nusselt-Lösung.

Reißt die Wasserströmung jedoch auf der geneigten Stahlplatte auf, wie es in Abb. 5.9 sowohl für die Aufgabe mit Aufgaberohr (Datenpunkte „Aufgaberohr“) als auch mit Überlaufwehr (Datenpunkte „Überlaufwehr“) gezeigt ist, kommt eine zusätzliche Abhängigkeit der Oberflächengeschwindigkeit u_s von der spezifischen Schattenfläche a_P hinzu. In Abb. 5.10 ist die gemessene mittlere Oberflächengeschwindigkeit über die gemessene Schattenfläche für die beiden Aufgabevarianten mit Aufgaberohr und Überlaufwehr aufgetragen. Wie schon in Tab. 5.3 gezeigt wurde, werden durch die Aufgabe mit Aufgaberohr höhere Geschwindigkeiten erzielt als mit dem Überlaufwehr. Beide Geschwindigkeitsverläufe zeigen in Abb. 5.10 allerdings, dass nach dem Aufreißen ($a_P < 1$) die Geschwindigkeit zunächst konstant auf dem Wert von $a_P = 1$ bleibt und erst ab einer spezifischen Schattenfläche von $a_P \leq 0,5$ im Mittel signifikant abnimmt.

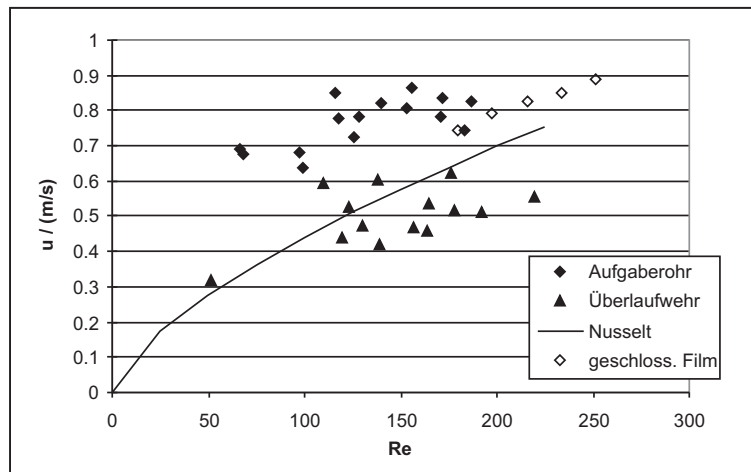


Abbildung 5.9: Oberflächen­geschwindigkeit u_s einer Wasserströmung in Abhängigkeit der Re-Zahl. u_s ist über etwa 100 Tracer sowie den Ort gemittelt.

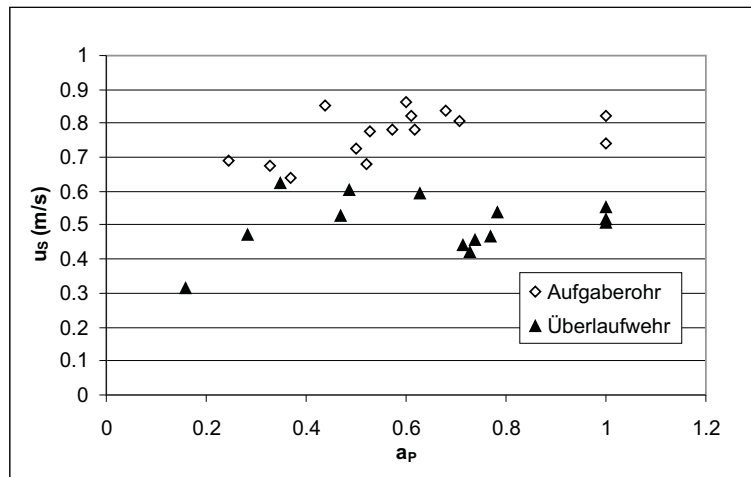


Abbildung 5.10: Oberflächen­geschwindigkeit als Funktion der Schattenfläche.

Um den Einfluss der Schattenfläche auf die Geschwindigkeit zu berücksichtigen, kann das Produkt aus Oberflächen­geschwindigkeit und Schattenfläche $u_s \cdot a_P$ gebildet und als Funktion der Re-Zahl aufgetragen werden. Dies ist in Abb. 5.11 für die Aufgabe mit Aufgaberohr bzw. Überlaufwehr dargestellt. Zusätzlich werden eigene Messergebnisse für die Oberflächen­geschwindigkeit einer geschlossenen Filmströmung bei $a_P = 1$ und Aufgabe mit Aufgaberohr sowie die nach Glg. 2.3 berechneten Oberflächen­geschwindigkeiten einer geschlossenen Filmströmung (Nusselt-Film) gezeigt.

Man erkennt, dass das Produkt $u_s \cdot a_P$ im Fall der aufgerissenen Strömung sowohl bei Aufgabe durch Überlaufwehr als auch mit Aufgaberohr durch eine exponentielle Ausgleichskurve beschrieben werden kann. Dieser exponentielle Verlauf kann bis zum Erreichen der geschlossenen Filmströmung bei $a_P = 1$ angenommen werden. Ab diesem Punkt geht die

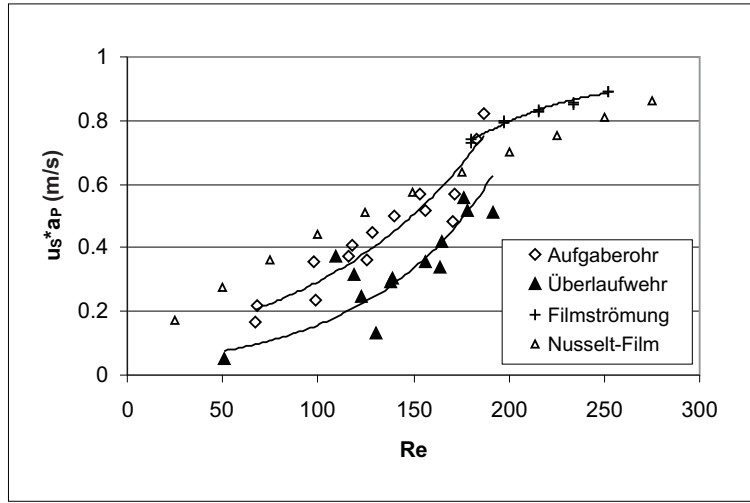


Abbildung 5.11: Oberflächengeschwindigkeit $\times$ Schattenfläche als Funktion der Re-Zahl.

Oberflächengeschwindigkeit dann in eine flacher ansteigende, proportional zu $Re^{2/3}$ verlaufende Kurve über, wie es in Abb. 5.11 für die Aufgabevariante mit Aufgaberohr zu sehen ist. Diese Abhängigkeit zu $Re^{2/3}$ ist ebenfalls in der Berechnung der Oberflächengeschwindigkeit nach Nusselt (vgl. Glg. 2.3 und 2.4) zu finden.

Wird das Produkt $u_s \cdot a$ zusätzlich auf die kritische Oberflächengeschwindigkeit u_{krit} an der Stelle $Re = Re_{krit}$ bezogen und über Re aufgetragen, so lässt sich mit Bildung einer Ausgleichsfunktion in MS-Excel® (vergleichbar mit den Kurven in Abb. 5.11) eine Beziehung erstellen, aus der die kritische Re-Zahl bei $u_s = u_{krit}$ und $a_P = 1$ direkt abgelesen werden kann (hier beispielhaft angegeben für die Variante mit Aufgaberohr):

$$Re = 191,1 + 92,6 \cdot \ln \left(\frac{u_s \cdot a_P}{u_{krit}} \right) \quad \text{mit } Re_{krit} = 191,1 \quad (5.1)$$

Anhand dieser Beziehungen können die CFD-Simulationen sehr leicht mit den experimentellen Daten verglichen und validiert werden. Ein erster Vergleich mit den Simulationsergebnissen zeigt ebenfalls einen exponentiellen Verlauf für $u_s \cdot a_P$ bei $a_P < 1$, wobei die simulierten Werte dichter an den Geschwindigkeiten mit Überlaufwehraufgabe lagen (Ausner et al., 2004).

Die bisher dargestellten Oberflächengeschwindigkeiten wurden durch Mittelung über die gesamte überströmte Plattenfläche bestimmt. Da aber besonders im Fall der Rinnsal- und Tropfenströmung eine Beschleunigung der Strömung entlang der Plattenlänge in Strömungsrichtung stattfindet, werden zusätzlich die Verläufe der Oberflächengeschwindigkeiten entlang der Lauflänge untersucht. Für die Messung wird dazu die Platte in sieben äquidistante Regionen entlang der Laufrichtung eingeteilt, wobei die letzten 15mm der Platte vernachlässigt werden, da es hier zur Aufstauung der Flüssigkeit und dadurch zu Abbremsungseffekten kommt. In diesen Regionen werden jeweils Oberflächengeschwindigkeiten gemessen und anschließend gemittelt. Diese gemittelten Oberflächengeschwindigkeiten sind in Abb. 5.12 für den Fall der

Aufgabe mit Überlaufwehr bei einer spezifischen Schattenfläche von $a_P = 0,37$ dargestellt. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung der Messwerte in jeder Region an.

Zusätzlich ist in Abb. 5.12 der simulierte Geschwindigkeitsverlauf eines Rinnals entlang der Lauflänge x in zwei Varianten (*avg.* und *max.*) aufgetragen (Hoffmann et al., 2004). Die simulierte Strömung wird ebenfalls in äquidistante Regionen entlang der Laufrichtung eingeteilt und für jede Region separat ausgewertet. Die Oberflächengeschwindigkeit für jede Region wird einerseits über eine lokale Mittelung aller Geschwindigkeiten an der Phasengrenzfläche bestimmt (*avg.*), andererseits über die Bestimmung der lokalen maximalen Oberflächengeschwindigkeit (*max.*).

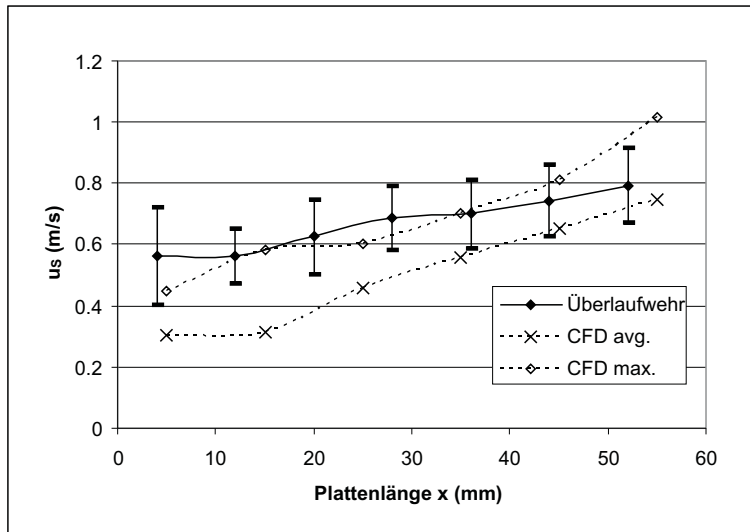


Abbildung 5.12: Oberflächengeschwindigkeit eines Rinnals entlang der Strömungsrichtung bei $a_P = 0,37$. Vergleich zwischen zwei Simulationsauswertungen (CFD-*avg.* bzw. -*max.*) und dem Experiment (Überlaufwehr).

In Abb. 5.12 erkennt man zunächst, dass die simulierten Mittelwerte *avg.* kleiner als die gemessenen Werte sind. Dagegen stimmen die Werte des maximalen Geschwindigkeitsverlaufs *max.* sehr gut mit den gemessenen Werten überein. Das ist dadurch begründet, dass durch die lokale Mittelung aller Geschwindigkeiten auf der Phasengrenzfläche auch kleinere Geschwindigkeiten, die sich am Rinnсалrand und in Plattennähe ausbilden, zur Berechnung des Mittelwerts *avg.* verwendet werden, und dadurch ein kleinerer Wert gebildet wird. Die Werte der lokalen Maximalgeschwindigkeiten *max.* werden zumeist an Punkten mit der größten Rinnсалdicke aufgenommen und entsprechen damit besser dem Verhalten der Tracer in der PTV-Messung.

Der Vergleich der in Abb. 5.12 dargestellten Trends der simulierten Geschwindigkeitsverläufe mit dem gemessenen Trend zeigt, dass der simulierte Verlauf der lokalen Mittelwerte *avg.* durch die gemessenen Oberflächengeschwindigkeiten bestätigt wird. Beide Geschwindigkeitsverläufe weisen in den ersten zwei Regionen keine signifikante Geschwindigkeitsänderung auf

und steigen ab der dritten Region stetig an. Ein Vergleich mit den Bilddaten zeigt, dass innerhalb dieser ersten beiden Regionen noch ein geschlossener Film vorliegt und es erst innerhalb der dritten Region zum Aufreißen der Strömung kommt. Da sich die lokale Strömungsrichtung an dieser Stelle deutlich ändert und sich die Strömung neu formieren muss, kommt es hier deshalb auch zu einer Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit, was sich im lokalen Mittel als konstante Oberflächengeschwindigkeit auswirkt. Im weiteren Verlauf der Plattenlänge beschleunigt das ausgebildete Rinnsal stetig bis zum Ende der Platte.

Der Trend der lokalen Maximalgeschwindigkeiten aus der Simulation *max.* zeigt dagegen deutliche Abweichungen vom gemessenen Geschwindigkeitsverlauf. Dies wird damit erklärt, dass es sich bei den aufgetragenen Maximalgeschwindigkeiten *max.* um einzelne diskrete Werte handelt, die experimentelle Kurve aber Mittelwerte aus mehreren lokalen Messdaten repräsentiert. Im Experiment führt dies zu einer Glättung des gemessenen Geschwindigkeitsverlaufs und damit zu einer besseren qualitativen Vergleichbarkeit mit den lokalen Mittelwerten *avg.* aus der Simulation. Für eine genaue Validierung der CFD-Simulationen sollten demzufolge zwar lokale Maximalgeschwindigkeiten für jede Region aus der Simulation ermittelt werden, dabei allerdings für mehrere Zeitschritte. Eine Mittelung der Geschwindigkeiten in jeder Region würde so zu einer Glättung des Geschwindigkeitsverlaufs führen und damit zu einer besseren Vergleichbarkeit mit den experimentellen Daten.

Mit diesen Untersuchungen wurde gezeigt, welche Ergebnisse der einphasigen Flüssigkeitsströmung mit Hilfe der PTV erhalten werden können. Die Oberflächengeschwindigkeit kann sowohl bei geschlossener Filmströmung bestimmt werden als auch bei aufgerissenem Film und anschließender Rinnsalströmung. Unterschiede in der Geschwindigkeit finden sich hauptsächlich aufgrund der unterschiedlichen Aufgabevarianten. Zudem sind die Messdaten geeignet, einen Vergleich mit CFD-Simulationsergebnissen mit einer flüssigen Phase durchzuführen und diese zu validieren.

5.4.2 Vergleich mit HFI-Messungen

Da bisher keine Annahmen über die Güte der PTV-Messungen sowie mögliche Fehler getroffen wurden, sollen Vergleichsmessungen mit der Hochfrequenzimpedanzsonden-Technik (HFI) Ansätze hierfür liefern. Eine HFI-Sonde besteht aus einem Koaxial-Kupferkabel mit isoliertem Innen- und Außenleiter. Der $50\mu\text{m}$ dicke Innenleiter ragt mehrere Millimeter aus dem Kabel heraus und taucht als Sondenspitze in die Flüssigkeit ein. Zwischen Innen- und Außenleiter wird ein hochfrequentes elektrisches Feld angelegt, dessen Impedanz sich mit der Dielektrizitätskonstante des umgebenden Mediums ändert. Da Flüssigkeit und Gas stark unterschiedliche Dielektrizitätskonstanten aufweisen, kann das aufgenommene Impedanzsignal direkt dazu benutzt werden, die Änderung der Flüssigkeitsoberfläche zu verfolgen. Ein Anstieg der Flüssigkeit wie beim Durchlauf einer Welle bewirkt eine Änderung der Impedanz. Das Signal steigt mit der Flüssigkeitsdicke an und verzeichnet somit das Dickenprofil der

Welle. Mit einer einzelnen Sonde kann so die zeitliche Änderung der Filmdicke aufgenommen werden, mit zwei Sonden, in einem festen Abstand hintereinander in Strömungsrichtung installiert, kann zusätzlich der zeitliche Versatz einer die beiden Sonden durchlaufenden Welle gemessen werden (vgl. Abb. 5.13). Das Impedanzsignal wird mit einer Messfrequenz von 1kHz aufgenommen. Aus den Signaldaten kann anschließend nach Maun (2004) der zeitliche Verlauf der Filmdicke sowie die mittlere Wellengeschwindigkeit bestimmt werden. Mit Hilfe von statistischen Methoden lässt sich außerdem die Geschwindigkeit einzelner Wellen sowie deren Häufigkeitsverteilung ermitteln (Iversen, 2005; Lozano-Avilés et al., 2005).

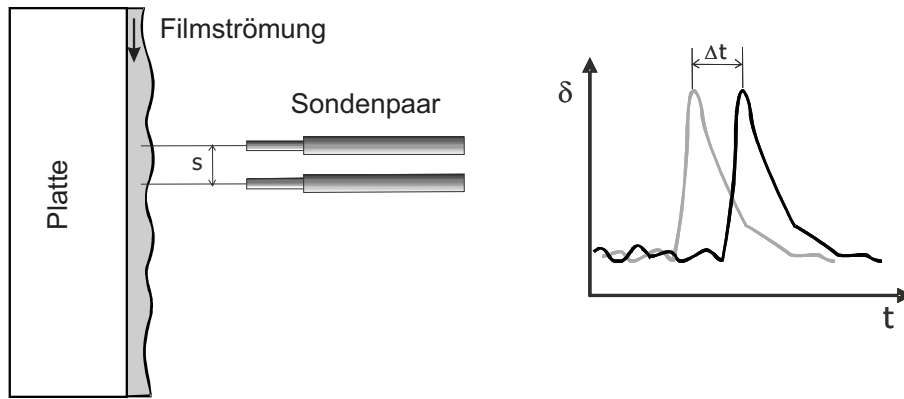


Abbildung 5.13: Prinzip der Geschwindigkeitsmessung mit HFI (Lozano Avilés et al., 2004): zwei Sonden im Abstand s messen das Flüssigkeitsdickenprofil δ . Der zeitliche Versatz Δt einer markanten Erhebung (Welle) führt zur Geschwindigkeit.

Für die Vergleichsmessungen werden die Wellengeschwindigkeiten einer Wasserfilmströmung bei $Re = 220$ auf der um 60° geneigten Platte 2 zuerst mit HFI gemessen und kurz darauf mit PTV. Das gleichzeitige Messen mit beiden Methoden ist nicht möglich, da beim Aufnehmen der PTV-Bilder elektromagnetische Felder erzeugt werden, die das Messsignal der HFI-Sonden stören und somit unbrauchbar machen. Aus diesem Grund können nur mittlere Wellengeschwindigkeiten sowie deren Häufigkeitsverteilung aus beiden Messungen miteinander verglichen werden. Die PTV-Daten werden dabei in zwei unterschiedlichen Bereichen auf der Platte ermittelt. Zum einen in einem sehr engen Bereich um die Sondenspitzen herum, zum anderen in einem sehr weiten Bereich, der nahezu die gesamte überströmte Platte umfasst. Da es sich bei der HFI-Messung um eine Punktmessung handelt, wird vermutet, dass die Ergebnisse aus dem engen PTV-Bereich besser mit den Ergebnissen der HFI-Messung übereinstimmen als die Messwerte von der gesamten Platte.

Die Auswertung der beiden PTV-Bereiche ergibt zunächst in beiden Bereichen erwartungsgemäß eine normalverteilte Geschwindigkeitsverteilung (vgl. Abb. 5.14), wobei sowohl die beiden mittleren Wellengeschwindigkeiten mit $\bar{u}_s = 0,9\text{m/s}$ als auch die jeweiligen Standardabweichungen mit $s(u) \approx 0,15\text{m/s}$ gleich sind. Demnach gibt es in den Messwerten keinen signifikanten Unterschied, an welcher Stelle der Platte gemessen wird. Allerdings steigt die

Anzahl detektierbarer Tracer mit der Größe des Bereiches, sodass für weitere Messungen der Oberflächengeschwindigkeit wieder die gesamte Platte ausgewertet wird.

Im Vergleich dazu zeigt die mit HFI gemessene Geschwindigkeitsverteilung in Abb. 5.14 jedoch einen deutlich unsymmetrischen, rechtsschiefen Verlauf mit der Tendenz zu größeren Geschwindigkeiten. Die automatische Auswertung der HFI-Signale führt in Einzelfällen zu Geschwindigkeiten von bis zu 3 m/s , was für die vorgegebene Strömung eindeutig zu hoch ist. Durch nachgeschaltete Filter können solche Ausreißer zwar ausgeschlossen werden, wie Abb. 5.14 aber zeigt, wird im Vergleich zur PTV-Messung immer noch eine sehr hohe Anzahl an großen Geschwindigkeiten ($u_s > 1,2$) aufgenommen, und es ergibt sich eine signifikante Rechtsschiefe. Aus diesem Grund ergibt sich hier je nach Auswertungsverfahren ein höherer Mittelwert der Oberflächengeschwindigkeit von $\bar{u}_s \approx 1,05\text{ m/s}$, sowie eine höhere Standardabweichung von $s(u) \approx 0,23\text{ m/s}$. Wie in Abb. 5.14 aber auch zu sehen ist, stimmen die Geschwindigkeitsverteilungen von PTV und HFI im Bereich $0,4 - 1,0\text{ m/s}$ sehr gut überein. Daher muss nach Ursachen für die unterschiedliche Form der Häufigkeitsverteilungen gesucht werden.

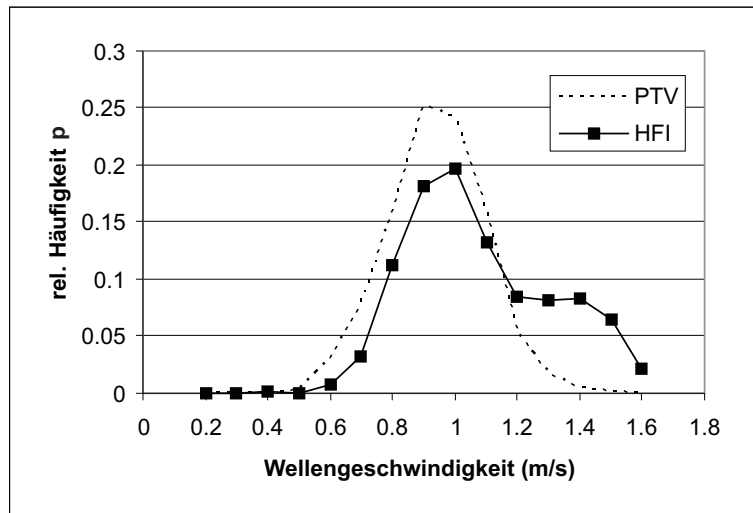


Abbildung 5.14: Vergleich der gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen zwischen HFI und PTV.

Um eine eventuelle Fehlerträchtigkeit der automatischen HFI-Signalauswertung auszuschließen, werden zusätzlich einzelne HFI-Sequenzen manuell ausgewertet und der zeitliche Versatz zwischen den Signalen „per Hand“ vermessen. Dabei wird der Versatz der Wellenfronten zwischen beiden Signalen bestimmt. Die Ergebnisse dieser Messungen weisen nun zwar keine Wellengeschwindigkeiten größer $1,6\text{ m/s}$ mehr auf, und auch die Standardabweichung liegt jetzt in einem Bereich von unter $0,2\text{ m/s}$. Die Rechtsschiefe der Verteilung ist aber erhalten geblieben und somit liegt auch der Mittelwert mit $1,05\text{ m/s}$ für die Geschwindigkeit der Wellenfronten noch zu hoch. Demnach liegt der Grund für die deutlichen Unterschiede in den Messergebnissen nicht bei der automatischen HFI-Signalauswertung.

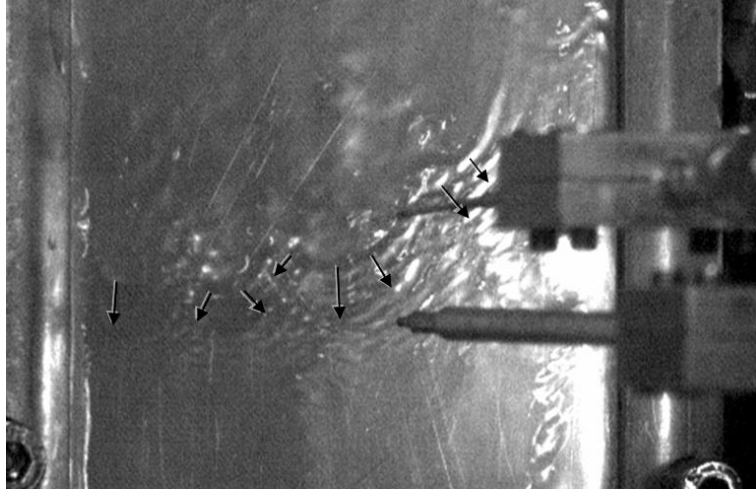


Abbildung 5.15: Dreidimensionale Gestalt einer abströmenden Wellenfront mit deutlicher Querbewegung.

Eine Erklärung für diese Abweichungen zur PTV-Messung kann die Beschaffenheit der Wellen liefern. Wie oben erläutert, entstehen die untersuchten Wellen aufgrund von Druckstößen durch die Schlauchpumpe und ändern während des Abströmens über die Platte signifikant sowohl ihre Form als auch ihre Strömungsrichtung. Abb. 5.15 zeigt eine doppelbelichtete Wellenformation beim Umströmen der HFI-Sonden. Obwohl die Hauptströmungsrichtung von oben nach unten verläuft, erkennt man hier doch eine starke Querbewegung der Wellen - angegeben durch die Pfeile im Bild. Dies bedeutet, dass die Wellen dieser Strömung stark dreidimensional sind und bereits über eine relativ kurze Distanz deutlich ihre Form ändern. Wird nun das Wellenprofil an zwei festen, in Strömungsrichtung hintereinander liegenden Punkten auf der Platte gemessen, so ist nicht sichergestellt, wie und in welcher Richtung eine bestimmte Welle diese beiden Punkte durchläuft. Es kann daher vorkommen, dass eine Welle die beiden Messpunkte leicht schräg durchläuft, was Messunterschiede sowohl in der Höhe der Welle als auch im zeitlichen Versatz (Zeit, bis die Welle im zweiten Messpunkt ankommt, wird größer) zur Folge hat. Strömt z.B. wie in Abb. 5.16 eine Wellenfront mit der Geschwindigkeit u_{Welle} um einen Winkel β quer zur Strömungsrichtung, ändert sich dadurch der zeitliche Versatz an den Sonden und damit die gemessene Wellengeschwindigkeit in Strömungsrichtung um etwa $\cos \beta$ zu

$$u_{HFI} \approx \frac{u_{Welle}}{\cos \beta} \quad (5.2)$$

Eigentlich kleine Geschwindigkeiten werden auf diese Weise von den HFI-Sonden als vermeintlich größere Geschwindigkeiten detektiert. Im Gesamtergebnis führt das schließlich zu einer Verschiebung der eigentlichen Normalverteilung der Wellengeschwindigkeit zu einer schiefen Verteilung in Richtung höherer Geschwindigkeiten, sowie zu einem größeren Mittelwert.

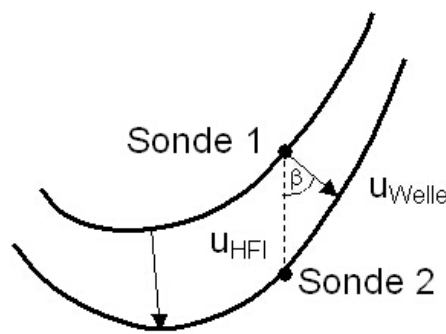


Abbildung 5.16: Fehlerhafte Geschwindigkeitsbestimmung durch punktuelle Sondenmessung.

Zusammengefasst ist die punktuelle Geschwindigkeitsmessung durch die HFI-Sonden für diese Anwendung nicht geeignet. Eine flexiblere Methode stellt die hier eingesetzte PTV-Methode dar, die zu einer normalverteilten Oberflächengeschwindigkeit führt. Diese Verteilung kann im Bereich kleinerer Geschwindigkeiten mit der HFI-Verteilung verglichen werden und liefert hierfür gute Übereinstimmungen. Des Weiteren können die HFI-Daten bzgl. der Fluidicke dazu benutzt werden, um die optische Filmdickenmessmethode mit LIF zu überprüfen, was unter anderem im Folgenden gezeigt werden soll.

5.5 Fluidicken

5.5.1 Wasserfilmströmung

Zur Bestimmung der Fluidicke wird zuerst eine Wasserströmung auf der geeigneten Stahlplatte mit LIF untersucht. Rhodamin B wird mit einer Konzentration von $1,39 \cdot 10^{-5} \text{ mol/l}$ im Wasser gelöst. Diese Farbstoffkonzentration wurde in einer Versuchsserie als optimal ermittelt, da sie zum einen hoch genug ist, um eine gut messbare Intensität zu erzeugen, zum anderen aber noch gering genug, um die Fluideigenschaften nicht signifikant zu beeinträchtigen und zu verändern.

Strömung und Kalibrationsküvette werden gleichzeitig mit der Kamera aufgenommen. Die Belichtungszeit wird auf $1/500\text{s}$ eingestellt, welche einen Kompromiss bildet aus ausreichend langer Belichtungszeit für das schwache Fluoreszenzlicht und genügend kurzer Belichtungszeit, um bewegte Objekte wie Wellenberge oder Tropfen noch ausreichend scharf abbilden zu können. Eine aufgenommene Bildfolge besteht aus etwa 50 Einzelframes, die anschließend in SigmaScan mit Hilfe von Makros aufbereitet und vermessen werden.

Bei einer Messreihe wird zunächst eine Bildserie von der trockenen Platte und der leeren Kalibrationsküvette aufgenommen. Die resultierenden 50 Bilder werden miteinander pixelweise gemittelt, wodurch ein Hintergrundbild entsteht, mit dem später auftretende Schatten, Spiegelungen und Hintergrundrauschen aus den Fluoreszenzbildern eliminiert werden. Im Anschluss

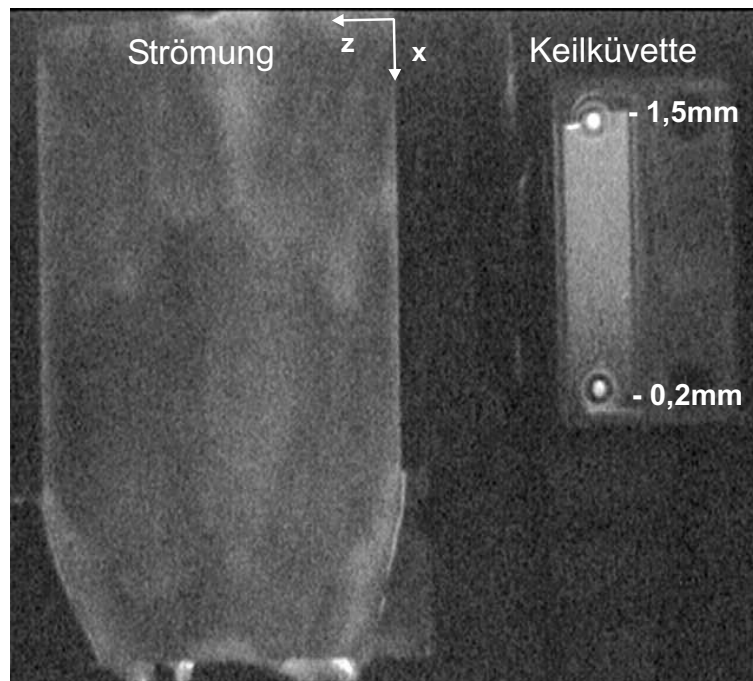


Abbildung 5.17: Fluoreszenzaufnahme einer Wasserströmung bei $Re = 220$ mit Kalibrationsküvetten.

wird die Küvette mit Farbstofflösung gefüllt und die Fluidströmung über die Platte initiiert. Die Messungen finden wie schon in den zuvor durchgeführten Untersuchungen bei verschiedenen Volumenströmen statt. Abb. 5.17 zeigt eine Beispielaufnahme von Wasser auf Platte 2 bei $Re = 220$ mit den daneben angeordneten Keilküvetten für die Intensitätskalibrierung.

Die Fluoreszenzaufnahmen werden in SigmaScan geladen und durch Subtraktion des Hintergrundbildes von Intensitätsstörungen bereinigt. Anschließend werden manuell Regionen im Bild ausgewählt, die für die Messung relevant sind: bspw. Wellenberge oder der Übergang vom Basisfilm zur Plattenhalterung. Dazu werden im Bild 2 Punkte markiert, zwischen denen die Pixelintensitäten entlang einer Geraden ausgelesen werden. Wird z.B. eine Gerade entlang der ansteigenden Intensität in der Keilküvette gelegt (vgl. Abb. 5.17), so erhält man die in Abb. 5.18 dargestellte Beziehung zwischen linear ansteigender Fluiddicke von $0,2\text{mm}$ bis $1,5\text{mm}$ und der gemessenen Pixelintensität. Für den untersuchten Bereich kann hier mit guter Näherung ein linearer Zusammenhang hergestellt werden, der eine einfache Umrechnung von Pixelintensitäten in Fluidicken erlaubt.

Wie in Abb. 5.18 auch zu sehen ist, weist die Pixelintensität trotz Hintergrundsubtraktion und Mittelung der Kalibrationsdaten über mehrere Einzelaufnahmen noch ein relativ großes Messrauschen auf. Daher müssen die Messdaten in den folgenden Untersuchungen kritisch betrachtet und häufig mit Ausgleichsfunktionen bzw. gemittelten Werten beschrieben werden.

Zunächst soll das Verhalten des Basisfilms einer Wasserströmung mit Änderung der Flüssigkeitsbelastung untersucht werden. Als Basisfilm wird die Flüssigkeitsströmung zwischen

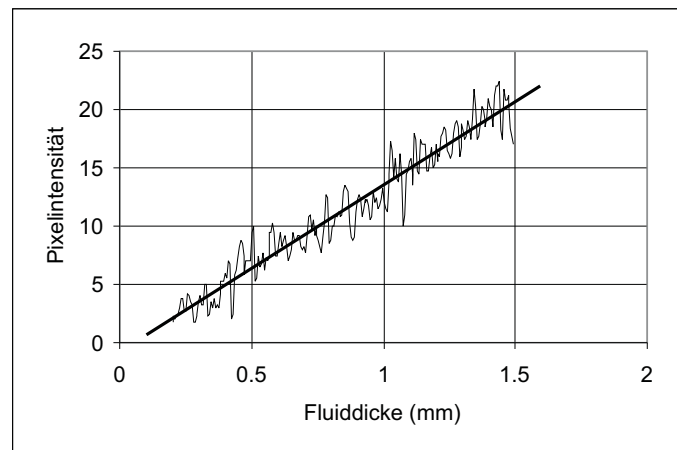


Abbildung 5.18: Gemessene Pixelintensitäten entlang des linearen Dickenanstiegs in der Keilküvette. Als Ausgleichsfunktion kann für diesen Bereich mit guter Genauigkeit ein linearer Zusammenhang zwischen den Größen hergestellt werden.

zwei Wellenbergen bezeichnet. Entsprechend Glg. 2.4 sollte die mittlere Filmdicke, die sich aus Basisfilm und Wellenbergen zusammensetzt, mit zunehmender Belastung linear ansteigen. Tatsächlich steigt die Dicke des Basisfilms mit der Re -Zahl auch linear an, wie Abb. 5.19 zeigt. Allerdings liegen die Werte deutlich unter denen der mittleren Filmdicke, was bedingt ist durch die starke Wellenbildung. Der geringere Anstieg des Basisfilms kann damit erklärt werden, dass sich mit zunehmendem Volumenstrom auch die Wellenfrequenz erhöht und damit der Basisfilm kaum an Stärke zunimmt.

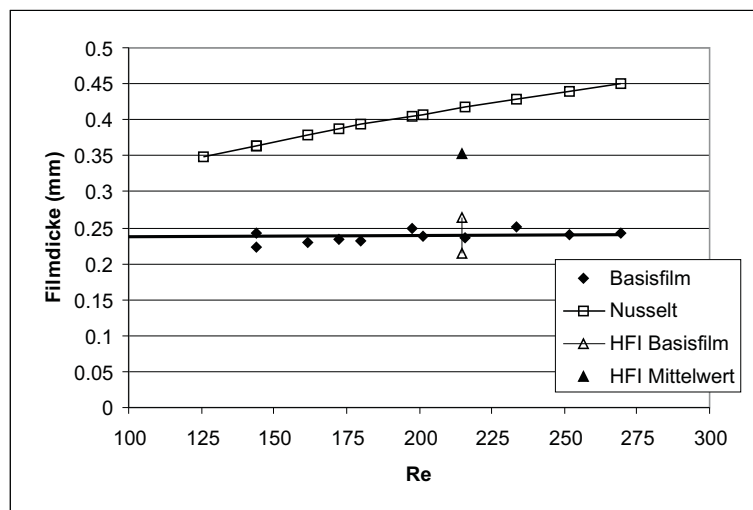


Abbildung 5.19: Gemessene Filmdicken des Basisfilms für verschiedene Re -Zahlen im Vergleich zur Nusselt-Filmdicke aus Glg. 2.4.

Die Vergleichsmessung mit der HFI-Methode liefert für $Re = 215$ einen Wertebereich zwischen 0,21 und 0,26 mm für den Basisfilm (Abb. 5.19 – HFI Basisfilm), und zeigt somit eine

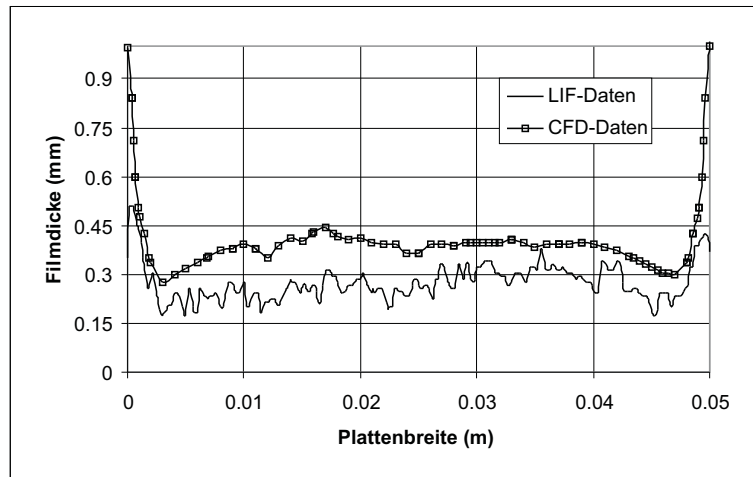


Abbildung 5.20: Filmdickenprofil entlang der Plattenbreite in z -Richtung. Vergleich der LIF-Messdaten mit Ergebnissen aus der CFD-Simulation (Ausner et al., 2005a).

gute Übereinstimmung mit den LIF-Messungen. Bildet man dagegen den Mittelwert über alle HFI-Messdaten einer Messreihe (60.000 Messwerte in 60 Sekunden, HFI Mittelwert in Abb. 5.19), so ergibt sich eine mittlere Filmdicke von $0,35\text{ mm}$, die wiederum in vergleichbare Nähe zur Nusselt-Filmdicke rückt, was die zuvor gemachten Aussagen bestätigt.

Wird entlang der z -Koordinate über die gesamte Plattenbreite das Filmdickenprofil des Basisfilms gemessen und aufgetragen, erkennt man, dass die Flüssigkeit an den Seitenbegrenzungen Menisken bildet. Die Plattenhalterungen bilden jeweils eine etwa 1 mm hohe, senkrechte Wand, die von der Flüssigkeit ebenso benetzt wird wie die überströmte Grundplatte. Wie in Abb. 5.20 dargestellt ist, erreicht der Basisfilm an den Rändern die größte Dicke. In Richtung Plattenmitte nimmt die Dicke dann schnell ab, wobei sich Senken bilden, bevor das Profil wieder zur Basisfilmdicke ansteigt. Der Profilabschnitt zwischen senkrechter Wand und dem Beginn des Basisfilms wird als Meniskus bezeichnet.

Abb. 5.20 zeigt das Profil der Filmdicke einer Wasserströmung bei $Re = 224$ und $\alpha = 60^\circ$, einerseits gemessen mit LIF im Experiment, andererseits berechnet in der CFD-Simulation. Die im Experiment beobachtete Bildung von Menisken am Plattenrand kann durch die Simulation gut nachgebildet werden. Der Unterschied in der Höhe des Basisfilms zwischen CFD und Messung kommt wieder durch die eingesetzten unterschiedlichen Aufgabevorrichtungen zustande: während in der Simulation an der Eingangsrandbedingung ein geschlossener Film vorgegeben wird, kommen im Experiment die Aufgaberohre mit ihrer höheren Anfangsgeschwindigkeit zur Anwendung. Durch die insgesamt höhere Geschwindigkeit im Experiment verkleinert sich bei gleichen Volumenströmen die Querschnittsfläche der Strömung und die Dicke des Basisfilms ist im Vergleich zur Simulation kleiner.

Die Untersuchungen zeigen auch, dass die an den Rändern gebildeten Menisken mit dem Volumenstrom ihre Größe ändern. Das an der senkrechten Wand anhaftende Flüssigkeitsdrei-

eck nimmt sowohl an Höhe als auch an Breite deutlich mit dem Volumenstrom zu, und zwar stärker als der Anstieg des Basisfilms. Zusätzlich nimmt die Breite der Senke zwischen Flüssigkeitsdreieck an der Wand und Basisfilm merklich ab, sodass bei sehr hohen Re -Zahlen diese Absenkung in der Fluiddicke kaum noch erkennbar ist.

Werden Pixelintensitäten auf einer Linie parallel zur Strömungsrichtung entlang der x -Koordinate ausgelesen, kann damit das Dickenprofil von Wellen ermittelt werden. Zunächst interessiert dabei die Höhe der Wellen sowie deren Änderung mit dem Volumenstrom. Die durchgeführten Messungen zeigen, dass im Bereich von $Re = 140 - 270$ kein signifikanter Anstieg der maximalen Wellenhöhe messbar ist. Die Höhe der Wellenberge liegt im untersuchten Volumenstrombereich konstant in einem Dickenbereich zwischen $0,4$ und $0,7\text{mm}$. Auch bleibt die mittlere Länge der Wellenberge, d.h. beginnend vom Anstieg der Dicke an der Wellenfront über den Wellenberg bis hin zum Wiedererreichen der Basisfilmdicke, bei variierender Re -Zahl in einem konstanten Bereich, was ebenso wie die konstante Höhe auf die erzwungene Wellenbildung durch die Schlauchpumpen zurückzuführen ist: da das pro Pumpstoß geförderte Volumen immer gleich bleibt, gibt es auch keine Veränderung in der Wellengeometrie. Einzig die Pumpfrequenz und damit die Häufigkeit der Wellenbildung ändert sich mit dem geförderten Volumenstrom.

Zusätzlich konnte bei der Vermessung des Wellenprofils aber ein weiteres interessantes Phänomen beobachtet werden: die gemessenen Wellenprofile lassen sich nach ihrer Länge in zwei separate Klassen einteilen. Die zuvor schon angesprochene Dreidimensionalität der Wellen bewirkt je nach z -Position auf der Platte, dass einige Wellenprofile Längen zwischen 30 und 40mm aufweisen, andere dagegen nur eine Länge von 15 bis 25mm besitzen. Die Höhe der Welle ist dabei in beiden Klassen gleich. Die Unterschiede beschränken sich lediglich auf die Wellenlänge sowie die Steilheit des Anstieges an der Wellenfront (Abstand zwischen Verlassen der Basisfilmdicke und Erreichen des Wellenmaximums). Dieser Umstand ist bedeutend bei dem Vergleich der Wellenprofile mit den Messdaten zur Filmdicke aus der HFI-Vergleichsmessung.

Abb. 5.21 zeigt im Diagramm die mit LIF gemessenen Profile einer langen und einer kurzen Welle im Vergleich zu einem mit HFI gemessenen Wellenprofil. Hierzu wurde die zeitliche Änderung des Impedanzsignals mit der in Abschnitt 5.4.2 ermittelten Oberflächengeschwindigkeit $\bar{u}_s = 0,9\text{m/s}$ in ein von der Lauflänge abhängiges Signal umgerechnet. Das Foto der Strömung auf der linken Seite in Abb. 5.21 gibt die Positionen an, in denen die beiden Wellenprofile mit LIF gemessen wurden. Entlang der mit $\circ$ markierten Linie wurde das Profil der kurzen Welle gemessen, entlang der mit $\square$ markierten Linie das Profil der langen Welle. Wie zuvor beschrieben, weisen beide LIF-Messungen eine ähnliche Wellenhöhe auf. Die Länge der Wellen sowie die Steilheit der Wellenfront sind jedoch stark unterschiedlich. Das HFI-Profil, welches an einem festen Punkt aufgenommen wurde (vgl. Abschnitt 5.4.2), stimmt dabei sehr gut mit dem Profil der langen Welle überein. Dies unterstreicht zum einen wieder die Notwendigkeit einer flächigen Messmethode für diesen speziellen Strömungszustand. Zum anderen

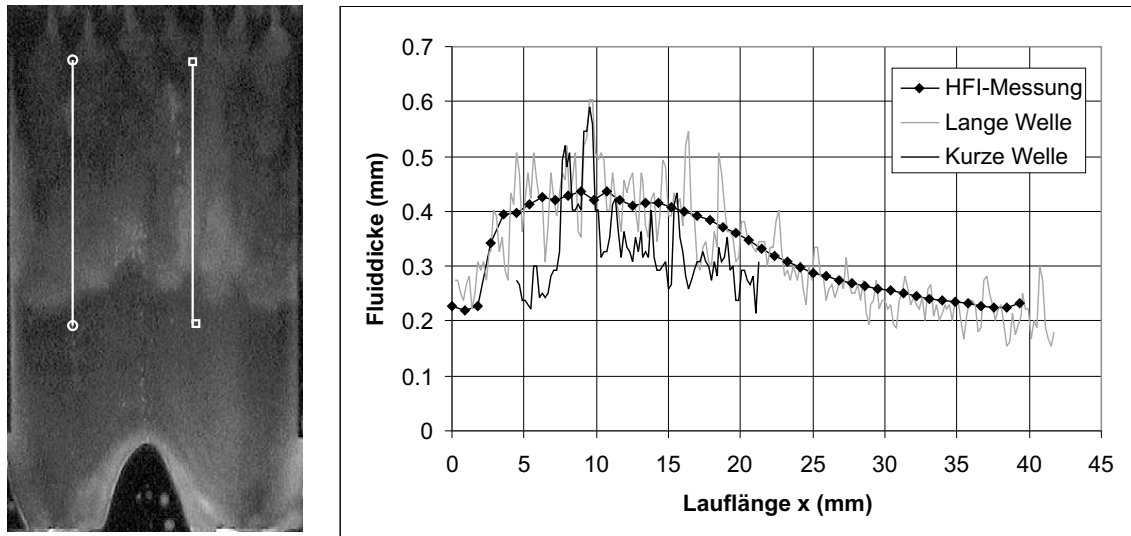


Abbildung 5.21: Mit LIF gemessene Wellenprofile einer kleinen Welle ($\circ$ im Foto) und einer großen Welle ($\square$ im Foto) im Vergleich zur HFI-Messung.

erlaubt der Vergleich aber auch, Aussagen über die Güte der LIF-Messung zu machen, da die HFI-Dickenmessung mit einem absoluten Fehler von $\pm 25 \mu\text{m}$ arbeitet, das etwa 10% der Basisfilmdicke entspricht und für diese Arbeit als ausreichend genau bewertet wird. Durch die gute Übereinstimmung von HFI- und LIF-Messung kann daher auch von einer guten Messgenauigkeit von LIF ausgegangen werden.

Nach den bisherigen Erkenntnissen ist die LIF-Methode eine gute Möglichkeit, um die Dicke dreidimensionaler Strömungen mit guter Genauigkeit zu messen. Als kritisch ist dabei allerdings das hohe Signal-Rausch-Verhältnis zu bewerten. Zwar kann das Rauschen nachträglich durch Filterung (bspw. Median-Filter oder Tiefpassfilter) gemindert werden, günstiger ist es jedoch, die Bildqualität schon bei der Aufnahme zu optimieren. Welche Ergebnisse mit der LIF-Methode bei der Toluolfilmströmung erzielt werden können, wird im folgenden Abschnitt gezeigt.

5.5.2 Toluolfilmströmung

Zur Filmdickenbestimmung der Toluolströmung mit LIF wird Rhodamin B mit einer Konzentration von $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ mol/l}$ in Toluol gelöst. Die Strömung erfolgt auf der um 45° geneigten Platte 2 bei variablem Volumenstrom. Die Belichtungszeit für die Aufnahmen beträgt wie bei der Wasserströmung $1/500\text{s}$ und die Kalibration wird mit Hilfe der Keilküvette vorgenommen.

Als erster Unterschied zur Wasserfilmströmung fällt auf, dass die Fluoreszenzintensität entlang des linearen Dickenanstiegs in der Kalibrationsküvette weniger linear verläuft. Sie kann vielmehr durch eine quadratische Funktion abgebildet werden, wie Abb. 5.22 zeigt. Aufgrund der geringeren Steigung im Bereich höherer Filmdicken ($> 1\text{mm}$) nimmt die Auflösung und somit die Messgenauigkeit der Intensitäten in diesem Bereich stark ab. Daher besitzen große

Intensitätswerte hier einen höheren Fehler und sind kritischer zu beurteilen. Im Bereich von 0,1 bis 1,0 mm lässt sich mit Hilfe dieser Kalibrationsfunktion die Fluidicke aber gut bestimmen.

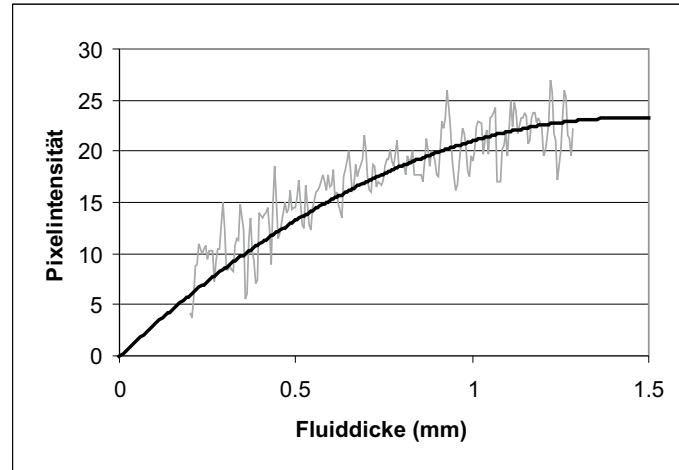


Abbildung 5.22: Kalibrationsmessung der Rhodamin B-Toluollösung mit quadratischer Ausgleichsfunktion.

Die Toluolbelastung auf der Platte wird im Re-Zahlenbereich zwischen 120 und 190 variiert. Dabei erkennt man, dass der Basisfilm mit der Flüssigkeitsbelastung ansteigt. Wie schon bei der Wasserströmung beobachtet wurde, erreicht auch die Toluolbasisfilmdicke nicht die mit Glg. 2.4 errechnete Filmdicke aufgrund starker Wellenbildung an der Oberfläche. Im Unterschied zur Wasserströmung aber steigt die Basisfilmdicke der Toluolströmung im untersuchten Volumenstrombereich deutlich stärker an und ist diesbezüglich eher vergleichbar mit der Nusselt-Filmdicke aus Glg. 2.4, wie Abb. 5.23 zeigt. Zusätzlich erkennt man, dass die Filmdicken des Toluolbasisfilms kleiner sind als die der Wasserfilmströmung.

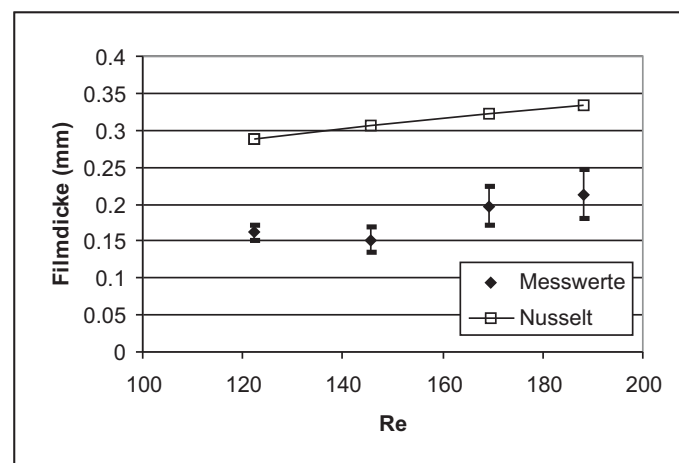


Abbildung 5.23: Gemessene Toluol-Basisfilmdicke im Vergleich zur Nusselt-Filmdicke aus Glg. 2.4 für verschiedene Re-Zahlen.

Ebenso wird wie bei der Wasserfilmströmung die Bildung von Menisken an den Plattenrändern detektiert. Dabei steigt die Höhe der Menisken stetig mit der Toluolbelastung an, im Gegensatz zur Wasserströmung bleibt jedoch die Breite des an der Wand haftenden Flüssigkeitsdreiecks im untersuchten Re-Bereich konstant bei etwa $2,5\text{mm}$. Eine Senke zwischen Flüssigkeitsdreieck und Basisfilm, wie sie bei der Wasserströmung aufgetreten ist, kann nicht gefunden werden.

Die Wellenberge weisen analog zum Wasserfilm trotz veränderlichem Volumenstrom eine konstante Höhe auf. Zudem bleibt auch die Länge der Toluolwellen mit ca. 15mm sehr konstant, jedoch ist diese kleiner als die Wasserwellenlänge. Der Anstieg der Toluolwellenfront ist steiler als bei vergleichbaren Wasserwellen, d.h. zwischen Verlassen des Basisfilms und Erreichen des Wellenmaximums liegen im Mittel nur etwa $2 - 3\text{mm}$.

Insgesamt erkennt man bei diesen Messungen, dass die veränderten Stoffparameter (kleinere Viskosität, kleinere Oberflächenspannung im Vergleich zum Wasser) ein deutlich verändertes Strömungsbild bewirken. So führt z.B. die kleinere Viskosität von Toluol zu einer geringeren Reibung in Plattennähe und damit vermutlich zu einem größeren Geschwindigkeitsgradienten im Film. Als Folge davon ergäbe sich bei gleichem Volumenstrom die gemessene, kleinere Filmdicke im Vergleich zur Wasserströmung.

5.5.3 Aufreißende Wasserströmung

Das mit Hilfe von LIF auch aufreißende Filmströmungen untersucht werden können, soll nun zum Abschluss dieses Abschnitts gezeigt werden. Über die polierte, um 60° geneigte Platte 1 fließt bei $Re = 150$ eine Wasserströmung mit $1,39 \cdot 10^{-5}\text{mol/l}$ Rhodamin B. Die Mintron-Kamera nimmt Bilder von der Strömung bei einer Belichtungszeit von $1/500\text{s}$ auf.

Abb. 5.24 zeigt eine Momentaufnahme dieser Rinnsalströmung inklusive der Keilküvetten im rechten Bildausschnitt. Aufgrund des höheren Kontaktwinkels von Wasser auf der Platte 1 ist die Strömung bei dieser Belastung noch nicht in der Lage, die gesamte Platte zu benetzen. Die weißen Markierungen in Abb. 5.24 geben zusätzlich die Messlinien an, entlang derer die Pixelintensität ausgegeben wird.

Die untersuchte Rinnsalströmung ist durch folgende morphologische Merkmale gekennzeichnet: zum einen mäandrieren die Rinnsale sehr stark und folgen dabei keinem festen Weg. Die Strömung ist also hochgradig instationär. Zum anderen schwankt die Rinnsalhöhe merklich, da die Pumpstöße wie schon bei der Filmströmung zur Bildung von Wellen bzw. Flüssigkeitschüben führen.

Lässt man sich nun das Intensitätsprofil des Rinnsals entlang einer in Abb. 5.24 dargestellten Linie ausgeben, ergibt sich das in Abb. 5.25 dargestellte Diagramm. Aufgetragen ist die in Fluidicken umgerechnete Fluoreszenzintensität als Funktion der Rinnsalbreite in z -Richtung. Besonders fällt hierbei auf, dass es sowohl am linken als auch am rechten Rand des Rinnsals einen sehr starken Intensitätspeak gibt, der in Abb. 5.24 als helle Umrandung des

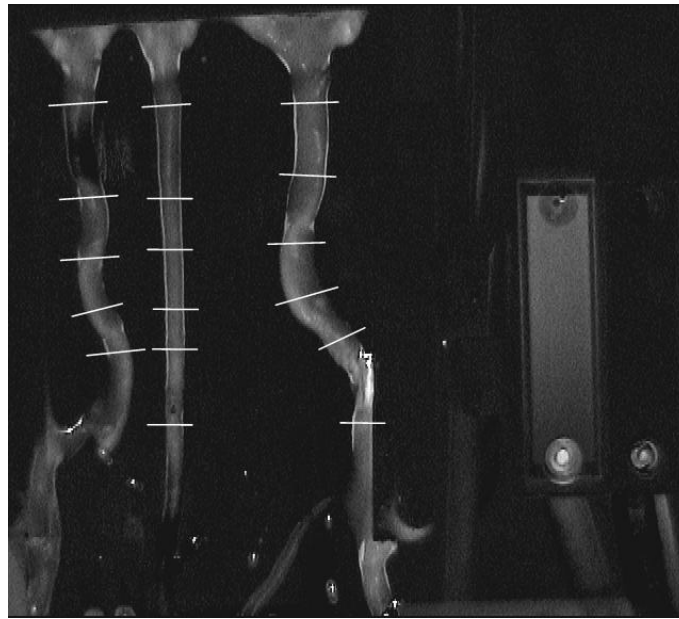


Abbildung 5.24: LIF-Messung an einer Wasserrinnsalströmung bei $Re = 150$. Die weißen Linien geben die einzelnen Messstrecken an.

Rinnsals zu finden ist. Zwischen diesen Intensitätspeaks findet sich dann ein gekrümmter Intensitätsanstieg bis auf eine Rinnsalhöhe von $1,2\text{ mm}$, der sich im weiteren Verlauf wieder auf einer gekrümmten Bahn absenkt. Den bereits in Abschnitt 2.3 erörterten Literaturangaben zufolge kann ein stark gekrümmtes Dickenprofil, was in etwa der Form eines Kreissegmentes entspricht, erwartet werden. Ungewöhnlich sind jedoch die hohen Intensitätsspitzen an den Rändern.

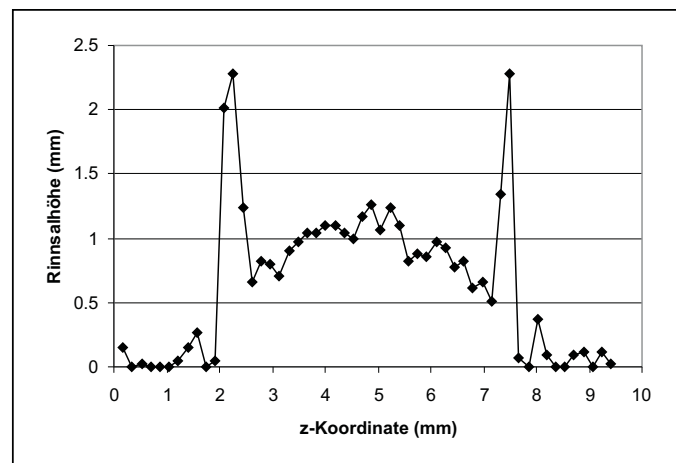


Abbildung 5.25: Gemessenes Dickenprofil eines Rinnsals in z -Richtung.

Eine Erklärung für diese starken Intensitätsanstiege entlang der Rinnsalränder liefert die genauere Betrachtung der gekrümmten Rinnsaloberfläche. Hierbei handelt es sich um eine

gekrümmte Phasengrenzfläche zwischen Luft und Wasser. Licht, das auf diese Phasengrenzfläche fällt, wird teilweise reflektiert, teilweise kann es durch die Phasengrenze hindurchtreten (Transmission). Wieviel Licht reflektiert wird und wieviel transmittiert, hängt stark vom Einfallswinkel des Lichts auf die Oberfläche ab. Hinzu kommt, dass die Lichtausbreitung in unterschiedlichen Medien unterschiedlich schnell verläuft, und es somit zur sogenannten Lichtbrechung, also zur Umlenkung des Lichtstrahls beim Übergang von einer Phase in die andere, kommt.

Zur Veranschaulichung der hier auftretenden optischen Phänomene zeigt Abb. 5.26 im oberen Teil schematisch die gekrümmte Oberfläche des Wasserrinnsals, in dessen Innerem der Fluoreszenzfarbstoff an jedem Punkt Licht in alle Richtungen aussendet. Da der Abstand zwischen Kamera und Rinnsal groß ist, wird angenommen, dass nur orthogonal zur Platte ausgesandtes Licht von der Kamera aufgenommen wird. Licht, das in andere Richtungen ausgesandt wird, trifft nicht auf die Kamera und wird daher auch nicht in Abb. 5.26 dargestellt.

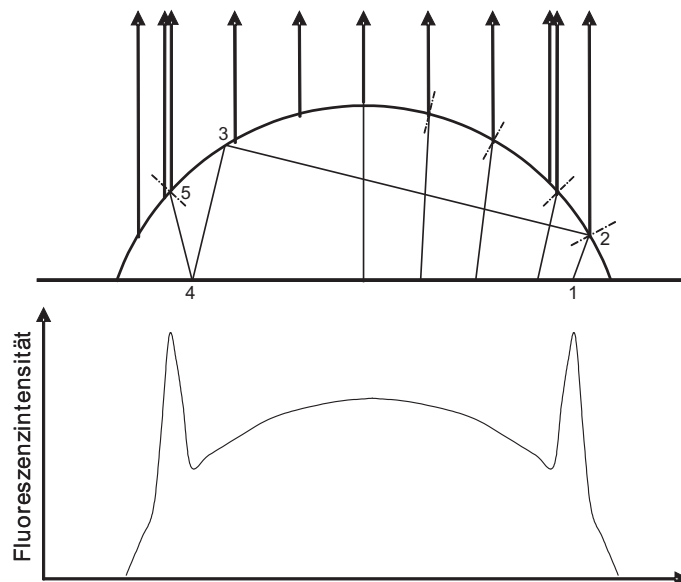


Abbildung 5.26: Prinzip von Transmission und Reflexion des Fluoreszenzlichtes an der gekrümmten Rinnsaloberfläche.

Im Bereich größerer Rinnsaldicken (Mitte des Rinnsals) ist die Phasengrenzfläche nur schwach gekrümmt. Dort auftreffendes Licht wird leicht gebrochen und kaum reflektiert. In Richtung der Ränder nimmt dagegen die Krümmung deutlich zu, was zur Abnahme des Anteils transmittierten Lichts und zur Zunahme reflektierten Lichts bis hin zur Totalreflexion führt. In Abb. 5.26 ist dies an einem Strahlengang beispielhaft dargestellt: ein Lichtstrahl, der vom Punkt 1 ausgesandt wird, trifft unter einem hohen Winkel auf die gekrümmte Phasengrenzfläche (Punkt 2) auf. Hier wird mehr Licht reflektiert als transmittiert. Der reflektierte Lichtstrahl trifft auf seinem Weg durch das Rinnsal im Punkt 3 wieder unter einem großen Winkel auf die Phasengrenze und wird dort totalreflektiert. Im Punkt 4 wird der Lichtstrahl

an der Stahlplatte gespiegelt und trifft schließlich in Punkt 5 unter einem kleineren Winkel auf die Phasengrenze. Das Licht verlässt an dieser Stelle das Rinnsal. Dadurch verstärkt sich das Licht im Randbereich und eine hohe Intensität wird detektiert (vgl. Abb. 5.26 - unten). Bei der Auswertung des Fluoreszenzsignals muss deshalb darauf geachtet werden, dass Intensitätsspitzen keine Berücksichtigung finden.

Die aufgenommenen Daten geben allerdings genaue Auskunft über die maximale Rinnsaldicke, sowie die Rinnsalbreite. Bei $Re = 150$ teilt sich die Strömung in drei Rinnsale auf, wobei die Rinnsalbreite zwischen 3,5 und 7mm liegt, die Rinnsalhöhe zwischen 1 und 2mm, abhängig von An- bzw. Abwesenheit einer Welle. Werden diese Messgrößen entlang der Lauflänge in x -Richtung erhoben, lassen sich daraus folgende Schlussfolgerungen ziehen: Die Rinnsalbreite nimmt mit zunehmender Lauflänge x leicht ab, wohingegen die Rinnsaldicke mit der Lauflänge ansteigt. Dies ist dadurch begründet, dass sich der Kontaktwinkel entlang des Rinnsals ändert. Kurz hinter der Flüssigkeitsaufgabe müssen die Rinnsale zunächst ausgebildet werden, wobei eine hohe Querströmung entsteht und der Kontaktwinkel abgesenkt wird. Im weiteren Verlauf nimmt die Querströmung ab, die Rinnsalströmung stabilisiert sich und der Kontaktwinkel nimmt wieder zu, bis der stationäre Wert (hier $67,4^\circ$) annähernd erreicht ist. Dabei ziehen sich die Rinnsale zusammen und es kommt zur Verminderung der Breite und Vergrößerung der Höhe.

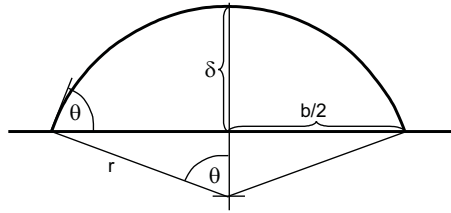


Abbildung 5.27: Prinzipskizze zur Annahme, das Rinnsalprofil entspräche einem Kreissegment.

Im Folgenden werden die gemessenen Breiten und Höhen gemittelt für jeweils eines der drei Rinnsale in Abb. 5.24 betrachtet und mit Ergebnissen aus der Literatur verglichen. Zum einen wird hierzu das maximale Rinnsalprofil nach Doniec (1991) mit Glg. 2.15 berechnet. Des Weiteren werden Rinnsaldicken berechnet unter der Annahme, dass das Dickenprofil dem eines Kreissegments entspricht. Entsprechend Abb. 5.27 lässt sich über die beiden Winkelgleichungen:

$$\sin \theta = \frac{b}{2 \cdot r} \quad (5.3)$$

$$\cos \theta = \frac{r - \delta}{r} \quad (5.4)$$

eine einfache geometrische Beziehung für die maximale Rinnsaldicke δ aufstellen:

$$\delta = \frac{b}{2} \cdot \frac{(1 - \cos \theta)}{\sin \theta} \quad (5.5)$$

Zur Berechnung der Rinnsaldicke werden der statische Kontaktwinkel θ sowie die gemessenen mittleren Rinnsalbreiten b eingesetzt. Auf dieser Annahme des kreisförmigen Rinnsalprofils basiert auch Glg. 2.16 von [El-Genk und Saber \(2001\)](#), der außerdem eine Minimierung der Gesamtenergie eines stabilen Rinnsals zugrunde liegt. Umgeformt lässt sich diese Gleichung für das Rinnsalprofil $\phi(z)$ auch darstellen als:

$$\phi(z) = \delta - \frac{\delta}{1 - \cos \theta} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - z^2 \left(\frac{1 - \cos \theta}{\delta} \right)} \right) \quad (5.6)$$

Wird Glg. 5.6 an der Stelle $z = b$ berechnet, folgt daraus $\phi(z) = 0$ und nach Einsetzen:

$$0 = \delta - \frac{\delta}{1 - \cos \theta} + \sqrt{\frac{\delta^2}{(1 - \cos \theta)^2} - b^2} \quad (5.7)$$

Nach Umformung lautet Glg. 5.7 dann:

$$0 = \delta^2 \left(1 + \frac{2}{(1 - \cos \theta)^2} \right) - b^2 \quad (5.8)$$

Umgestellt nach δ ergibt sich damit folgende Beziehung, aus der sich mit bekannter Rinnsalbreite b und bekanntem Kontaktwinkel θ die maximale Rinnsaldicke δ errechnen lässt:

$$\delta = b \sqrt{\frac{(1 - \cos \theta)^2}{3 - 2 \cos \theta + (\cos \theta)^2}} = \frac{b}{2} \cdot \frac{1 - \cos \theta}{\sqrt{\frac{3}{4} - \frac{1}{2} \cos \theta + \frac{1}{4} (\cos \theta)^2}} \quad (5.9)$$

Damit ähnelt dieser Ausdruck bis auf den trigonometrischen Term im Nenner sehr stark der Beziehung aus Glg. 5.5.

Der Vergleich der gemessenen Rinnsaldicken bei entsprechender Rinnsalbreite mit den zuvor berechneten Werten ist in Abb. 5.28 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Annahme, das Rinnsal entspricht in seiner Form der eines Kreissegments, mit guter Übereinstimmung getroffen werden kann. Die mit Glg. 2.15 ([Doniec, 1991](#)) berechneten Werte liegen dagegen eindeutig bei zu kleinen Rinnsaldicken. Mit Glg. 5.9 ([El-Genk und Saber, 2001](#)) werden bei den gemessenen Rinnsalbreiten etwas zu große Rinnsaldicken errechnet.

Die LIF-Methode hat damit gezeigt, dass sie eine geeignete Messmethode darstellt, um die Fluidicke dreidimensionaler Strömungen wie die wellige bzw. aufreißende Filmströmung auf glatten, geneigten Platten zu messen. Zur Kalibrierung der Fluoreszenzintensität haben sich die eingesetzten Keilküvetten mit ihrem linearen Fluidickenanstieg bewährt. Bei der Bildaufnahme muss allerdings darauf geachtet werden, dass alle technischen Möglichkeiten ausgeschöpft werden (Beleuchtung, Kamera, Farbstoffkonzentration), um ein optimales Bildergebnis mit einem niedrigen Signal-Rausch-Verhältnis zu erhalten.

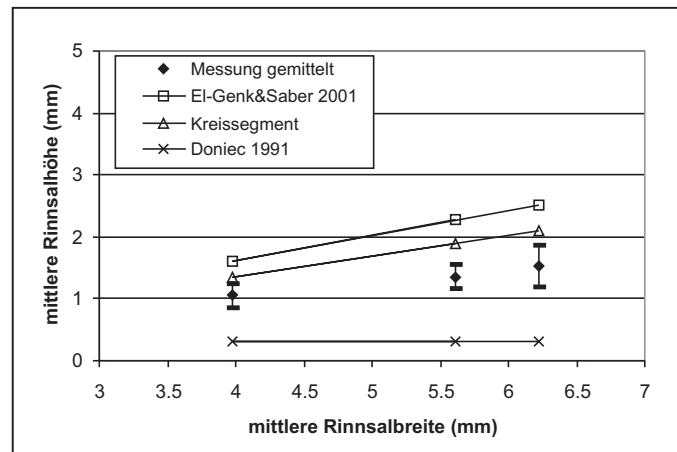


Abbildung 5.28: Vergleich der gemessenen Rinnsaldicke als Funktion der Rinnsalbreite mit Literaturdaten.

5.6 Strukturierte Platten

Die entwickelten und eingesetzten Messmethoden sollen in künftigen Arbeiten auch bei Strömungen auf strukturierten Platten, z.B. auf gewellten Stahlblechen in strukturierten Packungen, eingesetzt werden. Auf welche Schwierigkeiten man bei diesen Strömungen stoßen kann und welche Ergebnisse mit den Messmethoden erhalten werden können, soll in der folgenden Machbarkeitsstudie vorgestellt werden.

Das größte Problem von optischen Untersuchungen an Filmströmungen auf strukturierten Platten stellt die Schattenbildung aufgrund der Struktur dar. Wie Abb. 5.29 veranschaulicht können sich durch eine ungünstige Ausrichtung der Beleuchtung Schatten auf der strukturierten Platte bilden, die eine optische Auswertung der Strömung stark erschweren.

Da ein begrenzter optischer Zugang aber oftmals eine Optimierung der Beleuchtungsanrichtung nicht zulässt, kommen hier wieder Fluoreszenzfarbstoffe zum Einsatz, um den Bildkontrast zu verstärken. Abb. 5.30 zeigt eine Rhodamin B-Wasserströmung über zwei strukturierte und eine glatte Platte. Im Vergleich zu Abb. 5.29 erkennt man nun deutlich die überströmten Bereiche auf der Platte und erhält zusätzlich Informationen über die Fluiddicke, so wie es bereits in den vorherigen Abschnitten ausführlich dargestellt wurde.

Von besonderem Interesse bei der Verwendung strukturierter Platten ist immer, in welcher Weise sich die Strömung im Vergleich zur glatten Platte verändert. Die Motivation für den Einsatz einer Plattenstruktur ist im Allgemeinen die Vergrößerung der Oberfläche für den Energie- und Stoffaustausch. Aus diesem Grund soll zunächst untersucht werden, wie sich die Benetzungseigenschaft der Strömung auf den in Abb. 5.30 gezeigten Blechen verhält. Die Flüssigkeitsbelastung wird dazu konstant auf $Re = 100$ eingestellt, was einer Flüssigkeitsbelastung in der Kolonne von $B = 42 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$ entspricht.

Die Messung erfolgt wie bereits in Abschnitt 5.3 beschrieben anhand von Momentaufnah-



Abbildung 5.29: Schattenbildung durch Plattenstruktur (Optiflow, Sulzer Chemtech Ltd.), die die Bildqualität deutlich herabsetzt.

men der Strömung. Die gemessenen Flächen der benetzten Platten werden ins Verhältnis gesetzt zu den zur Verfügung stehenden Plattenflächen, um die spezifischen Schattenflächen für jede Platte zu erhalten. Die Ergebnisse dieser Messung sind in Tab. 5.4 dargestellt. Bei der Montz-Pak-Struktur ist eine leichte Erhöhung der Schattenfläche im Vergleich zur glatten Platte zu verzeichnen, wohingegen die Schattenfläche des Optiflow-Blechtes sich etwa um die Hälfte verkleinert. Ein Blick auf die Strömungsbilder in Abb. 5.30 zeigt zudem, dass die Flüssigkeit auf dem Montz-Pak-Blech sehr gleichmäßig verteilt ist, das Strömungsverhalten auf dem Optiflow-Blech dagegen eher dem Strömungsbild auf der glatten Platte gleicht (kein geschlossener Film, sondern zu den Rändern bewegte Rinnsale). Ursache für die schlechte Benetzung des Optiflow-Blechtes ist vermutlich ein höherer Kontaktwinkel der Wasserphase auf dem verwendeten Stahlblech. Die Überprüfung dessen ist jedoch nicht möglich, da gewellte Bleche mit der herkömmlichen Kontaktwinkelmessmethode über eine Konturanalyse eines Flüssigkeitstropfens auf ebenem Untergrund nicht untersucht werden können.

Tabelle 5.4: Gemessene Schattenflächen a_P und mittlere Oberflächengeschwindigkeiten u_s für eine Wasserströmung auf verschiedenen Plattenstrukturen.

	glatte Platte	Montz-Pak	Optiflow
a_P	0,757	0,786	0,358
$u_s(m/s)$	0,55	0,49	0,44

Die Plattenstruktur kann demnach dazu führen, die Benetzung der Platte durch die Flüssig-



Abbildung 5.30: Fluoreszenzfarbstoffe erhöhen den Kontrast der Strömung über strukturierte Platten. Die Vermessung der benetzten Plattenfläche wird dadurch erheblich vereinfacht. Untersuchte Platten von links nach rechts: glatte Stahlplatte (Platte 2); Montz-Pak B1-350, Montz GmbH; Optiflow, Sulzer Chemtech Ltd.

keit zu verbessern, vorausgesetzt, die Flüssigkeit weist grundsätzlich benetzende Eigenschaften bzgl. des Plattenmaterials auf. Strukturierte Bleche haben zusätzlich die Eigenschaft, die Oberflächengeschwindigkeit herabzusetzen. Wie [Wierschem et al. \(2003\)](#) bereits gezeigt haben, bildet die Strömung in den Senken der Plattenstruktur Wirbel, die zu einer Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit führen.

Werden mit Hilfe von PTV Oberflächengeschwindigkeiten auf strukturierten Blechen gemessen, kann diese Geschwindigkeitsabnahme ebenfalls bestimmt werden (vgl. Tab. 5.4. Für eine Wasserströmung bei einer Belastung von $Re = 200$ bzw $B = 85 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ und Flüssigkeitsaufgabe mit Überlaufwehr weist die Optiflow-Struktur die kleinste der gemessenen Oberflächengeschwindigkeiten auf, und erwartungsgemäß wird auf der glatten Platte die größte Oberflächengeschwindigkeit gemessen. Zu gleichen Ergebnissen führen auch die CFD-Simulationen, welche in [Ausner et al. \(2004\)](#) näher beschrieben sind.

Dies zeigt, dass die zuvor entwickelten und angewandten Messmethoden dazu geeignet sind, Strömungsmessungen auch auf strukturierten Platten durchzuführen.

6 Zweiphasige Strömung

Dieses Kapitel befasst sich mit der Strömung von zwei flüssigen, nichtmischbaren Phasen auf geneigten Platten. Als Testsystem werden dafür die Flüssigkeiten Wasser und Toluol eingesetzt, die beide in der chemischen Industrie als Lösungsmittel oder sogar Abfallprodukt vorkommen und daher bei thermischen Trennprozessen auch zusammen in einem Prozess auftreten. Zusätzlich zu den zwei flüssigen Phasen muss auch (insbesondere in den CFD-Simulationen) die umgebende Gasphase berücksichtigt werden, auch wenn diese wie in den beschriebenen Untersuchungen in Ruhe ist und somit nicht zum Impulsaustausch beiträgt. Es handelt sich bei diesem Stoffsystem demnach um ein Dreiphasensystem (gas-flüssig-flüssig), das deshalb auch als mehrphasige Filmströmung bezeichnet wird.

Da bislang von anderen Autoren keine detaillierten Untersuchungen mehrphasiger Filmströmungen veröffentlicht wurden, ist es nicht möglich, die hier beschriebenen Analysen mit Daten aus der Literatur zu vergleichen. Diese Arbeit legt daher einen Grundstein für weiterführende Untersuchungen von zwei flüssigen Phasen, die gemeinsam über eine Platte herabströmen. Viele der im Folgenden dargestellten Ergebnisse sind neuartig und wichtig für den Vergleich mit mehrphasigen CFD-Simulationen. Zusätzlich werden Parametereinflüsse experimentell und theoretisch analysiert und interpretiert.

6.1 Erweiterung des Versuchsaufbaus

Für die experimentellen Untersuchungen an mehrphasigen Filmströmungen muss der in Kap. 5 vorgestellte Versuchsaufbau erweitert werden. Die Messaufgabe erweitert sich nun um die kontrollierte Aufgabe einer zusätzlichen Flüssigkeit. Praktisch bedeutet dies den Einsatz eines weiteren Pumpen-Rotameter-Systems sowie einer weiteren Aufgabevorrichtung wie in Abb. 6.1 dargestellt.

Da die Aufgabe von zwei Flüssigkeiten nun nicht mehr mit Hilfe von Überlaufwehren realisiert werden kann, kommen in den mehrphasigen Analysen nur noch die schon zuvor verwendeten Aufgaberohre zum Einsatz. Mit einem Aufgaberohr für jede Phase werden die Flüssigkeiten separat auf das glatte, gewalzte Edelstahlblech (in Kap. 5 als Platte 2 bezeichnet) aufgebracht, dessen Neigungswinkel in den folgenden Untersuchungen wieder zwischen 45° und 60° variiert wird und dessen Abmaße $50\text{mm} \times 80\text{mm}$ (Breite $\times$ Länge) betragen.

Die beiden Flüssigkeiten fließen gemeinsam über die Platte und sammeln sich am Ende im Auffangbehälter, in dem sie sich sehr schnell voneinander trennen und als zwei separate Flüssigkeiten

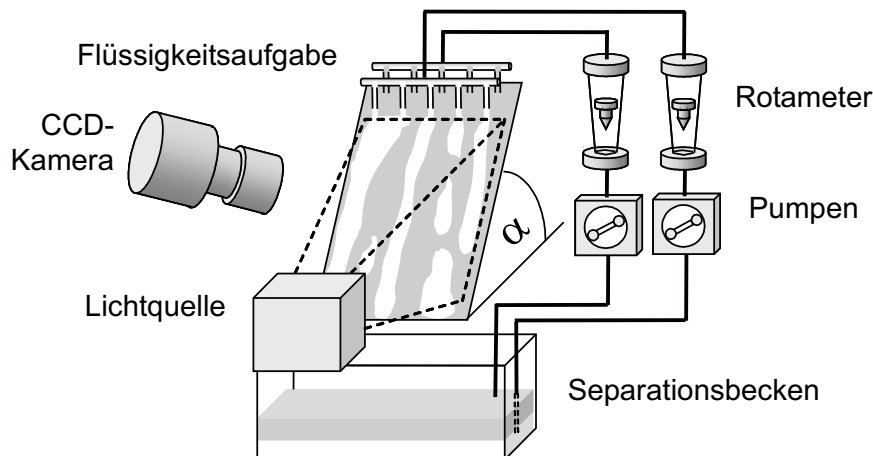


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für Strömungsmessungen an mehrphasigen Filmströmungen.

sigkeitsschichten vorliegen. Aufgrund des Dichteunterschieds befindet sich die wässrige Phase unten im Behälter und die Toluolphase darüber. Diese Tatsache ermöglicht nun das getrennte Abpumpen der beiden Flüssigkeiten in unterschiedlichen Höhen zurück in die Aufgaberohre, wodurch ein Flüssigkeitskreislauf entsteht.

Die Strömung wird wie bei der einphasigen Strömung mit einer CCD-Kamera, die normal zur Platte ausgerichtet ist, aufgenommen und anhand der Bilddaten vermessen und ausgewertet. Dabei liegt das Hauptaugenmerk der Auswertung in der getrennten Behandlung beider Phasen, was einige Anpassungen der Messtechnik erfordert, die im Folgenden beschrieben werden sollen.

6.2 Erweiterung der Messtechnik

6.2.1 Geschwindigkeitsmessung

Zur Messung der Oberflächengeschwindigkeiten für jede Phase werden Strömungsbilder von der mehrphasigen Filmströmung mit der JAI M40-Kamera aufgenommen. Die Bildrate liegt bei 60Hz mit einer Belichtungszeit von $1/125\text{s}$. Die Beleuchtung mit dem Stroboskop liefert bei einer Blitzfrequenz von 250Hz Doppelbelichtungen von Tracern, die sich mit der Strömung mitbewegen.

Die schon bei der einphasigen Strömung eingesetzten ISOSPHERES-Partikel haben gezeigt, dass sie stark hydrophile Eigenschaften besitzen. Daher werden sie vornehmlich an der Oberfläche der Wasserphase zu finden sein. Zusätzlich ergaben die einphasigen Geschwindigkeitsmessungen, dass auch Fronten von Wellen und Tropfen gute Tracer für die Oberflächengeschwindigkeitsmessung abgeben. Im Fall der mehrphasigen Filmströmung wird nun darauf zurückgegriffen, um neben der Wasserphase auch die Toluolphase vermessen zu können. Da-

bei hilft die Tatsache, dass die mehrphasige Filmströmung ein komplexes Strömungsbild aus Rinnsal-, Tropfen- und Filmströmung darstellt.

Wie Abb. 6.2 zeigt, bildet die Wasserphase in Anwesenheit von Toluol eine Rinnsal- und Tropfenströmung, die von einem die gesamte Platte benetzenden Toluolfilm umgeben ist. Die Wasserrinnsale führen zu einem ISOSPHERES-Partikel mit, deren Geschwindigkeit durch Doppelbelichtung gemessen werden kann. Zum anderen treten wie im einphasigen Fall Wellen aufgrund von Pumpstößen auf, die entlang der Wasserrinnsale fortlaufen. Stellenweise spalten sich von diesen Wellen auch einzelne Tropfen ab, die ebenso wie die Wellen Fronten erzeugen, deren Doppelbelichtung dann zur Geschwindigkeitsmessung genutzt werden kann.

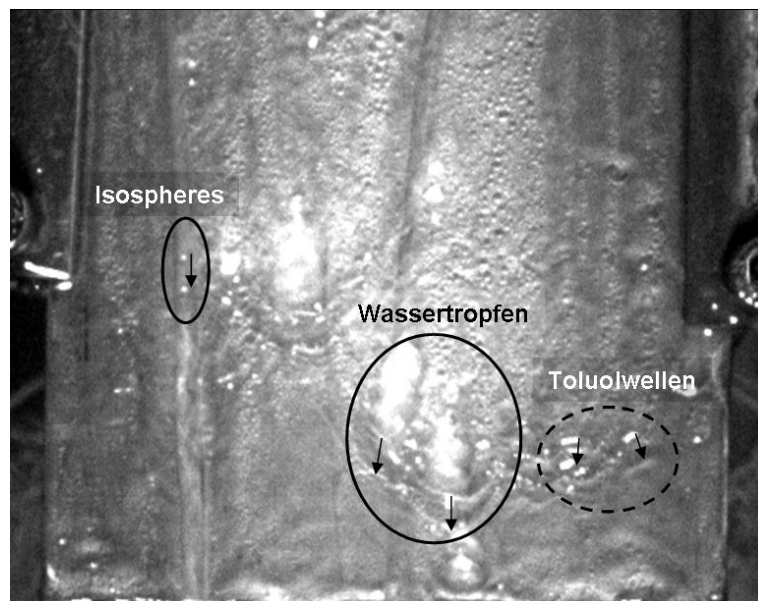


Abbildung 6.2: Unterschiedliche Tracer bei der mehrphasigen PTV-Messung.

Auf der Toluolphase befinden sich ebenfalls Wellen, deren Fronten zur Geschwindigkeitsmessung herangezogen werden. Darüberhinaus finden sich insbesondere auf dem Toluolbasisfilm kleinere Einschlüsse, die wie Tracerpartikel mit der Strömung mitbewegt werden. Hierbei handelt es sich um kleine Luftbläschen, die bei der Flüssigkeitsaufgabe mit den Aufgaberohren in die Toluolphase eingebracht werden. Diese werden dicht unter der Filmoberfläche mitgeführt und können somit auch zur Bestimmung der Toluoloberflächengeschwindigkeit genutzt werden.

Die Bildauswertung der doppelbelichteten Strömung erfolgt wieder mit dem Programm SigmaScan. Die Aufnahmen werden zunächst eingelesen und in der Länge kalibriert. Die Identifizierung und Auswertung der doppelbelichteten Tracerabbildungen wird wie schon im einphasigen Fall manuell durchgeführt. Es werden einzelne Tracerpaare identifiziert und die beiden Abbildungen auf dem Foto markiert. Zusätzlich erhält man die Aufgabe, das gefundene Tracerpaar der jeweiligen Phase zuzuordnen, um später Oberflächengeschwindigkeiten für

jede Phase einzeln zu erhalten. Diese Phasenzuordnung der Tracer ist nicht ganz einfach und erfordert sehr viel Erfahrung und Konzentration. Dafür führt diese Auswertungsmethode im Endeffekt aber zu sicheren und reproduzierbaren Ergebnissen.

6.2.2 Dickenmessung

Um die Phasentrennung bei der Dickenmessung zu realisieren, wird die einphasige LIF-Methode mit Rhodamin B um einen zusätzlichen Fluoreszenzfarbstoff erweitert. Es handelt sich hierbei um 1-(4'-Nitrophenyl)-6-Phenyl-Hexa-1,3,5-triene (MNPH), welches nach [Cundall et al. \(1979\)](#) solvatochromatische Eigenschaften besitzt und sich gut in der Toluolphase lösen lässt. MNPH weist ein Anregungsmaximum bei einer Wellenlänge von $\lambda_{ex} = 405nm$ auf, das wie schon bei der Anregung von Rhodamin B einer Quecksilberlinie entspricht. Die im einphasigen Fall eingesetzte Anregungslichtquelle kann demnach weiterhin verwendet werden. Dazu wird das Lampengehäuse mit einem Filterschlitten erweitert, der die zwei Filtergläser (405nm Bandpass und 545nm Bandpass) aufnehmen kann. Durch manuelles Verschieben des Filterschlittens kann so Anregungslicht für jeweils einen der beiden Farbstoffe MNPH und Rhodamin B erzeugt werden.

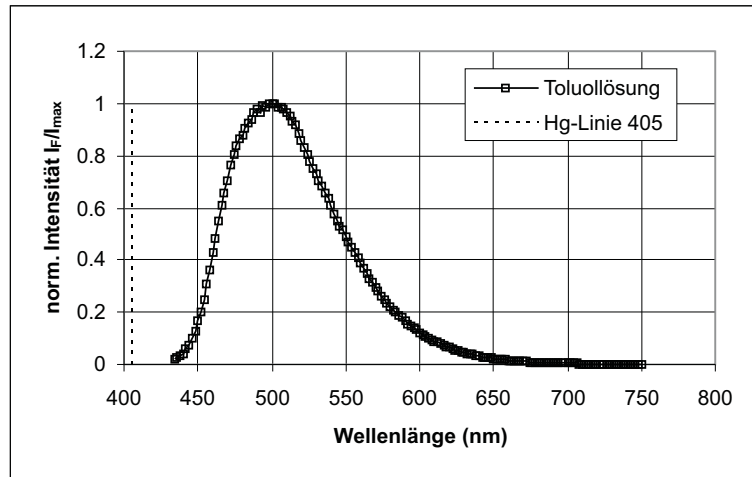


Abbildung 6.3: Fluoreszenzspektrum der MNPH-Toluollösung (Anregung bei Quecksilberlinie Hg-405).

MNPH besitzt solvatochromatische Eigenschaften, d.h. das Emissionsspektrum ist abhängig vom Lösungsmittel und verschiebt sich mit der Polarität des Lösungsmittels zu höheren Wellenlängen. Die Fluoreszenzspektralanalyse einer MNPH-Toluollösung ergibt gemäß Abb. 6.3 ein Emissionsspektrum, welches genau zwischen den Quecksilberlinien Hg-405 und Hg-545 liegt und sein Emissionsmaximum bei $\lambda_{em} = 500nm$ hat. Für die Aufnahme des MNPH-Emissionsspektrums wird daher ein Bandpassfilter bei 500nm mittlerer Wellenlänge und 40nm Bandbreite verwendet. Dieser Filter ist ebenfalls in einem Filterschlitten vor der Kamera installiert, um durch Verschieben des Schlittens die unterschiedlichen Emissionsspektren von

MNPH und Rhodamin aufnehmen zu können.

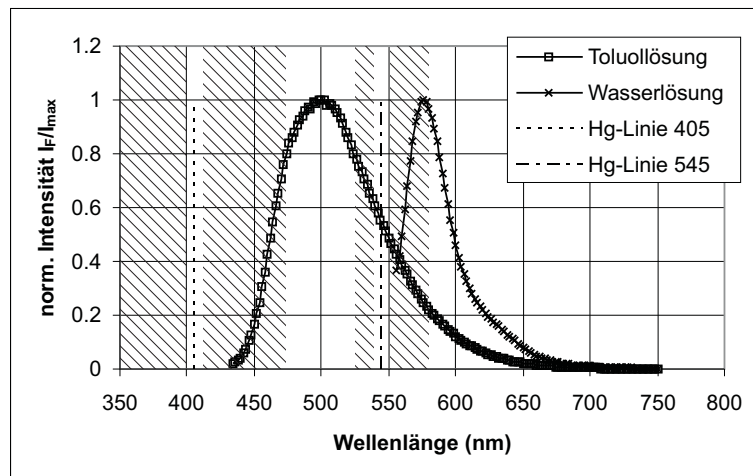


Abbildung 6.4: Gesamtes verwendetes Fluoreszenzspektrum der Wasserphase und der Toluolphase mit beiden Hg-Anregungslinien. Schraffiert sind die von den Filtern ausgeschlossenen Bereiche.

Das gesamte Lichtspektrum der entwickelten und eingesetzten mehrphasigen LIF-Methode ist in Abb. 6.4 dargestellt. Hier sind sowohl die Anregungslinien für die beiden Farbstoffe Rhodamin B und MNPH als auch die Emissionsspektren von MNPH in der Toluolphase und Rhodamin B in der Wasserphase aufgetragen. Die in Abb. 6.4 durch Schraffur markierten Bereiche geben die durch Filterung ausgeschlossenen Wellenlängenbereiche an.

Da sich MNPH nur in Toluol aber nicht in Wasser lösen und zur Fluoreszenz anregen lässt, ist damit bereits eine optische Separierung der Toluolphase von der gesamten Mehrphasenströmung möglich. Wie Abb. 6.5a zeigt, fluoresziert die Toluolphase im Wellenlängenbereich zwischen 480 und 520 nm, während die Wasserrinnale nur als dunkle Schatten zwischen den hell leuchtenden Toluolbereichen erkennbar sind. Werden sowohl Anregungs- als auch Emissionsspektrum durch Verschieben der Filterschlitten geändert, beginnt Rhodamin B zu fluoreszieren, während MNPH nicht mehr detektiert wird. Die Rhodamin B-Fluoreszenz ist in Abb. 6.5b dargestellt. Überraschenderweise wird die Emission hier aber nur in der Wasserphase gemessen, die Toluolphase ist nicht mehr zu erkennen.

Eigene Beobachtungen von Rhodamin B in einem Wasser-Toluol-System haben gezeigt, dass das Rhodamin in der Toluolphase unter Anwesenheit von Wasser seine Farbstoffeigenschaft verliert, und somit in Toluol nicht mehr durch Fluoreszenz nachgewiesen werden kann. Da aber aufgrund der Veränderung des Rhodamins in der Toluolphase eine Konzentrationsdifferenz zur Wasserphase entsteht, findet ein Stoffübergang von Rhodamin B aus der Wasserphase in die Toluolphase statt, so lange bis auch die wässrige Phase keinen Farbstoff mehr enthält und keine Fluoreszenz mehr gemessen wird.

Diese Farbstoffreaktion ermöglicht daher zum einen zwar die optische Trennung der Wasserphase von der Gesamtströmung. Da das Fluoreszenzsignal in der Wasserphase aber schnell

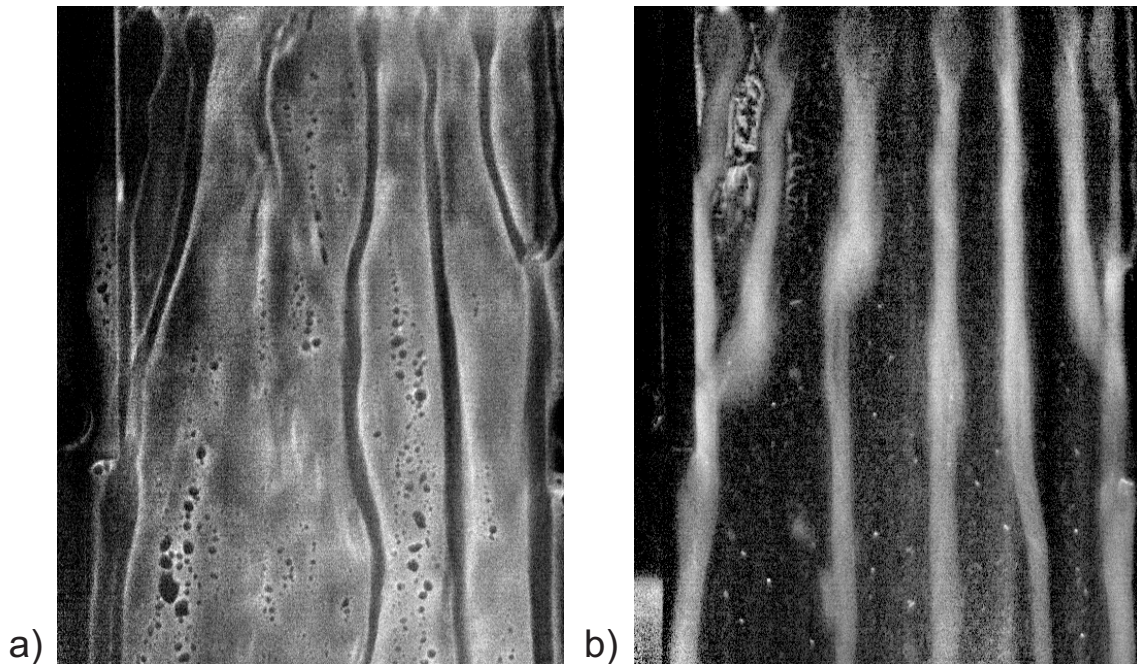


Abbildung 6.5: Phasentrennung durch Fluoreszenzfarbstoffe: a) MNPH-Fluoreszenzmission der Toluolphase bei $\lambda_{ex} = 405nm$; b) Rhodamin B-Emission der Wasserphase bei $\lambda_{ex} = 545nm$.

abnimmt, kann die Wasserphase nicht über einen längeren Zeitraum im Kreis geführt werden. Aus diesem Grund muss zum Erreichen reproduzierbarer Messergebnisse ständig frische Rhodamin-Wasserlösung verwendet werden, während die MNPH-Toluolphase zurückgeführt und im Kreis gefördert werden kann.

Die Auswertung der aufgenommenen Fluoreszenzintensitäten erfolgt wie im einphasigen Fall mit der Software SigmaScan. Dazu werden die Bilder eingelesen und Pixelintensitäten entlang von Linien in interessanten Bereichen ausgelesen. Durch Kalibrierung der Intensitäten mit dem linearen Fluidickenanstieg in den Keilküvetten kann dann auf die jeweiligen Fluidicken im Bild zurückgeschlossen werden.

6.2.3 Plattenbenetzung

Die Messungen der Plattenbenetzung erfolgen analog zur einphasigen Filmströmung. Die Aufnahmen der mehrphasigen Strömung werden in SigmaScan geladen und darauf manuell die Konturen der flüssigen Phasen markiert. Hierbei verhält es sich vorteilhaft, dass Toluol vollständig benetzende Eigenschaften besitzt. Folglich müssen lediglich die benetzte Fläche durch die Wasserphase sowie die gesamte Plattenfläche bestimmt werden. Die Differenz aus beiden Flächen bildet somit die von Toluol benetzte Fläche.

Allerdings werden dabei eventuelle Überlagerungen der beiden Phasen nicht berücksichtigt, z.B. wenn ein Wassertropfen auf dem Toluolfilm aufschwimmt, oder ein dünner Toluolfilm ein Wasserrinnsal bedeckt. Es erscheint daher günstiger, mit Hilfe der Fluoreszenz die Phasen

optisch voneinander zu trennen und anschließend beide Phasenbenetzungen separat zu vermessen. Dem entgegen steht ein größerer Arbeitsaufwand sowie der Verlust der Möglichkeit, beide Phasen zum gleichen Zeitpunkt vermessen zu können.

6.3 Oberflächengeschwindigkeit und Schattenfläche

Da bislang keine Erfahrungen mit der Filmströmung mehrerer Flüssigkeiten vorliegen, sollen erste Voruntersuchungen helfen, mögliche Parameterabhängigkeiten zu identifizieren, bevor eine strukturierte Untersuchung innerhalb eines Versuchsplans erfolgen kann. Dazu werden Wasser und Toluol auf die um 60° geneigte Platte 2 getrennt mit Hilfe der Aufgaberohre geleitet. Eine Variation der einzelnen Volumenströme führt zur Änderung in den gemessenen Oberflächengeschwindigkeiten für die Wasser- und Toluolphase. Außerdem hat die Reihenfolge der Flüssigkeitsaufgabe durch die Aufgaberohre qualitativ einen Einfluss auf das Strömungsbild und die Morphologie. Wie Abb. 6.6 zeigt, kann einerseits über das obere Rohr Toluol und über das untere Rohr Wasser auf die Platte geleitet werden, was in den nachfolgenden Untersuchungen mit Aufgabevariante 1 bezeichnet wird. Andererseits kann die Reihenfolge umgekehrt werden, sodass Wasser mit dem oberen Rohr und Toluol mit dem unteren Rohr aufgebracht werden, welches als Aufgabevariante 2 bezeichnet wird.

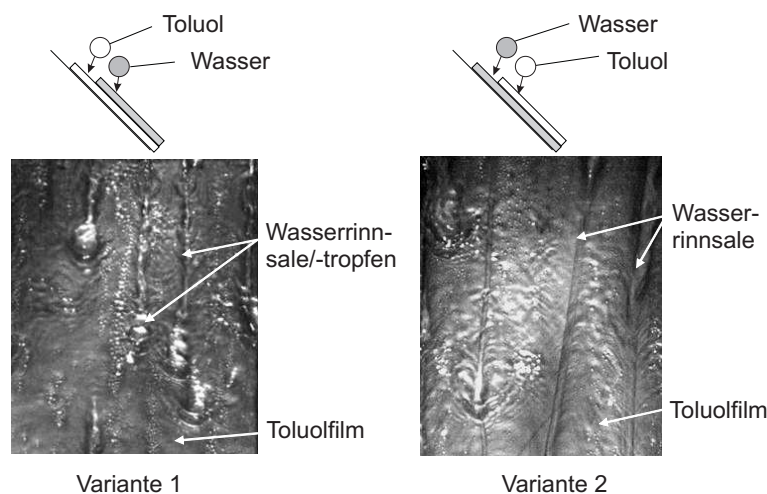


Abbildung 6.6: Variation der Aufgabereihenfolge der Flüssigkeiten. Es ergeben sich je nach Konfiguration unterschiedliche Strömungsbilder.

Durch die beiden Aufgabevarianten ergeben sich nach Abb. 6.6 zwei unterschiedliche Strömungsverhalten: Aufgabevariante 1 führt zu einem geschlossenen Toluolfilm, der nahezu die gesamte Platte benetzt, und auf dem die anschließend aufgebraachte Wasserphase hauptsächlich als Tropfenströmung abfließt. Mit Aufgabevariante 2 bilden sich auf der Platte Wassertröpfchen, die von einem geschlossenen dünnen Toluolfilm umgeben und auch überlagert werden. Diese Unterscheidung des Strömungsverhaltens kann insbesondere bei niedrigen Flüssigkeits-

belastungen beobachtet werden. Steigen die beiden Flüssigkeitsbelastungen (vor allem die von Wasser) an, so gehen beide Strömungsverhalten ineinander über und es sind sowohl Wassertropfen auf dem Toluolfilm als auch Wasserrinnale unter dem Toluolfilm zu beobachten. Da nicht bekannt ist, welches Strömungsverhalten (auch bei niedrigen Flüssigkeitsbelastungen) in realen Strömungsprozessen, bspw. in dreiphasig betriebenen Packungskolonnen, vorliegt, wird die Aufgabevariante zunächst als weiterer Einflussparameter neben den Volumenströmen für die beiden flüssigen Phasen gesehen und als solcher untersucht.

6.3.1 Versuchsplan

Aufgrund dieser Voruntersuchungen können nun weiterführende strukturierte Untersuchungen geplant werden, um genaue Aussagen über das Verhalten von Oberflächengeschwindigkeit und Schattenfläche bei Änderung der Einflussparameter treffen zu können und eventuelle Trends der Zielgrößen vorhersagen zu können. Dazu wird gemäß Abschnitt 3.2 ein faktorieller Versuchsplan aufgestellt, in dem der Einfluss der drei Parameter Toluolbelastung (Re_T), Wasserbelastung (Re_W) und Aufgabevariante (FC) auf die Zielgrößen Oberflächengeschwindigkeit von Wasser, Oberflächengeschwindigkeit von Toluol und Schattenfläche von Wasser ermittelt werden soll. Dazu werden Wasser und Toluol mit den Aufgaberohren auf Platte 2 aufgegeben, und die Strömung mit der JAI-Kamera aufgenommen. Zur Ermittlung der Geschwindigkeiten wird die Strömung mit dem Stroboskop bei 250 Hz Blitzfrequenz doppelbelichtet. Um die Traceranzahldichte zu erhöhen, werden ISOSPHERES-Partikel zur Wasserphase hinzugegeben. Der Neigungswinkel der überströmten Platte wird auf 45° eingestellt.

Tabelle 6.1: Variationsniveaus der Einflussparameter für den Versuchsplan zur Geschwindigkeits- und Schattenflächenmessung.

Parameter	Faktor	Niveau	
		-	+
Re_T	A	72,4	160,3
FC	B	1	2
Re_W	C	71,7	145,6

Die Einflussparameter werden gemäß Tab. 6.1 jeweils auf zwei unterschiedlichen Niveaus (+ = hohes Niveau, – = niedriges Niveau) variiert. Die gewählten Bereiche für die Toluolbelastung entsprechen dabei Kolonnenbelastungen von $B = 23 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ bzw. $52 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, für die Wasserbelastung entsprechen die Werte Kolonnenbelastungen von $B = 30 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ bzw. $62 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Aus Tab. 6.1 ergibt sich folglich ein 2^3 -Versuchsplan mit 8 durchzuführenden Versuchen. Die Variation der Faktoren in jedem Versuch sind in Tab. 6.2 angegeben. Da es sich bei Faktor B jedoch um einen diskreten Versuchsparameter handelt, können keine zusätz-

Tabelle 6.2: Faktorieller Versuchsplan zur Bestimmung der Oberflächengeschwindigkeiten und Schattenflächen der mehrphasigen Filmströmung.

Versuch	Faktor		
	A	B	C
(1)	-	-	-
a	+	-	-
b	-	+	-
ab	+	+	-
c	-	-	+
ac	+	-	+
bc	-	+	+
abc	+	+	+

Tabelle 6.3: Gemittelte Messwerte für die Oberflächengeschwindigkeiten sowie die Schattenfläche aus dem Versuchsplan.

Versuch	$u_{s,Wasser}$ m/s	$u_{s,Toluol}$ m/s	$a_{P,Wasser}$ m^2/m^2
(1)	0,590	0,358	0,096
	0,608	0,346	0,093
a	0,632	0,569	0,086
	0,611	0,592	0,082
b	0,532	0,397	0,097
	0,566	0,419	0,093
ab	0,549	0,443	0,083
	0,636	0,476	0,089
c	0,516	0,304	0,151
	0,516	0,262	0,193
ac	0,560	0,279	0,191
	0,540	0,289	0,200
bc	0,576	0,413	0,149
	0,500	0,386	0,131
abc	0,640	0,448	0,122
	0,607	0,353	0,084
Mittelwert	0,5736	0,3958	0,1213

lichen Mittelpunktversuche durchgeführt werden, wie es in Abschnitt 3.2 zur Abschätzung des Versuchsfehlers empfohlen wurde. Stattdessen wird daher der Versuchsplan doppelt ausgeführt, d.h. jeder Punkt im Versuchsplan wird zweimal vermessen, wodurch sich insgesamt 16 durchzuführende Versuche ergeben. Die Verwendung von Checklisten hilft dabei sicherzustellen,

len, dass bei der Versuchsdurchführung die korrekten Parametervariationen eingestellt sind und keine systematischen Fehler gemacht werden.

Tabelle 6.4: Auswertungstabelle des Versuchsplans.

Zielgröße		Wirkung	s_i^2	f	$\bar{s}_i^2$	F
$u_{s,Wasser}$	A	0,0464	0,0086	1	0,0086	9,0566
	B	0,0043	0,0001	1	0,0001	0,0771
	C	-0,0334	0,0045	1	0,0045	4,7022
	AB	0,0181	0,0013	1	0,0013	1,3759
	AC	0,0136	0,0007	1	0,0007	0,7779
	BC	0,0438	0,0077	1	0,0077	8,0624
	ABC	0,0074				
	Summe		0,0229	6		
Rest			0,0086	9	0,0010	
$u_{s,Toluol}$	A	0,0705	0,0199	1	0,0199	12,0642
	B	0,0417	0,0070	1	0,0070	4,2344
	C	-0,1081	0,0467	1	0,0467	28,3850
	AB	-0,0443	0,0079	1	0,0079	4,7785
	AC	-0,0694	0,0193	1	0,0193	11,6966
	BC	0,0742	0,0220	1	0,0220	13,3702
	ABC	0,0443				
	Summe		0,1227	6		
Rest			0,0148	9	0,0016	
$a_{P,Wasser}$	A	-0,0084	0,0003	1	0,0003	0,9240
	B	-0,0304	0,0037	1	0,0037	12,0418
	C	0,0630	0,0159	1	0,0159	51,7894
	AB	-0,0148	0,0009	1	0,0009	2,8561
	AC	0,0015	$9,5 \cdot 10^{-6}$	1	$9,5 \cdot 10^{-6}$	0,0310
	BC	-0,0318	0,0040	1	0,0040	13,1389
	ABC	-0,0152				
	Summe		0,0248	6		
Rest			0,0028	9	0,0003	

Nach Durchführung der Versuche werden die Bilddaten wie gewohnt ausgewertet. Die gemessenen Mittelwerte für die Oberflächengeschwindigkeit der Wasserphase $u_{s,Wasser}$, der Toluolphase $u_{s,Toluol}$, sowie der Mittelwert für die Schattenfläche der Wasserphase $a_{P,Wasser}$ sind in Tab. 6.3 aufgeführt. Hieraus werden im nächsten Schritt gemäß den Gleichungen 3.2 bis 3.4 alle Haupt- und Nebenwirkungen berechnet. Ebenso lassen sich die einzelnen Quadratsummen s_i^2 (nach Glg. 3.7) und die mittleren Quadrate $\bar{s}_i^2$ (Glg. 3.8) berechnen. Die jeweiligen

Ergebnisse für die drei Zielgrößen sind in Tab. 6.4 aufgeführt. Ebenso sind die jeweiligen Versuchsfehler, bestimmt mit Glg. 3.16 und Glg. 3.17, sowie die berechneten F -Werte nach Glg. 3.18 in der Tabelle angegeben. Da davon ausgegangen wird, dass keine Wechselwirkung ABC existiert, wird deren Quadratsumme ebenfalls zur Bestimmung des Versuchsfehlers verwendet.

Bei Engelman (1995) kann nun der tabellierte F -Wert für ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ nachgeschlagen werden:

$$F_{(0,95)}(1, 9) = 5,12 \quad (6.1)$$

Gemäß Glg. 3.18 sind alle Wirkungen mit einer Wahrscheinlichkeit von $(1 - \alpha) = 95\%$ signifikant, deren berechneter F -Wert größer ist als der tabellierte. Dies bedeutet, dass z.B. die Oberflächengeschwindigkeit von Wasser signifikant von der Hauptwirkung A sowie der Wechselwirkung BC abhängig ist, oder anders ausgedrückt, dass die Wassergeschwindigkeit maßgeblich von der Toluolbelastung beeinflusst wird, aber bspw. nicht von der Aufgabevariante. Diese hat dafür im Zusammenspiel mit der Wasserbelastung wiederum einen signifikanten Einfluss auf die Wassergeschwindigkeit, sodass zurückgeschlossen werden kann, dass auch die Wasserbelastung, als Hauptwirkung betrachtet, noch einen Einfluss auf die Wassergeschwindigkeit hat, obwohl der F -Test an dieser Stelle negativ ausfällt.

6.3.2 Vorhersagegleichungen

Wie man jetzt schon erkennen kann, ist die Deutung der einzelnen Haupt- und Wechselwirkungen auf eine bestimmte Zielgröße auf diese Weise sehr umständlich und nicht sehr anschaulich. Daher werden im Folgenden für alle drei Zielgrößen gemäß Abschnitt 3.4 Vorhersagegleichungen aufgestellt, anhand derer dann Grafiken erstellt werden und Parametereinflüsse leichter erklärt werden können. Dazu wird zunächst eine Transformation der Koordinaten durchgeführt. Die drei Einflussgrößen werden den Gleichungen 3.20 und 3.21 entsprechend umgeformt zu:

$$X_A = \frac{Re_T - 116,45}{43,85} \quad (6.2)$$

$$X_B = \frac{FC - 1,5}{0,5} \quad (6.3)$$

$$X_C = \frac{Re_W - 108,65}{36,95} \quad (6.4)$$

Mit den durch den F -Test als signifikant eingestuften Einflussgrößen können dann gemäß Glg. 3.22 Vorhersagegleichungen für die drei Zielgrößen Wasseroberflächengeschwindigkeit, Toluoloberflächengeschwindigkeit und Wasserschattenfläche aufgestellt werden:

$$u_{s,Wasser} = (0,574 + 0,023 \cdot X_A - 0,017 \cdot X_C + 0,022 \cdot X_B \cdot X_C) \cdot \frac{m}{s} \quad (6.5)$$

$$u_{s,Toluol} = (0,396 + 0,035 \cdot X_A - 0,054 \cdot X_C - 0,035 \cdot X_A \cdot X_C + 0,037 \cdot X_B \cdot X_C) \cdot \frac{m}{s} \quad (6.6)$$

$$\alpha_{P,Wasser} = (0,121 - 0,015 \cdot X_B + 0,032 \cdot X_C - 0,016 \cdot X_B \cdot X_C) \cdot 100\% \quad (6.7)$$

6.3.3 Auswertung

Anhand dieser Gleichungen können nun Diagramme erstellt werden, die das Verhalten einer Zielgröße bei Änderung der Einflussparameter veranschaulichen. Die Abbildungen 6.7a–c zeigen die Einflüsse der untersuchten Faktoren auf die drei Zielgrößen. So bewirkt z.B. eine Erhöhung der Toluolbelastung Re_T nach Abb. 6.7a eine Parallelverschiebung des ansteigenden $u_{s,Wasser}$ -Trends zu höheren Geschwindigkeiten. Durch diese Parallelverschiebung wird der Einfluss einer Hauptwirkung deutlich und lässt sich physikalisch damit erklären, dass der Toluolfilm bei größerer Belastung dicker wird und dessen Oberflächengeschwindigkeit zunimmt. Die Wassertropfen auf dem Toluolfilm fließen dadurch auf einer schneller bewegten Oberfläche als zuvor, wodurch sich ihre eigene Geschwindigkeit erhöht. Wird dagegen die Aufgabevariante auf $FC = 2$ geändert, so erkennt man eine Steigungsänderung des Trends: mit zunehmender Wasserbelastung Re_W sinkt nun die Oberflächengeschwindigkeit ab. Die Steigungsänderung veranschaulicht hierbei die Wechselwirkung zwischen der Aufgabevariante und der Wasserbelastung, und kann damit erklärt werden, dass sich die Wasserrinnsale nun unter dem Toluolfilm befinden. Bei kleinen Wasserbelastungen bilden sich sehr dünne und gerade Rinnsale aus, die unter dem Toluolfilm mit hoher Geschwindigkeit hinwegströmen können. Erhöht sich aber die Wasserbelastung, bilden sich auf den Rinnsalen Unregelmäßigkeiten und Wellen wie im einphasigen Fall. Dadurch entwickelt sich eine sehr viel größere Phasengrenzfläche zur Toluolphase und aufgrund von Reibungseffekten wird das Rinnsal deutlich abgebremst. Die starke Reibung zwischen Wasser und Toluol bewirkt im Übrigen auch wieder die Parallelverschiebung des Geschwindigkeitstrends zu höheren Geschwindigkeiten mit zunehmender Toluolbelastung.

Ähnliche Effekte lassen sich auch in den beiden anderen Diagrammen 6.7b–c erkennen. Wie Abb. 6.7b zeigt, wird hier eine deutliche Steigungsänderung durch die Erhöhung der Wasserbelastung erzielt, während die Änderung der Aufgabevariante eher zu einer Parallelverschiebung führt. Betrachtet man die Strömung genauer, bewegt sich die Wasserphase bei kleinem Re_W und $FC = 1$ hauptsächlich als Tropfen oben auf dem Toluolfilm. Der Toluolfilm wird dadurch kaum beeinflusst und wird mit zunehmender Toluolbelastung schneller. Ändert sich die Aufgabevariante, fließt Wasser als Rinnsal unter dem Toluolfilm und bremst die Toluolgegeschwindigkeit dadurch ab. Wird aber die Wasserbelastung erhöht, so bilden sich, wie eingangs beschrieben, bei $FC = 1$ zwar auch Wassertropfen auf dem Film, einiges Wasser gelangt aber auch unter die Toluolphase und bildet dort Rinnsale. Ebenso verhält es sich bei $FC = 2$, wo

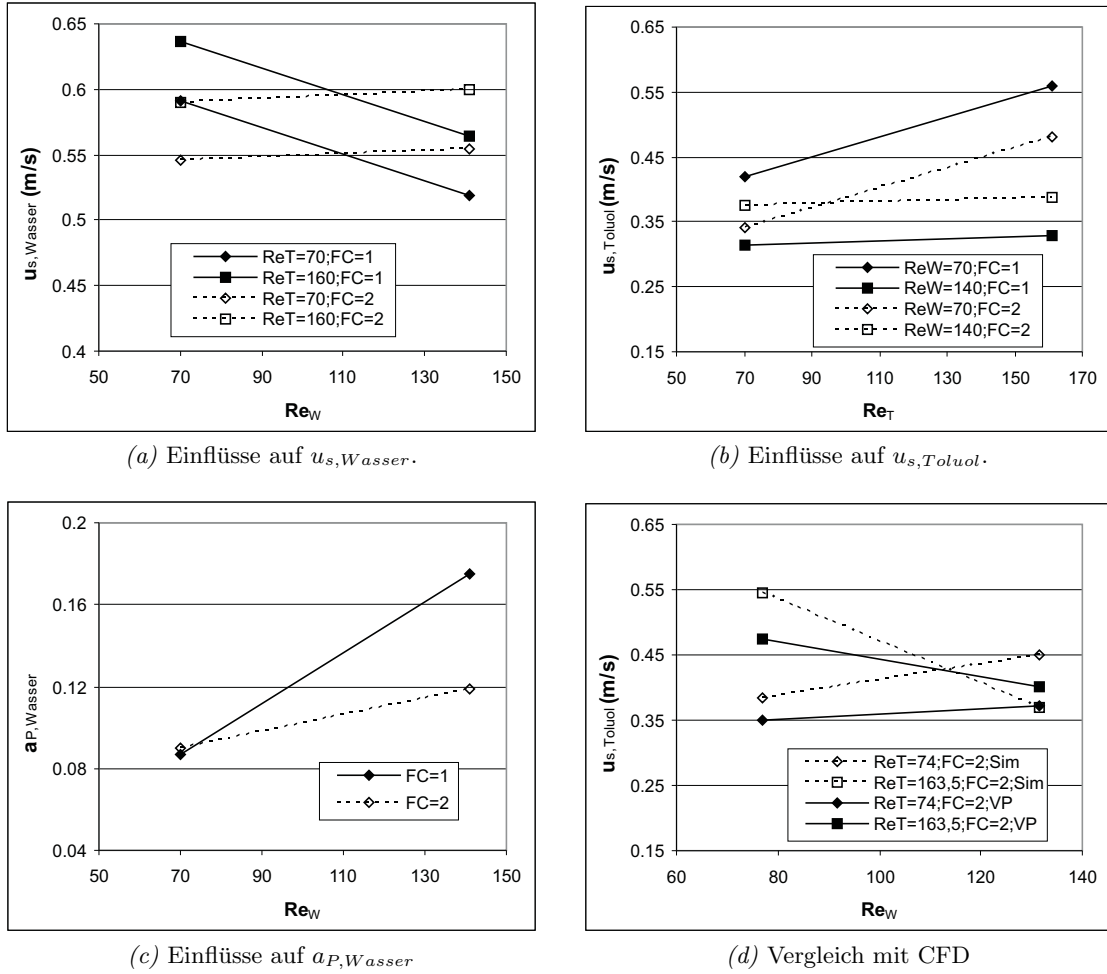


Abbildung 6.7: Parametereinflüsse auf die Zielgrößen $u_{s,Wasser}$, $u_{s,Toluol}$ und $a_{P,Wasser}$, sowie der Vergleich zwischen CFD (Sim) (Ausner et al., 2005c) und Versuchsplan (VP).

sich von den Rinnsalen unter dem Toluolfilm auch Tropfen ablösen, die dann auf dem Toluolfilm weiter strömen. Alles in allem wird die Toluolphase dadurch so stark beeinflusst, dass es zu einer deutlichen Verminderung der Oberflächengeschwindigkeit kommt.

Bei der Messung der Wasserschattenfläche kann kein signifikanter Einfluss der Toluolbelastung auf die Ausbreitung der Wasserphase ermittelt werden. Stattdessen führt aber wie in Abb. 6.7c dargestellt die Änderung der Aufgabevariante hier zu einer deutlichen Steigungsänderung, was wiederum auf die starke Wechselwirkung zwischen Re_W und FC verweist. Während bei niedrigen Wasserbelastungen in beiden Aufgabevariationen nahezu gleiche Schattenflächen gemessen werden können, erhöht sich bei großen Belastungen die Schattenfläche merklich wenn $FC = 1$ gewählt wird, was darauf zurückzuführen ist, dass das Wasser in diesem Fall zusätzlich zu den Rinnsalen sehr viele große Tropfen bildet und die Schattenfläche dadurch vergrößert. Dagegen formen sich bei $FC = 2$ eher höhere Rinnsale, die somit nur wenig zur

Vergrößerung der Schattenfläche beitragen, und von denen sich kleinere Tropfen ablösen als bei $FC = 1$.

Abschließend soll noch gezeigt werden, dass auch die CFD-Simulation in der Lage ist, diese komplexen Strömungsformen zu berechnen und ähnliche Geschwindigkeitsverläufe abzubilden. Dazu ist in Abb. 6.7d die Oberflächengeschwindigkeit der Toluolphase als Funktion der Wasserbelastung mit zusätzlicher Variation der Toluolbelastung aufgetragen. Da aus den Simulationen für Vergleichszwecke nur Rechnungen mit Aufgabevariante $FC = 2$ aus [Ausner et al. \(2005c\)](#) vorliegen, ist die Variation der Aufgabekonfiguration nicht dargestellt. Wie schon in Abb. 6.7b gezeigt wurde, existiert eine starke Wechselwirkung zwischen der Toluol- und der Wasserbelastung, die hier in einer deutlichen Änderung der Trendsteigung bei Erhöhung der Toluolphase resultiert. Abb. 6.7d zeigt eindeutig, dass diese Trendänderung ebenfalls durch die Simulation nachgebildet werden kann. Auch die Lage der simulierten Trends deckt sich gut mit denen aus dem Versuchsplan.

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass es sich bei der mehphasigen Filmströmung um eine sehr komplexe Strömungsform handelt. Ebenso komplex sind auch die Abhängigkeiten von Zielgrößen und Einflussparametern, wie die Auswertung des Versuchsplans ergeben hat. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bei der mehrphasigen Filmströmung bei entsprechender Flüssigkeitsbelastung deutlich kleinere Oberflächengeschwindigkeiten für eine Phase gemessen werden als im jeweils einphasigen Strömungsfall. Dieser Umstand gilt sowohl für die Wasserphase als auch für die Toluolphase, was auf eine starke Wechselwirkung zwischen beiden Phasen schließen lässt.

6.4 Fluidicken

Die Bestimmung der unterschiedlichen Fluidicken der Wasser-Toluolströmung wird mit Hilfe der mehrphasigen LIF auf der um 45° geneigten Platte 2 durchgeführt. Die beiden Flüssigkeiten werden mit Aufgabevariante $FC = 2$ (vgl. Abb. 6.6) auf die Platte aufgegeben und mit der Mintron-Kamera bei $1/500s$ Belichtungszeit aufgenommen. Um die Farbstoffreaktion von Rhodamin B in Wasser und Toluol so gering wie möglich zu halten, wird ständig frische Rhodamin B-Wasser-Lösung mit einer Konzentration von $1,39 \cdot 10^{-5} mol/l$ zugegeben, während die MNPH-Toluol-Lösung mit einer Konzentration von $3,4 \cdot 10^{-5} mol/l$ zurückgeführt und im Kreis gefahren wird.

Im Folgenden wird der Einfluss der beiden Flüssigkeitsbelastungen Re_W und Re_T auf markante Strömungsmerkmale wie Rinnsalhöhe und -breite für die Wasserströmung bzw. Meniskusbildung und Basisfilmdicke für die Toluolströmung untersucht. Dazu werden die Belastungen in einem ähnlichen Bereich, wie er schon in Kapitel 6.3 untersucht wurde (s. Tab. 6.5), auf jeweils drei Niveaus variiert.

Nach Aufnahme jeweils eines Hintergrundbildes für beide Filterkonfigurationen werden beide Kalibrationsküvetten mit entsprechender Farbstofflösung gefüllt und aufgenommen. Neben

Tabelle 6.5: Variationsbereich der Flüssigkeitsbelastungen für die mehrphasige Fluidickenmessung

Parameter	Niveau		
	-	0	+
Re_T	90	115	160
Re_W	70	105	140

der linearen Abhängigkeit zwischen Fluiddicke und Fluoreszenzintensität für Rhodamin B in Wasser (s. Abb. 5.18) weist die mit Toluol gefüllte Küvette ebenfalls einen Anstieg der Fluoreszenzintensität mit zunehmender Fluiddicke auf, der, wie Abb. 6.8 zeigt, durch eine lineare Ausgleichsfunktion angenähert werden kann.

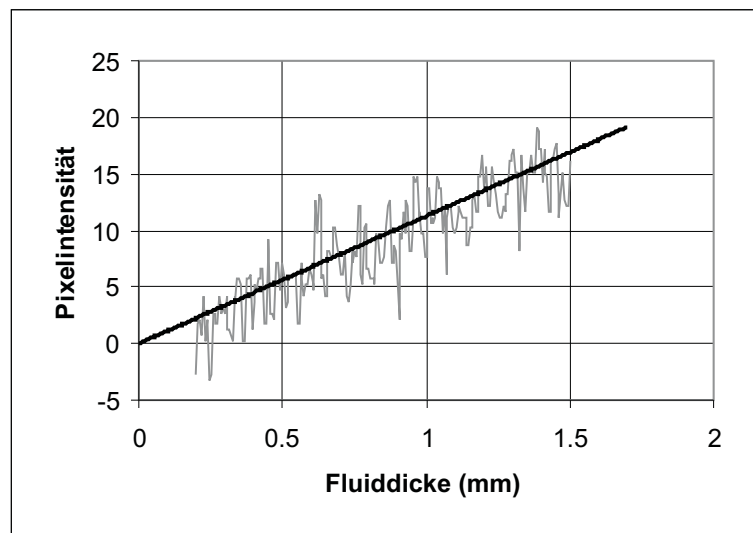


Abbildung 6.8: Kalibrationsfunktion der MNPH-Toluollösung.

Die anschließend aufgenommenen Fluoreszenzbilder der Strömung werden wie schon im einphasigen Fall in die Software SigmaScan geladen und die Pixelintensität an charakteristischen Stellen ausgelesen. Dazu werden Geraden an diesen Stellen manuell positioniert, wie es in Abb. 6.9 für die mit Rhodamin gefärbte Wasserphase sowie die mit MNPH markierte Toluolphase dargestellt ist. Bei der Wasserströmung sind vor allem Höhe und Breite der aufgenommenen Rinnsale von Interesse, während bei der Toluolphase neben den Menisken M am Plattenrand und dem Basisfilm BF auch die nähere Umgebung der Wasserrinnsale R vermessen wird.

6.4.1 Wasserphase

Sowohl bei der Wasser- als auch bei der Toluolphase ergeben sich durch die Aufgabe mit den Schlauchpumpen und den daraus resultierenden Pumpstößen lokale Unterschiede im jeweili-

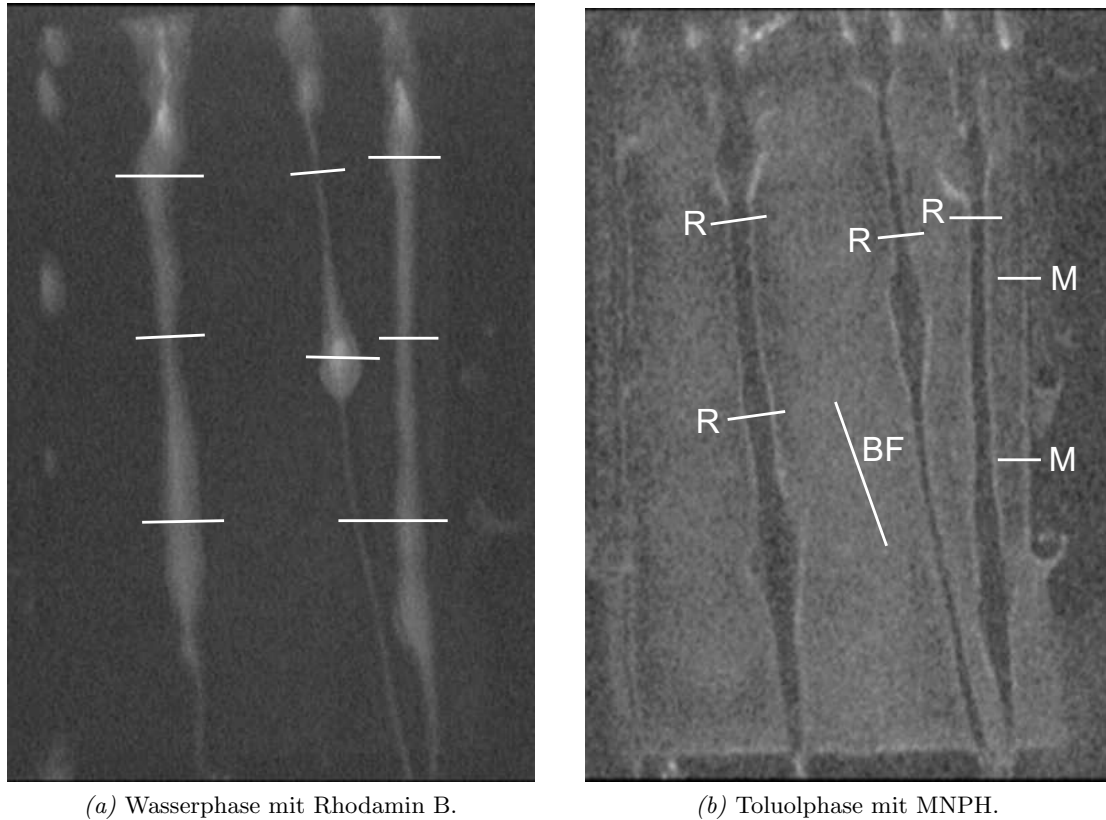


Abbildung 6.9: Mehrphasige Fluididdickenmessung: Geraden werden manuell im Bild gezogen, um die Dickenprofile an interessierenden Stellen wie bei Menisken M , Rinnsalen R oder im Basisfilm BF zu messen.

gen Volumenstrom. Insbesondere die Wasserrinnsale in Abb. 6.9a weisen neben gleichmäßig geformten Rinnsalen immer wieder wellen- bzw. tropfenförmige Verdickungen auf, die zu einer starken Variation der Rinnsaldicken und -höhen führt. Die Auswertung der Wasserrinnsale ergibt dabei einen deutlichen Zusammenhang zwischen Rinnsalhöhe und Rinnsalbreite. Je nach lokalem Volumenstrom existieren sowohl flache, schmale Rinnsale als auch hohe, breite Rinnsale. Die Rinnsalhöhe besitzt jedoch einen Grenzwert, d.h. bei großen lokalen Volumenströmen bleibt die Rinnsalhöhe eher konstant und die Rinnsalbreite nimmt weiter zu. Dieses Verhalten ist für unterschiedliche Flüssigkeitsbelastungen in Abb. 6.10 aufgetragen. Zum einen erkennt man hier, dass bei niedriger Toluolbelastung (Abb. 6.10a) eine Erhöhung der Wasserbelastung zu höheren Rinnsalen bei kleinerer Breite führt, was bereits in Abschnitt 6.3 im Anstieg der Oberflächengeschwindigkeit beobachtet wurde. Zum anderen werden durch Erhöhung der Toluolbelastung (Abb. 6.10b) niedrigere und dafür breitere Rinnsale gebildet, wobei eine Erhöhung der Wasserbelastung kaum noch Auswirkungen auf die Gestalt der Rinnsale besitzt. Der gemessene Grenzwert für die Rinnsalhöhe liegt bei niedriger Toluolbelastung bei etwa $2,5\text{mm}$, bei hoher Toluolbelastung dagegen um $2,0\text{mm}$. Diese absoluten Werte soll-

ten aufgrund der beschränkten Fluoreszenzkalibration bis $1,5\text{mm}$ zwar kritisch betrachtet werden, da eine Nichtlinearität der Fluoreszenzintensität in größeren Dickenbereichen nicht ausgeschlossen ist. Der Trend der abnehmenden Rinnsaldicke bei steigender Toluolbelastung ist aber eindeutig.

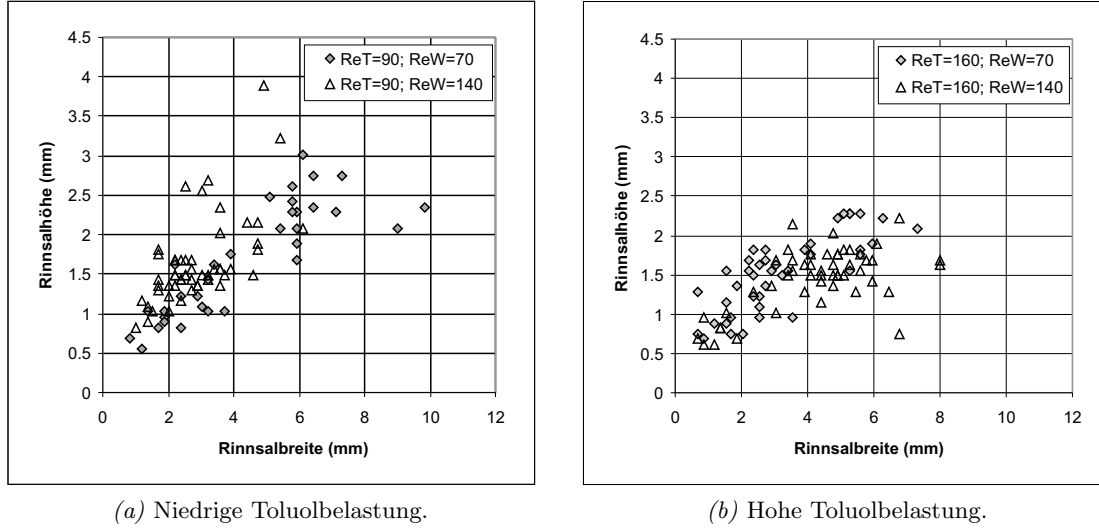


Abbildung 6.10: Zusammenhang zwischen Rinnsalbreite und Rinnsalhöhe in Abhängigkeit der Flüssigkeitsbelastungen.

In einem nächsten Schritt werden aus diesen Messdaten Mittelwerte sowie deren Standardabweichungen für die Rinnsalhöhen und Rinnsalbreiten gebildet und mit Daten aus der CFD (Repke et al., 2006) verglichen. Dieser Vergleich ist in Abb. 6.11 dargestellt. Zusätzlich sind hier die aus der Literatur entnommenen Beziehungen für die einphasige Rinnsalströmung, wie sie in Abschnitt 5.5.3 schon vorgestellt wurden, aufgetragen. Diese Beziehungen von Doniec (1991) und El-Genk und Saber (2001) sind zwar eigentlich für die einphasige aufreißende Wasserströmung entwickelt worden, sollen hier aber auf ihre eventuelle Anwendbarkeit für mehrphasige Rinnsalströmungen hin überprüft werden. Außerdem wird die im einphasigen Fall gültige Annahme, das Rinnsal besitze im Profil die Form eines Kreissegments, hier überprüft. In die Berechnungen der Rinnsaldicken gehen die gemessenen mittleren Rinnsalbreiten sowie der Kontaktwinkel zwischen Wasser, Toluol und Stahl mit $\theta = 124^\circ$ (Ausner et al., 2005b) ein.

In Abb. 6.11 liegen die gemessenen mittleren Rinnsaldicken bei etwa $1,5\text{mm}$, und die gemessenen Standardabweichungen nehmen mit zunehmender Flüssigkeitsbelastung ab. Die mit CFD bestimmten Rinnsaldicken liegen bei mittleren Werten um 1mm deutlich unter den Messwerten, weisen aber ebenfalls einen abnehmenden Trend der Standardabweichung mit zunehmender Flüssigkeitsbelastung auf und zeigen im Vergleich zu den einphasigen Ansätzen aus der Literatur die beste Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Die mit der Beziehung

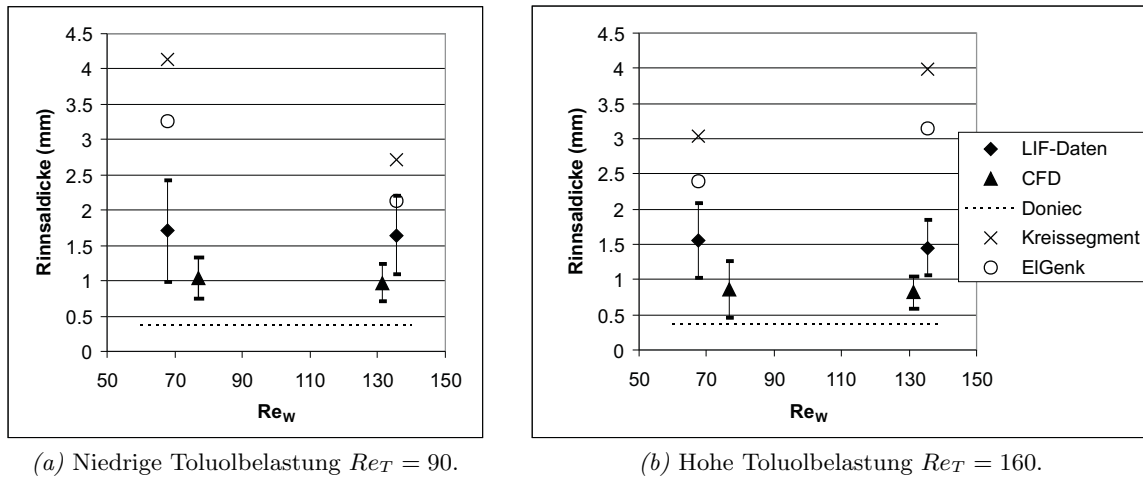


Abbildung 6.11: Vergleich der Rinnssaldicke unter Anwesenheit von Toluol zu einphasigen Beziehungen aus der Literatur.

von Doniec (1991) abgeschätzten Rinnssaldicken liegen hier bei viel zu kleinen Dicken, während die Annahme des Kreissegments und die Beziehung von El-Genk und Saber (2001) zu große Rinnssaldicken liefern. Dieses Ergebnis zeigt, dass der Einfluss der Toluolphase auf die Wasserphase sehr stark ist und bei der Modellierung der Strömung nicht vernachlässigt werden darf. Die CFD-Simulation stellt zur mehrphasigen Strömungsmessung bislang die beste Möglichkeit dar.

6.4.2 Vergleich MNPH zu Rhodamin B

Die MNPH-Toluollösung wird zunächst ohne die Anwesenheit von Wasser bei $Re_T = 115$ vermessen, um die Vergleichbarkeit zur Toluolfilmmessung mit Rhodamin B aus Abschnitt 5.5.2 festzustellen. Der Vergleich wird anhand der zuvor bereits verwendeten Parameter, die die Strömungsform charakterisieren, durchgeführt: die Basisfilmdicke zur Beschreibung des Basisfilms, die Ausbildung von Menisken (Höhe und Breite), sowie das Wellenprofil (Höhenunterschied zum Basisfilm, Länge der Welle und Länge der Wellenfront).

In Tab. 6.6 sind die gemessenen Parameter für die Rhodamin B und die MNPH-Lösung dargestellt. Bei der Messung der Basisfilmdicke werden sehr gut übereinstimmende Werte für die beiden Farbstofflösungen ermittelt. Ebenso werden mit beiden Lösungen ähnliche Längen und Breiten gemessen. Diese hängen zwar nicht direkt von der Farbstoffintensität ab (Kalibration erfolgt über die Längenkoordinaten im Bild), indirekt beeinflusst die Intensität aber die gute Detektierbarkeit dieser Größen. Leichte Unterschiede zwischen den Messwerten liegen hingegen in den Parametern, die große Dicken wie die Wellenhöhe oder die Meniskushöhe repräsentieren. Diese Differenzen liegen jedoch in einem tolerierbaren Bereich und sind vor allem von der manuellen Auswertung beeinflusst (Werte hängen stark davon ab, welche Stelle

Tabelle 6.6: Vergleich charakteristischer Fluidickenparameter eines Toluolfilms bei $Re_T = 115$ bei unterschiedlichen Farbstoffen.

Parameter	Rhodamin B (mm)	MNPH (mm)
Basisfilm (BF)	0,15	0,15
Meniskushöhe	0,83	1,01
Meniskusbreite	2,14	2,16
Wellenhöhe $-BF$	0,91	1,14
Wellenlänge	14,6	12,8
Wellenfrontlänge	2,15	2,10

der Strömung für die Intensitätsmessung ausgewählt wird).

Zudem zeigen diese Vergleichsmessungen aber auch, dass die MNPH-Intensität eine kleinere Steigung der Kalibrationsfunktion und damit eine geringere Sensitivität besitzt als Rhodamin B: für den Fluidickenunterschied von $0,2 - 1,5\text{mm}$ werden durch MNPH etwa 15 Intensitätsstufen, durch Rhodamin B fast 20 Intensitätsstufen verwendet. Außerdem weist die MNPH-Lösung ein schlechteres Signal-Rausch-Verhältnis auf als die Rhodamin-Lösung und führt somit zu ungenaueren Ergebnissen. Das detektierte MNPH-Signal reicht jedoch aus, um Aussagen über Trends und Abhängigkeiten der Dicken von den Flüssigkeitsbelastungen der mehrphasigen Filmströmung zu erhalten, was im Folgenden beschrieben werden soll.

6.4.3 Toluolphase

Die bei der mehrphasigen Filmströmung aufgenommene Toluolphase ist bereits in Abb. 6.9b dargestellt worden. Im Vergleich zur einphasigen Toluolströmung zeigt diese Strömung neben den bekannten Merkmalen wie Meniskusbildung M oder Basisfilmdicke BF weitere Intensitätsveränderungen entlang der Wasserrinnsale R . So wird z.B. an den Rinnsalrändern eine erhöhte Farbstoffintensität aufgenommen, was darauf schließen lässt, dass die Toluolphase hier Menisken ausbildet. Zwischen diesen Rinnsalmenisken sinkt die Intensität dagegen auf sehr kleine Werte, die vergleichbar mit dem Hintergrund sind, ab. Welchen Einfluss die Flüssigkeitsbelastungen auf diese Dickenmerkmale besitzen soll im weiteren Verlauf diskutiert werden.

Auf den aufgenommenen Strömungsbildern kann zunächst beobachtet werden, dass an den Plattenrändern häufig Wasserrinnsale entlang strömen und selten der Toluolfilm angrenzt. Daher gibt es auch kaum Möglichkeiten, Menisken des Toluolfilms am Plattenrand zu vermessen. Die wenigen Messwerte erlauben dennoch die Aussage, dass sich die am Plattenrand ausgebildeten Menisken nicht signifikant von denen der einphasigen Toluolströmung unterscheiden, weder in der Breite noch in der Höhe. Eine Abhängigkeit der Wasserbelastung kann hier nicht

festgestellt werden.

Ein Basisfilm bildet sich zwischen den Wasserrinnsalen aus und kann, wie in Abb. 6.9b gezeigt, vermessen werden. Hierbei kann analog zur reinen Toluolfilmströmung eine Erhöhung des Basisfilms mit steigender Toluolbelastung ermittelt werden. Dabei verhält sich die Dickenänderung bei Erhöhung von Re_T mit ähnlichem Anstieg wie bei der in Abb. 5.23 gezeigten Basisfilmänderung der reinen Toluolströmung. Zudem müsste es entsprechend der Ergebnisse aus den Oberflächengeschwindigkeitsmessungen (Abschnitt 6.3) und den daraus folgenden Überlegungen auch einen signifikanten Einfluss der Wasserbelastung auf die Dicke des Toluolbasisfilms geben. Dieser Einfluss kann in den bisherigen Messungen jedoch nicht ermittelt werden. Allerdings ist die bisher realisierte Intensitätsmessung wahrscheinlich nicht sensitiv genug, um eine solche Abhängigkeit mit Sicherheit detektieren zu können. Zukünftige Untersuchungen mit höher auflösender Messtechnik könnten hier noch die erwartete Abhängigkeit der Wasserbelastung auf die Basisfilmdicke aufzeigen.

Von den die Wasserrinnsale umgebenden Toluolmenisken werden sowohl der jeweilige Höhenunterschied zum Basisfilm (mit Vorsicht zu betrachten, da die Messung durch eine stark gekrümmte Phasengrenze erfolgt) sowie die Meniskusbreite vermessen. Außerdem wird der Abstand zwischen dem linken und dem rechten Meniskusmaximum ermittelt, um diesen Wert mit der Rinnsalbreite zu vergleichen. Zusätzlich wird die relative Pixelintensität an der Stelle gemessen, wo sich das Wasserrinnsal befindet. Die aus mehreren Aufnahmen gemittelten Messwerte sind in Tab. 6.7 angegeben.

Tabelle 6.7: Messwerte für die Meniskusbildung an Wasserrinnsalen in Abhängigkeit der Flüssigkeitsbelastungen.

Re_T	90	90	160	160
Re_W	70	140	70	140
Meniskushöhe $-BF$ (mm)	0,42	0,58	0,77	0,67
Meniskusbreite (mm)	0,84	0,79	0,81	0,90
Abstand Menisken (mm)	3,8	4,1	3,4	3,6
rel. Rinnsalintensität (–)	0,04	0,16	0,21	0,34

Betrachtet man zunächst die relative Meniskushöhe, steigt diese einerseits mit Erhöhung der Toluolbelastung an. Dies geschieht analog zum Verhalten der Menisken am Plattenrand im einphasigen Strömungsfall (vgl. Abschnitt 5.5.2). Andererseits steigt die Meniskushöhe auch mit der Wasserbelastung an, was durch die damit verbundene Erhöhung der Wasserrinnsal Dicke (vgl. Abschnitt 6.4.1) erklärt werden kann. Ebenfalls parallel zur Meniskusbildung am Plattenrand weisen die Menisken entlang der Wasserrinnsale konstante Breiten ohne Einfluss der Flüssigkeitsbelastungen auf.

In einem nächsten Schritt wird der Abstand zwischen den Meniskusmaxima gemessen und

für jede Bildserie gemittelt. Die Messwerte aus Tab. 6.7 zeigen einen mittleren Abstand zwischen den Menisken von $3 - 4\text{ mm}$, der gut mit den in Abschnitt 6.4.1 gemessenen mittleren Wasserrinnsalbreiten von $2,9 - 4,2\text{ mm}$ übereinstimmt. Demzufolge begrenzen die Toluolmenisken genau die Wasserrinnsale und können somit auch zur Bestimmung der Rinnsalbreite herangezogen werden. Signifikante Einflüsse der beiden Flüssigkeitsbelastungen auf die Rinnsalbreiten bzw. den Meniskusabstand können dabei nicht festgestellt werden.

Zusätzlich ist das MNPH-Intensitätsprofil eines von Toluol umströmten Wasserrinnsals im Querschnitt in Abb. 6.12 dargestellt. Aufgetragen ist hier die relative, also die auf das Intensitätsmaximum bezogene Pixelintensität als Funktion der Plattenbreitenkoordinate z . Die beiden das Rinnsal umgebenden Menisken auf der linken und der rechten Seite sind markiert. Aufgrund der Tatsache, dass sich kein MNPH in der Wasserphase lösen lässt, müsste demnach der Bereich zwischen den Menisken keine Intensität aufweisen. Zwischen den Spitzen der Menisken zeichnet sich aber ein gewisser Intensitätsanstieg ab, der nur auf das Vorhandensein von Toluol an dieser Stelle schließen lässt.

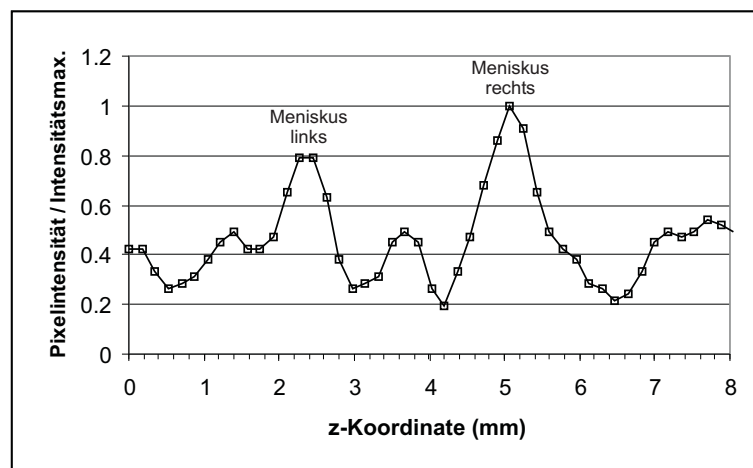


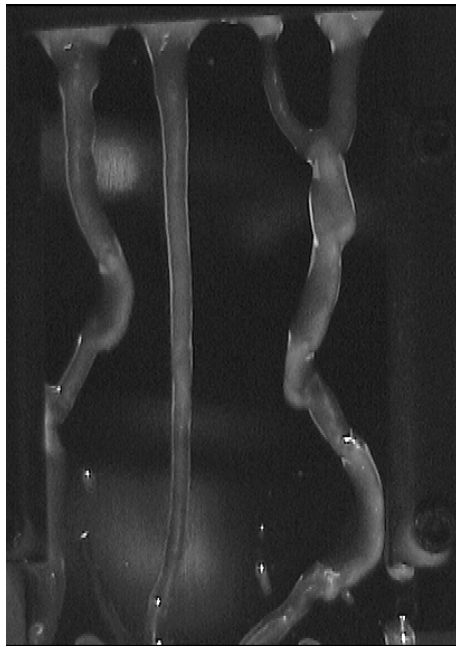
Abbildung 6.12: MNPH-Intensitätsprofil eines Wasserrinnsals im Querschnitt.

Die Auswertung aller aufgenommenen Bildserien zeigt, dass auf sämtlichen Bildern MNPH-Intensitäten im Bereich der Wasserrinnsale detektiert werden können. Diese Rinnsalintensitäten zwischen den Menisken sind gemittelt in Tab. 6.7 für verschiedene Flüssigkeitsbelastungen dargestellt. Man erkennt hierbei, dass insbesondere bei hohen Toluolbelastungen hohe Rinnsalintensitäten gemessen werden können. Die zuvor in Abschnitt 6.3 gemachten Beobachtungen, dass die Toluolphase die Wasserrinnsale bedeckt, kann demzufolge auch messtechnisch erfasst und nachgewiesen werden. Wasser und Toluol besitzen somit eine große Phasengrenzfläche zueinander, die für die starken Wechselwirkungen (Abbremsung beider Phasen, Beeinflussung der Rinnsalgröße, etc.) zwischen den beiden Phasen verantwortlich ist.

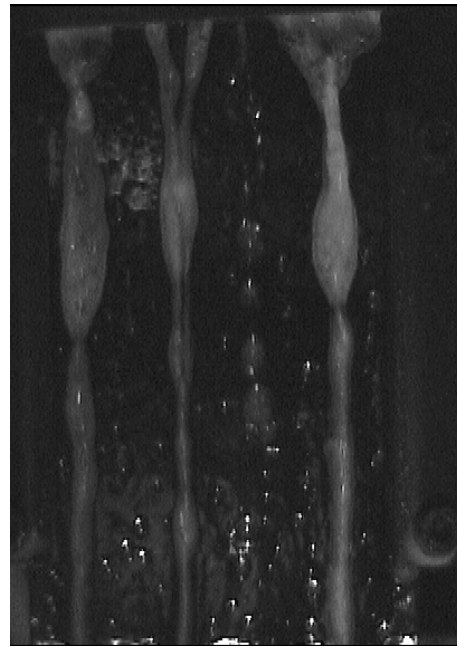
6.4.4 Stabilisierung der Strömung

In diesem Zusammenhang soll abschließend noch auf einen weiteren interessanten Aspekt der mehphasigen Filmströmung hingewiesen werden: im Vergleich zur einphasigen Wasserrinnsalströmung weist die Toluolphase eine gewisse Stabilisierung der Wasserphase auf, die z.B. für den beobachteten Effekt der teilweise verbesserten Trennleistung mehrphasig betriebener Packungskolonnen (Villain et al., 2005b) verantwortlich sein könnte.

Ein direkter Vergleich zwischen einer Wasserrinnsalströmung ohne Anwesenheit von Toluol und einer mit gleichzeitiger Toluolströmung ist in Abb. 6.13 dargestellt. Während die reine Wasserphase in Abb. 6.13a sehr stark auf dem Untergrund mäandriert, und vom Rinnsal immer wieder einzelne Tropfen abreißen, stellt sich durch Zugabe der Toluolphase in Abb. 6.13b eine sehr stabile Wasserströmung mit geraden Rinnsalen ein, die auch über längere Zeit ihren Strömungsweg nicht verlassen.



(a) Reine Wasserströmung.



(b) Wasser-Toluolströmung.

Abbildung 6.13: Stabilisierung der Wasserrinnsalströmung durch Zugabe von Toluol.

Diese Stabilisierung ermöglicht es einerseits, die Fluidicken von beiden Phasen zu unterschiedlichen Zeitpunkten (zeitlicher Versatz entsteht vor allem durch das Tauschen der Anregungs- und Emissionsfilter) aufnehmen zu können, ohne dass sich das Strömungsbild in der Zwischenzeit merklich ändert. Andererseits könnte die Stabilisierung auch in der industriellen Anwendung einen erstaunlichen Effekt bewirken: wie erste CFD-Simulationen von Filmströmungen auf stark gewellten Packungsblechen zeigen, führt eine mehrphasige Filmströmung mit zwei flüssigen Phasen zu einer deutlichen Stabilisierung der Flüssigkeitsströmung

auf dem Packungsblech und minimiert den unerwünschten Effekt der Maldistribution im Vergleich zur Strömung mit nur einer flüssigen Phase erheblich. Nähere Informationen dazu finden sich bei [Repke et al. \(2006\)](#).

In diesem Abschnitt wurde aufgezeigt, dass die LIF eine gute Möglichkeit bietet, die einzelnen Dicken mehrphasiger Filmströmungen zu bestimmen, und den Kontrast sowie die Identifikation beider Phasen deutlich zu verbessern. Dabei ist durch die Anpassung des Versuchsaufbaus auf das Erzielen eines möglichst hohen Signal-Rausch-Verhältnisses zu achten, um eine gute Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu erreichen und damit die Aussagekraft der Ergebnisse zu verstärken. Die manuelle Auswertung der Bildinformationen ist für erste Analysen der Strömung ausreichend und führt zu belastbaren Ergebnissen. Um den Zeitaufwand dieser Messungen und die Subjektivität zu minimieren, sollten tiefergehende Untersuchungen aber zukünftig mit einer automatischen Bildauswertungsmethode durchgeführt werden, wie sie im folgenden Abschnitt ansatzweise für die Geschwindigkeitsmessung vorgestellt wird.

6.5 Automatische Bildauswertung

Die Motivation für die automatische Bildauswertung ist, dass die manuelle Bildauswertung sehr viel Zeit in Anspruch nimmt und ein Automatismus eine erhebliche Arbeitserleichterung darstellen würde. Zusätzlich würde dadurch die Möglichkeit des Auftretens systematischer Messfehler durch unterschiedliche Personen, die die Bildauswertungen durchführen, drastisch reduziert. Im Rahmen dieser Arbeit wurden ausschließlich Ansätze zur automatischen Geschwindigkeitsmessung an zweiphasigen Flüssigkeitsströmungen entwickelt, die im Folgenden näher erläutert werden sollen. Weiterführende Überlegungen zur automatischen Fluidickenmessung bzw. Schattenflächenmessung werden am Ende dieses Abschnitts vorgestellt.

6.5.1 Geschwindigkeiten

In der Particle Imaging Velocimetry (PIV) werden die Bilddaten schon seit Entwicklung der Messmethode automatisch mit Hilfe von Korrelationsfunktionen ausgewertet, da eine hohe Partikelanzahldichte auf den PIV-Bildern eine Einzelverfolgung von Tracern unmöglich macht. Die PIV-Bilder werden dazu in kleinere Fenster aufgeteilt. Bspw. über die Kreuzkorrelation von zwei aufeinander folgenden Bildern wird dann die mittlere Verschiebung der in einem Fenster abgebildeten Tracer ([Adrian, 1991](#)) bestimmt. In der PTV kamen dagegen erst später Bestrebungen auf, die Bildauswertung automatisch durchführen zu lassen und dadurch Zeit einzusparen. Dazu geht man zunächst von der Annahme aus, dass sich der Geschwindigkeitsvektor eines Tracers von einem Bild zum nächsten nur wenig ändert, und dass sich mehrere Tracer in einer begrenzten Region ungefähr in die gleiche Richtung bewegen. Durch Vergleichen mehrerer nacheinander aufgenommener Bilder können dann Wahrscheinlichkeiten für die mögliche Verschiebung eines Partikels berechnet werden. Die Partikelverschiebungen mit den

höchsten Wahrscheinlichkeiten werden dann zur weiteren Auswertung herangezogen (Racca und Dewey, 1988; Kim und Lee, 2002).

Für die oben bereits aufgenommenen Doppelbelichtungen der zweiphasigen Strömung wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Auswertungsmethode auf der Grundlage der Autokorrelation in MATLAB[®] entwickelt (Näheres zum Programmcode findet sich in Kijak (2006)). Bei der Autokorrelation wird ein Signal (hier das Einzelbild) mit sich selbst verglichen und die Lageverschiebung markanter Punkte im Signal (hier die Tracer) berechnet. Dazu müssen die Bilder zunächst vom Hintergrund bereinigt und binarisiert werden. Nach Berechnung der Autokorrelationsfunktion

$$R(\Delta x, \Delta z) = \int_{Bild} I(x, z) \cdot I(x + \Delta x, z + \Delta z) dx dz \quad (6.8)$$

mit $I(x, z)$ für den Grauwert des Bildes an der Stelle (x, z) erhält man dann eine Matrix, die Tracerverschiebungen aus dem Mittelpunkt in alle möglichen Punkte auf dem Bild als Peaks darstellt. Diese Matrix kann wie in Abb. 6.14 (zunächst beispielhaft für eine einphasige Wasserströmung) als Konturplot dargestellt werden, wobei die einzelnen Peaks durch Höhenlinien angegeben werden wie auf einer Landkarte. Die Höhe eines Verschiebungspeaks verhält sich dabei proportional zur Häufigkeit der gefundenen Tracerverschiebungen auf diesen Punkt.

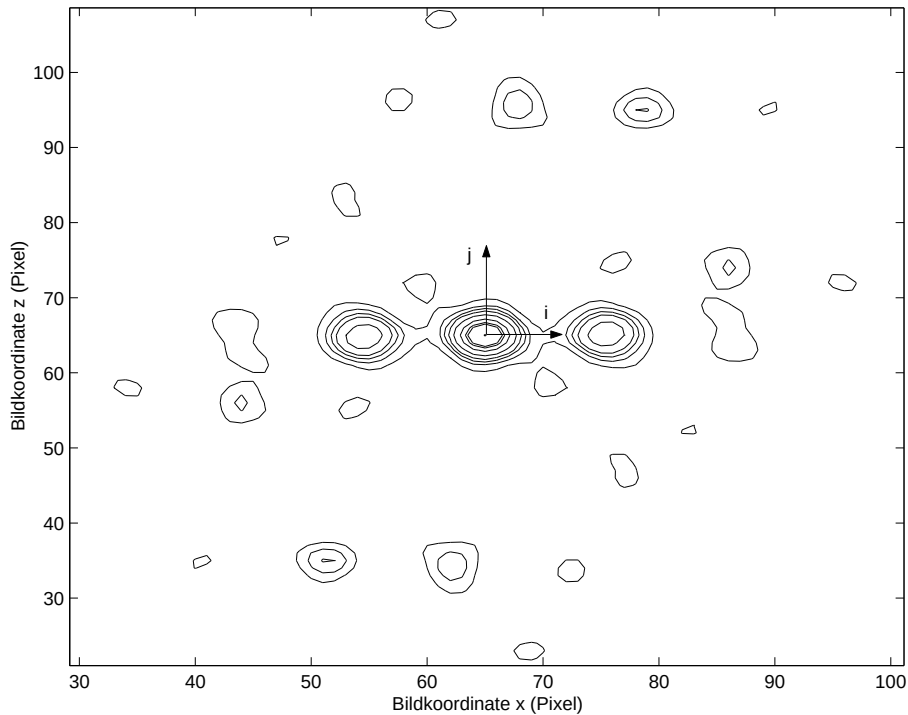


Abbildung 6.14: Karte der Tracerverschiebungen aus dem Mittelpunkt $i = j = 0 \text{ Pixel}$ durch Autokorrelation, dargestellt durch Höhenlinien.

Aus dieser Verschiebungskarte werden nun als nächstes alle ungültigen Verschiebungen

herausgefiltert: da keine Rückströmung und auch nur geringe Querströmung zu erwarten ist, werden nur Verschiebungspeaks als weiterhin gültig betrachtet, die in positiver i -Richtung liegen und ein Verhältnis

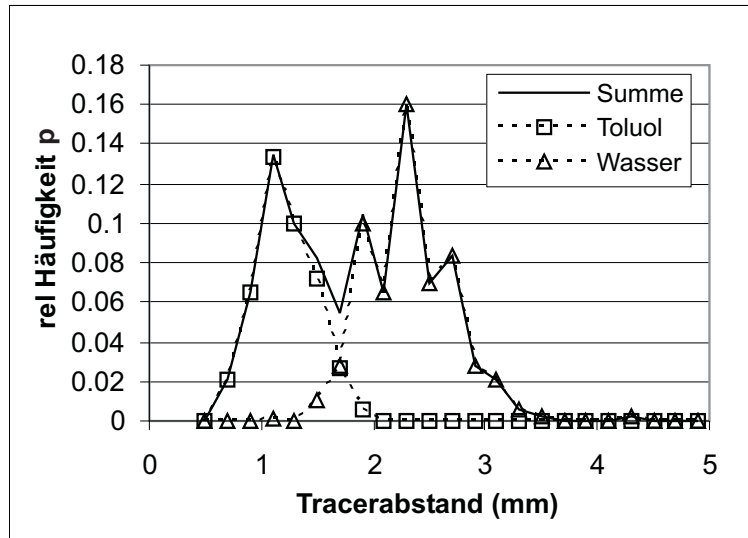
$$\frac{i}{|j|} \geq 1 \quad (6.9)$$

aufweisen. Werden diese Regeln auf Abb. 6.14 angewendet, so bleiben nur noch wenige Peaks im Bild gültig. Im nächsten Schritt wird die Höhe der noch gültigen Peaks betrachtet. Da die Höhe mit der Häufigkeit der gefundenen Verschiebungen auf den jeweiligen Punkt ansteigt, weist also ein hoher Peak auf eine häufig im Bild gefundene Tracerverschiebung hin. Der Abstand des höchsten gültigen Peaks (in Abb. 6.14 also etwa bei $x = 75Pixel$ und $z = 65Pixel$) zum Mittelpunkt (hier: $x = z = 64Pixel$) entspricht damit der häufigsten Tracerverschiebung im Zeitraum Δt und wird als signifikante Verschiebung für die Berechnung der mittleren Geschwindigkeit im Bildausschnitt ausgewählt.

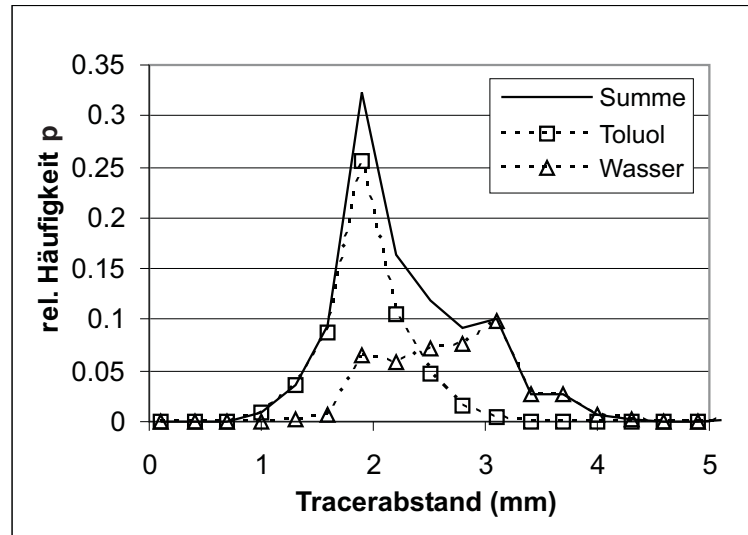
Werden mit diesem Verfahren die oben angeführten Doppelbelichtungen der zweiphasigen Strömung behandelt, können je nach Bildausschnitt in der Korrelationsmatrix (Abb. 6.14) zwei ungefähr gleich hohe Peaks gefunden werden, die beide in gleicher Richtung vom Mittelpunkt aus gesehen liegen und unterschiedliche Abstände zum Mittelpunkt aufweisen. Aufgrund der bereits gemachten Erfahrungen aus Abschnitt 6.3 kann hier der Peak mit dem kleineren Abstand zum Mittelpunkt der Toluolphase mit der geringeren Geschwindigkeit und der Peak mit dem größeren Abstand der Wasserphase mit der höheren Geschwindigkeit zugeordnet werden. Allerdings tritt bei der automatischen Bildauswertung häufiger der Effekt auf, dass sich die beiden Verschiebungspeaks nicht so eindeutig trennen lassen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die beiden Geschwindigkeiten sehr dicht beieinander liegen, oder die Streuungen der Geschwindigkeitsverteilungen sehr groß sind und sich gegenseitig überlagern.

Zur Veranschaulichung dieser Problematik sind in Abb. 6.15 zwei Gesamtverteilungen der in den mehrphasigen Oberflächengeschwindigkeitsmessungen aus Abschnitt 6.3 ermittelten Tracerabständen dargestellt. Da die Phasentrennung bereits manuell bei der Geschwindigkeitsmessung durchgeführt wurde, können die einzelnen Verteilungen jetzt als Referenz genutzt werden. In Abb. 6.15a führt die Summe der Toluol- und Wassertracerverteilung zu einer zweigipfeligen Verteilung, deren Spitzen jeweils einer Phase leicht zugeordnet werden können. Anders verhält es sich dagegen bei Abb. 6.15b. Hier bildet die Toluolverteilung zwar einen markanten Peak aus, dieser liegt aber sehr dicht an der sehr breiten und flachen Wasserverteilung. In der Summe führt dieser Umstand zu einer schiefen Gesamtverteilung mit einem Gipfel. Eine Trennung in zwei separate Phasen ist hier nur schwer möglich.

Um solche Gesamtverteilungen in einzelne Tracerverschiebungen für die Toluol- und die Wasserphase trennen zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Anpassungsalgorithmus auf Basis zweier Gaußverteilungen entwickelt. Dabei wird zunächst davon ausgegangen, dass die Tracerverschiebungen für jede Phase normalverteilt sind und jeweils durch eine Glockenkurve nach Glg. 3.1 beschrieben werden können. Die einzelnen Glockenkurven lassen sich



(a) Einfach zu trennende Tracerabstandsverteilung.



(b) Schwer zu trennende Tracerabstandsverteilung.

Abbildung 6.15: Gesamtverteilungen der mehrphasigen Tracerabstände aus den Oberflächengeschwindigkeitsmessungen. Die einzelnen Phasen lassen sich unterschiedlich leicht trennen.

jeweils mit den Parametern μ und σ sowie einem zusätzlichen Parameter h , der als Vorfaktor in Glg. 3.1 die Höhe der Glockenkurve beeinflusst, beschreiben und müssen in der Summe möglichst nahe an der gemessenen Gesamtverteilung liegen, d.h. das Fehlerquadrat soll minimal werden. Diese Anpassung der Glockenkurven wurde mit Hilfe der Evolutionsstrategie (Rechenberg, 1994) realisiert, die eine einfache Möglichkeit darstellt, Parameteranpassungen schnell und ohne großen Aufwand durchzuführen. Dazu werden aus zwei Grundzuständen (den sogenannten Eltern) durch Rekombination (Mischung der elterlichen Eigenschaften) und Mutation (leichte Veränderung der Eigenschaften) zwanzig neue Zustände (die sogenannten

Nachkommen) gebildet. Die zwei Nachkommen mit den besten Eigenschaften (kleinstes Fehlerquadrat) werden die neuen Eltern, aus denen neue Nachkommen generiert werden. Dieser Generationswechsel erfolgt entweder bis zu 1000-mal, oder bis das Fehlerquadrat des besten Nachkommen einen vorgegebenen Wert unterschreitet.

Der gesamte Programmablauf ist in Abb. 6.16 als Flussdiagramm dargestellt. Da das jeweilige Ergebnis eines Programmdurchlaufs immer vom Ergebnis anderer Durchläufe leicht abweicht, wird das Programm insgesamt 10-mal ausgeführt. Die Ergebnisse dieser 10 Durchläufe werden anschließend gemittelt. Vom Benutzer müssen vor Programmstart Startwerte für die Mittelwerte beider Phasen μ_1 und μ_2 , für die Standardabweichungen σ_1 und σ_2 , sowie für die Höhe h_1 ($h_2 = 1 - h_1$) vorgegeben werden. Nach Einlesen der Startwerte werden im Programm die Normalverteilungen und die Fehlerquadrate der Eltern berechnet und anschließend daraus die nachfolgende Generation errechnet. Dabei muss jeder Nachkomme eine Höhe von $0,4 \leq h_1 \leq 0,6$ aufweisen, um sicherzustellen, dass die beiden Normalverteilungen ähnliche Formen besitzen (andernfalls führt es häufig zu einer sehr schmalen, hohen und einer sehr breiten, flachen Verteilung, die physikalisch nicht sinnvoll sind). Erfüllen alle Nachkommen dieses Kriterium werden die zwei Nachkommen mit den kleinsten Fehlerquadraten als neue Eltern eingesetzt. Die Generationsschleife ist beendet, wenn das Residuum den Wert 10^{-5} unterschreitet, und der beste Nachkomme wird als bestes Ergebnis ausgewählt. Die nachfolgende Abfrage überprüft, ob die errechneten Standardabweichungen bzw. Varianzen eine gewisse Größe aufweisen. Zu kleine Standardabweichungen, die z.B. bei sehr dicht aneinander liegenden Mittelwerten auftreten, führen zu schlechten Endergebnissen. Nur wenn diese Bedingung erfüllt ist, wird das Ergebnis der Rechnung ausgegeben und ein neuer Programmdurchlauf kann beginnen. Der vollständige Programmcode hierzu ist im Anhang B abgedruckt.

Die Anpassung der beiden in Abb. 6.15 dargestellten Gesamtverteilungen durch jeweils zwei Glockenkurven wird in Abb. 6.17 gezeigt. In Abb. 6.17a führen zwei Glockenkurven mit ähnlicher Standardabweichung σ und unterschiedlichen Mittelwerten μ zur optimalen Anpassung der zuvor gemessenen Gesamtverteilung. Vergleicht man die errechneten Mittelwerte nun mit

Tabelle 6.8: Vergleich der mit Gaußkurven angepassten Verteilungen (*ES*) mit den zuvor gemessenen Verteilungen (*gem*): 2-gipfelig bzw. schief.

Größe	2-gipfelig			schief		
	<i>ES</i>	<i>gem</i>	Fehler	<i>ES</i>	<i>gem</i>	Fehler
μ_T	1,17	1,12	4,5%	1,93	1,79	7,8%
σ_T	0,26	0,25	4%	0,17	0,36	53%
μ_W	2,27	2,24	1,3%	2,53	2,56	1,2 %
σ_W	0,41	0,41	0%	0,66	0,57	16%

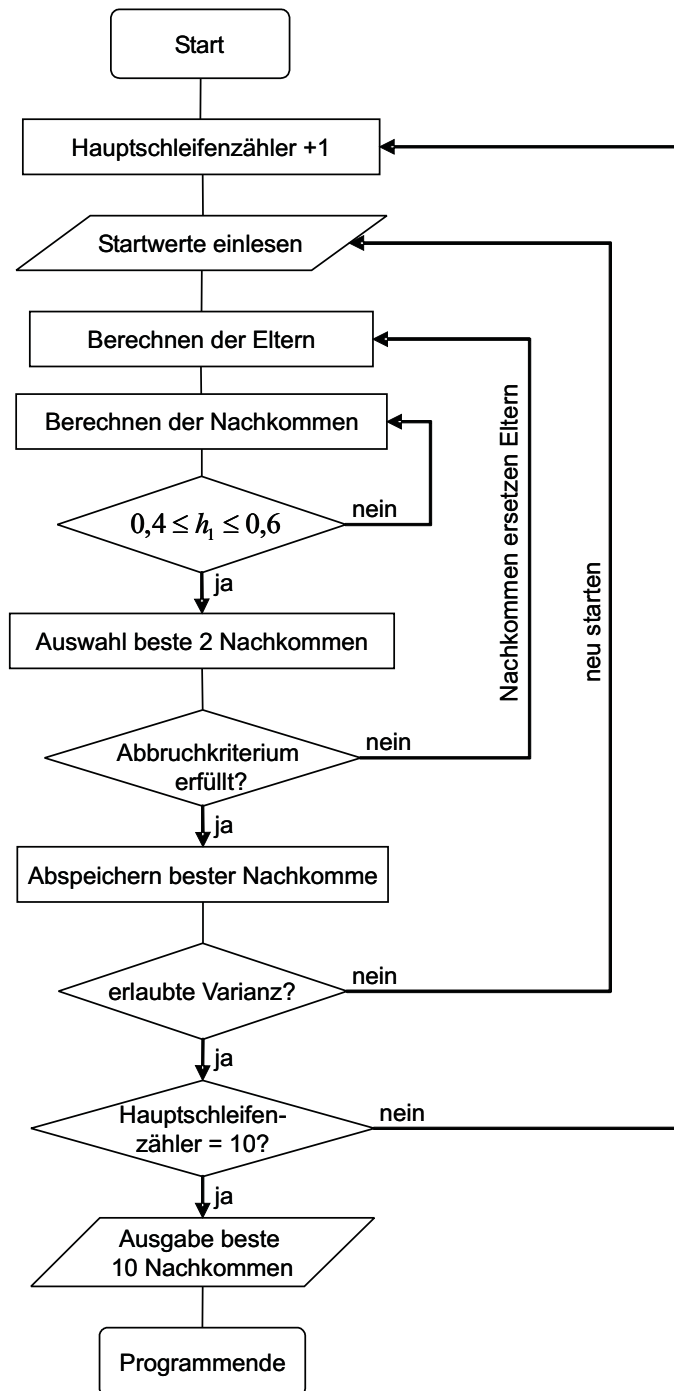
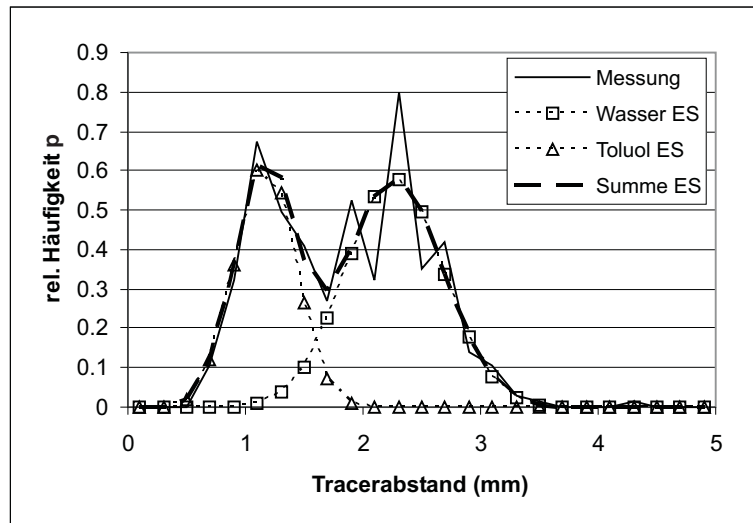
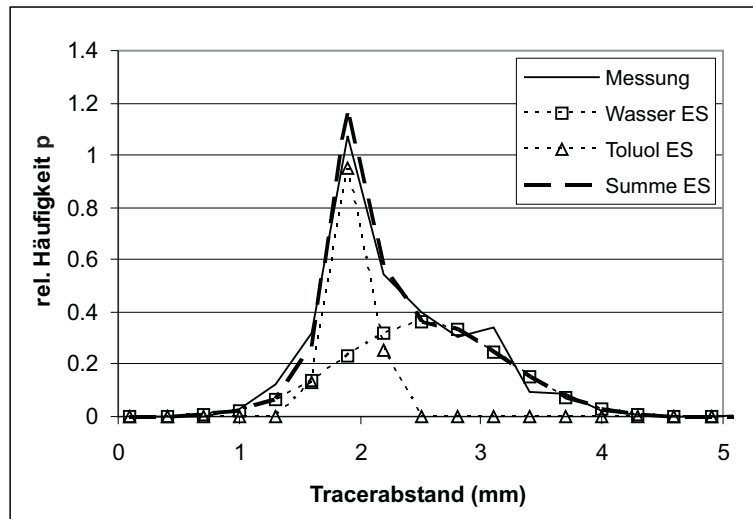


Abbildung 6.16: Flussdiagramm für die Gaußanpassung mittels evolutionstrategischem Algorithmus.



(a) Anpassung zweipfeler Verteilung.



(b) Anpassung schiefer Verteilung.

Abbildung 6.17: Anpassung der Gesamtverteilungen durch zwei Gaußkurven

den in Abb. 6.15a dargestellten Messwerten für jede Phase (s. Tab. 6.8), so findet man hier leicht überbestimmte Mittelwerte mit einem Fehler von unter 5%, sowie nahezu identische Standardabweichungen. Anders verhält es sich beim Vergleich der Anpassung in Abb. 6.17b mit den Messwerten in Abb. 6.15b. Hier zeigen die Mittelwerte eine recht gute Übereinstimmung mit einem Fehler von unter 10%, obgleich beide Mittelwerte in der Abb. sehr dicht beieinander liegen. Die Standardabweichungen weichen dagegen stark von einander ab (vgl. Tab. 6.8), geben aber den gemessenen Trend – kleines σ_T und großes σ_W – recht gut wider.

Für die spätere Verwendung der Gaußanpassung ist zudem hauptsächlich der Mittelwert von Interesse, da hieraus direkt durch Multiplikation mit der Blitzfrequenz des Stroboskops die mittlere Oberflächengeschwindigkeit errechnet wird. Daher ist vor allem eine gute Über-

einstimmung (Fehler $< 10\%$) der gemessenen und abgeschätzten Mittelwerte und weniger der Standardabweichungen wichtig, was durch die Anwendung des Algorithmus genügend genau erzielt werden kann.

6.5.2 Fluiddicke und Schattenfläche

Für die automatische Bildauswertung bezüglich der Fluiddicke bzw. der Schattenfläche existieren bislang nur erste gedankliche Ansätze, die bei praktischer Umsetzung und Weiterentwicklung jedoch schnell zu guten und sicheren Ergebnissen führen können. Für die Messung beider Größen können die aufgenommenen Fluoreszenzintensitäten in den Pixelbildern verwendet werden. Jedes Pixel repräsentiert dabei einen bestimmten Punkt auf der überströmten Platte, wodurch bereits eine Rasterung bzw. Diskretisierung der Strömung erfolgt.

Zur Messung der Schattenfläche könnte z.B. nun ein Algorithmus entwickelt werden, der die Pixel zeilenweise ausliest und nach Sprüngen in der Intensität sucht. Ändert sich dabei die Pixelintensität innerhalb weniger Punkte signifikant von dunkel nach hell oder umgekehrt, so kann an dieser Stelle auf das Vorhandensein einer Phasengrenzfläche geschlossen werden. Die Abtastung des gesamten Bildes ergäbe somit eine Art Karte der Phasengrenze, deren eingeschlossene Fläche leicht berechnet werden kann.

Ähnlich besitzen auch die Merkmale der Fluidickenmessung eine charakteristische Form, über die sie sich identifizieren und bestimmen lassen. So könnte z.B. der Meniskus am Plattenrand über seinen Intensitätsanstieg vom Basisfilm und den plötzlichen Intensitätsabfall zum Plattenrand hin automatisch beim zeilenweisen Auslesen der Pixelintensitäten erkannt und vermessen werden. Da in diesem Fall aber Informationen von jedem Punkt im Bild nicht unbedingt notwendig sind, könnte ein gröberes Raster, das über das Bild gelegt wird, und an dem die Pixel dann ausgelesen und ausgewertet werden, zu einer insgesamt schnelleren Bildauswertung bei ähnlichem Informationsgehalt führen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zur messtechnischen Untersuchung einer mehrphasigen Filmströmung, wie sie z.B. in dreiphasig betriebenen Packungskolonnen auftritt, werden bekannte Messverfahren wie Particle Tracking Velocimetry (PTV) und Light Induced Fluorescence (LIF) angewendet und weiterentwickelt. Mit Hilfe dieser optischen Messverfahren ist es möglich, die Strömung anhand der Ausbreitung, der Oberflächengeschwindigkeit und der Fluiddicke für jede flüssige Phase zu charakterisieren. Damit werden sowohl einphasige Wasser- und Toluolströmungen auf geneigten Stahlplatten und -strukturen analysiert, als auch mehrphasige Toluol-Wasserströmungen auf Stahlplatten.

Bei den einphasigen Strömungen können geschlossene Filmströmungen sowie aufreißende Strömungen mit anschließender Rinnsal- und Tropfenbildung untersucht werden. Eine Analyse verschiedener glatter und strukturierter Platten zeigt einen signifikanten Einfluss auf den statischen Kontaktwinkel und damit auf die Benetzungseigenschaften der Flüssigkeiten. Zusätzlich werden zwei Vorrichtungen zur Flüssigkeitsaufgabe untersucht und mit Literaturdaten sowie Ergebnissen aus der CFD-Simulation diskutiert. Hierbei zeigt sich, dass eine Flüssigkeitsaufgabe mittels Überlaufwehr eher der Definition eines Fallfilms, also einer nur durch Gravitation getriebenen Filmströmung, entspricht. Die Aufgabe mit einem Aufgaberohr dagegen liefert höhere Anfangsgeschwindigkeiten und führt dabei zu einer stabileren Strömung. Der Vergleich mit Daten und Korrelationen aus der Literatur zeigt für die einphasige Flüssigkeitsströmung eine gute Übereinstimmung. Allerdings wird hierbei aber auch erkennbar, dass die in der Theorie gemachten Annahmen (glatter und wellenfreier Film, zweidimensionale Strömung, kreisförmiges Rinnsalprofil, etc.) häufig so nicht mit der Realität übereinstimmen und für jeden speziellen Strömungsfall neu überprüft werden sollten. Aus diesem Grund ist es wichtig, CFD-Simulationen, die den gegebenen Randbedingungen entsprechend angepasst sind (z.B. Rinnsalströmung als Eingangsrandbedingung, falls vorhanden und möglich), mit genauen Messdaten zu validieren. Anschließend können die validierten CFD-Modelle dafür genutzt werden, um einerseits zusätzliche Informationen zur Strömung zu erhalten (z.B. Größe und Struktur der Phasengrenzfläche), die messtechnisch nur mit großem Aufwand ermittelt werden könnten. Andererseits können mit Hilfe der CFD leichter und schneller Parametervariationen untersucht werden, die im Experiment nur mit erheblichem Mehraufwand analysiert werden könnten.

Die untersuchte mehrphasige Flüssigkeitsströmung zeichnet sich dadurch aus, dass die wässrige Phase als Rinnsal- und Tropfenströmung vorliegt, die organische Phase dagegen als Film-

strömung, und sich beide Phasen gegenseitig überlagern und dabei stark beeinflussen. Mit Hilfe der gewählten Messverfahren lassen sich zudem beide Phasen optisch getrennt voneinander betrachten und auswerten. Die dargestellten Untersuchungen ergeben, dass die Wechselwirkungen zwischen den Flüssigkeiten so groß sind, dass es zur gegenseitigen Abbremsung der flüssigen Phasen kommt. Strömen die Flüssigkeiten gemeinsam über die Platte, wird eine geringere Oberflächengeschwindigkeit gemessen als im einphasigen Strömungsfall. Des Weiteren wird die Bildung der Wasserrinnsale stark von der umgebenden Toluolströmung beeinflusst: während im einphasigen Fall ein Wasserrinnsal im Profil gut durch ein Kreissegment beschrieben werden kann, dessen Höhe im Bereich von $1 - 1,5\text{mm}$ liegt, werden durch Zugabe der Toluolströmung deutlich höhere und breitere Rinnsale erzeugt, deren Profil sich mit einem Kreissegment nicht mehr ausreichend beschreiben lässt. Aus der Literatur bekannte Korrelationen für die Beschreibung einphasiger Film- und Rinnsalströmungen können für diesen mehrphasigen Strömungsfall nicht mehr angewandt werden. Die besten Möglichkeiten zur Beschreibung bietet hierfür nur noch die CFD-Simulation.

Außerdem führt die gegenseitige Beeinflussung der beiden flüssigen Phasen zu einer Stabilisierung der gesamten Strömung. Strömt das Wasser bei geringen Belastungen alleine über die geneigte Platte, werden Rinnsale gebildet, die stark mäandrieren und fortwährend die Strömungsrichtung ändern. Durch Anwesenheit von Toluol stabilisieren sich diese Rinnsale und fließen geradlinig die Platte herab.

Die dargestellten Untersuchungen geben einen ersten Hinweis auf die komplexen Zusammenhänge der flüssigen Phasen in mehrphasigen Filmströmungen. Um genauere Erkenntnisse über das Zusammenspiel der Flüssigkeiten zu erhalten, sollten in weiterführenden Arbeiten die Geschwindigkeitsfelder der beiden flüssigen Phasen im Bereich der Phasengrenzfläche genauer studiert werden. Die Untersuchungen sollten mit Hilfe laseroptischer Messverfahren sowie stark vergrößernder Optiken erfolgen. Anhand dieser Messungen und der daraus resultierenden Erkenntnisse sollten anschließend verbesserte Möglichkeiten geschaffen werden, um derartige Strömungen zu beschreiben. Mit der Fähigkeit, die mehrphasige Filmströmung vollständig beschreiben zu können, wäre dann ein großer Schritt zur Modellierung der Dreiphasenrektifikation in Packungskolonnen getan.

A Aufstellung der verwendeten Messtechnik

A.1 Ausbreitungs/Geschwindigkeitsmessung

- JAI M40 CCD-Kamera
 - s/w-Kamera
 - 60 Vollbilder/s
 - Belichtungszeit $1/60s - 1/12.000s$
 - C-Mount Objektivanschluss
- SIGMA Makroobjektiv
 - Brennweite 50mm
 - Blendenzahl F2,8
- ELMED TURBO-STROB Stroboskop
 - Xenon-Blitzröhre
 - Blitzfrequenz $1 - 800Hz$
 - interne Triggerung
- ISOSPHERES SG-300B Tracerpartikel
 - keramische Mikrohohlkugel
 - Dichte $0,65 - 0,75g/cm^3$
 - Korngröße $10 - 300\mu m$

A.2 Fluoreszenzmessung

- Mintron 12V1EX CCD-Kamera
 - sehr lichtempfindlicher SONY EXview CCD-Chip
 - s/w-Kamera
 - 50 Halbbilder/s

- C-Mount Objektivananschluss
- SIGMA Makroobjektiv
 - Brennweite 50mm
 - Blendenzahl F2,8
- Hamamatsu Mercury-Xenon-Lamp
 - 150W Quecksilber-Xenon-Lampe
 - breites Xenon-Spektrum mit einzelnen hohen Quecksilber-Spektrallinien
- LASER COMPONENTS - Optische Filter
 - Anregungsfilter: 405nm Band-Pass mit 10nm Bandbreite
 - Anregungsfilter: 545nm Band-Pass mit 10nm Bandbreite
 - Fluoreszenzfilter: 500nm Band-Pass mit 40nm Bandbreite
 - Fluoreszenzfilter: 600nm Lang-Pass
- HELLMMA Durchfluss-Keilküvette
 - Quarzglasküvette für Durchfluss-Betrieb
 - linearer Dickenanstieg von 0,2 – 1,5mm

B Programmcode

Der evolutionsstrategische Algorithmus zur Anpassung von zwei Gaußkurven an eine Gesamtverteilung ist als VB-Macro in MS-Excel[®] implementiert.

```
Sub Makro1()  
,  
' Beginn der Hauptschleife  
  For hsz = 0 To 9  
  
  ' Einlesen der Startwerte:  
    Dim PE(1, 5) As Double  
    For i = 0 To 4  
      PE(0, i) = Worksheets("gauss").Cells(i + 2, 3).Value  
      PE(1, i) = PE(0, i)  
    Next i  
    PE(0, 5) = 1 - PE(0, 2)  
    PE(1, 5) = 1 - PE(1, 2)  
  
  ' Parameter definieren  
    AA = 1.3  
    gg = 1000  
    ll = 20  
    nn = 25  
    abbr = 0.00001  
  
  ' Einlesen von x und y  
    Dim x(49) As Double  
    Dim y(49) As Double  
    For n = 0 To (nn - 1)  
      x(n) = Worksheets("Gauss").Cells(n + 10, 1).Value  
      y(n) = Worksheets("Gauss").Cells(n + 10, 2).Value  
    Next n
```

```
' Berechnen der ersten Eltern
Dim DE(1) As Double
Dim Q(1) As Double
For i = 0 To 1
    DE(i) = 0.1
    Q(i) = 0
    For n = 0 To (nn - 1)
        g1 = PE(i, 2) / (Sqr(6.28) * PE(i, 1)) * _
            Exp(-0.5 * (x(n) - PE(i, 0)) ^ 2 / PE(i, 1) ^ 2)
        g2 = PE(i, 5) / (Sqr(6.28) * PE(i, 4)) * _
            Exp(-0.5 * (x(n) - PE(i, 3)) ^ 2 / PE(i, 4) ^ 2)
        Q(i) = Q(i) + (y(n) - g1 - g2) ^ 2
    Next n
Next i

' Generationsschleife
Dim DN(19) As Double
Dim PN(19, 5) As Double
Dim QN(19) As Double

For g = 1 To gg
    For l = 0 To (ll - 1)
        DN(l) = (DE(0) + DE(1)) / 2
        DN(l) = DN(l) * AA ^ (2 * Int(Rnd + 0.5) - 1)
        r = Int(2 * Rnd)
        For i = 0 To 4
            z = Sqr(-2 * Log(1 - Rnd) / 6) * Sin(6.28 * Rnd)
            If i = 2 Then
                Do
                    PN(l, i) = PE(r, i) + DN(l) * z
                    z = Sqr(-2 * Log(1 - Rnd) / 6) * Sin(6.28 * Rnd)
                Loop While ((PN(l, i) < 0.4) Or (PN(l, i) > 0.6))
            ,
            Debug.Print PN(l, i)
        Else
            PN(l, i) = PE(r, i) + DN(l) * z
        End If
    Next i
    PN(l, 5) = 1 - PN(l, 2)
```

```

QN(1) = 0
For n = 0 To (nn - 1)
    g1 = PN(1, 2) / (Sqr(6.28) * PN(1, 1)) * _
        Exp(-0.5 * (x(n) - PN(1, 0)) ^ 2 / PN(1, 1) ^ 2)
    g2 = PN(1, 5) / (Sqr(6.28) * PN(1, 4)) * _
        Exp(-0.5 * (x(n) - PN(1, 3)) ^ 2 / PN(1, 4) ^ 2)
    QN(1) = QN(1) + (y(n) - g1 - g2) ^ 2
Next n
Next l

' Selektion und Abbruchkriterium
For b = 0 To 1
    QB = 300
    For l = 0 To (ll - 1)
        If QN(l) < QB Then
            QB = QN(l)
            Index = l
        End If
    Next l
    DE(b) = DN(Index)
    For i = 0 To 5
        PE(b, i) = PN(Index, i)
    Next i
    If b = 0 Then
        If (Abs(Q(b) - QN(Index))) / DN(Index) < abbr Then
            g = gg + 1
        End If
    End If
    Q(b) = QN(Index)
Next b
Next g

```


C Betreute Studien- und Diplomarbeiten

Im Rahmen der Dissertation wurden folgende Diplomarbeiten betreut:

Florent Fontaine: „Entwicklung einer Methode zur Filmdickenmessung mit Hilfe der Fluoreszenz“, Diplomarbeit, TU Berlin, 2004

Guillaume Esmiol: „Evolution and Optimization of a Glass Formation Process“, Diplomarbeit, Saint-Gobain-Recherche - Frankreich/TU Berlin, 2006

Zbigniew Kijak: „Entwicklung einer automatisierten Bildauswertungsmethode für mehrphasige PTV-Aufnahmen“, Masterthesis, TU Berlin, 2006

Literaturverzeichnis

- Adam, M.: Versuchsplanung und -auswertung - Vorlesungsskript. 2004.
- Adomeit, P. und Renz, U.: Hydrodynamics of Three-dimensional Waves in Laminar Falling Films. In: *International Journal of Multiphase Flow*, Band 26:S. 1183–1208, 2000.
- Adrian, R.J.: Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics. In: *Annual Review of Fluid Mechanics*, Band 23:S. 261–304, 1991.
- Al-Sibai, F.: *Experimentelle Untersuchung der Strömungscharakteristik und des Wärmeübergangs bei welligen Rieselfilmen*. Dissertation, RWTH Aachen, 2004.
- Alekseenko, S.V., Antipin, V.A., Bobylev, A.V. und Markovich, D.M.: PIV measurements of the velocity field in the liquid film flowing down inclined cylinder. In: *6th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Pasadena, California, 21-23 Sep. 2005*. 2005.
- Arici, E.U.: *Guest-Host-Wechselwirkungen Solvatochromie und Excimerbildung*. Dissertation, Philipps-Universität Marburg, 2000.
- Ataki, A. und Bart, H.J.: Experimental Study of Rivulet Liquid Flow on an Inclined Plate. In: of Chemical, GVC-VDI Society und Engineering, Process (Hg.) *Proceedings International Conference on Distillation and Absorption*. Berlin, 2002, S. CD-ROM. ISBN 3-931384-37-3.
- Ausner, I., Hoffmann, A., Repke, J.-U., Auracher, H. und Wozny, G.: Two-liquid phase film flow over inclined plates. In: *7th World Congress of Chemical Engineering 10-14 July 2005*. Glasgow, 2005a, S. auf CD-ROM.
- Ausner, I., Hoffmann, A., Repke, J.-U. und Wozny, G.: Analyzing the velocity field of multi-phase film flow - 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation 22-24 September 2004. 2004.
- Ausner, I., Hoffmann, A., Repke, J.-U. und Wozny, G.: Experimentelle und numerische Untersuchungen mehrphasiger Filmströmungen. In: *Chemie Ingenieur Technik*, Band 77(6):S. 735–741, 2005b.

- Ausner, I., Hoffmann, A., Repke, J.-U. und Wozny, G.: Multiphase film flow investigations on inclined plates. In: Fluidsystemtechnik, Forschungsschwerpunkt (Hg.) *3rd International Berlin Workshop (IBW3) on Transport Phenomena with Moving Boundaries*. TU Berlin, Berlin, Germany, 2005c, S. 224–234. ISBN 3-00-017322-6.
- Borchers, O., Busch, C. und Eigenberger, G.: Analyse der Hydrodynamik in Blasenströmungen mit einer Bildverarbeitungsmethode. In: Prasser, H.-M. (Hg.) *Proceedings of the 2nd Workshop on Measurement Techniques for Steady and Transient Multiphase Flows*. Forschungszentrum Rossendorf, Rossendorf (Dresden), Germany, 1999, S. 66–74.
- Brackbill, J.U., Kothe, D.B. und Zemach, C.: A Continuum Method for Modelling Surface Tension. In: *Journal of Computational Physics*, Band 100:S. 335–354, 1992.
- Brauer, H.: *Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen*. Sauerländer, Aarau, 1971.
- Brauner, N. und Maron, D.M.: Characteristics of inclined thin films, waviness and the associated mass transfer. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Band 25(1):S. 99–110, 1982.
- Celata, G.P., Di Marco, P., Mariani, A. und Shah, R.K. (Hg.): *Proceedings of 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation*. ETSPisa, Pisa, Italy, 2004. ISBN 88-467-1075-4.
- Cowen, E.A. und Monismith, S.G.: A hybrid digital particle tracking velocimetry technique. In: *Experiments in Fluids*, Band 22:S. 199–211, 1997.
- Cundall, R.B., Johnson, I., Jones, M.W., Thomas, E.W. und Munro, I.H.: Photophysical Properties of DPH Derivatives. In: *Chemical Physics Letters*, Band 64(1):S. 39–42, 1979.
- Deen, N., Westerweel, J. und Delnoij, E.: Two-Phase PIV in Bubbly Flows: Status and Trends. In: *Chemical Engineering Technology*, Band 25(1):S. 97–101, 2002.
- Doniec, A.: Laminar Flow of a Liquid Rivulet Down a Vertical Solid Surface. In: *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Band 69:S. 198–202, 1991.
- Dring, R.P.: Sizing Criteria for Laser Anemometry Particles. In: *Journal of Fluids Engineering*, Band 104:S. 15–17, 1982.
- Dussan, E.B.: On the spreading of liquids on solid surfaces: static and dynamic contact lines. In: *Annual Review of Fluid Mechanics*, Band 11:S. 371–400, 1979.
- El-Genk, M.S. und Saber, H.H.: Minimum thickness of a flowing down liquid film on a vertical surface. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Band 44:S. 2809–2825, 2001.

- Engelmann, H.-D.: Planen und Auswerten von Versuchen - Vorlesungsskript. 1995.
- Ferziger, J. H. und Peric, M.: *Computational Methods for Fluid Dynamics - 3rd Edition*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2003. ISBN 3-540-42074-6.
- Ghezzehei, T.A.: Constraints on flow regimes in wide-aperture fractures. In: *Water Resources Research*, Band 40:S. W11503, 2004.
- Gladden, L.F. und Alexander, P.: Applications of nuclear magnetic resonance imaging in process engineering. In: *Measurement Science and Technology*, Band 7:S. 423–435, 1996.
- Gmehling, J. und Brehm, A.: *Grundoperationen - Lehrbuch der Technischen Chemie, Bd. 2*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York, 1996.
- Gneist, G., Schollenberger, S. und Bart, H.J.: Stoffaustauschmessungen an Einzeltropfen mittels Laser induzierter Fluoreszenz. In: *Chemie Ingenieur Technik*, Band 76(8):S. 1072–1077, 2004.
- Gregory, J. (Hg.): *Handbook of Fluorescent Probes and Research Products - Ninth Edition - by Richard P. Haugland*. Molecular Probes, Inc., Eugene, Oregon, USA, 2002.
- Grimm, A., Mühlfriedel, K. und Baumann, K.-H.: Messung von Konzentrationsprofilen an ebenen Flüssig/Flüssig-Phasengrenzen mit Laser induzierter Fluoreszenz. In: *Chemie Ingenieur Technik*, Band 74(11):S. 1582–1586, 2002.
- Hamad, F.A. und Bruun, H.H.: Evaluation of bubble/drop velocity and slip velocity by a single normal hot-film probe placed in a two-phase flow. In: *Measurement Science and Technology*, Band 11:S. 11–19, 2000.
- Hartley, D.E. und Murgatroyd, W.: Criteria for the Break-Up of Thin Liquid Layers Flowing Isothermally Over Solid Surfaces. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (7):S. 1003–1015, 1964.
- Ho, F.C.K. und Hummel, R.L.: Average velocity distributions within falling liquid films. In: *Chemical Engineering Science*, Band 25:S. 1225–1237, 1970.
- Hoffmann, A., Ausner, I., Repke, J.-U. und Wozny, G.: Aufreißende Filmströmung auf geneigten Oberflächen. In: *Chemie Ingenieur Technik*, Band 76(8):S. 1065–1068, 2004.
- Hoffmann, A., Ausner, I., Repke, J.-U. und Wozny, G.: Detailed investigation of multiphase (gas-liquid and gas-liquid-liquid) flow behavior on inclined plates. In: *Chemical Engineering Research and Design: Transactions of the Institution of Chemical Engineers: Part A*, Band 84(A2):S. 147–154, 2006.

- Iversen, V.: Einfluss einer strukturierten Heizfläche auf den Wärmeübergang und die Welligkeit eines verdampfenden Fallfilms, Diplomarbeit - TU Berlin, IET. 2005.
- Jensen, K.D.: Flow Measurements. In: *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.*, Band 26(4):S. 400–419, 2004.
- Johnson, M.F.G., Schluter, R.A., Miksis, M.J. und Bankoff, S.G: Experimental study of rivulet formation on an inclined plate by fluorescence imaging. In: *Journal of Fluid Mechanics*, (394):S. 339–354, 1999.
- Karimi, G. und Kawaji, M.: An experimental study of freely falling films in a vertical tube. In: *Chemical Engineering Science*, Band 53(20):S. 3501–3512, 1998.
- Keane, R.D. und Adrian, R.J.: Theory of cross-correlation analysis of PIV images. In: *Applied Scientific Research*, Band 49:S. 191–215, 1992.
- Kiefer, J. (Hrsg.): *Ultraviolette Strahlen*. Walter de Gruyter, Berlin, 1977.
- Kijak, Z.: Entwicklung einer automatisierten Bildauswertungsmethode für mehrphasige PTV-Aufnahmen, Diplomarbeit - TU Berlin, FG DBTA. 2006.
- Kim, H.-B. und Lee, S.-J.: Performance improvement of two-frame particle tracking velocimetry using a hybrid adaptive scheme. In: *Measurement Science and Technology*, Band 13:S. 573–582, 2002.
- Kling, K. und Mewes, D.: Visualisieren des Mikro- und Makromischens mit Hilfe zweier fluoreszierender und chemisch reagierender Farbstoffe. In: *Chemie Ingenieur Technik*, Band 75(12):S. 1844–1847, 2003.
- Kraume, M.: *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik*. Springer, Berlin Heidelberg, 2004. ISBN 3-540-40105-9.
- Krämer, J. und Stichlmair, J.: Trennleistung von Packungen bei der Dreiphasenrektifikation. In: *Chemie Ingenieur Technik*, Band 67(7):S. 888–892, 1995.
- Küster, F.W.: *Rechentafeln für die chemische Analytik - 103. Auflage*. Walter de Gruyter-Verlag, Berlin, 1985. ISBN 3110105330.
- Le Coz, J-F. und Baritaud, T.: Application of laser induced fluorescence for measuring the thickness of evaporating gasoline liquid films. In: Adrian, R.J. (Hg.) *Developments in Laser Techniques and Applications to Fluid Mechanics*. Berlin, Heidelberg, New York, 1996, S. 115–131.
- Leuthner, S. und Auracher, H.: A High Frequency Impedance Probe for Wave Structure Identification of Falling Films. In: ETPFG (Hg.) *Proceedings of the 35th Two Phase Flow Group Meeting*. Brussels, Belgium, 1997.

- Lide, D.R. (Hg.): *CRC Handbook of Chemistry and Physics - 85th Edition*. Boca Raton, FL, 2004.
- Lindken, R., Gui, L. und Merzkirch, W.: Velocity Measurements in Multiphase Flow by Means of Particle Image Velocimetry. In: *Chemical Engineering & Technology*, Band 22(3):S. 202–206, 1999.
- Liu, J., Paul, J.D. und Gollub, J.P.: Measurements of the primary instabilities of film flow. In: *Journal of Fluid Mechanics*, (250):S. 69–101, 1993.
- Lone, L.W.: *Hemodynamic evaluation of prosthetic heart valves with PIV techniques*. Dissertation, National University of Singapore, 1998.
- Lozano Avilés, M., Auracher, H. und Bänsch, E.: Experimentelle Untersuchung der Fallfilmverdampfung binärer Gemische an strukturoptimierten Heizflächen - Hauptvortrag im GRK 827 "Transportvorgänge an bewegten Phasengrenzflächen". 2004.
- Lozano-Avilés, M., Maun, A.H., Iversen, V., Auracher, H. und Wozny, G.: High Frequency Needle Probes for Time-and Space-Characteristic Measurements of Falling Films on Smooth and Enhanced Surfaces. In: Kasagi, N. (Hg.) *6th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*. Matsushima, Japan, 2005.
- Ltd., Sulzer Chemtech: Structured Packings for Distillation, Absorption and Reactive Distillation. 2003.
- Maun, A.: *Experimentelle Untersuchungen zum Wärmeübergang an verdampfenden Fallfilmen binärer Gemische - VDI Fortschrittberichte, Reihe 3, Nr. 819*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2004.
- Mei, R.: Velocity fidelity of flow tracer particles. In: *Experiments in Fluids*, Band 22:S. 1–13, 1996.
- Melling, A.: Tracer particles and seeding for particle image velocimetry. In: *Measurement Science and Technology*, Band 8:S. 1406–1416, 1997.
- Meyers, J.F.: Generation of Particles and Seeding. In: von Karman Institute for Fluid Dynamics (Hg.) *Lecture Series 1991-08 - Laser Velocimetry*. von Karman Institute for Fluid Dynamics, Brüssel, Belgien, 1991.
- Michaelis, M.: *Kapillarinduzierte Schwingungen freier Flüssigkeitsoberflächen - VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 7: Strömungsmechanik, Nr. 454*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003.
- Mitrovic, J. und Reimann, E.: Kondensation von Dampfgemischen nicht mischbarer Flüssigkeiten. In: *Chemie Ingenieur Technik*, Band 73(9):S. 1095–1115, 2001.

- Miyara, A.: Numerical Analysis on Flow Dynamics and Heat Transfer of Falling Liquid Films with Interfacial Waves. In: *Heat and Mass Transfer*, Band 35:S. 298–306, 1999.
- Nusselt, W.: Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes. In: *VDI-Zeitschrift*, Band 60(27):S. 541–546, 1916.
- Park, J.S., Kihm, K.D. und Pratt, D.M.: Molecular tagging fluorescence velocimetry (MTFV) to measure meso- to micro-scale thermal flow fields. In: ASME (Hg.) *Proceedings: International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2000)*. ASME, Orlando, Florida, 2000.
- Perry, R. H. und Green, D. W.: *Perry's Chemical Engineer's Handbook, Eighth Edition*. McGraw Hill, Aukland u. a., 1998.
- Plimon, A.: Velocity profiles in shear force driven wall films. In: *Experiments in Fluids*, Band 11:S. 339–340, 1991.
- Podgorski, T., Flesselles, J.-M. und Limat, L.: Dry arches within flowing films. In: *Physics of Fluids*, Band 11(4):S. 845–852, 1999.
- Poseio, P., Poelma, C., Kaijen, R. und Delfos, R.: On the feasibility of PIV-velocity measurements in liquid-liquid flows simultaneously in both phases - Posterpräsentation bei ISTP 2004, Pisa. 2004.
- Prasad, A.K.: Particle image velocimetry. In: *Current Science*, Band 79(1):S. 51–60, 2000.
- Pucci, A., Mikitenko, P. und Asselineau, L.: Three-Phase Distillation. Simulation and Application to the Separation of Fermentation Products. In: *Chemical Engineering Science*, Band 41(3):S. 485–494, 1986.
- Pulvirenti, B. und Sotgia, G.: Experimental Analysis of Water Fluid Dynamics in Oil-Water Wavy-Stratified Regime. In: (Celata et al., 2004).
- Racca, R.G. und Dewey, J.M.: A method for automatic particle tracking in a three-dimensional flow field. In: *Experiments in Fluids*, Band 6:S. 25–32, 1988.
- Rechenberg, I.: *Evolutionstrategie '94*. Frommann-Holzboog, Stuttgart, 1994. ISBN 3-7728-1642-8.
- Reinecke, N., Petritsch, G., Schmitz, D. und Mewes, D.: Tomographische Messverfahren - Visualisierung zweiphasiger Strömungsfelder. In: *Chemie Ingenieur Technik*, Band 69(10):S. 1379–1394, 1997.
- Repke, J.-U.: *Experimentelle und theoretische Analyse der Dreiphasenrektifikation in Packungs- und Bodenkolonnen*. Dissertation, TU Berlin, Fachgebiet DBTA, 2002.

- Repke, J.-U., Hoffmann, A., Ausner, I., Villain, O. und Wozny, G.: On the track to understanding three phases in one tower - eingereicht für Distillation & Absorption, 4-6 Sep. 2006, London - UK. 2006.
- Repke, J.-U. und Wozny, G.: Experimental Investigations of Three-Phase Distillation in A Packed Column. In: *Chemical Engineering & Technology*, Band 25(2):S. 513–519, 2002.
- Römisch, U.: Statistik für Prozesswissenschaftler - Vorlesungsskript. 2004.
- Saber, H. H. und El-Genk, M. S.: On the breakup of a thin liquid film subject to interfacial shear. In: *Journal of Fluid Mechanics*, Band 500:S. 113–133, 2004.
- Schagen, A. und Modigell, M.: Luminescence technique for the measurements of local concentration distribution in thin liquid films. In: *Experiments in Fluids*, Band 38:S. 174–184, 2005.
- Schimpf, A., Kallweit, S. und Richon, J.B.: Photogrammetric Particle Image Velocimetry. In: Yoo, J.Y. (Hg.) *Proceedings for 5th International Symposium on Particle Image Velocimetry (PIV'03)*, Sept. 22-24. Korean Society of Visualization (KSV), Busan, Korea, 2003.
- Schmuki, P. und Laso, M.: On the stability of rivulet flow. In: *Journal of Fluid Mechanics*, Band 215:S. 125–143, 1990.
- Seeger, A., Affeld, K., Goubergrits, L., Kertzsch, U. und Wellenhofer, E.: X-ray-based assessment of the three-dimensional velocity of the liquid phase in a bubble column. In: *Experiments in Fluids*, Band 31:S. 193–201, 2001.
- Shetty, S. und Cerro, R.L.: Spreading of Liquid Point Sources over Inclined Solid Surfaces. In: *Ind. Eng. Chem. Res.*, Band 34:S. 4078–4086, 1995.
- Shi, Mei Geng und Mersmann, Alfons: Effektive Austauschfläche in Füllkörperkolonnen. In: *Chemie Ingenieur Technik*, Band 56(5):S. 404–405, 1984.
- Shi, Mei Geng und Mersmann, Alfons: Effective Interfacial Area in Packed Columns. In: *Ger. Chem. Eng.*, Band 8:S. 87–96, 1985.
- Sikalo, S., Tropea, C. und Ganic, E.N.: Dynamic Wetting Angle of a Spreading Droplet. In: (Celata et al., 2004).
- Soare, G., Piesu, V. und Bologa, V.: Modeling of Liquid Flow in Structured Packing. In: Milica, Ecaterina (Hg.) *Proc. of the 12th Romanian International Conference on Chemistry and Chemical Engineering*. University Politehnica of Bucharest, Faculty of industrial Chemistry, Bucharest, Romania, 2001.

- Stefes, B.: *Turbulente Wandgrenzschichten mit und ohne negativen Druckgradienten unter dem Einfluss hoher Turbulenzintensität der Außenströmung*. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2003.
- Stein, W.A.: Benetzung und Zwickelflüssigkeit bei zwei nebeneinander liegenden Zylindern. In: *Forschung im Ingenieurwesen*, Band 64:S. 329 – 343, 1999.
- Towell, G.D. und Rothfeld, L.B.: Hydrodynamics of rivulet flow. In: *AIChE Journal*, Band 12(5):S. 972–980, 1966.
- Veerapaneni, S., Wan, J. und Tokunaga, T.K.: Motion of Particles in Film Flow. In: *Environmental Science & Technology*, Band 34:S. 2465–2471, 2000.
- Villain, O., Repke, J.-U. und Wozny, G.: Evaluation of the Separation Efficiency of Three-Phase Operated Packed Towers. In: Kister, H.Z. und Pritchett, M.D. (Hg.) *AIChE Distillation 2005: Learning from the Past and Advancing the Future Topical Conference Proceedings 2005 Spring National Meeting April 10 - April 13, 2005*. Atlanta, Georgia, 2005a, S. 171–181. ISBN 8-8169-0990-3.
- Villain, O., Repke, J.-U. und Wozny, G.: Evaluation of the Separation Efficiency of Three-Phase Operated Packed Towers - 2005 AIChE Spring Meeting, 10.-14.04.2005. 2005b.
- Wierschem, A., Scholle, M. und Aksel, N.: Vortices in film flow over strongly undulated bottom profiles at low Reynolds numbers. In: *Physics of Fluids*, Band 15(2):S. 426–435, 2003.
- Wilkes, J.O. und Nedderman, R.M.: The measurement of velocities in thin films of liquid. In: *Chemical Engineering Science*, Band 17:S. 177–187, 1962.
- Wittig, S., Elsässer, A., Samenfink, W., Ebner, J. und Dullenkopf, K.: Velocity Profiles in Shear-Driven Liquid Films: LDV-Measurements. In: Adrian, R.J. (Hg.) *Developments in Laser Techniques and Fluid Mechanics*. Berlin, Heidelberg, New York, 1997, S. 509–522.
- Wünsch, G.: *Optische Analysenmethoden zur Bestimmung anorganischer Stoffe*. Walter de Gruyter, Berlin, 1976. ISBN 3110039087.
- Young, G.W. und Davis, S.H.: Rivulet instabilities. In: *Journal of Fluid Mechanics*, Band 176:S. 1–31, 1987.