

---

# 1 Einleitung

Rieselfilme werden in industriellen Prozessen für vielfältige Anwendungen eingesetzt. Sie eignen sich aufgrund ihrer hohen Wärme- und Stoffübergangsraten besonders für Prozesse in der Energie- und Verfahrenstechnik. Große Kontaktflächen bei kleinem spezifischem Durchfluss bestimmen die klassischen Einsatzgebiete wie zum Beispiel Wärmeübertrager mit und ohne Phasenwechsel zum Heizen, Kühlen, Verdampfen und Kondensieren sowie in stoffübertragenden Apparaten wie Absorbern, Rektifikationskolonnen, Kristallisatoren und Elektrolysezellen.

Fallfilm-Verdampfer und Füllkörper-Kolonnen sind die Basiskomponenten bei der Entsalzung von Seewasser. Rieselfilm-Wärmeübertrager werden als Kondensatoren von Kühlaggregaten in der Kryotechnik genutzt, zur Kühlung von Milchprodukten in der Lebensmitteltechnik und von Schwefelsäure in der chemischen Industrie. Auch dienen Flüssigkeitsfilme an den Brennkammerwänden von Raketentriebwerken und Reaktoren als thermischer Schutz gegen lokale Überhitzungen. Bei der Oberflächenbehandlung von Metall- und Kunststoffoberflächen haben Filme verbreitet Anwendung gefunden. In diesem Fall formen ebene oder achsensymmetrische Flüssigkeitsstrahlen, die mit verschiedenen Winkeln auf eine feste Wand treffen, einen Flüssigkeitsfilm, der sich über die Oberfläche ausbreitet. Solche Verfahren werden beim Abschrecken, Säubern innerer Oberflächen in Tanks oder Rohren und beim chemischen Fräsen großflächiger Teile von Flugzeugelementen angewandt. In der Kraftwerkstechnik kommen Filmströmungen in Brennkammern mit flüssiger Ascheaustragung zum Einsatz. Außerdem wird in der Abgasnachbehandlung die Notwendigkeit für eine breite Anwendung von Filmapparaten für die Gas- und Flüssigkeitsreinigung von schädlichen Komponenten infolge strikterer Umweltbestimmungen steigen.

Bei den meisten der genannten Beispiele tritt dabei eine Verstärkung der Übergangsprozesse aufgrund von Wellenbildung und Turbulenzen auf, da die durch Wellen verursachte Konvektionsbewegung die Transporteigenschaften der Strömung entscheidend verändert. Das Verständnis der Hydrodynamik und des Wärmetransports von Rieselfilmen ist daher von grundsätzlicher Bedeutung.

Ziel der Arbeit war es dieses Verständnis zu erweitern indem verschiedene Messverfahren an die besonderen Eigenschaften der Rieselfilmströmung, wie die geringe Dicke der Flüssigkeitsschicht (etwa 0,1 bis 2 mm) und die hohen Strömungsgeschwindigkeiten (0,3 bis 2 m/s) angepasst und angewendet wurden.

Mit diesen Messverfahren wurden experimentelle Untersuchungen der Strömungscharakteristik und des Wärmetransports welliger Silikonöl-Filme bei unterschiedlichen Neigungswinkeln und Kapitza-Zahlen durchgeführt.

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  $\Pi$ -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.

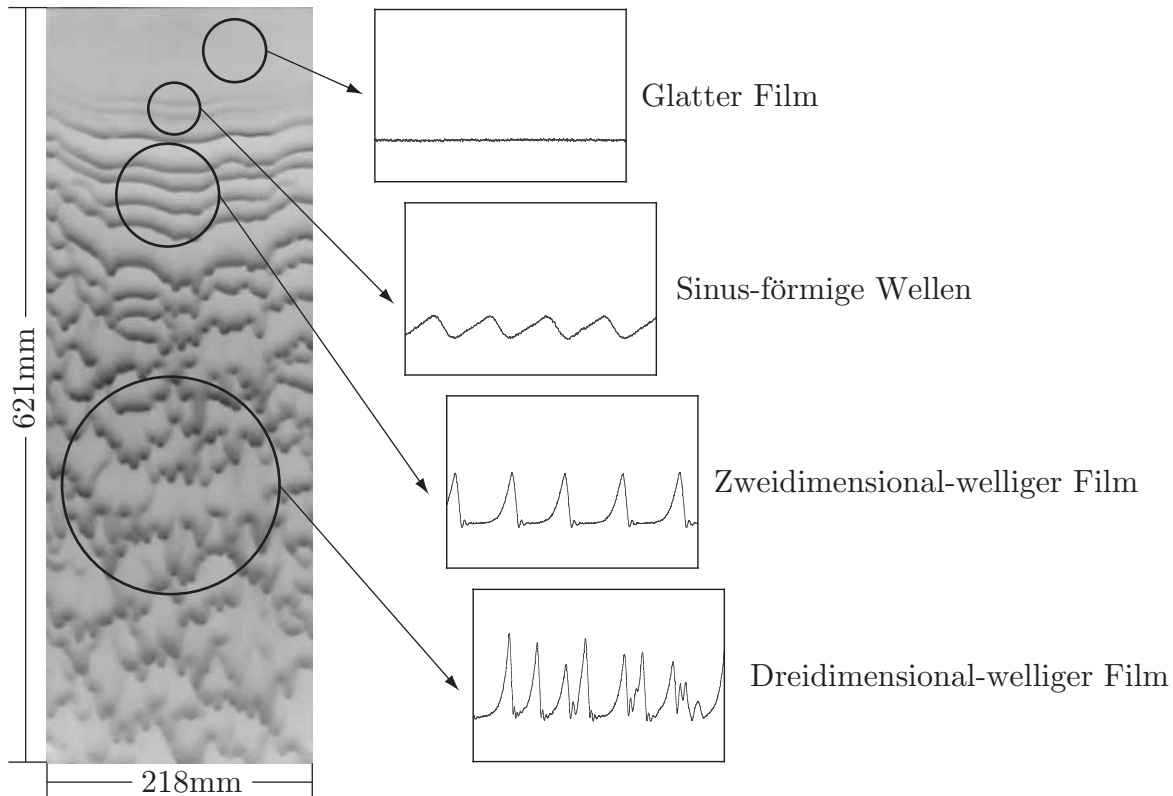


Abb. 2.2: Unterschiedliche Filmkonturen bei der Filmströmung

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.

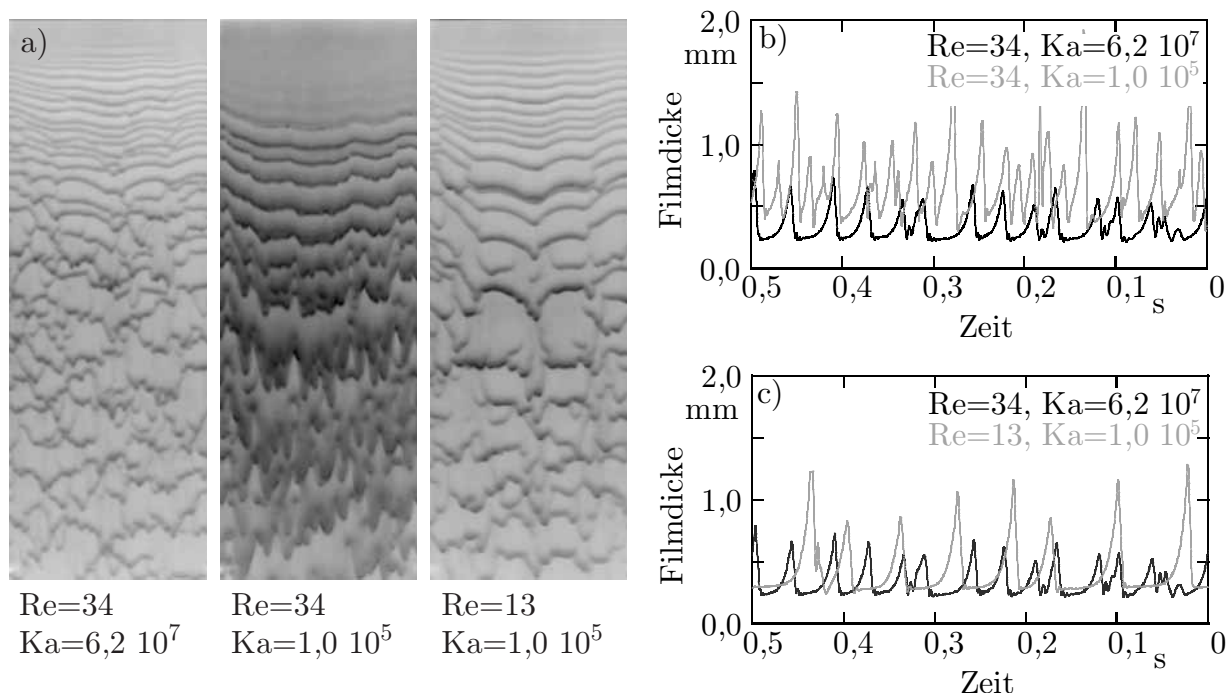


Abb. 2.3: Einfluss der Reynolds- und Kapitza-Zahl auf die Rieselfilmströmung.  
 a) Fluoreszenzaufnahme; b) Vergleich der Strömung bei gleicher Reynolds-Zahl; c) Ähnliche Strömung bei unterschiedlicher Reynolds-Zahl

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.

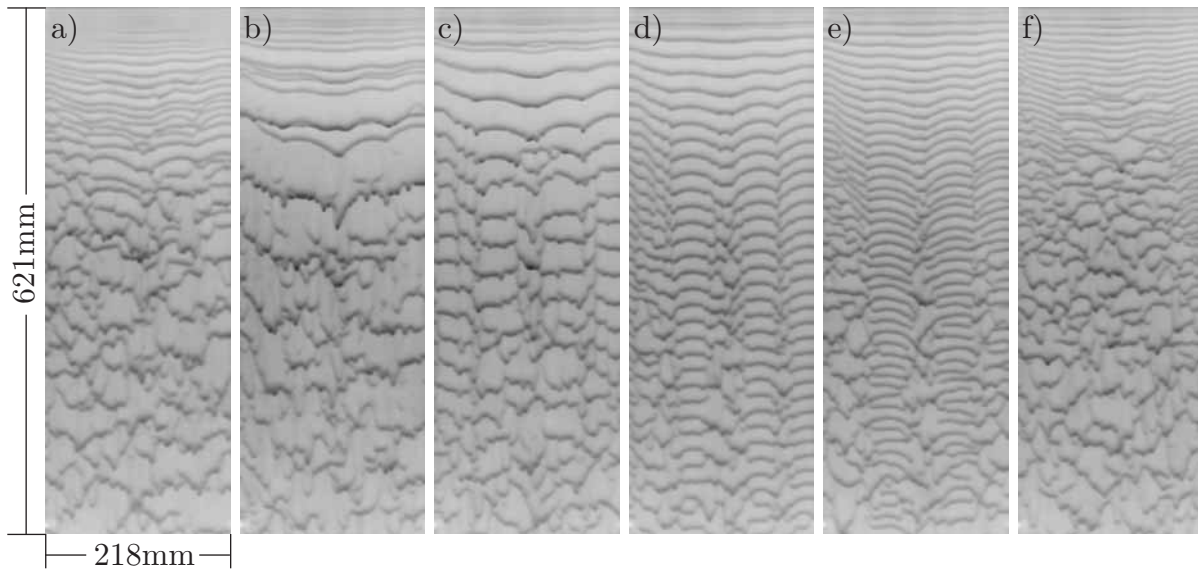


Abb. 2.4: Einfluss der Anregung auf die Rieselfilm-Strömung (DMS-T02,  $Re=35$ ).  
a) ohne Anregung ( $f_A = 0$  Hz); b)  $f_A = 5$  Hz; c)  $f_A = 10$  Hz; d)  $f_A = 15$  Hz;  
e)  $f_A = 20$  Hz; f)  $f_A = 25$  Hz.



### 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.  $90^\circ$  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.

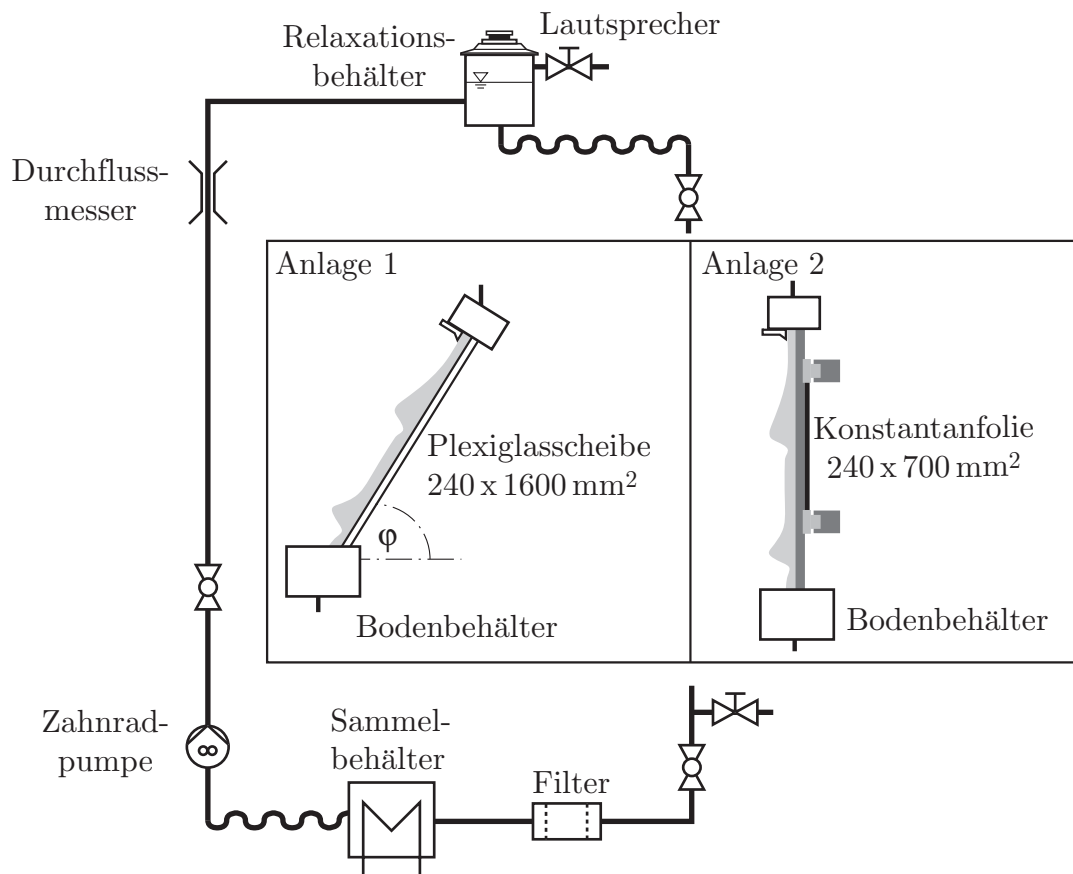


Abb. 3.1: Versuchsanlagen

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