

Masterarbeit

Experimentelle Untersuchung des Strömungsverhaltens von Rieselfilmen

erstellt für den

**Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen
Umweltschutzes**

Vorgelegt von:

Violeta Schorn

0735256

Betreuer/Gutachter:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Markus Lehner

Dipl.-Ing. Dr.mont. Johannes Rieger

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

AFFIDAVIT

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Kurzfassung

Experimentelle Untersuchung des Strömungsverhaltens von Rieselfilmen

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung des Strömungsverhaltens von Rieselfilmen an einem Versuchsstand am Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes. Dafür wurden laseroptische Messungen unter Verwendung des Messverfahrens der Particle Image Velocimetry (kurz PIV) durchgeführt. PIV ist ein bildgebendes Verfahren, mit dem das Geschwindigkeitsfeld des Rieselfilms entlang der schrägen Platte dargestellt wird.

Im Zuge der Versuche werden bestimmte Einflussparameter auf die Strömungsbildung variiert, um Erfahrungen und Erkenntnisse mit dem experimentellen Aufbau und dem verwendeten Messsystem zu sammeln. Zu den variierten Parametern zählen der Volumenstrom und die Viskosität der Flüssigkeit, der Anstellwinkel der Platte, der Einfluss einer Stolperstelle in der Strömung sowie Material und Oberflächenstruktur der Platte.

Da es zu Beginn der Arbeit noch große Probleme mit der Funktionsfähigkeit des Versuchsstandes gab, entwickelte sich neben den Messungen auch die Optimierung des Versuchsstandes zu einem zentralen Thema. Kernpunkte sind dabei die Dichtheit des Systems und die Flüssigkeitsaufgabe. In Zukunft sollen mit Hilfe der Messdaten die Einflüsse verschiedener Parameter auf die Strömung mit den in Packungskolonnen beobachteten Effekten in Zusammenhang gebracht werden. Somit können Modellberechnungen validiert werden, die wiederum die Beschreibung der Strömung innerhalb von Packungen ermöglichen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen ergaben, dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur qualitative Aussagen und keine quantitativen Aussagen zum Strömungsverhalten des Rieselfilms getroffen werden können, weil trotz der optimierten Flüssigkeitsaufgabe der Film entlang der glatten Platte nicht durchgehend homogen ist.

Abstract

Experimental investigation of the flow behaviour of falling films

The aim of the present work is the investigation of the flow behaviour of liquid films on an inclined plate at a test stand at the chair for process technology and industrial environmental protection. Therefore laser optical measurements using the measurement method of particle image velocimetry (PIV) were carried out. PIV is an imaging technique with which the velocity field of the running film down the inclined plate is shown.

During the investigation certain parameters that have influence on the flow behaviour are varied to gain experiences with the experimental setup and the measurement system used. The varied parameters include the flow rate, the viscosity of the fluid, the angle of the plate, the influence of a disturbing object in the flow, as well as material and surface structure of the plate.

As there were still major problems with the functionality of the test stand at the beginning of work, this work is also focused on the optimization of the test stand besides the actual measurements. Key points are the tightness of the system and the flow of the liquid onto the plate. In the future the influence of various parameters on the liquid flow shall be brought in context with the effects observed in packed columns using the measurement data. Thus model calculations can be validated which in return allow the description of the flow within the packed columns.

The results of the investigations show that at the present time only qualitative statements and no quantitative evidence to the flow behaviour can be made, because despite the optimized liquid flow the film along the plate is not perfectly homogeneous.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 EINLEITUNG	3
1.1 Problemstellung	3
1.2 Zielsetzung	4
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	5
2.1 Der Rieselfilm entlang einer schrägen Platte	5
2.1.1 Filmkennzahlen.....	5
2.1.2 Der glatte Film	6
2.1.3 Der wellige Film	8
2.1.4 Aufreißen von Filmströmungen	10
2.1.5 Rinnsal- und Tropfenströmung.....	12
2.1.6 Ergänzungen zur Flüssigkeitsbelastung.....	15
2.1.7 Einfluss von Mikrostrukturen	16
2.2 Laseroptische Untersuchungen von Strömungen	18
3 VERSUCHSSTAND AM LEHRSTUHL FÜR VERFAHRENSTECHNIK DES INDUSTRIELLEN UMWELTSCHUTZES.....	20
3.1 Auslegung	20
3.2 Probleme und Optimierung	23
3.2.1 Undichtigkeit	23
3.2.2 Flüssigkeitsaufgabe	24
3.2.3 Befestigung von Versuchsplatten.....	26
4 EXPERIMENTELLE RIESELFILMUNTERSUCHUNGEN	27
4.1 Einflussfaktoren	27
4.2 Particle Image Velocimetry	30
4.2.1 Messprinzip.....	30
4.2.2 Versuchsaufbau.....	31
4.2.3 Versuchsdurchführung.....	33
4.2.4 Auswertung der Rohbilder.....	38
4.3 Shadowgraphie	39
4.3.1 Messprinzip.....	39
4.3.2 Versuchsaufbau.....	40
4.3.3 Versuchsdurchführung.....	43

4.3.4	Auswertung.....	44
5	ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	45
5.1	Optimierter Versuchsstand	45
5.2	Experimentelle Untersuchungen.....	47
5.2.1	Viskosität der Versuchsflüssigkeit.....	48
5.2.2	Anstellwinkel der Platte.....	50
5.2.3	Volumenstrom der Fluidaufgabe	51
5.2.4	Material und Oberflächenstruktur der Platte.....	56
5.2.5	Stolperstellen in der Strömung.....	60
5.2.6	Filmdickenmessung	61
5.3	Einstellparameter der PIV Messung.....	63
5.3.1	Kamera und Laser	63
5.3.2	Tracerkonzentration	64
5.3.3	Auswertung.....	64
6	ZUSAMMENFASSUNG.....	74
7	VERZEICHNISSE	I
7.1	Literatur.....	I
7.2	Abkürzungen.....	V
7.3	Tabellen.....	VII
7.4	Abbildungen.....	VIII
ANHANG.....		XII

1 Einleitung

Rieselfilme sind dünne Flüssigkeitsfilme an senkrechten oder geneigten Oberflächen, die in industriellen Prozessen für vielfältige Anwendungen eingesetzt werden. Aufgrund ihrer hohen Wärme- und Stoffübertragungsraten eignen sie sich besonders für Prozesse in der Energie- und Verfahrenstechnik. Sie zeichnen sich durch eine große Kontaktfläche bei kleinem spezifischem Durchfluss aus. Klassische Einsatzgebiete sind Wärmeübertrager zum Heizen, Kühlen, Verdampfen und Kondensieren und stoffübertragenden Apparate wie Absorber, Rektifikationskolonnen, Kristallisatoren und Elektrolysezellen.

Rieselfilm- Wärmeübertrager werden zum Beispiel als Kondensatoren von Kühlaggregaten in der Tieftemperaturtechnik genutzt, zur Kühlung von Milchprodukten in der Lebensmittelindustrie und von Schwefelsäure in der chemischen Industrie. Des Weiteren dienen Flüssigkeitsfilme an den Brennkammerwänden von Reaktoren als thermischer Schutz gegen lokale Überhitzung. Bei der Oberflächenbehandlung von Metall- und Kunststoffoberflächen werden Filme ebenfalls verbreitet angewendet. (1) Im Fokus dieser Arbeit steht die Anwendung von Rieselfilmen in industriellen Packungskolonnen. Diese werden in der Verfahrenstechnik für Stofftrennprozesse wie Rektifikation, Absorption, Desorption, Flüssig/Flüssig Extraktion und Partikelabscheidung eingesetzt. Kennzeichnendes Merkmal von Packungskolonnen ist eine Füllung in Form von geordneten Packungen oder von einzelnen Füllkörpern, die geschüttet oder regelmäßig platziert sind. In der Regel werden Packungskolonnen in zwei Phasen im Gegenstrom durchströmt, wobei die Füllkörperschicht ruht. (2)

1.1 Problemstellung

Die Hydrodynamik sowie der Strömungszustand der flüssigen Phase innerhalb von Packungen hat einen signifikanten Einfluss auf das Betriebsverhalten und die Trennleistung von Kolonnen (3). Zum Beispiel führen Wellenbildung und Turbulenzen zu einer Verstärkung von Wärme- und Stoffübergang, weil die durch Wellen verursachte Konvektionsbewegung die Transporteigenschaften der Strömung maßgebend verändert. Das Verständnis der Hydrodynamik von Rieselfilmen ist daher von grundsätzlicher Bedeutung. (1)

Bei der Modellierung von Kolonnen wird die Fluidodynamik derzeit meist über halbempirische Korrelationen zur Bestimmung der Phasengrenzfläche und des Stoffübergangskoeffizienten berücksichtigt. Für eine genaue Modellierung des Stofftransports ohne empirische Parameter sowie für ein besseres physikalisches Verständnis der Strömungsvorgänge innerhalb der Packung, ist daher ein umfangreiches Wissen über die Strömung der einzelnen Phasen sowie deren spezifische Phasengrenzfläche erforderlich. (4)

Die Untersuchung des Strömungszustandes in Packungen erfordert allerdings einen hohen experimentellen Aufwand, weil diese von außen nur schwer zugänglich ist. Daher werden grundlegende Untersuchungen am Modellsystem der geneigten Platte unter der

vereinfachenden Annahme, dass sich die Strömung ähnlich zu der in Packungen verhält, durchgeführt. Das Experiment eines Rieselfilmes entlang einer geneigten Platte liefert dabei einen freien optischen Zugang und vereinfacht die Strömungsmessung erheblich. (4) In einer vorangegangenen Arbeit (5) wurde am Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes ein Versuchstand nach diesem Modell konstruiert und gebaut.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist, laseroptische Untersuchungen des Strömungsverhaltens von Rieselfilmen an dem neu gebauten Versuchstand durchzuführen. Dadurch sollen Erfahrungen und Erkenntnisse mit dem experimentellen Aufbau und dem verwendeten Messsystem gesammelt werden. Angewendet wird ein laseroptisches High-Speed Messsystem der Firma LaVision GmbH. Das Messprinzip ist die Particle Imaging Velocimetry (kurz PIV), ein bildgebendes Verfahren mit dem das Geschwindigkeitsfeld von Fluidströmungen dargestellt werden kann.

Im Zuge der Versuche werden bestimmte Einflussparameter auf die Strömungsbildung variiert. Dazu zählen der Volumenstrom und die Viskosität der Flüssigkeit, der Anstellwinkelwinkel der Platte, der Einfluss einer Stolperstelle in der Strömung sowie Material und Oberflächenstruktur der Platte. Für letzteres werden Bleche von Packungen verwendet, die aktuell in industriellen Kolonnen eingesetzt werden. In Zukunft sollen mit Hilfe der Messdaten die Einflüsse verschiedener Parameter auf die Strömung mit den in Kolonnen beobachteten Effekten in Zusammenhang gebracht werden. Somit können Modellberechnungen validiert werden, die wiederum die Beschreibung der Strömung innerhalb von Packungen ermöglichen.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die physikalischen Grundlagen von Rieselfilmen und besondere Phänomene wie Aufreißen und Rinnsalbildung erläutert. Dies ist notwendig um die späteren Messergebnisse entsprechend bewerten und vergleichen zu können. (4)

2.1 Der Rieselfilm entlang einer schrägen Platte

Als Rieselfilm wird ein etwa 0,2 mm bis 1 mm dünner Flüssigkeitsfilm bezeichnet, der unter dem Einfluss der Schwerkraft an einer senkrechten oder geneigten Wand mit einer mittleren Geschwindigkeit von 0,5 m/s bis 2,0 m/s abfließt (6). 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 Gasphase große Kontaktflächen zur Verfügung.

Wie alle Strömungsformen kann auch die Filmströmung eine laminare oder turbulente Charakteristik aufweisen. 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 kann die Reynolds-Kennzahl Re als Funktion der Flüssigkeitsbelastung verwendet werden, d.h. Volumenstrom \dot{V} pro berieselte Breite b , auch Umfangbelastung U bezeichnet, mit der kinematischen Viskosität ν der Flüssigkeit (4):

$$Re = \frac{U}{\nu} = \frac{\dot{V}}{b \cdot \nu} \quad (1)$$

2.1.1 Filmkennzahlen

In Tabelle 1 sind Parameter angeführt, die in der Literatur (1) zur Beschreibung von Filmströmungen verwendet werden. Die Größen unterteilen sich in die Gruppe der unabhängigen Variablen und in die Gruppe der abhängigen Variablen. Dabei sind die unabhängigen Größen zum Teil Parameter, welche zur Einstellung der Versuchsbedingungen benutzt werden. Dazu zählen zum Beispiel der Volumenstrom, der Neigungswinkel der Rieselfilmstrecke oder das Versuchsmedium. Abhängige Größen sind vor allem die Messgrößen, welche sich aus den gegebenen Versuchsbedingungen einstellen, wie die Filmdicke oder die Wellengeschwindigkeit. Um eine Reduzierung dieser Größen zu erreichen und die Ergebnisse mit ähnlichen Versuchsmedien vergleichen zu können, werden dimensionslose Variablen wie die Reynolds-Zahl eingeführt.

Tabelle 1: Abhängige und unabhängige Parameter der Rieselfilmströmung (1).

Nr.	Name	Symbol	Einheit	Dimension
unabhängige Größen				
1	Auf Filmbreite bezogener Volumenstrom	U	m ³ /(m h)	L ² /t
2	Neigungswinkel	α	°	1
3	Fallbeschleunigung	a	m/s ²	L/t ²
4	kinematische Viskosität	ν	m ² /s	L ² /t
5	Dichte	ρ	kg/m ³	(F t ²)/L ⁴
6	Oberflächenspannung	σ	kg/s ²	F/L
7	Wärmeleitfähigkeit	λ	W/(m K)	F/(t T)
8	spezifische Wärmekapazität	c	J/(kg K)	L ² /(t ² T)
9	Heizleistung	P	W	(F L)/t
abhängige Größen				
1	Filmbreite	b	mm	L
2	Wellenlänge	l	mm	L
3	Wellengeschwindigkeit	v	m/s	L
4	Wellenfrequenz	f	1/s	1/t
5	Filmdicke	δ	mm	L
6	minimale Filmdicke	δ_{\min}	mm	L
7	mittlere Filmdicke	δ_{mittel}	mm	L
8	maximale Filmdicke	δ_{\max}	mm	L
9	Residualfilmdicke	δ_{res}	mm	L
10	Temperaturdifferenz	T	°C	T

Die neun unabhängigen Größen führen zusammen mit den vier Dimensionen (F, L, t, T) nach dem Π -Theorem von Buckingham (7) auf fünf dimensionslose Film-Kennzahlen und zwar die Reynolds-Zahl, Prandtl-Zahl, Kapitza-Zahl, Nusselt-Zahl und dem Kosinus des Neigungswinkels. (1)

2.1.2 Der glatte Film

Die in folgender Abbildung 1 (linkes Teilbild) dargestellte laminare glatte Filmeströmung bildet sich nur bei sehr kleinen Reynolds-Zahlen im Bereich von $Re = 3$ (4).

Für diesen Fall hat Nusselt (8), unter der Annahme, dass an der Wand $y = 0$ Haftbedingungen vorliegen und an der Phasengrenze $y = \delta$ kein Impulsaustausch mit der

Gasphase stattfindet, folgende Beziehung für das Geschwindigkeitsprofil u am senkrechten Fallfilm als Funktion der Filmhöhe y aufgestellt:

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

An der Form der Gleichung ist erkennbar, dass das laminare Strömungsprofil die Form einer halben Parabel besitzt, und an der Phasengrenze die maximale Geschwindigkeit von

$$u_{\max} = \frac{1}{2} \frac{g \delta^2}{\nu} \quad (3)$$

erreicht wird. u_{\max} wird auch als Oberflächengeschwindigkeit u_s bezeichnet. Die Dicke δ des Filmes kann ferner aus der Flüssigkeitsbelastung bzw. der Reynolds-Zahl bestimmt werden:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{3\nu^2}{g} \text{Re}} = \sqrt[3]{\frac{3\dot{V}\nu}{gb}} \quad (4)$$

Strömt die Flüssigkeit nicht auf einer senkrechten sondern auf einer zur Horizontalen um α geneigten Oberfläche, so wirkt auf die Strömung die verminderte Schwerkraft $\sin \alpha \cdot g$. (4)

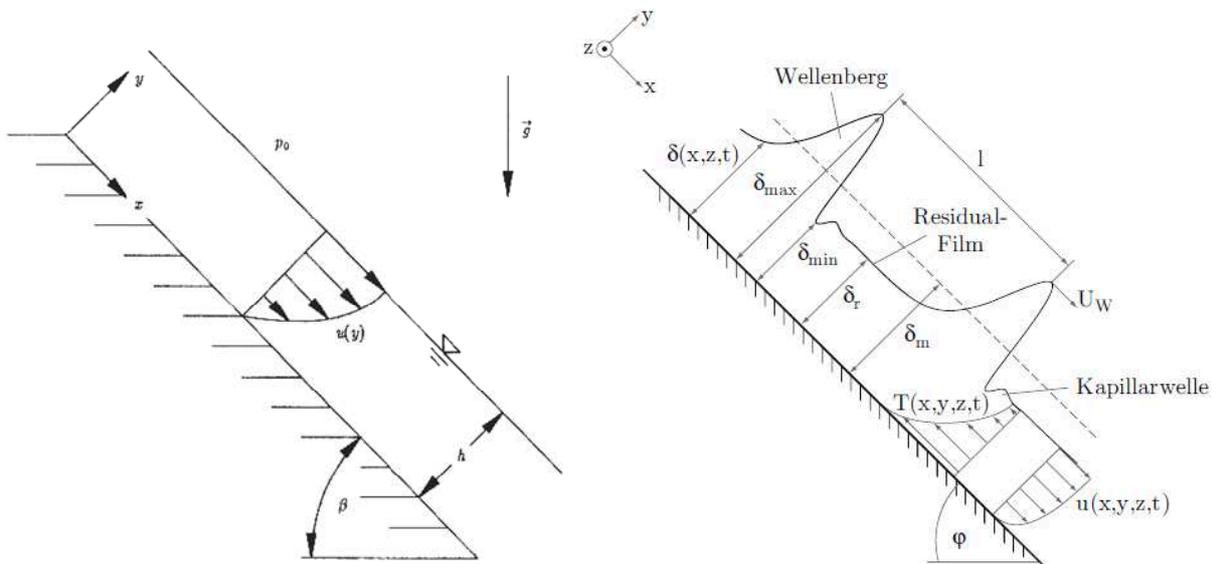


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer glatten (links) und welligen (rechts) Filmströmung entlang einer geneigten Wand (9) und (1).

2.1.3 Der wellige Film

In technischen Anwendungen treten üblicherweise Filme mit welliger Oberfläche auf, siehe Abbildung 1 (rechtes Teilbild). Die Quervermischung durch die auftretenden Wellen führt dabei zu einer deutlichen Intensivierung der Stofftransportes. (10)

Schon bei verhältnismäßig kleinen Reynolds-Zahlen bilden sich bei der laminaren Filmströmung zunächst sinusförmige Wellen und später Wellen mit ausgeprägten Amplituden und Residualfilmbereichen. In Abbildung 2 sind die verschiedenen Filmkonturen dargestellt.

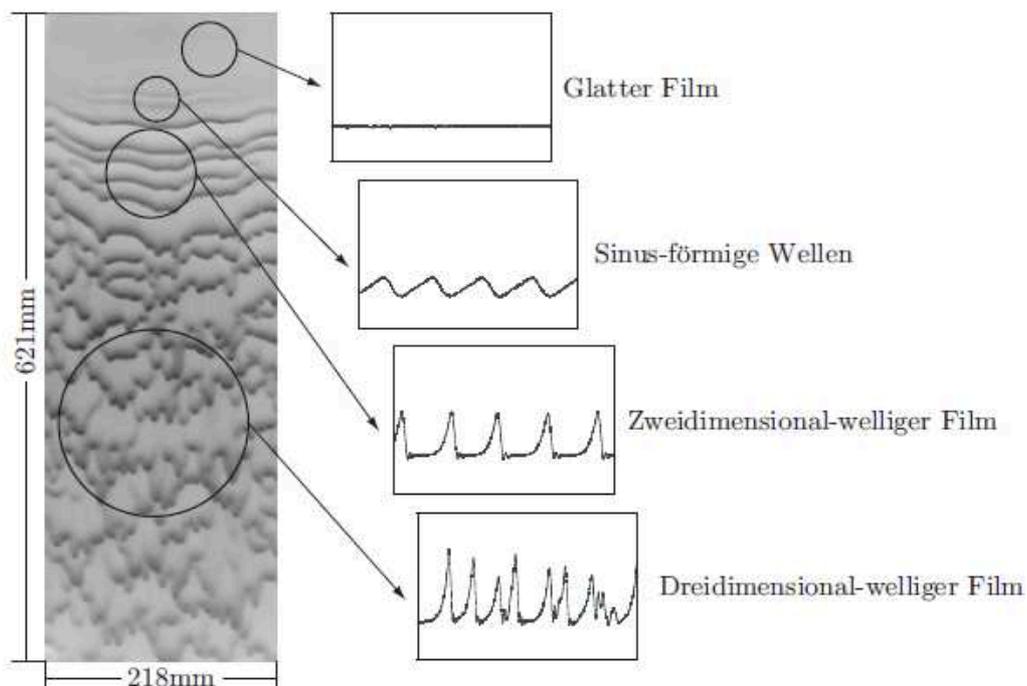


Abbildung 2: Unterschiedliche Filmkonturen bei der Filmströmung (1).

Es ist erkennbar, dass die Filmoberfläche nur im Einlaufbereich glatt ist. Danach bilden sich zunächst sinusförmige horizontale Wellen und später horizontale Wellenfronten mit ausgeprägter Amplitude aus. Diese Wellenstruktur wird allgemein als zweidimensional-wellig bezeichnet. Im weiteren Verlauf entwickeln sich aus kleinsten Störungen der Filmströmung V-förmige Wellenfronten, die zu Wellen mit unterschiedlicher Amplitude und Wellengeschwindigkeit werden. Diese so genannte dreidimensional-wellige Filmströmung ist weiterhin laminar und bildet nach Ishigai et al. (11) zusammen mit der zweidimensional-welligen Filmströmung den stabil welligen Bereich.

Bei steigender Flüssigkeitsbelastung geht die laminare Strömung in den Zustand der turbulenten Filmströmung über. In der Literatur (11) wird davon ausgegangen, dass der Übergangsbereich, unabhängig von den Stoffwerten wie Oberflächenspannung und Viskosität, in einem Reynolds-Zahlenbereich von $Re = 75 - 400$ liegt. (1)

In diesem Bereich ist die theoretische Untersuchung der Filmströmung erheblich komplexer, da sich durch die Wellenbildung die Filmhöhe und damit die Geschwindigkeitsverteilung ständig ändern. Die Filmströmung besteht nun aus zwei Schichten, der wandnahen Schicht (dem sogenannten Basisfilm) und der oberflächennahen Wellenschicht, in der die Wellen auf dem Basisfilm wegleiten. Das Geschwindigkeitsprofil im Inneren des Basisfilms weist weiterhin eine laminare Form auf. Adomeit und Renz (12) und Miyara (13) haben gezeigt, dass das Nusselt-Profil aus Gleichung (2) nur im Basisfilm die Geschwindigkeitsverteilung noch gut wiedergeben kann. In der Wellenschicht dagegen weicht die Geschwindigkeitsverteilung signifikant vom Nusselt-Profil ab. Solche Strömungen werden als pseudolaminar bezeichnet. (4)

Ab einer Reynolds-Zahl von $Re = 400$ bis $Re = 800$ kann die Rieselfilmströmung als voll turbulent betrachtet werden (1), wodurch sich Wärme- und Stofftransport erheblich erhöhen (10). Für die Beschreibung der Geschwindigkeitsverteilung haben verschiedene Autoren den aus der turbulenten Rohrströmung bekannten Ansatz des logarithmischen Wandgesetzes angewandt. Das logarithmische Wandgesetz wurde ursprünglich in der numerischen Strömungssimulation 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 einer dimensionslosen Form betrachtet:

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad \text{mit} \quad u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{g\delta} \quad (5)$$

wie auch der Abstand y zur Wand:

$$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu} \quad (6)$$

Trägt man u^+ als Funktion von $\ln y^+$ (14) 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 (15) und Karimi und Kawaji (16) Beziehungen für u^+ der turbulenten Filmströmung aufgestellt, mit denen sich das Geschwindigkeitsprofil sogar bei starker Wellenbildung ($Re \geq 2000$) bis $y^+ = 100$ darstellen lässt.

Die Entstehung von Wellen beruht auf einer hydrodynamischen Instabilität des Films. Die Oberflächenspannung hat dabei einen entscheidenden Einfluss auf die Wellenbildung. Es wurde beobachtet (17), dass große Oberflächenspannungen den Film stabilisieren, und dadurch selbst bei großen Reynolds-Zahlen 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:

$$K_F = \frac{\sigma^3}{g v^4 \rho^3} \quad \text{bzw.} \quad Ka = \sqrt[3]{K_F} = \frac{\sigma}{\rho g^{1/3} v^{4/3}} \quad (7)$$

Brauer (17) gibt verschiedene Gleichungen für die Beziehung zwischen der Filmkennzahl K_F und der Reynolds-Zahl, 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 Reynolds-Zahl, bei der die erste Wellenbildung beobachtet werden kann, ansteigt. Zusätzlich hat auch die Einlauflänge 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 (18) führten dazu Untersuchungen an einer senkrechten Filmströmung durch und fanden bei $Re = 50$ ein ausgebildetes Geschwindigkeitsprofil mit stabiler Filmdicke schon nach einer Einlauflänge von nur 7 mm 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 (19) 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 Gleichung (4) aufstellen:

$$L_i = 500 \delta, \quad Re \leq 500 \quad (8)$$

$$L_i = (350 + 0,03Re) \delta, \quad Re > 500 \quad (9)$$

Die Einlauflänge für die Wellenbildung liegt demnach je nach Reynolds-Zahl bei wenigen bis hin zu mehreren Zentimetern entfernt von der Flüssigkeitsaufgabe. (4)

2.1.4 Aufreißen von Filmströmungen

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, weil 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 (20) 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 Films, was im Folgenden näher beschrieben werden soll.

Die Flüssigkeitsbelastung, bei der zum ersten Mal ein Filmaufreißen beobachtet werden kann, wird mithilfe einer kritischen Reynolds-Zahl Re_{krit} definiert. Als Einflussparameter werden in der Literatur (21) unter anderem die Wandgeometrie, das Wandmaterial, die Oberflächenspannung des Fluides bzw. der Stofftransport zwischen Gas- und Flüssigphase angegeben. Saber und El-Genk (22) geben eine Zusammenstellung verschiedener Korrelationen für die Berechnung der kritischen Reynolds-Zahl an, in denen neben fluidspezifischen Größen wie Viskosität und Oberflächenspannung der Kontaktwinkel Θ einen entscheidenden Einfluss auf die Benetzung der Oberfläche hat.

Betrachtet man, wie in Abbildung 3 dargestellt, eine gasförmige, eine flüssige und eine feste Phase, so treffen sich alle drei Phasen in der sogenannten Kontaktlinie.

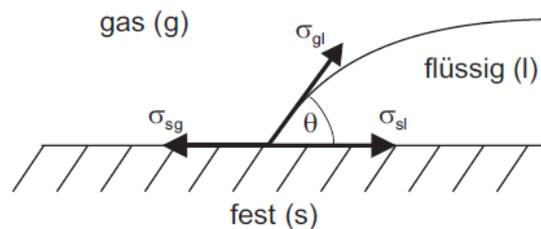


Abbildung 3: Definition des Kontaktwinkels Θ an einem Dreiphasensystem (gas-flüssig-fest) im statischen Gleichgewicht (4).

Der Winkel, den die feste und flüssige Phase im Gleichgewicht miteinander bilden, wird statischer Kontaktwinkel Θ genannt (23). Dieser Winkel setzt sich aus den einzelnen Oberflächenspannungen der jeweiligen Phasengrenzen fest-flüssig (sl), gas-flüssig (gl) und fest-gas (sg) zusammen:

$$\sigma_{sg} - \sigma_{sl} - \sigma_{gl} \cos \Theta = 0 \quad (10)$$

Der Kontaktwinkel gibt Auskunft über die Benetzungseigenschaften eines bestimmten Fluides 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 (24). Folglich ist die Bestimmung von Θ mit Hilfe von Gleichung (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 Abbildung 3 gezeigt, gemessen wird. Mit dieser Information kann nun die kritische Reynolds-Zahl für das Aufreißen eines Filmes z.B. mit der Beziehung nach Hartley und Murgatroyd (25), die über eine Bilanz der am Aufreißpunkt angreifenden Kräfte abgeleitet werden kann, mit guter Genauigkeit vorausgesagt werden:

$$\text{Re}_{krit} = 1,70(1 - \cos \Theta)^{3/5} K_F^{1/5} \quad (11)$$

Das erste Aufreißen des Films geschieht häufig in der Form, wie sie in Abbildung 3 dargestellt ist. Es bildet sich eine Trockenzone auf der Plattenoberfläche, die von einem parabelförmigen Flüssigkeitsrand begrenzt wird (26). Dabei werden die laminaren Stromlinien abgelenkt und bilden einen erhöhten Flüssigkeitsrand entlang der trockenen Plattenfläche (siehe Filmdickenprofil in Abbildung 4).

Bei weiterer Absenkung der Flüssigkeitsbelastung, reißt diese Struktur weiter auf und der Scheitelpunkt der Parabel (siehe Abbildung 4) 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 dicke 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 Abbildung 5 qualitativ dargestellt. In der Darstellung nimmt die Flüssigkeitsbelastung kontinuierlich von links nach rechts ab. (4)

2.1.5 Rinnsal- und Tropfenströmung

In Abbildung 5 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 andere Form, eine größere Dicke sowie ein verändertes Geschwindigkeitsprofil auf.

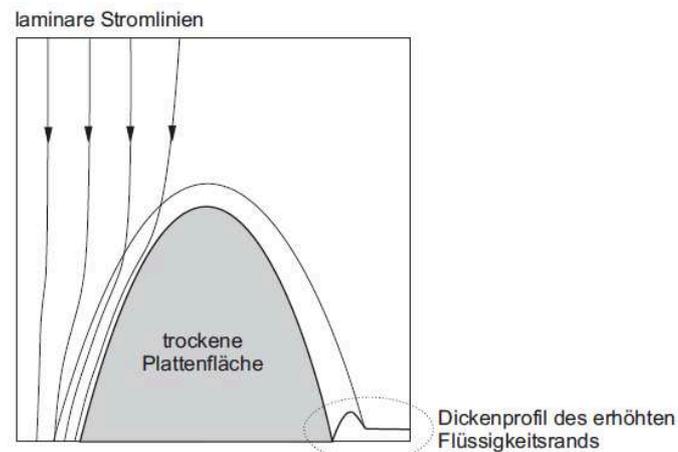


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Filmaufreißens. Die laminaren Stromlinien verengen sich und bilden einen erhöhten Rand um die Trockenzone. (4)

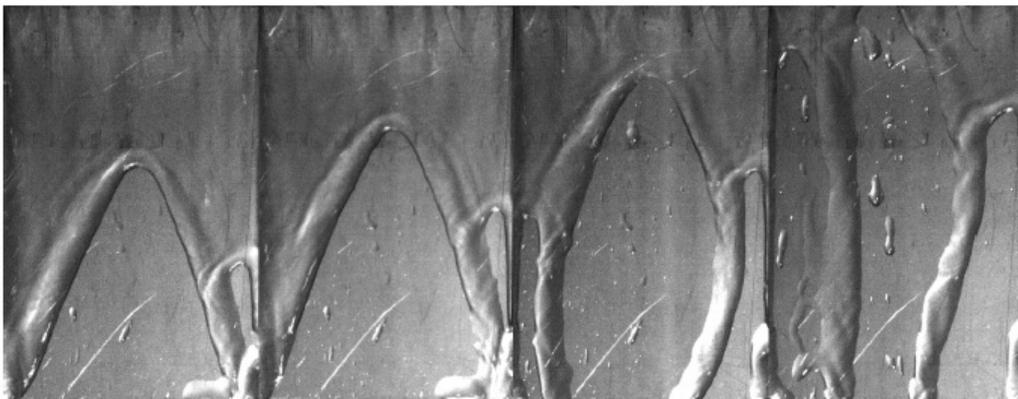


Abbildung 5: Veränderung der Morphologie einer Wasserströmung über eine Stahlplatte ($\alpha = 60$) bei sinkender Flüssigkeitsbelastung ($Re \approx 150 - 80$ von links nach rechts) (4).

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 Gleichung (2) stellt auch hier 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 (27) ausgedrückt werden als:

$$u(y, \Phi(z)) = \frac{g}{\nu} \left(y\Phi(z) - \frac{1}{2}y^2 \right) \quad (12)$$

Da das Rinnsalprofil $\phi(z)$ eine gekrümmte Phasengrenze beschreibt, kann mit Hilfe der Laplace-Gleichung die Druckdifferenz zwischen Innendruck im Rinnsal p_i und Umgebungsdruck p_u berechnet werden:

$$p_i - p_u = \frac{\sigma}{r}, \quad \frac{1}{r} = -\frac{\Phi''(z)}{(1 + \Phi'^2(z))^{3/2}} \quad (13)$$

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.

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 (28) 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 (29) 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 (30). 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.

Tropfen, die über eine geneigte Platte herabströmen, werden maßgeblich durch ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit und damit verbunden durch die dynamischen Kontaktwinkel charakterisiert (31).

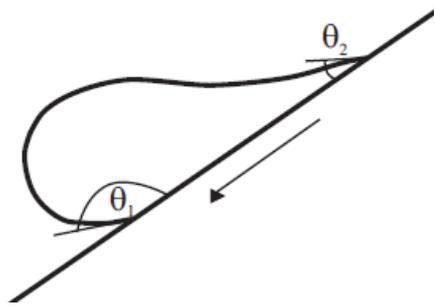


Abbildung 6: Auftreten dynamischer Kontaktwinkel Θ_i an einem herabströmenden Tropfen (4).

Wie in Abbildung 6 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. (31) zeigen, nimmt die Tropfengeschwindigkeit nach Ablösen 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. (4)

2.1.6 Ergänzungen zur Flüssigkeitsbelastung

Wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt wurde, hat 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 Reynolds-Zahl Re eine in der Strömungsmechanik weit verbreitete Kenngröße ist, verwendet man bei der Arbeit mit Fallfilmverdampfern eher die Umfangsbelastung U . Die Umformbelastung 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 $U = 0,5 - 1,5 \text{ m}^3/(\text{m h})$ (10) betrieben, um eine gute Benetzung der zur Verfügung

gestellten Heizfläche zu gewährleisten und ein Aufreißen zu vermeiden. Mit Hilfe von Gleichung (1) lässt sich die Umfangsbelastung U sehr leicht in die dimensionslose Reynolds-Zahl 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 (10) in einem Bereich von $B = 0,2 - 200 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ liegen (angegebener Bereich z.B. für Mellapak 250 (32)). Um die Kolonnenbelastung B in die Reynolds-Zahl Re umrechnen zu können, muss die Kolonnenquerschnittsfläche in Bezug zur berieselten 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 15 mm je nach Packung. Auf einer Fläche von 1 m^2 würden bei einer Elementgröße von $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ (z.B. Mellapak 250, Sulzer Chemtech Ltd.) etwa 4444 Elemente Platz finden und eine Kantenlänge von ca. 132 m aufweisen. Aus der Flüssigkeitsbelastung B kann dann eine Umfangsbelastung U mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$U = \frac{B}{132 \text{ m} / \text{m}^2} \quad (14)$$

Die Re -Zahlen mit $Re = U/\nu$ lägen damit für den oben angegebenen Kolonnenbelastungsbereich einer Wasserströmung bei $Re = 0,47 - 471$, bei ungefähr 5. Man erkennt hierbei, dass sich die Belastungsbereiche von Fallfilmverdampfer und Packungskolonne in gewissem Maße überschneiden. (4)

2.1.7 Einfluss von Mikrostrukturen

Mikrostrukturierte Packungsoberflächen führen, im Vergleich zu glatten Materiallinienoberflächen, zu signifikanten Stofftransportsteigerung. Hierfür können mehrere Faktoren, wie die Benetzungseigenschaften oder die Beeinflussung der Fluidodynamik innerhalb des Flüssigkeitsfilms verantwortlich sein. (33)

2.1.7.1 Benetzungseigenschaften

Die positiven Effekte dreidimensionaler Mikrostrukturen auf die Benetzungseigenschaften sind bereits seit längerem (34) bekannt und können bei industriellen Packungsoberflächen für Rinnsalströmungen von Wasser, Wasser/Glycerin sowie Silikonöl an geneigten Platten leicht nachgewiesen werden (35). Als Beispiel dient Abbildung 7, in der ein kleiner Silikonölvolumenstrom auf eine a) glatte, b) zweidimensionale und c) dreidimensionale Oberfläche aufgegeben wird. Aufgrund von Kapillarkräften sowie Umlenkungen bewirken die hier verwendeten Mikrostrukturen eine signifikante Verbesserung der Flüssigkeitsverteilung auf der Oberfläche. (33)

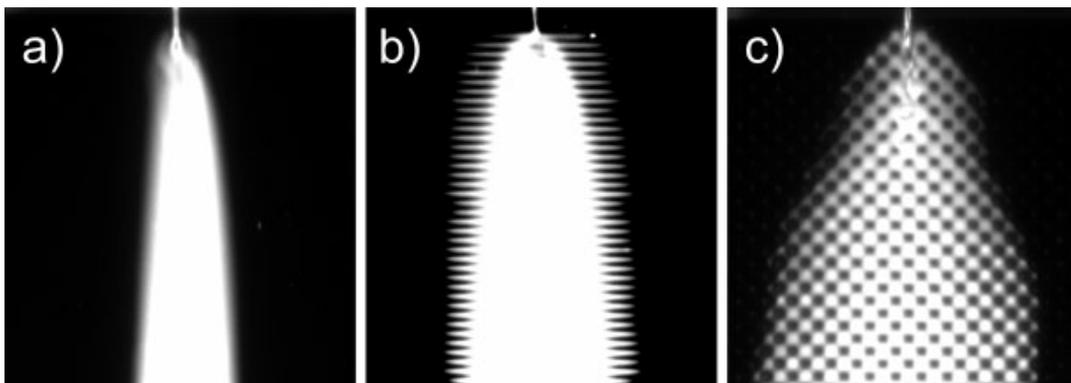


Abbildung 7: Der Benetzungstest bei glatter und mikrostrukturierter Packungsoberfläche auf einer geneigten Platte mit Silikonöl zeigt eine deutlich bessere Flüssigkeitsverteilung mit Mikrostrukturen. a) Glatte Platte, b) zweidimensionale und c) dreidimensionale Oberflächenstruktur. Aufnahmen mittels LIF und 6 s nach Erstbenetzung (33).

2.1.7.2 Fluidodynamik innerhalb der Filmströmung

Nach Repke (33) wird die Fluidodynamik einer Filmströmung aufgrund von dreidimensionalen Mikrostrukturen massiv beeinflusst. Mittels einer μ PIV- Messung wurden die Effekte quantifiziert und relevante Phänomene aufgedeckt. Abbildung 8 zeigt beispielhaft die Ergebnisse der μ PIV-Geschwindigkeitsmessung auf einer geneigten Platte, welche mit der dreidimensionalen Tetraedermikrostruktur eines Montz-Packungsblechs versehen ist. (33)

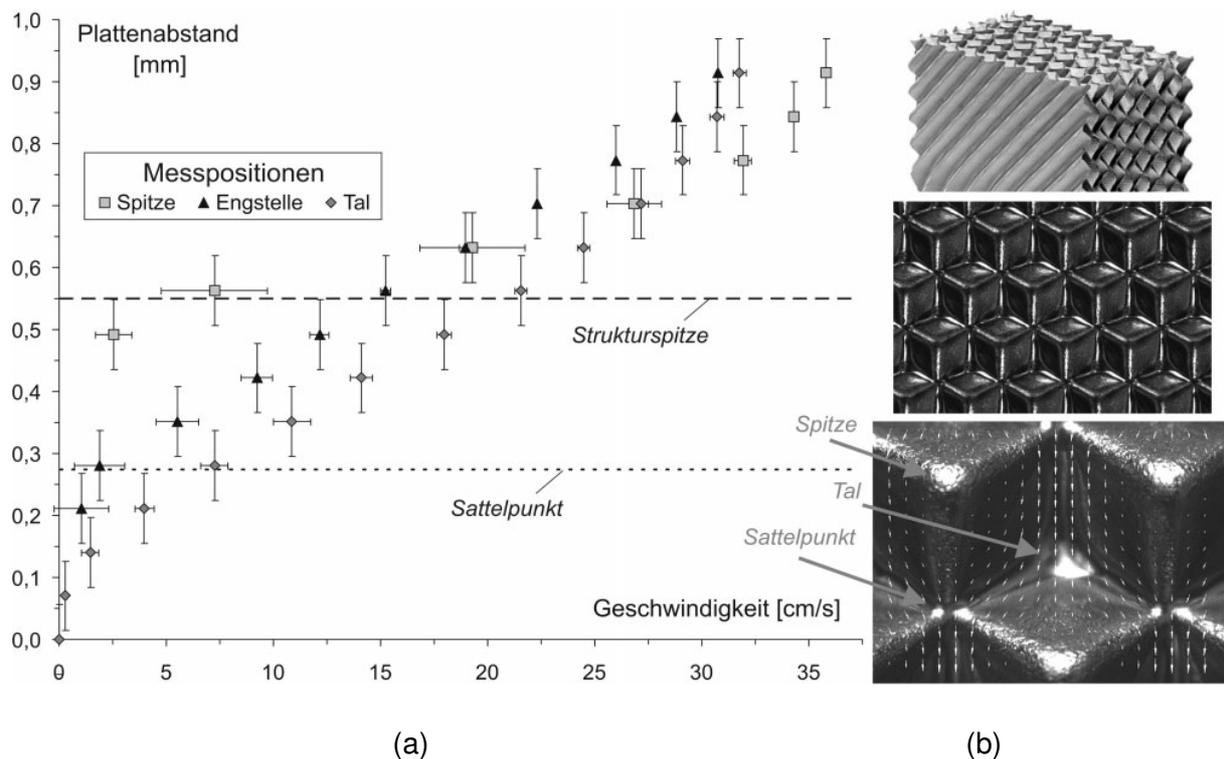


Abbildung 8: (a): Geschwindigkeitsprofile aus μ PIV-Messungen für drei charakteristische Orte der Montz-Tetraederstruktur; (b): Betrachtungsebenen des Packungssegments bis zum Messort ($2 \times 2,5$ mm) der Mikrostruktur auf geneigter Platte inklusive Geschwindigkeitsvektoren (33).

Man erkennt, dass sowohl lokale Unterschiede der Geschwindigkeitsprofile vorliegen als auch dreidimensionale Strömungsstrukturen induziert werden. Die maximale Filmdicke bzw. der Hold-up wächst im Vergleich zur klassischen zweidimensionalen Nusselt-Lösung signifikant an, so dass annähernd eine Verdopplung erreicht wird. Zudem werden Strömungsumlenkungen sichtbar und aus der Massenerhaltung kann man zusätzlich eine lokale Auf- sowie Abwärtsbewegung bzgl. Tal und Spitze ableiten (36). Die Vermutung liegt nahe, dass durch diesen Strömungseingriff der Stofftransport beeinflusst wird. Weitere μ PIV-Messungen zeigen, dass analoge Effekte auch für andere dreidimensionale Mikrostrukturen auftreten können (35). (33)

2.2 Laseroptische Untersuchungen von Strömungen

Laseroptische Messverfahren werden in einer Reihe von Anwendungsgebieten eingesetzt. Dazu gehört z.B. die Visualisierung der Strömung von Gasen und Flüssigkeiten bei der Verbrennungsdagnostik sowie bei der Untersuchung von Flüssigsprays und Gasblasen in Flüssigkeiten. Es können spezifische Größen wie Strömungsgeschwindigkeit, Temperatur

und Konzentration bestimmter Stoffe in einem Fluid bzw. der Stoffübergang zwischen Fluiden gemessen werden. (37) In dieser Arbeit werden Messungen zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit sowie der Filmdicke von Rieselfilmen durchgeführt. Die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit basiert auf dem Prinzip der Particle Imaging Velocimetry, kurz PIV. Für die Bestimmung der Filmdicke der Strömung wird die Shadowgraphie angewandt. Die theoretischen Grundlagen der beiden Methoden werden im Kapitel 4 erläutert.

3 Versuchsstand am Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes

In einer vorangegangenen Masterarbeit (5) am Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des Industriellen Umweltschutzes wurde ein Versuchsstand zur Durchführung von Rieselfilmversuchen entlang einer schrägen Platte entworfen. In diesem Kapitel werden die ursprüngliche Auslegung und der Zusammenbau der Anlage sowie Optimierungsmaßnahmen beschrieben, die sich im Zuge dieser Arbeit aufgrund von Problemen bei der Versuchsdurchführung ergaben.

3.1 Auslegung

Abbildung 9 zeigt den Versuchsstand, wie er von Foith (5) ausgelegt und zusammengebaut wurde.

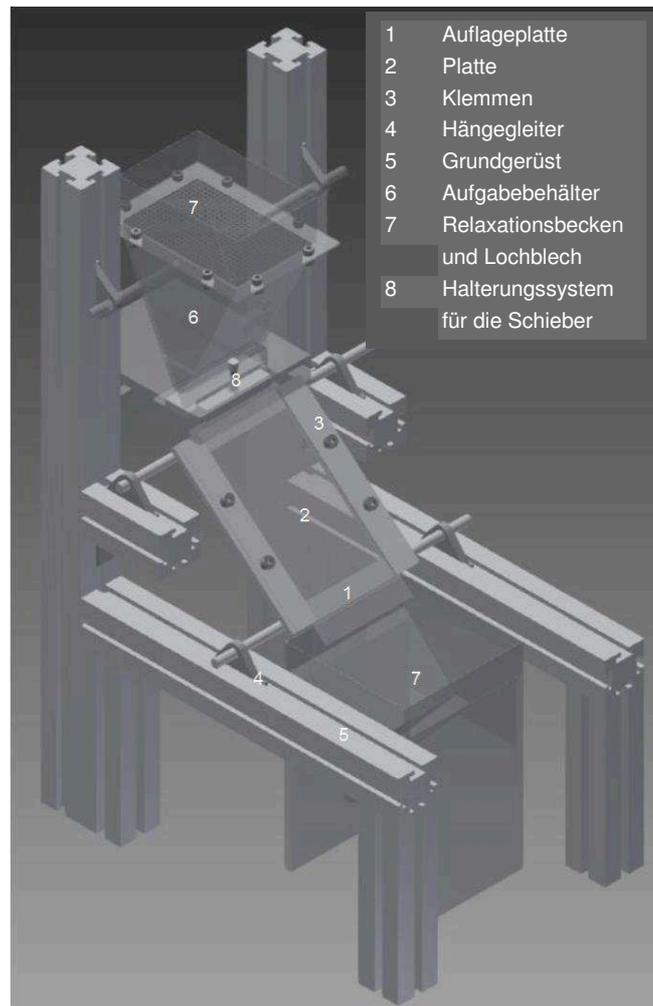


Abbildung 9: Versuchsstand zur Rieselfilmuntersuchung an einer schräg geneigten Platte (5).

Die Versuchsanlage besteht aus einer Auflageplatte, auf der die zu untersuchende Platte mit seitlichen Klammern und Schrauben befestigt wird. Die Auflageplatte ist auf der Unterseite mit Hilfe von zwei Stangen aus PVC und Hänggleitern mit dem Grundgerüst verbunden. Der Plattenneigungswinkel kann somit in einem Bereich von 10° bis 80° variiert werden. Die Flüssigkeit wird mittels einer Zahnradpumpe über einen Schlauch dem Aufgabebehälter zugeführt und über einen Auffangbehälter abgeführt. Das Kernstück der Anlage ist das Halterungssystem für die Schieber, das sich zwischen Aufgabebehälter und Platte befindet. Der Zweck dieses Halterungssystems ist, die aus dem Aufgabebehälter ankommende Flüssigkeit mit Hilfe von zwei Schiebern zu beeinflussen und so die Aufgabe der Flüssigkeit auf die geneigte Platte individuell einzustellen (Variation der Dicke des Rieselfilms). Abbildung 10 zeigt das Schiebersystem in einer Detailansicht.

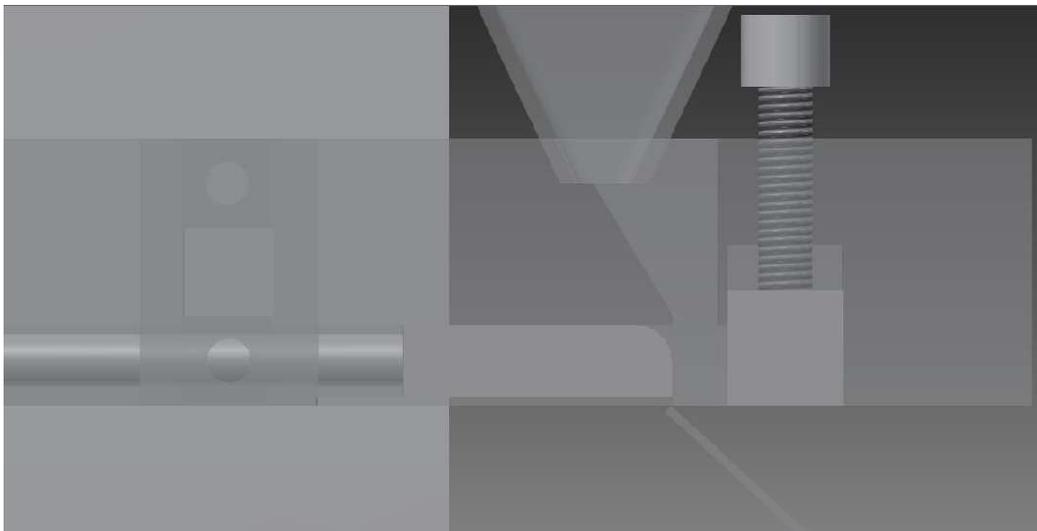


Abbildung 10: Halterungssystem mit Schiebern in Seitenansicht (5).

Ursprünglich war geplant, mit dem horizontalen Schieber eine Spaltweite für die Flüssigkeit vorzugeben. Der vertikale Schieber sollte zur Regulierung der Spaltweite gegenüber der Platte dienen, um somit direkt eine bestimmte Flüssigkeitsschichtdicke bei der Aufgabe einzustellen.

Bei ersten Testversuchen mit dem Versuchsstand traten einige Probleme auf, für die in weitere Folge Optimierungsmaßnahmen gesucht wurden. Für eine detaillierte Erläuterung hierzu sei auf die Arbeit von Foith (5) verwiesen. Das größte Problem stellte die Undichtigkeit der Anlage im Bereich der Flüssigkeitsaufgabe auf die Platte sowie entlang der Platte dar. In Abbildung 11 und Abbildung 12 sind die Ergebnisse der Abdichtungsmaßnahmen veranschaulicht.

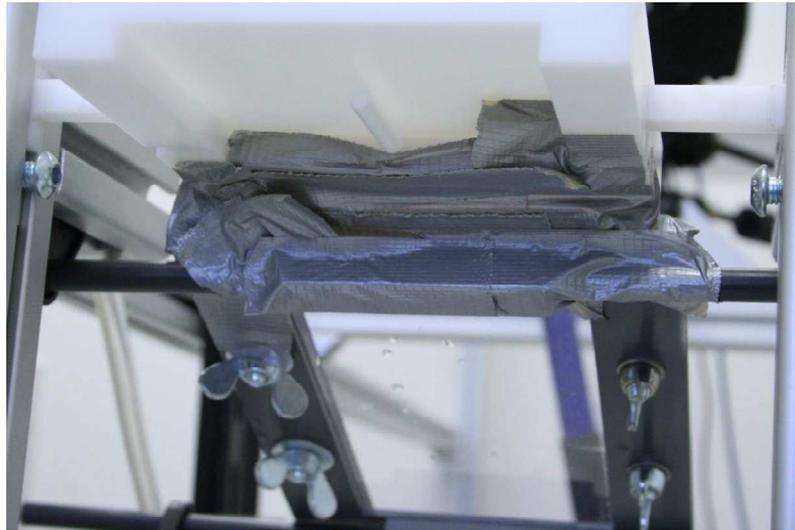


Abbildung 11: Abgedichtete Undichtigkeitsstellen an der Verbindungsstelle zwischen Halterungssystem der Schieber und Platte (5).

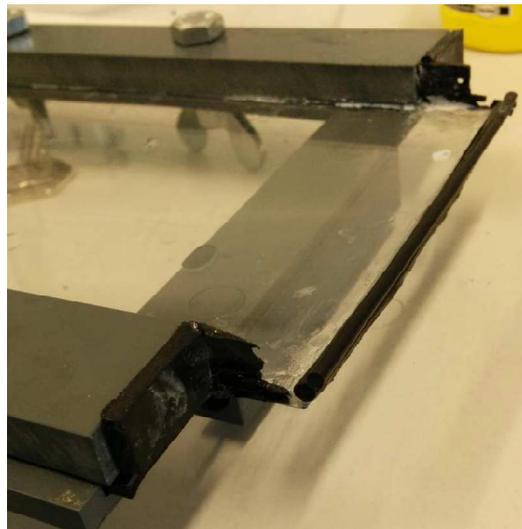


Abbildung 12: an der Platte angebrachte Dichtungswände und Dichtungsbänder (5).

An der Platte und deren Auflage wurden zusätzliche Dichtungen angebracht. Ebenso wurden die Schieber mit Dichtungsbändern versehen und verbleibende Leckagestellen provisorisch mit Klebeband abgedichtet. Trotzdem war es nicht möglich, die Undichtigkeiten zu beheben. Zusätzlich verlor durch die Maßnahmen der vertikale Schieber seine Funktionsfähigkeit, weil dieser aufgrund des zusätzlichen Dichtungsmaterials nicht mehr bis zur Platte hinunter reichen konnte. (5)

3.2 Probleme und Optimierung

Im Zuge dieser Arbeit wurden Optimierungen bezüglich der Undichtheit, der Art der Flüssigkeitsaufgabe und der Befestigung verschiedener Platten auf die Unterlageplatte durchgeführt.

3.2.1 Undichtigkeit

Die provisorische Lösung zur Abdichtung der Anlage mit Klebeband stellte sich als unzuverlässig heraus. Da die Undichtigkeiten vor allem an der Verbindungsstelle zwischen dem Halterungssystem mit den Schiebern und der Patte auftraten, wurde entschieden das Halterungssystem mit den Schiebern zu entfernen. Stattdessen wird der Aufgabebehälter direkt auf die an der Platte aufgeklebten Dichtungsbänder platziert (siehe Abbildung 13).

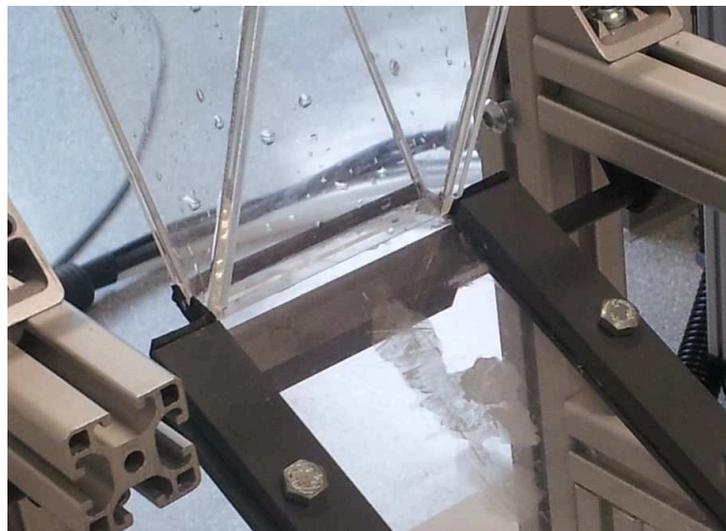


Abbildung 13: Platzierung des Aufgabebehälters direkt auf die an der Platte aufgeklebten Dichtungsbänder zur Vermeidung von Undichtheiten der Anlage.

An den beiden rechteckigen Wänden des Aufgabebehälters sind je 2 mm große Einkerbungen vorhanden, wodurch sich der Behälter formpassend auf die Dichtungsbänder der Platte aufsetzen lässt. Zur Positionierung und Fixierung des Aufgabetrichters, für die ursprünglich das Halterungssystem der Schieber vorgesehen war, werden verstellbare Stopper-Elemente im Grundgerüst eingesetzt. Durch diese Maßnahme konnten die Undichtigkeiten größtenteils behoben werden. Tröpfchenweise Leckagen, die dennoch auftreten, werden durch eine etwa 5 cm hohe Auffangwanne aufgefangen, in welcher der gesamte Versuchsaufbau gestellt wurde.

Das Wegfallen des Schiebersystems zur Filmdickeneinstellung wird zugunsten einer nahezu kompletten Abdichtung der Anlage in Kauf genommen. Das System hatte sich in der Praxis ohnehin als sehr umständlich herausgestellt und war durch die vorangegangenen Abdichtungsmaßnahmen nicht mehr funktionsfähig. Im nächsten Schritt wurde an der Flüssigkeitsaufgabe gearbeitet, um einen möglichst gleichmäßigen Übergang der Flüssigkeit vom Aufgabebehälter auf die Platte zu gewährleisten.

3.2.2 Flüssigkeitsaufgabe

Erste PIV-Versuche zeigten, dass durch die Art der Flüssigkeitsaufgabe auf die Platte das Strömungsverhalten des Rieselfilms stark beeinflusst wird. Ziel ist ein möglichst unvorbelasteter und gleichmäßiger Übergang vom Aufgabebehälter auf die schräge Platte, um einen homogenen Film zu erzeugen, der sich über die gesamte Plattenquerschnittsfläche erstreckt.

Beim direkten Übergang der Versuchsflüssigkeit auf die Platte, was nun der Fall ist, wird die Geschwindigkeitsverteilung auf der Platte stark vorbelastet. Es entsteht ein sehr ungleichmäßiges Profil, wie Abbildung 32 im Kapitel 5.1 zeigt. Zusätzlich kommt es meist zur Bildung von Rinnsalen anstatt der Bildung eines geschlossenen Rieselfilms. Grund dafür ist, dass sich die Flüssigkeit, die dem Aufgabebehälter über einen Schlauch zugeführt wird, im Behälter nicht gleichmäßig verteilt. Um dieses Problem zu beheben wurde versucht, durch eine Verkleinerung der Austrittsöffnung d.h. des Spaltes des Aufgabebehälters eine Stauung der Flüssigkeit im Behälter zu erzeugen. Dadurch soll eine gleichmäßige Verteilung der Flüssigkeit auf der schrägen Platte gewährleistet werden.

In einem ersten Schritt wurde im Technikum des Lehrstuhles manuell ein 0,5 mm dickes gekantetes Aluminiumblech gefertigt und mit Klebefolie am Behälter angebracht, wie in folgender Abbildung 14 zu sehen ist.

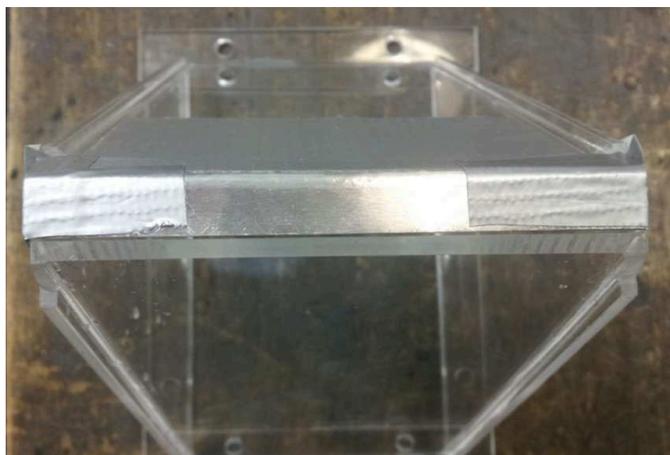


Abbildung 14: Aluminiumblech zur Reduzierung des Austrittsspaltens am Aufgabebehälter.

Die Austrittsbreite des Aufgabebehälters konnte dadurch von 12 mm auf etwa 1 mm reduziert werden. Weitere Versuche zeigten, dass dadurch die Bildung von Rinnsalen stark eingeschränkt werden konnte. Die Flüssigkeit staut sich im Aufgabebehälter, je nach Volumenstrom, zwischen 0 und 70 mm hoch. Das Geschwindigkeitsprofil ist aber dennoch inhomogen, was Abbildung 33 in Kapitel 5.1 verdeutlicht. Diese Ungleichmäßigkeiten sind auf kleine Unebenheiten entlang der Längskante des Bleches zurückzuführen, die durch den manuellen Zuschnitt entstanden. Ebenso war es nicht möglich, die Längskante des Bleches und die Kante des Aufgabebehälters exakt auf eine Ebene auszurichten.

Deshalb wurden gekantete Bleche mit einem mittig angeordneten Spalt entworfen und mit drei verschiedenen Spaltbreiten bei der Firma RVT Process Equipment GmbH gefertigt (siehe Abbildung 15).



Abbildung 15: Aluminiumbleche mit gelasertem Spalt.

Die Spaltbreiten betragen 0,3 mm, 0,5 mm und 0,7 mm. Sie wurden mit einem Laser geschnitten und weisen deshalb keine Unebenheiten auf. Die Befestigung der Bleche am Aufgabebehälter erfolgt mit Klebefolie. Die gewünschte Stauung der Flüssigkeit im Aufgabebehälter tritt auch hier auf. Die Ergebnisse hinsichtlich der Gleichmäßigkeit des Rieselfilms, die diese Art der Flüssigkeitsaufgabe erzeugt, sind vielversprechend. Bei den Geschwindigkeitsprofilen ist vor allem bei großen Volumenströmen eine deutliche Homogenisierung erkennbar (siehe dazu Abbildung 34 im Kapitel 5.1).

3.2.3 Befestigung von Versuchsplatten

Am Versuchsstand sollen verschiedene Platten unterschiedlicher Dicke getestet werden. Das System zur Befestigung der Versuchsplatten besteht aus einer Auflageplatte aus PVC und einer Platte aus Plexiglas, die als Unterlage für die zu untersuchende Platte dient. Die Unterlageplatte und die Versuchsplatte werden seitlich mit Klemmen und Schrauben befestigt. In Abbildung 9 und Abbildung 13 ist dies anschaulich dargestellt.

Bei Versuchen mit einem strukturiertem Metallblech stellte sich heraus, dass durch die Klemmen und Schrauben diese Versuchsplatte nicht ausreichend fest eingespannt werden kann. Die Platte wölbte sich stellenweise, was die Strömungswege der Flüssigkeit enorm beeinflussen würde. Mithilfe von Blockmagnete konnte das Blech ohne Aufwölbung auf die Plexiglas-Unterplatte befestigt werden (siehe Abbildung 16).



Abbildung 16: Blockmagnete zur Befestigung des strukturierten Metallblechs.

4 Experimentelle Rieselfilmuntersuchungen

In diesem Kapitel wird die experimentelle Durchführung der Rieselfilm-Versuche erläutert. Ziel der Versuche ist, das Geschwindigkeitsfeld von Rieselfilmen entlang der schrägen Platte mit dem Messverfahren der Particle Image Velocimetry (kurz PIV) zu bestimmen. Es werden bestimmte Einflussfaktoren auf die Strömung variiert, um Erfahrungen und Erkenntnisse mit dem experimentellen Aufbau und dem verwendeten Messsystem zu sammeln. Im Anschluss der Geschwindigkeitsmessungen wurde ein Shadowgraphie-Versuch durchgeführt, um die Dicke des Rieselfilms zu bestimmen. Damit soll die Plausibilität der gemessenen Geschwindigkeiten überprüft werden.

4.1 Einflussfaktoren

Das Strömungsverhalten von Rieselfilmen wird von mehreren Faktoren beeinflusst (vgl. Kapitel 2.1). Nachstehend sind jene Einflussfaktoren beschrieben, die im Zuge dieser Arbeit näher untersucht wurden.

Viskosität der Versuchsflüssigkeiten

Es wurden drei Flüssigkeiten unterschiedlicher Viskosität getestet: deionisiertes Wasser, Silikonöl M 5 und Silikonöl M 20. Bei den Silikonölen handelt es sich um stabilisiertes, niedrigviskos Polydimethylsiloxan mit einer kinematischen Viskosität von 5 mm²/s (M 5) bzw. 20 mm²/s (M 20). Um die Tracerpartikel für die PIV-Messungen in den Flüssigkeiten besser zu verteilen, werden sie zuerst in Ethanol suspendiert bevor sie mit der Flüssigkeit gemischt werden. In Tabelle 2 sind die Zusammensetzung der untersuchten Versuchsflüssigkeiten und ihre kinematischen Viskositäten aufgezeigt. Die kinematische Viskosität der Versuchsflüssigkeit wird aus jenen der einzelnen Komponenten und dem Mischverhältnis abgeschätzt (siehe dazu die Erläuterung im Anhang).

Tabelle 2: Zusammensetzung und kinematische Viskosität der Versuchsflüssigkeiten.

Versuchsfluid	Zusammensetzung					kin. Visk.
	H ₂ O deion.	S M 5	S M 20	Ethanol	Rhodamin B	
	ml	ml	ml	ml	mg	10 ⁻⁶ m ² /s
Wasser	350	-	-	50	60	1
Silikonöl M 5	-	350	-	50	60	5
Silikonöl M 20	-	-	350	50	60	18

Wird in weitere Folge von „Wasser“ bzw. „Silikonöl“ gesprochen ist damit immer das Wasser-Ethanol-Gemisch bzw. das Silikonöl-Ethanol-Gemisch mit Rhodamin B-Partikel gemeint. Das Mischverhältnis entspricht 7:1 d.h. 350 ml deionisiertes Wasser bzw. Silikonöl und 50 ml Ethanol mit etwa 60 mg Tracerpartikel (Rhodamin B). Die Rhodamin B-Konzentration von etwa 0,15 g pro Liter Versuchsflüssigkeit wurde aufgrund positiver Erfahrungen bei Vorversuchen gewählt. Die beiden Silikonöle wurden nur einmalig für die Versuche zur Viskosität und des Neigungswinkels der Platte verwendet, weil das Öl die gesamte Versuchsanlage verschmiert und diese nur schwer wieder zu reinigen ist. Alle weiteren Versuche wurden deshalb mit Wasser durchgeführt.

Anstellwinkel der Platte

Die schräge Platte wurde bei drei verschiedenen Anstellwinkeln positioniert: 30 Grad, 45 Grad und 60 Grad. Die Variierung des Winkels erfolgt durch die Höhenverstellung der Hänggleiter im Grundgerüst (vgl. Abbildung 9). Der Winkel wird dabei mit einem Geodreieck und einer Wasserwaage gemessen. Mithilfe der Wasserwaage wird auch überprüft, dass die Platte nicht um ihre Längsachse geneigt ist, um so einen gleichverteilten Film über die Breite der Platte zu erhalten. Für die Versuche, die nicht auf einen auf einen variierenden Anstellwinkel abzielten, wurde Neigung von 30 Grad gewählt.

Volumenstrom

Die Flüssigkeitsaufgabe wurde mithilfe einer Zahnradschleuse zwischen 1700 ml/min und 3400 ml/min variiert. In Tabelle 3 sind die Reynolds-Zahlen der eingestellten Volumenströme von Wasser angeführt, die sich gemäß Gleichung (1) und bei einer Filmbreite von 100 mm ergeben.

Tabelle 3: Volumenstrom und Re für Wasser bei einer Filmbreite von 100 mm.

Volumenstrom	Re
ml/min	-
1700	283
1878	313
2000	333
2500	417
3000	500
3400	567

Der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung liegt bei in einem Reynolds-Zahlenbereich von $Re = 75 - 400$ (vgl. Kapitel 2.1.3). Das bedeutet, dass ab einem Volumenstrom von etwa 2500 ml/min mit $Re = 417$ von einem turbulenten Rieselfilm ausgegangen werden kann.

Material und Oberflächenstruktur der Platte

Die ersten Versuche wurden mit einer 2 mm dicken, glatten Platte aus Plexiglas (PMMA) durchgeführt. Anschließend wurden eine glattes und eine strukturiertes Metallblech der Firma RVT Process Equipment GmbH untersucht, siehe Abbildung 17.



Abbildung 17: strukturiertes und glattes Metallblech.

Die Oberfläche des strukturierten Blechs wird durch spezielles Walzen des glatten Bleches bearbeitet. Es wird von der Firma RVT Process Equipment GmbH zur Fertigung von Packungen für Kolonnen eingesetzt. Die Bleche sind etwa 0,5 mm dick und werden mit den seitlichen Klemmen auf die Plexiglasplatte gespannt. Da sich das strukturierte Blech stellenweise wölbt, wird es zusätzlich mit Blockmagneten befestigt (vgl. Kapitel 3.2.3).

Stolperstellen in der Strömung

Um den Einfluss einer Störstelle in der Strömung zu untersuchen wurde ein runder Wandmagnet als Stolperstelle auf der Plexiglasplatte befestigt, siehe Abbildung 18.



Abbildung 18: Stolperstelle.

Flüssigkeitsaufgabe

Da sich im Zuge der Versuche herausstellte, dass auch die Art der Flüssigkeitsaufgabe auf die schräge Platte das Strömungsverhalten des Rieselfilms beeinflusst, wurde diese im Laufe der Versuche verändert und optimiert (vgl. Kapitel 3.2.2).

4.2 Particle Image Velocimetry

Im Folgenden wird die Durchführung der Particle Image Velocimetry-Versuche erläutert. Wie bereits vorhin erwähnt, ist das Ziel dabei die Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes des Rieselfilms sowie das Sammeln von Erfahrungen mit dem experimentellen Aufbau und dem Messsystem.

4.2.1 Messprinzip

Die Particle Imaging Velocimetry ist eine optische berührungsfreie Methode zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in Strömungen. Das Prinzip dieses Verfahrens basiert auf dem Vergleich von zwei zeitlich aufeinander folgender Lichtschnittaufnahmen.

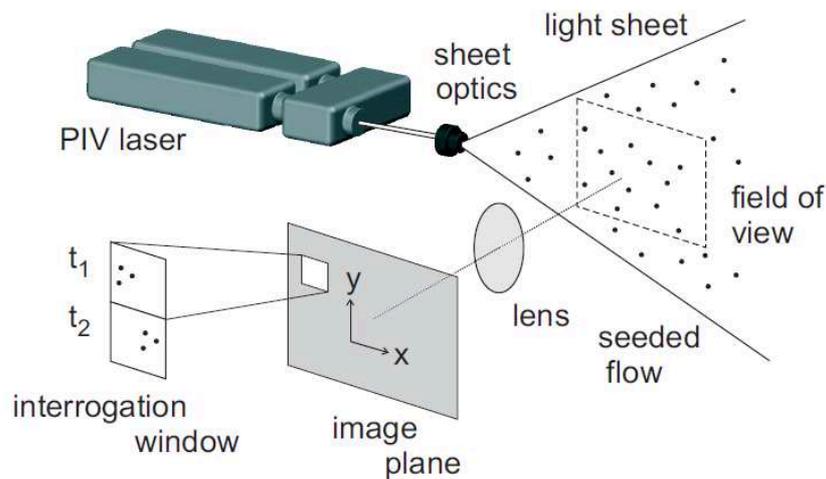


Abbildung 19: Setup eines 2D-PIV Systems (38).

Abbildung 19 zeigt das prinzipielle Setup einer zweidimensionalen-PIV Messung. Die Versuchsflüssigkeit wird mit kleinen Partikeln, sogenannte „Tracerpartikel“, versetzt. Mittels eines Lichtschnittes, erzeugt durch einen doppelt gepulsten Laserstrahl mit entsprechender Linsenoptik, werden die Partikel in der Strömung zweimal innerhalb einer kurzen Zeitspanne belichtet. Die Ortsänderung der Partikel in dieser Zeitspanne wird entweder durch einzelne aufeinander folgende Bilder (single-frame Modus) oder durch aufeinander folgende Bildpaare (double-frame Modus) mit jeweils einer Belichtung aufgenommen. In dieser Arbeit wird die zweite Methode angewandt. Die Ortsänderung pro Zeitspanne zwischen den Laserpulsen ergibt die Strömungsgeschwindigkeit. Eine Kamera, üblicherweise im rechten Winkel zum Lichtschnitt positioniert, nimmt das Streulicht der Partikel auf. Abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit und der Verschlusszeit der Kameralinse, wird die Zeitspanne zwischen den Laserpulsen so gewählt, dass eine geeignete Ortsänderung der Partikel aufgenommen werden kann. Anhand der Zeitverschiebung zwischen den zwei Belichtungen und der Ortsänderung der Partikel werden Geschwindigkeitsvektoren berechnet.

4.2.2 Versuchsaufbau

Abbildung 20 zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau für die PIV-Versuche. Die beiden Kernstücke des Versuchsaufbaus sind der Versuchsstand mit der schrägen Platte und das laseroptische High-Speed Messsystem der Firma LaVision GmbH.

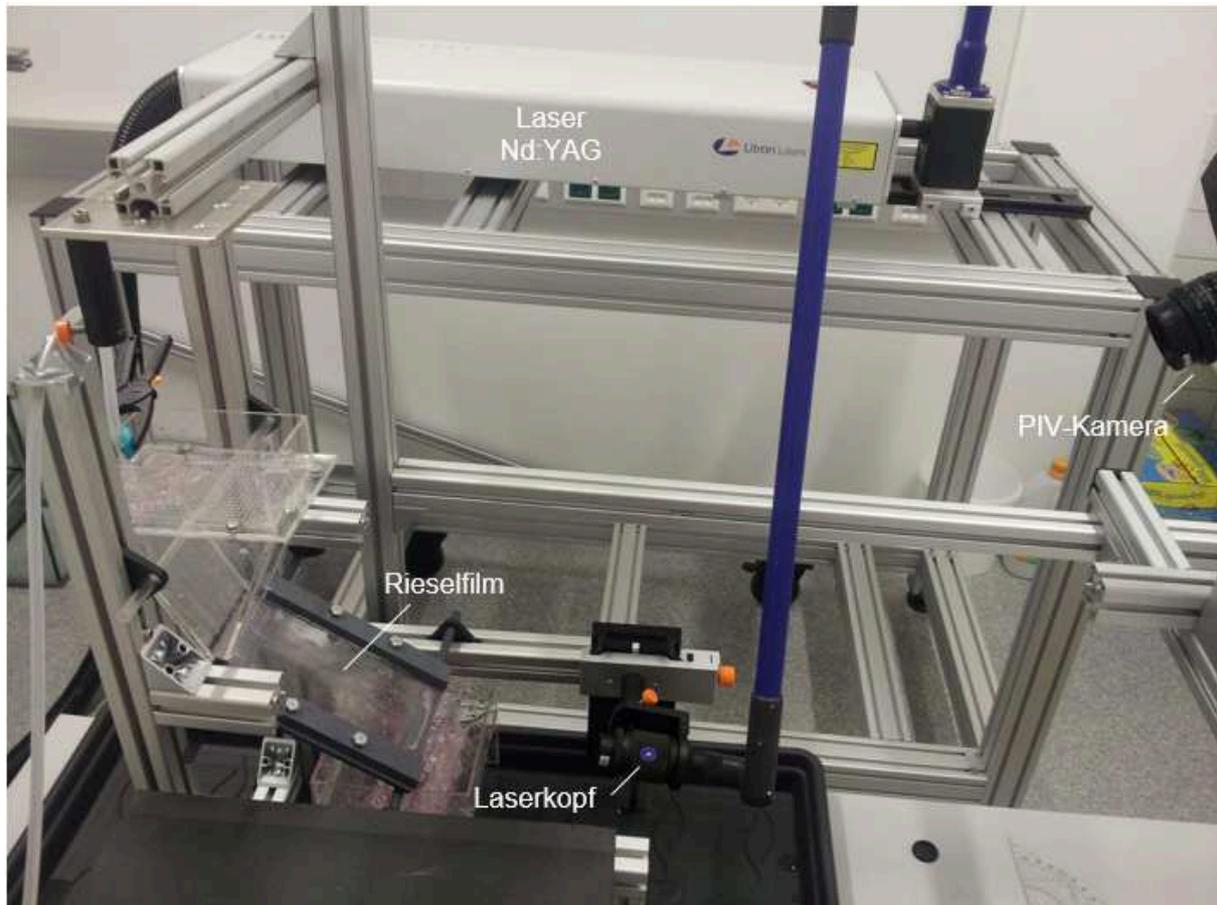


Abbildung 20: Versuchsaufbau für die PIV-Versuche.

Das laseroptische Messsystem besteht aus mehreren modulartigen Komponenten zur berührungslosen Untersuchung von Interaktionen zwischen gasförmigen und flüssigen Strömungen. Die Hauptkomponenten sind ein Laser mit Laserlichtführungsarm, eine bzw. mehrere High Speed Kameras und ein PC mit entsprechender Software zur Steuerung und Auswertung.

Der Laser ist ein doppelgepulster Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat Laser (kurz Nd:YAG) Laser mit einer Wellenlänge von 527 nm (neongrünes Licht) und einer Energie von 22,5 mJ. Er ist nach EN 60825-1 der höchsten Geräteklasse (Klasse 4) zugeordnet. Der erzeugte Laserstrahl wird über den Laserlichtführungsarm zum Laserkopf geführt. Der Laserkopf ist mit einer Linse versehen, die den gebündelten Laserstrahl in eine Ebene (Lichtschnitt) weitet. Es wird eine Linse mit einer Brennweite von $f = -10$ bzw. $f = -50$ verwendet. Je kleiner die Zahl ist, desto größer ist die Aufweitung. Die eingesetzte PIV-Kamera ist eine Hochgeschwindigkeitskamera vom Typ „Imager pro HS 4M“. Sie verfügt über einen CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) Sensor mit einer Frequenz

von 1279 Hz bei einer Auflösung von 2016 x 2016 Pixel (4 Megapixel). Der Volumenstrom der Versuchsflüssigkeit wird über eine Zahnradschlepppumpe vom Typ „Heidolph PD5230“ eingestellt. Die Pumpe gewährleistet die Kreislaufführung der Versuchsflüssigkeit zwischen Aufgabe- und Auffangbehälter. Die Steuerung und Auswertung der PIV-Messungen erfolgt über einen PC und mit der LaVision Software „DaVis Highspeed“. Die Schnittstelle zwischen Kamera, Laser und Software ist der „High Speed Controller“ (HSC).

4.2.3 Versuchsdurchführung

Im Zuge dieser Arbeit wurde eine Reihe von PIV-Versuchen durchgeführt. Die Vorgehensweise der Versuchsdurchführung kann allgemein durch folgende Schritte beschrieben werden.

1. Herstellung der Versuchsflüssigkeit

Zuerst wird die Versuchsflüssigkeit hergestellt. Dazu wird die zu testende Flüssigkeit (deionisiertes Wasser bzw. Silikonöl) mit Ethanol und Tracerpartikel gemischt, siehe dazu die Erläuterungen zur Viskosität der Versuchsflüssigkeiten in Kapitel 4.1. Als Tracer wird Rhodamin B Pulver mit einer Korngrößenverteilung von 20 – 50 µm eingesetzt. Im Fall der strukturierten Platte, wird ebenfalls ein Rhodamin B Pulver mit einer kleineren Korngrößenverteilung von 1 – 20 µm getestet, weil vermutet wird, dass sich die größeren, schwereren Partikel in den Vertiefungen absetzen.

2. Positionierung der Rieselfilmplatte

Die zu untersuchende Platte wird auf der Auflageplatte aus PVC bzw. auf der Plexiglasplatte befestigt. Anschließend wird der gewünschte Neigungswinkel der Platte am Versuchsstand eingestellt und die Schläuche für Zu- und Abfluss an der Pumpe und am Aufgabe- bzw. Auffangbehälter befestigt.

3. Aktivierung von Kamera, HSC und Auswertesoftware

Kamera und High Speed Controller werden eingeschaltet bevor die Steuer und Auswertesoftware „Davis PIV-Software“ am PC geöffnet wird. Dadurch erkennt das Programm die Komponenten und sie werden richtig initialisiert. Es ist nicht nötig den Laser vor Starten des Programmes einzuschalten.

4. Positionierung von Kamera und Laserkopf

Die Kamera und der Laserkopf werden in Position gebracht. Die Ausrichtung des Laserkopfes auf den Rieselfilm erfolgt, wie in Abbildung 20 zu sehen ist, von unten und möglichst in der Ebene des Rieselfilms. Dadurch wird eine großflächige Ausleuchtung des Films erreicht. Nach Einschalten des Lasers muss die Position des Laserkopfes meist noch nachkorrigiert werden. Die Kamera wird von oben auf den Rieselfilm gerichtet, wobei der

aufzunehmende Bereich mittig im Bild platziert wird, wie in Abbildung 21 zu sehen. Über die Blendenzahl am Kameraobjektiv wird das Bild scharf gestellt. Mit der gewählten Position von Kamera und Versuchsstand im Labor eignete sich eine Blendenzahl zwischen 4 und 5,6 für ein scharfes Bild. Bei den Versuchen wird nicht die gesamte Platte und Umgebung sondern lediglich ein Bildausschnitt aufgenommen. Dieser ist in Abbildung 21 durch das Rechteck gekennzeichnet. Der Bildausschnitt wird in der Software im Register „device settings“ eingestellt.

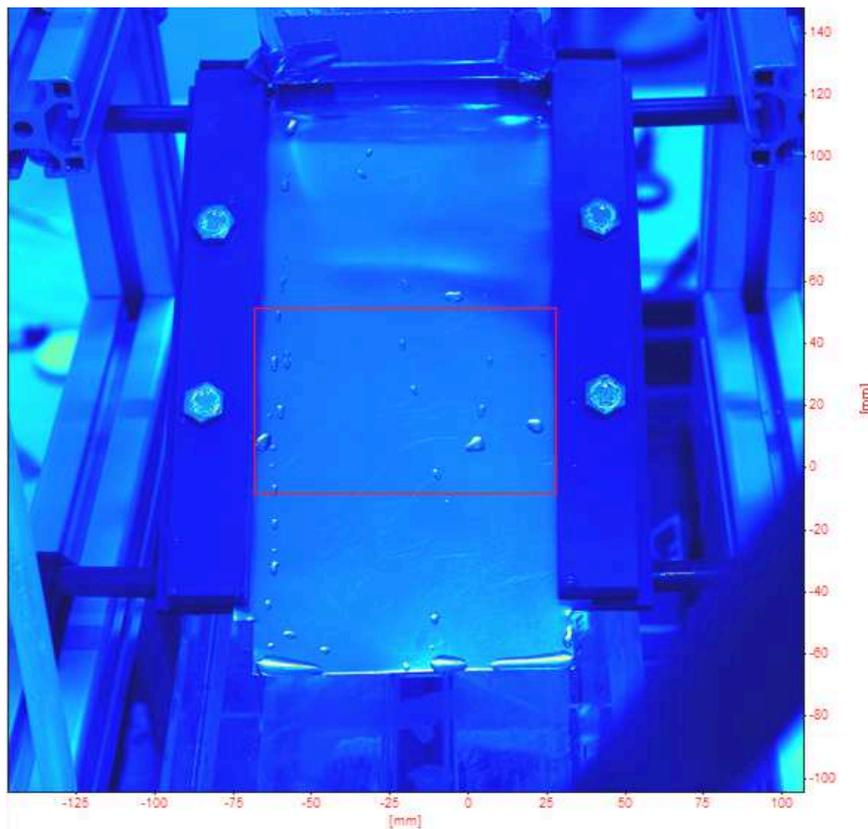


Abbildung 21: Bildausschnitt X=768 Pixel und Y=476 Pixel.

5. Kalibrierung

Mit der Kalibrierung des Systems wird festgelegt, wie viele Pixel einem Millimeter entsprechen. Die Kalibrierung wird noch ohne Versuchsflüssigkeit und bei Tageslicht (kein Laserlicht) durchgeführt. Wie folgende Abbildung 22 zeigt, wird dazu eine Kalibrierplatte mit einem Netz gleichweit voneinander entfernten Punkten auf der Versuchsplatte in Position gehalten und aufgenommen.

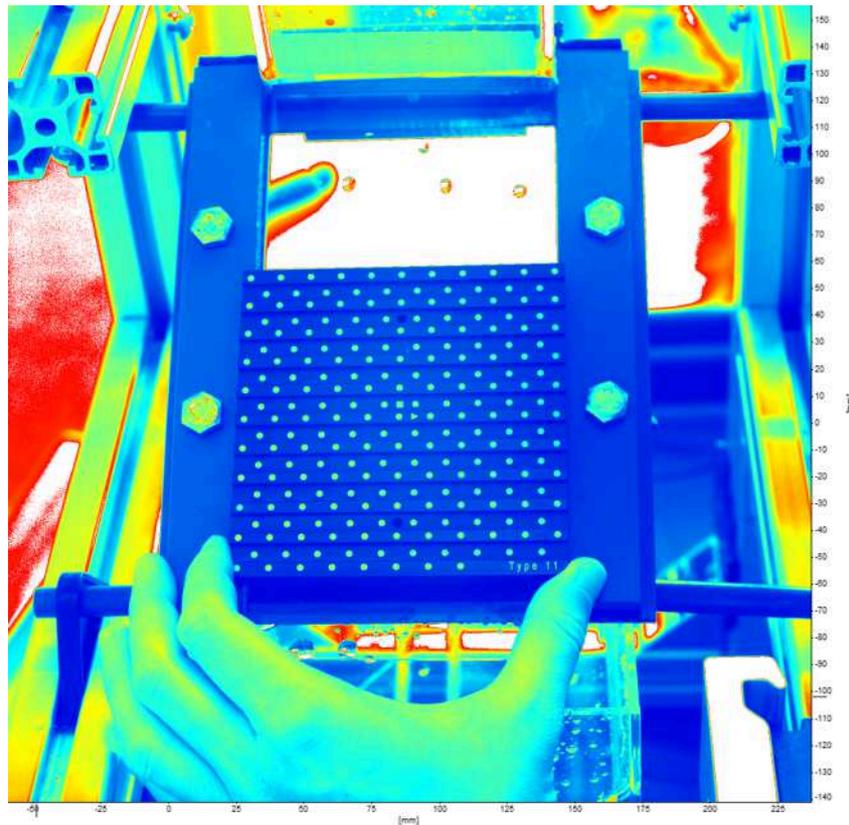


Abbildung 22: Kalibrierung für die PIV-Versuche.

Die verwendete Kalibrierplatte ist dreidimensional und vom Typ 11. Der Abstand der Punkte voneinander ist in der Software hinterlegt. Für die Bildaufnahme bei der Kalibrierung wird die Kamera auf „single frame“ (Einzelbildaufnahme) gestellt. Die Belichtungszeit wird größtmöglich mit etwa 4976 μs gewählt. Anschließend wird die Kalibrierung im DaVis in acht Schritten durchgeführt.

Im ersten Schritt wird der Modus der Kalibration auf eine Kamera (2D) festgelegt. Danach wird die Achsenorientierung des Koordinatensystems rechtsbündig eingestellt. Im nächsten Schritt wird die verwendete Kalibrierplatte (Typ 11) angegeben. Nun wird das Bild der Kalibrierplatte (Abbildung 22) in das Menü geladen. In Schritt Nummer 5 werden mit der Maus bestimmte Punkte auf dem Bild der Kalibrierplatte lokalisiert. Daraufhin wird die automatische Suche der restlichen Punkte gestartet und es erfolgt die automatische Feldberechnung. Im letzten Schritt wird das Ergebnis überprüft. Ein Fehler unter 1 Pixel ist gut, ein Fehler unter 0,3 Pixel ist exzellent. Nach Drücken des „Finish“-Knopfes ist die Kalibrierung abgeschlossen. (39) Nach der Kalibrierung darf die Position der Platte und der Kamera nicht mehr verändert werden.

6. Erzeugung des Rieselfilms

Nun wird die Versuchsflüssigkeit aufgegeben und an der Pumpe der gewünschte Volumenstrom eingestellt. Bei vielen Versuchen mit Wasser wurde anfänglich ein Abfließen der Versuchsflüssigkeit in der Mitte der Platte anstatt der Bildung eines geschlossenen Rieselfilms entlang der Breite der Platte beobachtet. Es hat sich bewährt, den Volumenstrom deshalb anfänglich für etwa fünf Minuten auf einen maximalen Durchfluss von 3400 ml/min einzustellen bis sich ein stabiler Film gebildet hat der an den seitlichen Klemmen benetzt. Erst danach wird der Volumenstrom dann nach unten reguliert. Abbildung 23 zeigt den erzeugten Rieselfilm von Wasser entlang dem glatten Metallblech bei einem Volumenstrom von 1700 ml/min. Abbildung 24 den Rieselfilm von Silikonöl M 20 entlang der Plexiglasplatte bei einem Volumenstrom von 1900 ml/min.

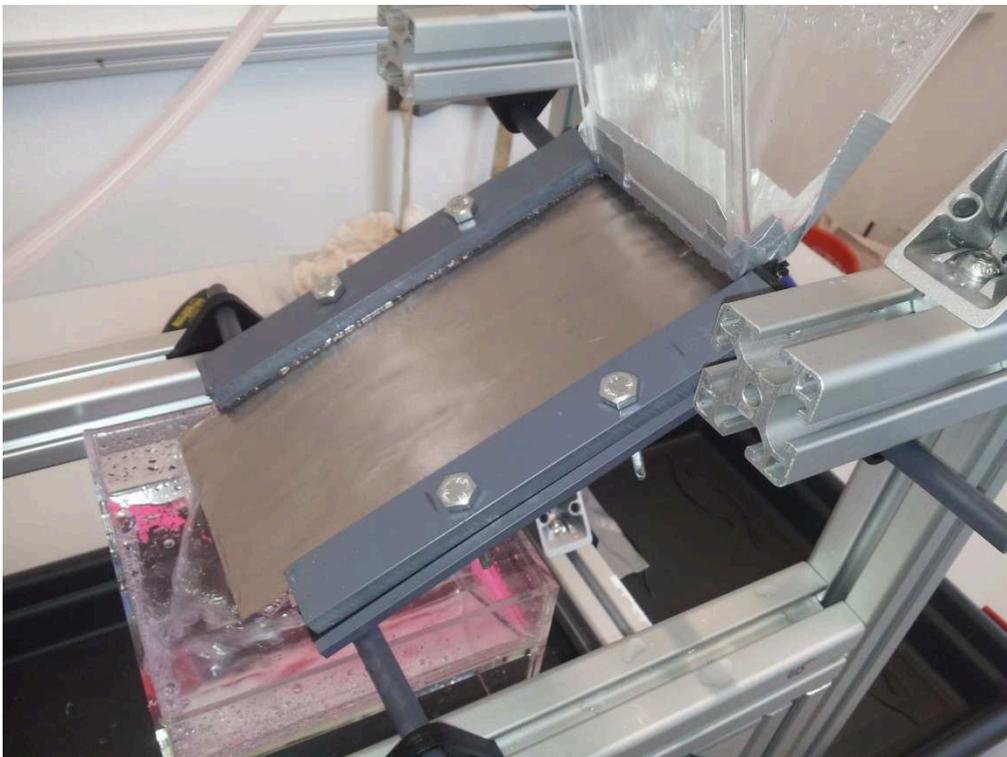


Abbildung 23: Rieselfilm von Wasser entlang des glatten Metallblechs (Anstellwinkel 30 Grad) bei einem Volumenstrom von 1700 ml/min.



Abbildung 24: Rieselfilm von Silikonöl M 20 entlang der Plexiglasplatte (Anstellwinkel 60 Grad) bei einem Volumenstrom von 1900 ml/min.

7. Aktivierung des Lasers

Nachdem der Rieselfilm erzeugt ist wird der Laser aktiviert. Bei den Versuchen wird eine Laserleistung von 75 % eingestellt. Sobald der Laser aktiviert ist, wird mit einer Schutzbrille gearbeitet, die das Laserlicht filtert. Der Laser benötigt etwa fünf Minuten bis die beiden Dioden eine Betriebstemperatur von 70° Celsius erreichen. Währenddessen wird das Kameraobjektiv mit einem Filter versehen, der nur die Wellenlängen des Lasers von 527 nm durchlässt. Zur Abschirmung des Experiments gegen gestreutes Laserlicht werden seitlich und hinter dem Experiment Styroporplatten aufgestellt.

8. PIV-Aufnahmen

Ist der Rieselfilm erzeugt und Kamera und Laser in Position gebracht, wird mit der Aufnahme begonnen. Dazu wird im Programm der Aufnahmetyp „PIV“ gewählt. Im Register „device settings“ im Menüpunkt „high speed recording“ wird die Kamera nun auf „double frame“ (Doppelbild) gestellt und der Laser auf „on“ gesetzt. Der Laser ist jetzt im Programm aktiviert, es wird aber nicht permanent, sondern nur während der Bildaufnahmen, Laserlicht ausgesandt. Im Menüpunkt „Timing“ wird eine Bildaufnahmerate von 250 Hz eingestellt, das bedeutet es werden pro Sekunde 250 Bildpaare aufgenommen. Die Zeitspanne dt zwischen den Laserpulsen wird mit $350 \mu\text{s}$ so gewählt, dass eine geeignete erkennbare Ortsänderung der Partikel auftritt. Die Ortsänderung ist als Partikelversatz zwischen den zwei Bildern („frame 1“ und „frame 2“) zu erkennen. Als Daumenregel zur Einstellung dieses Wertes gilt ein mittlere Partikelversatz von 5 Pixel (39). Im Unteregister „device offset“ wird eine Verzögerungszeit zur Referenzzeit festgelegt. Kamera und Laser brauchen unterschiedliche Zeitspannen, ein Bild aufzunehmen bzw. einen Lichtpuls abzugeben. Sie müssen zeitlich aufeinander abgestimmt sein, da sonst kein Licht im Bild ist. Bei der Kamera („Imager pro HS“) wird T1A auf $-5 \mu\text{s}$ gesetzt, bei dem Laser („light source 1“) T1A auf $-10 \mu\text{s}$ und T1B auf $-8 \mu\text{s}$. Die Abkürzungen T1A und T1B stehen für Laserstrahl 1 und 2. Die angegebenen Werte für die Einstellungen haben sich bei den Versuchen bewährt. Sind die Einstellungen für die Aufnahmen vorgenommen, wird das Kamerabild zunächst nur im Live-Modus dargestellt ohne der Speicherung von Bildern. Sind die Bilder zufriedenstellend, wird die Aufnahme mit Speicherung gestartet.

4.2.4 Auswertung der Rohbilder

Die Auswertung der Rohbilder erfolgt im DaVis (siehe Ergebnisse in Kapitel 5.2). Die digitale PIV- Aufnahme wird in kleine quadratische Auswertefenster unterteilt, so genannte „interrogation windows“, siehe Abbildung 25.

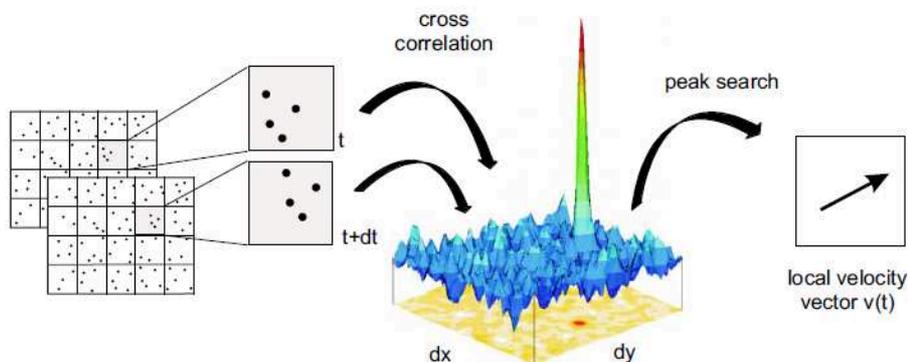


Abbildung 25: Prinzip der Auswertung einer PIV Aufnahme mittels Kreuzkorrelation (38).

Anhand eines statistischen Korrelationsverfahrens (Bildung von interrogation windows) wird für jedes Auswertefenster ein Verschiebungsvektor repräsentativ für alle Partikel definiert. Aus diesem Grund wird die Größe eines Auswertefensters so gewählt, dass sich alle Partikel darin homogen in dieselbe Richtung und gleich weit bewegen. Die Auswertung der Bilder hängt davon ab wie diese von der Kamera aufgenommen wurden. Die in dieser Arbeit aufgenommenen Bilder sind einzeln belichtete Doppelbilder, sie werden mittels Kreuzkorrelation ausgewertet. Ein einzelnes Bild mit Doppelbelichtung würde mittels Autokorrelation ausgewertet werden.

Das Programm erlaubt die Rohbilder im Vorfeld zu optimieren, so können z.B. Ungleichmäßigkeiten im Hintergrund gefiltert werden. Ebenso können für die Vektorberechnung gewisse Parameter, wie zum Beispiel die Fenstergröße für die Iterationen, vorgeben werden. Im Zuge dieser Arbeit wurde eine Auswertemaske mit bewährten Parametern erstellt um im Programm gespeichert. Ebenso wurde eine Maske für die Anpassung des Layouts für Bilder in Schwarz-weiß und Bilder in Farbe erstellt (siehe Kapitle 5.3).

4.3 Shadowgraphie

Im Folgenden wird die Durchführung des Shadowgraphie-Versuches erläutert. Anhand der damit bestimmten Filmdicken soll die Filmgeschwindigkeit berechnet werden um die mit PIV gemessenen Geschwindigkeiten auf Plausibilität zu prüfen.

4.3.1 Messprinzip

Die Shadowgraphie, auch Schattenabbildung genannt, ist ein Verfahren zur Visualisierung von Teilchen, Tröpfchen oder anderen Strukturen. In dieser Arbeit wird das Verfahren zur Bestimmung der Rieselfilmdicke eingesetzt. Die Technik basiert auf einem hochauflösenden, bildgebenden Aufnahmeverfahren in Verbindung mit einer gepulsten Hintergrundbeleuchtung. Die folgende Abbildung 26 zeigt das prinzipielle Setup einer Shadowgraphie-Messung.

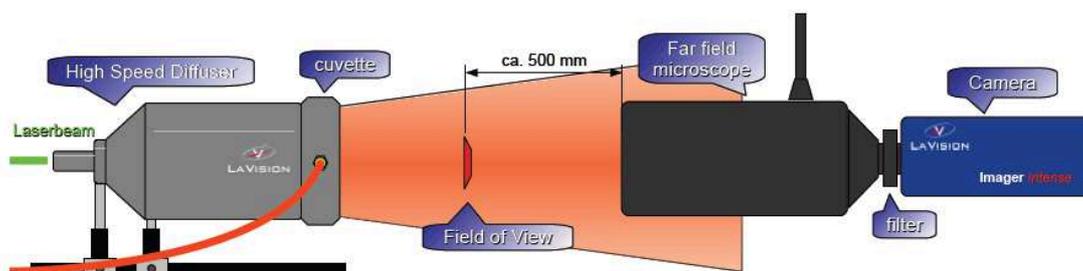


Abbildung 26: Setup einer Shadowgraphie-Messung mit Hochgeschwindigkeits-Diffuser und Fernfeldmikroskop (40).

Die Beleuchtung, das darzustellende Experiment und das Aufnahmesystem sind optimaler Weise auf einer Linie angeordnet. Der Aufnahmebereich ist definiert durch die Brennebene sowie die Tiefenschärfe des bildgebenden Systems. Mithilfe eines Fernfeldmikroskops ist eine extrem hohe Vergrößerung und Auflösung des Aufnahmebereichs unter Beibehaltung eines großen Arbeitsabstandes möglich. Die Technik ist unabhängig von Form und Material (transparent oder undurchsichtig) der Teilchen. (41) Die erforderliche Hintergrundbeleuchtung zur Schattenaufnahme wird durch einen gepulsten Laser und einen Hochgeschwindigkeits-Diffuser erzeugt.

4.3.2 Versuchsaufbau

Abbildung 27 zeigt den Versuchsaufbau den Shadowgraphie-Versuch gemäß dem eben beschriebenen prinzipiellen Setup. Die beiden Kernstücke des Versuchsaufbaus sind, wie bei den PIV-Versuchen, der Versuchsstand mit der schrägen Platte und das laseroptische High-Speed Messsystem der Firma LaVision GmbH.

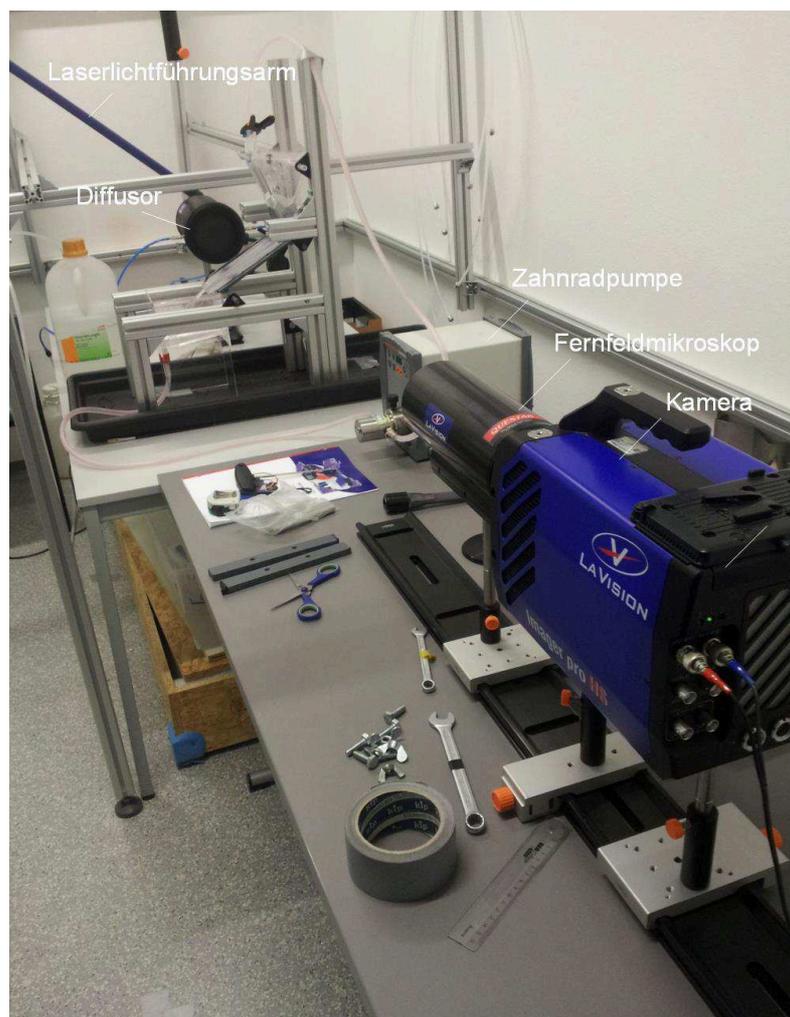


Abbildung 27: Versuchsaufbau für den Shadowgraphie-Versuch.

Bei der Shadowgraphie wird derselbe doppelgepulster Nd:YAG Laser, dieselbe Kamera und die gleiche Software wie bei den PIV-Versuchen eingesetzt. Im Gegensatz zu den PIV-Versuchen, wird der Laserstrahl bei der Shadowgraphie aber für einen Hochgeschwindigkeits-Diffusor zur Erzeugung einer gleichmäßig diffusen Hintergrundbeleuchtung verwendet. Der Hochgeschwindigkeits-Diffusor ist seitlich am Rieselfilm positioniert um die für die Schattenaufnahme erforderliche Hintergrundbeleuchtung zu erzeugen. Aufgrund des Wellenlängen-Wandlers innerhalb des Diffusers kann ein fleckenfreies Gegenlicht kombiniert mit dem Vorteil ultrakurzer Lichtpulse hoher Intensität erzeugt werden. Der Hochgeschwindigkeits-Diffusor ist speziell für Hochgeschwindigkeits-Laser ausgelegt, weil diese eine hohe mittlere Leistung besitzen und deshalb ungekühlte Diffuser zerstören würden. Die Wellenlängen-Wandlung findet in der Küvette statt, die mit einer Farbstofflösung aus Ethanol und Rhodamin gefüllt sind. Die Lösung wird permanent über die Farbstoff-Pumpe ausgetauscht und gekühlt. In Abbildung 28 wird veranschaulicht, wie der Laserstrahl im Diffusor expandiert wird und die Farbstofflösung in den Küvetten beleuchtet.

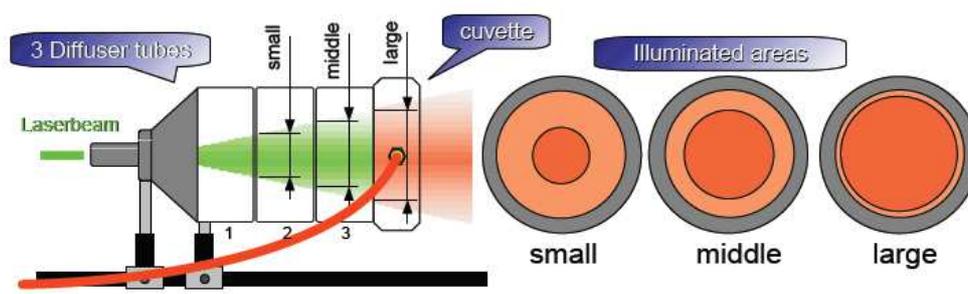


Abbildung 28: Einstellung des beleuchteten Bereichs (40).

Wie zu sehen ist, kann der beleuchtete Bereich an der Diffusor-Frontscheibe variiert werden. Ein großer beleuchteter Bereich bedeutet eine niedrigere Intensität und umgekehrt. (40)

Die Kamera ist bei der Shadowgraphie seitlich auf den Rieselfilm ausgerichtet und mit einem Fernfeldmikroskop versehen. Abbildung 29 zeigt das Funktionsprinzip des eingesetzten Fernfeldmikroskops. Es ermöglicht eine extrem hohe Vergrößerung und Auflösung des Aufnahmebereichs unter Beibehaltung eines großen Arbeitsabstandes. Das Licht tritt über die Frontkorrekturlinse in das Mikroskop ein, wird dort gebrochen und gelangt zum ersten Spiegel auf der Rückseite des Mikroskops. Dort wird das Licht zum zweiten Spiegel reflektiert, der an der Frontlinse montiert ist. Der Strahl passiert dann einen Kanal, der in der zentralen Öffnung am zweiten Spiegel gelagert ist. Je nach Stellung des dahinterliegenden Prismas kann der obere Anschluss (Okular) oder der axiale Anschluss (Kamera) verwendet

werden. (42) In dieser Arbeit wird der axiale Anschluss zur Kamera verwendet, um die Bilder aufzuzeichnen.

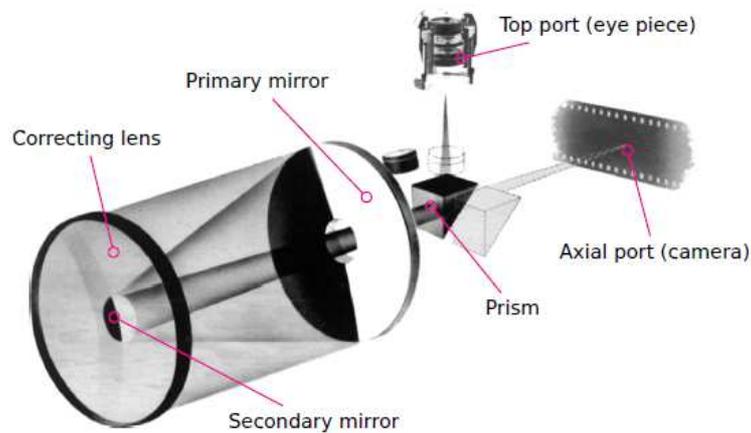


Abbildung 29: Funktionsprinzip des Fernfeldmikroskops (42).

Um einen optischen Zugang der Kamera zum Rieselfilm zu ermöglichen, werden die seitlichen Klemmen zur Befestigung der Versuchsplatte entfernt, siehe Abbildung 30 links ohne und zum Vergleich rechts mit Klemmen. Die verwendete Platte (glatte Metallblech) wird nur durch die Blockmagnete auf der Unterlageplatte gehalten und schließt nun mit der seitlichen Haltevorrichtung ab.

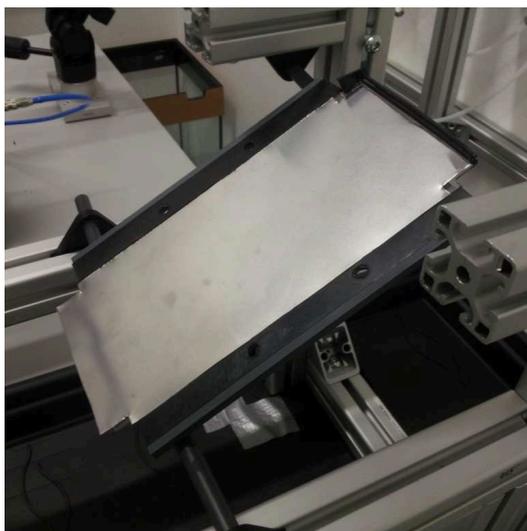


Abbildung 30: Versuchsplatte ohne (links) und mit (rechts) seitlichen Klemmen

4.3.3 Versuchsdurchführung

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Shadowgraphie-Versuch mit Wasser als Versuchsflüssigkeit durchgeführt. Grund dafür ist, dass sich durch die Entfernung der seitlichen Klemmen auf der Platte kein Rieselfilm über die Breite der Platte mehr ausbildet (siehe Abbildung 31) und die Ergebnisse deshalb nicht verwendbar sind.

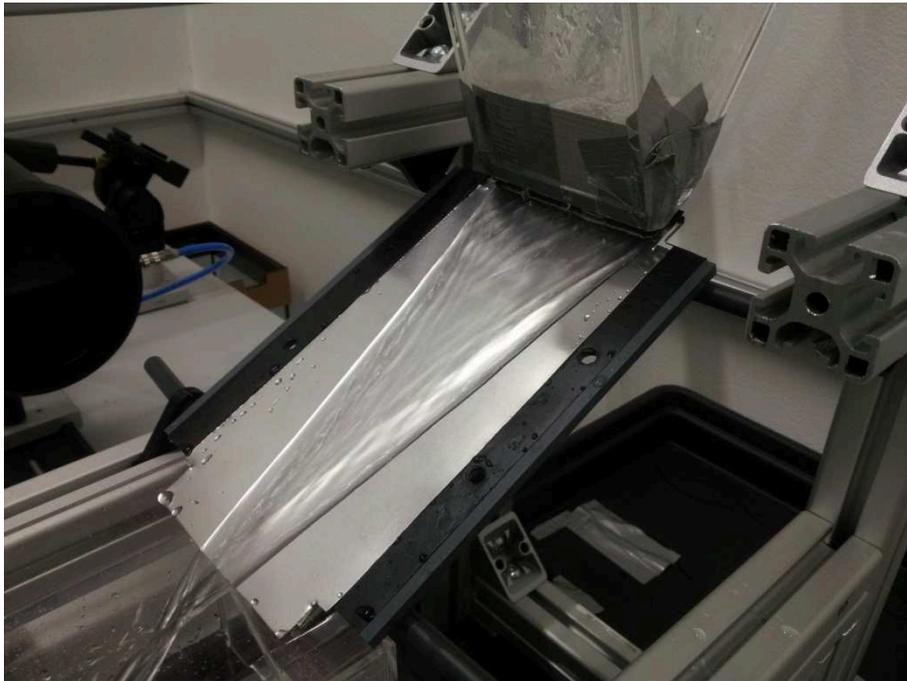


Abbildung 31: Strömungsverhalten der Versuchsflüssigkeit während der Shadowgraphie-messung. Es bildet sich kein geschlossener Film über die Breite der Platte aus.

Bevor weitere Messungen durchgeführt werden können, muss zuerst wieder die Rieselfilmbildung optimiert werden, was im Rahmen dieser Arbeit aber nicht mehr erfolgte. Trotzdem wurde ein Shadowgraphie-Versuch durchgeführt, um die prinzipielle Eignung der Methode zur Filmdickenbestimmung zu testen.

Der Versuchsablauf erfolgt in denselben Schritten wie bei den PIV-Versuchen (vgl. Kapitel 4.2.3). Kamera und Lasers werden jedoch wie in Abbildung 27 zu sehen ist in einer Linie positioniert. Zusätzlich wird am Laserkopf des Highspeed-Diffusers montiert. Er wird mit einer Farbstofflösung aus 500 ml Ethanol und 10 mg Rhodamin B Partikel gefüllt. Dies ist nötig um eine gleichmäßige diffuse Hintergrundbeleuchtung zu erhalten. Die Umwälzpumpe sorgt dafür, dass das Rhodamin nicht in der Küvette absinken kann. An der Kamera wird das Fernfeldmikroskop angeschlossen. Das Bild wird über die Fokussierstange am Mikroskop scharf gestellt. Gesteuert wird die Shadowgraphie ebenfalls über den PC und mit der

LaVision Software „DaVis Highspeed“. Allerdings wird als Aufnahmetyp „Imaging“ (Bildaufnahme) und nicht „PIV“ verwendet. Eine Kalibrierung der Kamera ist für die Shadowgraphie nicht erforderlich.

4.3.4 Auswertung

Die Auswertung der Bilder, d.h. die Bestimmung der Filmdicke des aufgenommenen Rieselfilms erfolgt nicht über die Software. Die Filmdicke wird mithilfe der seitlichen Bildbemaßung bestimmt. Es wird ein Punkt A ($a_1; a_2$) an der Plattenoberfläche und ein Punkt B ($b_1; b_2$) an der Filmoberfläche definiert (vgl. dazu Abbildung 48 in Kapitel 5.2.6). Die Filmdicke δ entspricht der Länge des Vektors zwischen den beiden Punkten:

$$\delta = \left| \vec{\delta} \right| = \overline{AB} = (b_1 - a_1; b_2 - a_2) \quad (15)$$

Mit der Filmdicke δ , der Filmbreite b von 100 mm, sowie dem eingestellten Volumenstrom \dot{V} , kann über die Kontinuitätsgleichung die Strömungsgeschwindigkeit berechnet werden:

$$u = \frac{\dot{V}}{(\delta \cdot b)} \quad (16)$$

Anhand der berechneten Geschwindigkeiten können die mit PIV gemessenen Geschwindigkeiten verifiziert werden. Die Durchführung dieses Plausibilitätschecks ist vorerst jedoch nicht möglich, weil die Ergebnisse der Filmdickenmessung nicht verwendbar sind.

5 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Optimierung des Versuchstandes, der durchgeführten Versuche sowie die Anwendung des Messsystems beschrieben.

5.1 Optimierter Versuchsstand

Die anfänglichen Undichtigkeiten des Versuchsstandes konnten durch die Entfernung des Schiebersystems und die direkte Platzierung des Aufgabetrichters auf die Platte größtenteils beseitigt werden. Durch kleine Leckagen austretendes Wasser wird mithilfe einer Wanne, in welche der Versuchsstand gestellt wurde, aufgefangen.

Nachdem das Schiebersystem entfernt wurde, erfolgte bei den ersten PIV-Versuchen der Flüssigkeitsübergang auf die Platte direkt über die 12 mm breite Öffnung des Aufgabebehälters (siehe Abbildung 13 in Kapitel 3.2.1). Abbildung 32 zeigt das Geschwindigkeitsprofil des Rieselfilms, das dabei aufgenommen wurde. Dass hier ein über die Breite der Platte geschlossener Film aufgetreten ist, ist bei dieser Art der Aufgabe allerdings eine Ausnahme. Meist fließt die Flüssigkeit stattdessen in Rinnsalen ab.

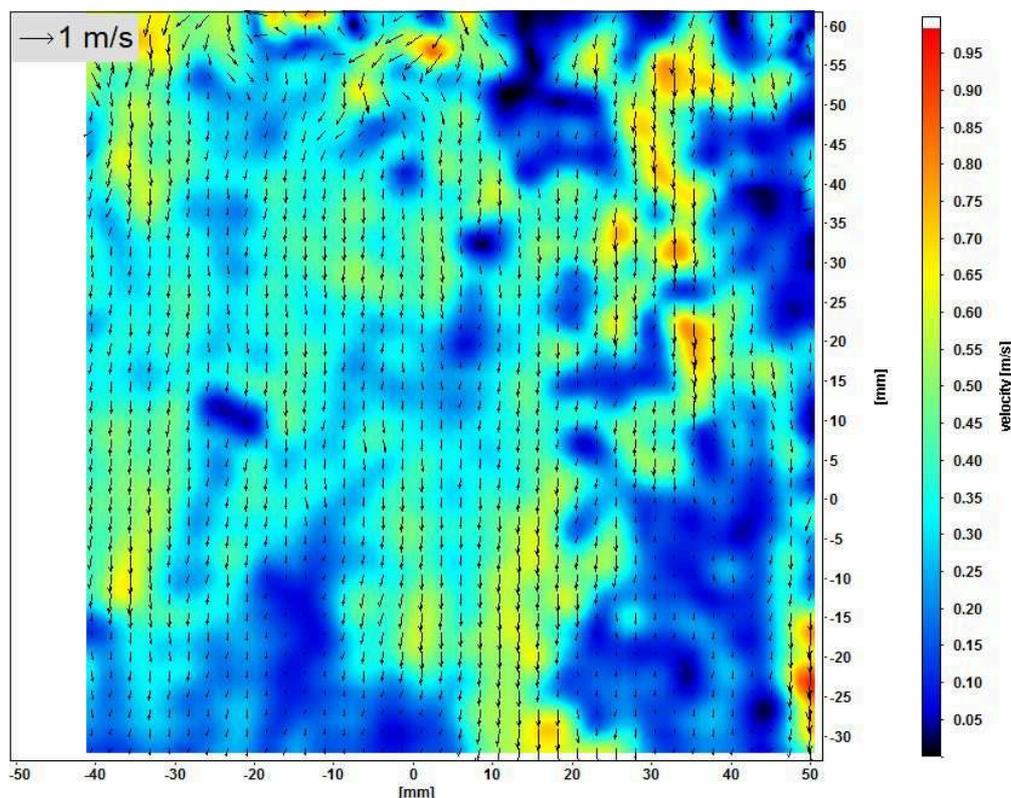


Abbildung 32: Geschwindigkeitsprofil entlang der Plexiglasplatte (Medium Wasser; Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über die originale Spaltbreite des Aufgabebehälters von 12 mm und einem Volumenstrom von 1878 ml/min.

Da sich die Flüssigkeit bereits im Aufgabebehälter ungleichmäßig verteilt, entsteht auch auf der Platte eine inhomogene Geschwindigkeitsverteilung. Das ist an der Ungleichmäßigkeit der Farbverteilung zu erkennen. Die folgende Abbildung 33 zeigt das Geschwindigkeitsprofil bei Aufgabe über das im Technikum des Lehrstuhls gefertigte gekantete Blech (siehe Abbildung 19 in Kapitel 3.2.1). Das Profil wurde an dem glatten Metallblech bei einem Volumenstrom von 3400 ml/min aufgenommen.

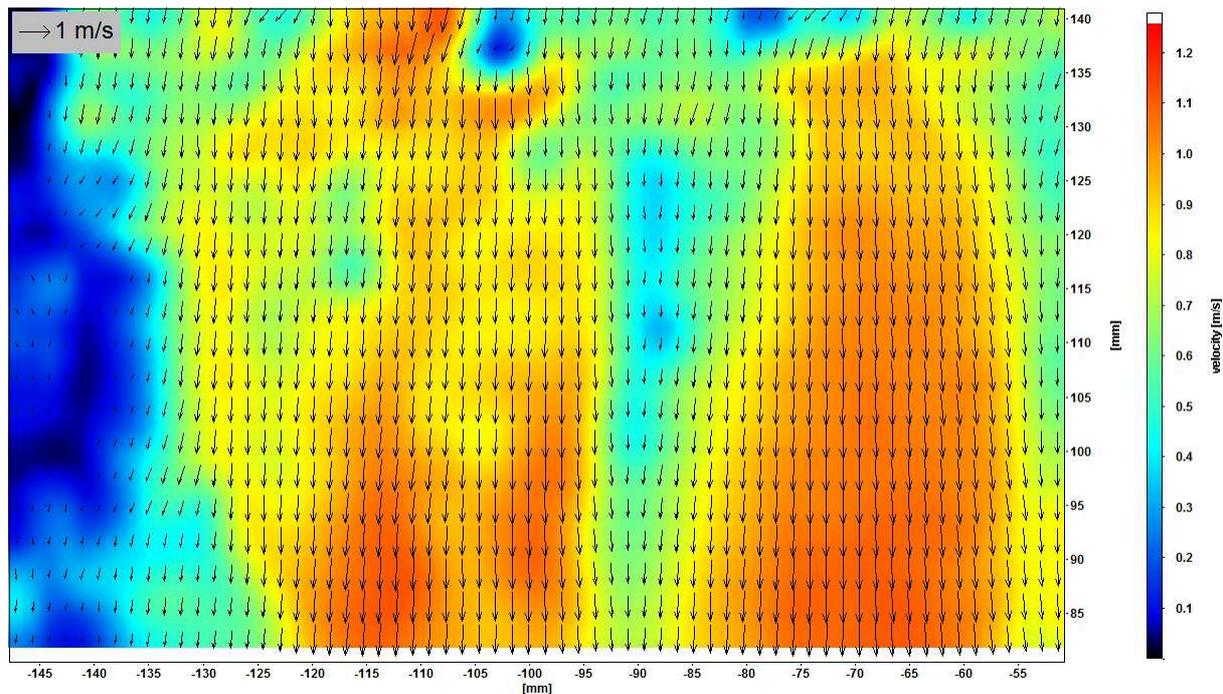


Abbildung 33: Geschwindigkeitsprofil entlang des glatten Metallblechs (Medium Wasser; Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über das gekantete Aluminiumblech und einem Volumenstrom von 3400 ml/min.

Auch hier zeigt sich, dass die Strömung nicht gleichmäßig ist. Generell ist aber eine Verbesserung zum vorherigen Zustand festzustellen. Außerdem bildet sich meist ein geschlossener Film und es tritt die gewünschte Stauung im Aufgabebehälter zur Vergleichmäßigung auf.

Eine weitere Verbesserung der Gleichmäßigkeit des Rieselfilms konnte durch die Verwendung der industriell gefertigten zweimal gekanteten Bleche mit gelasertem Spalt (siehe Abbildung 15 in Kapitel 3.2.1) erzielt werden. Abbildung 34 zeigt das Geschwindigkeitsprofil, das sich dadurch bei einem Volumenstrom von 3400 ml/min auf dem glatten Metallblech bildet.

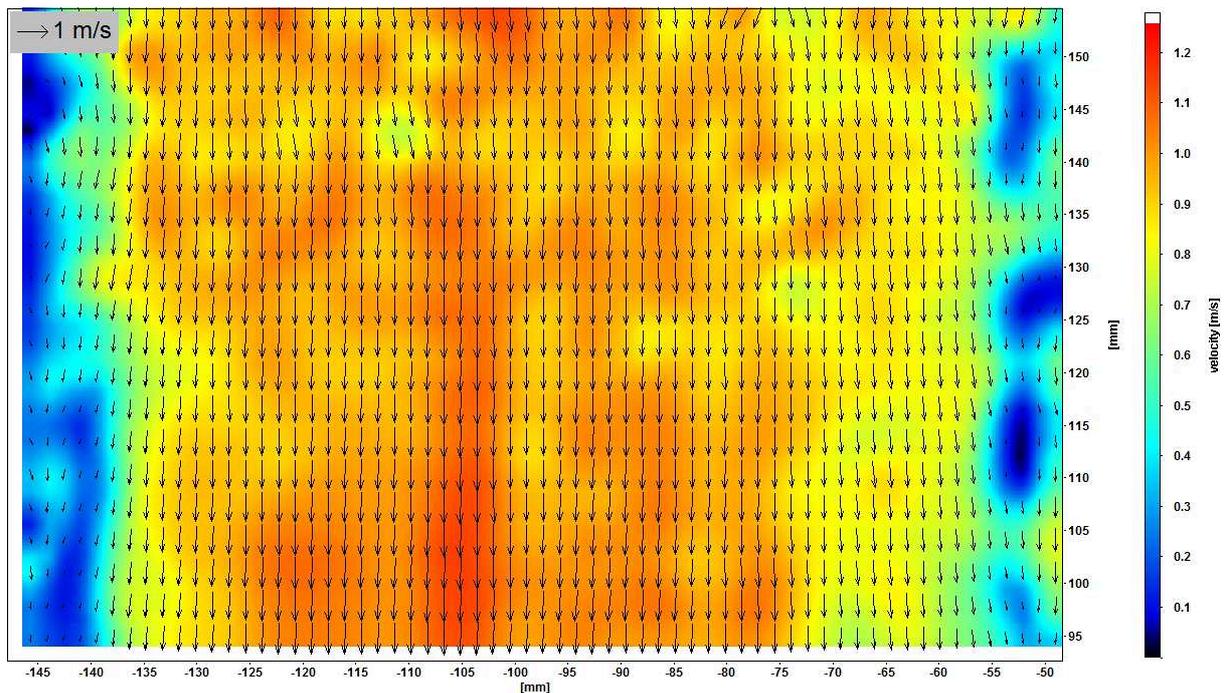


Abbildung 34: Geschwindigkeitsprofil entlang des glatten Metallblechs (Medium Wasser; Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über das Aluminiumblech mit 0,3 mm Spaltbreite und einem Volumenstrom von 3400 ml/min.

Vergleicht man dieses Profil mit den vorhergehenden Profilen (Abbildung 32 und Abbildung 33), so ist eine deutliche Homogenisierung erkennbar. Diese wird einerseits dadurch bewirkt, dass die Flüssigkeit im Aufgabebehälter gestaut wird und sich dort somit gleichmäßig verteilt. Andererseits weist der Austrittsspalt keine Unebenheiten auf, wodurch ein gleichmäßiger Übergang der Flüssigkeit auf die Platte ermöglicht wird. Alle drei Spaltbreiten (0,3 mm, 0,5 mm und 0,7 mm) erzielten ähnlich gute Ergebnisse. Es wurde allerdings beobachtet, dass die Geschwindigkeitsprofile mit sinkendem Volumenstrom wieder unregelmäßiger werden. Das liegt daran, dass die Stauung im Aufgabebehälter bei kleineren Volumenströmen abnimmt.

5.2 Experimentelle Untersuchungen

In diesem Unterkapitel werden ausgewählte Ergebnisse der PIV-Versuche sowie ein erster Versuch zur Filmdickenmessung mit Shadowgraphie beschrieben.

Bei den Ergebnissen der PIV-Versuche muss beachtet werden, dass die Geschwindigkeitsprofile nur qualitative Aussagen und keine quantitativen Aussagen über die Strömungsgeschwindigkeit des Rieselfilms zulassen. Grund dafür ist, dass das der erzeugte Rieselfilm, trotz der kontinuierlichen Optimierung des Versuchsaufbaus im Laufe der

Versuche, immer noch nicht über die gesamte Breite der Platte homogen ist. Des Weiteren kann keine Aussage darüber getroffen werden, in welcher Tiefenebene des Rieselfilms die Geschwindigkeit aufgenommen wird. Das heißt, es ist nicht bekannt ob das Geschwindigkeitsprofil die Strömungsgeschwindigkeit nahe der Platte, in der Mitte, oder an der Oberfläche der Rieselfilm dargestellt. Nach Angaben des Messsystemherstellers LaVision, ist dafür eine erweiterte Software für die Durchführung einer „Topgraphischen PIV“ nötig.

5.2.1 Viskosität der Versuchsflüssigkeit

Nachstehend sind die aufgenommenen Geschwindigkeitsprofile der beiden Silikonöl-Ethanol-Gemische, das Silikon M 5 - Ethanol-Gemisch mit einer kinematischen Viskosität von $5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ und das Silikonöl M 20 - Ethanol-Gemisch mit einer kinematischen Viskosität von $18 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, dargestellt. Als Versuchsplatte wurde die Plexiglasplatte bei einem Neigungswinkel von 30 Grad eingesetzt. Da die Versuche zu Beginn der Arbeit durchgeführt wurden, erfolgte die Flüssigkeitsaufgabe noch direkt über die 12 mm große Öffnung des Aufgabebehälters (vgl. Abbildung 13 in Kapitel 3.2.1). Der eingestellte Volumenstrom beträgt 1878 ml/min. Ein vergleichbares Profil (gleiche Flüssigkeitsaufgabe, Platte, Neigungswinkel und beinahe gleicher Volumenstrom) des Wasser-Ethanol Gemisches mit einer kinematischen Viskosität von $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ist in Abbildung 32 in Kapitel 5.1 dargestellt.

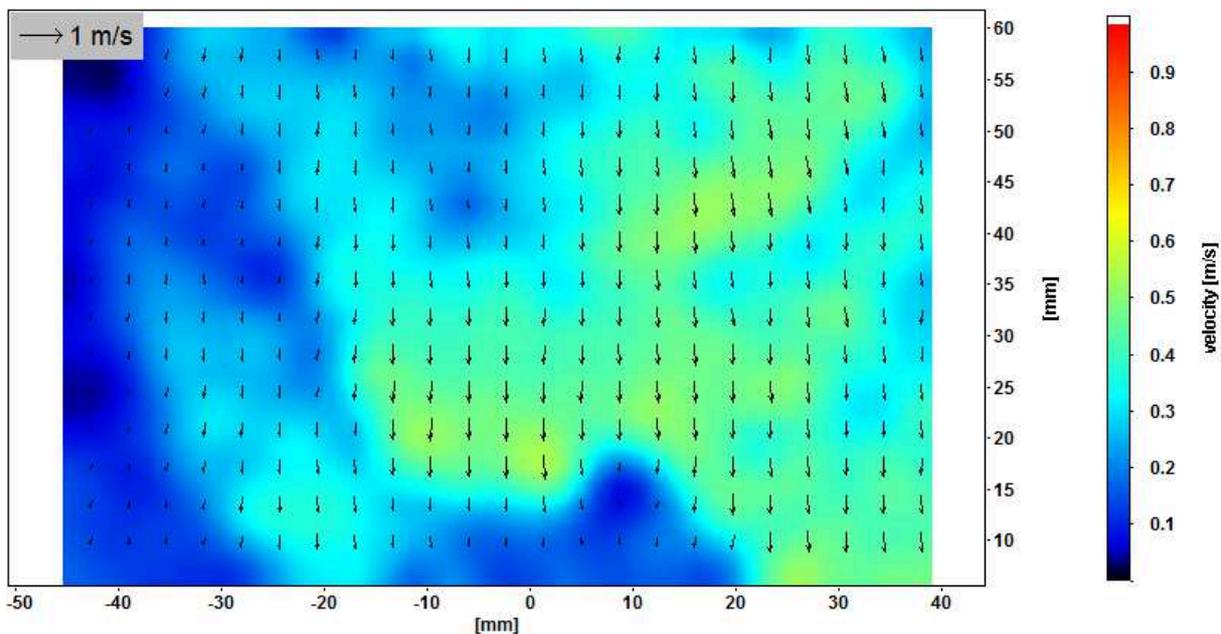


Abbildung 35: Geschwindigkeitsprofil von Silikonöl M 5 entlang der Plexiglasplatte (Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über die originale Spaltbreite des Aufgabebehälters von 12 mm und einem Volumenstrom von 1878 ml/min.

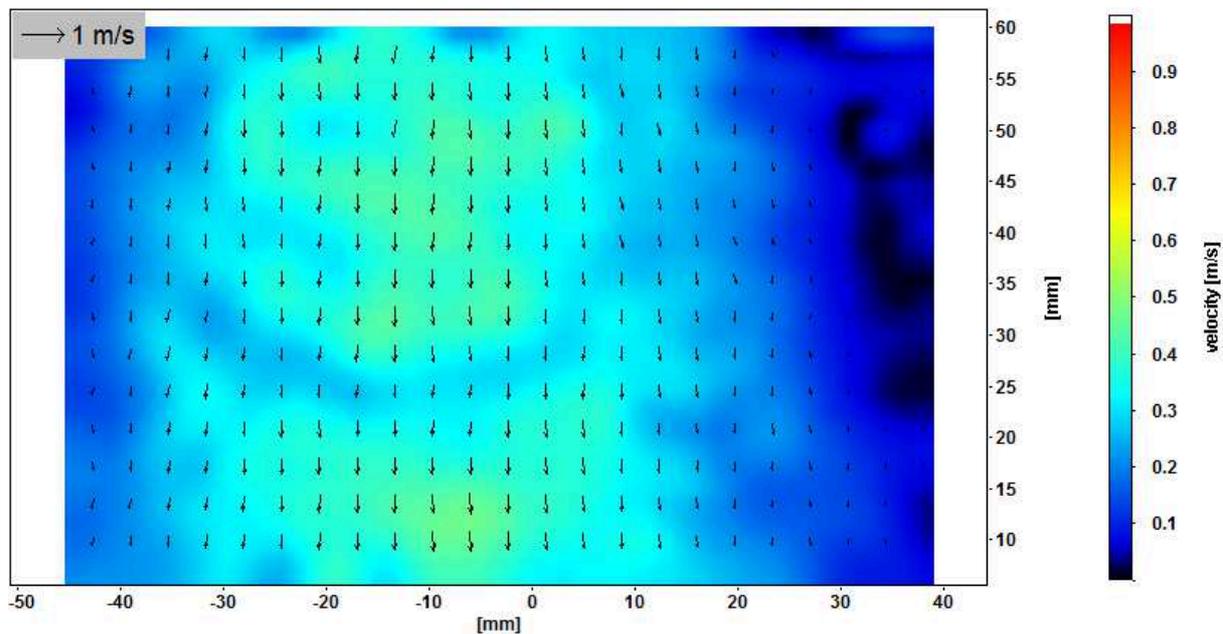


Abbildung 36: Geschwindigkeitsprofil von Silikonöl M 20 entlang der Plexiglasplatte (Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über die originale Spaltbreite des Aufgabebehälters von 12 mm und einem Volumenstrom von 1878 ml/min.

Prinzipiell ist an den Geschwindigkeitsprofilen erkennbar, dass die Strömungsgeschwindigkeit des Rieselfilms mit steigender Viskosität abnimmt, also das Wasser schneller entlang der Platte abfließt als die Silikonöle. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass durch die Aufgabe der Flüssigkeit über die große Öffnung des Aufgabebehälters der Rieselfilm von vornherein durch die Position des Schlauches im Aufgabebehälter lokal beschleunigt wird was die Ergebnisse beeinträchtigt. Das ist vor allem an der Ungleichmäßigkeit der Geschwindigkeitsverteilung des Wassers (Abbildung 32) und des Silikonöls M 5 (Abbildung 35) erkennbar. Das höher viskose Silikonöl M 20 (Abbildung 36) kann den Einfluss der ungleichen Flüssigkeitsaufgabe besser kompensieren und das Geschwindigkeitsfeld ist etwas gleichmäßiger. Das zeigt, dass das Geschwindigkeitsprofil entlang der Filmbreite mit steigender Viskosität einheitlicher wird. Aus den Ergebnissen dieser Versuchsreihe wurde beschlossen die Art der Flüssigkeitsaufgabe zu optimieren (siehe Kapitel 3.2.2). Von einer weiteren Verwendung der Silikonöle wurde abgesehen, weil die Versuchsanlage nach Verwendung der Öle nur durch großen Aufwand wieder gereinigt werden konnte. Die vollständige Entfernung von Ölsuren ist erforderlich, weil dadurch sonst bei weiteren Versuchen mit Wasser das Fließverhalten beeinträchtigt wird.

5.2.2 Anstellwinkel der Platte

Die unterschiedlichen Anstellwinkel der Platte (30, 45 und 60 Grad) wurden mit dem Silikonöls M 5 getestet. Daher gelten für die aufgenommenen Geschwindigkeitsprofile dieselben Aussagen wie im Kapitel zu davor.

Nachstehend sind die Geschwindigkeitsprofile des Silikonöls M 5 für den Anstellwinkel 45 Grad (Abbildung 37) und 60 Grad (Abbildung 38) dargestellt. Das Profil bei 30 Grad ist in Kapitel 5.2.1 in Abbildung 35 zu sehen.

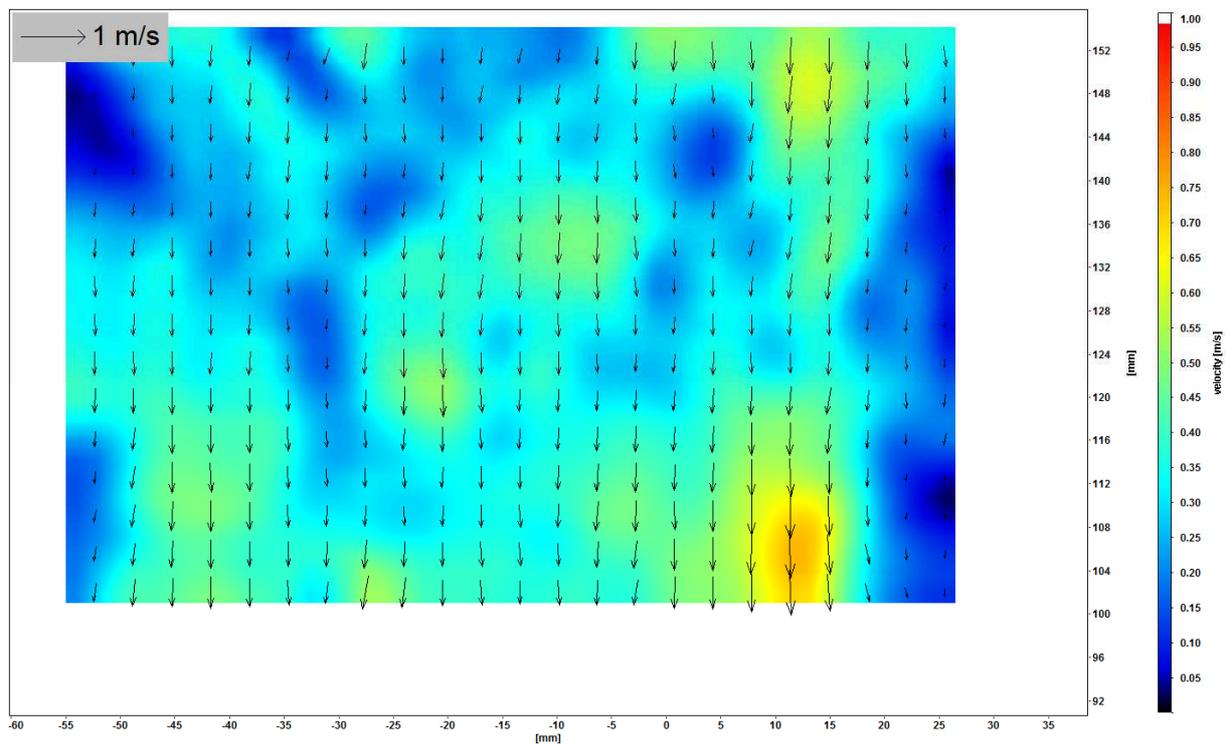


Abbildung 37: Geschwindigkeitsprofil von Silikonöl M 5 entlang der Plexiglasplatte (Anstellwinkel 45 Grad) bei Aufgabe über die originale Spaltbreite des Aufgabebehälters von 12 mm und einem Volumenstrom von 1900 ml/min.

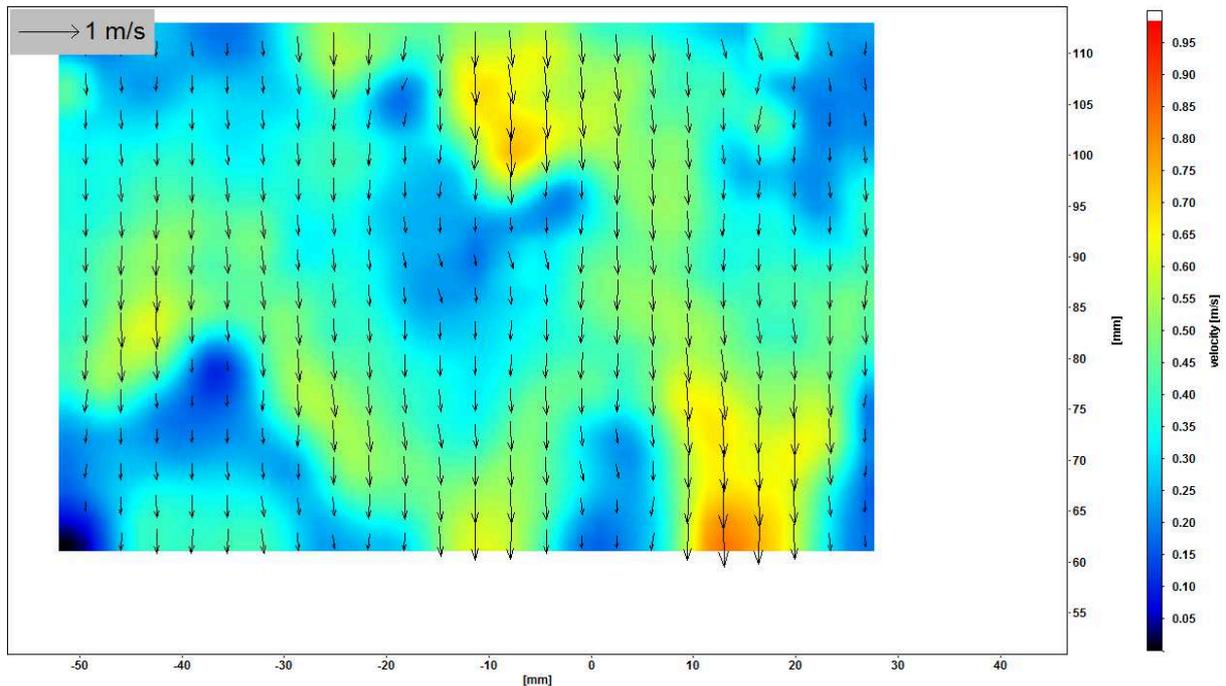


Abbildung 38: Geschwindigkeitsprofil von Silikonöl M 5 entlang der Plexiglasplatte (Anstellwinkel 60 Grad) bei Aufgabe über die originale Spaltbreite des Aufgabebehälters von 12 mm und einem Volumenstrom von 1900 ml/min.

An den Aufnahmen ist erkennbar, dass die Geschwindigkeit des Rieselfilms entlang der Platte mit steigendem Winkel zunimmt. Das ist an der Größe der Pfeile bzw. daran zu erkennen, dass der Farbeverlauf mit steigendem Volumenstrom zunehmend rötlicher wird. Dieses Verhalten konnte auch bei Wasser und dem Silikonöl M 20 beobachtet werden. Die Einstellung verschiedener Anstellwinkel funktioniert problemlos. Das System der Hänggleiter in der Führung des Grundgerüsts hat sich demnach bewährt.

5.2.3 Volumenstrom der Fluidaufgabe

Im Folgenden werden PIV-Aufnahmen von Wasser entlang des glatten unstrukturierten Metallblechs bei Volumenströmen von 3400 ml/min ($Re = 567$), 3000 ml/min ($Re = 500$), 2500 ml/min ($Re = 417$) und 2000 ml/min ($Re = 333$) dargestellt. Die Flüssigkeitsaufgabe ist bei diesen Versuchen bereits optimiert worden und erfolgte über das Aluminiumblech mit 0,5 mm Spaltbreite.

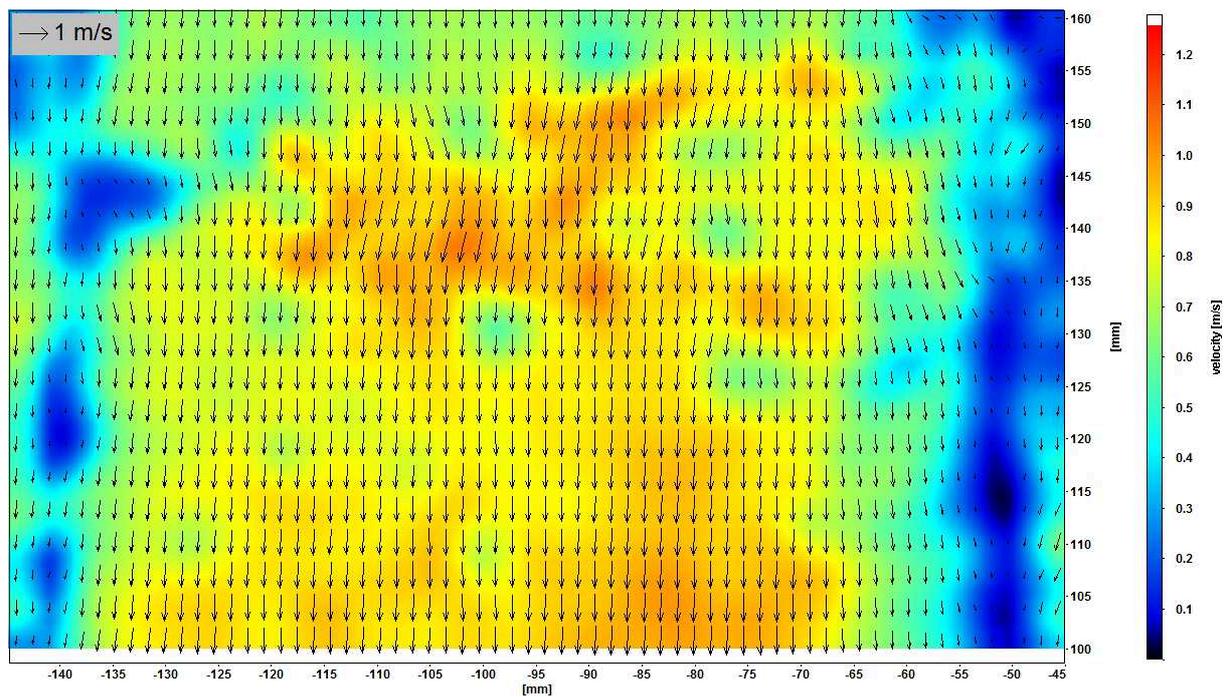


Abbildung 39: Geschwindigkeitsprofil von Wasser entlang des glatten Metallblechs (Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über das Aluminiumblech mit 0,5 mm Spaltbreite und einem Volumenstrom von 3400 ml/min.

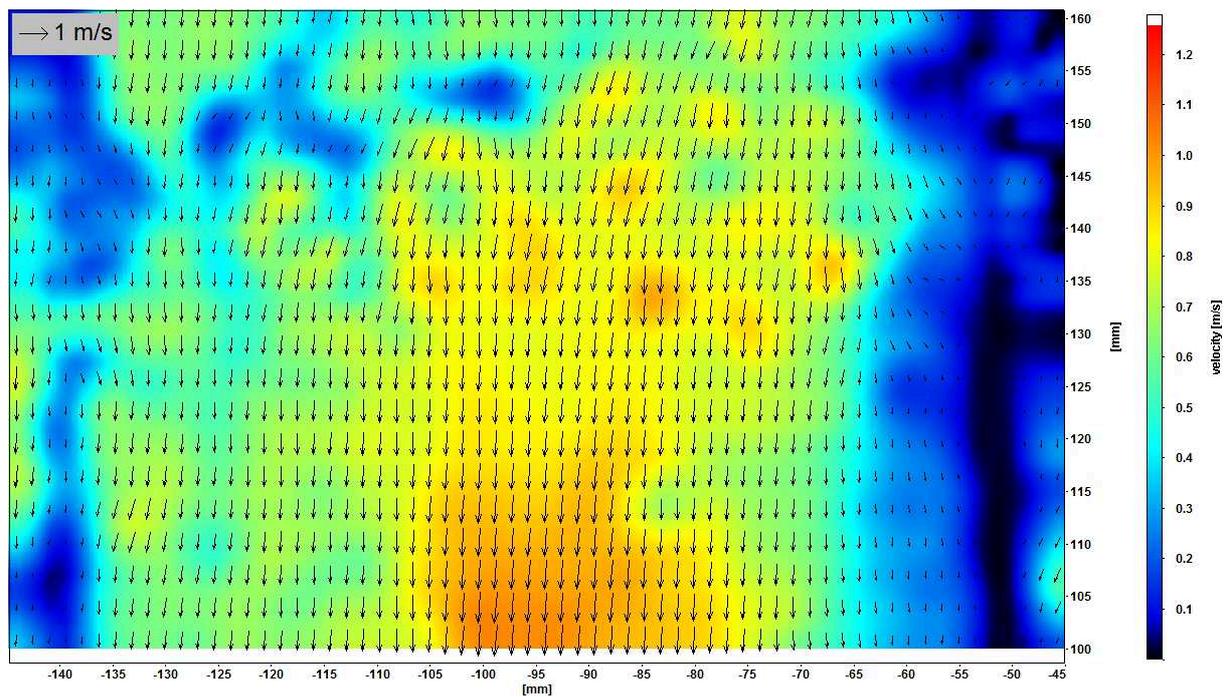


Abbildung 40: Geschwindigkeitsprofil von Wasser entlang des glatten Metallblechs (Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über das Aluminiumblech mit 0,5 mm Spaltbreite und einem Volumenstrom von 3000 ml/min.

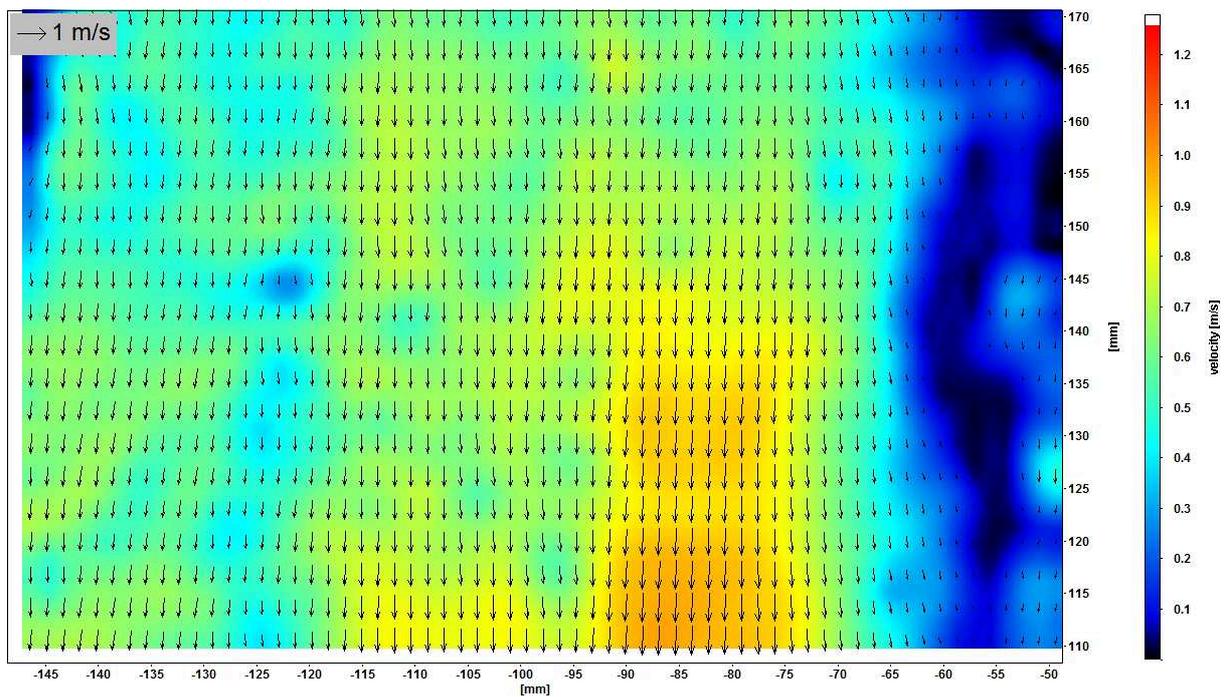


Abbildung 41: Geschwindigkeitsprofil von Wasser entlang des glatten Metallblechs (Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über das Aluminiumblech mit 0,5 mm Spaltbreite und einem Volumenstrom von 2500 ml/min.

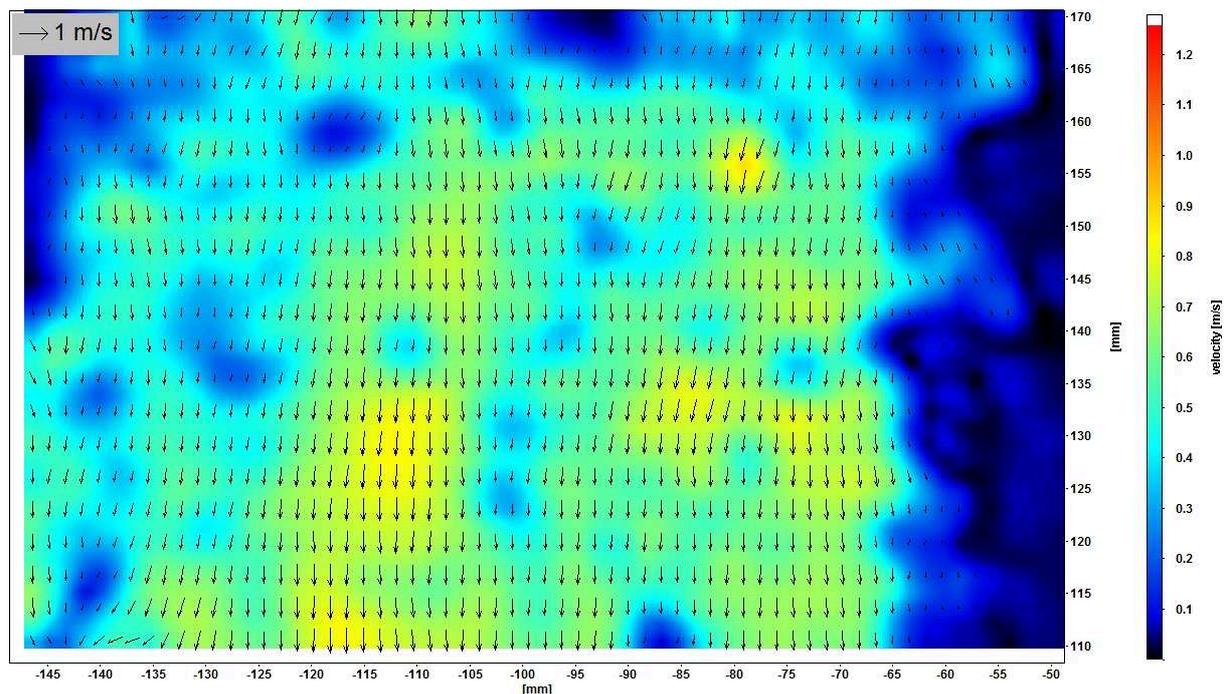


Abbildung 42: Geschwindigkeitsprofil von Wasser entlang des glatten Metallblechs (Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über das Aluminiumblech mit 0,5 mm Spaltbreite und einem Volumenstrom von 2000 ml/min.

Anhand der vorliegenden PIV-Aufnahmen kann gezeigt werden, dass die Strömungsgeschwindigkeit entlang der Platte bei einer Abnahme des Volumenstroms kleiner wird, was auch zu erwarten war. Es ist zudem erkennbar, dass das Geschwindigkeitsfeld fortlaufend mit abnehmendem Volumenstrom ungleichmäßiger wird (vgl. dazu Abbildung 42 mit einem Volumenstrom von 2000 ml/min und Abbildung 39 mit einem Volumenstrom von 3400 ml/min). Der Grund ist vermutlich der, dass sich bei dem geringeren Volumenstrom weniger Flüssigkeit im Aufgabebehälter staut und somit der Fluidstrom auf die Platte ungleichmäßiger ausfällt. Ein weiteres auffälliges Strömungsverhalten ist, eine niedrigere Strömungsgeschwindigkeit an den seitlichen Rändern des Rieselfilms zu den Klemmen hin, als in der Mitte der Platte. Die geringere Strömungsgeschwindigkeit in diesem Bereich wird durch das Benetzen des Rieselfilms an den Klemmen bewirkt. Dadurch bleibt der Film auch entlang der Breite der Patte stabil. Bei einem niedrigeren Volumenstrom als 1500 ml/min wurde vermehrt ein Aufreißen des Rieselfilms beobachtet.

Das Einstellen unterschiedlicher Volumenströme funktioniert einfach und schnell über die Steuerung der Zahradpumpe. Die Grenze für das Durchführen von PIV-Aufnahmen mit dem glatten Metallblech liegt bei einem Volumenstrom von etwa 2000 ml/min. Bei geringeren Volumenströmen ist das Rohbild sehr dunkel und die Tracerpartikel sind darauf nicht mehr

erkennbar, obwohl diese mit dem freien Auge in der Strömung sehr wohl zu sehen sind. Bei der durchsichtigen Plexiglasplatte liegt die Grenze für die PIV-Aufnahmen bei einem etwas niedrigeren Volumenstrom von ca. 1700 ml/min. Das liegt daran, dass die Plexiglasplatte transparent ist und die Partikel darauf deshalb besser zu erkennen sind als auf der metallischen, dunklen Platte.

5.2.4 Material und Oberflächenstruktur der Platte

Die bisher dargestellten Geschwindigkeitsprofile wurden an der Plexiglasplatte (Kapitel 5.2.1 und Kapitel 5.2.2) und an dem glatten Metallblech (Kapitel 5.2.3) aufgenommen. Beide Platten weisen eine glatte Oberfläche auf. Um das Strömungsverhalten des Rieselfilms entlang der glatten Platte mit jenem an einer unebenen Oberfläche zu vergleichen, wurden PIV-Versuche mit dem strukturiertem Metallblech (siehe Abbildung 17 in Kapitel 4.1) durchgeführt.

Die ersten Aufnahmen des Rieselfilms entlang der strukturierten Platte wurden mit Wasser und den üblichen Tracerpartikel (Rhodamin B Pulver mit einer Korngrößenverteilung von 20 – 50 μm) durchgeführt. Auf den Rohbildern waren mit freiem Auge keine Tracerpartikel zu erkennen und die Auswertung der Bilder lieferte auffällig niedrige Geschwindigkeitswerte. Die Pulvermenge in der Versuchsflüssigkeit wurde deshalb während der Messungen von 60 mg auf 100 mg erhöht, doch die Ergebnisse blieben gleich. Es wurde vermutet, dass sich die Dichte der Tracerpartikel zu hoch ist und diese sich in den Vertiefungen der Struktur absetzen. Deshalb wurde in einem weiteren Versuch Rhodamin B mit einer kleineren Korngrößenverteilung von 1 - 20 μm und einer geringeren Dichte getestet. Die Ergebnisse sind aber im Grunde ähnlich zu den Ergebnissen mit den größeren Partikeln. Sie werden in den folgenden Abbildungen dargestellt.

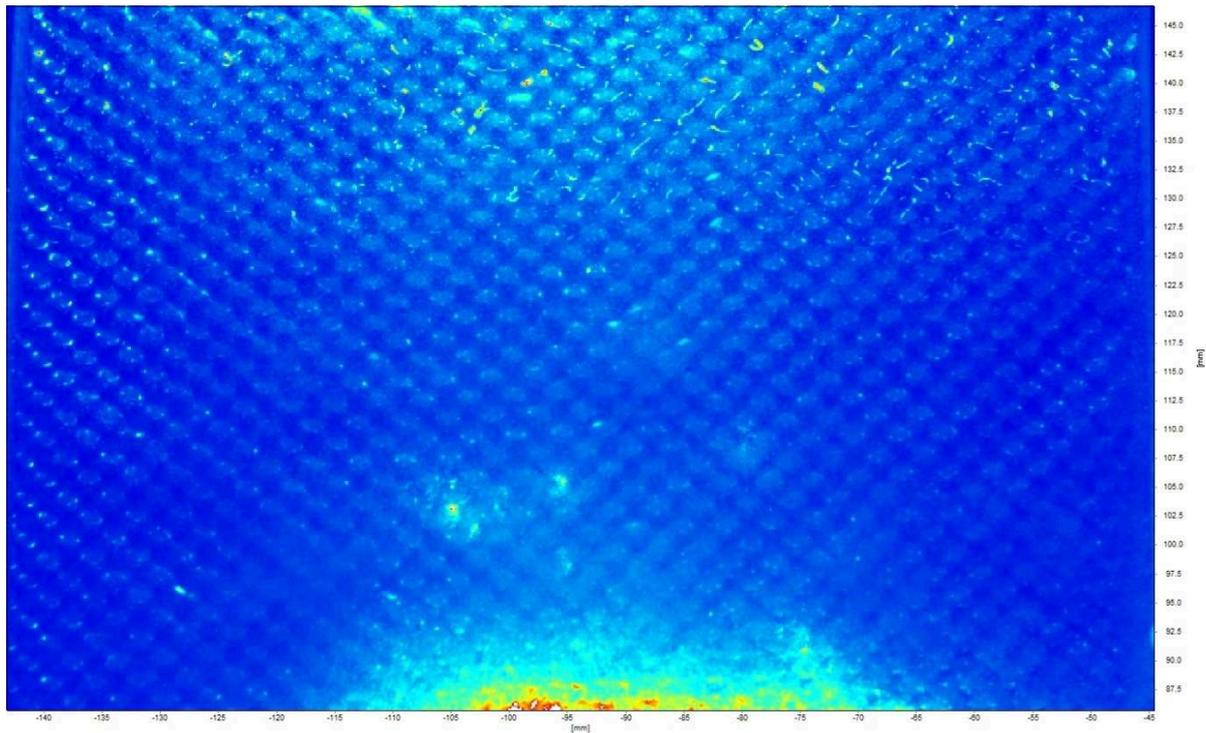


Abbildung 43: Rohbild (Frame 1) des Rieselfilms von Wasser entlang des strukturierten Metallblechs (Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über das Aluminiumblech mit 0,5 mm Spaltbreite und einem Volumenstrom von 3400 ml/min; Rhodamin B Pulver mit 1 - 20 μm Korngröße.

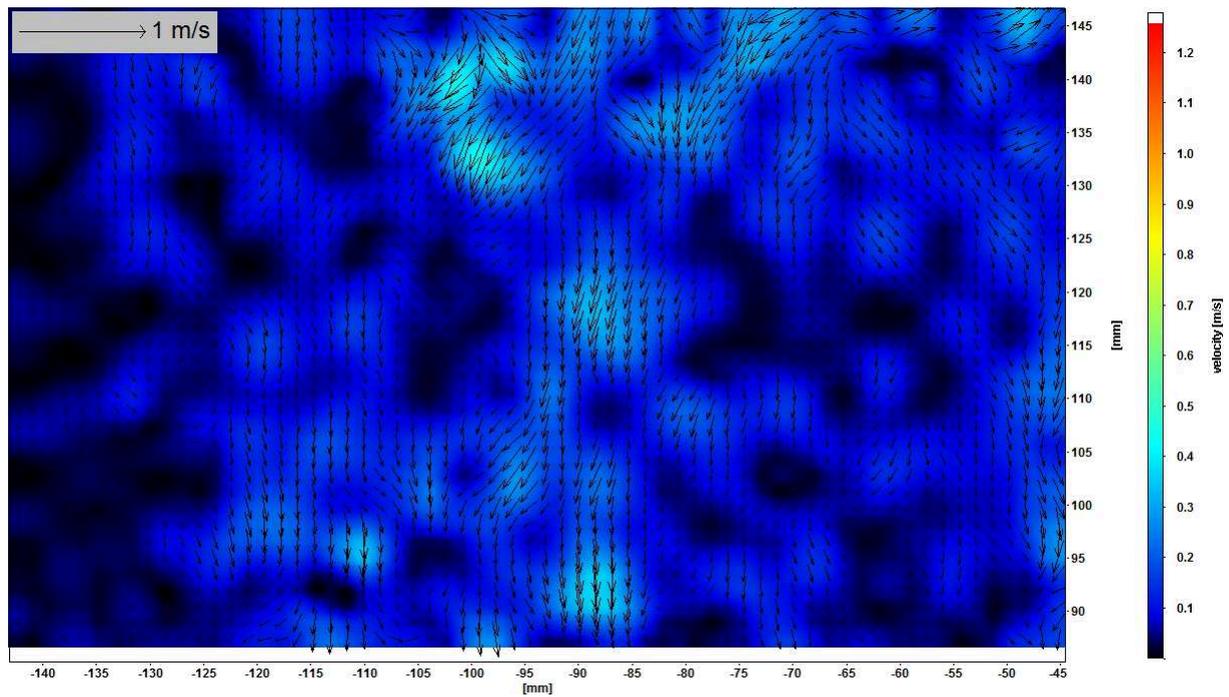


Abbildung 44: Geschwindigkeitsfeld des Rieselfilms entlang des strukturierten Metallblechs (Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über das Aluminiumblech mit 0,5 mm Spaltbreite und einem Volumenstrom von 3400 ml/min; Rhodamin B Pulver mit 1 - 20 μm Korngröße.

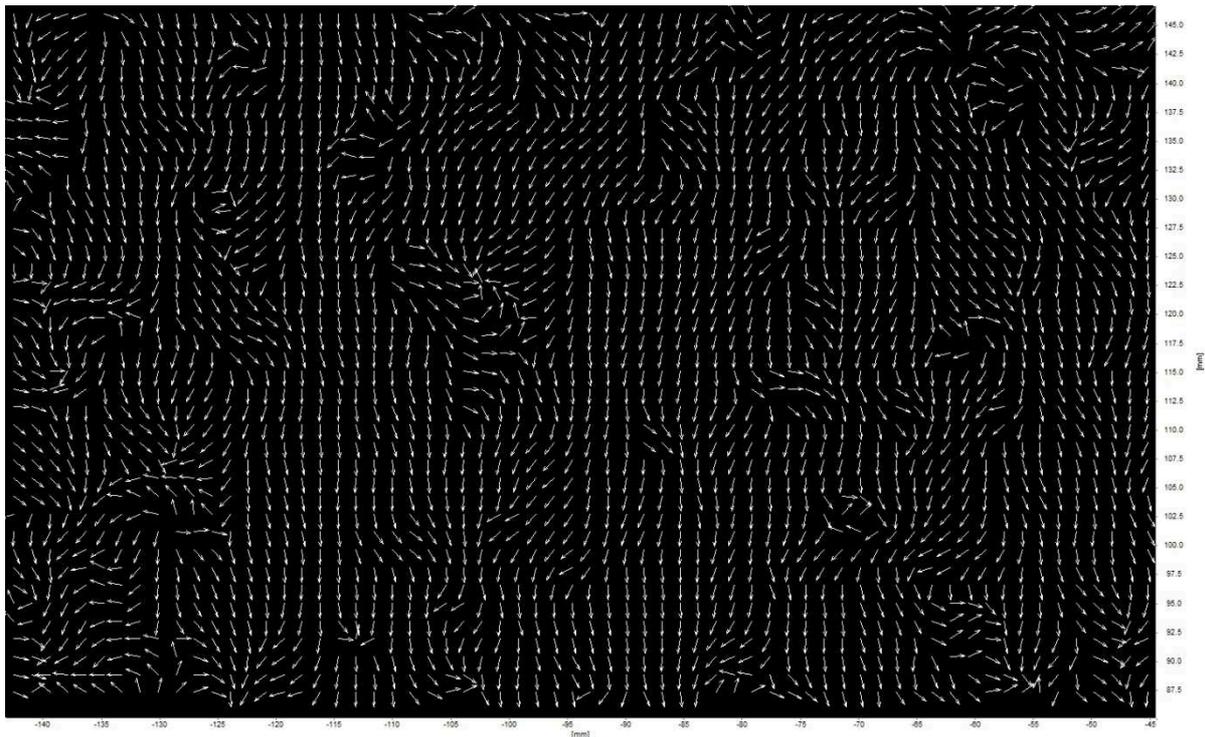


Abbildung 45: Vektorfeld (Schwarz-Weiß) des Rieselfilms mit einer auf 10 Pixel fixierten Pfeillänge entlang des strukturierten Metallblechs (Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über das Aluminiumblech mit 0,5 mm Spaltbreite und einem Volumenstrom von 3400 ml/min; Rhodamin B Pulver mit 1 - 20 μm Korngröße.

Im Gegensatz zu den Rohbildern des Rieselfilms, die entlang der glatten Platten aufgenommen wurden (siehe Kapitel 5.3.3 Abbildung 49 und Abbildung 50) sind auf den Rohbildern der strukturierten Platte (Abbildung 43) keine Tracerpartikel erkennbar. Die Auswertung der Rohbilder liefert ein Geschwindigkeitsfeld mit auffällig niedrigen Geschwindigkeiten (Abbildung 44). Im Vergleich dazu ist die aufgenommene Strömungsgeschwindigkeit an der glatten Platte bei gleichen Einstellungen viel höher (vgl. Abbildung 39). Deshalb wird vermutet, dass das gemessene Geschwindigkeitsprofil an der strukturierten Platte nicht den wahren Geschwindigkeiten entspricht und auch die kleineren Partikel in den Vertiefungen der Platte hängen bleiben. Eine andere Erklärung wäre, dass das Geschwindigkeitsprofil direkt an der Plattenoberfläche zwischen den Erhöhungen der Oberfläche aufgenommen wird. In Abbildung 45 ist das Vektorbild des Rieselfilms mit einer fixen Pfeillänge von 10 Pixel dargestellt, wodurch die Strömung des Rieselfilms besser zu erkennen ist. Es scheint, dass sich in der Struktur der Platte lokal kleine Rezirkulationszonen bilden. Das würde eine Erhöhung der Turbulenz und damit einen erhöhten Stoffaustausch bei der strukturierten Platte bedeuten. Ähnliche Strömungsmuster wurden bei einem

Volumenstrom von 3000 ml/min und 2500 ml/min beobachtet. Es fiel zudem auf, dass die Flüssigkeit auf dem strukturierten Blech deutlich besser benetzt als auf dem glatten Blech. Diese Verbesserung der Flüssigkeitsverteilung ist auf die Oberfläche der strukturierten Platte (Umlenkungen der Strömung auf der Platte) zurückzuführen.

5.2.5 Stolperstellen in der Strömung

Die nachfolgenden Abbildungen 46 und 47 zeigen das Ergebnis der PIV-Versuche bei Einbringen eines runden Wandmagneten als Störstelle in den Rieselfilm von Wasser entlang der Plexiglasplatte. Die Aufnahmen wurden bei einem Volumenstrom von 2700 ml/min und bei einer Flüssigkeitsaufgabe über das gekantete Aluminiumblech durchgeführt (vgl. Abbildung 18 in Kapitel 4.1).

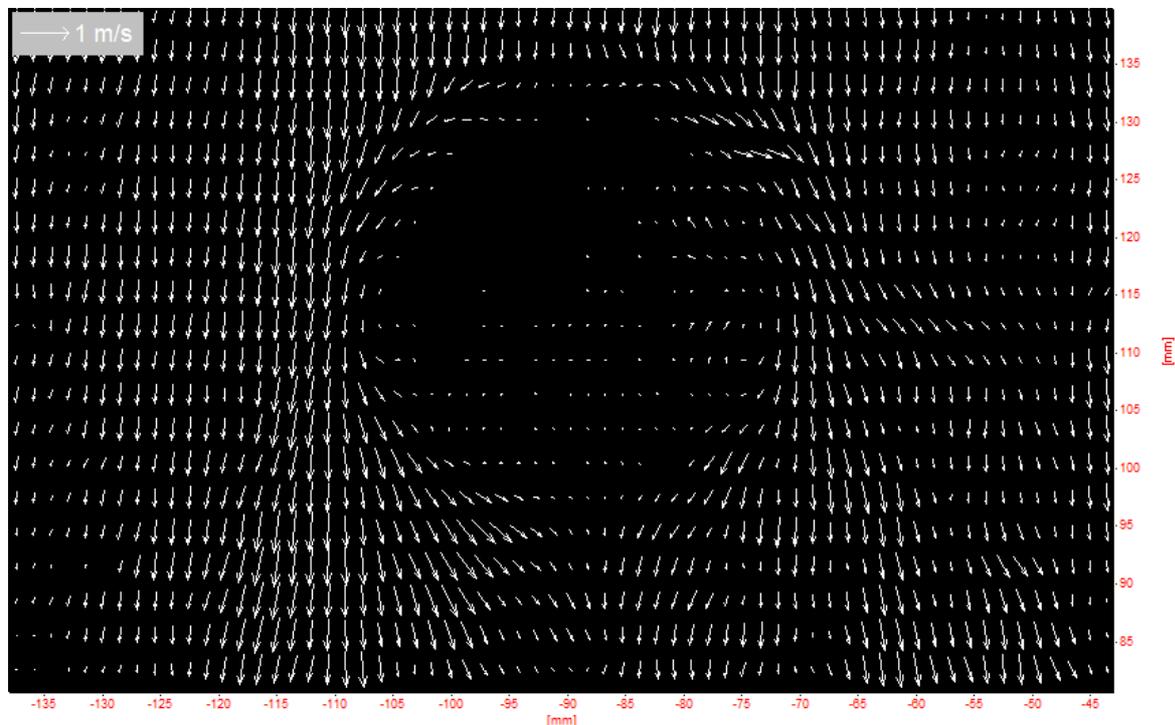


Abbildung 46: Geschwindigkeitsprofil (Schwarz-Weiß) von Wasser entlang der Plexiglasplatte (Anstellwinkel 30 Grad) mit runder Störstelle bei Aufgabe über das gekantete Aluminiumblech und einem Volumenstrom von 2700 ml/min.

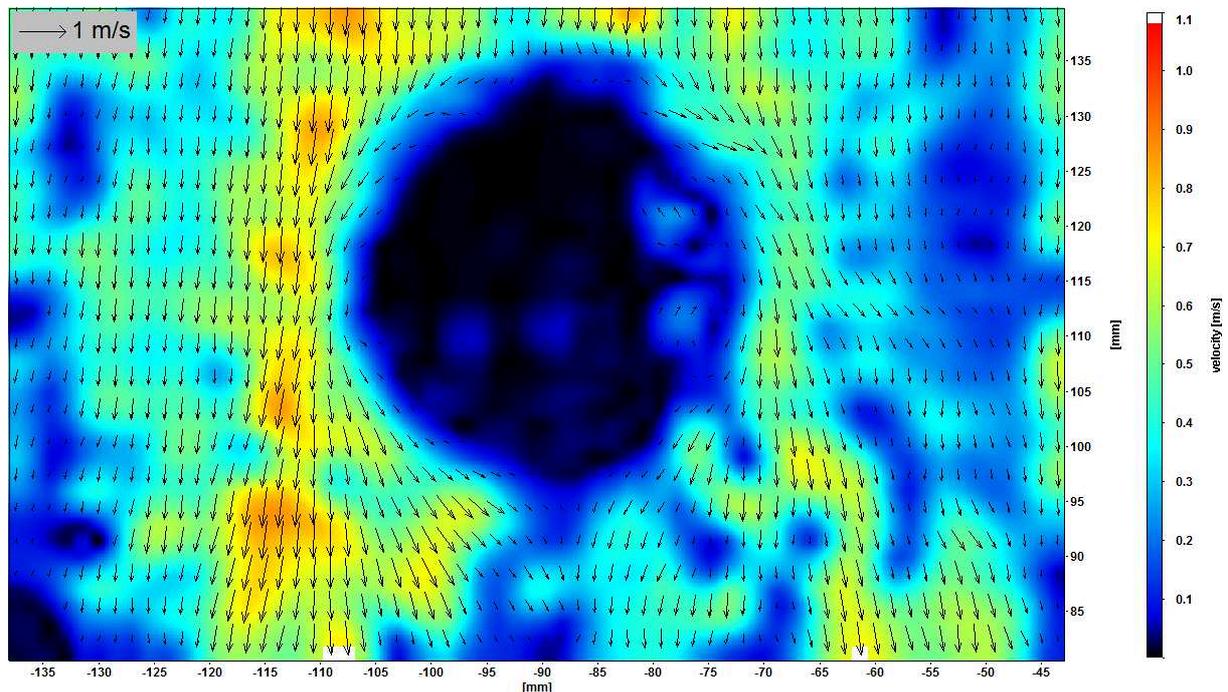


Abbildung 47: Geschwindigkeitsprofil (in Farbe) von Wasser entlang der Plexiglasplatte (Anstellwinkel 30 Grad) mit runder Störstelle bei Aufgabe über das gekantete Aluminiumblech und einem Volumenstrom von 2700 ml/min.

Die PIV-Auswertung zeigte, dass die Störstelle das Strömungsprofil maßgeblich beeinflusst. Die Störstelle im Rieselfilm ist in den Aufnahmen als schwarzer Fleck deutlich zu erkennen. Die Hauptströmung teilt sich am Scheitel des Magneten nach links und rechts auf umströmt den Magneten und löst sich dann wieder ab. Das entspricht auch genau dem Strömungsbild, das während der Versuche zu beobachten war.

5.2.6 Filmdickenmessung

In der folgenden Abbildung 48 ist das Ergebnis der Shadowgraphiemessung von Wasser bei einem Volumenstrom von 2400 ml/min dargestellt. Wie bereits in Kapitel 4.3.4 beschrieben, erfolgt die Auswertung der Filmdicke mithilfe des Bildmaßstabes. Die Filmdicke entspricht der Länge des Vektors zwischen Punkt A auf der Plattenoberfläche und Punkt B auf der Filmoberfläche, in diesem Fall 1,07 mm.

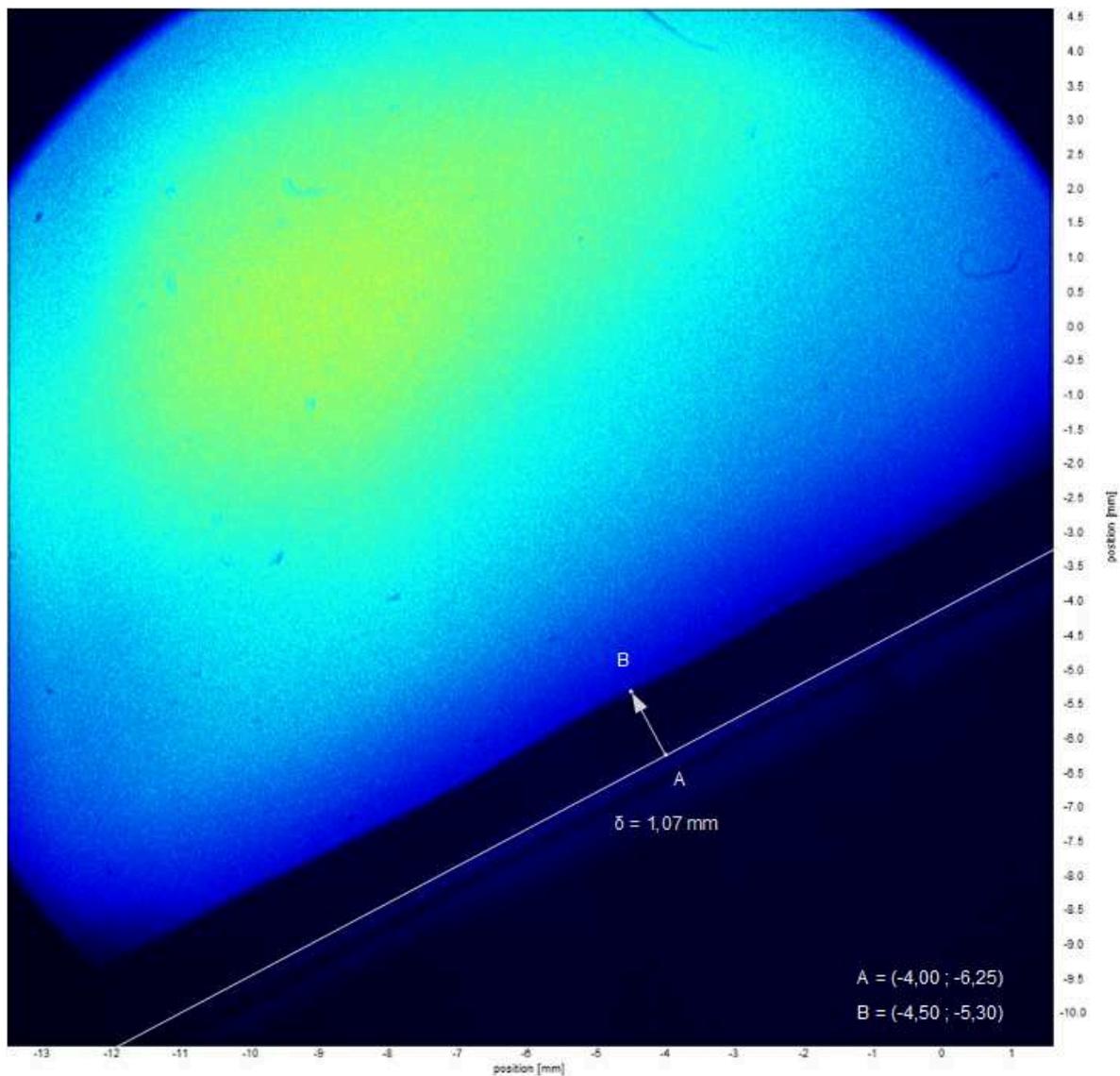


Abbildung 48: Shadowgraphieaufnahme: Bestimmung der Filmdicke bei einem Volumenstrom von 2400 ml/min.

Das Ergebnis der Filmdickenbestimmung ist nicht aussagekräftig, weil sich während der Messung kein Rieselfilm, sondern eine verengte Strömung in der Mitte der Platte ausgebildet hat, siehe dazu Abbildung 31 in Kapitel 4.3.3. Es kann folglich auch keine Plausibilitätsüberprüfung der gemessenen Filmgeschwindigkeiten durchgeführt werden. Grundsätzlich konnte jedoch gezeigt werden, dass die Shadowgraphiemessung zur Bestimmung der Filmdicke verwendet werden kann.

5.3 Einstellparameter der PIV Messung

Die Messreihen dienen in erster Linie dazu, Erfahrungen mit dem Versuchsstand und dem Messsystem von LaVision zu sammeln. In diesem Unterkapitel werden die Einstellparameter für Kamera, Laser, die Tracerkonzentration sowie die Parameter zur Auswertung der Rohbilder zusammengefasst.

5.3.1 Kamera und Laser

Die Hochgeschwindigkeitskamera („Imager pro HS 4M“) wird von vorne und senkrecht auf das Experiment gerichtet, sodass der Rieselfilm in der Mitte des Aufnahmebereichs platziert ist (siehe Abbildung 21 in Kapitel 4.2.3). Der Abstand zwischen Kameraobjektiv und Mittelpunkt der Platte beträgt zwischen 65 cm und 75 cm. Der aufgenommene Bildabschnitt kann in der DaVis Software vorgegeben werden, allerdings wird dieser automatisch zentriert ausgerichtet. Das heißt, der aufzunehmende Bereich muss von vornherein zentrisch im Kamerabild positioniert werden. Eine geeignete Blendenzahl für ein scharfes Bild liegt zwischen 4 und 5,6. Für die PIV-Versuche wird ein Filter eingesetzt, der nur die Wellenlänge des Lasers von 527 nm durchlässt. Nach der Kalibrierung der Kamera darf die Position nicht mehr verstellt werden. Für die PIV-Aufnahmen hat sich eine Bildaufnahmezeit von 250 Hz bewährt. Für die Aufnahmen wird die Kamera auf Doppelbild („double frame“) gestellt. Kamera und Laser brauchen unterschiedliche Zeitspannen, ein Bild aufzunehmen bzw. einen Lichtpuls abzugeben. Sie müssen zeitlich aufeinander abgestimmt werden, weil das Bild ansonsten unbeleuchtet ist. Bei der Kamera haben sich Einstellungen von T1A auf $-5 \mu\text{s}$ und beim Laser T1A auf $-10 \mu\text{s}$ bzw. T1B auf $-8 \mu\text{s}$ bewährt.

Der Laserkopf des doppelgepulsten Nd:YAG Lasers wird am besten so ausgerichtet, dass der Strahl von vorne auf den Rieselfilm ausgerichtet ist. Es wurde auch eine Beleuchtung von der Seite getestet, die Belichtung ist dabei aber schlechter und die seitlichen Klemmen zur Befestigung der Platten sind im Weg. Die eingesetzte Linse mit einer Brennweite von $f = -50$ erzeugt einen breiteren Lichtschnitt als die Linse mit einer Brennweite von $f = -10$. Mit beiden Linsen konnten jedoch gute Ergebnisse erzielt werden. Bei den Versuchen wurden unterschiedliche Laserleistungen getestet. Für Positionierung des Laserkopfes reicht eine Laserleistung von 30 %. Während der Versuche wurde die Leistung zwischen 60 % und 90 % variiert, eine Leistung von 75 % stellte sich dabei als ausreichend heraus. Bei niedrigerer Leistung ist das Bild zu dunkel und bei höherer Leistung muss besonders darauf geachtet werden, dass der Strahl nicht zu lange auf die aus Kunststoff gefertigten Klemmen gerichtet ist, weil diese sonst zu schmelzen beginnen. Als ideale Zeitspanne zwischen den zwei Laserpulsen für die PIV-Aufnahmen hat sich ein Wert von $350 \mu\text{s}$ herausgestellt. Der Wert wurde für alle eingestellten Volumenströme zwischen 1700 ml/min und 3400 ml/min beibehalten.

5.3.2 Tracerkonzentration

Als Tracer für die PIV-Versuche wird Rhodamin B Pulver eingesetzt. Die aufgrund von Vorversuchen gewählte Konzentration in der Versuchsflüssigkeit von etwa 0,15 g pro Liter hat sich bei den Versuchen bewährt. Auffallend bei den Aufnahmen war, dass die Partikeldichte bei höheren Volumenströmen größer ist als bei niedrigen Volumenströmen. Das liegt daran, dass bei einem hohen Volumenstrom absolut gesehen auch mehr Partikel im Bild sind als bei einem niedrigen Volumenstrom. Aber auch bei dem niedrigsten eingestellten Volumenstrom von 1700 ml/min war die Partikeldichte in den Aufnahmen ausreichend, um ein Vektorbild auszuwerten. Ausnahme für eine höhere Tracerkonzentration stellten die Versuche mit der strukturierten Platte dar. Hier wurden zu den 60 mg in der Versuchslösung während des Versuchs noch 40 mg hinzugefügt, weil auf den Rohbildern keine Partikel zu erkennen waren. Einige Partikel setzten sich auch in Ecken und Nischen entlang der gesamten Förderstrecke der Versuchsflüssigkeit ab (vor allem im Aufgabe- und im Auffangbehälter). Es empfiehlt sich, daher abgesetzte Partikel immer wieder durch Umrühren des Fluides im Auffangbehälter zu mobilisieren, damit im Rieselfilm genügend Partikel mitgeführt werden. Hinsichtlich der Korngrößenverteilung des eingesetzten Rhodamin B- Pulvers hat sich das Pulver mit 20 -50 μm . durchaus bewährt. Lediglich bei der strukturierten Platte wurden leichtere Partikel mit einer Korngrößenverteilung von 1 - 20 μm getestet, weil vermutet wurde, dass die 20 - 50 μm Partikel zu schwer sind und sich deshalb in der Struktur absetzen. Die Ergebnisse waren jedoch sehr ähnlich. Die Rhodamin B- Partikel werden zuerst in Ethanol suspendiert, bevor sie der zu untersuchenden Flüssigkeit zugegeben werden. Dadurch wird eine bessere Verteilung in der Versuchsflüssigkeit erzielt. Anfänglich wurden dafür 100 ml Ethanol für 300 ml Wasser verwendet. Da es bei den Versuchen damit zu einer leichten Schaumbildung kam, wurde das Verhältnis auf 50 ml Ethanol zu 350 ml Wasser korrigiert.

5.3.3 Auswertung

Grundlage für die Auswertung der Particle Image Velocimetry sind die aufgenommenen Rohbilder. Es wurde beobachtet, dass auf den Rohbildern je nach eingesetzter Platte die Tracerpartikel besser oder schlechter zu erkennen sind. In den folgenden Abbildungen (49 und 50) sind beispielhaft Rohbilder des Rieselfilms von Wasser entlang der Plexiglasplatte und entlang des glatten Metallblechs dargestellt. Ein Rohbild entlang der strukturierten Platte ist in Kapitel 5.2.4 in Abbildung 43 zu sehen.

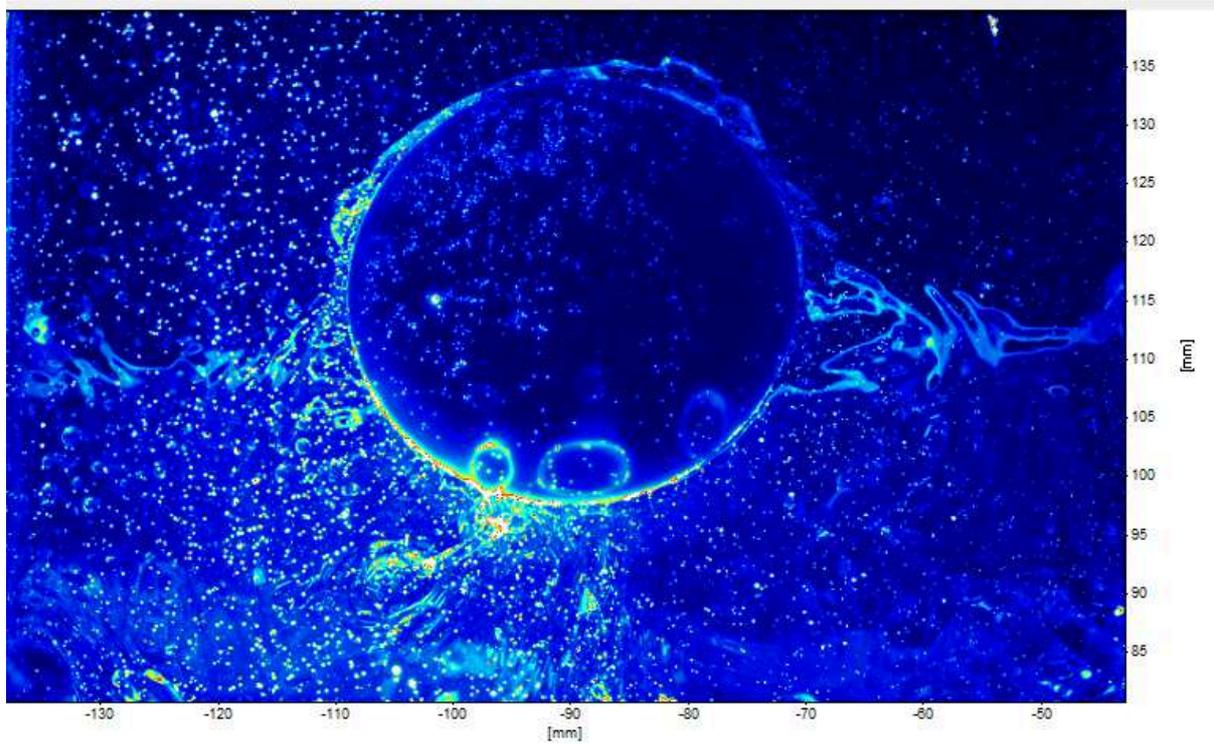


Abbildung 49: Rohbild des Rieselfilms von Wasser entlang der Plexiglasplatte (mit runder Störstelle) bei einem Volumenstrom von 2700 ml/min.

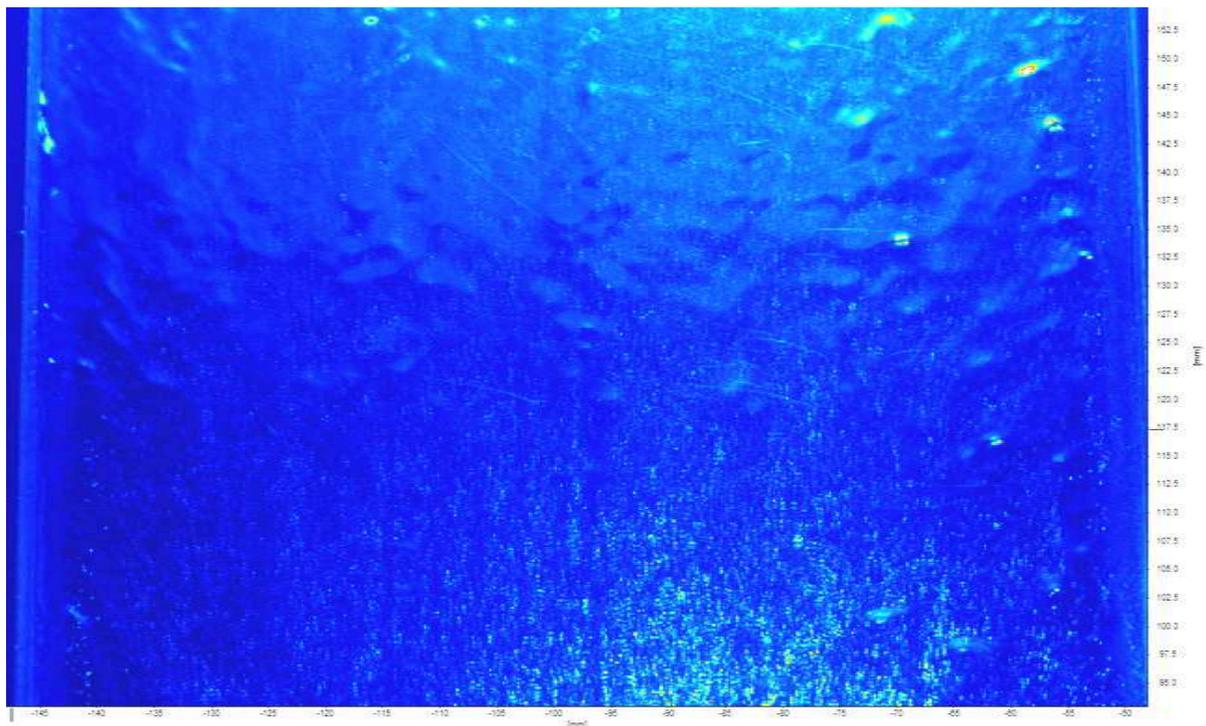


Abbildung 50: Rohbild des Rieselfilms von Wasser entlang des glatten Metallblechs bei einem Volumenstrom von 3400 ml/min.

Bei der durchsichtigen Plexiglasplatte (Abbildung 49) sind die Partikel deutlich besser zu erkennen als auf dem dunklen glatten Metallblech (Abbildung 50), obwohl der Volumenstrom über das glatte Blech höher ist. Auf dem ebenfalls dunklen und strukturierten Metallblech sind im Rohbild keine Partikel zu sehen (Abbildung 43 in Kapitel 5.2.4). Die Konzentration der Partikel in der Versuchsflüssigkeit ist auf allen Bildern gleich, bei der strukturierten Platte sogar noch etwas höher. Grund für die unterschiedliche Klarheit der Bilder ist, dass die Plexiglasplatte transparent ist und die Partikel auf dieser Platte deshalb besser zu erkennen sind als auf den dunklen, metallischen Platten. Die Auswertung der Rohbilder des glatten Metallblechs lieferte aber qualitativ gleichwertige Vektorbilder als die Auswertung der Rohbilder der Plexiglasplatte.

Mit folgenden Einstellparametern im DaVis (siehe Abbildungen 51 bis 55) können die Rohbilder meist zu einem guten Vektorbild ausgewertet werden. Sie sind in der Software als Maske „MA Violeta Standardauswertung“ abgespeichert. Da die Rohbilder aber je nach Experiment und Aufnahmebedingungen unterschiedlich sind, darf die Maske lediglich als Orientierungshilfe für die Auswertung gesehen werden. Für eine detaillierte Beschreibung der Auswertung und der DaVis Software im Allgemeinen, sei auf das Handbuch von LaVison (38) verwiesen.

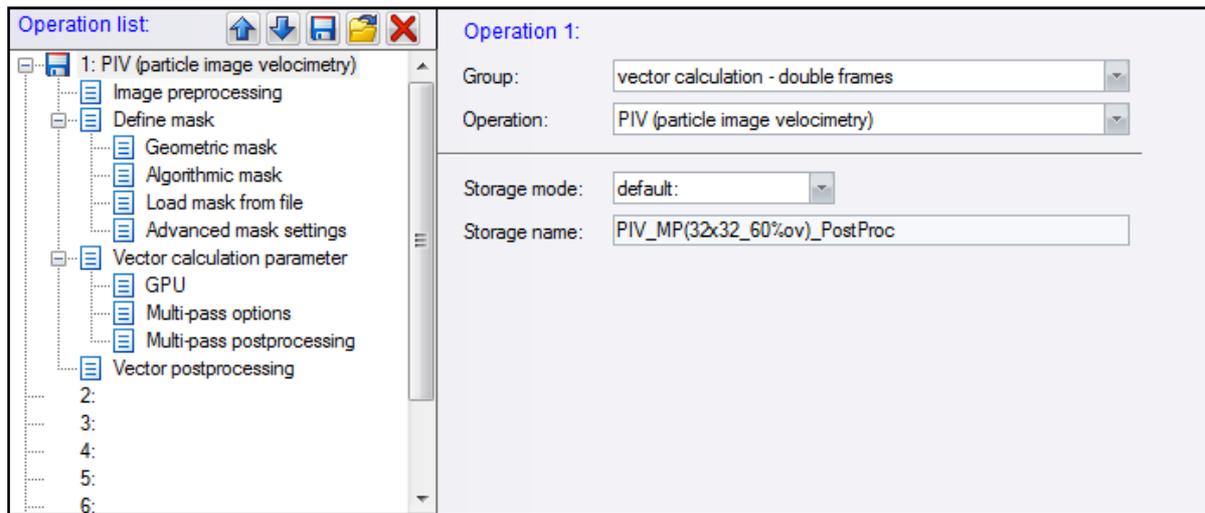


Abbildung 51: PIV-Auswertung: Maske „MA Violeta Standardauswertung“
PIV (particle image velocimetry)

Die Auswertung der „PIV (particle image velocimetry)“ durch eine Vektorkalkulation basierend auf den aufgenommenen Bildpaaren („vector calculation – double frame“) (Abbildung 51). Eine Vorbearbeitung der Rohbilder („image preprocessing“) wird nicht durchgeführt. Standardmäßig wird auch kein Auswertebereich definiert („define mask“), weil der Bildaufnahmebereich der Kamera in der Regel schon auf 768 x 476 Pixel voreingestellt wurde. Sollte dies nicht der Fall sein, kann eine entsprechende geometrische Maske („geometric mask“) im Unterregister definiert werden. Deshalb ist auch die Verwendung der geometrischen Maske im Register der Vektorberechnung (Abbildung 52) aktiviert.

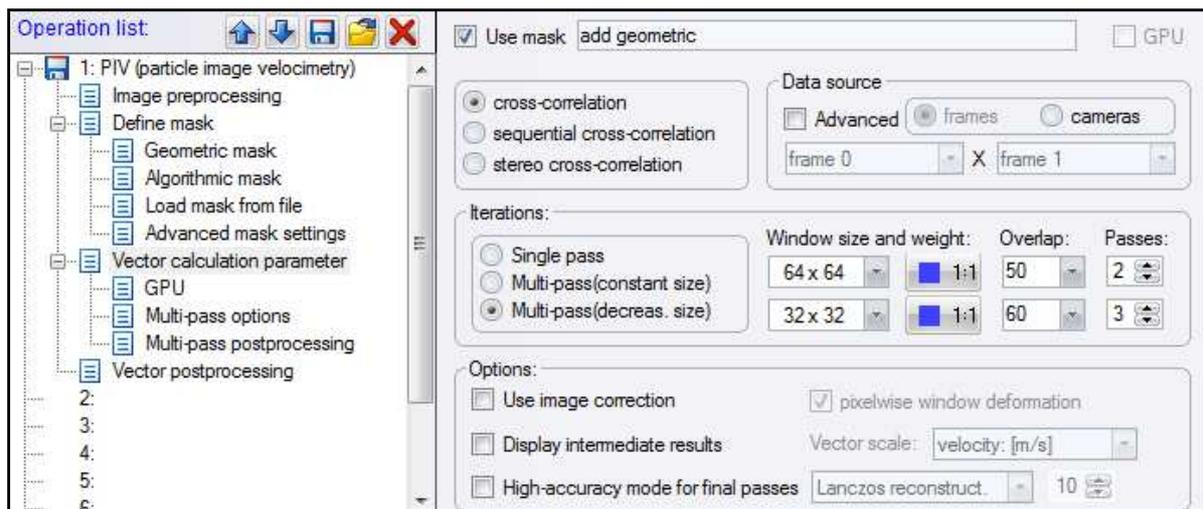


Abbildung 52: PIV-Auswertung: Maske „MA Violeta Standardauswertung“
Vector calculation parameter

Im Register Vektorkalkulationsparameter („vector calculation parameter“) können Einstellungen zur Datenquelle und der Korrelationsmethode gewählt werden. Es wird die Methode der Kreuzkorrelation („cross-correlation“) gewählt, das bedeutet das Vektorfeld auf Basis von zwei einzeln belichteten Bildern berechnet wird. Dies entspricht auch dem gewähltem Kameramodus („double-frame“). Für die Korrelation werden die Bilder in kleine Auswertefenster („interrogation windows“) unterteilt. (siehe Abbildung 25 in Kapitel 4.3.4). Generell kann die Korrelation in einem Schritt oder in iterativ in mehreren Schritten durchgeführt werden, wobei die Größe der Auswertefenster konstant oder kleiner werdend sein können. Um die Genauigkeit der Auswertung zu erhöhen, wird eine iterative Korrelation in mehreren Durchgängen und kleiner werdenden Auswertefenstern („multi-pass (decreas. size)“) gewählt. Die Korrelationsfunktion arbeitet nach dem Prinzip der Intensität innerhalb jedes Fensters und passiert das gesamte PIV mit einem bestimmten Fensterversatz. Aus den Daten wird für jedes Auswertefenster ein repräsentativer Geschwindigkeitsvektor ausgewertet. Bei der gewählten Methode von mehreren Durchgängen mit kleiner werdenden Fenstern wird das Vektorfeld aus einer zufälligen Anzahl von Iterationen berechnet. In der ersten Reihe wird die Startgröße der Fenster mit „64 x 64“ Pixel vorgegeben, in der zweiten Reihe die Endgröße der Fenster mit „32 x 32“ Pixel. Bei jedem Durchgang wird die Startgröße der Fenster halbiert bis die Endgröße der Fenster erreicht ist. Die Überschneidung (gewählt mit „50“ % bzw. „60“ %) beschreibt um wie viel sich benachbarte Auswertefenster bei den Durchgängen (gewählt mit „2“ bzw. „3“) überschneiden. Je größer die Überschneidung, desto enger ist das Feld der berechneten Geschwindigkeitsvektoren (Abbildung 53). Die Pixelanzahl für jedes Fenster bleibt aber unverändert.

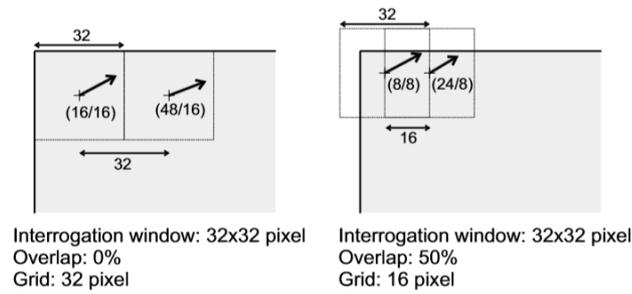


Abbildung 53: Vektorposition abhängig von Auswertefenstergröße und Überschneidung

Im Unterkapitel „multi-pass-options“ werden weitere Angaben zur Vektorberechnung gemacht (Abbildung 54).

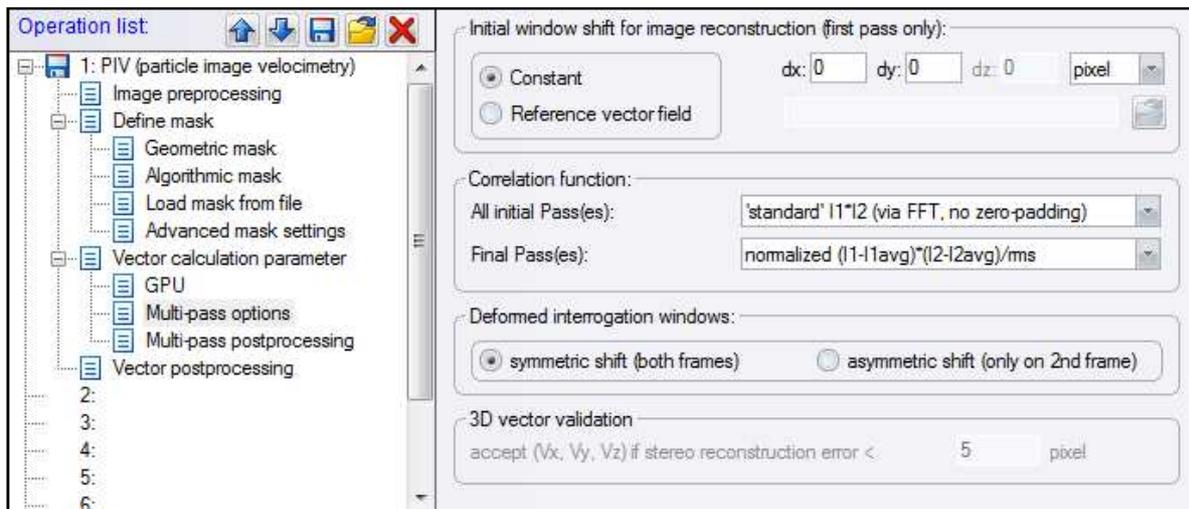


Abbildung 54: PIV-Auswertung: Maske „MA Violeta Standardauswertung“
Vector calculation parameter – Multi-pass options

Für den ersten Durchgang könnte ein Versatz der Auswertefenster zwischen dem ersten Bild und dem zweiten Bild vorgegeben werden. Diese Einstellung wird jedoch auf konstant („constant“) und ohne Versatz d.h. $dx = 0$ und $dy = 0$ gesetzt. Das bedeutet, dass die Auswertefenster in beiden Bildern (Frame 1 und 2) an der gleichen Stelle (ohne Versatz) positioniert sind. Für die Kreuzkorrelation stehen zwei Algorithmen zur Auswahl. Gemäß den Vorgaben im Produkthandbuch „Getting Started“ von LaVision (39) wird für die

Startdurchgänge der Algorithmus „standard I1*I2 (via FFT, no zero-padding)“ gewählt und für die Enddurchgänge („final pass(es)“) der Algorithmus „normalized (I1-I1avg)*(I2-I2avg)/rms“. Die Beschreibung der Algorithmen ist im ausführlichem Handbuch von LaVision (38) zu finden. Die Einstellung eines symmetrischen Versatzes bei deformierten Auswertefenstern („symmetric shift (both frames)“) bedeutet, dass der Vektor symmetrisch in der Mitte zwischen den Auswertefenstern der Bilder positioniert ist, was für PIV-Darstellungen üblich ist. Das berechnete Vektorbild wird kann im Anschluss nachbearbeitet werden („vector postprocessing“) um zweifelhafte oder falsche Vektoren zu eliminieren (Abbildung 55).

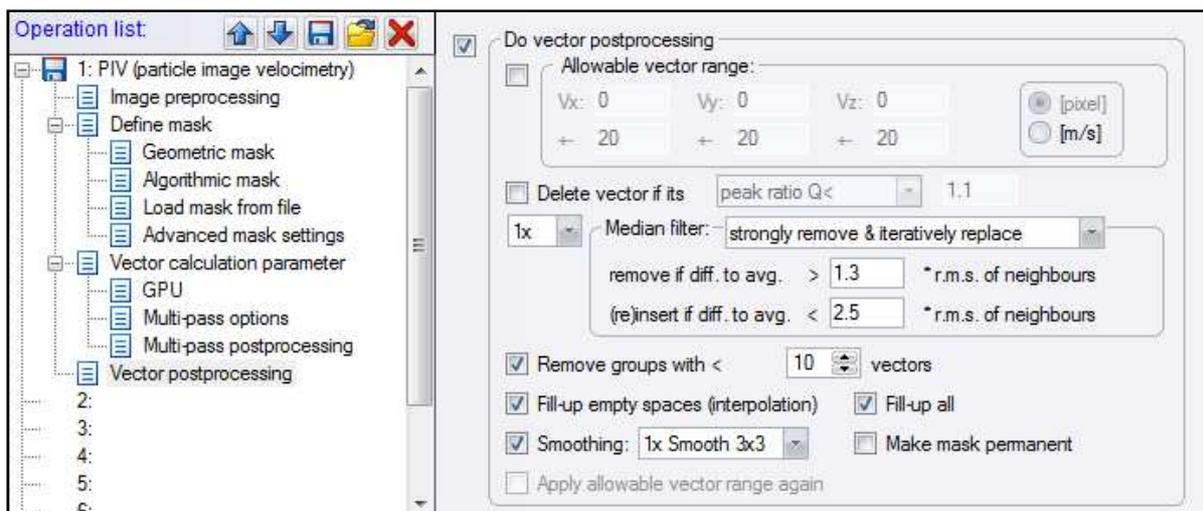


Abbildung 55: PIV-Auswertung: Maske „MA Violeta Standardauswertung“
Vector postprocessing

Der Medianfilter berechnet einen Medianvektor aus einer Gruppe benachbarter Vektoren und vergleicht den mittleren Vektor mit diesem Medianvektor. Der betrachtete Vektor wird entfernt, wenn er außerhalb des erlaubten Bereiches des mittleren Vektors liegt. Dadurch werden Ausreißer eliminiert. Es wird ein Medianfilter „strongly remove & iteratively replace“ aktiviert, der Vektoren entfernt, wenn die Differenz zum Mittelwert größer als „1.3“ mal der Quadratwurzel des Nachbarn ist und Vektoren (wieder) einfügt, wenn die Differenz zum Mittelwert kleiner als „2.5“ mal der Quadratwurzel des Nachbarn ist. Vektorgruppen mit weniger als 10 Vektoren werden entfernt. Alle leeren Stellen, die durch die Entfernung von „schlechten Vektoren“ entstehen werden durch Interpolieren aufgefüllt. Zur Glättung des Vektorbildes wird eine einmalige Glättung „1 x Smooth 3 x 3 „ aktiviert. In Abbildung 56 ist das Ergebnis) der Auswerteeinstellungen beispielhaft für das Rohbildes aus Abbildung 50, mit den Standarddisplayeinstellungen der Software, dargestellt.

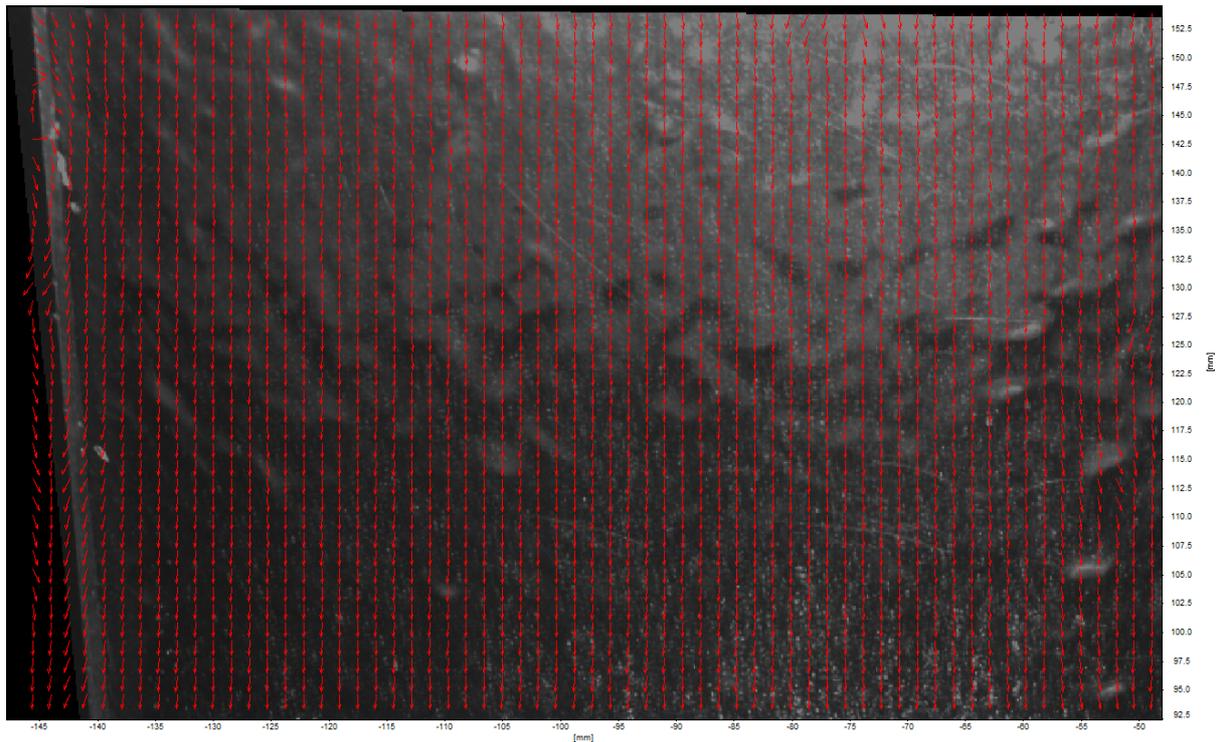


Abbildung 56: Geschwindigkeitsprofil (Standardauswertung) des Rieselfilms von Wasser entlang des glatten Metallblechs bei einem Volumenstrom von 3400 ml/min

Für eine anschaulichere Darstellung des Vektorbildes wurde eine Displaymaske für eine Schwarz-Weiß Darstellung („MA Violeta Standarddisplay Schwarz-Weiß“) und eine farbliche Darstellung („MA Violeta Standarddisplay Farbe“) erstellt und in der Software gespeichert. Wieder dienen die Vorgaben lediglich zur Orientierung. Bei beiden Darstellungen werden die absoluten Geschwindigkeiten dargestellt. Die Vektorpfeile haben eine Stärke von einem Pixel. Der Netzfaktor („display grid faktor“) wird auf 1 x 2 eingestellt, das hebt die vertikale Strömungsrichtung hervor. Bei der Vektorlänge wird der Pixelversatz mit einem Faktor „8“ multipliziert. Das verlängert die Pfeile für eine bessere Sichtbarkeit. Die Vektoren werden zentral im Netz dargestellt, ein Referenzvektor von 1 m/s wird in schwarz auf hellgrau mit 20 dpi links oben im Bild dargestellt. Bei der Schwarz-Weiß-Darstellung sind die Vektoren weiß auf schwarzem Hintergrund und bei der Farb-Darstellung weiß auf farbigem Hintergrund. Der Hintergrund wird ausgestellt (kein Rohbild im Hintergrund). Die Farbpalette in der Farb-Darstellung geht von dunkelbau bis rot und ist von 0 m/s bis 1,28 m/s skaliert. Der „disabled color index“ ist Nr. 255, das bedeutet, dass der Hintergrund in weißer Farbe dargestellt wird. In den folgenden Abbildungen ist nun das Geschwindigkeitsprofil aus Abbildung 56 als Schwarz-Weiß- und als Farb-Darstellung dargestellt.

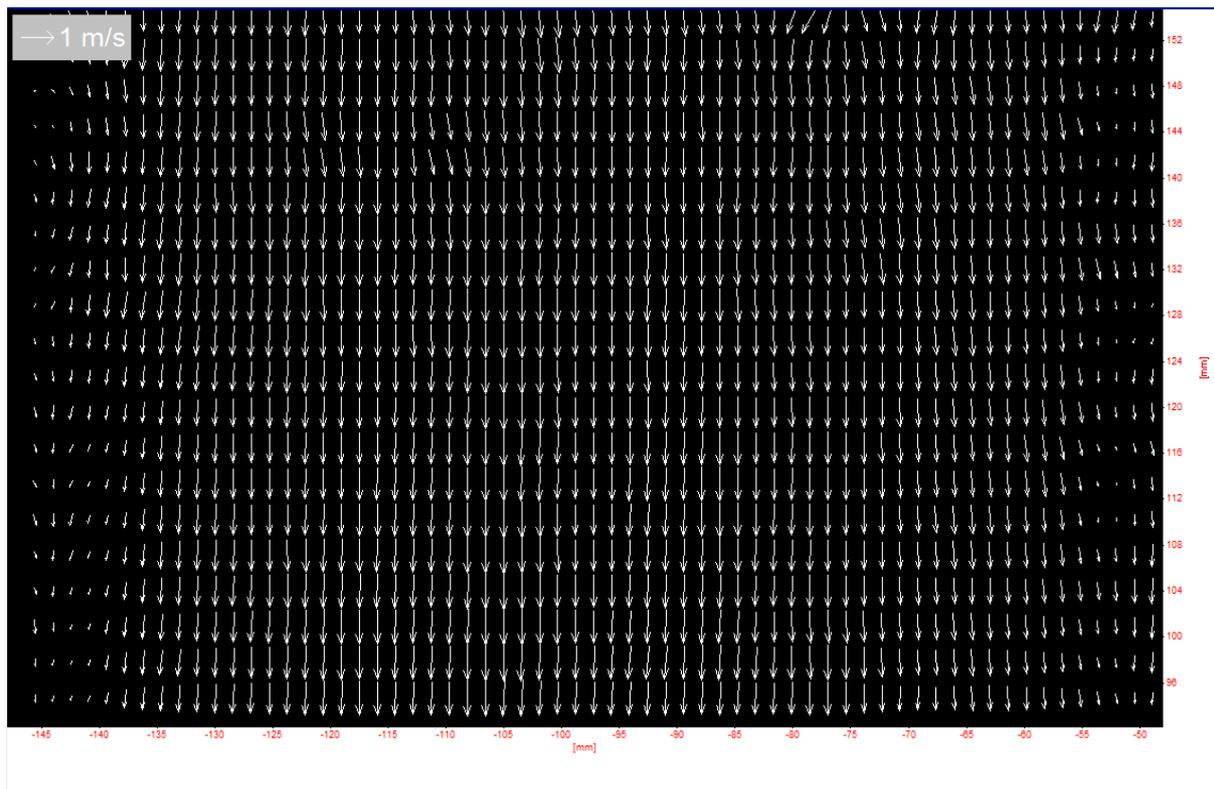


Abbildung 57: Geschwindigkeitsprofil (Schwarz-Weiß) des Rieselfilms von Wasser entlang des glatten Metallblechs bei einem Volumenstrom von 3400 ml/min.

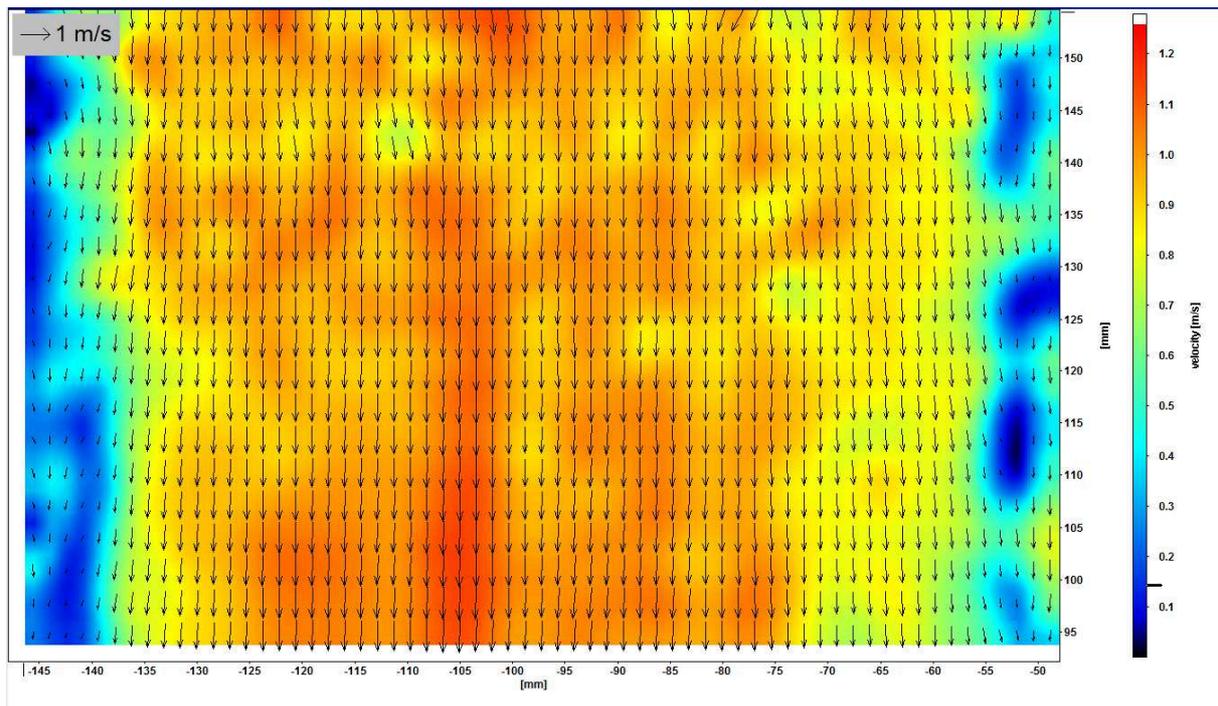


Abbildung 58: Geschwindigkeitsprofil (Farbe) des Rieselfilms von Wasser entlang des glatten Metallblechs bei einem Volumenstrom von 3400 ml/min.

6 Zusammenfassung

Rieselfilme sind dünne Flüssigkeitsfilme an senkrechten oder geneigten Oberflächen. Aufgrund ihrer hohen Wärme- und Stoffübertragungsraten eignen sie sich besonders für den Einsatz in Wärmeübertragern und stoffübertragenden Apparaten wie beispielsweise für Packungskolonnen, die in dieser Arbeit im Fokus stehen. Die auf den Packungen entstehenden Rieselfilme zeichnen sich durch eine hohe Austauschfläche bei geringer Schichtdicke aus, wodurch die benötigten Volumenströme relativ gering sind. Nach ihrer Turbulenz wird die Strömung in die Bereiche laminar, quasi laminar und turbulent eingeteilt. Die Hydrodynamik und der Strömungszustand der flüssigen Phase innerhalb von Packungen hat einen signifikanten Einfluss auf das Betriebsverhalten und die Trennleistung von Kolonnen (3). Das Verständnis des Strömungsverhaltens von Rieselfilmen ist deshalb von grundsätzlicher Bedeutung.

Da die Untersuchung des Strömungszustandes in Packungen einen hohen experimentellen Aufwand erfordert, werden grundlegende Untersuchungen am Modellsystem der geneigten Platte durchgeführt. Am Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes wurde ein Versuchstand nach diesem Modell konstruiert und gebaut (5). Ziel dieser Arbeit ist es nun an diesem Versuchstand erste laseroptische Messungen des Geschwindigkeitsfeldes von Rieselfilmen durchzuführen, um Erfahrungen und Erkenntnisse mit dem experimentellen Aufbau und dem Messsystem zu sammeln. Angewandt wird das laseroptische Messsystem der Firma LaVision GmbH. Das eingesetzte Messverfahren ist die Particle Image Velocimetry (PIV), ein bildgebendes Verfahren mit dem das Geschwindigkeitsfeld des Rieselfilms entlang der schrägen Platte dargestellt wird. Das Prinzip dieses Verfahrens basiert auf dem Vergleich von zwei zeitlich aufeinander folgenden Lichtschnittaufnahmen von Tracerpartikel in der Strömung. Das Geschwindigkeitsfeld wird durch ein Vektorfeld beschrieben, wobei die Länge des Vektors der Geschwindigkeit entspricht. Als Tracerpartikel wurde Rhodamin B Pulver mit einer Korngrößenverteilung von 20 – 50 µm eingesetzt. Die gewählte Konzentration in der Versuchsflüssigkeit von etwa 0,15 g pro Liter hat sich bei den Versuchen bewährt

Da es zu Beginn noch Probleme mit der Versuchsanlage gab, wurde zuerst an der Optimierung des Versuchstandes gearbeitet. Das größte Problem stellte die Undichtigkeit der Anlage dar die provisorisch mit Klebeband abgedichtet war. Die Anlage konnte nahezu komplett abgedichtet werden indem das Schiebersystem entfernt wurde und der Aufgabebehälter direkt auf die an der Platte angeklebten Dichtungsbänder aufgesetzt wurde. Durch kleine Leckagen austretendes Wasser wird mithilfe einer Wanne, in welche der Versuchstand gestellt wurde, aufgefangen.

Erste PIV-Versuche mit Wasser und Silikonölen an der Plexiglasplatte zeigten, dass bei der direkten Flüssigkeitsaufgabe auf die Platte über die 12 mm breite Öffnung des Aufgabebehälters das Geschwindigkeitsfeld sehr inhomogen ist und das Strömungsverhalten

des Rieselfilms stark durch die Position des Schlauches im Aufgabebehälter beeinflusst wird. Bei Wasser entsteht außerdem nur in Ausnahmefällen ein geschlossener Film über die Breite der Platte. Meist fließt die Flüssigkeit stattdessen in Rinnsalen ab. In weiterer Folge wurde deshalb die Flüssigkeitsaufgabe optimiert. Die Idee war die Flüssigkeit im Aufgabebehälter zu stauen um einen möglichst gleichmäßigen, unvorbelasteten Übergang des Versuchsfluid auf die Platte zu gewährleisten. Dazu wurde in einem ersten Schritt manuell ein gekantetes Aluminiumblech gefertigt mit dem die Austrittsöffnung des Aufgabebehälters von 12 mm auf etwa 1 mm reduziert wurde. Durch die dadurch eintretende Stauung im Aufgabebehälter konnte meist ein geschlossener Rieselfilm erzeugt werden. Das Geschwindigkeitsprofil war aber dennoch ungleichmäßig, weil auch das gekantete Blech Unebenheiten aufwies. In einem zweiten Schritt wurden deshalb Bleche mit einem mittig angeordneten Spalt entworfen und industriell gefertigt. Der Spalt (0,3 mm, 0,5 mm bzw. 0,7 mm) wurde dabei mit einem Laser eingeschnitten und ist deshalb sehr gleichmäßig. Bei der Auswertung weiterer PIV-Versuchen wurde eine deutliche Verbesserung der Homogenität festgestellt.

Im Zuge der Arbeit wurden neben der Flüssigkeitsaufgabe auch andere Einflussparameter auf die Strömungsbildung verändert, um den Einfluss der Parameter auf das Strömungsverhalten zu untersuchen und um Erfahrungen mit dem Messaufbau zu sammeln. Zu den variierten Parametern zählen der Volumenstrom und die Viskosität der Flüssigkeit, der Anstellwinkel der Platte, der Einfluss einer Stolperstelle in der Strömung sowie Material und Oberflächenstruktur der Platte.

Hinsichtlich der Viskosität der Versuchsflüssigkeit konnte gezeigt werden, dass die höher viskosen Fluide Silikonöl M 5 und Silikonöl M 20 langsamer fließen als Wasser. Die Verwendung des Silikonöls hat sich allerdings als unangenehm erwiesen, weil Ölrückstände im Versuchsstand nur sehr schwer beseitigt werden können. Die Einstellung verschiedener Anstellwinkel der Platte sowie Volumenströme funktionierte sehr gut. Die zu erwartende Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit entlang der Platte bei niedrigeren Volumenströmen bzw. die Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit bei größerem Anstellwinkel, sind auf den PIV-Aufnahmen eindeutig ersichtlich. Es hat sich zudem gezeigt, dass das Geschwindigkeitsfeld fortlaufend mit abnehmendem Volumenstrom ungleichmäßiger wird, vermutlich weil sich bei geringerem Volumenstrom weniger Flüssigkeit im Aufgabebehälter staut. Ein weiteres auffälliges Strömungsverhalten ist eine niedrigere Strömungsgeschwindigkeit an den seitlichen Rändern des Rieselfilms zu den Klemmen hin, als in der Mitte der Platte. Die geringere Strömungsgeschwindigkeit in diesem Bereich wird durch das Benetzen des Rieselfilms an den Klemmen bewirkt. Dadurch bleibt der Film auch entlang der Breite der Platte stabil. Dieses Strömungsverhalten wurde auch bei dem Shadowgraphie-Versuch deutlich, bei dem sich durch die Entfernung der Klemmen kein Film entlang der Breite der Platte ausgebildet hat. Bei einem niedrigeren Volumenstrom als 1500 ml/min wurde vermehrt ein Aufreißen des Rieselfilms beobachtet. Die PIV-Auswertung zeigte weiteres, dass eine Störstelle das Strömungsprofil maßgeblich beeinflusst. Die

eingebraachte Störstelle im Rieselfilm ist in den Aufnahmen als schwarzer Fleck deutlich zu erkennen. Die Aufnahme des Geschwindigkeitsprofil entlang des strukturierten Metallblechs stellte sich im Vergleich zu der Plexiglasplatte und dem glatten Metallblech als problematisch heraus. Da die Auswertung auffällig niedrigere Geschwindigkeiten als auf dem glatten Blech liefert, wird vermutet, dass das gemessene Geschwindigkeitsprofil an der strukturierten Platte nicht den wahren Geschwindigkeiten entspricht und die Tracerpartikel in den Vertiefungen der Platte hängen bleiben bzw. dass sich aufgrund der Struktur kleine Rezirkulationszonen bilden. Während der Versuch viel auf, dass die Flüssigkeit auf dem strukturierten Blech deutlich besser benetzt als auf dem glatten Blech. Diese Verbesserung der Flüssigkeitsverteilung ist auf die Oberfläche der strukturierten Platte (Umlenkungen der Strömung auf der Platte) zurückzuführen.

Bei den Ergebnissen der PIV-Versuche muss generell beachtet werden, dass die Geschwindigkeitsprofile nur qualitative Aussagen und keine quantitativen Aussagen über die Strömungsgeschwindigkeit des Rieselfilms zulassen. Grund dafür ist, dass das der erzeugte Rieselfilm, trotz der kontinuierlichen Optimierung des Versuchsaufbaus im Laufe der Versuche, immer noch nicht über die gesamte Breite der Platte homogen ist. Des Weiteren kann keine Aussage darüber getroffen werden, in welcher Tiefenebene des Rieselfilms die Geschwindigkeit aufgenommen wird. Das heißt, es ist nicht bekannt ob das Geschwindigkeitsprofil die Strömungsgeschwindigkeit nahe der Platte, in der Mitte, oder an der Oberfläche der Rieselfilm dargestellt. Diese Information könnten durch eine Softwareerweiterung und ein Topographisches PIV gewonnen werden.

Im Anschluss der Geschwindigkeitsmessungen wurde ein erster Shadowgraphie-Versuch durchgeführt, um die Dicke des Rieselfilms zu bestimmen, um damit die Plausibilität der gemessenen Geschwindigkeiten zu überprüfen. Das Ergebnis der Filmdickenbestimmung war jedoch nicht aussagekräftig, weil sich während der Messung kein Rieselfilm, sondern eine verengte Strömung in der Mitte der Platte ausgebildet hat. Es konnte aber gezeigt werden, dass die Shadowgraphiemessung zur Bestimmung der Filmdicke verwendet werden kann.

7 Verzeichnisse

7.1 Literatur

1. **Al-Sibai, F.** *Experimentelle Untersuchungen der Strömungscharakteristik und des Wärmeübergangs bei welligen Rieselfilmen*. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen : s.n., 2004. S. 1-8, 27-30, Dissertation.
2. **Mersmann, A. und Deixler, A.** Packungskolonnen. *Chem. Ing. Tech.* 1986, Bd. 58, Nr.1, S. 19-20.
3. **Repke, J. U. und Wozny, G.** Experimental Investigations of Three-Phase Distillation in A Packed Column. *Chemical Engineering & Technology*. 2002, Bd. 25 (2), S. 513-519.
4. **Ausner, I.** *Experimentelle Untersuchungen mehrphasiger Filmströmungen*. Fakultät III - Prozesswissenschaften der Technischen Universität Berlin. Berlin : s.n., 2006. S. 3-12, Dissertation.
5. **Foith, P.** *Konstruktion eines Versuchsstands für laseroptische Vermessungen von Rieselfilmströmungen*. Institut für Verfahrenstechnik des Industriellen Umweltschutzes, Montanuniversität Leoben. Leoben : s.n., 2014. S. 43-78, Masterarbeit.
6. **Fahlenkamp, H.** *Zum Mechanismus des Stofftransports im laminar-welligen Rieselfilm*. Rheinisch- Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen : Fotodruck J. Mainz, 1979. S. 1, Dissertation.
7. **Buckingham, E.** On physically similar systems. *Physical Review*. 1914, 4, S. 345-376.
8. **Nußelt, W.** Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes. *VDI-Z 60*. 1916, S. 541-546, 569-575.
9. **Spurk, J. H.** *Strömungslehre: Einführung in die Theorie der Strömungslehre*. 7 Auflage. Darmstadt : Springer, 2006. S. 185.
10. **Kraume, M.** *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik : Grundlagen und apparative Umsetzungen*. 2. Aufl. Berlin : Springer, 2012. S. 165-194 (Kap 6), 357-386 (Kap 11). Online ISBN 978-3-642-25148-1.
11. **Ishigai, S, et al.** Hydrodynamics and heat transfer of vertical falling liquid films. *Bull JSME*. 1972, 15, S. 594-602.
12. **Adomeit, P. und Renz, U.** Hydrodynamics of Three-dimensional Waves in Laminar Falling Films. *International Journal of Multiphase Flow*. 2000, Bd. 26, S. 1183–1208.

13. **Miyara, A.** Numerical Analysis on Flow Dynamics and Heat Transfer of Falling Liquid Films with Interfacial Waves. *Heat and Mass Transfer*. 1999, Bd. 35, S. 298–306.
14. **Ferziger, J. H. und Peric, M.** *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3rd Edition. Berlin Heidelberg New York : Springer-Verlag, 2003. ISBN 3-540-42074-6.
15. **Ho, F. C. K. und Hummel, R. L.** Average velocity distributions within falling liquid films. *Chemical Engineering Science*. 1970, Bd. 25, S. 1225–1237.
16. **Karimi, G. und Kawaji, M.** An experimental study of freely falling films in a vertical tube. *Chemical Engineering Science*. 1998, Bd. 53 (20), S. 3501–3512.
17. **Brauer, H.** *Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen*. Aarau : Sauerländer, 1971.
18. **Wilkes, J. O. und Nedderman, R. M.** The measurement of velocities in thin films of liquid. *Chemical Engineering Science*. 1962, Bd. 17, S. 177–187.
19. **Brauner, N. und Maron, D. M.** Characteristics of inclined thin films, waviness and the associated mass transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1982, Bd. 25 (1), S. 99–110.
20. **Ghezzehei, T. A.** Constraints on flow regimes in wide-aperture fractures. *Water Resources*. 2004, Bd. 40.
21. **Perry, R. H. und Green, D. W.** *Perry's Chemical Engineer's Handbook*,. 8. Aukland u. a. : s.n., 1998.
22. **Saber, H. H. und El-Genk, M. S.** On the breakup of a thin liquid film subject to interfacial. *Journal of Fluid Mechanics*. 2004, Bd. 500, S. 113-133.
23. **Dussan, E. B.** On the spreading of liquids on solid surfaces: static and dynamic contact lines. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1979, Bd. 11, S. 371–400.
24. **Michaelis, M.** *Kapillarinduzierte Schwingungen freier Flüssigkeitsoberflächen*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2003. VDI Fortschrittsberichte. Reihe 7: Strömungsmechanik, Nr. 454.
25. **Hartley, D. E. und Murgatroyd, W.** Criteria for the Break-Up of Thin Liquid Layers Flowing Isothermally Over Solid Surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1964, S. S. 1003–1015.
26. **Podgorski, T., Flesselles, J.- M. und Limat, L.** Dry arches within flowing films. *Physics of Fluids*. 1999, Bd. 11 (4), S. 845–852.

27. **El-Genk, M. S. und Saber, H. H.** Minimum thickness of a flowing down liquid film on a vertical surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2001, Bd. 44, S. 2809–2825.
28. **Young, G. W. und Davis, S. H.** Rivulet instabilities. *Journal of Fluid Mechanics*. 1987, Bd. 176, S. 1–31.
29. **Schmuki, P. und Laso, M.** On the stability of rivulet flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 1990, Bd. 215, S. 125–143.
30. **Shetty, S. und Cerro, R. L.** Spreading of Liquid Point Sources over Inclined Solid Surfaces. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1995, Bd. 34, S. 4078–4086.
31. **Sikalo, S., Tropea, C. und Ganic, E. N.** Dynamic Wetting Angle of a Spreading Droplet. In: 41. Celata, G. P., et al., 2004.
32. **Sulzer Chemtech Ltd.** Structured Packings for Distillation, Absorption and Reactive Distillation. 2003.
33. **Repke, J. U., Kohrt, M. und Wozny, G.** Untersuchungen mehrphasiger Strömungen an einfachen geneigten Platten als potenzielles Auslegungswerkzeug für technische Trennapparate. *Chemie Ingenieur Technik*. 2011, Bd. 83, 7, S. 1107-1114.
34. **Plüss, R.** 4 981 621 US Patent, 1991.
35. **Kohrt, M.** TU Berlin. 2011. Dissertation. in Vorbereitung.
36. **Paschke, S.** TU Berlin. 2011. Dissertation. in Vorbereitung.
37. **Rieger, J. und Lehner, M.** *Laseroptisches Messsystem am Lehrstuhl für Verfahrenstechnik*. Montanuniversität Leoben. Leoben : s.n., 2013.
38. **LaVision GmbH.** *Product-Manual FLOWMaster for DaVis 8.1*. Göttingen : LaVision GmbH, 2012.
39. **LaVision GmbH.** *Product-Manual FlowMaster Getting Started*. Göttingen : La Vision GmbH, 2012.
40. **LaVision GmbH.** *Product Manual High Speed Diffuser for DaVis 8.0*. Göttingen : LaVision GmbH, 2010.
41. **LaVision GmbH.** <http://www.lavision.de>. [Online] [Zitat vom: 06. 09 2014.]
42. **LaVision GmbH.** *Product Manual Long Distance Microscope*. Göttingen : La Vision GmbH, 2012.

-
43. **Wikibooks**. Tabellensammlung Chemie Stoffdaten Wasser. [Online] [Zitat vom: 04. 10 2014.] http://de.wikibooks.org/wiki/Tabellensammlung_Chemie/_Stoffdaten_Wasser.
44. **Carl Roth GmbH + Co. KG**. Produktspezifikation Siliconöl M 5. Karlsruhe : s.n., 2013.
45. **Carl Roth GmbH + Co. KG** . Produktspezifikation Siliconöl M 20. Karlsruhe : s.n., 2014.
46. **Carl Roth GmbH + Co. KG**. Produktspezifikation Ethanol 96%. Karlsruhe : s.n., 2013.
47. **Prandtl, L.** *Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung*. Leipzig : B.G. Teubner, 1904. S. S 484–491, Verh III Int Math Kongr in Heidelberg.
48. **Miller, W. A. und Keyhani, M.** The effect of roll waves on the hydrodynamics of falling films. *Proc ASME Advanced Energy Systems*. 2001.
49. **Celata, G. P., et al.** *Proceedings of 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation*. Pisa, Italien : ETSPisa, 2004. ISBN 88-467-1075-4.
50. **Siegloch, H.** *Technische Fluidmechanik*. 6., neu bearb. Aufl. Eningen u.A. : Springer, 2008. S. 96.

7.2 Abkürzungen

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Bezeichnung</i>
α	°	Neigungswinkel
a	m/s ²	Fallbeschleunigung
A_{quer}	m	Querschnittsfläche der Kolonne
b	mm	Plattenbreite
B	m ³ /(m ² ·h)	Kolonnenbelastung bezogen auf Querschnittsfl.
c	J/(kg·K)	spezifische Wärmeleitfähigkeit
δ	mm	Filmdicke
δ_{min}	mm	minimale Filmdicke
δ_{mittel}	mm	mittlere Filmdicke
δ_{max}	mm	maximale Filmdicke
δ_{res}	mm	Residualfilmdicke
E	J	Gesamtenergie
η	mPa·s	dynamischer Viskosität
f	1/s	Wellenfrequenz
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
Ka	-	Kapitza-Zahl
K_F	-	dimensionslose Filmkennzahl
Θ	°	statistischer Kontaktwinkel
λ	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit
l	mm	Wellenlänge
L	m	Länge
L_i	mm	Einlaufstrecke
ν	m ² /s	kinematische Viskosität
p_i	N/m ²	Innendruck im Rinnsal

p_u	N/m^2	Umgebungsdruck
P	W	Heizleistung
PIV	-	Particle Image Velocimetry
ρ	g/cm^3	Dichte
r	m	Kreisradius
$1/r$	$1/m$	Krümmung der Phasengrenzfläche
Re	-	Reynolds-Kennzahl
Re_{krit}	-	kritische Reynolds-Kennzahl
σ	kg/s^2	Oberflächenspannung
σ_{sg}	kg/s^2	Oberflächenspannung Phasengrenze fest-gas
σ_{gl}	kg/s^2	Oberflächenspannung Phasengrenze gas-flüssig
σ_{sl}	kg/s^2	Oberflächenspannung Phasengrenze fest-flüssig
τ_w	N/m^2	Wandschubspannung
T	$^{\circ}C$	Temperatur/Temperaturdifferenz
t	s	Zeit
u	m/s	Geschwindigkeitsprofil
u_{max}	m/s	maximale Geschwindigkeit
u_{τ}	m/s	Wandschubspannungsgeschwindigkeit
u^+	-	dimensionslose Wandgeschwindigkeit
U	$m^3/(m \cdot h)$	Umfangbelastung
v	m/s	Wellengeschwindigkeit
\dot{V}	ml/min	Volumenstrom
$\phi(z)$	m	Rinnsaldickenprofil
x	-	Massenanteil
y	mm	Abstand
y^+	-	dimensionsloser Abstand

7.3 Tabellen

Tabelle 1: Abhängige und unabhängige Parameter der Rieselfilmströmung (1).	6
Tabelle 2: Zusammensetzung und kinematische Viskosität der Versuchsflüssigkeiten.....	27
Tabelle 3: Volumenstrom und Re für Wasser bei einer Filmbreite von 100 mm.....	28
Tabelle 4: kinematische Viskosität ν der Versuchsflüssigkeiten.....	XII
Tabelle 5: Stoffwerte zur Abschätzung der kinematischen Viskosität.....	XII

7.4 Abbildungen

Abbildung 1: Schematische Darstellung einer glatten (links) und welligen (rechts) Filmströmung entlang einer geneigten Wand (9) und (1).....	7
Abbildung 2: Unterschiedliche Filmkonturen bei der Filmströmung (1).	8
Abbildung 3: Definition des Kontaktwinkels Θ an einem Dreiphasensystem (gas-flüssig-fest) im statischen Gleichgewicht (4).....	11
Abbildung 4: Schematische Darstellung des Filmaufreißens. Die laminaren Stromlinien verengen sich und bilden einen erhöhten Rand um die Trockenzone. (4)	13
Abbildung 5: Veränderung der Morphologie einer Wasserströmung über eine Stahlplatte ($\alpha = 60$) bei sinkender Flüssigkeitsbelastung ($Re \approx 150 - 80$ von links nach rechts) (4).	13
Abbildung 6: Auftreten dynamischer Kontaktwinkel Θ_i an einem herabströmenden Tropfen (4).	15
Abbildung 7: Der Benetzungstest bei glatter und mikrostrukturierter Packungsoberfläche auf einer geneigten Platte mit Silikonöl zeigt eine deutlich bessere Flüssigkeitsverteilung mit Mikrostrukturen. a) Glatte Platte, b) zweidimensionale und c) dreidimensionale Oberflächenstruktur. Aufnahmen mittels LIF und 6 s nach Erstbenetzung (33).	17
Abbildung 8: (a): Geschwindigkeitsprofile aus μ PIV-Messungen für drei charakteristische Orte der Montz-Tetraederstruktur; (b): Betrachtungsebenen des Packungssegments bis zum Messort ($2 \times 2,5$ mm) der Mikrostruktur auf geneigter Platte inklusive Geschwindigkeitsvektoren (33).....	18
Abbildung 9: Versuchstand zur Rieselfilmuntersuchung an einer schräg geneigten Platte (5).	20
Abbildung 10: Halterungssystem mit Schiebern in Seitenansicht (5).	21
Abbildung 11: Abgedichtete Undichtigkeitsstellen an der Verbindungsstelle zwischen Halterungssystem der Schieber und Platte (5).	22
Abbildung 12: an der Platte angebrachte Dichtungswände und Dichtungsbänder (5).....	22
Abbildung 13: Platzierung des Aufgabebehälters direkt auf die an der Platte aufgeklebten Dichtungsbänder zur Vermeidung von Undichtheiten der Anlage.	23
Abbildung 14: Aluminiumblech zur Reduzierung des Austrittsspalt am Aufgabebehälter. .	24
Abbildung 15: Aluminiumbleche mit gelasertem Spalt.	25
Abbildung 16: Blockmagnete zur Befestigung des strukturierten Metallblechs.....	26
Abbildung 17: strukturiertes und glattes Metallblech.	29
Abbildung 18: Stolperstelle.....	30

Abbildung 19: Setup eines 2D-PIV Systems (38).....	31
Abbildung 20: Versuchsaufbau für die PIV-Versuche.	32
Abbildung 21: Bildausschnitt X=768 Pixel und Y=476 Pixel.....	34
Abbildung 22: Kalibrierung für die PIV-Versuche.....	35
Abbildung 23: Rieselfilm von Wasser entlang des glatten Metallblechs (Anstellwinkel 30 Grad) bei einem Volumenstrom von 1700 ml/min.	36
Abbildung 24: Rieselfilm von Silikonöl M 20 entlang der Plexiglasplatte (Anstellwinkel 60 Grad) bei einem Volumenstrom von 1900 ml/min.	37
Abbildung 25: Prinzip der Auswertung einer PIV Aufnahme mittels Kreuzkorrelation (38). ...	38
Abbildung 26: Setup einer Shadowgraphie-Messung mit Hochgeschwindigkeits-Diffuser und Fernfeldmikroskop (40).	39
Abbildung 27: Versuchsaufbau für den Shadowgraphie-Versuch.	40
Abbildung 28: Einstellung des beleuchteten Bereichs (40).	41
Abbildung 29: Funktionsprinzip des Fernfeldmikroskops (42).....	42
Abbildung 30: Versuchsplatte ohne (links) und mit (rechts) seitlichen Klemmen.....	42
Abbildung 31: Strömungsverhalten der Versuchsflüssigkeit während der Shadowgraphie- messung. Es bildet sich kein geschlossener Film über die Breite der Platte aus.	43
Abbildung 32: Geschwindigkeitsprofil entlang der Plexiglasplatte (Medium Wasser; Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über die originale Spaltbreite des Aufgabebehälters von 12 mm und einem Volumenstrom von 1878 ml/min.	45
Abbildung 33: Geschwindigkeitsprofil entlang des glatten Metallblechs (Medium Wasser; Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über das gekantete Aluminiumblech und einem Volumenstrom von 3400 ml/min.	46
Abbildung 34: Geschwindigkeitsprofil entlang des glatten Metallblechs (Medium Wasser; Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über das Aluminiumblech mit 0,3 mm Spaltbreite und einem Volumenstrom von 3400 ml/min.....	47
Abbildung 35: Geschwindigkeitsprofil von Silikonöl M 5 entlang der Plexiglasplatte (Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über die originale Spaltbreite des Aufgabebehälters von 12 mm und einem Volumenstrom von 1878 ml/min.	48
Abbildung 36: Geschwindigkeitsprofil von Silikonöl M 20 entlang der Plexiglasplatte (Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über die originale Spaltbreite des Aufgabebehälters von 12 mm und einem Volumenstrom von 1878 ml/min.	49
Abbildung 37: Geschwindigkeitsprofil von Silikonöl M5 entlang der Plexiglasplatte (Anstellwinkel 45 Grad) bei Aufgabe über die originale Spaltbreite des Aufgabebehälters von 12 mm und einem Volumenstrom von 1900 ml/min.	50

Abbildung 38: Geschwindigkeitsprofil von Silikonöl M5 entlang der Plexiglasplatte (Anstellwinkel 60 Grad) bei Aufgabe über die originale Spaltbreite des Aufgabebehälters von 12 mm und einem Volumenstrom von 1900 ml/min.	51
Abbildung 39: Geschwindigkeitsprofil von Wasser entlang des glatten Metallblechs (Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über das Aluminiumblech mit 0,5 mm Spaltbreite und einem Volumenstrom von 3400 ml/min.....	52
Abbildung 40: Geschwindigkeitsprofil von Wasser entlang des glatten Metallblechs (Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über das Aluminiumblech mit 0,5 mm Spaltbreite und einem Volumenstrom von 3000 ml/min.....	53
Abbildung 41: Geschwindigkeitsprofil von Wasser entlang des glatten Metallblechs (Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über das Aluminiumblech mit 0,5 mm Spaltbreite und einem Volumenstrom von 2500 ml/min.....	54
Abbildung 42: Geschwindigkeitsprofil von Wasser entlang des glatten Metallblechs (Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über das Aluminiumblech mit 0,5 mm Spaltbreite und einem Volumenstrom von 2000 ml/min.....	55
Abbildung 43: Rohbild (Frame 1) des Rieselfilms von Wasser entlang des strukturierten Metallblechs (Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über das Aluminiumblech mit 0,5 mm Spaltbreite und einem Volumenstrom von 3400 ml/min;.....	57
Abbildung 44: Geschwindigkeitsfeld des Rieselfilms entlang des strukturierten Metallblechs (Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über das Aluminiumblech mit 0,5 mm Spaltbreite und einem Volumenstrom von 3400 ml/min; Rhodamin B Pulver mit 1 - 20 µm Korngröße.	58
Abbildung 45: Vektorfeld (Schwarz-Weiß) des Rieselfilms mit einer auf 10 Pixel fixierten Pfeillänge entlang des strukturierten Metallblechs (Anstellwinkel 30 Grad) bei Aufgabe über das Aluminiumblech mit 0,5 mm Spaltbreite und einem Volumenstrom von 3400 ml/min; Rhodamin B Pulver mit 1 - 20 µm Korngröße.....	59
Abbildung 46: Geschwindigkeitsprofil (Schwarz-Weiß) von Wasser entlang der Plexiglasplatte (Anstellwinkel 30 Grad) mit runder Störstelle bei Aufgabe über das gekantete Aluminiumblech und einem Volumenstrom von 2700 ml/min.	60
Abbildung 47: Geschwindigkeitsprofil (in Farbe) von Wasser entlang der Plexiglasplatte (Anstellwinkel 30 Grad) mit runder Störstelle bei Aufgabe über das gekantete Aluminiumblech und einem Volumenstrom von 2700 ml/min.....	61
Abbildung 48: Shadowgraphieaufnahme: Bestimmung der Filmdicke bei einem Volumenstrom von 2400 ml/min.	62
Abbildung 49: Rohbild des Rieselfilms von Wasser entlang der Plexiglasplatte (mit runder Störstelle) bei einem Volumenstrom von 2700 ml/min.	65

Abbildung 50: Rohbild des Rieselfilms von Wasser entlang des glatten Metallblechs bei einem Volumenstrom von 3400 ml/min.....	66
Abbildung 51: PIV-Auswertung: Maske „MA Violeta Standardauswertung“.....	67
Abbildung 52: PIV-Auswertung: Maske „MA Violeta Standardauswertung“.....	68
Abbildung 53: Vektorposition abhängig von Auswertefenstergröße und Überschneidung.....	69
Abbildung 54: PIV-Auswertung: Maske „MA Violeta Standardauswertung“.....	69
Abbildung 55: PIV-Auswertung: Maske „MA Violeta Standardauswertung“.....	70
Abbildung 56: Geschwindigkeitsprofil (Standardauswertung) des Rieselfilms von Wasser entlang des glatten Metallblechs bei einem Volumenstrom von 3400 ml/min.....	71
Abbildung 57: Geschwindigkeitsprofil (Schwarz-Weiß) des Rieselfilms von Wasser entlang des glatten Metallblechs bei einem Volumenstrom von 3400 ml/min.	72
Abbildung 58: Geschwindigkeitsprofil (Farbe) des Rieselfilms von Wasser entlang des glatten Metallblechs bei einem Volumenstrom von 3400 ml/min.	73

Anhang

Versuchsflüssigkeit (Fluidviskosität)

Die kinematische Viskosität ν der Versuchsflüssigkeiten wird vom Autor vereinfacht über die kinematische Viskosität der einzelnen Komponenten und ihrem Massenanteil x in dem Gemisch gemäß folgender Gleichung (16 abgeschätzt):

$$\nu = \nu_1 \cdot x_1 + \nu_2 \cdot x_2 \quad (17)$$

Es ist zu beachten, dass diese Gleichung keine anerkannte Formel zur Bestimmung der Mischviskosität ist. Mit der Zusammensetzung der Versuchsflüssigkeiten aus Tabelle 2 (jeweiliger Volumenanteil von Ethanol in der Lösung von 12,5%) ergeben sich die in Tabelle 4 dargestellten Werte für die Viskosität. Die der Abschätzung zugrunde liegenden Stoffwerte sind in Tabelle 5 angeführt.

Tabelle 4: kinematische Viskosität ν der Versuchsflüssigkeiten.

Versuchsflüssigkeit	kin. Viskosität
	$10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Wasser	1
Silikonöl M5	5
Silikonöl M20	18

Tabelle 5: Stoffwerte zur Abschätzung der kinematischen Viskosität

Bezeichnung	Dichte bei 20°C	dyn. Viskosität	kin. Viskosität
	g/cm^3	$\text{mPa}\cdot\text{s}$	$10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
deionisiertes Wasser	0,998 (43)	1,001 (43)	1
Silikonöl M5	-	-	5 (44)
Silikonöl M20	-	-	20 (45)
Ethanol	0,810 (46)	1,000 (46)	1

Die Umrechnung von dynamischer Viskosität η auf kinematische Viskosität ν erfolgt über die Dichte ρ gemäß folgender Gleichung (18):

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (18)$$