

## **Konstruktion eines Versuchsstands für laseroptische Vermessungen von Rieselfimströmungen**

**Lehrstuhl für Verfahrenstechnik  
des industriellen Umweltschutzes**

**Vorgelegt von:**  
Peter Foith  
0835347

**Betreuer/Gutachter:**  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Markus Lehner

Montanuniversität Leoben, Juni 2014



Die Eidesstattliche Erklärung muss unterschrieben und mit Datum versehen in Ihrer Abschlussarbeit eingebunden werden.

### EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Datum 06.05.2014

A handwritten signature in blue ink that reads "Peter Foith".

Unterschrift Verfasser/in  
Peter, Foith  
Matrikelnummer: 0835347

---

## **Kurzfassung**

Zielsetzung der gegenständlichen Arbeit ist die Konstruktion eines Versuchsstandes für laseroptische Vermessungen von Rieselfilmströmungen. Die verwendete Messmethodik bei den Untersuchungen ist die Particle Image Velocimetry (PIV), mit welcher das Geschwindigkeitsfeld einer Filmströmung entlang einer geneigten Platte untersucht werden kann. Die Messstände bisheriger Arbeiten zu diesem Thema werden recherchiert und mit den gewonnenen Kenntnissen ein Versuchsstand entworfen und gebaut. Dieser zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität hinsichtlich der möglichen einstellbaren Plattenneigungswinkel aus. Zudem können unterschiedlichen Filmdicken und Flüssigkeitsvolumenströme eingestellt werden. Der gesamte Aufbau ist so konstruiert, dass sich möglichst wenige Totzonen zur Absetzung der für die PIV notwendigen Tracerpartikel ergeben. Eine weitere Anforderung an den Versuchsstand ist es unterschiedliche Plattengeometrien verwenden zu können, um so auch die Auswirkungen von komplexen Plattenoberflächen mit Makro- und Mikrostrukturen auf die Filmströmung untersuchen zu können. Dadurch soll es möglich sein in Zukunft auch reale Packungsmaterialien und deren Oberflächen untersuchen zu können, da es bis dato nur vereinzelte Arbeiten zu diesem Thema gibt.

## **Abstract**

The objective of this thesis is the construction of a test station for laser optical measurements of liquid films falling on an inclined plate. The method used to examine the liquid films is called particle image velocimetry (PIV), which allows to determine the velocity field of tracer particles suspended in the liquid. A literature study of test rigs of previous theses is used to design and construct a test station, which matches several requirements. One is to be able to examine a wide range of inclination angles giving the opportunity to emulate different packing materials and their structures that are commonly found in packed columns. To ensure a genuine emulation of packed columns it is also required to be able to adjust the thickness and the volumetric flow rate of the test fluids. The test station is designed to minimize the possibility of dead zones and therefore the deposition of tracer particles, which are needed for PIV measurements. Another requirement is the possibility to have exchangeable plates making it possible to analyze film flows over a micro-structured plate. This would have the advantage of being able to utilize real packing materials in the future and further develop the understanding in this area, as there have only been few researches conducted in this matter so far.

---

## Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen von Rieselfilmen .....	1
1.1	Strömungsregime der Filmströmungen .....	4
1.1.1	Einteilung der Regime mit dimensionslosen Kennzahlen.....	4
1.1.2	Eigenschaften und Unterschiede der jeweiligen Strömungsregime .....	6
1.1.2.1	Laminare, glatte Strömung.....	6
1.1.2.2	Quasi laminare und turbulente Strömung .....	8
1.3	Einfluss von Mikrostrukturen auf die Rieselfilmbildung.....	9
1.3.1	Bisherige experimentelle Untersuchungen von strukturierten Packungen ....	13
2	Recherche über bestehende Versuchsanlagen.....	16
2.1	Kevin Leslie Murray Moran.....	18
2.2	Faruk Al-Sibai.....	20
2.3	Ilja Ausner .....	24
2.4	Georg Friedrich Dietze .....	26
2.5	Steve Paschke.....	30
2.6	Martin Kohrt.....	36
2.7	Fazit und Erkenntnisse für die Auslegung des Versuchsstands .....	41
3	Beschreibung des Versuchsstandes .....	43
3.1	Anforderungen.....	43
3.2	Materialauswahl.....	53
3.3	Auswahl des Fluides für Testdurchlauf und Volumina-Berechnung .....	54
4	Versuchsstand.....	57
4.1	Zusammenbau.....	57
4.2	Testdurchlauf und Optimierungsmaßnahmen .....	64

---

5	Ausblick .....	74
6	Zusammenfassung .....	77
7	Verzeichnisse .....	79
7.1	Literatur .....	79
7.2	Tabellen .....	82
7.3	Abbildungen .....	83

## 1 Grundlagen von Rieselfilmen

Um den Ablauf von verfahrenstechnischen Prozessen zu optimieren und dadurch die Baugröße von der verfahrenstechnischen Einrichtung - etwa Packungskolonnen oder Plattenwärmetauscher - möglichst gering zu halten, ist eine hohe Austauschfläche von Nöten. Je größer diese ist, umso besser kann der Energie- und Stofftransport ablaufen. Die Fluidodynamik von Fallfilm- und Rieselfilmströmungen werden seit beinahe einem Jahrhundert untersucht und das Verständnis für eine bessere Applikation steigt stetig an. Gegenstand der Untersuchungen war oftmals auch die Beschreibung der Vorgänge des Stofftransportes dieser Strömungen, wobei im Vergleich zur Untersuchung der Fluidodynamik diese weniger umfangreich ausgefallen sind. Daher gibt es bereits zu diesen Themen genügend einschlägige Literatur. Dennoch soll in diesem und dem folgenden Abschnitt ein Überblick über die grundlegenden Eigenschaften von Rieselfilmen bezüglich ihrer Fluidodynamik, der möglichen Einteilung der Strömungsregime und die Einflüsse von Mikrostrukturen auf die Strömungen gegeben werden.

Bei diesen Filmströmungen kommt eine flüssige Phase in Kontakt mit einer gasförmigen Phase. Dabei kann die Gasphase die Flüssigphase durchdringen, wodurch eine zweiphasige Strömung entsteht. In manchen technischen Anwendungen beeinflussen sich die Phasen hingegen kaum. In diesem einfachsten Fall strömt die Gasphase über die Oberfläche der Flüssigphase, wobei sich diese als Filmströmung ausbildet. Dies bezeichnet man als einphasige Filmströmung und ist der gängigste Fall bei diesen Anwendungen. In einigen speziellen Anwendungsfällen kommen jedoch auch zweiphasige oder mehrphasige Filmströmungen zum Einsatz, wobei hier mindestens zwei flüssige Phasen auf eine Gasphase treffen. Diese Filmströmungen zeichnen sich durch eine große Oberfläche bei gleichzeitig geringer Schichtdicke aus, wodurch für große Kontaktflächen zwischen Gas und Flüssigkeit nur kleine Volumen nötig sind. Sie bilden sich aufgrund des Einflusses der Schwerkraft an geneigten oder senkrechten Oberflächen aus. Man bezeichnet jene Strömungen entlang geneigter Oberflächen als Rieselfilme und senkrechte Strömungen als Fallfilme. Auf Rieselfilme wirkt aufgrund der Neigung eine um

## Kapitel 1 - Grundlagen von Rieselfilmen

$\sin(\alpha) \cdot g$  verminderte Schwerkraft. In der Praxis entstehen diese Filme in Packungskolonnen auf Füllkörpern, wobei deren Struktur und Oberfläche ebenso maßgebend für die Ausbildung der unterschiedlichen Wellenformationen sind, wie die Flüssigkeitsbelastung innerhalb der Kolonne [ 1, 2].

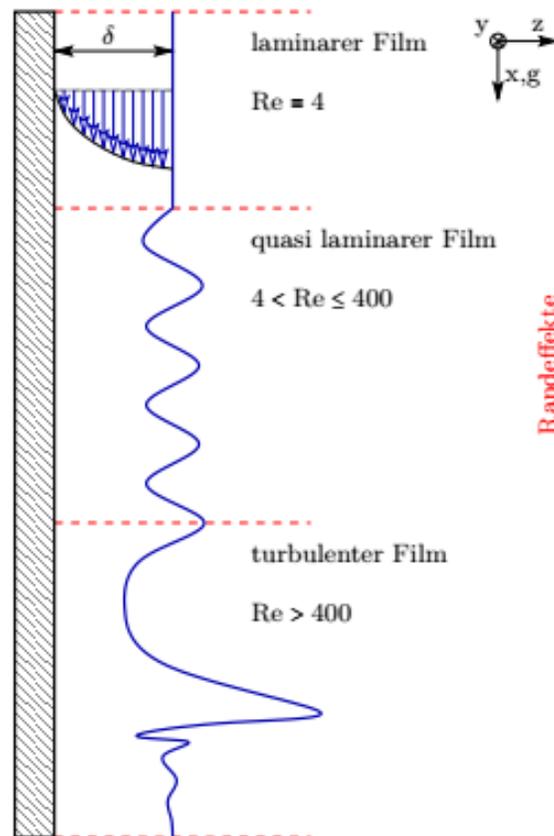
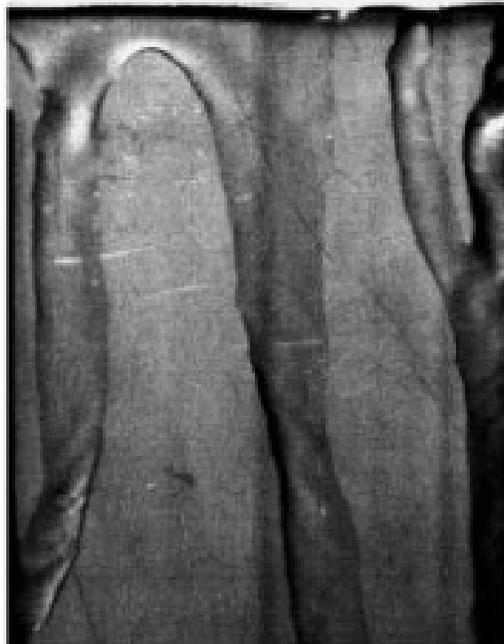


Abbildung 1 - Einteilung der Strömungsregime mit Hilfe der Reynolds-Zahl [ 3]

Abbildung 1 zeigt die prinzipielle Einteilung der Strömungsregime. Außerdem vermittelt es einen vereinfachten Eindruck über die Struktur der einzelnen Bereiche. Bei geringem Volumenstrom der Flüssigkeit, also kleiner Reynolds-Zahl, bildet sich ein laminarer, glatter Flüssigkeitsfilm aus, in welchem sich keine Wellenströmung ausbildet. Bei schrittweiser Erhöhung des Volumenstromes bildet sich ein laminarer Film mit sinusförmigen Wellen aus. Diese Strömung wird als quasi laminare Strömung bezeichnet. Bei noch höheren Flüssigkeitsbelastungen stellt sich ein voll turbulenter

Strömungszustand ein, in welchem es zur Bildung von ungleichförmigen Wellen kommt [ 1, 3]. Bei einer Rieselfilmströmung wird die gesamte berieselte Oberfläche von der Flüssigphase benetzt, womit die größtmögliche Austauschfläche zur Verfügung steht. Je nach dem verwendeten Stoffsystem und den Rahmenbedingungen, wie dem Volumenstrom oder Struktur der berieselten Oberfläche, kann es aber auch zu sogenannten Rinnsal- oder Tropfenströmungen kommen (siehe Abbildung 2).



**Abbildung 2 - Rinnsalströmung [ 4]**

Rinnsale entstehen meist direkt bei der Aufgabe der Flüssigkeit auf die Oberfläche, wenn der Volumenstrom bzw. die Flüssigkeitsbelastung nicht hoch genug ist. Sie können aber auch durch das Aufreißen von Filmen erzeugt werden, wobei hier bei einem bereits vorhandenen Rieselfilm der Volumenstrom immer weiter abgesenkt wird bis dieser geschlossene Film aufreißt. Rinnsal- und Tropfenströmungen sind generell unerwünschte Strömungsformen, da hierbei nicht die gesamte zur Verfügung stehende Oberfläche benetzt wird und so die Austauschfläche zwischen Flüssig- und Gasphase erheblich niedriger ausfällt [ 3, 4].

## 1.1 Strömungsregime der Filmströmungen

### 1.1.1 Einteilung der Regime mit dimensionslosen Kennzahlen

Die ersten Untersuchungen zur Einteilung der Strömungsregime wurden bereits 1916 von Wilhelm Nußelt durchgeführt, wobei er mit seiner Wasserhaut-Theorie das Geschwindigkeitsprofil laminar strömender Fallfilme von newton'schen, inkompressiblen Flüssigkeiten über eine glatte Oberfläche beschreiben wollte [ 5]. Durch Aufstellen und Integration einer Kräftebilanz unter Annahme von Randbedingungen wie Vorliegen von Wandhaftung und keine Übertragung von Schubspannungen über die Oberfläche des Films, konnte Nußelt eine maximale Filmgeschwindigkeit  $w_{N,max}$  für Fallfilme berechnen.

$$w_{N,max}(y) = \frac{g \cdot \sin \delta_N^2}{2 \cdot \nu_f} \quad (1)$$

Hierbei stellt  $w_{N,max}$  die maximale Nußelt-Geschwindigkeit in m/s,  $\delta_N$  die Nußelt-Filmstärke in m und  $\nu_f$  die kinematische Viskosität der Flüssigkeit in m<sup>2</sup>/s dar. Die Nußelt-Filmstärke kann unter zur Hilfenahme der Reynolds-Zahl berechnet werden, wobei  $\bar{w}_f$  die mittlere Filmgeschwindigkeit in m/s,  $\dot{V}_f$  der Volumenstrom des Filmes in m<sup>3</sup>/s, B die Breite des Filmes in m und  $\alpha$  der Neigungswinkel der Platte ist.

$$Re = \frac{\bar{w}_f \cdot \delta_N}{\nu_f} = \frac{\dot{V}_f}{B \cdot \nu_f} \quad (2)$$

$$\delta_N = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \dot{V}_f \cdot \nu_f}{B \cdot g \cdot \cos \alpha}} \quad (3)$$

Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen von Nußelt wurden für Fallfilme weithin erweitert und beschreiben laminare Filme derzeit ausreichend gut [ 3, 6]. Nach Al-Sibai liefert die Wasserhaut-Theorie zu hohe Werte für die Oberflächengeschwindigkeit bei Anwendung für Rieselfilme. Daher sind die Erkenntnisse für Fallfilme von Nußelt

unzureichend für die Beschreibung der Fluidodynamik von Rieselfilmen und daher nicht verwendbar [ 7].

Für die Einteilung der Strömungsregime für Rieselfilme gibt es unterschiedliche Methoden, die zur Abschätzung der Grenzen herangezogen werden können. Zum einen gibt es die Reynolds-Zahl  $Re$ , welche von Nußelt für Fallfilme verwendet wurde:

$$Re = \frac{\bar{w}_f * \delta_N}{\nu_f} = \frac{\dot{V}_f}{B * \nu_f} \quad (4)$$

Die Reynolds-Zahl stellt im Allgemeinen das Verhältnis von Trägheitskräften zu Reibungskräften dar, wobei sie umgeformt den Volumenstrom  $\dot{V}$  über die Plattenbreite  $B$  darstellt. Mit der Reynolds-Zahl werden der Übergang von laminar auf quasi laminar bei  $Re=4$  und der Übergang von quasi laminar auf turbulent bei  $Re=400$  definiert. Da wie aber bereits erwähnt die Erkenntnisse der Wasserhaut-Theorie für Rieselfilme nicht ausreichend sind, wird für eine genauere Einteilung der einzelnen Regime meist die Filmkennzahl  $K_L$  herangezogen:

$$K_L = \frac{\rho_f * \sigma_{fg}^3}{g * \eta_f^4} = \frac{Re^4 * Fr}{We^3} = \frac{1}{Ka} \quad (5)$$

Mehrere Quellen geben an, dass sich die Filmkennzahl mit der Reynolds-, der Froud- und der Weberzahl definieren lässt, wobei sie auch aus dem Kehrwert der Kapitza-Zahl  $Ka$  gebildet werden kann. Sie bildet sich im Grunde aus der Dichte der Flüssigkeit  $\rho_f$ , der Oberflächenspannung  $\sigma_{fg}$ , der Erdbeschleunigung  $g$  und der dynamischen Viskosität  $\eta_f$ . Jedoch ist die Nomenklatur uneinheitlich, da die Filmkennzahl teils als  $K_L$ , als  $K_F$  oder auch als  $Ka$  bezeichnet wird [ 8, 9]. Manche Autoren setzen wiederum die Filmkennzahl mit der Kapitza-Zahl gleich [ 7, 10]. Die Filmkennzahl teilt die Strömungsregime nicht in drei, sondern in fünf Bereiche ein, wobei die Einteilung von Ishigai [ 6] aus dem Jahr 1972 von Al-Sibai [ 7] 2004 überarbeitet wurde.

Tabelle 1 - Strömungsregime von Filmströmungen nach Ishigai [ 6] und Al-Sibai [ 7]

<i>Strömungsregime</i>	<i>Ishigai [6]</i>	<i>Al-Sibai [7]</i>
Laminare, glatte Strömung	$Re \leq 0,47 K_L^{0,1}$	$Re \leq 0,6 K_L^{0,1}$
1.Übergangsbereich	$0,47 K_L^{0,1} < Re \leq 2,2 K_L^{0,1}$	$0,6 K_L^{0,1} < Re \leq K_L^{0,1}$
Quasi laminare Strömung	$K_L^{0,1} < Re \leq 75$	$K_L^{0,1} < Re \leq 25 K_L^{0,09}$
2. Übergangsbereich	$75 < Re \leq 400$	$25 K_L^{0,09} < Re \leq 192 K_L^{0,06}$
Turbulente Strömung	$Re > 400$	$Re > 192 K_L^{0,06}$

Die Abweichungen zwischen Ishigai und Al-Sibai können auf die Unterschiede des jeweiligen Versuchsaufbaus, das eingesetzte Stoffsystem und auf die subjektive Bewertung der Strömungsübergänge zurückgeführt werden.

### 1.1.2 Eigenschaften und Unterschiede der jeweiligen Strömungsregime

Da sich Rieselfilme durch eine hohe Austauschfläche bei gleichzeitig geringem Volumen auszeichnen, finden Rieselfilmapparate häufig Anwendung als Reaktoren für schnelle chemische Reaktionen. Dabei verläuft die Reaktion bzw. der Energie- und Stoffaustauschvorgang zwischen Flüssig- und Gasphase nicht über die gesamte zur Verfügung stehende Flüssigkeit, sondern der Hauptteil der Reaktion verläuft direkt im Bereich der Phasengrenzfläche. Für die analytische Untersuchung mit Hilfe von Differenzialgleichungen lassen sich Annahmen aufgrund der Eigenschaften der einzelnen Strömungsregime treffen. Diese sollen nachfolgend erläutert werden, um das derzeitige grundsätzliche Verständnis für die einzelnen Regime zu geben, wobei auf die Differenzialgleichungen und deren Lösungen nicht näher eingegangen wird und in [ 11] zusammengefasst sind. Weiters soll in diesem Abschnitt das derzeitige Verständnis der einzelnen Strömungsregime durch bisherige experimentelle Untersuchungen wiedergegeben werden.

#### 1.1.2.1 Laminare, glatte Strömung

Der Stofftransport für dieses Strömungsregime wird derzeit mit Hilfe zweier unterschiedlicher Annahmen charakterisiert:

## Kapitel 1 - Grundlagen von Rieselfilmen

In der ersten Annahme wird davon ausgegangen, dass die Filmdicke der Flüssigphase sehr viel größer ist, als die Eindringtiefe der Reaktion. Aufgrund der eher oberflächlichen Reaktion kann der Stoffaustausch im Kern des Filmes vernachlässigt werden. Für die Geschwindigkeitsverteilung wird angenommen, dass über die gesamte Eindringtiefe eine maximale Geschwindigkeit von  $w_{\max} = 1,5 \cdot \bar{w}$  herrscht, wobei  $\bar{w}$  die mittlere Geschwindigkeit der Flüssigphase ist [ 11]. Im starken Kontrast zur ersten Annahme wird bei der zweiten davon ausgegangen, dass der Stofftransport im gesamten Rieselfilm stattfindet.

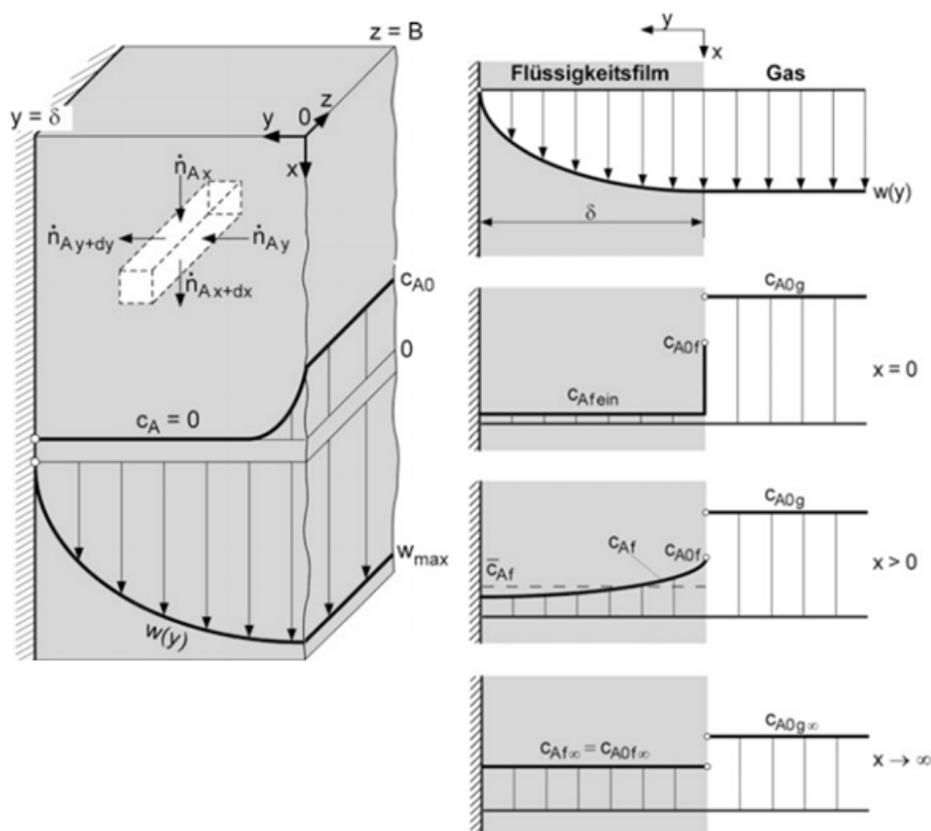


Abbildung 3 - Geschwindigkeits- und Konzentrationsprofil der zwei Annahmen in der Flüssigphase (links Annahme 1, rechts Annahme 2) [ 11]

Abbildung 3 zeigt nun das Geschwindigkeitsprofil und den Stoffübergang aufgrund der zwei unterschiedlichen Annahmen. Die Geschwindigkeitsverteilung ist über die Lauflänge

ähnlich, wobei hingegen der Stoffübergang des Stoffes A im Rieselfilm über die Eintauchtiefe  $x$  unterschiedlich schnell verläuft. Bei der Annahme eins geht der Stoffübergang wesentlich schneller vonstatten, als es bei der zweiten Annahme der Fall ist [ 11].

Experimentelle Untersuchungen haben nachgewiesen, dass der Stofftransport einer quasi laminaren Strömung im Vergleich zu einer glatten Strömung um etwa 200 % höher liegt [ 12]. Die Annahme einer geringen Eintauchtiefe und somit einer oberflächlichen Reaktion in unmittelbarer Umgebung der Phasengrenzfläche kann daher als gute Näherung genommen werden.

#### *1.1.2.2 Quasi laminare und turbulente Strömung*

Im Kapitel 1.1.2.1 konnte aufgrund bisheriger experimenteller Untersuchungen den turbulenten Strömungsformen (quasi laminare und turbulente Strömung) ein höherer Stoffaustausch nachgewiesen werden. Aufgrund eines höheren Volumenstromes steigt die Turbulenz der Strömung, weshalb angenommen wird, dass die Reaktion auch im Kern der Flüssigphase verläuft. Diese tiefer gehende Reaktion wird aufgrund von Quervermischungseffekten begünstigt. Mit ansteigender Turbulenz nimmt die Intensivierung des Stofftransportes aufgrund der Quervermischung zu. Die quasi laminare Filmströmung wird in technischen Anwendungen häufiger angewendet, da verglichen mit dem laminar glatten Film der Stoffaustausch aufgrund der größeren Turbulenz erheblich höher ist. Weiters fällt der Energiebedarf im Vergleich zur turbulenten Strömung geringer aus. Es wurden bereits viele theoretische Untersuchungen durchgeführt, um das Verständnis für diese Filmströmung und ihre Wellenbildung noch weiter zu verbessern. Jedoch konnte bisher keine ausreichend zufriedenstellende analytische Beschreibung der tatsächlich auftretenden Transportvorgänge aufgestellt werden, um die Auswirkungen des Stofftransportes aufgrund der Wellenbildung exakt zu beschreiben [ 11].

Dennoch wurden mathematische Modelle entwickelt, die mit den Messdaten von einigen Stoffsystemen eine gute Übereinstimmung vorweisen. Für Wasser haben etwa Roberts

und Chang im Jahr 2000 ein Modell entwickelt, um die den Stofftransport mit Berücksichtigung der Filmwellen zu beschreiben. Ihr Modell korreliert dabei sehr gut mit den Messdaten, wobei sie einen maximalen Stofftransport bei einer Reynolds-Zahl von 40 ermittelt haben [ 13]. Ebenfalls für Wasser haben Park und Nosoko die Wellendynamik der Strömung eines Fallfilmes untersucht. Dabei fanden sie heraus, dass bei Reynolds-Zahlen kleiner als 40 2D-Wellen und bei Reynolds-Zahlen größer 40 hufeisenförmige Wellen mit Kapillarwellen vor dem Wellenberg auftreten (siehe **Error! Reference source not found.**) [ 14].

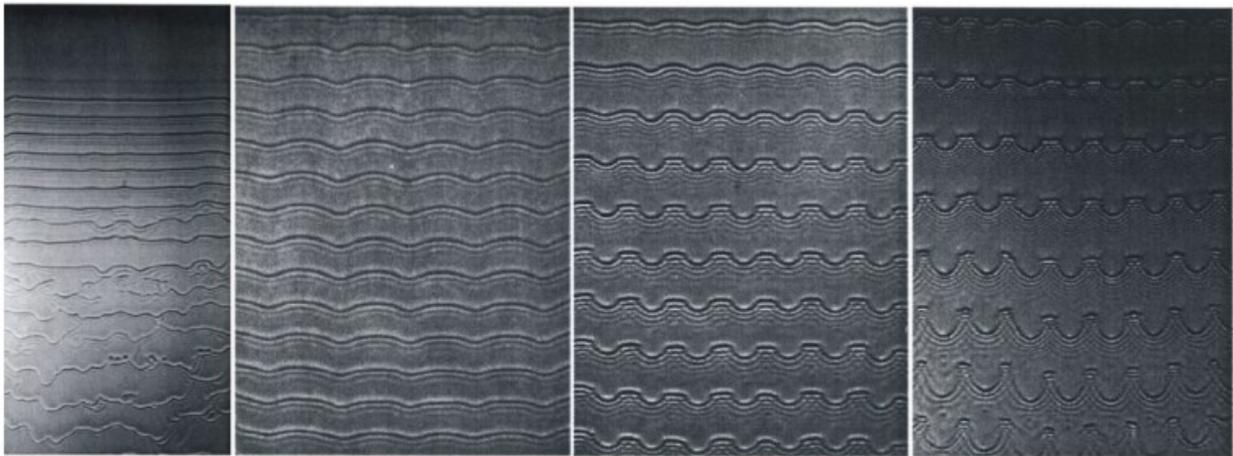


Abbildung 4 - Wasserfallfilme ohne und mit pulsierter Strömung (von links nach rechts): natürlich  $Re= 32$ ;  $Re= 20,9$  &  $\omega= 19$  Hz;  $Re= 40,8$  &  $\omega= 19,1$  Hz;  $Re= 59,3$  &  $\omega= 17$  Hz

### 1.3 Einfluss von Mikrostrukturen auf die Rieselfilmbildung

Für Trennoperationen der thermischen Verfahrenstechnik wie Rektifikation oder Absorption werden für die Erreichung eines hohen Trenngrades Packungskolonnen eingesetzt. Da diese Operationen einen hohen Energiebedarf aufweisen, kommen entweder Schüttungen aus regellos verteilten Füllkörpern oder strukturierte Packungen zum Einsatz. Mit Hilfe von strukturierten Packungen kann der hohe Energiebedarf der Trennoperationen gesenkt werden [ 11]. Packungen werden für jeden Anwendungsfall in ihrer Ausführung und den eingesetzten Materialien optimiert (siehe Abbildung 5).

## Kapitel 1 - Grundlagen von Rieselfilmen

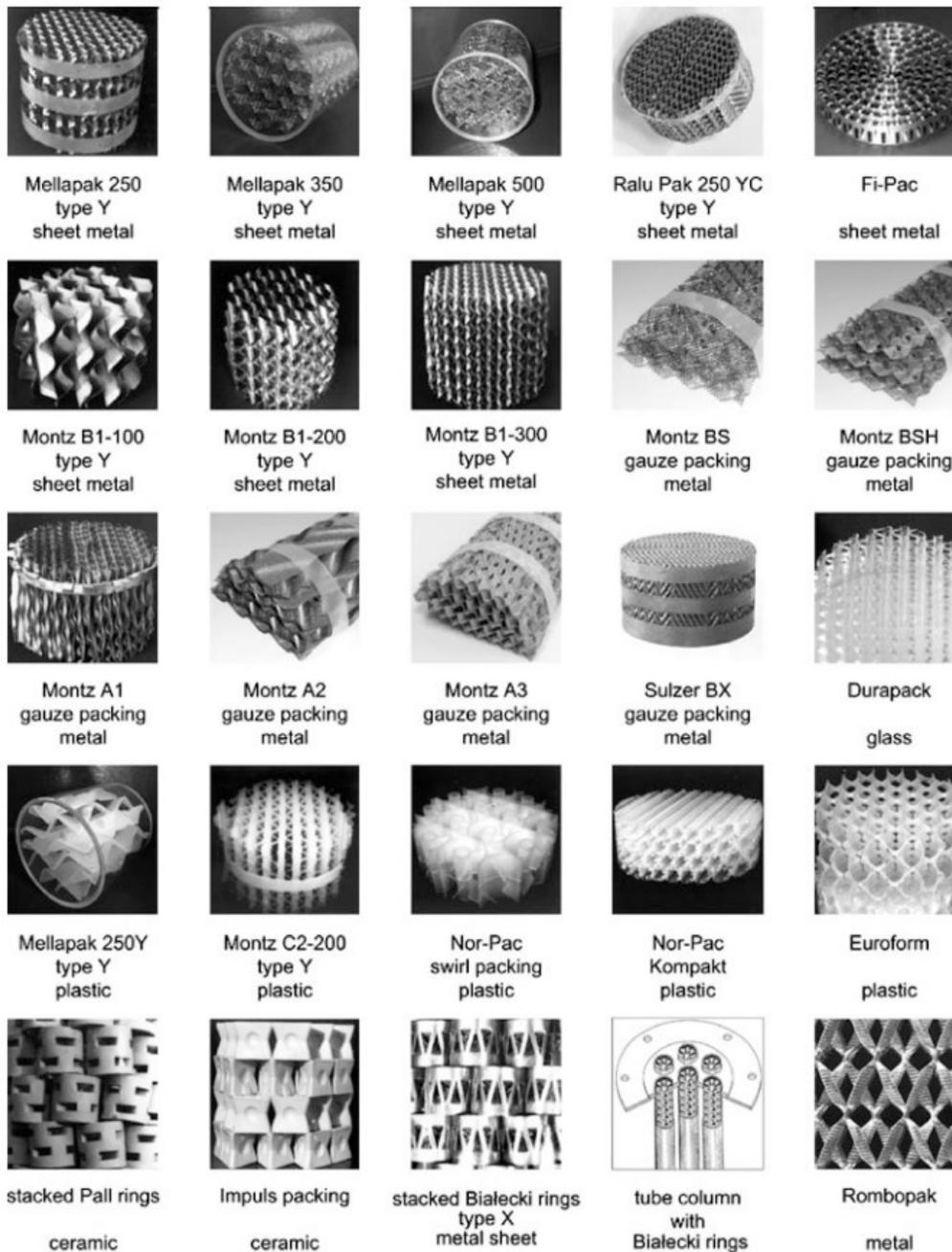


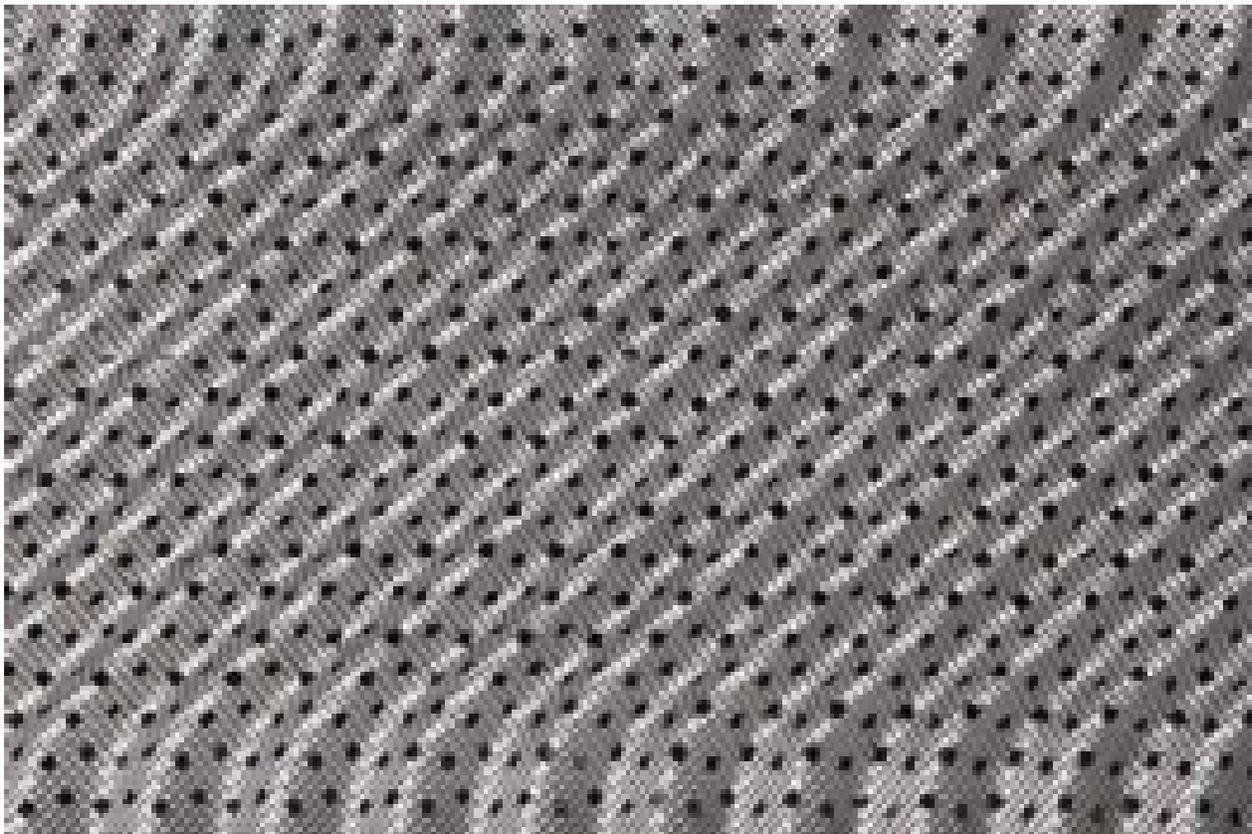
Abbildung 5 - Typische Bauformen von technischen Packungen [ 11]

Packungen bestehen zumeist aus Metall und Kunststoff, wobei bei Prozessen mit hohen Temperaturen und gleichzeitig hohen Korrosionspotential auch Packungen aus Keramik zum Einsatz kommen können. Packungsmaterialien aus Metall kommen in Prozessen zur

## Kapitel 1 - Grundlagen von Rieselfilmen

Anwendung in denen vorwiegend geringe Berieselungsdichten und hohe Gasbelastungen erforderlich sind. Vakuumdestillationen und –rektifikationen können als Beispiele genannt werden. Wenn die Einsatzbedingungen hinsichtlich der Temperatur es zulassen, können hierfür auch Kunststoffpackungen eingesetzt werden. Ansonsten kommen Packungen aus Kunststoff meist bei Prozessen mit größeren Berieselungsdichten zum Einsatz, wie etwa bei Rauchgaswäschern und Strippern.

Neben Makrostrukturen besitzen strukturierte Packungen auch zusätzlich Mikrostrukturen (siehe Abbildung 6 für eine detaillierte Ansicht einer strukturierten Packung).



**Abbildung 6 - Strukturierte Metallpackung „RMP S250Y“ der Firma RVT PE in detaillierter Ansicht [ 15]**

Makrostrukturen dienen der Beeinflussung der Gasstromführung zur Regelung des Kolonnendruckverlustes und zur Flüssigkeitsverteilung [ 16, 17]. Mikrostrukturen finden hingegen zur Beeinflussung der Benetzungsvorgänge und der Flüssigkeitsdurchmischung Einsatz [ 18]. Die Mikrostruktur hat daher die Aufgabe den

Flüssigkeitsfilm zu durchmischen, zu verteilen und somit eine ausreichende Benetzung der Oberfläche zu gewährleisten. Es trägt somit zur Optimierung des Stoffaustausches zwischen Gas- und Flüssigphase bei. Daher sind die Untersuchungen von verschiedenen Mikrostrukturen und deren Auswirkung auf die vollständige Bildung eines Rieselfilmes von großer Bedeutung. Martin Kohrt [ 19] hat in diesem Zusammenhang einen ausführlichen Überblick über Mikrostrukturen im Detail und über die bisherige Literatur von experimentellen und theoretischen Studien bezüglich der Fluidodynamik und dem Stofftransport bei Filmströmungen auf Mikrostrukturen gegeben. Da jedoch das Ziel dieser Arbeit der Bau eines Versuchsstandes zur Untersuchung von Rieselfilmen mit unterschiedlichen Stoffsystemen auf unterschiedlichen Strukturoberflächen ist, sollen hier im Folgenden dennoch die Mikrostrukturen zusammenfassend erläutert werden. Anschließend werden im Kapitel 1.3.1 die bisherigen experimentellen Untersuchungen anhand von Mikrostrukturen hinsichtlich von Fluidodynamik ebenfalls zusammenfassend dargelegt.

Die Filmdicke  $\delta_f$  eines Rieselfilms bewegt sich in den meisten technischen Anwendungen im Bereich von 0,1 bis 1 mm. Im Vergleich liegen Mikrostrukturen zwischen 10-1000  $\mu\text{m}$ , weshalb diese Strukturen auch den größten Einfluss auf die Benetzung haben. Mikrostrukturen können prinzipiell in zwei- und dreidimensionale Typen eingeteilt werden, wobei beide in der Realität dreidimensionale Körper sind. Die Unterschiede zwischen 2D- und 3D-Strukturen bestehen darin, dass 2D-Typen mathematisch bereits mit zwei Koordinaten beschreibbar sind. Weiters kann bei zweidimensionalen Typen die Flüssigkeit nur in eine Richtung strömen wohingegen sie bei 3D-Typen in zwei Strömungsrichtungen fließen kann. Folglich kann bei 2D-Typen ein zweidimensionales und bei 3D-Typen ein dreidimensionales Geschwindigkeitsfeld beschrieben werden [ 19, 20]. Diese zwei Typen lassen sich je nach technischem Anwendungsgebiet noch weiter unterteilen. So werden 2D-Typen mit longitudinaler Anströmung oder Mischformen etwa bei Rohrbündelwärmeübertragern oder bei Fallfilmverdampfern eingesetzt, da diese den Wärme- und Stofftransport innerhalb von Rohren begünstigen. Üblicherweise werden für

Packungskolonnen Packungen mit zweidimensionalem Typ und transversaler Anströmung oder dreidimensionalem Typ mit Pyramidenform verwendet.

### 1.3.1 Bisherige experimentelle Untersuchungen von strukturierten Packungen

Bisherige experimentelle Untersuchungen wurden entweder anhand von Modellstrukturen oder unter Verwendung von realen Packungsmaterialien durchgeführt. In diesem Kapitel soll lediglich auf die experimentellen Untersuchungen mit realen Packungsmaterialien hinsichtlich der Fluidodynamik eingegangen werden. Zum Vergleich werden jedoch auch jene Arbeiten mit einbezogen, welche sich experimentell mit der Fluidodynamik auf Modellstrukturen befasst haben. Zunächst soll mit Hilfe einer Tabelle ein Überblick über die bisherigen Forschungsarbeiten im Hinblick von Untersuchungen anhand von Platten-Geometrien gegeben werden.

Tabelle 2 - Bisherige Untersuchungen auf 2D-Mikrostrukturen hinsichtlich der Fluidynamik [ 19]

Autoren der Publikationen	Struktur der Packungen			
	Geometrie	Modellstruktur	Packungsmat.	
Davies und Warner [28]	Rippen	x		
Davies und Lozano [29]		x		
Argyriadi und andere [22]		x		
Zhao und Cerro [21]	Wellen	x	x	
Shetty und Cerro [30]		x		
Shetty und Cerro [31]		x		
Wierschem und andere [34]		x		
Scholle und andere [35]		x		
Wierschem und andere [32]		x		
Wierschem und andere [33]		x		
Ataki [36]				x
Ataki und andere [37]				x
Paschke [10]				x
Kohrt [19]			x	

Tabelle 2 zeigt jene Publikationen, die sich mit experimentellen Versuchen auf Modellstrukturen und auf Packungsmaterialien mit zweidimensionaler Struktur befasst haben. Es ist daraus ersichtlich, dass ein Großteil der Arbeiten die periodisch

angeordneten Wellen auf Modellstrukturen untersucht hat. Bei dieser Geometrie sind auch die einzigen wenigen Versuche mit realen Packungsmaterialien vorgenommen worden. Jene Forschungsarbeiten, welche mit dreidimensionalen Strukturen gearbeitet haben, werden in folgender Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3 - Bisherige Untersuchungen auf 3D-Mikrostrukturen hinsichtlich der Fluidodynamik [ 19]

Autoren der Publikationen	Struktur der Packungen		
	Geometrie	Modellstruktur	Packungsmat.
Dressaire und andere [38]	Zylinder	x	
Paschke [10]	Tetraeder		x
Kohrt [19]	Pyramiden		x

Aus beiden Tabellen geht hervor, dass Untersuchungen anhand von Modellstrukturen dominiert haben. Das Interesse für die Fluidodynamik auf realen Packungsmaterialien auf 2D- als auch auf 3D-Strukturen ist erst in den letzten Jahren gestiegen.

Zhao und Cerro haben bereits Anfang der 90er Jahre Untersuchungen anhand von Modellstrukturen durchgeführt [ 21]. Weiters haben sie angemerkt, dass auch zukünftige Untersuchungen den Eigenschaften von Filmströmungen anhand von realen strukturierten Packungen gewidmet werden sollte. Das und ihre gewonnenen Erkenntnisse sind mitunter Gründe weshalb ihre Forschungstätigkeiten als Pionierarbeit gelten. In ihrer Arbeit haben sie die Filmdicken und Geschwindigkeiten im Bereich kleiner Reynolds-Zahlen auf zweidimensionalen strukturierten Platten anhand von Experimenten untersucht. Als Stoffsysteme sind hierbei Silikonöl, Glycerin und verschiedene Wasser-Glycerin-Mischungen eingesetzt worden. Ein Verhältnis aus Nußelt-Filmdicke  $\delta_N$  und der Amplitude  $A_S$  dient hierbei als charakteristischer Parameter zur Bewertung des Filmes aufgrund seiner Anpassung an die Platte und die sich einstellenden Strömungsbedingungen [ 21]:

$$\delta^* = \frac{\delta_N}{A_S} \quad (6)$$

Für kleine Reynolds-Zahlen lassen sich nun folgende Eigenschaften bewerten [ 21]:

- $\delta^* < 0,1$ : Die Strömungsbedingungen gleichen denen auf einer glatten Oberfläche und der Film zeigt eine gute Anpassung an die Platte.
- $0,1 \leq \delta^* < 1$ : In diesem Bereich treten Effekte auf, welche sich dadurch auszeichnen, dass sich die freie Filmoberfläche der Periode des festen Untergrundes anpasst. Es können jedoch größere Variationen in den Filmdicken auftreten. Daraus folgt, dass es im Vergleich zu glatten Oberflächen eine Vielzahl von möglichen Konturen der Filme bei Verwendung von strukturierten Oberflächen gibt.
- $\delta^* \geq 1$ : Der Film erscheint annähernd glatt.

Die gefundenen Erkenntnisse von Zhao und Cerro des Effektes, dass sich die freie Filmoberfläche bei bestimmten Bedingungen an die strukturierte Oberfläche anpassen, haben ebenfalls Argyriadi, Vlachogiannis und Bontozoglou bei ihren Untersuchungen festgestellt [ 22], indem sie die Filmdickenverteilung über eine gerippte Modellstruktur bei unterschiedlichen Plattenneigungswinkeln gemessen haben. Dabei konnten sie in einem Reynolds-Zahl-Bereich von 10 bis 450 eine Strömungsstabilisierung feststellen, die dazu führt, dass sich die freie Oberfläche der Wellenlänge der Rippen angepasst hat [ 22].

## 2 Recherche über bestehende Versuchsanlagen

Eine umfangreiche Literaturrecherche wurde als Grundlage für die Konstruktion der Versuchsanlage durchgeführt. Hierfür wurden Forschungsarbeiten betrachtet, welche experimentelle Versuche anhand von geneigten Platten untersuchten. Die Recherche fokussierte sich auf das verwendete Stoffsystem, die verwendete Messmethode und den prinzipiellen Aufbau der jeweilig betrachteten Arbeit. Weiters wurde noch darauf geachtet, ob der Versuchsstand eine entsprechende Variabilität beziehungsweise Anpassungsfähigkeit wichtiger Einflussparameter wie z.B., Änderungen des Neigungswinkels  $\alpha$  der Platte, des untersuchten Plattenmaterials und damit eingeschlossene Veränderungen der Oberfläche im Hinblick auf Mikro- und Makrostrukturen und der Transparenz der Platte zulässt. In den nachfolgenden Abschnitten werden nun jene Arbeiten vorgestellt, welche den genannten Kriterien entsprechen beziehungsweise nützliche Erkenntnisse für die Konstruktion und den Bau des Versuchsstandes geliefert haben. Zum Zwecke der Übersichtlichkeit gibt Tabelle 4 einen kurzen Einblick in diese Forschungsarbeiten und ermöglicht die einzelnen Eckdaten der Arbeiten miteinander zu vergleichen. Aufgrund der Zweckmäßigkeit sind die Namen der jeweilig verwendeten Messmethoden nur in abgekürzter Form in die Tabelle eingetragen. Die vollständigen Bezeichnungen und eine Erklärung bezüglich der Funktionsweise können in den einzelnen Arbeiten nachgelesen werden.

## Kapitel 2 - Recherche über bestehende Versuchsanlagen

Tabelle 4 - Übersicht der Recherche

Autor	Kevin Leslie Murray Moran [23]	Faruk Al-Sibai [7]
<b>Ziel</b>	Hydrodynamische Charakteristika, (Filmdicke, -geschwindigkeit, Geschwindigkeitsprofil und Wandscherkräfte)	Hydrodynamik und Wärmetransport bei untersch. $\alpha$ und Filmdicken
<b>Stoffsystem</b>	Silikonöl mit photochromen Farbstoff	Silikonöle untersch. Viskosität mit Tracerpartikeln
<b>Messmethode</b>	Photochrome Farbstoff-aktivierung (PDA)	Geschwindigkeit: PIV Filmdicke: Fluoreszenz-Intensitäts-Verfahren
<b>Versuchsaufbau</b>	$\alpha = 45^\circ$ , Aufgabe mittels Überlaufwehr, Modellstruktur	$\alpha = 13^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ Aufgabe mittels Überlaufwehr, Modellstruktur

Autor	Ilja Ausner [2]	Georg Friedrich Dietze [24]
<b>Ziel</b>	Strömungsvorgänge bei zweiphasigen Filmströmungen	Untersuchung der Strömungsablösung laminarer Filme
<b>Stoffsystem</b>	Wasser & Toluol mit Keramik-Tracerpartikel	Silikonöl mit Tracerpartikeln
<b>Messmethode</b>	Geschwindigkeit: PIV Filmdicke: LIF	Geschwindigkeit: PIV & LDV Filmdicke: CCI
<b>Versuchsaufbau</b>	$\alpha = 45^\circ$ & $60^\circ$ , Aufgabe mittels Überlaufwehr oder zwei Aufgaberohren, Modellstruktur aber untersch. Platten möglich	$\alpha = 35^\circ$ , Aufgabe mittels Überlaufwehr, Modellstruktur

Autor	Steve Paschke [10]	Martin Kohrt [19]
<b>Ziel</b>	Filmströmungen auf transparenten & nicht-transparenten Oberflächen	Untersuchung des Einflusses von Mikrostrukturen auf Stofftransport
<b>Stoffsystem</b>	Wasser-Glycerin-Gemisch, Isooktan, n-Hexan, Silikonöl	Silikonöle untersch. Viskosität mit Tracerpartikeln (PIV) bzw. fluoreszentem Farbstoff (LIF)
<b>Messmethode</b>	PIV & $\mu$ PIV	Geschwindigkeit: $\mu$ PIV Filmdicke: LIF Farbfaden- und Benetzungsversuch
<b>Versuchsaufbau</b>	$\alpha = 45^\circ$ & $60^\circ$ , Aufgabe mittels Überlaufwehr oder Aufgaberohr, Packungsmaterialien	$\alpha = 60^\circ$ , Aufgabe mittels Überlaufwehr, Packungsmaterialien

## **2.1 Kevin Leslie Murray Moran**

### **Zielsetzung und Versuchsstand**

Moran hat in dieser Arbeit die hydrodynamischen Charakteristika von laminaren Filmströmungen auf einer geneigten Platte untersucht. Dabei wurden Filmdicken- und Geschwindigkeitsmessungen in einem Strömungsbereich von  $Re = 11$  bis  $Re = 220$  durchgeführt und des Weiteren betrachtet Moran ebenfalls das Geschwindigkeitsprofil, sowie die Wandscherkräfte näher. Diese Untersuchungen wurden anhand eines Rieselfilmes vorgenommen, welcher aufgrund der Schwerkraft über eine um  $45^\circ$  gegenüber der Horizontalen geneigten Platten fließt. Abbildung 7 zeigt den schematischen Aufbau der Versuchsanlage sowie folgende verwendete Bestandteile der Anlage:

- Aufgabe-, Auffang- und Pufferbehälter
- Platte
- Flüssigkeitspumpe
- Zwei Schwebekörper-Durchflussmesser
- Filter für Flüssigkeit
- Thermometer
- Komponenten für die PDA-Messung

Die Flüssigkeit wurde während der Messung im Kreis geführt. Diese wird in den Aufgabebehälter aufgegeben und gelangt über einen Überlaufwehr auf die Platte. Auf der Platte bildet sich dann der zu untersuchende Rieselfilm und gelangt dann in den Auffangbehälter. Mittels einer Flüssigkeitspumpe wird die Flüssigkeit dann in den Pufferbehälter gefördert, wobei sie mit Hilfe eines Filters von Fremdstoffen gereinigt wird. Der Pufferbehälter stellt sicher, dass die Pumpe niemals trocken läuft, wobei er gleichzeitig wie der Aufgabebehälter auch als Relaxationsbehälter für die Flüssigkeit dient. Vom Pufferbehälter wird die Flüssigkeit wieder in den Aufgabebehälter aufgegeben, wobei vorher der Durchfluss mittels eines Schwebekörper-Durchflussmessers gemessen wird. Je nach eingestelltem Volumenstrom der Flüssigkeitspumpe, und damit höherer

## Kapitel 2 - Recherche über bestehende Versuchsanlagen

oder niedriger Turbulenz des Filmes, wird dabei entweder der Durchflussmesser für niedrige Volumenströme oder jener für höhere verwendet. Für die Einhaltung einer gleichbleibenden Temperatur und dem Einstellen einer konstanten, stabilen Filmströmung während der Messungen wird dieser Kreislauf einige Minuten laufen gelassen. Die Temperaturmessung erfolgt dabei im Aufgabeebehälter [ 23].

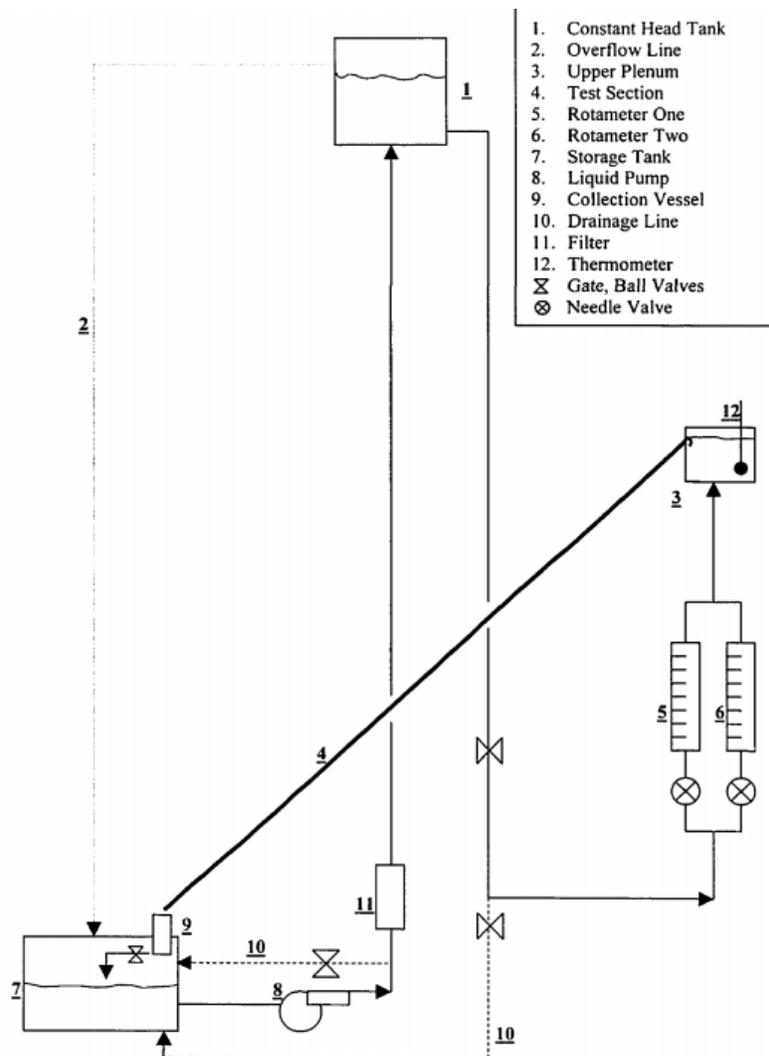


Abbildung 7 - Schematischer Versuchsaufbau, Moran [ 23]

### ***Stoffsystem und verwendetes Messsystem***

Das Stoffsystem, das bei Moran zur Anwendung kam, ist ein von Dow Corning hergestelltes Silikonöl mit der Bezeichnung „Silicon Fluid 200“. Es wurde aufgrund seiner hohen Viskosität und seiner günstigen Eigenschaften ausgesucht. Darunter zählen etwa, dass es nicht mit seiner Umgebung reagiert, über einen geringen Dampfdruck und hohe Temperaturbeständigkeit verfügt. Außerdem erlaubt es eine einfache Handhabbarkeit, da es weder toxisch ist noch ein hohes Flammpotential besitzt. Es ist eine organische, farblose Flüssigkeit, welche transparent ist und sich gut für die photochrome Farbstoffaktivierung, die ausgewählte Messmethode, eignet. Die photochrome Farbstoffaktivierung (photochromic dye activation technique, PDA). Der verwendete Farbstoff 2-(2,4-dinitro-benzyl)-pyridine wird dem Stoffsystem beigemischt und zur Untersuchung der Filmcharakteristika mit ultraviolettem Licht bestrahlt. Durch die Bestrahlung mit dem hochenergetischen Licht wird eine photochromatische Reaktion ausgelöst, die bewirkt, dass sich der Farbstoff im Stoffsystem auflöst und färbige Spuren hinterlässt. Diese werden dann mit einer Serie von zeitlich abgestimmten Fotoaufnahmen aufgezeichnet und erlauben die Charakteristika des Films auszuwerten [ 23].

## ***2.2 Faruk Al-Sibai***

### ***Zielsetzung und Versuchsstand***

In seiner Arbeit steht die Untersuchung der Hydrodynamik und des Wärmetransportes von Rieselfilmströmungen auf unterschiedlich stark geneigten Oberflächen im Mittelpunkt. Hierbei hat Al-Sibai das Verständnis über die Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften des Rieselfilmes, wie Filmschichtdicke und Strömungsgeschwindigkeit, mit der Filmdynamik und des Wärmeaustausches vorangetrieben. Für diesen Zweck wurden zwei Versuchsanlagen mit unterschiedlichen Rieselfilmstrecken aufgebaut (siehe Abbildung 8) [ 7].

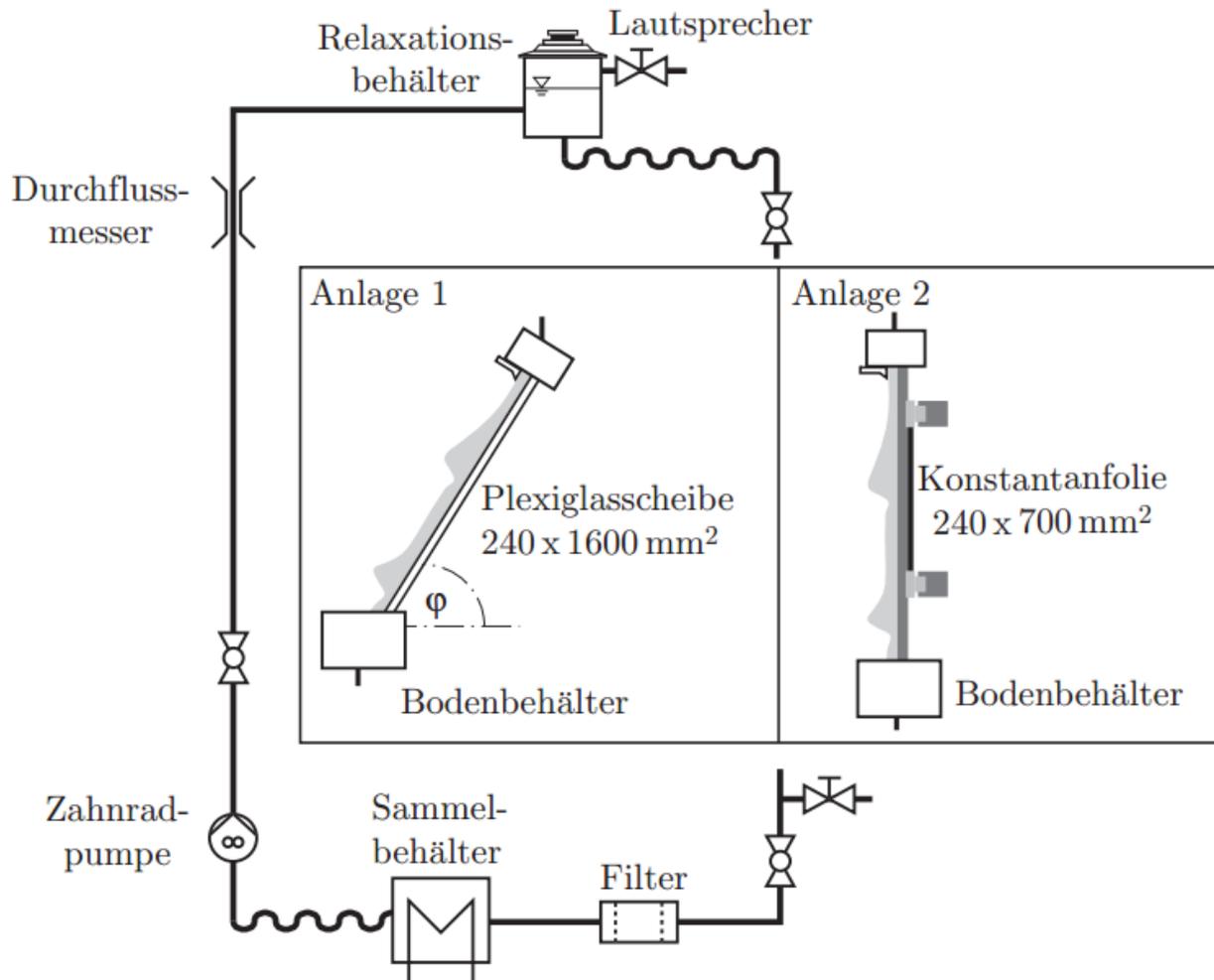


Abbildung 8 - Schematischer Versuchsaufbau, Al-Sibai [ 7]

Eine Anlage wurde für die Filmgeschwindigkeitsmessungen konzipiert und die andere für die Messung des Wärmetransportes mit Hilfe einer Beheizung des Filmes. Die beiden Anlagen unterscheiden sich ansonsten nur marginal. Da jedoch der zu bauende Versuchsstand zur Untersuchung des Geschwindigkeitsprofils dienen soll, wird hier dennoch nur die erste Anlage zur Messung der Filmgeschwindigkeit näher erläutert. Folgende Komponenten wurden für den Versuchsaufbau verwendet:

- Filmaufgabebehälter, Bodenbehälter, Sammelbehälter, Relaxationsbehälter
- Lautsprecher im Deckel des Relaxationsbehälters

## Kapitel 2 - Recherche über bestehende Versuchsanlagen

---

- Zahnradpumpe für die Förderung der Flüssigkeit
- Feinfilter zur Reinigung der Flüssigkeit
- Ovalraddurchflussmesser
- Platte aus Acrylglas
- Messsystemkomponenten für den jeweiligen Messvorgang

Der geschlossene Kreislauf der Flüssigkeit wird durch die Zahnradpumpe aufrechterhalten, wobei diese aus dem Bodenbehälter über einen Ovalraddurchflussmesser in den Relaxationsbehälter gelangt. Der Durchflussmesser dient zur Kontrolle und Einhaltung des an der Zahnradpumpe zuvor festgelegten Volumenstromes. Im Relaxationsbehälter sollen kleine Luftbläschen aufsteigen können, was durch eine Verlangsamung der Flüssigkeit bewirkt wird. Ein Lautsprecher wurde im Deckel des Relaxationsbehälters installiert. Mit Hilfe dessen soll auf die Form der Wellen Einfluss genommen werden können, indem der Flüssigkeit periodische Pulse aufgeprägt werden. Das Fluid gelangt dann zur Filmaufgabestelle, welche die Aufgabe hat die gleichmäßige Flüssigkeitsverteilung auf der Messstrecke sicherzustellen und eine anfängliche Filmdicke vorzugeben. Die Spaltweite kann mittels einer Mikrometerschraube zwischen 0,05 und 2 mm variiert werden. Als Platte wurde Acrylglas ausgewählt, welches 240 mm breit und 1600 mm lang war. Nach der Messstrecke gelangt die Flüssigkeit in einen Feinfilter zur Reinigung und in einen Sammelbehälter. Der Sammelbehälter ist mit einer Kupferwendel bestückt, die zur Temperierung der Flüssigkeit dient. Der Versuchsaufbau ist so konstruiert, dass der Neigungswinkel  $\alpha$  der Platte variiert werden kann. Die Versuche mit den unterschiedlich viskosen Silikonölen wurden bei einem Neigungswinkel von  $13^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ , sowie  $90^\circ$  durchgeführt [ 7].

### ***Stoffsystem und verwendetes Messsystem***

Wie auch bei Moran wurde als Versuchsflüssigkeit Silikonöl ausgewählt. Genauer gesagt handelt es sich hierbei um Dimethylsiloxan (DMS). Es eignet sich aufgrund der vielfältigen Variationen der Viskosität und der relativ geringen Abhängigkeit ihrer Zähigkeit von der Temperatur. Es ermöglicht daher eine gründliche Untersuchung der Fluidodynamik. Im speziellen konnte hierbei auf die Zusammenhänge zwischen der Fluidschichtdicke und

den Eigenschaften des verwendeten Fluides eingegangen werden. Al-Sibai hat in seiner Arbeit Silikonöle in einem Bereich von 1,5 bis 100 m<sup>2</sup>/s ( $10^{-6}$ ) untersucht, wobei der untersuchte Reynolds-Zahlen-Bereich von der jeweiligen Viskosität abhängig war. So wurde etwa für eine Viskosität von  $1,5 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s ein Reynolds-Zahl-Bereich von 5 bis 700 und für eine Viskosität von  $20 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s ein Bereich von 4 bis 75 untersucht. Für eine genaue Auflistung der von Al-Sibai eingesetzten Silikonöle und deren Eigenschaften wird auf seine Arbeit verwiesen [ 7]. Für die Messung der Filmschichtdicke hat das Fluoreszenz-Intensitäts-Verfahren Anwendung gefunden. Mit diesem ist es möglich die Dicke und die Welligkeit eines transparenten Fluides zu messen. Hierfür wird die Intensität der angeregten Fluoreszenz auf den Film ermittelt, wobei eine bestimmte Konzentration eines Fluoreszenzindikators in die Versuchsflüssigkeit aufgegeben wird. Hier wurde etwa Cumarin 152a aufgegeben, welches bei Anregung bläulich leuchtet. Die lokale Intensität des Fluoreszenzlichtes ist von mehreren Faktoren abhängig, wie etwa die Intensität der Anregung, der Einfallswinkel und die lokale Schichtdicke. Für die Geschwindigkeitsmessung wurde auf die Particle-Image-Velocimetry-Methode (PIV) zurückgegriffen. Mit dieser ist es möglich zweidimensionale Geschwindigkeitsfelder in Strömungen zu bestimmen. Hierfür sind ein Doppelpuls-Laser und eine Kamera mit einem CCD-Sensor (charge-coupled device, ladungsgekoppeltes Bauteil) notwendig. Der Laser schickt gebündeltes Licht einer bestimmten Wellenlänge mit einer vorgegeben Impulsdauer auf die Messstrecke und belichtet mehrmals in einem zeitlichen Abstand Tracerpartikel, welche der Versuchsflüssigkeit aufgegeben werden. Die Kamera ist auf die Wellenlänge des Lasers abgestimmt und vergleicht zwei zeitlich aufeinander folgende Belichtungsaufnahmen. Dadurch werden die Bewegung der Tracerpartikel und somit das Geschwindigkeitsfeld der Filmströmung erkennbar. Eine Besonderheit bei dem Aufbau von Al-Sibai besteht darin, dass die Filmströmungen über transparente Platten gemessen werden, da die Messung durch die Platte hindurch erfolgt [ 7].

### 2.3 Ilja Ausner

#### Zielsetzung und Versuchsstand

Das Verständnis für die Strömungsvorgänge von zweiphasigen Filmströmungen innerhalb von Packungskolonnen soll verbessert werden, indem Untersuchungen von ein- und zweiphasigen Fluidströmungen anhand von geneigten Platten durchgeführt werden. Mit Hilfe der Messdaten sollen dann einerseits CFD-Simulationen validiert und in weiterer Folge soll anhand der Experimente die Trennleistung von Packungskolonnen erhöht werden. Weiters sollen typische Stoffsysteme bei einer Dreiphasenrektifikation wie etwa Aceton-Toluol-Wasser untersucht werden, um das Verständnis für die Vorgänge wie bei dieser speziellen Anwendung eines organisch-wässrigen Systems weiter voranzutreiben. Für die Untersuchungen wurde ein Versuchsstand entwickelt, welcher schematisch in Abbildung 9 dargestellt ist [ 2].

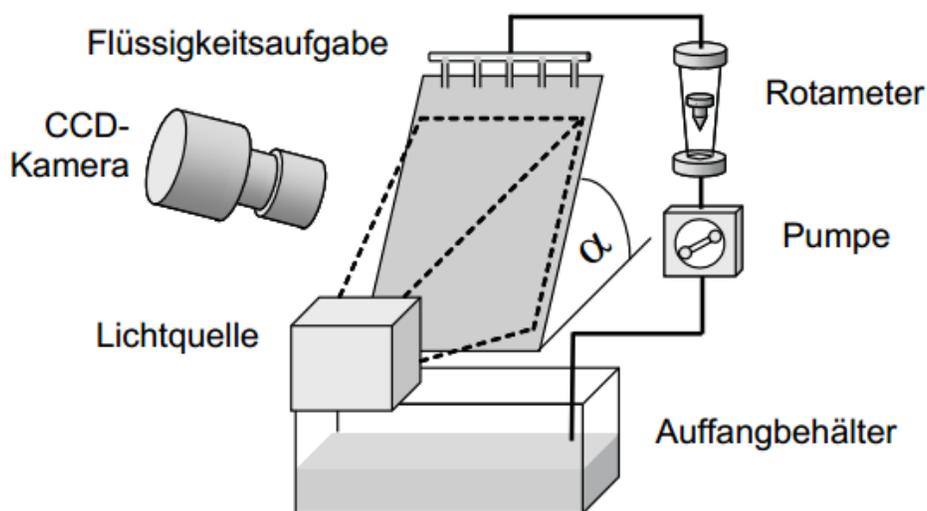


Abbildung 9 - Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus, Ausner [ 2]

Dieser besteht im Grunde genommen aus folgenden Komponenten:

- Edelstahlplatte
- Überlaufwehr in Form eines Behälters oder einem Aufgaberohr

## Kapitel 2 - Recherche über bestehende Versuchsanlagen

---

- Auffangbehälter
- Schlauchpumpe
- Rotameter
- Komponenten für die LIF und die PIV Messungen

Bei der Aufgabe mittels Überlaufwehr kommt ein Behälter zum Einsatz, in den kontinuierlich Flüssigkeit gefördert wird. Sobald ein kritischer Füllstand erreicht wurde, gelangt die Flüssigkeit über einen Wehr auf die Platte. Der Versuchsaufbau mittels Aufgaberohr kann durch die Ergänzung mit einer zweiten Pumpe, eines zweiten Rotameters und eines zweiten Aufgaberohres für die Messungen von zweiphasigen Filmströmungen, also von flüssig-flüssig-gas Strömungen, erweitert werden.

Der Versuchsablauf sieht vor, dass die Versuchsfüssigkeit vom Auffangbehälter mit Hilfe der Schlauchpumpe zur Aufgabe befördert wird. Währenddessen wird mittels eines Rotameters der Volumenstrom gemessen. Die Aufgabe erfolgt entweder per Überlaufwehr oder über ein Aufgaberohr, welches aus Edelstahl besteht. Mit Hilfe des Überlaufwehrs soll sich bereits am Plattenanfang ein geschlossener Rieselfilm bilden können, wohingegen so die Aufgabe einer zweiten Flüssigkeit nur schwer realisierbar ist. Das Aufgaberohr ist quer zur Platte angeordnet und besitzt mehrere Öffnungen, um die Flüssigkeit möglichst über die gesamte Plattenbreite verteilen zu können. Aufgrund dieser Jet-Aufgabe ist jedoch die Anfangsgeschwindigkeit der Flüssigkeit höher, welche die Ausbildung eines vollständig geschlossenen Filmes negativ beeinflusst. Der Neigungswinkel der Platte, welche aus Edelstahl besteht, wird mit Hilfe von Klemmen seitlich fixiert und ist frei wählbar. Jedoch wurden die Versuche nur bei  $45^\circ$  und bei  $60^\circ$  Neigungswinkel durchgeführt. Aufgrund der seitlichen Befestigung der Klemmen ist es möglich unterschiedlich dicke Platten mit und ohne Mikrostruktur einzusetzen [ 2].

### ***Stoffsystem und verwendetes Messsystem***

Als Stoffsystem wird hier Wasser und Toluol verwendet und jeweils einphasig oder als zweiphasige Strömung untersucht. Dieses Stoffsystem wurde aufgrund seiner Unmischbarkeit und seiner häufigen technischen Anwendung in Kolonnen ausgewählt.

Als Messsystem für die Geschwindigkeitsmessung wird die PIV-Methode angewendet. Hierbei kommen Keramikpartikel (ISOSPHERES SG-300B) mit einem Durchmesser von 100  $\mu\text{m}$  als Tracer zur Anwendung. Wiederum sind für diese Messmethodik eine CCD-Kamera, welche senkrecht auf die Platte ausgerichtet ist, und eine pulsierte Belichtung von Nöten. Als Lichtquelle kommt in diesem Fall ein ELMED-Stroboskop zur Anwendung, welches das Strömungsfeld aus horizontaler Richtung direkt von vorne beleuchtet. Die Dickenmessung erfolgt mittels der lichtinduzierten Fluoreszenz (LIF) Methode. Es wird hierbei die Absorptionsfähigkeit von elektromagnetischer Strahlung durch Moleküle ausgenutzt, die diese wiederum abgeben können. Ein Fluoreszenzfarbstoff wird in das Stoffsystem aufgegeben, welches bei Anregung durch eine Lichtquelle die Energie in Form von Licht einer bestimmten Wellenlänge abgibt. Als Farbstoff wurde bei diesen Versuchen Rhodamin B eingesetzt, das ein Absorptionsmaximum bei einer Wellenlänge von 545 nm besitzt, welches genau einer Spektrallinie von Quecksilber entspricht. Wird dieser Fluoreszenzfarbstoff nun mit einem der beiden Versuchsflüssigkeiten vermischt und mit einer Quecksilber-Xenon-Lampe belichtet, so kann in dem belichteten Fluidfilm eine Fluoreszenzintensität detektiert werden. Diese ist sowohl abhängig von der Konzentration des Farbstoffes, als auch von der Schichtdicke des Fluides. Daher kann bei konstanter Farbstoffkonzentration von der Intensität der Fluoreszenz auf die Schichtdicke geschlossen werden [ 2].

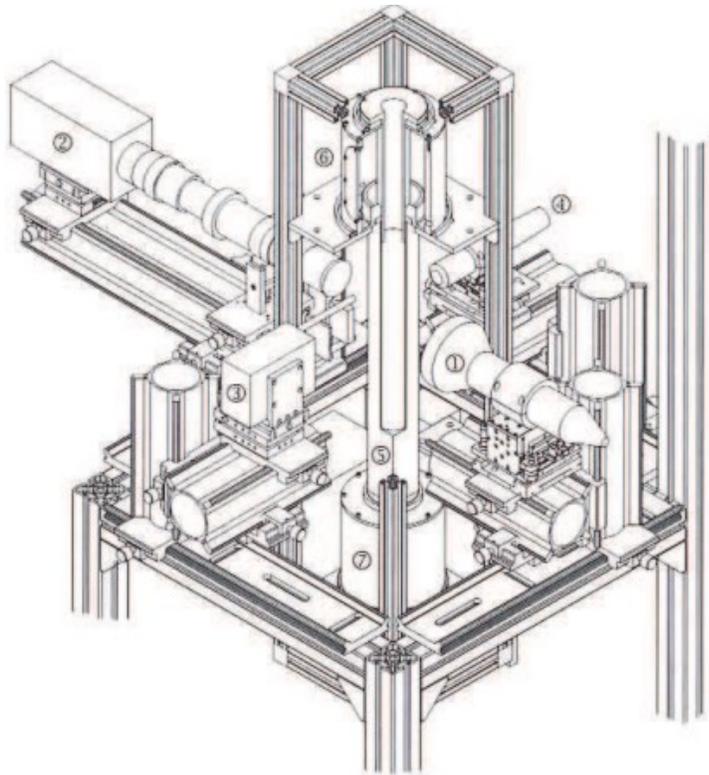
## **2.4 Georg Friedrich Dietze**

### ***Zielsetzung und Versuchsstand***

Dietze untersucht in seiner Arbeit die Strömungsablösung im Kapillarwellenbereich laminarer Rieselfilme. Für seine Versuche hat er sich dabei auf experimentelle und numerische zweidimensionale laminare Rieselfilme und dreidimensionale Simulationen gestützt. Er wollte damit einen wertvollen Beitrag zur Entwicklung von Modellen zur Beschreibung der Wellendynamik solcher Filme leisten, mit seinen experimentellen Messungen numerische Daten verifizieren, um das bisher ungeklärte Phänomen der Strömungsablösung bei Rieselfilmen, erklären zu können. Zur experimentellen Untersuchung der Filmströmung wurden zwei unterschiedliche Testvorrichtungen

## Kapitel 2 - Recherche über bestehende Versuchsanlagen

verwendet. Die erste Vorrichtung dient als der Versuchsstand für die optischen Messungen anhand einer senkrechten Platte auf der eine Fallfilmströmung erzeugt wird (siehe Abbildung 10) [ 24]. Es kommen für die Geschwindigkeitsmessung zwei Methoden zur Anwendung. Zum einen handelt es sich um die bereits erläuterte Particle Image Velocimetry-Methode (PIV) und zum anderen um die Laser Doppler Velocimetry-Methode (LDV). Zur Messung der Filmschichtdicke wird die Confocal Chromatic Imaging-Methode (CCI) verwendet. Die Messsysteme werden im nachfolgenden Abschnitt Stoffsystem und verwendetes Messsystem näher behandelt.

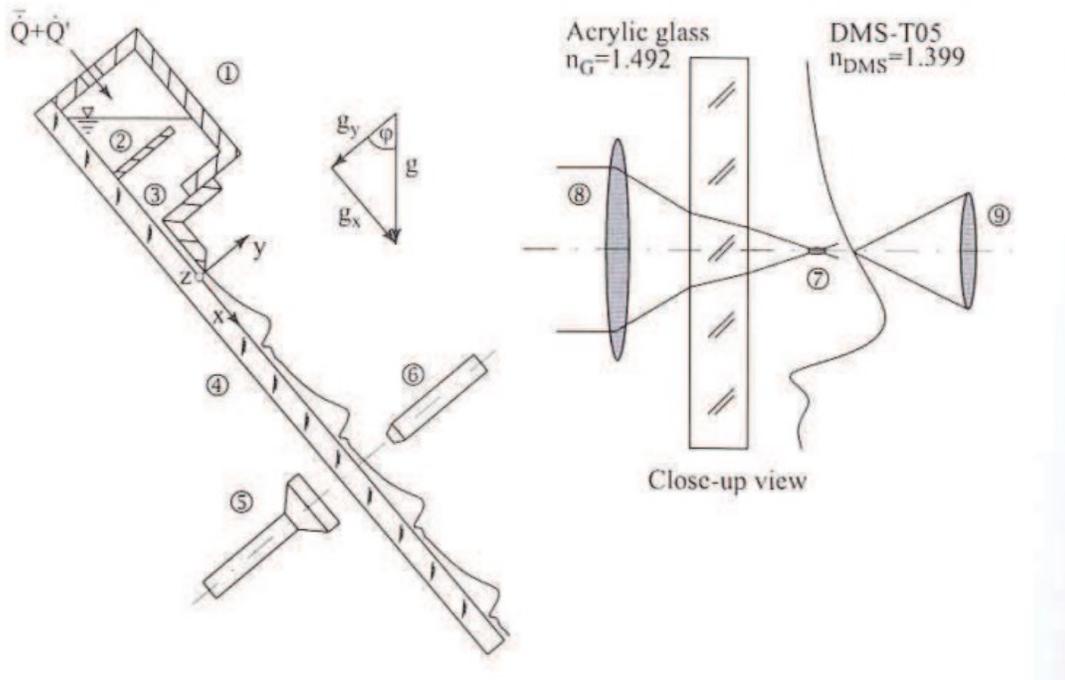


**Abbildung 10 - Versuchsstand für Vermessung von Fallfilmströmung [ 24]**

Mit Hilfe des zweiten Versuchsaufbaus werden Rieselfilmströmungen, also Strömungen anhand von geneigten Platten, untersucht (siehe Abbildung 11). Bei diesem Messaufbau kommt zur Geschwindigkeitsmessung ebenfalls die LDV-Methode und für die Dickenmessung des Filmes die CCI-Methode zum Einsatz. Dadurch, dass bei dieser Vorrichtung nur eine Geschwindigkeitsmessung angewendet wird, sind die Messdaten

## Kapitel 2 - Recherche über bestehende Versuchsanlagen

gegenüber denen der ersten Messvorrichtung weniger akkurat. Dieser zweite Versuchsstand dient daher nur zum Vergleich der Messergebnisse mit denen des ersten Versuchsstandes.



**Abbildung 11 - Schema der Messsystemeinrichtung des zweiten Versuchsaufbaus, Dietze [ 24]**

Obwohl die Fallfilmvorrichtung bei Dietze die Hauptvorrichtung für seine Arbeit darstellt und die Rieselfilmvorrichtung lediglich zum Vergleich der Messdaten dient, wird dennoch der Aufbau des zweiten Versuchsstandes nun im näheren erläutert, da speziell bei diesem Rieselfilme untersucht wurden. Die grundsätzlichen Komponenten, die bei diesem Messaufbau zum Einsatz kommen, sind eine Glasplatte aus Acryl, ein Reservoir-Behälter, welcher zur Aufgabe der Flüssigkeit auf die Platte dient, und eine Zahnradschleuse zur Umwälzung der Versuchsflüssigkeit. Die Aufgabe der Flüssigkeit erfolgt mittels eines Überlaufwehres, welcher in das Reservoir-Konzept integriert ist. Ein Neigungswinkel der Platte von  $35^\circ$  gegenüber der Horizontalen wurde für diesen Versuchsaufbau fixiert [ 24].

### ***Stoffsystem und verwendetes Messsystem***

Dimethylsiloxan wurde auch hier als Stoffsystem verwendet. Es eignet sich hervorragend für Versuche anhand von Filmströmungen. Weiters existieren bereits eine Vielzahl an experimentellen Untersuchungen mit diesem Stoffsystem, weshalb es die Reproduktion von bekannten Messdaten bei bestimmten Rahmenbedingungen erlaubt und sich daher zur Kalibration von Messeinrichtungen eignet. Dietze hat für seine Versuche im Bereich von niedrigen Reynolds-Zahlen ein Silikonöl mit einer Viskosität von etwa  $5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  ausgewählt. Zur Messung der Filmschichtdicke wird die Konfokale chromatische Abstandsmessung bzw. Bildgebung (Confocal Chromatic Imaging, CCI) angewendet. Bei dieser Messmethode werden im Prinzip der Abstand von der Linse bis zur Flüssig-Gas-Grenzschicht und der Abstand bis zur Plattenoberfläche gemessen und miteinander verglichen. Es wird dabei die chromatische Aberration ausgenutzt, welche dazu führt, dass Licht unterschiedlicher Wellenlänge unterschiedlich stark gebrochen wird. Durch diese simple Vorgehensweise kann die Schichtdicke der Filmströmung präzise gemessen werden. Für die Messung der Geschwindigkeit werden dem Stoffsystem Titandioxidpartikel ( $\text{TiO}_2$ ) aufgegeben, welche sowohl für die LDV und die PIV Messung notwendig sind [ 24]. Das Prinzip bei der Laser Doppler Anemometrie (Laser Doppler Velocimetry, LDV) ist, dass mit Hilfe eines Strahlteilers ein Laserstrahl aufgeteilt wird. Die beiden Laserstrahlen kreuzen einander am designierten Messpunkt und erzeugen ein Interferenzmuster. Durchströmt dann die Flüssigkeit mit den Tracerpartikeln den Messpunkt, so verursachen die Partikel eine Streuung. Diese Streusignale werden in einem Photodetektor registriert, wobei eine Proportionalität zwischen der Frequenz des Signals und der Geschwindigkeitskomponente des Partikels besteht [ 25]. Die PIV-Methode wurde bereits im Abschnitt 2.2 beschrieben.

## 2.5 Steve Paschke

### Zielsetzung und Versuchsstand

Das Ziel dieser Arbeit ist die experimentelle Analyse von zweiphasigen Flüssigkeitsströmungen auf geneigten Oberflächen, um die Vorgänge bei Dreiphasenrektifikationen in Packungskolonnen besser beschreiben zu können. Dabei sollen für die Platte nicht nur glatte, sondern auch strukturierte Packungsmaterialien verwendet werden, welche üblicherweise in der Industrie zum Einsatz kommen. Um diese Plattenmaterialien bei den Versuchen einsetzen zu können musste die ausgewählte Geschwindigkeitsmesstechnologie PIV erweitert werden. Aus dieser Bestrebung ist die Micro Particle Image Velocimetry-Methode ( $\mu$ PIV) entstanden, welche es erlaubt auch nicht transparente Platten bei den Messungen einzusetzen, indem die Messung durch die bewegte wellige Flüssigkeitsoberfläche erfolgt [ 10]. Näheres dazu im nachfolgenden Abschnitt Stoffsystem und verwendetes Messsystem. Der für diese Versuche aufgebaute Versuchsstand ist schematisch in Abbildung 12 dargestellt.

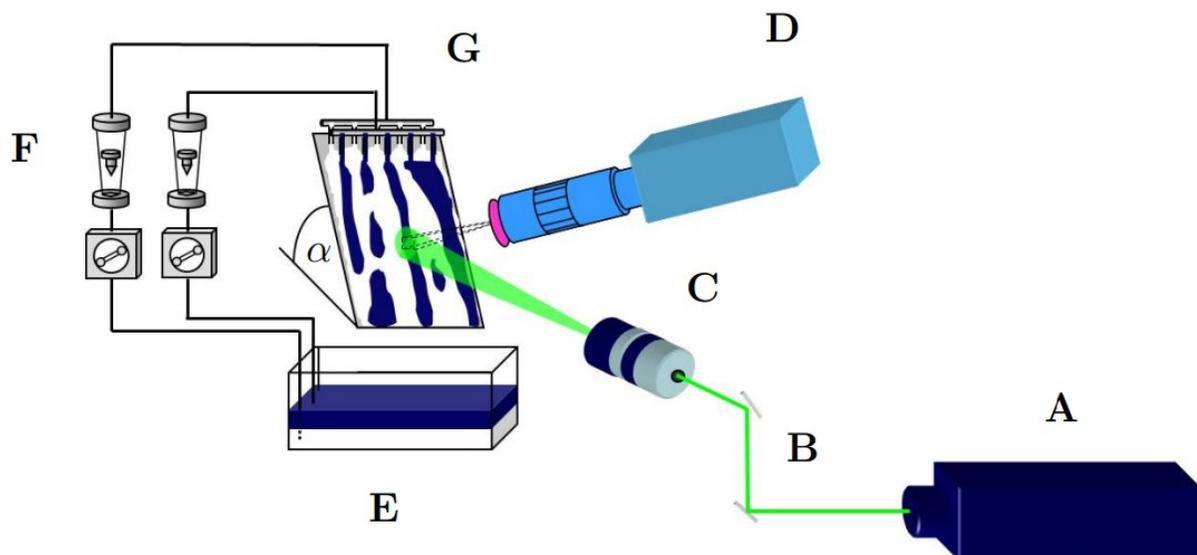
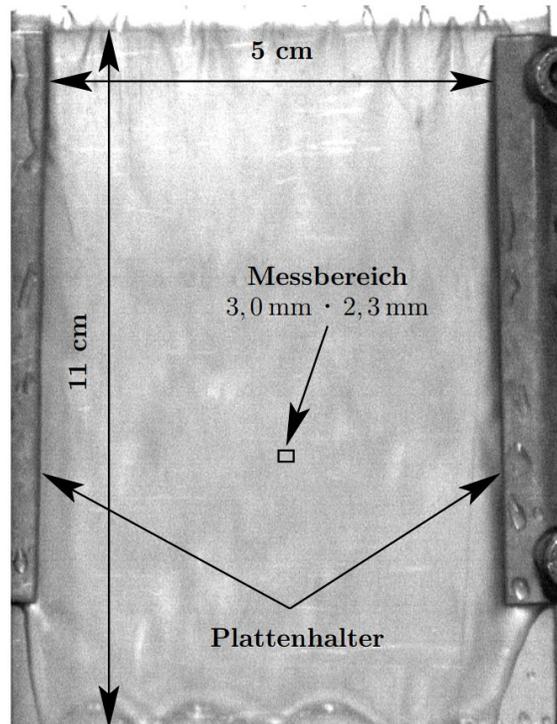


Abbildung 12 - Schema des Versuchsstandes von Paschke [ 10]

Der Versuchsaufbau besteht aus folgenden in Abbildung 12 gezeigten Komponenten:

- A. ND:YAG-Laser
- B. Spiegelsystem
- C. Lichtschnittoptik
- D. CCD-Kamera mit Linearverschieber (H)
- E. Vorlagebehälter
- F. Schlauchpumpen mit Rotameter
- G. Flüssigkeitsaufgabe mittels Aufgaberohr oder Überlaufwehr

Der Laser, die Spiegel, die Lichtschnittoptik und die CCD-Kamera werden genauso wie bei der PIV-Methode auch bei der erweiterten  $\mu$ PIV-Methode für die Geschwindigkeitsmessung benötigt. Der restliche Aufbau ist ähnlich zu den bisher beschriebenen Versuchsständen und hat sich bewährt. Eine Pumpe, in diesem Fall eine Schlauchpumpe, fördert das Stoffsystem vom Vorlagebehälter zur Aufgabestelle. Der Volumenstrom wird mittels Rotameter gemessen und kontrolliert. Die Aufgabe erfolgt je nach Stoffsystem mittels eines Überlaufwehrs, einem Aufgaberohr oder auch zwei Aufgaberohren bei Untersuchung von zwei Flüssigkeiten. Der Neigungswinkel  $\alpha$  der Platte entspricht bei den Versuchen entweder  $45^\circ$  oder  $60^\circ$ . Unterschiedliche Plattenmaterialien kommen bei den Versuchen zum Einsatz, wobei diese sowohl transparent als auch nicht-transparent sind. Wie auch bei den Versuchen von Ilja Ausner (siehe Kapitel 2.3) wird auch hier die Platte mit Hilfe von seitlichen Klammern befestigt, welche es erlauben Platten unterschiedlicher Dicke verwenden zu können [ 10].



**Abbildung 13 - Halterungssystem und Dimension der verwendeten Platte, sowie Größe des Messbereiches [ 10]**

In Abbildung 13 ist dieses Halterungssystem dargestellt, welches im Grunde aus zwei schmalen Metallklammern besteht, welche mit vier Schrauben montiert werden und so die Platte fixieren. Außerdem zeigt die Abbildung die Größe des verwendeten Messbereichs im Vergleich zur Plattendimension. Abbildung 14 zeigt nun den Aufbau der Versuchseinrichtung, wie dieser in der Realität ausgesehen hat. Als Grundgerüst zur Halterung der einzelnen Elemente des Messaufbaus wird ein Aluminium Profil System wie etwa „Cap Alu Profil System“ verwendet.

In Abbildung 14 sind folgende Komponenten dargestellt [ 10]:

- B. Spiegel
- C. Lichtschnittoptik
- D. CCD-Kamera mit Mikroobjektiv und Bandpassfilter
- E. Vorlagebehälter bzw. Denkanter
- F. Schlauchpumpen mit Rotameter

- G. Feedaufgabe
- H. Linearverschieber
- I. Windkessel

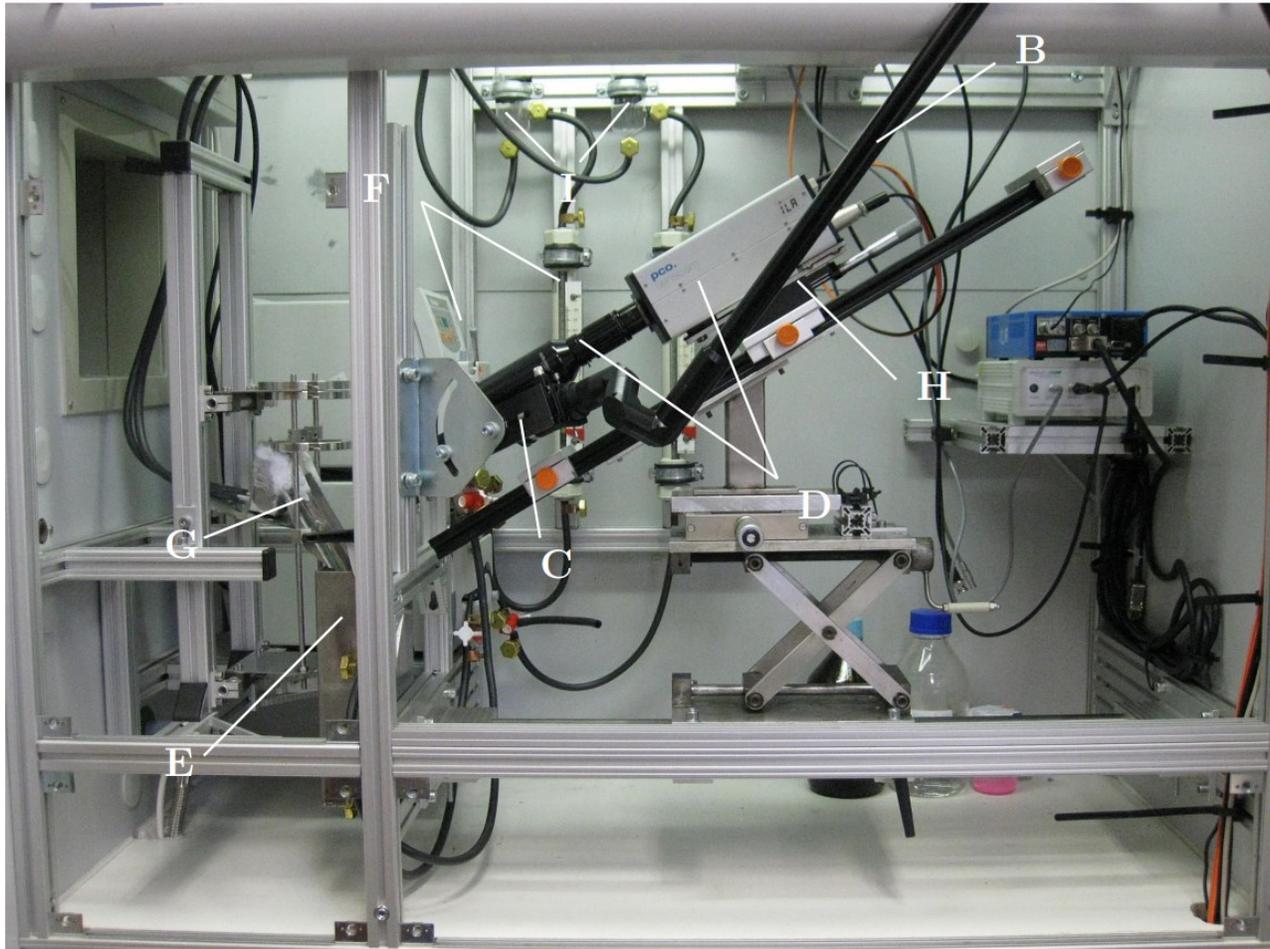


Abbildung 14 - Aufbau des Versuchsstandes von Paschke [ 10]

Um die Fluidodynamik noch konkreter beschreiben zu können, hat Paschke die Einflüsse eines Gasgegenstroms auf die Genauigkeit der Messmethode und auf das Geschwindigkeitsfeld der Flüssigkeit untersucht. Hierfür wird die Versuchsanlage um eine Gegenstrommesszelle erweitert (siehe Abbildung 15) [ 10].

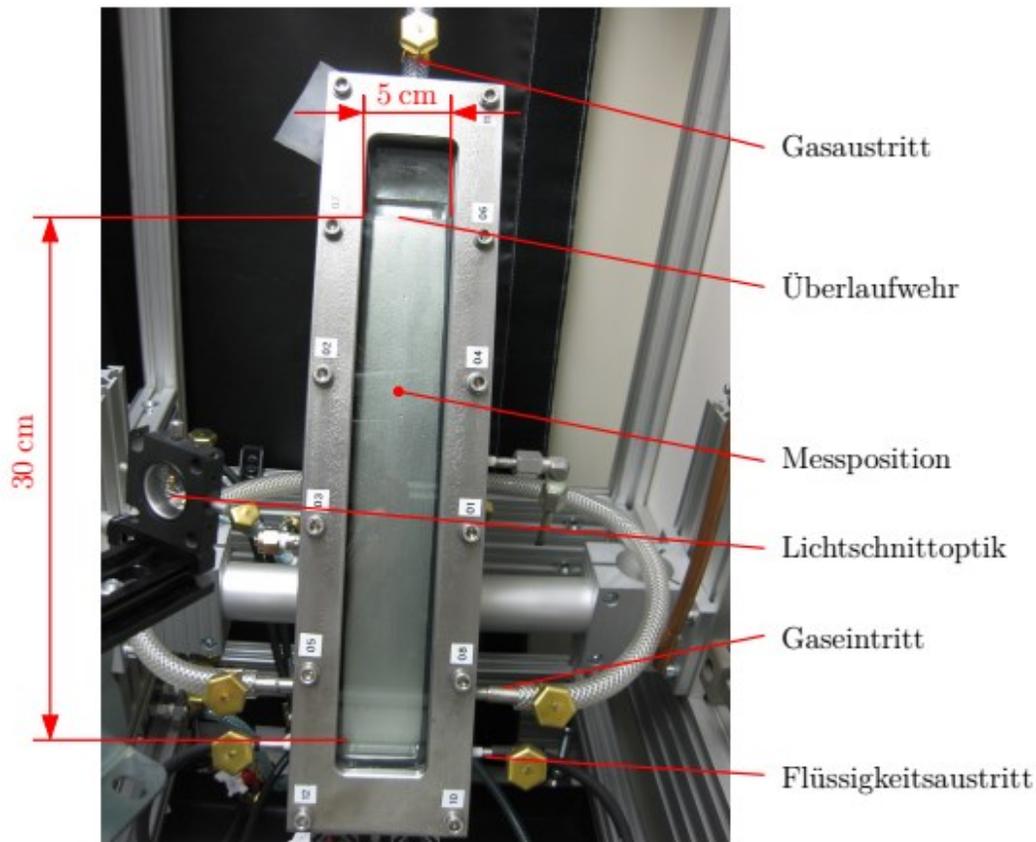


Abbildung 15 – Gegenstrommesszelle [ 10]

### ***Stoffsystem und verwendetes Messsystem***

Mehrere Stoffsysteme werden in Betracht gezogen, wobei hauptsächlich zweiphasige Filmströmungen untersucht werden. Es wird jeweils eine wässrige Phase und eine organische Phase auf die Platte aufgegeben. Die wässrige Phase war hierbei immer ein Gemisch aus Wasser-Glycerin, da mit diesem der Brechungsindex aufgrund des Glycerin-Gehaltes im Wasser eingestellt werden kann. Die wässrige Phase war das einzige Stoffsystem, welches auch einphasig untersucht wurde. Als organische Phase wurde entweder Isooktan, n-Hexan oder Silikonöl (Polydimethylsiloxan, Xiameter® PMX-200 Silicone Fluid der Firma Dow Corning) verwendet. Um die Phasen unabhängig voneinander vermessen zu können, werden der wässrigen Phase hydrophile Partikel und der organischen Phase hydrophobe Partikel zu gegeben. Dies bewirkt, dass sich die

Partikel nur in ihrer Phase lösen. Weiters müssen die Partikel einen unterschiedlichen Durchmesser aufweisen. Für die Messung der Geschwindigkeit der Strömung kommt einerseits die bereits bekannte PIV-Methode, als auch die von Steve Paschke in dieser Arbeit entwickelten  $\mu$ PIV-Methode. Erstere dient jedoch nur zum Vergleich der Messdaten mit der neuen Methode, um diese zu validieren. Der größte Unterschied zur bisherigen Methode ist das bei dieser Methodik direkt durch die Gas-Flüssig-Phasengrenzfläche gemessen werden kann und so auch nicht-transparente Plattenmaterialien eingesetzt werden können [ 10]. Abbildung 16 zeigt die schematische Herangehensweise bei der konventionellen und der neuen Messmethodik, wobei  $\dot{L}$  den Flüssigkeitsstrom und  $\dot{V}$  den Gasstrom darstellt.

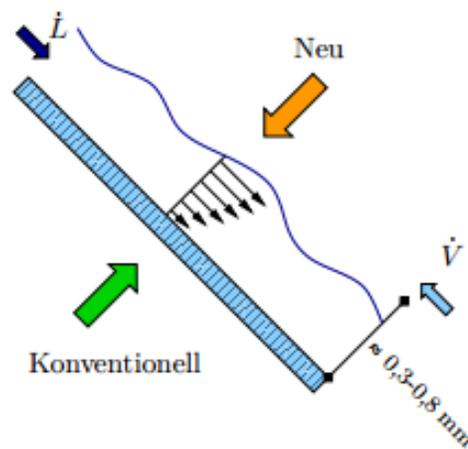


Abbildung 16 - Schematische Herangehensweise bei der konventionellen und der neuen Messmethodik [ 10]

## **2.6 Martin Kohrt**

### ***Zielsetzung und Versuchsstand***

In dieser Forschungsarbeit bestand das Ziel in der Aufklärung des Einflusses von Mikrostrukturen auf den Stofftransport und die Fluidodynamik von Filmströmungen anhand von einer geneigten Platte. Es konnte nämlich bereits gezeigt werden, dass Mikrostrukturen zu einer erheblichen Stofftransportsteigerung von bis zu 100 % führen können [ 26]. Als Ursachen für diese Steigerung wurden eine erhöhte Turbulenz im Film, eine verbesserte Benetzung der verwendeten Oberfläche oder ein erhöhter Flüssigkeitsinhalt genannt, wobei diese Phänomene weder näher untersucht noch nachgewiesen wurden. Mit dieser Arbeit sollen nun die Ursachen für den verbesserten Stofftransport und die ablaufenden Vorgänge innerhalb der Filmströmung bei Verwendung von Materialien mit Mikrostrukturen untersucht werden [ 19]. Hierfür wurde ein Versuchsstand gebaut, welcher für jede der ausgesuchten Messsysteme angepasst werden kann, um so eine erfolgreiche Messdurchführung der unterschiedlichen Messarten zu gewährleisten. Zu diesen gehören etwa Absorptionsmessungen zur Untersuchung des Stofftransportes (siehe Abbildung 17), Filmdickenmessungen nach der LIF-Methode, Geschwindigkeitsmessungen mit der von Paschke entwickelten  $\mu$ PIV-Methode, sowie Farb- und Benetzungstests zur Visualisierung von Stromlinien, Mischungen und Geschwindigkeitsverteilungen. Der Versuchsaufbau für die Absorptionsmessung weist die höchste Komplexität im Vergleich zu den anderen Messaufbauten auf und nimmt eine zentrale Rolle bei den Untersuchungen ein. Das liegt daran, dass mit Hilfe dieses Versuchsstandes direkt die Größe der Einflüsse bei Verwendung von mikrostrukturierten Platten gemessen werden können. Die anderen Messsysteme dienen der weiteren Untersuchung der Vorgänge innerhalb der Filmströmung, um nochmals näher auf die Ursachen des verbesserten Stofftransportes eingehen zu können. Jedoch ist für diese Arbeit der Messaufbau für die Messung der Geschwindigkeit mit Hilfe der  $\mu$ PIV-Methode von größerem Interesse. Daher wird der Aufbau anhand der folgenden Abbildung 18 erläutert [ 19].

## Kapitel 2 - Recherche über bestehende Versuchsanlagen

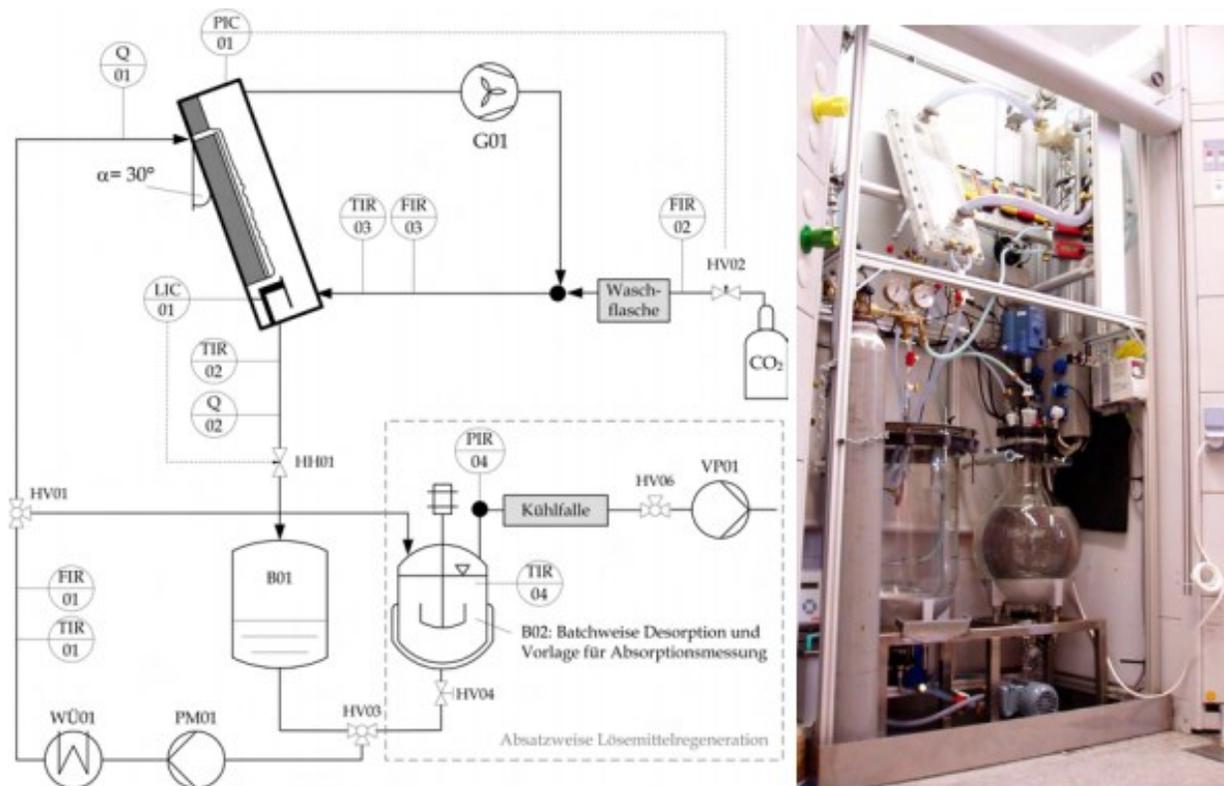


Abbildung 17 - Aufbau für Absorptionsmessung [ 19]

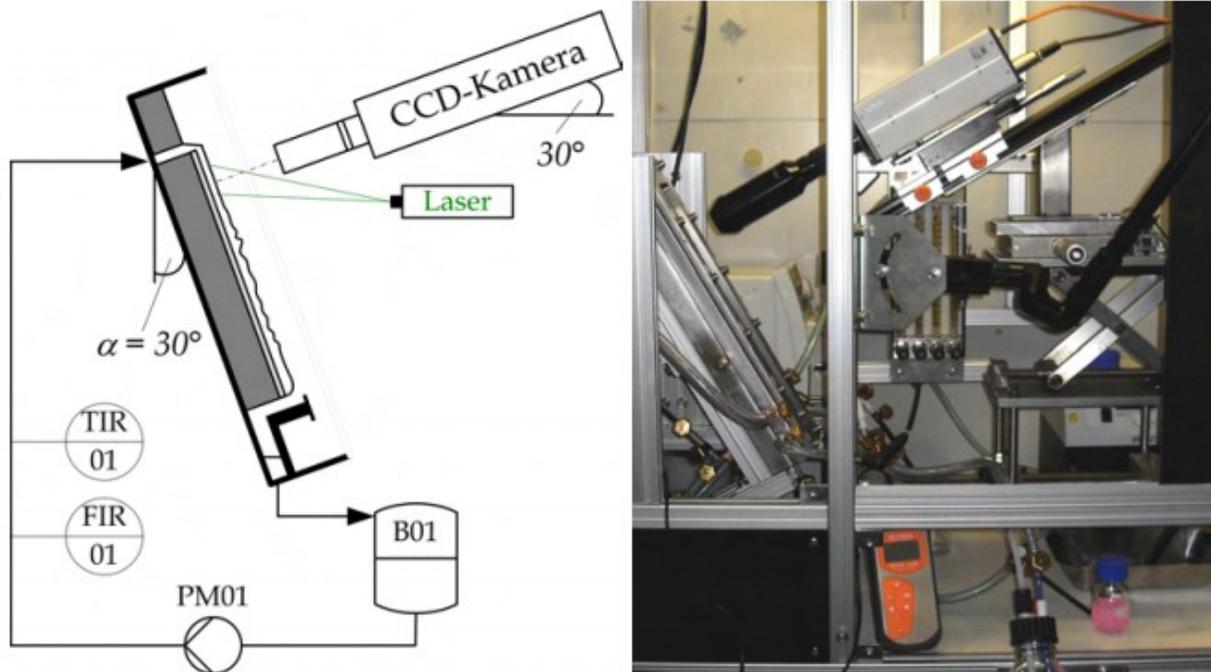


Abbildung 18 – Messaufbau für  $\mu$ PIV-Geschwindigkeitsmessung [ 19]

Wie bei den Versuchsaufbauten der bereits besprochenen Forschungsarbeiten ist auch bei dieser der Aufbau für die Geschwindigkeitsmessung relativ einfach gestaltet. Die notwendigen Komponenten für den Versuchsstand sind:

- ein Auffangbehälter
- eine Pumpe
- ein Durchflussmesser
- und eine Temperaturüberwachung

Es wird wieder eine Versuchsflüssigkeit mittels einer Pumpe im Kreis gefördert, wobei sowohl Volumenstrom als auch die Temperatur gemessen werden. Auf der um  $60^\circ$  gegenüber der Horizontalen geneigten Platte, welche eine Breite von 5 cm und eine Länge von 30 cm aufweist, erfolgt die Messung des Geschwindigkeitsprofils. Hierfür sind wiederum eine CCD-Kamera und ein Laser notwendig. Der Neigungswinkel  $\alpha$  der Platte ist fixiert und daher unveränderlich. Die Aufgabe der Versuchsflüssigkeit auf die Platte

erfolgt mittels eines Überlaufwehrs. Als Plattenmaterial kommt eine Edelstahlplatte als Basisplatte zur Anwendung. Auf diese können dann Bleche mit unterschiedlichem Oberflächenprofil, also mit und ohne Struktur, befestigt werden. Die Platten werden hierbei ähnlich wie beim Versuchsstand von Paschke seitlich fixiert. Abbildung 19 zeigt wie die Platten für die Absorptionsmessungen befestigt wurden, wobei diese für die Geschwindigkeitsmessung ähnlich ausgesehen hat. Als Grundgerüst für Komponenten des Messaufbaus dient, wie auch bei Paschke, ein Aluminium Profil System [ 19].

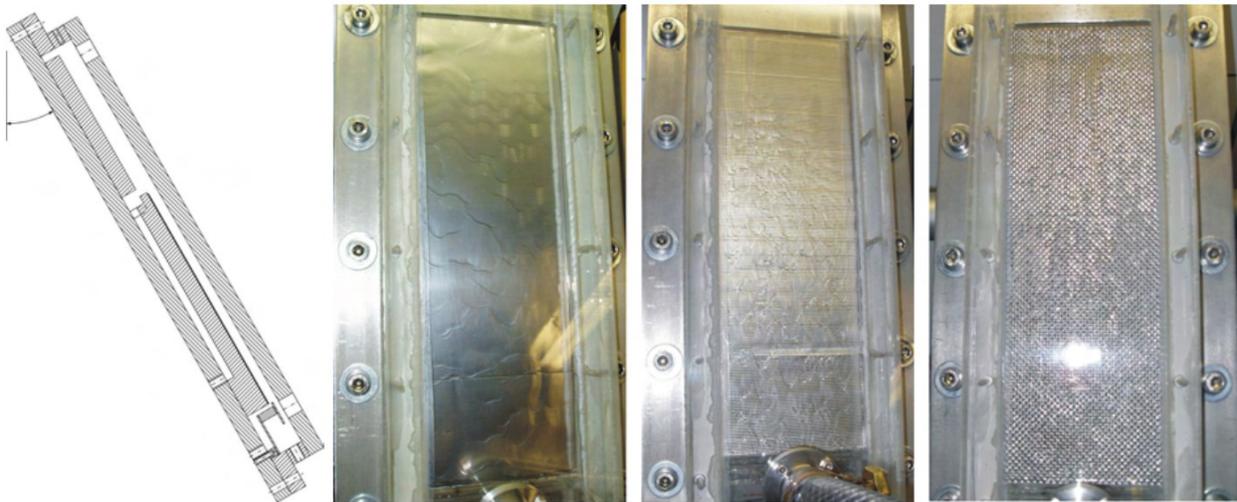


Abbildung 19 - Fixierung der Platten [ 19]

### ***Stoffsystem und verwendetes Messsystem***

Für die Untersuchung kommt ebenso wie bei Paschke ein Silikonöl zum Einsatz, wobei die Viskosität variiert wird. Es handelt sich hierbei genauer um ein Polydimethylsiloxan von der Firma Dow Corning mit der Bezeichnung Xiameter® PMX-200 Silicone Fluid. Die von Kohrt eingesetzten Öle weisen die Viskositäten  $5 \text{ mm}^2/\text{s}$  und  $10 \text{ mm}^2/\text{s}$ . In Tabelle 5 sind die genauen Stoffdaten der zum Einsatz gekommenen Öle aufgelistet [ 19].

Tabelle 5 - Stoffdaten der von Kohrt verwendeten Silikonöle bei 28,5 °C und 1 atm [ 19]

Silikonöl	Viskosität* $\nu_f$ [mm <sup>2</sup> /s]	Dichte* $\rho_f$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Oberflächenspannung* $\sigma_{fg}$ [mN/m]	Filmzahl $Fi$ [-]
DC1	0,97**	812	16,0	$8,8 \cdot 10^8$
DC5	4,9	915	18,3	$1,4 \cdot 10^6$
DC10	9,9	935	18,9	$8,8 \cdot 10^4$

Die Filmzahl  $Fi$  ist hierbei folgendermaßen definiert, wobei  $\eta_f^4$  die dynamische Viskosität in  $\frac{kg^4}{m^4 \cdot s^4}$  ist [ 19]:

$$Fi = \frac{\rho_f \cdot \sigma_{fg}^3}{g \cdot \eta_f^4} \quad (7)$$

Unterschiedliche Messsysteme sind bei dieser Arbeit zum Einsatz gekommen, wie etwa

- eine Messung des Stofftransportes mittels einer Absorptionsmessung anhand der Stoffpaarung Silikonöl und CO<sub>2</sub>,
- einer Filmdickenmessung nach der LIF-Methode, um strömungstechnische Unterschiede bei der Filmströmung auf glatten und mikrostrukturierten Platten zu untersuchen,
- einem Farbfaden- und Benetzungstest mit welchem Stromlinien visualisiert werden sollen, um Mischungseffekte und Geschwindigkeitsverteilungen aufgrund von Mikrostrukturen feststellen zu können und
- einer Geschwindigkeitsmessung nach der  $\mu$ PIV-Methode, um zweidimensionale Geschwindigkeitsfelder in der Filmströmung zu bestimmen.

Die Absorptionsmessung nimmt eine zentrale Rolle bei den Messungen in dieser Arbeit ein. Jedoch sind Messvorgänge dieser Art nicht für den zu konzipierenden Versuchsstand vorgesehen, weshalb auf die Absorptionsmessung nicht näher eingegangen wird. Ebenfalls der Farbfaden- und Benetzungstest ist für den zu bauenden Versuchsstand vernachlässigbar, wobei dieser aufgrund seiner geringeren Komplexität durchaus im späteren Verlauf für etwaige Messungen realisiert werden kann. Die Funktionsweise der

lichtinduzierten Fluoreszenz als Möglichkeit der Filmdickenmessung einer Filmströmung und die Micro Particle Image Velocimetry sind wie in den vorhergehenden Forschungsarbeiten beschrieben zum Einsatz gekommen [ 19].

## **2.7 Fazit und Erkenntnisse für die Auslegung des Versuchsstands**

Aufgrund der Recherche konnten wichtige Eckpunkte des Versuchsstandes, wie z.B. die Größe des Messstandes, bereits im Vorfeld geklärt werden. Da wenig Details bezüglich der Größe der eigentlichen Versuchsaufbauten in den Forschungsarbeiten vorhanden war und meist nur die Abmessungen der Platte erwähnt wurden, erschien es zweckmäßig, die Größe des Versuchsapparates von der Plattengeometrie abzuleiten. In Tabelle 6 sind die Abmessungen der verwendeten Platten der recherchierten Arbeiten veranschaulicht.

**Tabelle 6 - Übersicht über Plattengeometrien in den Forschungsarbeiten**

	<b>Faruk Al-Sibai</b>	<b>Ilja Ausner</b>	<b>Steve Paschke</b>	<b>Martin Kohrt</b>
Abmessungen in [mm]	240 x 1600	50 x 80	50 x 110	50 x 300

Aus diesem Vergleich heraus wurde eine Plattengeometrie von 110 mm Breite und 230 mm Länge festgelegt. Diese Größe erlaubt die Konstruktion eines Versuchsstandes, welcher weder klein und unhandlich noch zu groß und damit teuer werden würde. Die von den Autoren für die Platten gewählten Materialien variieren ebenso wie die Geometrien der Platten. Jedoch dürfte sich sowohl Metall als auch Kunststoff für PIV-Untersuchungen eignen, vorausgesetzt es wird die  $\mu$ PIV-Methode angewendet, da diese auch die Verwendung nicht-transparenter Plattenmaterialien erlaubt. In unserem Fall wurde eine transparente Kunststoffplatte ausgewählt, wobei auf diese im nächsten Kapitel eingegangen wird. Zur Befestigung der Platte hat sich in dem Großteil der Forschungsarbeiten eine seitliche Fixierung mittels Klemmen und Schrauben bewährt. Dieses System ermöglicht ein einfaches Lösen und Befestigen von Platten mit unterschiedlicher Dicke und bietet somit eine hohe Flexibilität bezüglich dem Einsatz von verschiedenen Plattenmaterialien.

Ein Stoffsystem, welches von vielen in ihren Arbeiten verwendet wurde, war Silikonöl. Das liegt daran, dass dieses in der Vergangenheit schon ausgiebig getestet wurde und somit viele Messdaten vorhanden sind. Dadurch ist es möglich, bereits vorhandene Testdaten mit Hilfe des Versuchsstandes und des Messaufbaus zu rekonstruieren, womit es sich hervorragend für die Kalibrierung des Messaufbaus und der Kontrolle der ermittelten Daten eignet. Weiters ist dieses Stoffsystem kommerziell günstig zu erwerben und bietet eine Vielzahl an Ölen mit ähnlichen Eigenschaften bei gleichzeitig variierender Viskosität. Dies ist besonders für Messungen bei unterschiedlichen Neigungswinkeln interessant und erleichtert die Bildung eines vollständig geschlossenen Rieselfilms.

Zur Aufgabe des Versuchsfluides auf die Platte dient in vielen Arbeiten ein Behälter mit integriertem Überlaufwehr. Mit dieser Methode ist es möglich Einfluss auf die Flüssigkeit zu nehmen. In den meisten Arbeiten wurde dies mit Hilfe eines im Deckel befestigten Lautsprechers bewerkstelligt, welcher dazu diente die Wellenform aktiv zu gestalten. Bei der Untersuchung von Rieselfilmen unter Verwendung von zwei oder mehr Flüssigkeiten in Form von Mehrphasenströmungen wurden hingegen Aufgaberohre verwendet. Das hat den Grund, dass mit diesen die Schichtung der unterschiedlichen Flüssigkeiten auf der Platte einfacher vorzugeben ist, als mit einem Aufgabebehälter. Aufgaberohre stellen generell eine einfachere Möglichkeit der Flüssigkeitsaufgabe dar, bieten jedoch keine direkte Möglichkeit etwa die Schichtdicke zu beeinflussen. Daher liegt die Verwendung eines Überlaufwehrs für den Versuchsstand nahe.

Ein Aluminium Profil System dient als Grundgerüst für den Versuchsaufbau und hat in vielen der Forschungsarbeiten Anwendung gefunden. Es ermöglicht den Versuchsstand mit der Platte unabhängig zu konstruieren und ermöglicht darüber hinaus eine hohe Flexibilität bezüglich der Verwendung unterschiedlicher Messsysteme und die Verbindung dieser mit dem Versuchsaufbau. Es bietet zudem auch eine einfache Möglichkeit das bestehende System im Nachhinein mit unterschiedlichen Mess- und Überwachungsinstrumenten zu erweitern.

Mit Hilfe dieser genannten Kenntnisse wurde ein Versuchsstand nach einigen speziellen Anforderungen und Gesichtspunkten konstruiert, welche im nachfolgenden Kapitel näher erläutert werden.

### **3 Beschreibung des Versuchsstandes**

Für die Konstruktion des geplanten Versuchsstandes für die Untersuchung von Rieselfilmen kommt das Konstruktionsprogramm „Autodesk Inventor Professional 2014“ zum Einsatz. Dieses wurde aufgrund der vorhandenen Vorkenntnisse des Autors und der Verfügbarkeit des Programmes mittels einer Studenten-Lizenz ausgewählt. Diese Software bietet nicht nur eine dreidimensionale Darstellung zur besseren Anschaulichkeit des Versuchsstandes, sondern es bietet auch die Möglichkeit die Vorgaben und Anforderungen bezüglich der Funktionen des Aufbaus bereits vorab testen zu können. Dadurch kann der Versuchsstand konstruiert, virtuell getestet und untersucht und bei Bedarf neu konzipiert oder erweitert werden. Die für die Konstruktion notwendigen Vorgaben und Anforderungen sind schlussendlich maßgebend für die Auswahl und Formgebung der einzelnen Komponenten des Versuchsstandes. Daher werden in den nachfolgenden Kapiteln die Anforderungen an die Bauteile und ihre Formgebung, sowie die Materialauswahl der Baugruppen im Einzelnen näher erläutert.

#### ***3.1 Anforderungen***

Die Anforderungen an den Versuchsstand sind zur Übersicht in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7 - Anforderungen an den Versuchsstand

<b>Element/Bereich</b>	<b>Anforderung</b>
Plattenneigungswinkel $\alpha$	Variabel einstellbar Großer Bereich (10° bis 80°)
Verschiedene Plattenmaterialien	Dicke Oberflächenstruktur Transparenz
Behältergeometrien	Absetzen von Tracer-Partikeln minimieren
Flüssigkeitsaufgabe	Möglichkeit der Vorgabe der Filmschichtdicke Möglichst geringe Turbulenzen

Eine zentrale Voraussetzung für den Versuchsstand ist die Möglichkeit einen großen Bereich des Platten-Neigungswinkels  $\alpha$  untersuchen zu können. Dadurch soll gewährleistet werden, dass die Strömungscharakteristik von Rieselfilmen über Oberflächen mit flacher Neigung und über jene mit einer sehr steilen Neigung untersucht werden kann. Hierfür ist es nötig einen Bereich von etwa 10° bis etwa 80° gegenüber der Horizontalen abdecken zu können. Um dies bewerkstelligen zu können wird auf ein Grundgerüst aus Aluminium Profilen der Firma CAP GmbH (Cap Alu Profil System) zurückgegriffen. Mit Hilfe diesen können alle notwendigen Bauteile des Versuchsstandes miteinander verbunden werden. Des Weiteren verfügen die Profile aufgrund ihres Designs über Vertiefungen auf allen Seiten, welche in Kombination mit anderen Bauteilen der Firma CAP, so genannten Hängegleitern, als Führungen für die Komponenten des Versuchsstandes verwendet werden können. Mit diesen Rahmenbedingungen kann ausgehend von der gewählten Plattengeometrie der Messstand konstruiert werden. Die Plattengeometrie wurde wie bereits im vorhergehenden Kapitel 2.7 erwähnt mit 110 mm Breite und 230 mm Länge festgelegt. Hierbei beträgt die Plattendicke lediglich 1 mm. Dies hat den Grund, dass diese Platte nur für die ersten Versuche Verwendung finden wird und in Zukunft nur als Unterlagsplatte für die zu untersuchenden Oberflächen dienen soll. Ausgehend von diesen Dimensionen wurde eine Auflageplatte konstruiert, auf welcher die zu untersuchende Platte mit seitlichen Klammern mit Schrauben befestigt wird (siehe Abbildung 20).

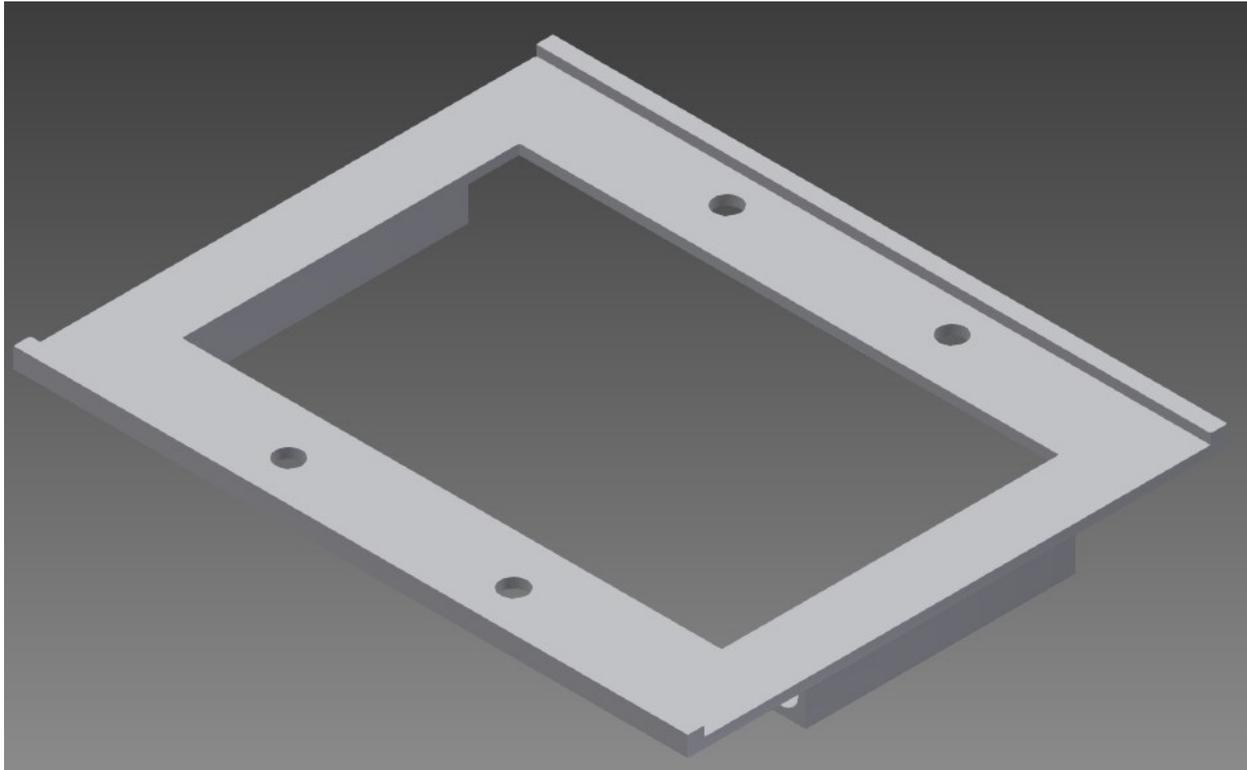


Abbildung 20 - Auflage für Platte

Die Auflageplatte wird auf der Unterseite jeweils vorne und hinten mit Hilfe von Stangen aus PVC und den Hängegleitern mit dem Grundgerüst verbunden. Beide Hängegleiter bewegen sich in den Führungen von horizontal angeordneten Aluminium Profilen, wobei eines dieser Profile mittels eines Winkels auf einem vertikalen Profil befestigt wird (siehe Abbildung 26). Dadurch kann dieser Hängegleiter sowohl horizontal als auch vertikal, mittels einer Verschiebung des Aluminium Profils in der Vertikalen, bewegt werden. Durch diese Bewegungsfreiheit kann die Abdeckung eines großen Messbereiches des Neigungswinkels  $\alpha$  gewährleistet werden. Das Konzept zur Befestigung der zu untersuchenden Platte auf der Auflageplatte mittels seitlicher Klammern ermöglicht es Platten unterschiedlicher Dicken und Materialien auf der Auflage zu befestigen. Lediglich die Geometrien der Platten müssen den Vorgaben entsprechen, wodurch eine hohe Flexibilität hinsichtlich der untersuchbaren Platten und deren Oberflächen sichergestellt werden kann. Die Klammern dienen hierbei nicht nur als Halterungselemente für die

### Kapitel 3 - Beschreibung des Versuchsstandes

eingespannten Platten, sondern haben bei laufenden Messungen ebenfalls die Funktion das seitliche Überlaufen der Versuchsflüssigkeit zu verhindern. Um diesem Verwendungszweck auch bei höheren Volumenströmen nachkommen zu können, müssen die Klammern eine gewisse Dicke beziehungsweise Höhe aufweisen. Um den Volumenstrom und so die Turbulenz innerhalb der Versuchsflüssigkeit einzustellen, wird die Pumpe „Heidolph PD5230“ eingesetzt. Diese befördert die Flüssigkeit in Form eines Kreislaufes von einem Auffangbehälter zu einem Aufgabebehälter befördert. An die Konstruktion des Auffangbehälters (siehe Abbildung 21) sind aufgrund der Messmethode einige spezielle Anforderungen gestellt worden.

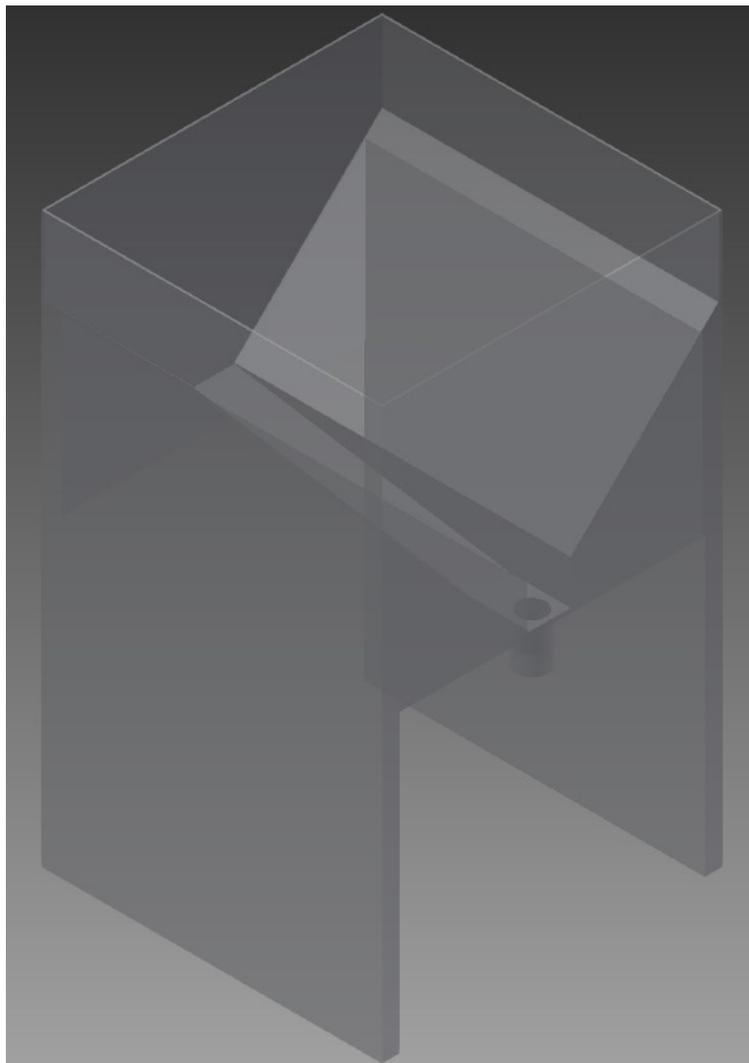


Abbildung 21 - Auffangbehälter

### Kapitel 3 - Beschreibung des Versuchsstandes

Da für den Einsatz der  $\mu$ PIV-Messmethode die Aufgabe von Tracer-Partikeln in die Versuchsflüssigkeit notwendig ist, musste der Auffangbehälter derart konstruiert werden, dass das Absetzen von Partikeln in Ecken und Nischen nicht möglich ist. Zu Beginn war dieser Behälter daher konisch geformt, da dies die naheliegendste Lösung darstellt. Aufgrund von höheren Kosten bei der Fertigung eines konischen Behälters wurde diese Idee verworfen und ein Behälter mit rechteckiger Standfläche konzipiert. Bei diesem Konzept besitzen alle Flächen eine Neigung, damit sich von der Strömung losgelöste Partikel in Richtung der Austrittsöffnung bewegen können und so ein Absetzen verhindert werden kann. Dem Flüssigkeitskreislauf bei laufenden Untersuchungen folgend wird die mit den Tracer-Partikeln beladene Versuchsflüssigkeit dann vom Auffangbehälter zum Aufgabebehälter (siehe Abbildung 22) befördert.

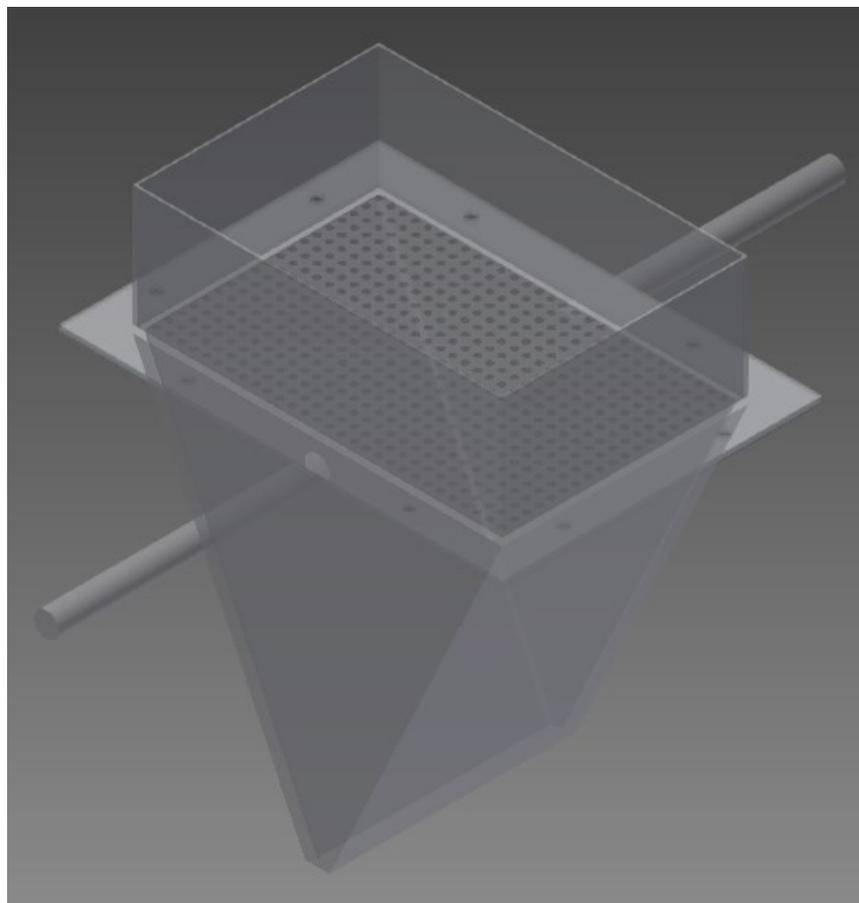
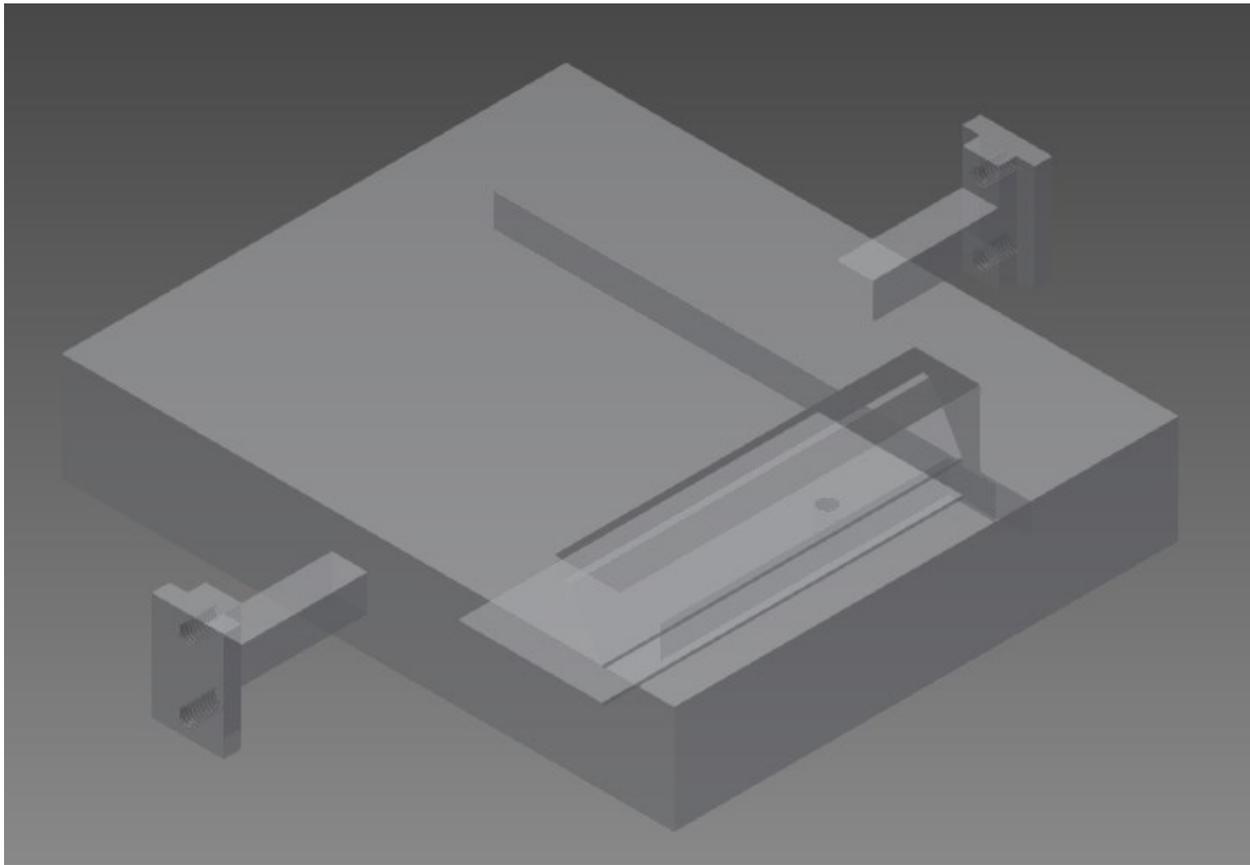


Abbildung 22 - Aufgabebehälter mit Lochblech und Relaxationsbehälter

### Kapitel 3 - Beschreibung des Versuchsstandes

---

Der Aufgabebehälter besitzt von der Seite gesehen eine dreieckförmige Struktur, welcher ebenfalls der vorherrschenden Konzeptidee folgt, das Absetzen von Tracer-Partikeln zu verhindern. Mittels einer Pumpe tritt die Flüssigkeit aus einem Schlauch aus und gelangt von oben in den Behälter ein. Da die aus dem Schlauch austretende Flüssigkeit nur eine kleine Querschnittsoberfläche einnimmt, muss diese zunächst einen Relaxationsbehälter und ein Lochblech passieren. Das Lochblech dient zur gleichmäßigeren Verteilung der aufgegebenen Flüssigkeit auf den gesamten Behälter und der Relaxationsbehälter dient bei höheren Volumenströmen dem Zweck der Verlangsamung der Flüssigkeit, damit diese allmählicher und kontrollierter aufgegeben werden kann. Mittels Hängegleitern wird der Aufgabebehälter in den Führungen von zwei vertikalen Alu Profilen mit dem Grundgerüst verbunden. Dabei ermöglichen die Hängegleiter eine einfache Handhabung und Verstellung der Behälterposition in der Vertikalen. Sie dienen jedoch nicht zur Fixierung der gewählten Position. Diese wird in weitere Folge durch eines der Kernstücke der Anlage, dem Halterungssystem für die Schieber (siehe Abbildung 23), vorgegeben.



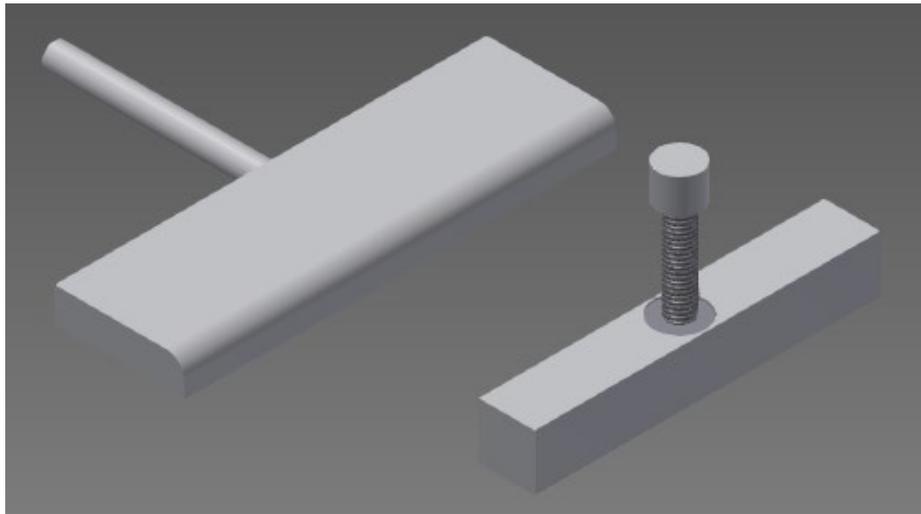
**Abbildung 23 - Halterungssystem für die Schieber**

Das liegt daran, dass dieses Halterungssystem auf der Oberseite über eine Öffnung verfügt, in welche der Aufgabebehälter mündet (siehe Abbildung 24).



**Abbildung 24 - Seitenansicht des Halterungssystems mit eingesetzten Schiebern**

Dadurch liegt der Aufgabebehälter formpassend auf, wodurch die Positionierung und Fixierung des Halterungssystems ebenfalls die Position des Aufgabebehälters festgelegt wird. Die Lage des Halterungssystems kann in der Vertikalen eingestellt werden, wobei dies hierbei nicht wie bei dem Behälter oder der Auflage für die Platte mit Hilfe von Hängegleitern geschieht. Diese Komponente wird nämlich direkt in den Führungen der Alu Profile eingesetzt und kann in diesen bewegt werden. Die Höhe kann dann relativ einfach mittels zwei Stopper-Elementen und jeweils einer Schraube fixiert werden. Der Nutzen dieses Halterungssystems ist die aus dem Aufgabebehälter ankommende Versuchsflüssigkeit mit Hilfe von zwei Schiebern beeinflussen und so die Aufgabe der Flüssigkeit auf die geneigte Platte individuell einstellen zu können. Mit dem ersten Schieber, welcher horizontal in der Halterungskomponente liegt (siehe Abbildung 24), kann eine Spaltweite für die Flüssigkeit vorgegeben werden. Die Einstellung dieser erfolgt hierbei per Hand, indem der Schieber auf die gewünschte Spaltweite verschoben wird. Um dabei die Turbulenzbildung so gering als möglich zu halten, wurde für die vordere obere Kante des Schiebers eine Rundung vorgesehen (siehe Abbildung 25). Gleichzeitig ermöglicht eine Kante auf der Unterseite des Schiebers eine verbesserte Kontrolle bei der Aufgabe der Flüssigkeit auf die Platte. Dabei befindet sich die Platte direkt unterhalb der vorgesehenen Aufgabeöffnung und zwar derart, dass die Plattenkante möglichst mit der Schieber Kante abschließt. Dadurch sollen zusätzliche Turbulenzen wiederum auf ein Minimum gehalten werden. Der zweite Schieber befindet sich in einer vertikalen Position in dem Halterungssystem und wird zur Spaltweitenregulierung gegenüber der Platte verwendet. Es kann somit direkt eine Flüssigkeitsschichtdicke bei der Aufgabe eingestellt und vorgegeben werden. Die Einstellung erfolgt bei diesem Schieber mittels einem Gewinde und einer Schraube.



**Abbildung 25 - Horizontaler und vertikaler Schieber**

Dieses Schiebersystem ermöglicht so auf zwei Arten die Aufgabe der Flüssigkeit zu beeinflussen, wobei dies auch bei unterschiedlichen Neigungswinkeln der Platte möglich ist. Das gewählte System mit den Hängegleitern ermöglicht in weiterer Folge die Plattenoberkante je nach gewähltem Neigungswinkel so zu positionieren, so dass eine optimale Flüssigkeitsaufgabe erfolgen kann.

Abbildung 26 zeigt nun ein zusammengebautes Modell des Versuchsstandes in Autodesk Inventor Professional 2014. Aufgrund des Designs und der Funktionsweise sollte es mit dem Messaufbau möglich sein, den gewünschten großen Neigungswinkelbereich abzudecken, die Verwendung verschiedener Fluide zu zulassen und unterschiedliche Plattenmaterialien und -oberflächen untersuchen zu können.

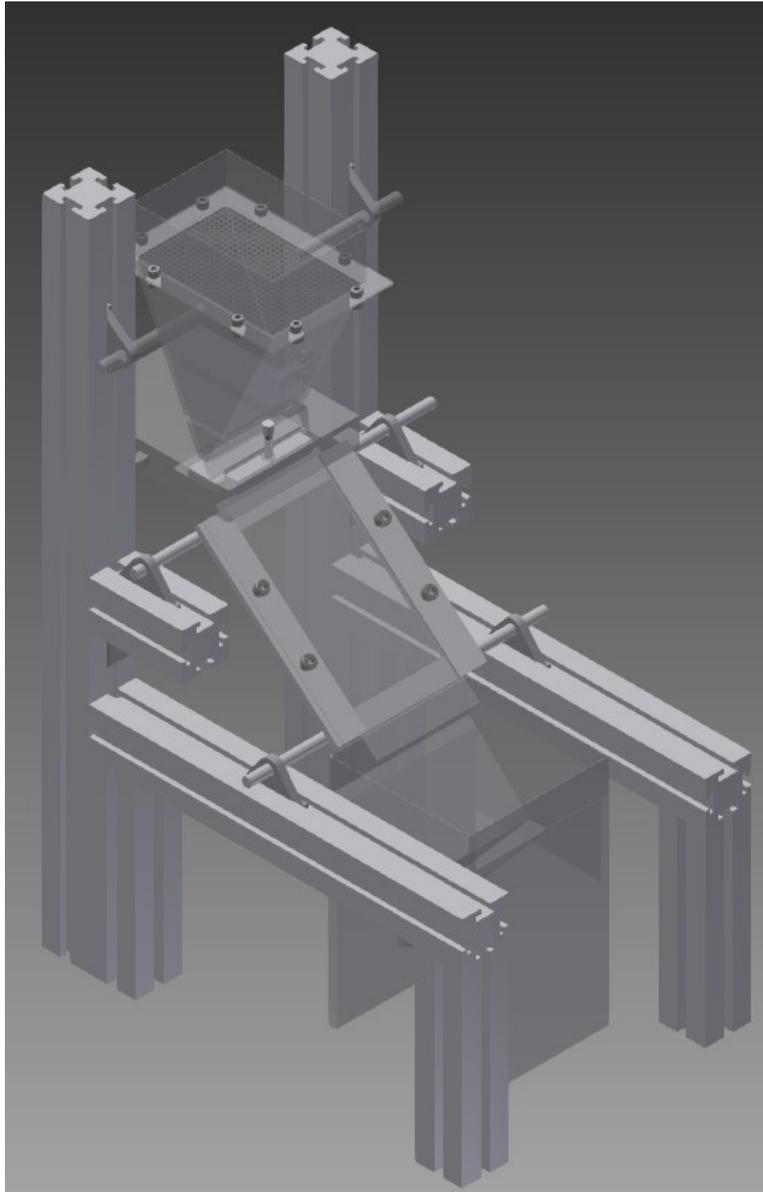


Abbildung 26 - Konzept des Versuchsstandes in Autodesk Inventor Professional 2014

### 3.2 Materialauswahl

Unterschiedliche Materialien werden für die einzelnen Komponenten herangezogen. Die Auswahl dieser erfolgt dabei einerseits aufgrund der jeweiligen Funktion der Komponente, jedoch auch vom Materialsortiment des Unternehmens „KBG Kunststoff-Bearbeitungs Ges.m.b.H“, welches die Komponenten des Versuchsstandes gefertigt hat. So besteht die Platte etwa aus Acrylglas, da bei dieser Komponente kaum mechanische oder chemische Beanspruchungen zu erwarten sind. Das Grundgerüst besteht wie im Kapitel 3.1 bereits erwähnt aus Aluminium, da es Teil eines Aluminium Profil Systems ist, womit die Materialauswahl erleichtert wurde. Zur besseren Übersicht sind in Tabelle 8 alle Komponenten nach dem gewählten Material eingeteilt. Anschließend wird die Materialauswahl aller Komponenten näher erläutert.

Tabelle 8 - Übersicht der ausgewählten Materialien

<b>Material</b>	<b>Komponente</b>
PMMA	Auffangbehälter Aufgabebehälter
POM	Halterungssystem für Schieber Horizontaler Schieber Vertikaler Schieber
PET	Relaxationsbehälter Platte Lochblech
PVC	Auflage für Platte Klammern
Aluminium	Grundgerüst

Wie in Tabelle 8 ersichtlich wurden für die Komponenten des Versuchsstandes fünf unterschiedliche Materialien ausgewählt. Sowohl der Auffang- als auch der Aufgabebehälter bestehen aus Polymethylmethacrylat (PMMA), welches auch als Acryl- oder Plexiglas bezeichnet wird. Dieser Werkstoff wurde ausgewählt, da bei den Behältern weder mechanische noch chemische Beanspruchungen erwartet werden können. Außerdem erlaubt dieses Material aufgrund seiner Transparenz den Verlauf der

Flüssigkeit mit den aufgegeben Tracer-Partikeln mit freiem Auge zu beobachten. Des Weiteren wird dieser Kunststoff bei der Fertigungsfirma relativ günstig angeboten und eignet sich hervorragend für Klebverbindungen. Da die Komplexität der Geometrie der Behälter gering ist und diese im Grunde aus mehreren Platten bestehen, die mittels Klebverbindungen miteinander verbunden werden, wurde dieses Material ausgewählt. Aufgrund der hohen Komplexität des Halterungssystems für die Schieber, wurde für diese Komponenten Polyoxymethylen (POM natur), auch Polyacetal genannt, verwendet. Die Fertigungsfirma hat diesen Werkstoff aufgrund seiner hohen Festigkeit und seiner guten Bearbeitbarkeit empfohlen, weshalb dieses Material auch für die beiden Schieber ausgewählt wurde. Die Anforderungen an den Relaxationsbehälter, das Lochblech und die Platte sind im Vergleich zu den meisten anderen Komponenten relativ gering, weshalb hier der Fokus auf die Verwendung eines günstigen Werkstoffes gesetzt wird. Für diese Komponenten wird daher Polyethylenterephthalat (PET) als Fertigungsmaterial herangezogen. Die Auflage für die Platte weist wiederum eine hohe Komplexität auf und bedarf einer hohen Festigkeit, um eine hohe Stabilität gewährleisten zu können. Ebenso ist bei den beiden Klammern eine hohe Festigkeit wichtig, da diese mit Schraubverbindungen eine Platte an der Auflage befestigen. Daher wird Polyvinylchlorid (PVC) als Werkstoff für diese Komponenten eingesetzt, wobei ebenso POM hätte verwendet werden können. Jedoch hat sich die Fertigung dieser Komponenten aus PVC als günstiger erwiesen als aus POM. Die Herstellung der Komponenten aus Metall wäre teilweise möglich gewesen. Jedoch sind manche Geometrien, wie z.B. das Halterungssystem oder die Auflage für die Platte, zu komplex, um diese kostengünstig fertigen zu lassen. Außerdem hat die ausgewählte Fertigungsfirma bereits mehrere Aufträge der Montanuniversität zufriedenstellend bearbeitet, weshalb deren Arbeitsqualität und Zuverlässigkeit bereits bekannt war.

### ***3.3 Auswahl des Fluides für Testdurchlauf und Volumina-Berechnung***

Für die Auslegung der Komponenten war nicht nur ihre Funktion in Bezug auf die Untersuchung mit der PIV-Methode ausschlaggebend, sondern auch die notwendigen Volumenströme, um die unterschiedlichen Turbulenzbereiche von Rieselfilmen

untersuchen zu können. Um daher auch höhere Volumenströme und die damit einhergehenden Turbulenzen untersuchen zu können, mussten die Volumina der Behälter entsprechend ausgelegt werden. Hierfür wird die Gleichung (4) umgeformt, so dass eine erste Abschätzung der Volumenströme aufgrund der Reynolds-Zahl vorgenommen werden kann. Man erhält dadurch folgenden Zusammenhang:

$$\dot{V}_f = Re * B * v_f \quad (8)$$

Wählt man nun eine Flüssigkeit bestimmter Viskosität aus und legt die Reynolds-Zahl für einen bestimmten Bereich fest, kann der Volumenstrom grob eingeschätzt werden. Für diese erste Abschätzung muss daher ein Versuchsfluid für die ersten Testdurchläufe der Anlage ausgewählt werden. Aus der Recherche hat sich ergeben, dass das Silikonöl Xiameter PMX-200 Silicone Fluid der Firma Dow Corning bereits gut untersucht wurde und die Ergebnisse eines Testdurchlaufs mit bestehenden Daten daher gut vergleichbar sein sollten. Da sich dieses Fluid dadurch auszeichnet, dass es mit zahlreichen unterschiedlichen Viskositäten  $\nu$  bei sonst gleichbleibenden Eigenschaften erhältlich ist, werden für eine erste Abschätzung die Viskositäten 1 mm<sup>2</sup>/s, 5 mm<sup>2</sup>/s und 10 mm<sup>2</sup>/s ausgewählt. Tabelle 9 zeigt zum Zwecke der Anschaulichkeit die Abschätzung des Volumenstromes bei einer Viskosität von  $\nu = 1$  mm<sup>2</sup>/s.

Tabelle 9 - Abschätzung des Volumenstromes für  $\nu = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$

$\nu = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$				
$Re / [-]$	$V_{\text{pkt, f}} / [\text{l/s}]$	$V_{\text{pkt, f}} / [\text{ml/min}]$	$\delta_N / [\text{mm}]$	
0,1	1,00E-05		0,6	0,35
0,5	5,00E-05		3	0,60
1	1,00E-04		6	0,76
5	5,00E-04		30	1,29
10	1,00E-03		60	1,63
20	2,00E-03		120	2,05
30	3,00E-03		180	2,35
40	4,00E-03		240	2,59
50	5,00E-03		300	2,79
100	0,01		600	3,51
200	0,02		1200	4,42
300	0,03		1800	5,06
400	0,04		2400	5,57
500	0,05		3000	6,00
600	0,06		3600	6,38

Außerdem ist in Tabelle 9 die Filmschichtdicke  $\delta_N$  bei einem Neigungswinkel  $\alpha$  von  $45^\circ$  ersichtlich, wobei diese mit Gleichung (3) berechnet wird. Eine vorab Beurteilung der Dicke der Filmschicht bei dem jeweilig gewählten Volumenstrom dient ebenfalls der Vergleichbarkeit der Ergebnisse des Testdurchlaufes. Jedoch war zum Zeitpunkt des Testdurchlaufs das Silikonöl noch nicht vorhanden, weshalb für die erste PIV Messung ein Flüssigkeitsgemisch aus Ethanol und Wasser verwendet wurde [ 27]. Weitere Details hierzu sind im Kapitel 4.2 zu finden.

Mit Hilfe der voraussichtlich benötigten Volumenströme können nun die Volumina der Behälter besser abgeschätzt und bei Bedarf angepasst werden. In Tabelle 10 sind die Volumina aller Behälter ersichtlich.

**Tabelle 10 - Volumina der Behälter**

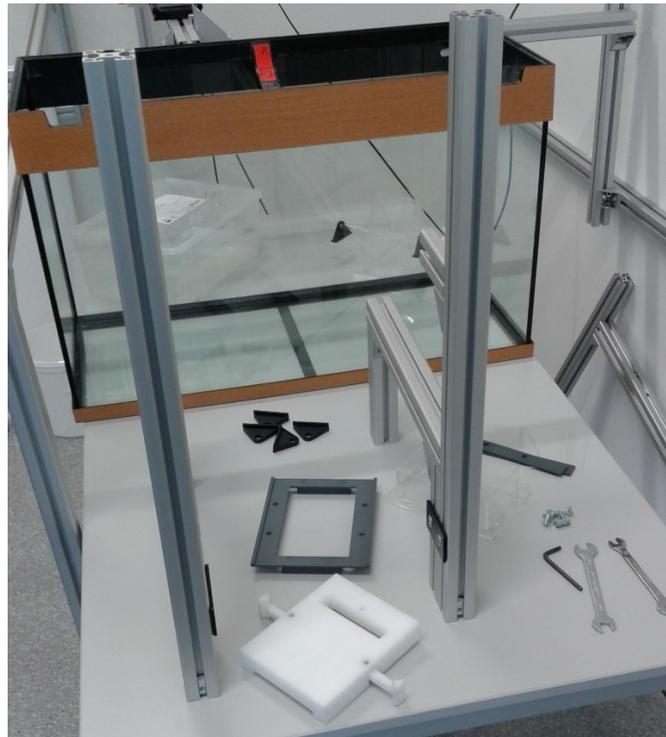
<b>Bauteil</b>	<b>V / [l]</b>
Aufgabebehälter	1,1
Relaxationsbehälter	0,7
Auffangbehälter	1,5

Diese Volumina sollten für die Untersuchung von Rieselfilmströmungen des laminaren, des quasi laminar und des turbulenten Bereichs ausreichen. Falls jedoch das vorhandene Volumen des Auffangbehälters für die Untersuchung von Rieselfilmen bei höheren Volumenströmen nicht ausreicht, kann ein Pufferbehälter das fehlende Volumen ausgleichen und so die Messung ermöglichen.

## **4 Versuchsstand**

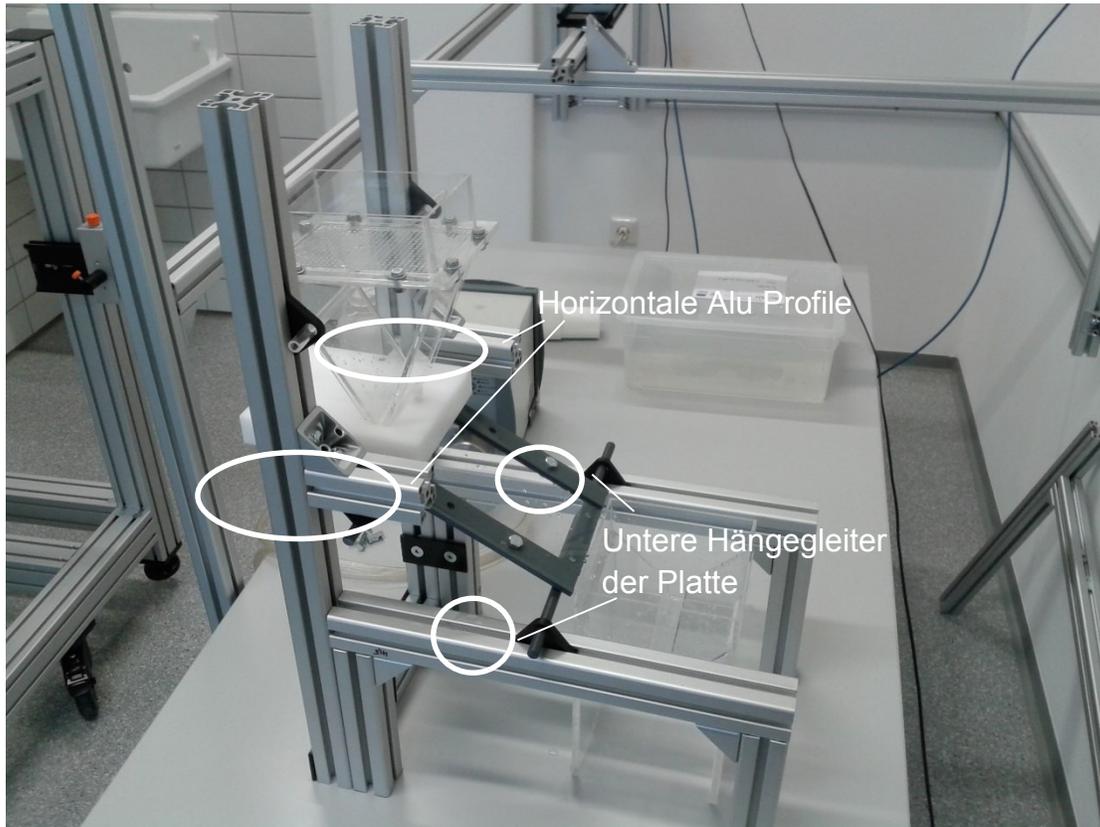
### **4.1 Zusammenbau**

Die Bearbeitung und Fertigstellung der Komponenten des Versuchsstands wurde wie bereits im Kapitel 3.2 erwähnt von der Firma „KBG Kunststoff-Bearbeitungs Ges.m.b.H“ übernommen. Aufgrund des Einsatzes des Aluminium Profil Systems „Cap Alu Profil System“ der Firma CAP GmbH als Grundgerüst für den Messaufbau und dem Design der Bauteile, die auf das Grundgerüst abgestimmt waren, konnte der Zusammenbau des Versuchsstandes rasch erfolgen.



**Abbildung 27 - Fertiges Grundgerüst mit noch nicht eingesetzten Komponenten**

Abbildung 27 zeigt das fertig gestellte Grundgerüst für die einzelnen Komponenten. Diese wurden nur noch mit Hilfe der Hängegleiter und der PVC Stangen in die Führungen der Alu Profile eingesetzt.



**Abbildung 28 - Fertig zusammengesetzter Versuchsstand**

In Abbildung 28 ist nun dargestellt, wie der Versuchsstand mit den eingesetzten Komponenten in der Realität aussieht. Mit Hilfe der horizontalen Profile kann nun die Höhe der Platte verstellt werden, wodurch sich die unteren Hängegleiter der Platte in den Führungen mitbewegen und der Neigungswinkel  $\alpha$  eingestellt werden kann. Die gewählte Höhe kann dann mittels zweier Winkel mit Schrauben fixiert werden (siehe Abbildung 29). Außerdem kann die Platte mittels der horizontalen Profile seitlich verschoben werden, um so die Plattenoberkante entsprechend der gewählten Höhe mit der Flüssigkeitsaustrittsöffnung des Halterungssystems abzustimmen.

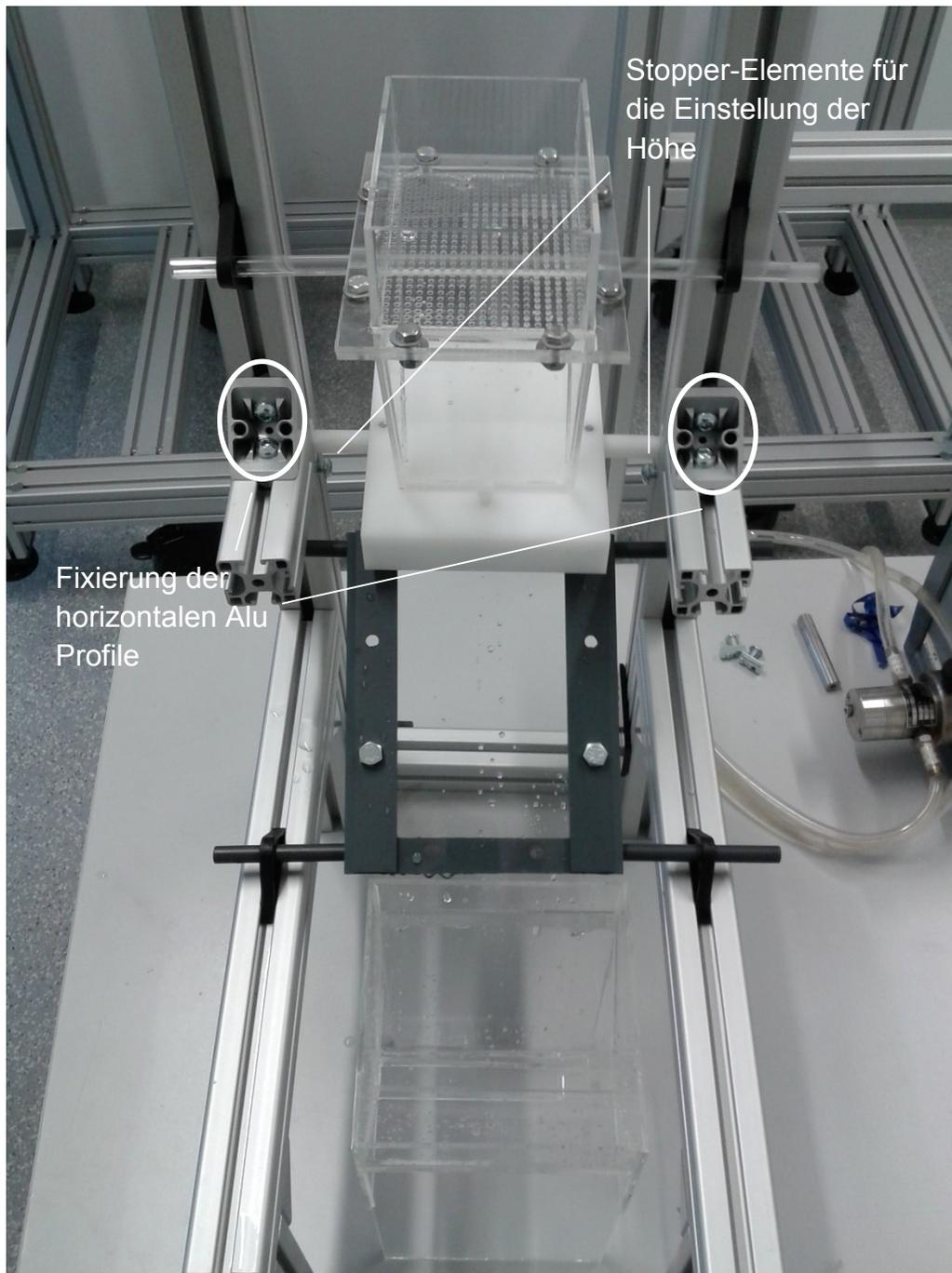


Abbildung 29 - Frontansicht des Versuchsstands

Die Höhe des Halterungssystems kann auf ähnliche Weise mit Hilfe von Stopper-Elementen in den Führungen der vertikalen Aluminium Profile festgelegt werden.

Hierzu muss wiederum lediglich jeweils eine Schraube gelöst oder festgezogen werden.

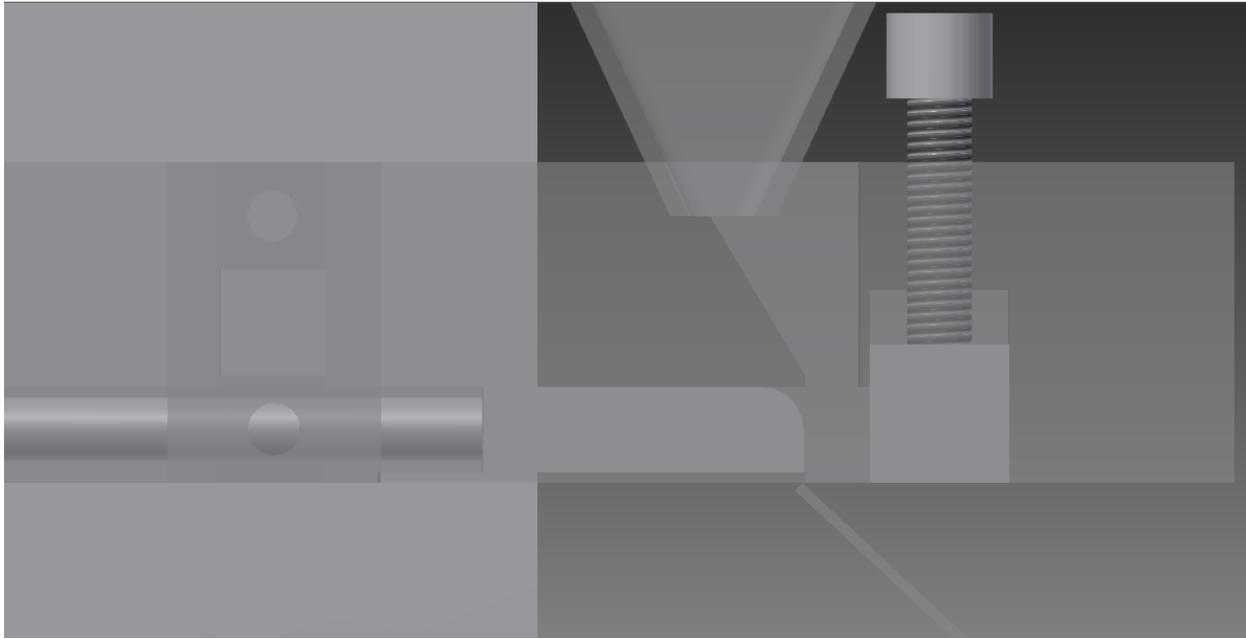


**Abbildung 30 - Vertikaler Schieber**

Die Funktion des in Kapitel 3.1 beschriebenen vertikalen Schiebers, welcher ein Teil des zweiteiligen Schiebersystems ist, ist nun zur besseren Veranschaulichung in Abbildung 30 zu erkennen. Mittels einer oben befindlichen Schraube kann der Abstand zwischen der Plattenoberfläche und dem Schieber eingestellt werden, wobei der vertikale Schieber um bis zu 6 mm aus dem Schiebersystem herausbewegt werden kann. Mit dem horizontalen Schieber kann die Größe der Austrittsöffnung zwischen 0 mm und 5 mm variiert werden. Auf diese Weise kann direkt auf die Schichtdicke des untersuchten Fluides und auf die Turbulenzbildung entlang der Platte Einfluss genommen werden. In Abbildung 31 und Abbildung 32 ist die Funktionsweise beider Schieber nochmals schematisch dargestellt.

## Kapitel 4 - Versuchsstand

In der Ausgangsposition fließt die Versuchsflüssigkeit unbehindert an den Schiebern vorbei und wird bei vollständig ausgefahrener Position hingegen stark beeinflusst.



**Abbildung 31 - Ausgangsposition der Schieber**



**Abbildung 32 - Vollständig ausgefahrene Schieber**

## Kapitel 4 - Versuchsstand

Vor dem eigentlichen Testdurchlauf, in welchem die PIV-Messungen durchgeführt und die gesamte Anlage auf ihre Funktion erprobt wird, wird ein Durchlauf ohne Verwendung der Kamera und dem Laser vorgenommen. Als Testflüssigkeit kommt hierbei reines Wasser zum Einsatz. Dieser Versuch dient nur zur ersten Abschätzung der Funktionstüchtigkeit und Funktionalität in Hinblick auf Undichtigkeiten bei verschiedenen Volumenströmen und Neigungswinkeln der Platte.

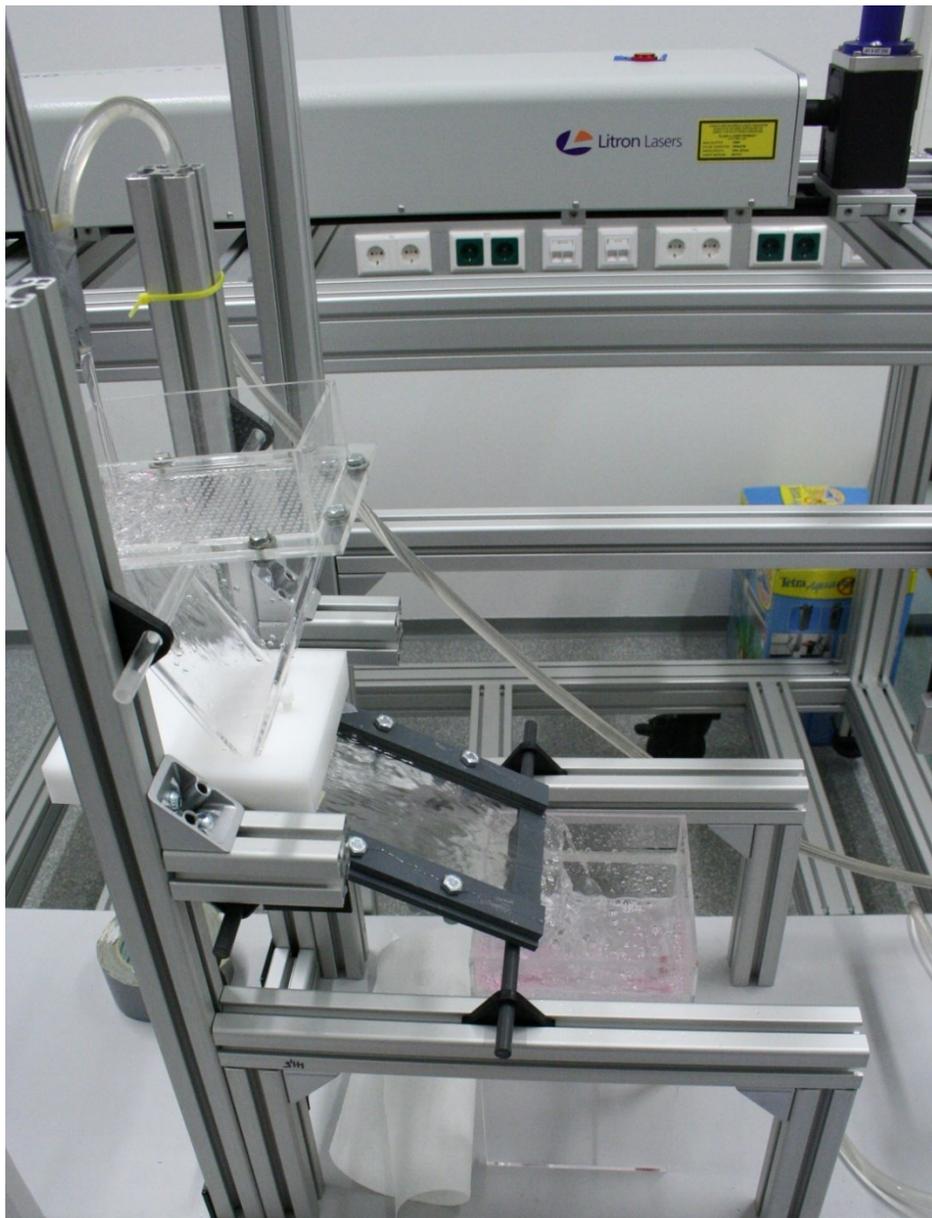


Abbildung 33 - Versuchsstand in Betrieb mit Wasser als Fluid

## 4.2 Testdurchlauf und Optimierungsmaßnahmen

### Testdurchlauf

Der Testdurchlauf der Anlage wurde von Frau Alexandra Wegleitner durchgeführt, weshalb die Einstellungen und Ergebnisse ihrer Arbeit hier lediglich in Form einer kurzen Zusammenfassung erwähnt werden. Auf Basis ihrer Arbeit werden anschließend jedoch die Probleme während des Versuches näher erläutert und mögliche Optimierungsmaßnahmen vorgeschlagen.

Abbildung 34 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Versuchsanlage mit positionierter Kamera für die PIV-Messungen.

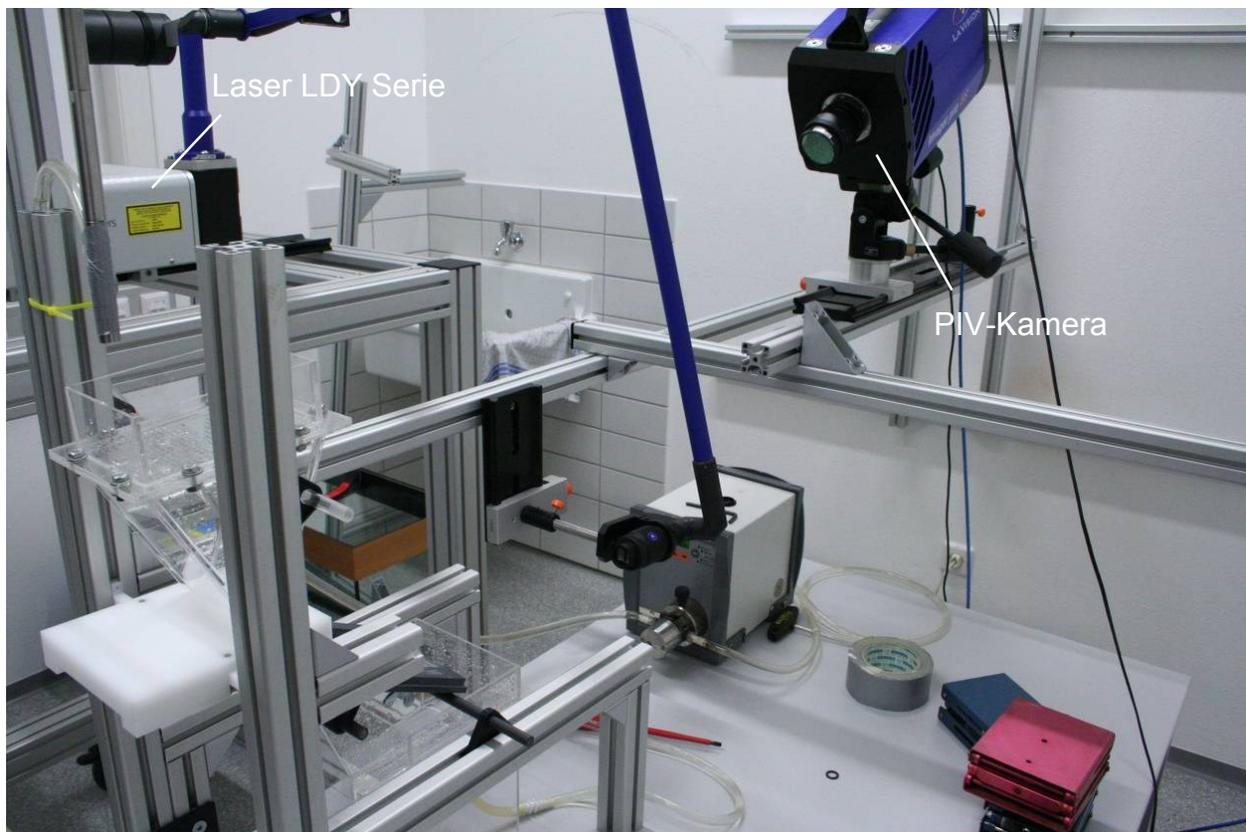


Abbildung 34 - Versuchsaufbau des Testdurchlaufs [ 27]

Für die PIV-Messungen wird ein Laser des Types „LDY 303HE PIV“ mit einer Wellenlänge von 527 nm und einer maximalen Frequenz von 20 kHz verwendet. Die PIV-Kamera ist vom Typ „Imager pro HS 4M“ der Firma LaVision, welches über einen CMOS-Sensor mit einer Frequenz von 1279 Hz verfügt und dabei eine Auflösung von 2016 x 2016 Pixel ermöglicht [ 27].

Als Versuchsfluid wird für diese erste Messung nicht wie hier in dieser Arbeit vorgeschlagen Silikonöl verwendet, sondern ein Flüssigkeitsgemisch aus Ethanol und Wasser. Das Mischungsverhältnis für 400 ml Flüssigkeit entspricht dabei 1:3, also 100 ml Ethanol und 300 ml Wasser, wobei als Tracer-Partikel 60 mg Rhodamin B-Partikel in Pulverform aufgegeben werden. Der Korngrößenbereich dieser Pulvers entspricht dabei 20 – 50  $\mu\text{m}$ . Der Grund für diese Mischung liegt darin, dass sich die gewählten Tracer-Partikeln in einer Ethanol-Wasser-Mischung besser auflösen, als in reinem Wasser [ 27].

Die PIV-Messungen werden mittels der Software „Davis PIV-Software“ vorgenommen, wobei mit dieser auch die Versuchseinstellungen festgelegt werden. Für diesen Testdurchlauf wird eine Belichtungszeit von 4976  $\mu\text{s}$  gewählt, welche ungefähr der maximalen Belichtungszeit von 5000  $\mu\text{s}$  der verwendeten Kamera entspricht. Die Belichtungszeit kann umso höher gewählt werden, je kleiner der Bildschirmausschnitt ist. Weiters wird eine Kamerabildrate von 200 Bilder pro Sekunde festgelegt. Als nächster Schritt erfolgt die Kalibration der Kamera, wobei auf genauere Details dieses Prozesses verzichtet und für mehr Details bezüglich dieser Schritte auf die Arbeit von Frau Wegleitner verwiesen wird [ 27]. Nach Beendigung der Vorbereitungen für die Messungen und der Durchführung der PIV-Messung, können die aus dem Programm erhaltenen Rohbilder der Partikelbewegungen mit Hilfe der Software noch weiter optimiert werden. Das optimierte Ergebnis der Messung ist in Abbildung 35 dargestellt und zeigt den Verlauf der Tracer-Partikel über die Platte, als auch die Geschwindigkeitsverteilung.

Ziel dieses Testdurchlaufs war es, eine erfolgreiche PIV-Messung des Geschwindigkeitsfeldes der Filmströmung aufzunehmen und etwaig vorhandene Probleme bei der Messung für zukünftige Versuche zu beheben. Auf den folgenden Seiten werden die aufgetretenen Probleme erläutert und mögliche

Optimierungsmaßnahmen genannt. Für eine Diskussion bezüglich der Ergebnisse der PIV-Messung wird auf die Arbeit von Frau Wegleitner verwiesen.

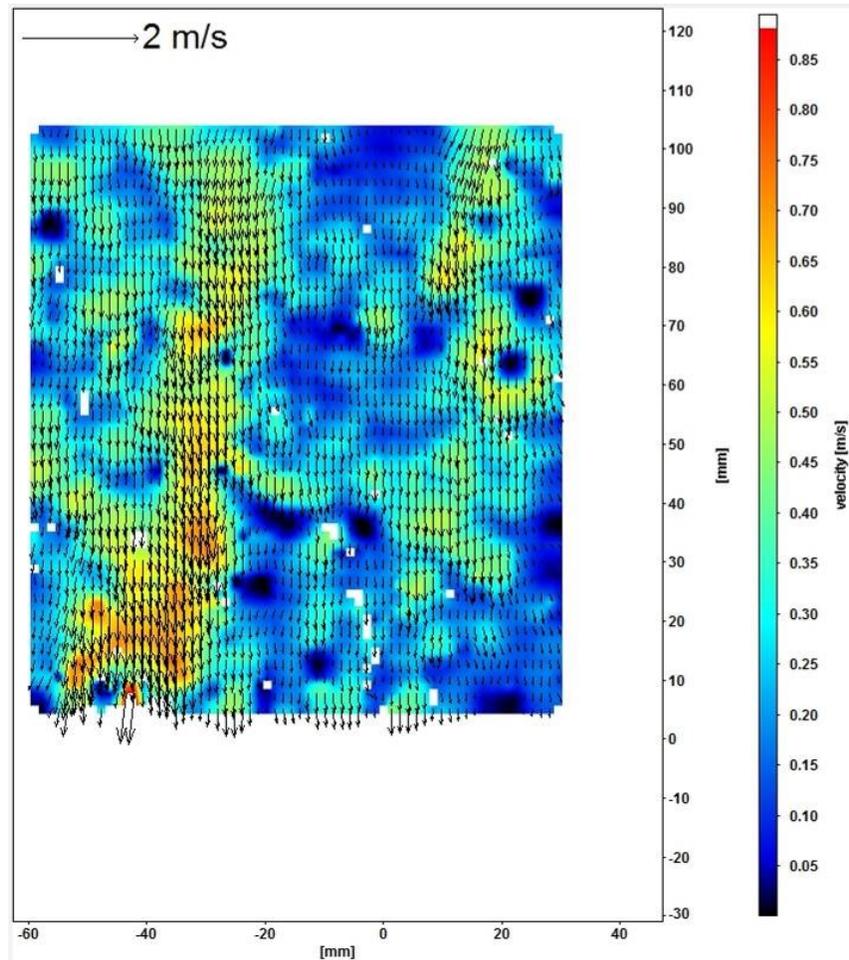


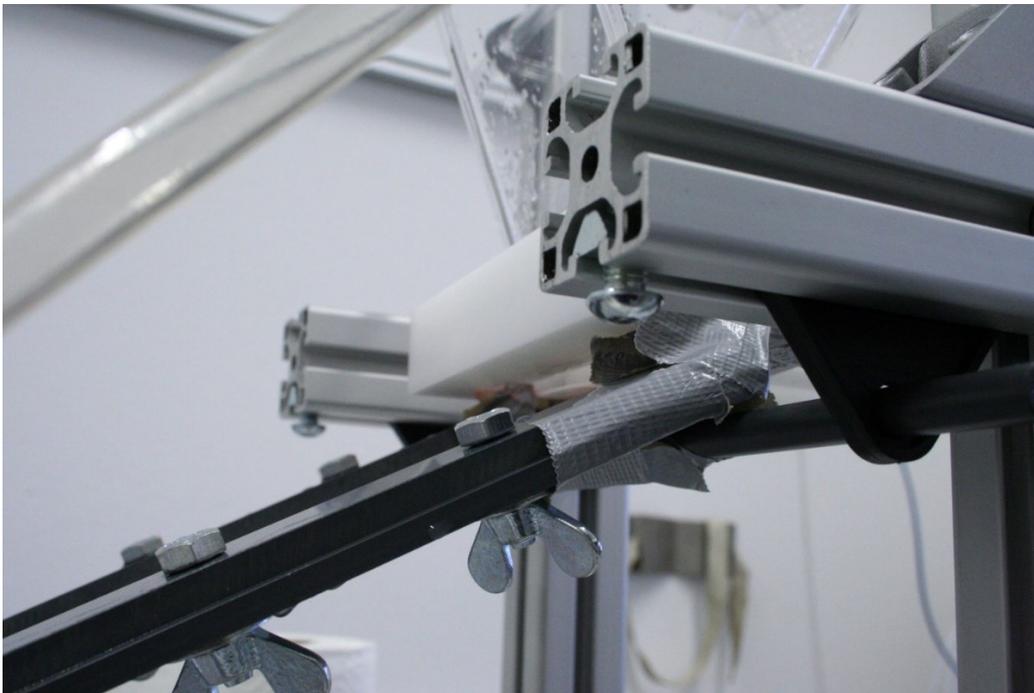
Abbildung 35 - Ergebnis der PIV-Messung [ 27]

### ***Probleme und Optimierungen***

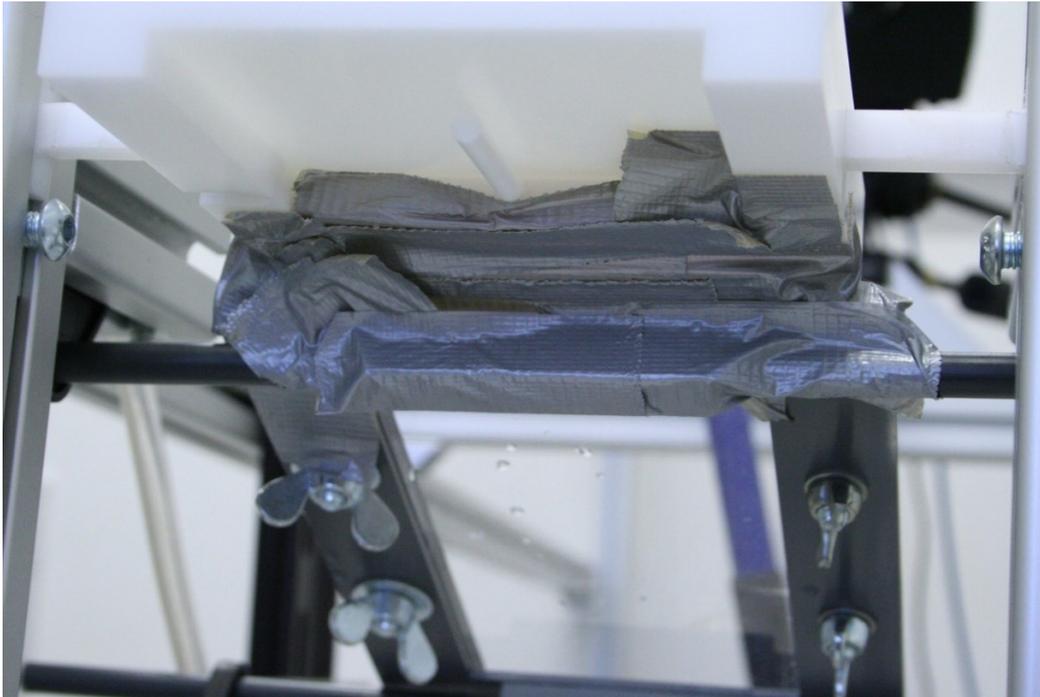
Bei der ersten Inbetriebnahme der Anlage, bei welcher keine PIV-Messung durchgeführt wurde, konnte festgestellt werden, dass bei der Aufgabe der Flüssigkeit in den Relaxationsbehälter die Position des Schlauches bei geringen Volumenströmen eine wesentliche Rolle einnimmt. Eine einseitige Positionierung an der linken oder rechten Kante des Behälters führt zu einer ebenso einseitigen Filmströmung auf der Platte. Daher

muss darauf geachtet werden, dass die Aufgabe mit dem Schlauch möglichst zentral in den Behälter erfolgt. Durch Fixierung des Schlauches an einem der Aluminium Profile konnte dieses Problem schnell behoben werden (siehe Abbildung 33).

Ein weiteres großes Problem waren Undichtigkeitsstellen. Diese befinden sich an der Unterseite des Halterungssystems wo sich die Schieber, als auch die vorgesehene Austrittöffnung der Flüssigkeit befindet. Sie führen zu einer ungleichmäßigen Aufgabe des Versuchsfluides auf die Platte, wodurch zusätzliche unbeabsichtigte Turbulenzen erzeugt werden. Des Weiteren bewirken die Undichtigkeitsstellen, dass ein Teil der Flüssigkeit nicht auf die Platte gelangt und so auch aufgegebene Tracer-Partikel nicht für die PIV-Messung zu Verfügung stehen. Dieses Problem konnte für den ersten Testdurchlauf provisorisch mit Klebefolie gänzlich behoben werden, wodurch die Aufgabe der Flüssigkeit auf die Platte wie vorgesehen kontrolliert ablaufen konnte (siehe Abbildung 36 und Abbildung 37).

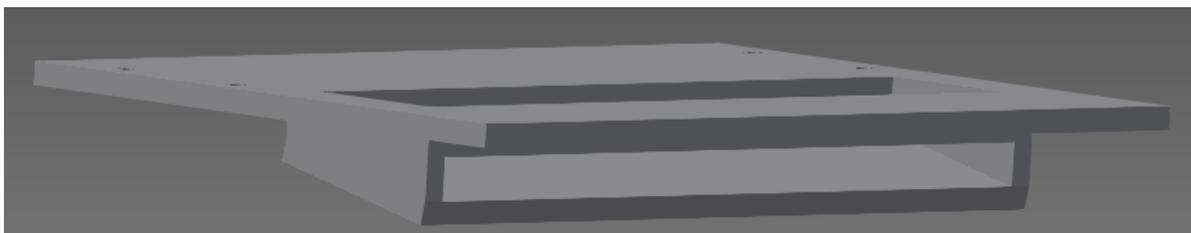


**Abbildung 36 - Abdichtung der undichten Stellen mit Klebefolie**



**Abbildung 37 - Abgedichtete Undichtigkeitsstellen**

Für eine permanente Lösung dieses Problems ist eine Erweiterung des bestehenden Systems erforderlich. Ein möglicher Lösungsweg wäre es die Aufgabe der Flüssigkeit noch stärker mittels eines Schachtes oder einer Schleuse (siehe Abbildung 38) vorzugeben.



**Abbildung 38 – Aufgabeschleuse**

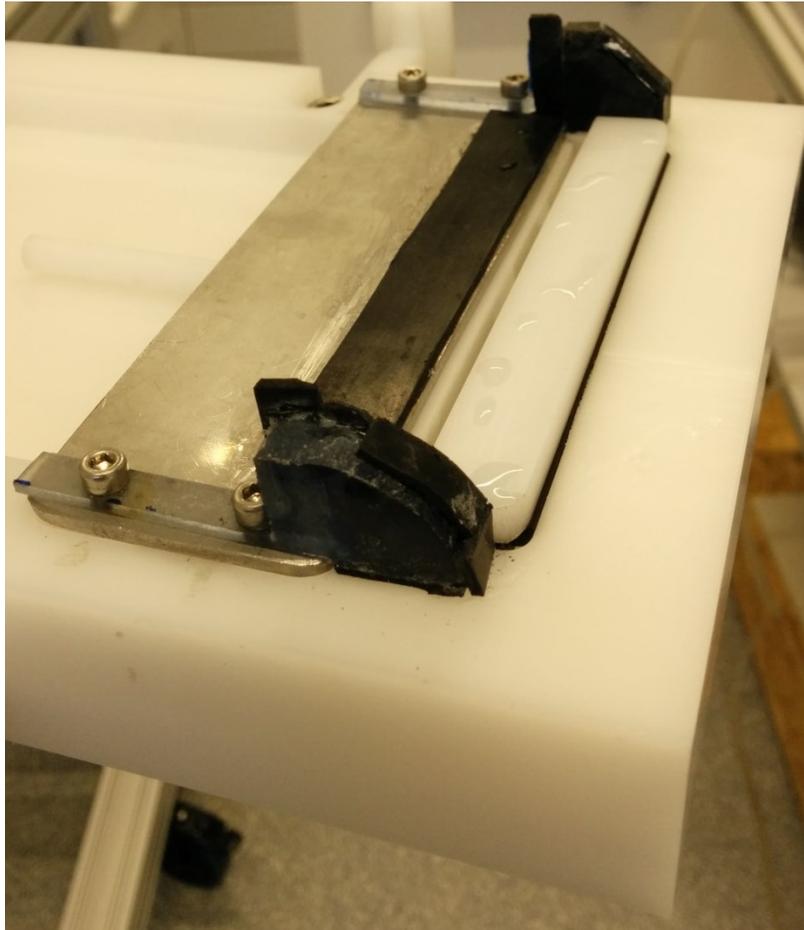
Dieses Bauteil würde auf der Unterseite des Halterungssystems für die Schieber mit mehreren Schrauben befestigt werden. Dadurch könnten die Undichtigkeitsstellen behoben und die Aufgabe des Versuchsfluides besser vorgegeben werden. Jedoch würde

dies bedeuten, dass die Flüssigkeit unabhängig vom gewählten Neigungswinkel  $\alpha$  stets mit einem fix vorgegeben Winkel auf die Platte aufgegeben wird. Dadurch würde, abhängig vom Unterschied dieser zwei Winkel zueinander, mehr oder weniger starke Turbulenzen unbeabsichtigt in die Flüssigkeit induziert werden. Dies hätte einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der PIV-Messung. Aufgrund dieser Problematik wurde diese Möglichkeit verworfen und stattdessen beschlossen, mittels von Dichtungsbändern die undichten Stellen abzudichten. Um diese Dichtungsbänder an beiden Schiebern anbringen zu können, müssen diese adaptiert werden, wobei hierfür lediglich Nuten in die Schieber eingefräst werden müssen. Nach Einbau der mit Dichtungen versehenen Schieber und Versuchen mit Wasser, wobei ein Neigungswinkel von etwa  $60^\circ$  und ein Volumenstrom von 2 l/min verwendet werden, konnte die Undichtigkeit teilweise eingegrenzt werden. Jedoch sind weitere Undichtigkeitsstellen hervorgetreten, die mit Hilfe dieser Dichtungsbänder nicht abgedichtet werden können (siehe Abbildung 39).



**Abbildung 39 - Seitliche Undichtigkeitsstelle**

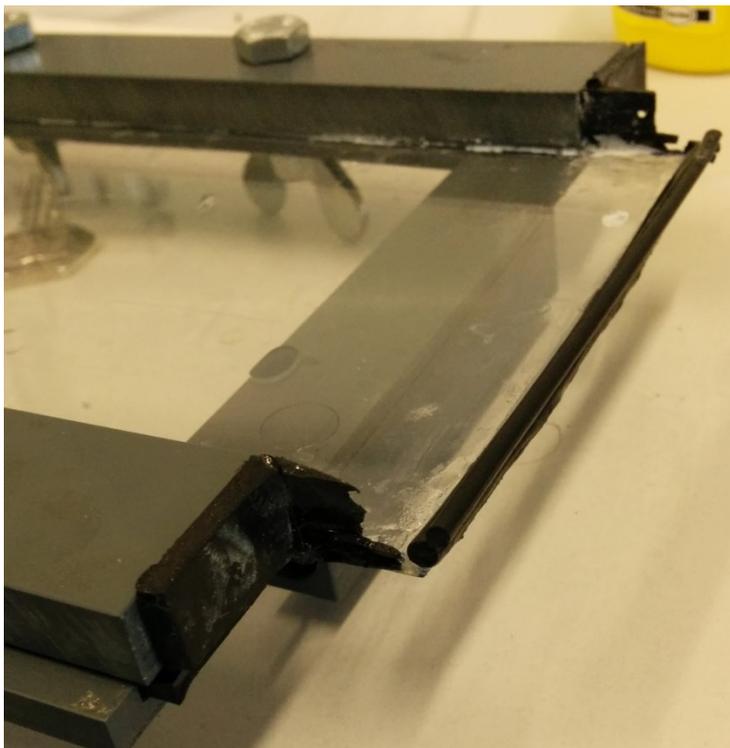
Um diese offenen Stellen zu schließen, werden zwei Stützwände aus PVC angefertigt, welche auf der jeweils der Platte zugewandten Seite mit einem großflächigem weichem Dichtmaterial ausgestattet sind und auf der Unterseite der Halterung für die Schieber befestigt werden (siehe Abbildung 40).



**Abbildung 40 - Befestigte Stützwände**

Indem sich die Platte an die abgedichteten Seiten der Wände anpresst, sollen die Stellen in Abbildung 39 geschlossen werden. Weitere Versuche mit Wasser zeigen, dass die Undichtigkeiten zum größten Teil behoben werden konnten und nur noch vereinzelte kleine Leckagen vorhanden sind. Mittels weiterer Dichtungsmaterialien können diese vereinzelten Leckagen ebenfalls entfernt werden. Jedoch mussten hierfür auf der Platte Dichtungsmaterialien befestigt werden, welche einer Keilform entsprechen, um die nötige Abdichtung zu erreichen. Dies bedeutet aber ein erschwertes Wechseln der Platte, womit eine Anforderung an den Versuchsstand nicht optimal gelöst wird. Des Weiteren zeigen Versuche bei anderen Plattenneigungswinkeln, dass wiederum vereinzelte kleine Leckagen vorhanden sind, aus denen Wasser tropfenförmig austritt. Außerdem fließt

Wasser bei der Austrittsöffnung der Halterung teilweise nicht auf die Platte, sondern hinten an dieser vorbei. Der Grund hierfür liegt einerseits daran, dass die Flüssigkeit an der Unterseite der Halterung entlang fließt und andererseits, dass die obere Kante der Platte zu nahe an der Austrittsöffnung der Halterung ist. Um dieses Problem zu beheben werden Dichtungsbänder an der Kante angebracht, um eine weitere Abdichtung zwischen Platte und Halterung zu schaffen (siehe Abbildung 41).



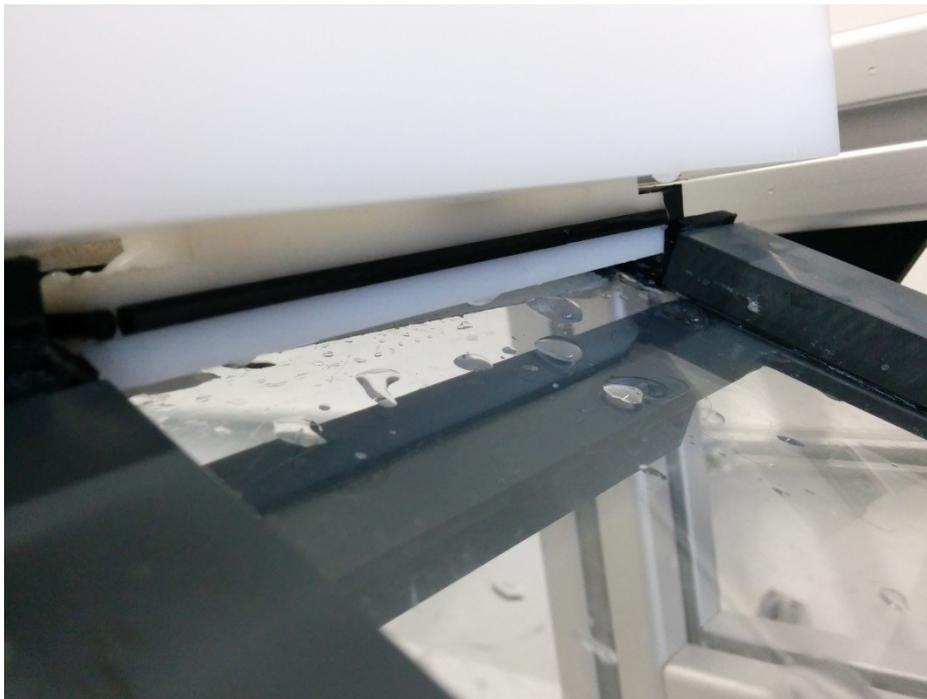
**Abbildung 41 - Dichtungsband an Platte**

Bei Versuchen stellt sich wiederum heraus, dass diese Abdichtung je nach Neigungswinkel der Platte besser oder schlechter dichtet. Diese Variabilität der Abdichtung kommt daher, dass die Lage der Platte je nach eingestelltem Neigungswinkel unterschiedlich ausfällt. Das System kann durch diesen Umstand zwar für einen eingestellten Neigungswinkel komplett abgedichtet werden. Sobald jedoch der Winkel verändert wird, sind wieder kleine Undichtigkeitsstellen vorhanden, welche mit weiterem Dichtungsmaterial erneut abgedichtet werden müssen. Dies führt dann aber dazu, dass

## Kapitel 4 - Versuchsstand

nun bei anderen Neigungswinkeln zu viel Dichtungsmaterial vorhanden ist und wieder neue Undichtigkeiten auftreten. Das System kann daher auf diese Art und Weise nie vollständig abgedichtet werden.

Bei der Durchführung von Versuchen mit Wasser, um den Einfluss des vertikalen Schiebers auf die Flüssigkeitsschichtdicke zu testen, hat sich gezeigt, dass dieser in seiner Höhe zu klein ist und nicht bis zur Platte hinunter reicht (siehe Abbildung 42).



**Abbildung 42 - Problem mit Schiebergröße**

Dies ist sowohl bei steilen, als auch bei flachen Neigungswinkeln der Fall. Grund hierfür sind vermutlich die zusätzlich angebrachten Abdichtungen an der Platte und deren Halterung, welche vorher beschrieben wurden. Diese bewirken, dass zwischen Platte und Halterung ein größerer Abstand besteht, als bei der Auslegung des vertikalen Schiebers vorgesehen war. Daher ist der vertikale Schieber mit den zusätzlichen Dichtungen in dieser Form nicht funktionsfähig.

## 5 Ausblick

Der konstruierte Versuchsstand erfüllt prinzipiell die gestellten Anforderungen und es ist möglich Versuche bei unterschiedlichen Bedingungen durchzuführen. Aufgrund der bestehenden Undichtigkeitsprobleme ist das Arbeiten jedoch weiterhin nur mit Hilfe von Klebefolie möglich und daher sehr umständlich. Nichtsdestotrotz kommt der Versuchsstand zur Untersuchung unterschiedlicher Fluide und Plattengeometrien in Zukunft zum Einsatz und soll dabei zur Sammlung von Erfahrung und Knowhow bei der Untersuchung von Rieselfilmströmungen dienen. Einzig die Funktion des vertikalen Schiebers kann aufgrund der zusätzlichen Dichtungsmaterialien in der derzeitigen Form nicht getestet werden. Um dieses Problem zu beheben, ohne den Versuchsstand in einem größeren Umfang zu verändern, gibt es zwei Möglichkeiten:

- Entfernen des angebrachten Dichtungsmaterials, um den durch diesen entstandenen zusätzlichen Abstand zu schließen. Dies würde jedoch bedeuten, dass Klebefolie über einen größeren Bereich zur Abdichtung aufgetragen werden müsste.
- Beibehaltung des Dichtungsmaterials und stattdessen Modifikation der Höhe des Schiebers, damit dieser bis zur Platte reicht. Der Schieber könnte etwa durch Aufkleben von weiterem Material erweitert werden.

Mit Hilfe einer dieser Maßnahmen könnte zumindest der Einfluss des vertikalen Schiebers auf die Flüssigkeitsschichtdicke getestet und für weitere Versuche berücksichtigt werden.

Im Folgenden soll der konstruierte Versuchsstand nochmals kritisch betrachtet und mögliche alternative Denkansätze und Konstruktionsmöglichkeiten für einen neuen Versuchsstand genannt werden:

Die Undichtigkeiten im System stellen mit Abstand die größte Problematik mit dem Versuchsstand dar. Diese treten vor allem im Bereich der Flüssigkeitsaufgabe auf, womit es nahe liegt bei der Konstruktion auf diese besonders zu achten. Das konstruierte Schiebersystem hat ebenfalls zur Undichtigkeit im Bereich der Aufgabe beigetragen und

sich in der Praxis als umständlich herausgestellt. Eine Möglichkeit, um eine vollständige Abdichtung des Versuchsstandes zu gewährleisten, wäre die gesamte Auflage der Platte in Form eines Kastens abzuschließen oder umzukonstruieren, wobei nur das untere Ende beim Flüssigkeitsaustritt offen wäre. Das obere Ende, an welchem die Aufgabe der Flüssigkeit auf die Platte abläuft, wäre vollständig abgeschlossen. Die Flüssigkeitsaufgabe könnte stattdessen durch eine Öffnung an der Decke des Kastens erfolgen, in welche ein Aufgabebehälter hineinragt. Da sich die Lage der Öffnung je nach Neigungswinkel etwas unterscheidet, müsste der Aufgabebehälter in seiner Lage horizontal und vertikal verstellbar sein. Bei dieser Aufgabemethode würde die Flüssigkeit zusätzliche Turbulenzen erfahren, falls der Behälter nicht nahe genug zur Platte geführt werden kann, womit die Messung der Fluidodynamik beeinflusst werden könnte. Daher wäre es sinnvoll die Platte länger zu gestalten, damit die Flüssigkeit entsprechend Zeit hat, um einen vollständigen Rieselfilm ausbilden zu können. Das Einsetzen der Platte in diese Kastenform könnte so funktionieren, dass die Platte an einer Seite des Kastens in einen vorgefertigten Schlitz eingesetzt wird. Falls diese Methodik zu teuer oder umständlich in der Fertigung ist, könnte die Unterseite der Kastenform über eine abmontierbare Unterplatte verfügen. Die Platte könnte dann im Kasten platziert und wieder geschlossen werden. Bei beiden Methoden müsste dabei auf die notwendige Abdichtung, der Ecken, Kanten und Bohrlöcher geachtet werden. Ein neues Schiebersystem könnte in der Kastenform integriert werden, welches normal zu der Platte und in einem entsprechenden Abstand vor dem Messfeld der Kamera eingebaut werden müsste. Es müsste dennoch auch weit genug entfernt sein, um die Aufgabe der Flüssigkeit nicht zu beeinträchtigen. Damit könnten auf der Platte prinzipiell drei unterschiedliche Bereiche - Aufgabe, Glättung, Messung - definiert werden. Ist kann davon ausgegangen werden, dass es im Bereich der Glättung zum Aufstauen der Flüssigkeit kommen kann, wenn mit dem Schieber ein entsprechender kleiner Spalt eingestellt wird. Wird jedoch in allen Bereichen entlang der Platte und der gesamten Kastenform auf eine ausreichende Abdichtung geachtet, sollte dies kein Problem darstellen. Bei der Einstellung des Neigungswinkels mit dem Versuchsstand gab es keine großen Probleme, weshalb dieses System übernommen werden kann. Die Auslegung der

Behälter in ihrer Form und Größe, kann nochmals überdacht werden. Denn der Aufgabebehälter könnte ohne weiteres etwas kleiner gestaltet werden, da dieser zu groß dimensioniert wurde. Der Relaxationsbehälter und das Lochblech haben in der Praxis nicht den gewünschten Effekt einer gleichmäßigen Verteilung im Aufgabebehälter bewirkt, sondern diese stattdessen meist verschlechtert. Daher könnten diese neu überdacht oder völlig beiseitegelassen werden. Stattdessen könnte die Befestigung und Anordnung des Schlauches am Aufgabebehälter für eine effektivere Verteilung der Flüssigkeit konzipiert werden. Die Bauform des Auffangbehälters hat den gewünschten Effekt erzielt, da kein Absetzen von Tracer-Partikeln beobachtet werden konnte. Lediglich das Fassungsvermögen könnte erhöht werden, da dieses für höhere Volumenströme zwar ausreichend, aber dennoch knapp bemessen wurde.

## 6 Zusammenfassung

Rieselfilme sind Filmströmungen auf geneigten Oberflächen aufgrund der Schwerkraft, wobei eine Gas- und eine Flüssigphase in Kontakt stehen. In technischen Anwendungen, wie Packungskolonnen, werden die beiden Phasen meist im Gegenstromprinzip zueinander geführt. Die auf den Packungen entstehenden Filmströmungen zeichnen sich durch eine hohe Austauschfläche bei geringer Schichtdicke auf, weshalb die notwendigen Volumenströme relativ gering sind. Die Einteilung der Strömungen erfolgt nach ihrer Turbulenz in die Bereiche laminar, quasi laminar und turbulent. Für die Untersuchung dieser Filmströmungen werden Versuchsfluide entlang einer geneigten Platte mit Hilfe von unterschiedlichen Messmethoden untersucht. Mittels der Particle Image Velocimetry-Methode (PIV) kann etwa das Geschwindigkeitsfeld der Strömung näher betrachtet werden. Die sich ausbildende Filmströmung ist von mehreren Parametern, wie der Viskosität der Flüssigkeit, dem gewählten Volumenstrom oder der Struktur der Plattenoberfläche, abhängig. Erst wenige Arbeiten haben sich mit den Einflüssen von Makro- und Mikrostrukturen auf die Wellenbildung bei Rieselfilmen befasst. Meist wurden ebenfalls nur einige wenige Plattenneigungswinkel und bestimmte Versuchsfluide untersucht. Daher ist es Ziel dieser Arbeit einen Versuchsstand zu konstruieren, welcher unterschiedliche Anforderungen erfüllt. Zum einen soll die Möglichkeit bestehen den Neigungswinkel  $\alpha$  der Platte variabel über einen möglichst großen Bereich einstellen zu können. Zum anderen soll die Flüssigkeitsaufgabe unter möglichst geringer Induzierung von Turbulenzen erfolgen, sowie die Möglichkeit bieten die Filmschichtdicke vorzugeben. Des Weiteren soll die zu verwendende Platte auswechselbar sein und so auch die Verwendung verschiedener Platten hinsichtlich von Material, Dicke und Oberflächenstruktur ermöglichen. Außerdem ist dem Absetzen von Tracer-Partikeln zu minimieren, weshalb die Behälter entsprechend konstruiert werden müssen. Für diesen Zweck wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, um Versuchsanlagen vorangegangener Forschungsarbeiten zu analysieren. Die Konstruktion des Versuchsstands erfolgte mit „Autodesk Inventor Professional 2014“ und erlaubte es die Funktionalitäten der Anlage virtuell vorab zu testen. Mit dem angefertigten Versuchsstand

konnten anschließend Testdurchläufe durchgeführt werden, bei denen sich einige Probleme bei der Versuchsdurchführung zeigten. Probleme mit Undichtigkeiten waren dabei am kritischsten zu betrachten, da die Flüssigkeit mit Tracer-Partikeln beaufschlagt ist und so die Messung der Geschwindigkeitsverteilung entschieden beeinflusst wird. Die Schieber werden mit Dichtungsbändern versehen, um Undichtigkeiten zu beheben. Des Weiteren werden zusätzliche Dichtungen an der Platte und deren Auflage angebracht, um den Bereich der Flüssigkeitsaufgabe abzudichten. Mittels dieser Maßnahmen war es jedoch nicht möglich die Undichtigkeiten zu beheben. Außerdem ist der vertikale Schieber nicht mehr funktionsfähig, da dieser aufgrund des zusätzlichen Dichtungsmaterials nicht mehr bis zur Platte hinunter reicht. Aufgrund der noch immer bestehenden Probleme mit Undichtigkeiten und dem Entstehen von neuen Problemen bei dem Versuch diese zu beheben, werden keine weiteren Maßnahmen mehr durchgeführt. Der Versuchsstand wird dennoch für kommende Versuche eingesetzt und für diese Zwecke entsprechend mit Klebefolie abgedichtet. Die dabei gesammelten Erfahrungen sollen für die Konstruktion eines neuen Versuchsstandes herangezogen werden.

## 7 Verzeichnisse

### 7.1 Literatur

1. Gmehling, J. & Brehm, A.: Grundoperationen - Lehrbuch der Technischen Chemie, Thieme Verlag, Band 2, Stuttgart 2001
2. Ausner, I.: Experimentelle Untersuchungen mehrphasiger Filmströmungen, Dissertation, TU Berlin, 2006
3. Brauer, H.: Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmung, Sauerländer Verlag, Aarau, 1971
4. Hoffmann, A., Ausner, I., Repke, J.-U. & Wozny, G.: Aufreißende Filmströmung auf geneigten Oberflächen, Chemie Ingenieur Technik, Band 76 (8), S. 1065-1068, Berlin, 2004
5. Nußelt, W.: Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes, VDI-Z, Band 60 (27), S. 541-546, 1916
6. Ishigai, S., Nakanisi, S., Koizumi, T. & Oyabi, Z.: Hydrodynamics and heat transfer of vertical falling liquid films, Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers, Band 15, S. 594-602, 1972
7. Al-Sibai, F.: Experimentelle Untersuchung der Strömungscharakteristik und des Wärmeübergangs bei welligen Rieselfilmen, Dissertation, RWTH Aachen, 2004
8. VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen: VDI-Wärmeatlas, Springer Verlag, Band 11, Düsseldorf, 2013
9. Weise, F.: Experimentelle Untersuchungen zur Strömung und Wärmeübertragung von Reinstoff-Fallfilmen mit hohen Prandtl-Zahlen, Cuvillier, Band 1, 2007
10. Paschke, S.: Experimentelle Analyse ein- und zweiphasiger Filmströmungen auf glatten und strukturierten Oberflächen, Dissertation, TU Berlin, 2011
11. Kraume, M.: Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik - Grundlagen und apparative Umsetzungen, Springer Verlag, 1.Auflage, 2003

12. Banerjee, S., Rhodes, R. & Scott, D. S.: Mass transfer to falling wavy liquid films at low Reynolds numbers, *Chemical Engineering Science*, Band 22 (1), S. 43-48, 1967
13. Roberts, R. M. & Chang, H.-C.: Wave-enhanced interfacial transfer, *Chemical Engineering Science*, Band 55 (6), S. 1127-1141, 2000
14. Park, C. D. & Nosoko, T.: Three-dimensional wave dynamics on a falling film and associated mass transfer, *AIChE J*, Band 49 (11), S. 2715-2727, 2003
15. RVT Process Equipment GmbH, Broschüre über Strukturierte Packungen, URL: [http://rvtpe.de/wp-content/uploads/2013/06/RVT\\_Strukturierte\\_Packungen\\_130416.pdf](http://rvtpe.de/wp-content/uploads/2013/06/RVT_Strukturierte_Packungen_130416.pdf), März 2014
16. Alekseenko, S. V., Markovich, D.M., Evseev, A.R., Bobylev, A.V., Tarasov, B.V., Karsten, V.M.: Experimental investigation of liquid distribution over structured packing, *AIChE J*, Band 54, S. 1424-1430, 2008
17. Olujic, Z., Jödecke, M., Shilkin, A., Schuch, G., Kaibel, B.: Equipment improvement trends in distillation, *Chemical Engineering and Processing*, Band 48 (6), S. 1089-1104, 2009
18. Pluss, R.: Regular packing element of a thin foil-like material for mass transfer and heat exchange columns, Patent, 1991
19. Kohrt, M.: Experimentelle Untersuchung von Stofftransport und Fluidodynamik bei Rieselfilmströmungen auf mikrostrukturierten Oberflächen, Dissertation, TU Berlin, 2012
20. Kohrt, M., Ausner, I., Repke, J.-U.: Experimental investigation on the effect of packing material textures on the liquid-side mass transfer, *Distillation and Absorption*, S. 593-598 2010
21. Zhao, L., Cerro, R. L.: Experimental characterization of viscous film flows over complex surfaces, *International Journal of Multiphase Flow*, Band 18 (4), S. 495-516, 1992
22. Argyriadi, K., Vlachogiannis, M., Bontozoglou, V.: Experimental study of inclined film flow along periodic corrugations: The effect of wall steepness, *Physics of Fluids*, Band 18 (1), S. 15, 2006

23. Moran, K. L. M.: Experimental study of laminar liquid films falling on an inclined plate, Dissertation, University of Toronto, 1997
24. Dietze, G. F.: Flow Separation in Falling Liquid Films, Dissertation, RWTH Aachen, 2010
25. Albrecht, H.-E., Borys, M., Damaschke, N., Tropeca, C.: Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques, Springer Verlag, Berlin, 2003
26. Schultes, M.: Raschig Super-Pak - A new packing structure with innovative advantages, Chemie Ingenieur Technik, Band 80 (7), S. 927-933, 2008
27. Wegleitner, A.: Laseroptische Fallfilmuntersuchungen, Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben, 2014
28. Davies, J. T., Warner, K. V.: The effect of large-scale roughness in promoting gas absorption, Chemical Engineering Science, Band 24 (2), S. 231-240, 1969
29. Davies, J. T., Lozano, F. J.: Turbulence characteristics and mass transfer at air-water surfaces, AIChE, Band 25 (3), S. 405-415, 1979
30. Shetty, S., Cerro, R. L.: Flow of a thin film over a periodic surface, International Journal of Multiphase Flow, Band 19 (6), S. 1013-1027, 1993
31. Shetty, S. A., Cerro, R. L.: Spreading of a liquid point source over a complex surface, Ind. Eng. Chem. Res., Band 37 (2), S. 626-635, 1998
32. Wierschem, A., Bontozoglou, V., Heining, C., Uecker, H., Aksel, N.: Linear resonance in viscous films on inclined wavy planes, International Journal of Multiphase Flow, Band 34 (6), S. 580-589, 2008
33. Wierschem, A., Pollak, T., Heining, C., Aksel, N.: Suppression of eddies in films over topography, Physics of Fluids, Band 22 (11), S. 8, 2010
34. Wierschem, A., Scholle, M., Aksel, N.: Vortices in film flow over strongly undulated bottom profiles at low Reynolds numbers, Physics of Fluids, Band 15 (2), S. 426-435, 2003

35. Scholle, M., Haas, A., Aksel, N., Wilson, M.C.T., Thompson, H.M., Gaskell, P.H.: Competing geometric and inertial effects on local flow structure in thick gravity-driven fluid films, *Physics of Fluids*, Band 20 (12), S. 10, 2008
36. Ataki, A.: *Wetting of Structured Packing Elements - CFD and Experiment*, Dissertation, TU Kaiserslauten, 2006
37. Ataki, A., Kolb, P., Bühlmann, U.: *Wetting performance and pressure drop of structured packings: CFD and experiment*, IChemE, Symposium Serie NO. 152, S. 534-543, 2006
38. Dressaire, E., Courbin, L., Crest, J., Stone, H. A.: *Inertia dominated thin-film flows over microdecorated surfaces*, *Physics of Fluids*, Band 22 (7), S. 13, 2010

## 7.2 Tabellen

Tabelle 1 - Strömungsregime von Filmströmungen nach Ishigai [6] und Al-Sibai [7].....	6
Tabelle 2 - Bisherige Untersuchungen auf 2D-Mikrostrukturen hinsichtlich der Fluidodynamik [19] .....	13
Tabelle 3 - Bisherige Untersuchungen auf 3D-Mikrostrukturen hinsichtlich der Fluidodynamik [19] .....	14
Tabelle 4 - Übersicht der Recherche .....	17
Tabelle 5 - Stoffdaten der von Kohrt verwendeten Silikonöle bei 28,5 °C und 1 atm [19] .....	40
Tabelle 6 - Übersicht über Plattengeometrien in den Forschungsarbeiten .....	41
Tabelle 7 - Anforderungen an den Versuchsstand .....	44
Tabelle 8 - Übersicht der ausgewählten Materialien .....	53
Tabelle 9 - Abschätzung des Volumenstromes für $v = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$ .....	56
Tabelle 10 - Volumina der Behälter .....	57

### 7.3 Abbildungen

Abbildung 1 - Einteilung der Strömungsregime mit Hilfe der Reynolds-Zahl [3] .....	2
Abbildung 2 - Rinnsalströmung [4].....	3
Abbildung 3 - Geschwindigkeits- und Konzentrationsprofil der zwei Annahmen in der Flüssigphase (links Annahme 1, rechts Annahme 2) [11].....	7
Abbildung 4 - Wasserfallfilme ohne und mit pulsierter Strömung (von links nach rechts): natürlich $Re= 32$ ; $Re= 20,9$ & $\omega= 19$ Hz; $Re= 40,8$ & $\omega= 19,1$ Hz; $Re= 59,3$ & $\omega= 17$ Hz	9
Abbildung 5 - Typische Bauformen von technischen Packungen [11] .....	10
Abbildung 6 - Strukturierte Metallpackung „RMP S250Y“ der Firma RVT PE in detaillierter Ansicht [15].....	11
Abbildung 7 - Schematischer Versuchsaufbau, Moran [23].....	19
Abbildung 8 - Schematischer Versuchsaufbau, Al-Sibai [7].....	21
Abbildung 9 - Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus, Ausner [2] .....	24
Abbildung 10 - Versuchsstand für Vermessung von Fallfilmströmung [24].....	27
Abbildung 11 - Schema der Messsystemeinrichtung des zweiten Versuchsaufbaus, Dietze [24] .....	28
Abbildung 12 - Schema des Versuchsstandes von Paschke [10].....	30
Abbildung 13 - Halterungssystem und Dimension der verwendeten Platte, sowie Größe des Messbereiches [10].....	32
Abbildung 14 - Aufbau des Versuchsstandes von Paschke [10].....	33
Abbildung 15 – Gegenstrommesszelle [10] .....	34
Abbildung 16 - Schematische Herangehensweise bei der konventionellen und der neuen Messmethodik [10] .....	35
Abbildung 17 - Aufbau für Absorptionsmessung [19].....	37
Abbildung 18 – Messaufbau für $\mu$ PIV-Geschwindigkeitsmessung [19].....	38
Abbildung 19 - Fixierung der Platten [19].....	39
Abbildung 20 - Auflage für Platte .....	45
Abbildung 21 - Auffangbehälter .....	46
Abbildung 22 - Aufgabebehälter mit Lochblech und Relaxationsbehälter.....	47

Abbildung 23 - Halterungssystem für die Schieber .....	49
Abbildung 24 - Seitenansicht des Halterungssystems mit eingesetzten Schiebern .....	49
Abbildung 25 - Horizontaler und vertikaler Schieber .....	51
Abbildung 26 - Konzept des Versuchsstandes in Autodesk Inventor Professional 2014 .....	52
Abbildung 27 - Fertiges Grundgerüst mit noch nicht eingesetzten Komponenten .....	58
Abbildung 28 - Fertig zusammengestellter Versuchsstand .....	59
Abbildung 29 - Frontansicht des Versuchsstands .....	60
Abbildung 30 - Vertikaler Schieber .....	61
Abbildung 31 - Ausgangsposition der Schieber .....	62
Abbildung 32 - Vollständig ausgefahrene Schieber .....	62
Abbildung 33 - Versuchsstand in Betrieb mit Wasser als Fluid .....	63
Abbildung 34 - Versuchsaufbau des Testdurchlaufs [27] .....	64
Abbildung 35 - Ergebnis der PIV-Messung [27] .....	66
Abbildung 36 - Abdichtung der undichten Stellen mit Klebefolie .....	67
Abbildung 37 - Abgedichtete Undichtigkeitsstellen .....	68
Abbildung 38 – Aufgabeschleuse .....	68
Abbildung 39 - Seitliche Undichtigkeitsstelle .....	70
Abbildung 40 - Befestigte Stützwände .....	71
Abbildung 41 - Dichtungsband an Platte .....	72
Abbildung 42 - Problem mit Schiebergröße .....	73