

Der erste Teil der Arbeit befasste sich mit der Entwicklung geeigneter zeitlich und örtlich hochauflösender Messverfahren. So wurde ein Messverfahren auf der Grundlage der Fluoreszenz-Intensitäts-Methode entwickelt, das in der Lage ist, die Filmdicke und die Wellengeschwindigkeit mit hoher zeitlicher Auflösung simultan zu bestimmen.

Im zweiten Teil der Arbeit wurden Messungen der Filmgeschwindigkeit an periodisch angeregten zweidimensional-welligen Filmen mit der Particle-Image-Velocimetry (PIV) durchgeführt. Durch Messungen der Wandtemperaturverteilung mit einem eigens entwickelten Messverfahren auf der Grundlage der Infrarot-Thermografie konnte der Einfluss der Welligkeit auf die Wärmeübertragung im laminar-welligen Strömungsbereich untersucht werden.

Aus den experimentellen Ergebnissen laminar-welliger und turbulenter Filme wurden dimensionslose Nährungsgleichungen für verschiedene Parameter zur Beschreibung der Rieselfilmströmung wie der Filmdicke, Wellenfrequenz und Wellengeschwindigkeit ermittelt, und bestehende Klassifizierungen unterschiedlicher Welligkeiten und Strömungszustände mit den eigenen Messungen bei unterschiedlichen Kapitza-Zahlen verglichen.

Dimension aufgeführt

Nr.	Name	Dimension
unabhängige Größen		
1	Auf Filmbreite bezogener Volumenstrom	L^2/t
2	Neigungswinkel	1
3	Fallbeschleunigung	L/t^2
4	kinematische Viskosität	L^2/t
5	Dichte	$(F t^2)/L^4$
6	Oberflächenspannung	F/L
7	Wärmeleitfähigkeit	$F/(t T)$
8	spezifische Wärmekapazität	$L^2/(t^2 T)$
9	Heizleistung	$(F L)/t$
abhängige Größen		
1	Filmbreite	L
2	Wellenlänge	L
3	Wellengeschwindigkeit	L/t
4	Wellenfrequenz	$1/t$
5	Filmstärke	L
6	minimale Filmstärke	L
7	mittlere Filmstärke	L
8	maximale Filmstärke	L
9	Residualfilmstärke	L
10	Temperaturdifferenz	T

Tabelle 2.1: Abhängige und unabhängige Parameter der Rieselfilmströmung

Die neun unabhängigen Größen führen zusammen mit den vier Dimensionen [F, L, t, T] nach dem Π -Theorem von Buckingham (1914) auf fünf dimensionslose Film-Kennzahlen und zwar die Reynolds-Zahl, Prandtl-Zahl, Kapitza-Zahl, Nußelt-Zahl und dem Kosinus des Neigungswinkel.

Des Weiteren können mit den abhängigen Größen weitere dimensionslose Film-Kennzahlen wie der Froude-Zahl, Strouhal-Zahl sowie verschiedene dimensionslose

Filmdicken gebildet werden. Eine Übersicht aller gebräuchlichen Film-Kennzahlen sowie deren Definition ist in der anschließenden Tabelle zusammengestellt.

Name	Formel	
Reynolds-Zahl	$Re \equiv \frac{\dot{m}}{b\eta}$	Verhältnis von Trägheits- zu Reibungskräften
Kapitza-Zahl	$Ka \equiv \frac{\rho\sigma^3}{g\eta^4}$	Stoffwerte
Prandtl-Zahl	$Pr \equiv \frac{\eta c_p}{\lambda}$	Verknüpft das Temperaturfeld mit dem Strömungsfeld
Nußelt-Zahl	$Nu \equiv \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \left(\frac{v^2}{g}\right)^{1/3}$	Wärmeübergang
Froude-Zahl	$Fr \equiv \frac{\dot{V}^2}{\cos(\varphi)b^2 g\delta_m^3}$	Verhältnis von Trägheits- zu Schwerekräften
Strouhal-Zahl	$Sr \equiv \frac{f_w \delta_{\max}}{U}$	Frequenz der charakteristischen Länge
dimensionslose Filmdicke	$\delta_x^+ = \delta_x \cdot \left(\frac{g \sin(\varphi)}{v^2}\right)^{1/3}$	$x = \min, r, m, \max$

Tabelle 2.2: Tabelle der verwendeten Filmkennzahlen

2.2 Der glatte Film

Die laminare Filmströmung mit glatter Oberfläche kann mit der Wasserhaut-Theorie von Nußelt (1916) ausreichend genau beschrieben werden, solange von einer glatten schubspannungsfreien Oberfläche ausgegangen wird. Dieser Strömungszustand tritt in der Realität aber nur bei sehr kleinen Reynolds-Zahlen auf. Ishigai et al. (1972) geben dazu eine obere Grenze an, die anhand der Analyse von Oberflächenstörungen an wässrigen Lösungen experimentell ermittelt wurde zu:

$$Re \leq 0,47 \cdot Ka^{0,1} \text{ (glatter Film)} \quad (2.1)$$

In ihrer Arbeit betrachteten Ishigai et al. nur senkrechte Wasserfilme und stützten ihre Aussagen auf die Ergebnisse von Brauer (1956), sodass noch zu klären ist, inwieweit diese Grenze auch auf geneigte und andere Filmfluide anwendbar ist.

2.3 Der wellige Film

Schon bei verhältnismäßig kleinen Reynolds-Zahlen bilden sich bei der laminaren Filmströmung zunächst sinus-förmige Wellen und später Wellen mit ausgeprägten Amplituden und Residualfilmbereichen. In Abbildung 2.2 sind die verschiedenen Filmkonturen dargestellt.

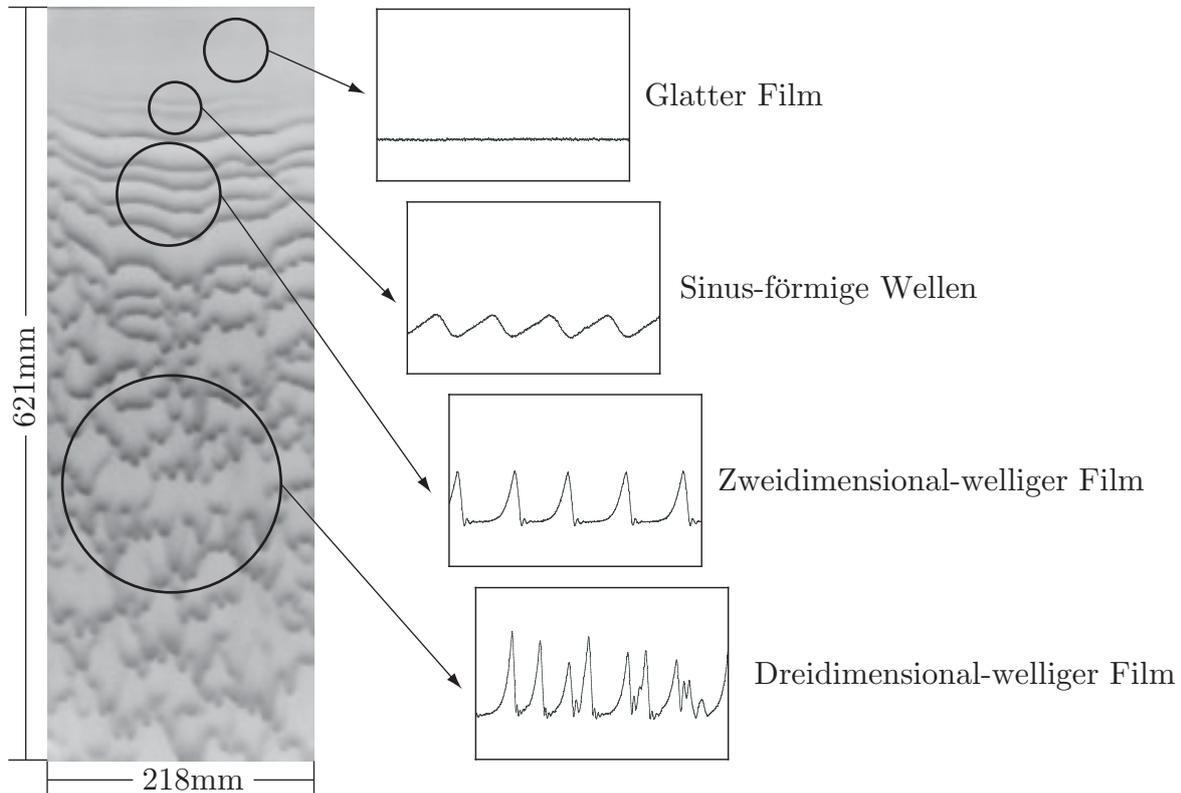


Abb. 2.2: Unterschiedliche Filmkonturen bei der Filmströmung

Man erkennt, dass die Filmoberfläche nur im Einlaufbereich glatt ist. Danach bilden sich zunächst sinus-förmige horizontale Wellen und später horizontale Wellenfronten mit ausgeprägter Amplitude aus. Diese Wellenstruktur wird allgemein als zweidimensional-wellig bezeichnet.

Im weiteren Verlauf entwickeln sich aus kleinsten Störungen der Filmströmung V-förmige Wellenfronten, die zu Wellen mit unterschiedlicher Amplitude und Wellengeschwindigkeit werden. Diese so genannte dreidimensional-wellige Filmströmung ist weiterhin laminar und bildet nach Ishigai et al. (1972) zusammen mit der zweidimensional-welligen Filmströmung den stabil welligen Bereich, welcher als Funktion der Kapitza-Zahl ausgedrückt werden kann.

$$2,2 \cdot Ka^{0,1} \leq Re \leq 75 \quad (\text{stabil welliger Film}) \quad (2.2)$$

Dass die Reynolds-Zahl allein nicht ausreicht, um Rieselfilm-Strömungen zu

charakterisieren, zeigt Abbildung 2.3. Dort ist der zusätzliche Einfluss der Kapitza-Zahl auf die Rieselfilmströmung anhand einer Gegenüberstellung verschiedener Rieselfilme dargestellt. Trotz gleicher Reynolds-Zahl, Bild 2.3a und 2.3b, ist die Ausprägung der V-förmigen Wellen der beiden linken Aufnahmen (Bild 2.3a) unterschiedlich. Eine größere Ähnlichkeit der Strömung ist dagegen bei den Aufnahmen mit unterschiedlicher Reynolds-Zahl und Kapitza-Zahl, Bild 2.3a und 2.3c, zu beobachten, obwohl aufgrund der höheren Viskosität die mittlere Filmdicke naturgemäß dicker ist.

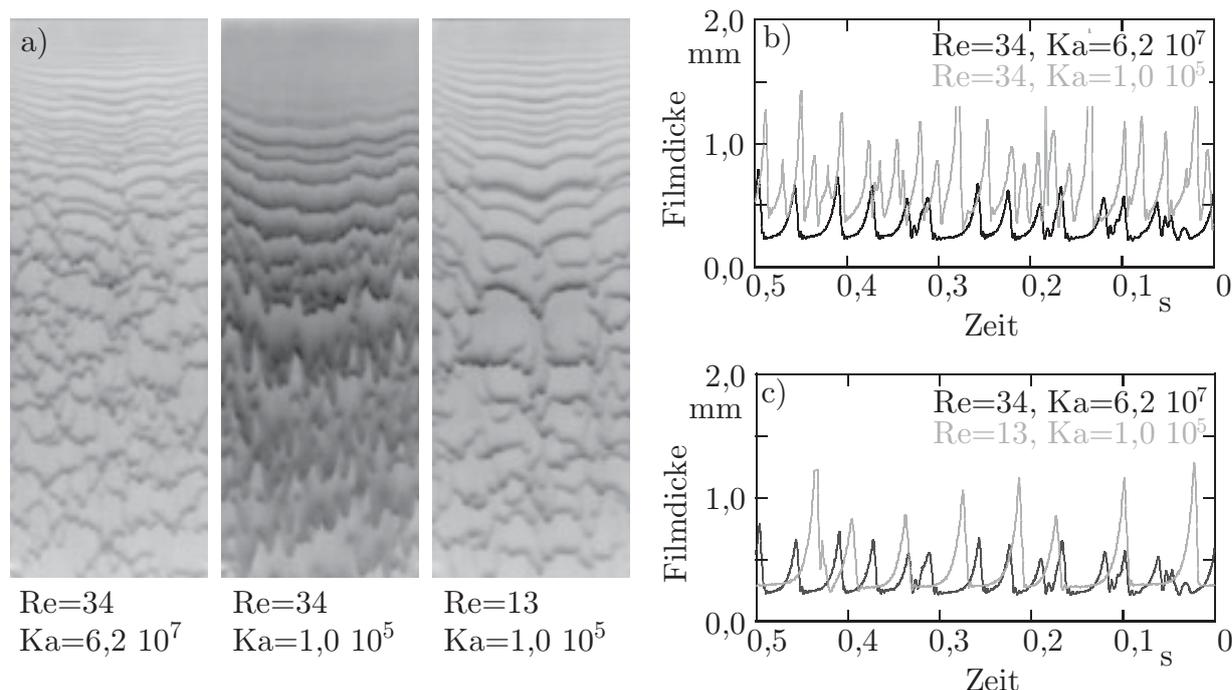


Abb. 2.3: Einfluss der Reynolds- und Kapitza-Zahl auf die Rieselfilmströmung.
a) Fluoreszenzaufnahme; b) Vergleich der Strömung bei gleicher Reynolds-Zahl; c) Ähnliche Strömung bei unterschiedlicher Reynolds-Zahl

Bei steigender Flüssigkeitsbelastung geht die laminare Strömung in den Zustand der turbulenten Filmströmung über. In der Literatur (Ishigai et al. (1972)) wird davon ausgegangen, dass dieser Übergangsbereich unabhängig von den Stoffwerten wie Oberflächenspannung und Viskosität in einem Reynolds-Zahlenbereich von $Re = 75 - 400$ liegt. Ab einer Reynolds-Zahl von $Re = 400$ bis $Re = 800$ kann die Rieselfilmströmung als vollständig turbulent betrachtet werden.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Oberflächenstruktur welliger Rieselfilmströmungen kann eine von außen durch Schallwellen dem Film aufgeprägte Anregungsfrequenz sein. In Bild 2.4 sind Fluoreszenzaufnahmen eines vertikal ablaufenden Silikonölfilms bei gleicher Reynolds-Zahl ($Re = 35$) und unterschiedlicher Anregungsfrequenz abgebildet. Man erkennt, dass eine Anregung nur in einem kleinen Frequenzbereich zur Stabilisierung

horizontaler Wellenfronten führt, in diesem Fall in den Fluoreszenzaufnahmen 2.4d und 2.4e mit $f_A = 15$ und 20 Hz.

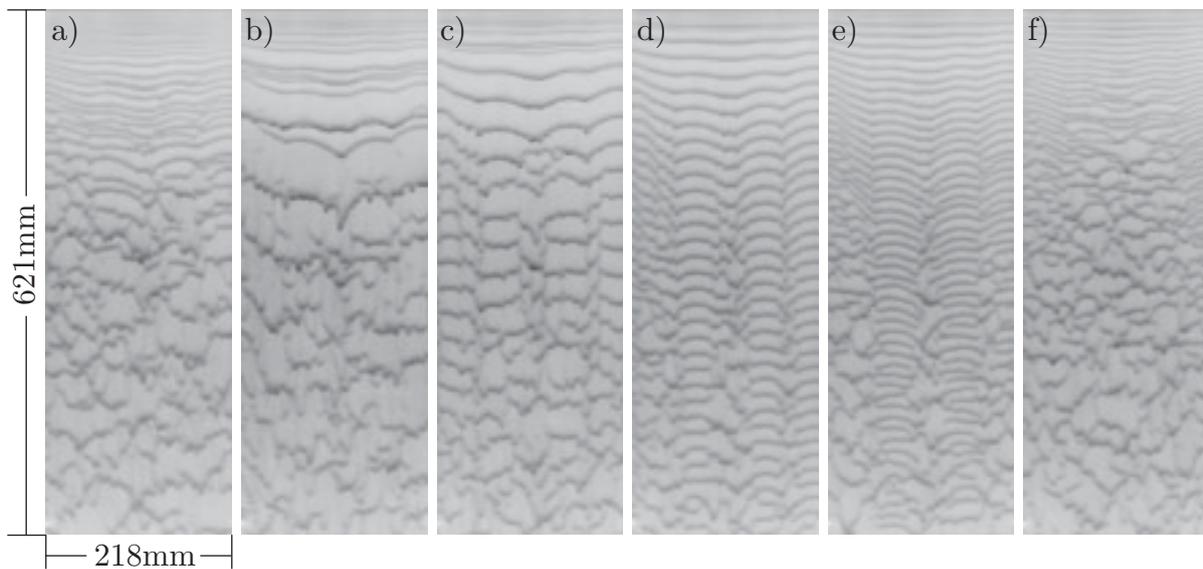


Abb. 2.4: Einfluss der Anregung auf die Rieselfilm-Strömung (DMS-T02, $Re=35$).
a) ohne Anregung ($f_A = 0$ Hz); b) $f_A = 5$ Hz; c) $f_A = 10$ Hz; d) $f_A = 15$ Hz;
e) $f_A = 20$ Hz; f) $f_A = 25$ Hz.

3 Versuchsanlagen

Für die Untersuchung von Rieselfilmen mit angeregten zweidimensionalen Wellen und ausgebildeten dreidimensionalen Wellen bis hin zum turbulenten Film wurden zwei Versuchsanlagen mit unterschiedlichen Rieselfilmstrecken und Justagemöglichkeiten entworfen und gebaut. Der wesentliche Unterschied dieser Anlagen besteht darin, dass in der Anlage 1 ein optischer Zugang von der Seite und der Rückwand der Rieselfilmstrecken für Filmgeschwindigkeitsmessungen besteht, wohingegen in der Anlage 2 für die Untersuchung des Wärmetransports eine Beheizung des Filmes in Form einer Widerstandsheizung realisiert worden ist. Des Weiteren lässt sich die Anlage 1 aus der senkrechten Position um ca. 90° neigen. Alle weiteren Anlagenkomponenten unterscheiden sich nur marginal in Größe und Art der Ausführung.

3.1 Aufbau der Anlagen

In Bild 3.1 ist der prinzipielle Aufbau der beiden Versuchsanlagen dargestellt.

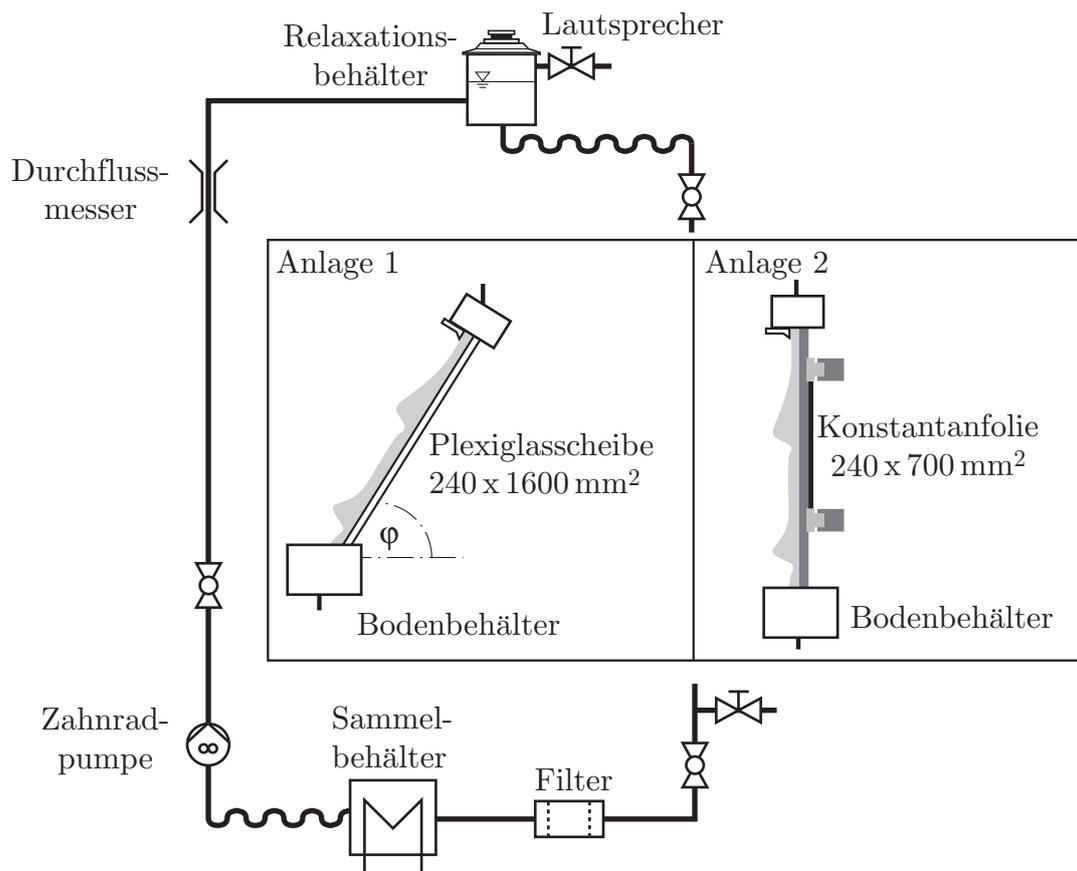


Abb. 3.1: Versuchsanlagen

Eine Zahnradpumpe fördert die Versuchsflüssigkeit in einem geschlossenen Kreislauf aus dem Bodenbehälter über einen Ovalraddurchflussmesser und einer düsenartigen Aufweitung in einen Relaxationsbehälter. Im Einlauf des Relaxationsbehälters wird der

Fluidstrom soweit verlangsamt, dass kleinere Luftbläschen aufsteigen können. Zur Erzeugung angeregter zweidimensionaler Filmwellen ist in den Deckel des Relaxationsbehälters ein Lautsprecher integriert. Dieser hat die Aufgabe, dem Fluidstrom periodische Pulse aufzuprägen, um auf die Form der Wellen Einfluss zu nehmen. Nach dem Entgasungsbehälter wird der Fluidstrom der Filmaufgabestelle zugeführt. Diese dient dazu, die Flüssigkeit gleichmäßig auf die Messstrecke zu verteilen und die anfängliche Filmdicke einzustellen. Bei der Versuchsdurchführung kann die Spaltweite je nach Film-massenstrom und Medium mit einer Mikrometerschraube zwischen 0,05 und 2 mm sehr genau eingestellt werden.

Am unteren Ende der jeweiligen Messstrecke gelangt das Filmfluid zuerst in einen Feinfilter und danach in den Sammelbehälter, in dem zur Temperierung der Flüssigkeit eine Wasser durchflossene Kupferwendel eingesetzt ist. Um Schwingungen von der Zahnraddpumpe auf die Messstrecke auszuschließen ist die Pumpe über Dämpfungselemente vom Restsystem entkoppelt.

3.1.1 Messstrecke mit optischem Zugang

Bei der Messstrecke der Anlage 1 handelt es sich um eine ebene Platte aus Acrylglas mit einer Dicke von 10 mm, einer Breite von 240 mm und einer Länge von 1600 mm. Um einen zusätzlichen optischen Zugang von der Seite in den Film zu gewährleisten, besteht die seitliche Begrenzung der Rieselfilmstrecke auch aus Acrylglas (Abbildung 4.7).

3.1.2 Beheizbare Messstrecke

Die Anlage 2 hat anstelle der Acrylglasplatte eine beheizbare Konstantanfolie mit einer Dicke von 25 μm , einer Breite von 240 mm und einer Länge von 700 mm mit den Stoffdaten nach Tabelle 3.1.

Bezeichnung		Einheit
Dichte ρ	8900	kg/m^3
Wärmeleitfähigkeit λ	23	$\text{W}/(\text{m K})$
spezifischer elektrischer Widerstand κ	2,04	$\text{m}/(\Omega \text{mm}^2)$
spez. Wärmekapazität c_p	410	$\text{J}/(\text{kg K})$

Tabelle 3.1: Eigenschaften der Widerstandfolie

Die Konstantanfolie ist am oberen und unteren Rand auf Rollen mit einem Durchmesser von 30 mm aufgespannt und an den Seitenrändern mit einem Teflonwinkel (siehe Abbildung 4.14) fixiert. Bei der Konstruktion der Messstrecke wurde darauf geachtet, dass die Folie keinen elektrischen Kontakt zu anderen Elementen der Messstrecke hat. Die