



Stefanie Arndt (Autor)
**Fallfilmverdampfung viskoser Reinstoffe unter
Berücksichtigung der Einlaufgeometrie**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/35>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1 Einleitung

In der chemischen Industrie und bei der Herstellung von Lebensmitteln wird sehr häufig mit Flüssigkeiten gearbeitet, die einerseits mit Wärme behandelt werden müssen, andererseits gegenüber hohen Temperaturen und lang andauernder Erhitzung empfindlich sind. In diesen Fällen werden vorzugsweise Fallfilmverdampfer eingesetzt, die aus senkrechten von außen beheizten Rohren bestehen. An der Innenseite der Rohre rieselt ein dünner Produktfilm schwerkraftgetrieben herab.

Zur Eindampfung von Zuckerlösungen vor der Kristallisation hat sich der Einsatz von Fallfilmverdampfern durchgesetzt. Aufgrund der Eigenschaften der Zuckerlösung muss ein kleines Temperaturfenster eingehalten werden [Urbaniec, 2004]. Die mehrstufige Verschaltung der Fallfilmverdampfer bewirkt, dass der Energiebedarf in Form von Heizdampf deutlich reduziert werden kann. Der Heizdampf kann in mehreren Stufen bei unterschiedlichem Druck verwendet werden oder der erzeugte Brüden kann in anderen Stufen als Heizdampf genutzt werden.

Die Auslegung von Anlagen für Produktmedien mit Viskositäten ähnlich der von Wasser wird anhand einer Vielzahl an Berechnungsvorschriften vorgenommen. Nach VDI Wärmeatlas [Schnabel et al., 2006, Abschnitt Md] sowie Wadekar [Wadekar, 2003] sind diese als gesichert zu betrachten [Weise, 2007]. Für höhere Viskositäten liegen nur wenige Auslegungsgleichungen vor. Die Viskosität einer reinen Saccharoselösung liegt bei einem Zuckergehalt von 70 % und einer Temperatur von $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ bereits bei $\eta \geq 10 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ [Schmidt, 2000], und ist damit zehn mal so hoch wie die Viskosität von Wasser bei Raumtemperatur. Die Übertragbarkeit der wenigen Korrelationen bei hohen Viskositäten auf die industrielle Anwendung ist unsicher. Die Korrelationen wurden auf der Basis von experimentellen Laboruntersuchungen entwickelt. Die verwendeten Anlagen unterschieden sich in verschiedenen Aspekten von der in der Industrie angewendeten Konfiguration. So wurden größtenteils außen berieselte Versuchsrohre verwendet, für die Filmaufgabe werden Ringspalte in der Forschung am häufigsten verwendet. In der Industrie befindet sich das Produkt meist auf der Innenseite des Rohres, die Filmaufgabe erfolgt durch Überlaufwehre.

Die vorliegende Arbeit untersucht den Einfluss der Produktviskosität, dargestellt durch die Prandtl-Zahl auf die Fallfilmverdampfung. Diese wird über die Veränderung der Siedetemperatur der Reinstoffe durch entsprechenden Druck im Versuchsrohr eingestellt. Darüber hinaus wird der Einfluss der Anlagengeometrie auf den Wärmeübergangskoeffizienten auf der Produktseite untersucht. Insbesondere die Änderung der Einlaufgeometrie wird in die experimentellen Betrachtungen eingeschlossen.



1 Einleitung

Zunächst wird der aktuelle Forschungsstand im Bereich der Fallfilmverdampfung zusammengefasst mit besonderem Fokus auf die eingesetzten Versuchsmedien und Anlagengeometrien. Daraufhin folgt die Darstellung der eigenen experimentellen Ergebnisse für die Fallfilmverdampfung mit zwei verschiedenen Einlaufgeometrien und verschiedenen Produktviskositäten. Ebenso werden die Ergebnisse der fluiddynamischen Untersuchung des Einlaufbereiches vorgestellt. Die in Verdampfungsversuchen erzielten Ergebnisse werden mit den vorhandenen Korrelationen aus der Literatur verglichen und die Möglichkeit einer stoffunabhängigen Modellierung wird geprüft.

2 Forschungsstand

Bei der Fallfilmverdampfung wird ein dünner Flüssigkeitsfilm, der an einer beheizten Wand herab rieselt, verdampft. Durch die Nutzung eines dünnen Filmes ist nur eine geringe treibende Temperaturdifferenz zwischen der Heiz- und Produktseite nötig, um den Leichtsieder zu verdampfen. Dies bewirkt eine materialschonende Wärmebehandlung, die das Produkt im Gegensatz zu vollständig gefluteten Rohren kleineren Wandtemperaturen aussetzt. Außerdem ist es möglich, Energie effizient zu nutzen, da Kopplungen im Prozess zwischen unterschiedlichen Temperaturniveaus durchgeführt werden können.

Der Film wird bei der Fallfilmverdampfung in vertikalen Rohren durch die Schwerkraft erzeugt. Mechanische Wischer werden nicht eingesetzt. Dies macht die Fallfilmverdampfung zu einer vergleichsweise kostengünstigen Technik in Bezug auf Investitionen.

Weitere Vorteile der Fallfilmverdampfung sind der sehr geringe Druckverlust sowie die geringe Produktmenge, welche mit der heißen Wand in direktem Kontakt steht. Darüber hinaus kommt es bei Fallfilmverdampfung zu keiner durch die hydraulische Höhe bedingten Druckänderung, die die Verdampfungstemperatur beeinflusst [Schuchmann et al., 2005].

Die Rohre eines Fallfilmverdampfers haben im Allgemeinen Rohrlängen zwischen $l = 4\text{ m}$ und $l = 20\text{ m}$ bei Außendurchmessern von $d_a \approx 0,026 \dots 0,09\text{ m}$. Dies entspricht einem Verhältnis von Länge zu Innendurchmesser von $\frac{l}{d_i} = 150 \dots 200$, bei tiefen Verdampfungsdrücken auch bis ca. $\frac{l}{d_i} = 100$. Durch den geringen Druckverlust in den Verdampferrohren können Verdampfungsdrücke von bis ca. 5 mbar realisiert werden [Scholl et al., 2006]. In der industriellen Anwendung wird der Film üblicherweise an der Innenseite der Rohre ausgebildet. Die mittleren Filmdicken betragen $\delta_m = 0,1 \dots 2\text{ mm}$ [Al-Sibai, 2004] bei typischen Berieselungsdichten von $\dot{\Gamma}^* = 1,2 \dots 1,5\text{ m}^3\text{ m}^{-1}\text{ h}^{-1}$ [Scholl et al., 2006]¹.

Fallfilmverdampfer können als Gegen- oder Gleichstromapparate ausgelegt werden, bezogen auf die Stromführung des entstehenden Dampfes, siehe Abbildung 2.1.

Die Wahl der Bauform beeinflusst die Fluidodynamik des Filmes. Bei einer Gegenstromführung kann es bei hohen Dampfstromen und damit hohen Dampfgeschwindigkeiten zu einer Verlangsamung des Filmes an der Oberfläche bis zu einem Tropfenmitriss (Entrainment) kommen. In Gleichstromapparaten kommt es bei hohen Dampfstromen zu einer Beschleunigung an der Filmoberfläche.

¹Eine volumenbezogene Berieselungsdichte von $\dot{\Gamma}^* = 1,2 \dots 1,5\text{ m}^3\text{ m}^{-1}\text{ h}^{-1}$ entspricht bei einer Dichte von $\rho = 950\text{ kg m}^3$ einer massenbezogenen Berieselungsdichte von $\dot{\Gamma} = 0,3 \dots 0,4\text{ kg m}^{-1}\text{ s}^{-1}$

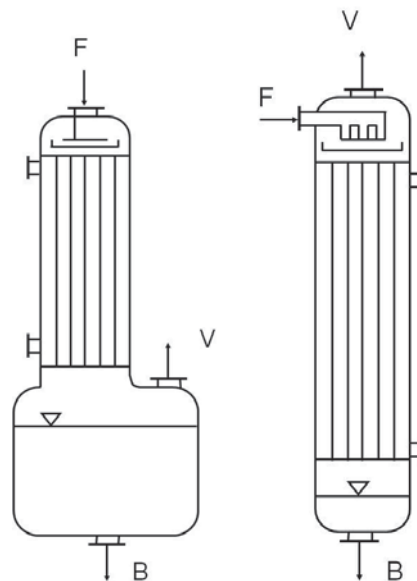


Abbildung 2.1: Fallfilmverdampfer in Gleichstrom- (links) und Gegenstromfahrweise (rechts) [Scholl et al., 2006]; V= Vapour, Dampf; F= Flüssigkeit; B = Brüden

Für eine produktschonende Behandlung von thermisch empfindlichen Produkten ist bei Fallfilmverdampfern die Verteilung der Flüssigkeit auf der beheizten Fläche von besonderer Bedeutung. Ist eine vollständige Benetzung der beheizten Fläche nicht gegeben, kommt es zu lokalen Überhitzungen und damit zur thermischen Schädigung und zu verstärktem Fouling [Lozano Aviles, 2007]. Daher ist es nötig, die Berieselungsdichte ausreichend hoch zu halten und die Filmaufgabe am oberen Ende der Rohre so zu gestalten, dass eine gleichmäßige Berieselung stattfindet. Als Filmaufgabesysteme sind die in Abbildung 2.2 dargestellten Wehre weit verbreitet.

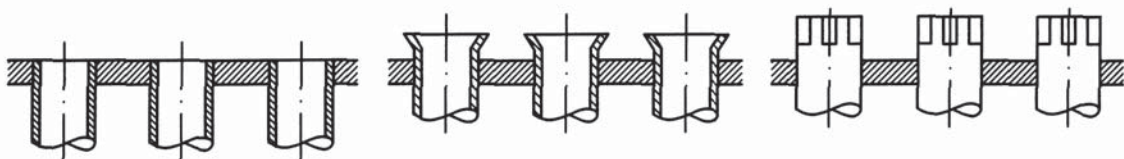


Abbildung 2.2: Filmaufgabesysteme für innen berieselte Rohre [Scholl et al., 2006]

2.1 Fallfilmverdampfer in der industriellen Anwendung

Fallfilmverdampfer werden in der industriellen Anwendung eingesetzt, um thermisch sensitive Materialien zu behandeln. Sie gehören insbesondere in der Lebensmittelindustrie zu den Standardverdampfern [Chen, 1997] und lösen die Steigfilmverdampfer ab [Schuchmann et al., 2005]. Anwendungsgebiete für Fallfilmverdampfer sind die Konzentrierung von Stärkeprodukten, die Konzentrierung von Milchprodukten aber auch die Herstellung

von Fruchtsaftkonzentrat und die Konzentrierung von Genussmitteln wie Kaffee oder Tee [Schuchmann et al., 2005].

In der Milchindustrie ist der Prozess der Konzentrierung von Milchprodukten, gemeinsam mit der Trocknung zur Produktion von Milchpulver, der energieintensivste Prozessschritt [Ramirez et al., 2006]. Bei der Aufkonzentrierung steigt dabei die Viskosität der Milch mit steigender Feststoffkonzentration. Für Untersuchungen zur Eindampfung von Vollmilch und entrahmter Milch wird die Viskosität für das Konzentrat der entrahmten Milch (400 g Feststoff pro kg Milch) mit 9 Pa s angegeben, für Vollmilch mit gleichem Feststoffgehalt wird von einer dynamische Viskosität von 6,4 Pa s berichtet [Jebson et al., 1997]. Von Jebson werden für diese Viskositäten Prandtl-Zahlen von $Pr = 104$ für entrahmte Milch und $Pr = 73$ für Vollmilch berechnet.

Das Viskositäts- und Oberflächenspannungsverhalten von reinen und technischen Saccharoselösungen untersuchte Schmidt [Schmidt, 2000]. Messungen an einem in der Praxis eingesetzten Fallfilmverdampfer zeigten, dass je nach Verdampferstufe Viskositäten von bis zu 0,019 Pa s erreicht werden. Dies entspricht hier einer Prandtl-Zahl von $Pr = 90$ [Schmidt, 2000].

Ein weiteres Anwendungsgebiet ist in der Eindampfung von Schwarzlauge zu finden, einem Nebenprodukt in der Zelluloseherstellung. Wie Chen berichtet ist die Kontaktzeit der Schwarzlauge mit der heißen Wand ein entscheidender Faktor, um die Bildung von Fouling-schichten zu kontrollieren. Aufgrund der inversen Löslichkeit der in der Schwarzlauge enthaltenen Salze kommt der Temperatureinfluss auf das Fouling hinzu. Daher bietet sich die Verwendung der Fallfilmverdampfer an. Die Eigenschaften von Schwarzlauge sind dabei stark vom Feststoffgehalt abhängig. Bei Feststoffkonzentrationen von 35 ... 45% treten bereits Prandtl-Zahlen von $15 < Pr < 33$ auf [Chen, 2004].

Johansson et al. untersuchten die Fallfilmverdampfung von Schwarzlauge und nutzten die Lösungen einer Weichholzverarbeitung. Die auftretenden Feststoffkonzentrationen lagen bei 28 ... 54%, die gemessenen Viskositäten betragen $0,00065 \leq \eta \leq 0,079$ Pa s [Johansson et al., 2006].

2.2 Fluiddynamik der Fallfilmverdampfung

Ein Baustein zum Verständnis der Vorgänge in Fallfilmverdampfern ist die Untersuchung der Fluiddynamik des Rieselfilms. Die Fluiddynamik beeinflusst sowohl den Wärmeübergang als auch den Stoffübergang stark. Im Gegensatz zur Fluiddynamik in vollständig gefluteten Rohren liegt bei Rieselfilmen eine freie Oberfläche an der Phasengrenzfläche vor. Dies führt dazu, dass eine Vielzahl an Parametern zur Beschreibung von Rieselfilmen herangezogen werden, die in einem vollständig gefluteten Rohr nicht auftreten. Unter anderen führt Al-Sibai [Al-Sibai, 2004] folgende wichtige charakterisierende Filmparameter als abhängige Größen auf: die Wellenlänge a , die Wellengeschwindigkeit u_w , die Wellen-

frequenz, die mittlere Filmdicke δ_m , die minimale Filmdicke δ_{min} , sowie die maximale Filmdicke δ_{max} , vgl. Abb. 2.3.

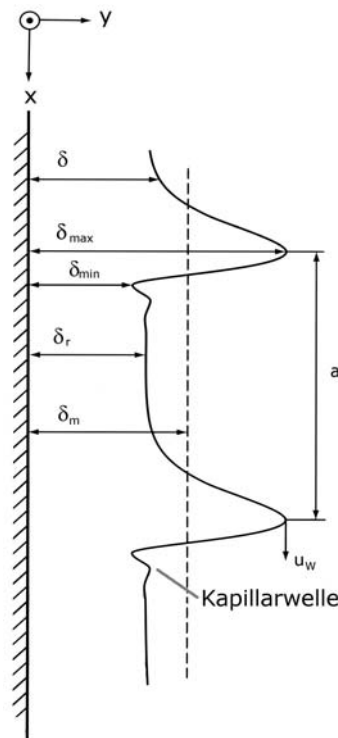


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung wichtiger Filmparameter an der senkrechten Wand, vgl. [Al-Sibai, 2004]

Hinzu kommt die Filmbreite für die Untersuchung der Strömungsverhältnisse an geneigten und senkrechten Platten. Diese Größen verändern sich mit steigender Flüssigkeitsbeaufschlagung der berieselten Oberfläche, welche auch in der Berieselungsdichte dargestellt wird:

$$\dot{\Gamma} = \begin{cases} \frac{\dot{m}}{U} & \text{bei der Berieselung von Rohren} \\ \frac{\dot{m}}{w} & \text{bei der Berieselung von Platten} \end{cases} \quad (2.1)$$

2.2.1 Charakterisierung des Rieselfilms

Bei sehr niedrigen Berieselungsdichten ist der Film, der sich an der senkrechten Oberfläche ausbildet, glatt und wellenfrei. Dieser Zustand wurde von W. Nusselt [Nusselt, 1916] mathematisch beschrieben. Im technischen Bereich ist ein völlig glatter Film von sehr niedriger Relevanz, da bei niedrigen Berieselungsdichten der Film aufreißen kann. So beschreibt bereits Jackson [Jackson, 1955], dass für die Kalibrierung der Messeinrichtung ein wellenfreier Film erzeugt werden sollte. Eine sichere, einheitliche Benetzung war jedoch bei den hierfür nötigen Berieselungsdichten nur bei hohen Viskositäten möglich. Tritt jedoch im industriellen Betrieb ein Filmaufriss auf und bilden sich trockene Stellen an der

beheizten Wand, kommt es zu Überhitzungen an diesen Stellen. Dies führt zu Produktschädigungen und Verkrustungen durch Kristallisation von Produktbestandteilen. Diese Effekte sind für den Betrieb eines Fallfilmverdampfers unbedingt zu vermeiden.

Wird die Berieselungsdichte gesteigert, bilden sich an der Filmoberfläche sinusförmige Wellen aus. Für ein außen berieseltes Rohr beobachtete Brauer [Brauer, 1956], dass sich in diesem Bereich die Wellen ringförmig um das Rohr schließen. Horizontale Wellenfronten bilden sich aus, deren Abstand sich über die Lauflänge nicht verändert. In diesem Bereich wird der Film als zweidimensional bezeichnet [Al-Sibai, 2004; Fulford, 1964].

Danach wird das Strömungsbild geprägt von V-förmigen Wellen und verzerrten Wellenfronten, die sich mit unterschiedlichen Wellengeschwindigkeiten fortsetzen und nicht mehr periodisch sind. Ebenfalls ist zu beobachten, dass bei weiter steigendem Massenstrom zunächst Schwallwellen auftreten, sich verschiedene Wellen überholen und sich vor größeren Wellen kleinere Kapillarwellen bilden [Brauer, 1956]. Im Folgenden treten Unruhepunkte auf, die Filmoberfläche wird aufgeraut und der Film wird turbulent.

Für sehr große Berieselungsdichten zeigte Karapantsios, dass die chaotische Charakteristik von Filmdickenschwankungen gegenüber niedrigen Reynolds-Zahlen deutlich verstärkt ist. Die Auflösung von großen und kleinen Wellen in den Messungen ist deutlich erschwert [Karapantsios et al., 1989].

Die Unterteilung der verschiedenen Strömungsbereiche ist Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten. Verwendet werden dazu dimensionslose Kennzahlen, vornehmlich die Reynolds-Zahl

$$Re = \frac{\dot{m}}{U \cdot \eta} \quad (2.2)$$

sowie zur Berücksichtigung der Oberflächenspannung die Kapitza-Zahl Ka , bzw. Filmkennzahl K_F

$$Ka = \frac{\eta^4 \cdot g}{\rho \cdot \sigma^3} = \frac{1}{K_F} \quad (2.3)$$

Kirkbride [Kirkbride, 1934] ermittelte die Filmdicken dünner Filme durch die Verwendung einer Messschraube („micrometer“). Beobachtet wurde, dass bereits ab einer Reynolds-Zahl von $Re = 2$ Wellen auftreten, die einen Unterschied zwischen maximaler und mittlerer Filmdicke verursachen [Kirkbride, 1934].

Dukler und Bergelin [Dukler et al., 1952] teilten die Strömungsbereiche nach laminar und turbulent ein mit einem Übergang bei $Re = 270$.

Im Gegensatz dazu fand Brauer [Brauer, 1956], dass der turbulente Strömungsbereich für „gewöhnliche Flüssigkeiten“² bei einer kritischen Reynolds-Zahl von $Re_{krit} = 400$ einsetzt. Erste Wellen werden visuell bei $Re = 4$ beobachtet. Darüber hinaus wird der laminare Bereich in vier Teilbereiche mit folgenden Potenzgesetzen eingeteilt:

²[Brauer, 1956, S. 39]

$$Re_{W1} = 0,306 \cdot K_F^{\frac{1}{10}} \quad \text{Einsetzen erster Wellen} \quad (2.4)$$

$$Re_{instab} = 0,720 \cdot K_F^{\frac{1}{10}} \quad \text{Instabil werden der Wellen} \quad (2.5)$$

$$Re_{W2} = 1,35 \cdot K_F^{\frac{1}{10}} \quad \text{Parallel werden der Wellenbergkurven} \quad (2.6)$$

$$Re_{krit} = 35,0 \cdot K_F^{\frac{1}{10}} \quad \text{Auftreten von Kapillarwellen} \quad (2.7)$$

Bei diesen Reynolds-Zahlen ändern sich die Filmparameter und die Filmstruktur signifikant wie anhand von der Messungen der maximalen Filmdicke, der Oberflächengeschwindigkeit, der mittleren Filmgeschwindigkeiten sowie durch Frequenzmessungen ermittelt wurde [Brauer, 1956].

Tailby und Portalski [Tailby et al., 1962] teilten die Strömungsbereiche in fünf Bereiche ein, die von laminar-glatt über pseudo-laminar, übergehend und pseudo-turbulent zum turbulenten Strömungsbereich führen und von Salazar [Salazar et al., 1978] durch die statistische Auswertung der Filmdicke bestätigt wurden. Die Strömungsbereiche wurden anhand von Beobachtungen des Beginns der Welligkeit über die Lauflänge ermittelt. Die Aufteilung der Strömungsbereiche anhand der Reynolds-Zahl kann für Wasser aus der graphischen Auftragung abgelesen werden. Der Übergang von laminar-glatte Strömung zur pseudo-laminaren Strömung wird bei einer Reynolds-Zahl von $Re \approx 6$ beobachtet, der Übergangsbereich beginnt bei einer Reynolds-Zahl von $Re \approx 87$. Für den Beginn des pseudo-turbulenten Bereiches wird eine kritische Reynolds-Zahl von $Re \approx 380$ beobachtet und der Anfang der turbulenten Strömung zeigt sich bei $Re \approx 525$. Bei steigender Viskosität ergibt sich eine Verschiebung der kritischen Reynolds-Zahlen [Tailby et al., 1962].

Ebenfalls unter Einsatz einer Kontaktnadel beobachteten Ishigai et al. [Ishigai et al., 1972], dass unterhalb einer Reynolds-Zahl von

$$Re \leq 0,47 \cdot K_F^{\frac{1}{10}} \quad (2.8)$$

der Flüssigkeitsfilm laminar-glatt vorliegt. Weitere Bereiche teilten Ishigai et al. ein in

$$0,47 \cdot K_F^{\frac{1}{10}} \leq Re = 2,2 \cdot K_f^{\frac{1}{10}} \quad \text{erster Übergangsbereich} \quad (2.9)$$

$$2,2 \cdot K_F^{\frac{1}{10}} \leq Re = 75 \quad \text{stabil-welliger Bereich} \quad (2.10)$$

$$75 \leq Re = 400 \quad \text{zweiter Übergangsbereich} \quad (2.11)$$

Über einer Reynolds-Zahl von $Re = 400$ wird die Strömung als turbulent beschrieben. [Ishigai et al., 1972]

Durch Messungen mit Particle-Image-Velocimetry (PIV), Fluoreszenz-Intensitäts-Messung und visuellen Beobachtungen kam Al-Sibai [Al-Sibai, 2004] für Silikonöle zu charakteristischen Reynolds-Zahlen im Film von:

$$Re_1 = 0,6 \cdot K_F^{0,1} \quad \text{Grenze des wellenfreien Films} \quad (2.12)$$

$$Re_2 = 1,0 \cdot K_F^{0,1} \quad \text{Grenze der sinusförmigen Wellen} \quad (2.13)$$

$$Re_{3a} = 25 \cdot K_F^{0,09} \quad \text{Grenze des laminar-welligen Strömungszustandes a} \quad (2.14)$$

$$Re_{3b} = 32 \cdot K_F^{0,1} \quad \text{Grenze des laminar-welligen Strömungszustandes b} \quad (2.15)$$

$$Re_4 = 192 \cdot K_F^{0,06} \quad \text{Beginn des turbulenten Strömungszustandes} \quad (2.16)$$

Die Grenze des laminar-welligen Strömungszustands wurde über zwei unterschiedliche Parameter bestimmt, der Standardabweichung der mittleren Filmdicke sowie dem Auftreten eines Residualfilmes (glatter Bereich zwischen den Wellen) [Al-Sibai, 2004].

Der Vergleich der unterschiedlichen Einteilung der Strömungsformen zeigt sehr unterschiedliche Gleichungen im konstanten Faktor, wobei der Einfluss der Filmkennzahl im Allgemeinen sehr ähnlich quantifiziert wird. Die Abweichungen können in den unterschiedlichen Messmethoden und Anlagenkonfigurationen aber auch in den unterschiedlichen Filmparametern begründet sein, auf denen die Einteilung basiert. Die Anlagenparameter wichtiger Arbeiten sind in Tab. 2.1 und 2.2 zusammengefasst.

Die örtlichen Filmparameter sind dabei sowohl von der Reynolds-Zahl abhängig als auch zeitlich veränderlich. Dies macht die analytische Beschreibung schwierig [Brauer, 1956].

In der Literatur wird für die lokalen Filmparameter oftmals eine statistische Betrachtung von Messwerten herangezogen [Telles et al., 1970; Chu et al., 1974; Salazar et al., 1978; Karapantsios et al., 1989].

Für die Beschreibung der mittleren Filmdicke bei laminar-glattem Film hingegen steht die mathematische Herleitung von W. Nusselt [Nusselt, 1916] zur Verfügung. Die Annahme für die mathematische Beschreibung ist, dass keine Schubspannung an der Filmoberfläche übertragen wird. Darüber hinaus werden die Beschleunigungskräfte und der Einfluss der Oberflächenkrümmung bei der Betrachtung des Filmes an einer Rohrrinnenwand vernachlässigt. Für die Filmdicke an einer ebenen Platte ergibt sich

$$\delta_m = \left(3 \cdot \frac{\nu^2}{g} \cdot \frac{\dot{\Gamma}}{\eta_F} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(3 \cdot \frac{\nu^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{\frac{1}{3}} \quad (2.17)$$

Brauer bestätigte diese Gleichung anhand von Schattenaufnahmen bis zu einer Reynolds-Zahl von $Re = 400$. Für den turbulenten Strömungsbereich schlägt Brauer folgende Gleichung vor:

$$\delta_m = Re_{krit}^{-\frac{1}{5}} \cdot \left(3 \cdot \frac{\nu^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{\frac{8}{15}} \quad (2.18)$$

mit $Re_{krit} = 400$ [Brauer, 1956].



Tabelle 2.1: Zusammenfassung wichtiger Anlagenparameter der Literatur zur Fluidynamik von Rieselfilmen I

Autor	Reynolds-Zahl	Medium	Versuchsanlage	Filmposition	Filmaufgabe
[Kirkbride, 1934]	0,04 ... 2000	Wasser, Öl	Rohr Glas $l_{max} = 0,76 \text{ m}$	außen	
[Dukler et al., 1952]	120 ... 693	Wasser	Platte Edelstahl $l_{max} = 2,4 \text{ m}$		Leitblech
[Jackson, 1955]	1 ... 1148	Wasser, Methanol, Ethylacetat, Isopropanol, Glycerin-Lösung	Rohr Glas	innen	Glattwehr
[Brauer, 1956]	2 ... 2000	Wasser, Diethylen- glykol/Wasser	Rohr ³ Messing $l_{max} = 1,8 \text{ m}$	außen	Ringspalt
[Feind, 1960]	10 ... 2000	Wasser, Diethylen- glykol/Wasser	Rohr Messing $l_{max} = 2,5 \text{ m}$	innen	Ringspalt
[Telles et al., 1970]	234 ... 1438	Wasser	Rechteckkanal Plexiglas $l_{max} = 5,5 \text{ m}$	gegenüber liegende Flächen	

³teilweise konisch

Tabelle 2.2: Zusammenfassung wichtiger Anlagenparameter der Literatur zur Fluidynamik von Rieselfilmen II

Autor	Reynolds-Zahl	Medium	Versuchsanlage	Film-position	Filmaufgabe
[Ishigai et al., 1972]	12 ... 1000	Wasser, Diethylenglykol/ Wasser	Rohr Messing $l_{max} = 2 \text{ m}$	außen	Ringspalt
[Chu et al., 1974]	52 ... 1890	Wasser,	Rohr Plexiglas $l_{max} = 4,25 \text{ m}^4$	innen	Ringspalt
[Salazar et al., 1978]	36 ... 1008	Wasser	Platte Plexiglas $l_{max} = 0,155 \text{ m}$		
[Takahama et al., 1980]	200 ... 2000	Wasser	Rohr $l_{max} = 2,0 \text{ m}$	außen	Ringspalt
[Karapantsios et al., 1989]	127 ... 3273	Wasser	Rohr Plexiglas $l_{max} = 2,8 \text{ m}^5$	innen	Überlauf, angeschragt
[Ye et al., 2002]	200 ... 1100	Wasser	Rohr Plexiglas $l_{max} = 1,1 \text{ m}$	außen	Ringspalt mit Drahtnetz
[Al-Sibai, 2004]	4 ... 700	Wasser, Silikonöle	Platte Plexiglas/ Konstantanfolie $l_{max} = 1,6 \text{ m}$		Spaltaufgabe

⁴zusammengesetzt

⁵zusammengesetzt

Feind [Feind, 1960] zeigte, dass bei steigender Viskosität die Abweichung der mittleren Filmstärke im Vergleich zu Gl. 2.17 zunimmt, dass jedoch durch die Messung am Rohr die Veränderung vernachlässigbar ist. Für den turbulenten Strömungsbereich wird die Abhängigkeit der mittleren Filmstärke beschrieben zu

$$\delta_m = 0,369 \cdot \left(3 \cdot \frac{\nu^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{\frac{1}{2}} \quad (2.19)$$

Braun [Braun, 1969] hingegen fand für Reynolds-Zahlen von $100 \leq Re \leq 420$, dass die mittlere Filmstärke 7 % niedriger liegt als für den laminar-glatten Film von Nusselt. Dies entspricht der Abweichung, die Kapitza [Kapitza et al., 1948, in Braun, 1969] aufgrund sinusförmiger Welligkeiten erwartete. Die mittlere Filmstärke des laminar-welligen Filmes lässt sich demnach beschreiben durch

$$\delta_m = \left(2,4 \cdot \frac{\nu^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{\frac{1}{3}} \quad (2.20)$$

Für die mittlere Filmstärke im turbulenten Bereich sind weitere Gleichungen nach dem Aufbau

$$\delta_m = m \cdot \left(\frac{\nu^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot Re^n \quad (2.21)$$

bekannt. Die Konstanten m und n sind zusammen mit den bereits vorgestellten in Tabelle 2.3 zusammengestellt, eine graphische Darstellung ist in Abb. 2.4 zu sehen. Weitergehende Zusammenfassungen zur Fluidodynamik von Rieselfilmen sind bei Coulon [Coulon, 1971] und Helbig [Helbig, 2007] dargestellt.

Tabelle 2.3: Parameter zur Berechnung der mittleren Filmstärke im turbulenten Strömungsbereich

Autor	m	n
[Brauer, 1956]	$Re_{krit}^{-\frac{1}{5}} \cdot 1,44$	$\frac{8}{15}$
[Feind, 1960]	0,515	$\frac{1}{2}$
[Takahama et al., 1980]	0,473	0,526
[Mudawwar et al., 1986]	0,324	0,580
[Ye et al., 2002]	0,588	0,498

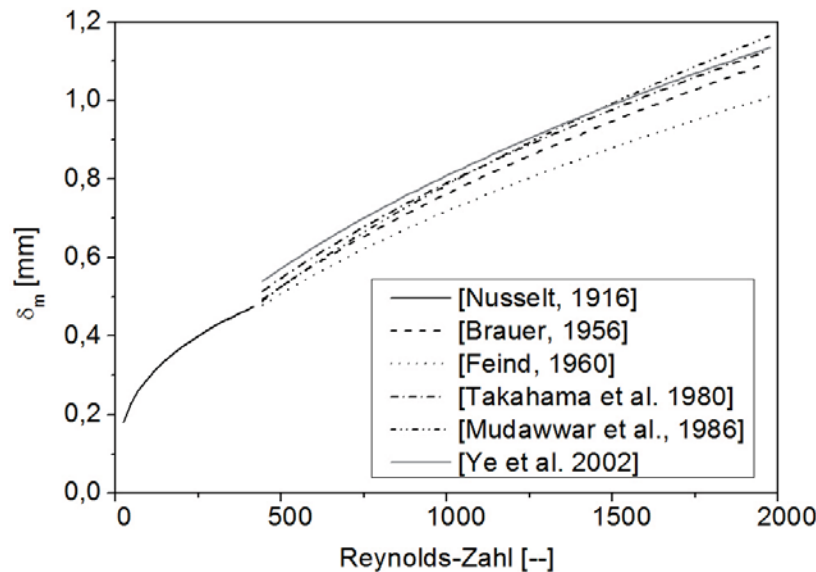


Abbildung 2.4: Berechnete mittlere Filmdicken für Wasser bei 25 °C nach Gleichungen 2.17 und 2.21 mit Parametern nach Tabelle 2.3

2.2.2 Fluidodynamik an innen berieselten Rohren

Zur Fluidodynamik wurden diverse Messungen an innen berieselten Rohren durchgeführt, von denen eine Auswahl im Folgenden dargestellt wird.

Bereits 1941 führten Friedman und Miller [Friedman et al., 1941] Messungen an einem innen berieselten Rohr durch und berichteten über eine gute Übereinstimmung der gemessenen mittleren Filmdicke mit früheren Arbeiten an anderen Geometrien bei Reynolds-Zahlen von $Re < 250$. Das Auftreten eines pseudo-laminaren Strömungsbereiches konnte nicht auf den Rohrdurchmesser zurück geführt werden [Friedman et al., 1941].

Die Oberflächengeschwindigkeiten von Rieselfilmen an einem innen berieselten Rohr untersuchten Braun, Eckstein und Hiby 1971 [Braun et al., 1971] mit Hilfe der Absorption von Salzsäure in verdünnter Natronlauge. Durch die Zugabe eines Fluoreszenz-Indikators wurden Orte mit frischer, nicht neutralisierter Flüssigkeit sichtbar gemacht. Festgestellt werden konnte, dass die Messergebnisse gut mit denen von Portalski [Portalski, 1964] übereinstimmen, in den Geschwindigkeitswerten jedoch von denen nach Brauer abweichen. Dies wird hauptsächlich auf die Messmethode zurück geführt. Schwallfronten, die sich um den gesamten Rohrumfang schließen, werden im Gegensatz zu Brauer [Brauer, 1956] nicht beobachtet. Eine Begründung hierfür wird im Rohrdurchmesser und in der Filmposition auf der Innenseite gesehen [Braun et al., 1971].

Die Fluidodynamik von Rieselfilmen bei hohen Reynolds-Zahlen ($127 \leq Re \leq 3273$) untersuchten Karapantsios et al. [Karapantsios et al., 1989]. Die Experimente wurden mit Wasser in einem innen berieselten Plexiglasrohr durchgeführt. Der Abstand der Messsonde (Parallel-Draht Leitfähigkeitssonde) vom Einlauf betrug $l = 2,5m$, was ausgehend