

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der experimentellen Untersuchung der Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten für das Blasensieden an Rieselfilmen für ein vertikales Rohr. Untersucht werden die reinen Fluide Ethanol, Wasser und MM sowie die Gemische Ethanol/Wasser und Ethanol/MM, welche als potenziell neue Arbeitsmedien im Organic Rankine Cycles, Absorptions- oder Kompressionswärmepumpen eingesetzt werden könnten.

Es wird ein neuer Versuchsaufbau entwickelt, welcher in der Lage ist, gekoppelte Wärme- und Stoffübergangsmessungen zu ermöglichen. Durch installierte Vorrichtungen und Pumpen, können jeweils eine Flüssigkeits- und Dampfprobe entnommen und mittels eines Fourier-Transform-Infrarotspektrometers auf die Konzentration hin bestimmt werden. Die eigentliche Messstrecke besteht aus zwei kombinierten Kupferrohren mit Pt100 Temperatursensoren zur Messung der innen Wandtemperatur welche eingelötet sind. Über die innere Wandtemperatur kann unter Berücksichtigung der Wärmeleitung auf die äußere Wandtemperatur zurückgerechnet werden. Diese Temperatur wird zur Auswertung der Wärmeübergangskoeffizienten benötigt. Zusätzlich werden Stoffdatenmessungen durchgeführt, da die Stoffdatensoftware REFPROP mangelnde Ergebnisse liefert. Aus den Messergebnissen werden eigene empirische Korrelationen entwickelt. Diese belastbaren Stoffdatenmodelle werden zur Messdatenauswertung sowie zur Berechnung von Wärmeübergangskoeffizienten benötigt. Übergeordnetes Ziel ist es, eine verbesserte Korrelation zur Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten beim Blasensieden für Gemische zu entwickeln. Die Messergebnisse für die Stoffübergangskoeffizienten zeigen, dass diese stark abhängig von der Form der Dampf-Flüssigkeit-Gleichgewichts-Kurve und der Wärmestromdichte sind. Die Wärmeübergangskoeffizienten für Ethanol/Wasser zeigen einen fallenden Verlauf zwischen den Reinstoffen und lassen sich gut mit Messdaten aus der Literatur abgleichen. Bei Ethanol/MM zeigen sich steigende Wärmeübergangskoeffizienten, im Vergleich zu den reinen Fluiden, welche sich nicht über den Stoffübergang erklären lassen. Hier kann ein Marangoni-Effekt für diesen Anstieg der Wärmeübergangskoeffizienten verantwortlich sein. Ein Vergleich mit aus der Literatur bekannten Korrelationen von Schlünder, Thome/Shakir, Fujita/Tsutsui, Inoue/Monde und der in dieser Arbeit neu entwickelten Korrelation zeigt, dass die bekannten Korrelationen steigende Wärmeübergangskoeffizienten nicht wiedergeben können. Durch die Implementierung der lokalen vorherrschenden Sättigungstemperatur des Gemisches, sowie der Dichte- und Oberflächenspannungsverhältnisse der reinen Fluide, ist die neue Korrelation in der Lage, den Verlauf gut wiederzugeben. Weiterhin wird nachgewiesen, dass die neu entwickelte Korrelation für eine Vielzahl von Gemischen anwendbar ist und zu deutlich geringeren Abweichungen zu Messdaten führt. Hierzu wurden 12 verschiedene binäre und 2 ternäre Gemische mit der neuen Korrelation verglichen.

1 Einleitung

Der Einsatz von Fluidgemischen und insbesondere zeotropen Gemischen als Arbeitsmedien in thermodynamischen Kreisprozessen wie Organic Rankine Cycles (ORC), Absorptions- oder Kompressionswärmepumpen [1–3] nimmt stetig zu. Zeotrope Fluidgemische können zu einer guten Temperaturgleitanpassung im Kondensator und Verdampfer führen. Dadurch kommt es zu einer Reduzierung der Exergieverluste und einer höheren Zyklenleistung im Gesamtsystem. Auch gesetzliche Vorgaben führen zu einer erweiterten Anwendung für die Gemische. Gemäß EU-Verordnung Nr. 517/2014 (F-Gase-Verordnung) [4], dem Montreal- und dem Kyoto-Protokoll sind Arbeitsmedien mit einem Ozonabbau Potenzial (ODP) von mehr als 0 verboten und zukünftige Arbeitsmedien sollten zudem ein möglichst niedriges Treibhauspotenzial (GWP) aufweisen. Ferner sollten potenzielle Kältemittel nicht brennbar, explosiv, giftig oder ätzend sein. Aufgrund der hohen Anforderungen und des jüngsten Ausstiegs [5] aus fluorierten Kohlenwasserstoffen verstärkt sich diese Entwicklung hin zu Fluidgemischen, weil nur diese ansatzweise in der Lage sind, die ganzen Anforderungen zu erfüllen [6].

Neben der Systemleistung und rechtlichen Aspekten müssen bei der Auswahl der Arbeitsmedien auch die Wärmeübertragungseigenschaften berücksichtigt werden. Laut Bai et al. [7], Modi und Haglind [8], Aricapa et al. [9], Wang et al. [10] und Weith et al. [11] können zeotrope Fluidgemische verwendet werden, um die Gesamteffizienz eines Systems zu verbessern. So untersuchten Aricapa et al. [9] in ihrer Studie verschiedene Kältemittelgemische im Vergleich zu R134a, R404A und R410A. So wurde gezeigt, dass die Verwendung von Gemischen wie R134a/R1234yf das Treibhauspotenzial im Vergleich zu reinem R134a um bis zu 50 % senken kann. Ferner ergab der Einsatz von Gemischen wie R447A (R32/R1234ze(E)/R125) oder R459A (R32/R1234ze(E)/1234yf(E)), dass im Vergleich zu R410A ein um bis zu 78 % niedrigeres GWP erreicht und gleichzeitig die Leistungszahl (COP) um bis zu 4 % erhöht werden konnte. Wang et al. [10] untersuchten den Einfluss des Gemisches Hexamethyldisiloxan (MM)/Octamethyltrisiloxan (MDM) auf die Nettoleistung und Effizienz eines ORC im Vergleich zu den reinen Fluiden. Es zeigte sich, dass die thermische Stabilität der Siloxane einen erheblichen Einfluss auf die Zyklenleistung des ORC hat und durch den Einsatz von Siloxan gemischen konnte die Nettoleistung im Vergleich zu reinen Arbeitsflüssigkeiten um bis zu 8 % gesteigert werden. Weith et al. [11] analysierten Fluidgemische wie MM/MDM für eine Kraft-Wärme-Kopplung und zeigten hier, dass durch den Einsatz des Gemisches der ORC-Wirkungsgrad um bis zu 3 % gegenüber der effizientesten reinen Komponente gesteigert werden konnte. Allerdings ergaben thermoökonomische Untersuchungen, dass die Optimierung des Systems als Funktion der Gemischzusammensetzung eines Fluidgemisches ein Konflikt zwischen der Steigerung der Leistungsabgabe und der Vergrößerung der Wärmeübertragungsflächen darstellen kann, wie Untersuchungen von Weith et al. [11], Heberle et al. [12] und Andreasen et al. [13] zeigen. Daher sind für die Vorausberechnung von Wärmeübergangskoeffizienten genaue Korrelationen und Modelle für reine Fluide und vor allem für Fluidgemische erforderlich. Laut

Modi und Haglind [8] und Andreasen et al. [14] hat die Wahl des Fluides und des Siedeprozesses eine entscheidende Rolle auf die Gesamtleistung bei Geothermieranwendungen und entsprechenden ORC-Verdampfern. Andreasen et al. [14] zeigten, dass nur durch die Optimierung des Siedevorgangs über den Siededruck für ein Isobutan/Pentan-Gemisch, eine um 15 % höhere Leistungsabgabe erreicht werden konnte. Für die Auslegung von Wärmeübertragern sowie die Optimierung von thermischen Systemen und Energiemanagementsystemen sind daher genaue Kenntnisse über den Siedeprozess des jeweiligen reinen Fluids oder Gemischs erforderlich. Dadurch können Auslegungs-, Investitions- und Betriebskosten verringert werden.

Generell ist bekannt, dass viele Forscher und Arbeitsgruppen experimentelle Untersuchungen zum Blasensieden an reinen Fluiden und Fluidgemischen durchgeführt haben. So ist beim Blasensieden von Gemischen aus zahlreichen Untersuchungen bekannt [15–23], dass der Wärmeübergangskoeffizient geringer ist als der der zugehörigen reinen Komponenten. Dieser Effekt des verringerten Wärmeübergangskoeffizienten kann durch verschiedene Einflussparameter erklärt werden. Einerseits sind Wärme- und Stoffübergangsmechanismen beim Verdampfen von Gemischen stets eng gekoppelt, sodass nach Gropp und Schlünder [24] Stoffübergangswiderstände im Gemisch zu einer Verschlechterung führen können. Zudem weisen Stoffdatenänderungen bei den Gemischen, wie bei den reinen Fluiden auch, einen erheblichen Einfluss auf den Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten auf. Xu et al. [25] haben in ihren Untersuchungen aufgezeigt, dass das Blasensieden von Fluidgemischen im Laufe der Jahre ausgiebig unter vielen Gesichtspunkten untersucht wurde. Das Ergebnis war, dass die größten und einflussreichsten Auswirkungen auf das Blasensieden von Gemischen Effekte wie Stoffübergangswiderstände oder Marangoni-Strömungen sein können. Jedoch liegen hierzu kaum Untersuchungen oder Veröffentlichungen vor, da Stofftransportmessungen und Untersuchungen zum Marangoni-Effekt beim Blasen- oder Strömungssieden nur mit einem sehr hohen Aufwand durchführbar sind.

In der Literatur gibt es nur wenige Fälle, in denen Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten anhand eines vertikalen Flüssigkeitsfilms untersucht wurden. Gropp und Schlünder [24] führten unter anderem parallele Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten-Messungen für das Blasensieden an einem vertikalen Fall- oder Rieselfilm für das Gemisch R11/R113 durch. Fujita und Ueda [26–28] untersuchten Wärmeübergangskoeffizienten und Filmzerfälle als Funktion der Reynolds-Zahl für Wasser in einem vertikalen Rohr. Für reine Fluide existieren zahlreiche Untersuchungen zur Fluidodynamik und Wärmeübertragung, hauptsächlich für horizontale oder vertikale Fluidfilme [26, 29–32]. Es gibt jedoch kaum Untersuchungen zum Blasensieden von Fluidgemischen für vertikale Rieselfilme. Durch die auftretenden Stoffübergangsphänomene ergeben sich weiterführende Forschungsfragen. Hierzu zählen unter anderem das Auftreten eines Marangoni-Effekts an der Phasengrenze und ob sich diese Effekte auch in aktuellen Blasensiedekorrelationen für Gemische widerspiegeln lassen. Angesichts der Vorteile und Bedeutung der Verwendung von Gemischen in thermodynamischen Kreisprozessen und damit ver-

bundenen Siedevorgängen sind daher genauere Informationen und eine gründliche Interpretation für vertikale Fallfilme beim Blasensieden erforderlich. Dadurch soll eine breitere Verwendung ermöglicht werden und auf diese Weise soll die Leistung von Gemischen als effizientere Wärmeübertragungsmedien verbessert werden.

Derzeit können zur Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten beim Blasensieden empirische oder semi-empirische Korrelationen verwendet werden, die nur für eine begrenzte Anzahl von Fluiden und Betriebsmöglichkeiten anwendbar sind. In der Regel erfordern die Berechnungsmethoden zuverlässige thermophysikalische Stoffdaten der Gemische wie Dampf-Flüssigkeits-Gleichgewichte (Englisch: *Vapor-Liquid-Equilibrium* und im Nachfolgenden VLE abgekürzt), Dichte, Oberflächenspannung sowie Verdampfungsenthalpie, die für neue Fluide oder Fluidgemische oft nicht verfügbar oder bei der Abschätzung mitunter sehr fehleranfällig sind. Arnautovic et al. [33, 34] haben in ihren Untersuchungen dargestellt, dass je nach Wahl der Berechnungsmethode hohe Unsicherheiten bei der Berechnung von VLE-Daten und Transporteigenschaften wie Viskosität oder Oberflächenspannung für Siloxangemische auftreten können. Diese Unsicherheiten in den Stoffeigenschaften der Fluide, vor allem in den VLE-Daten, können einen großen Einfluss auf die Bestimmung und Berechnung der Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten haben.

Basierend auf dem dargestellten Stand der Forschung, hat die vorliegende Arbeit folgende Ziele:

- Messung von Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten für Ethanol/Wasser und Ethanol/MM, die potenziell als Arbeitsmedien in thermodynamischen Kreisprozessen verwendet werden können.
- Identifizierung geeigneter Wärmeübertragungskorrelationen für Ethanol/Wasser und Ethanol/MM.
- Entwicklung einer erweiterten und verbesserten Korrelation für das Blasensieden von Gemischen, die unter Berücksichtigung zugänglicher Stoffdaten verwendet werden kann.
- Umfassende Validierung der erweiterten Korrelation durch Fluidgemische mit unterschiedlichen Eigenschaften wie zeotrop und azeotrop sowie verschiedenen Stoffklassen der Gemischkomponenten.

Weiterhin ergeben sich zum Erreichen dieser Ziele folgende wissenschaftliche Fragestellungen:

- Sind die relevanten Stoffdaten, welche zur Messdatenauswertung und zur Vorausberechnung für die Korrelationen benötigt werden, verfügbar und können diese über ausgewählte Berechnungsmodelle abgebildet werden?
- Welchen Einfluss haben Ungenauigkeiten in den Stoffdaten auf die Messdatenauswertung und Vorausberechnung der Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten?
- Wie wirken sich Betriebsparameter wie Wärmestromdichte oder Konzentrationsänderung auf den Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten beim Blasensieden von Fluidgemischen aus?
- Wie verhält sich der Stoffübergangskoeffizient beim Blasensieden und welchen Einfluss hat dieser bei der Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten?
- Von welchen Faktoren hängt die Verringerung oder Verbesserung des Wärmeübergangskoeffizienten bei den Fluidgemischen ab?
- Lässt sich der Wärmeübergangskoeffizient beim Blasensieden für Fluidgemische auch über thermophysikalische Eigenschaften der reinen Fluide besser vorhersagen?

Um die hier aufgeführten Ziele und wissenschaftlichen Fragen zu erreichen und zu beantworten, gliedert sich die vorliegende Arbeit wie folgt:

Kapitel 2 gibt zunächst einen detaillierten Überblick über den Stand der Forschung im Bereich des Wärme- und Stofftransports beim Sieden. Es wird hier auf die Mechanismen der Wärme- und Stoffübertragung eingegangen sowie auf die theoretische Vorausberechnung für die reinen Fluide und Fluidgemische. In Kapitel 3 wird auf Grundlage der theoretischen Berechnungsmethoden des Siedens für Gemische eine erweiterte Korrelation entwickelt und vorgestellt. Grundlage der neuen Korrelation sind VLE-Daten und Reinstoffgrößen und damit soll eine verbesserte Vorausberechnung für das Blasensieden von Gemischen ermöglichen werden. Benötigte Stoffdaten, welche die Grundlage der Messdatenauswertung und Vorausberechnungsmethoden darstellen, werden in Kapitel 4 mit bekannten Berechnungsmethoden und mit experimentellen Daten abgeglichen. Dieser Arbeitsschritt zielt darauf ab, möglichst belastbare Stoffdaten und Berechnungsmodelle zu identifizieren. Kapitel 5 beschreibt den experimentellen Aufbau zur Messung der Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten mit einer detaillierten Messunsicherheitsanalyse und im Kapitel 6 werden anschließend die experimentellen Messergebnisse für die reinen Fluide sowie für die Fluidgemische dargestellt und diskutiert. Kapitel 7 zeigt einen theoretischen Vergleich ausgewählter Korrelationen sowie der in Kapitel 3 entwickelten Korrelation zum Blasensieden mit den eigenen experimentellen Messdaten, sowie Daten aus der Literatur. Zudem wird untersucht, welchen Einfluss die Stoffübergangskoeffizienten sowie Stoffdaten auf den gemessenen und berechneten Wärmeübergangskoeffizienten haben. Basierend auf den in den vorigen Kapiteln gewonnen Ergebnissen werden diese in Kapitel 8 diskutiert und es wird eine Empfehlung für zukünftige Arbeiten ausgesprochen. Abschließend gibt Kapitel 9 eine Zusammenfassung der gesamten Arbeit wieder.

2 Wärme- und Stofftransport beim Sieden

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Wärme- und Stofftransport von reinen Fluiden und Fluidgemischen beim Blasensieden. Diese Untersuchungen erfolgen an einem vertikalen Rieselfilm. Rieselfilme sind Fluidströmungen an ebenen oder gekrümmten Flächen, welche durch die Schwerkraft ausgelöst werden. So treten Film- und Rinnsalströmungen in vielen verfahrenstechnischen Apparaten wie Füll- oder Packungskolonnen, Kühltürmen oder Wärmeübertragern (Verdampfer und Kondensatoren), mit einem Flüssigkeit/Gas-System auf [35–37]. Vor allem bei der Stoffübertragung bieten zweiphasige Rieselfilme große Vorteile. Unter anderem benötigen aufgebrauchte Fluidfilme eine geringe Menge an Fluid, vorwiegend bei stark temperaturabhängigen Fluiden, um einen stabilen Film zu bilden und erzeugen gleichzeitig eine große Stoffaustauschfläche zur umgebenden Phase. Dadurch können bei schwerkraftgetriebenen Rieselfilmen die Konstruktions- und Betriebskosten gering gehalten werden. Ein technisches Problem beim Einsatz von Rieselfilmströmung ist allerdings das Erzeugen und über die komplette Lauflänge stabil halten des Filmes. Durch eine immer stärker werdende Strömung oder das Ausdünnen des Filmes kann der Rieselfilm zusammenbrechen und damit verringern sich dann die Wärme- und Stoffübertragungsflächen [36].

Im Nachfolgenden werden die Mechanismen der verschiedenen Strömungsformen von Rieselfilmen sowie die Wärme- und Stoffübertragung dargestellt.

2.1 Filmströmung

Die Strömungsformen von verdampfenden Flüssigkeitsfilmen können maßgeblich den Wärme- und Stofftransport beeinflussen und sind bereits in vielen theoretischen und experimentellen Arbeiten untersucht worden [26–32]. Bei der reinen Filmströmung wird der Bereich in drei unterschiedliche Regime aufgeteilt.

Zur Beschreibung der jeweiligen Bereiche werden verschiedene allgemeine Kennzahlen verwendet.

Nach Brauer [38] lässt sich die Film-Reynolds-Zahl über

$$\text{Re}_F = \frac{\dot{V}_F}{\pi d_F \nu_F} = \frac{\Gamma}{\eta_F} = \frac{u_m \delta_m}{\nu_F} \quad (2.1)$$

berechnen, mit dem Volumenstrom $\dot{V}_F$, der herabrieselnden Flüssigkeit, der charakteristischen Länge d_F und der kinematischen ν_F und dynamischen η_F Viskosität der Flüssigkeit. Aus diesen physikalischen Größen lässt sich dann die Berieselungsdichte Γ bestimmen. Zudem kann sich die Reynolds-Zahl auch aus der mittleren Filmdicke δ_m und der mittleren Filmgeschwindigkeit u_m ableiten. Die Reynolds-Zahl ist eine der zentralen Kenngrößen, um die Filmströmung in ihre jeweiligen Bereiche zu unterteilen.

Eine weitere Kennzahl, welche maßgeblich verwendet wird, ist die Prandtl-Zahl mit

$$\text{Pr} = \frac{\eta_F c_p}{\lambda_F}, \quad (2.2)$$

welche eine rein stoffdatenbasierte Kennzahl darstellt, mit der dynamischen Viskosität η_F , der Wärmekapazität c_p und der Wärmeleitfähigkeit λ_F des Fluides. Des Weiteren wird auch die Filmkennzahl K_F oder Kapitza-Zahl [39] Ka verwendet,

$$K_F = \frac{\rho_F \sigma_F^3}{g \eta_F^4} = \frac{1}{Ka}, \quad (2.3)$$

welche auch eine rein stoffdatenbasierte Kennzahl ist. Hierbei entspricht g der Erdbeschleunigung und σ_F der Oberflächenspannung des Fluides. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Filmkennzahl dem Kehrwert der Kapitza-Zahl entspricht.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die drei maßgeblichen Strömungsformen eines Fluidfilmes erläutert.

2.1.1 Laminare Filmströmung

Eine laminare Filmströmung wurde erstmals von Nusselt im Kontext der Wasserhaut-Theorie [40] untersucht und beschrieben. Der rein laminare Rieselfilm in Abbildung 2.1 hat nur eine Geschwindigkeitskomponente in x -Richtung und tritt nur bei geringer Film-Reynolds-Zahl auf.

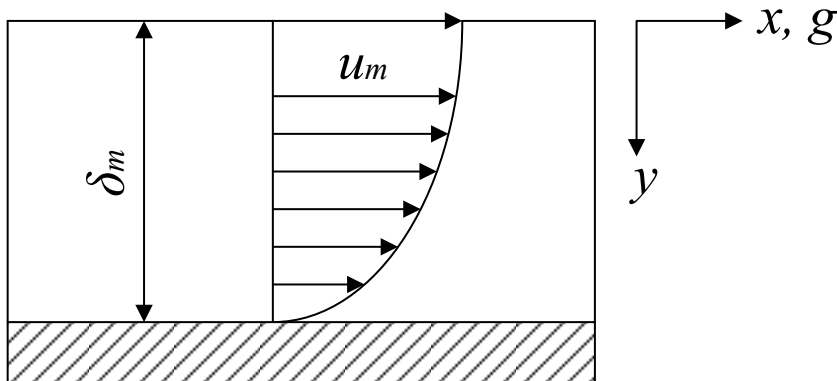


Abbildung 2.1: laminarer Rieselfilm

Nach Ishigai et al. [41] liegt der laminare Bereich bis zu einer Grenze von

$$\text{Re}_F = < 0,47 Ka^{0,1}. \quad (2.4)$$

Allerdings untersuchten Ishigai et al. [41] ausschließlich Wasserfilme, weshalb es hier in der Literatur für diese Beziehung unterschiedliche Angaben gibt. Nach Al-Sibai [42] liegt die Grenze für einen laminaren Film bei

$$\text{Re}_F = < 0,6 Ka^{0,1}, \quad (2.5)$$

wobei beide Autoren unterschiedliche Versuchsaufbauten und Fluide verwendet haben. Im Allgemeinen wird laut Al-Sibai [42] davon ausgegangen, dass der Übergang zum welligen Film ab einer Film-Reynolds-Zahl von 4 stattfindet.

Die mittlere Filmdicke δ_m eines laminaren Rieselfilms lässt sich nach Nusselt [40] sowie dem VDI-Wärmeatlas 2013 [43] wie folgt berechnen

$$\delta_m = \left(3 \frac{\nu_F^2}{g} \right)^{1/2} Re_F^{1/3}, \quad (2.6)$$

mit der mittleren Filmgeschwindigkeit u_m

$$u_m = \left(\frac{\nu_F g}{3} Re_F^2 \right)^{1/3}. \quad (2.7)$$

2.1.2 Wellige Filmströmung

Bei steigender Film-Reynolds-Zahl und Lauflänge steigt auch die Berieselungsdichte Γ , was dazu führt, dass sich erste Wellen im Flüssigkeitsfilm bilden, gemäß Abbildung 2.2.

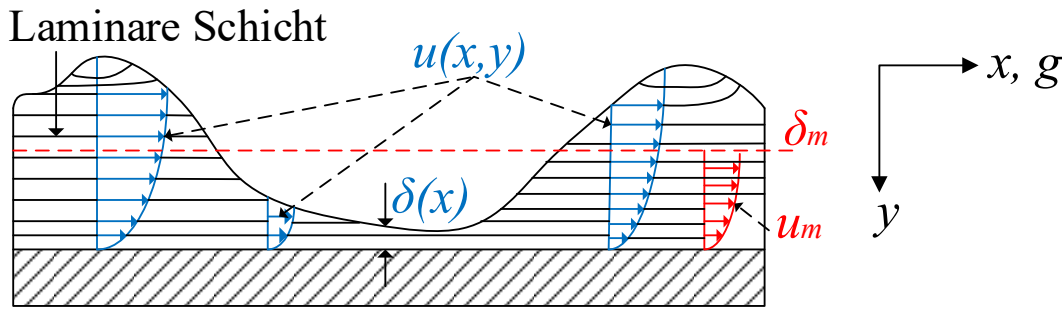


Abbildung 2.2: Laminar-Welliger-Rieselfilm

Es bilden sich zuerst erste sinusförmige Wellen aus, welche im weiteren Verlauf in unregelmäßigen Wellen, mit lokalen Filmdicken $\delta(x)$, in immer ausgeprägter Amplitude übergehen. Diese Wellenform wird auch als zweidimensional-wellig (2-D) bezeichnet. Brauer [38], Kapitza [39], Wilke [44] und Malewski [45] geben den welligen Bereich wie folgt wieder

$$4 \leq Re_F \leq 80, \quad (2.8)$$

wohingegen Ishigai et al. [41] den Bereich als Funktion der Kapitza-Zahl angeben

$$2,2 Ka^{0,1} \leq Re_F \leq 75. \quad (2.9)$$

Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass sich im Weiteren der Übergangsbereich zwischen einem stabilen welligen Film und einem voll turbulenten Film zwischen

$$75 \leq Re_F \leq 400 \quad (2.10)$$

ausbildet. Laut Weise et al. [29] und Horn [46] lässt sich der Übergangsbereich in verschiedene Filmströmungen unterteilen, siehe Abbildung 2.3.

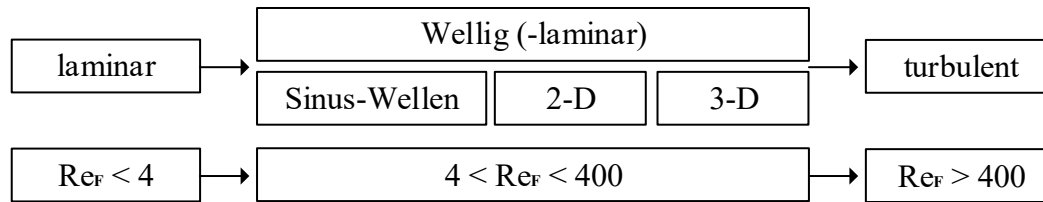


Abbildung 2.3: Filmströmungsregionen nach Weise et al. [29] und Horn [46]

Wie zu erkennen ist, kann der Übergangsbereich in folgende Kategorien unterteilt werden:

- Wellig (-laminar), mit einer geringen ($Re_F < 10$) oder einer großen ($Re_F > 300$) Film-Reynolds-Zahl
- Eine reine Sinus-Wellen-Strömung
- Eine zwei- bis dreidimensionale wellige Strömung, bei gleicher Film-Reynolds-Zahl, bevor die Strömung in den voll turbulenten Bereich übergeht

Daher ist dieser Bereich laut Gropp [47], aufgrund seiner sehr unterschiedlichen möglichen Strömungszustände, mit großen Unsicherheiten behaftet.

Es hat sich in Untersuchungen von Al-Sibai [42], Nordgren und Setterwall [48] sowie Karapantsios und Karabelas [49] gezeigt, dass die Oberflächenspannung einen erheblichen Einfluss auf den Strömungszustand und die Wellenbildung haben kann. Durch eine kleine Oberflächenspannung kann es schon in einem welligen Film zu ersten Verwirbelungen und Turbulenzen kommen, welche einen Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeit, Filmdicke, wie auch die Wärmeübertragung in dem Film haben können. Drosos et al. [50] haben in ihren Untersuchungen dargestellt, dass die Oberflächenspannung schon im Einlaufbereich großen Einfluss auf die Wellenbildung eines Rieselfilmes hat und dass es dadurch zu Unregelmäßigkeiten und Turbulenzen im entstehenden Fluidfilm kommen kann.

2.1.3 Turbulente Filmströmung

Wie in Gleichung (2.10) angegeben, beginnt eine voll turbulente Filmströmung ab einer Reynoldszahl von $Re_F > 400$. In einem voll turbulenten Film, siehe Abbildung 2.4, gibt es stellenweise ein sehr starkes Wellenbild, wodurch die lokale Filmdicke $\delta(x)$ der Welle um ein Vielfaches größer sein kann als direkt hinter oder vor der Welle. Die auftretenden Turbulenzen haben Auswirkungen auf die Wellenbildung sowie Stabilität des Rieselfilmes und das kann zu Ablösungen sowie starken Verwirbelungen in einer Welle führen. Daher können Berechnungen zur mittleren Filmdicke und Geschwindigkeit nach Gleichung (2.6) und (2.7) fehlerbehaftet sein.

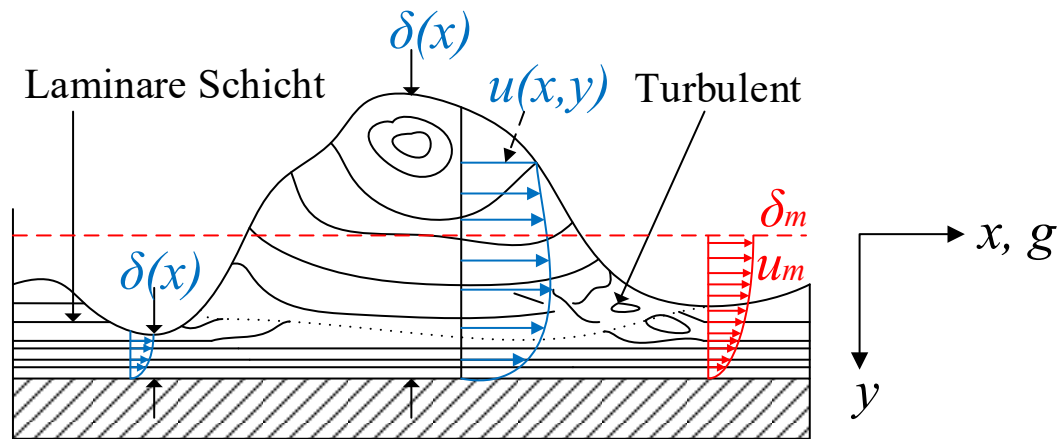


Abbildung 2.4: Turbulent-welliger Rieselfilm

Weise et al. [29] und Al-Sibai [42] gehen nach ihren Untersuchungen davon aus, dass sich eine vollturbulente Filmströmung (starke Wellenbildung, Verwirbelungen innerhalb der Wellen) erst ab Reynolds-Zahlen > 800 voll ausbilden. Dieser Wert ist jedoch auch wieder abhängig von den geometrischen und stofflichen Eigenschaften.

2.2 Wärmeübergang beim Sieden

Wird ein Fluid von seiner flüssigen Phase in die Gasphase überführt, wird von Sieden gesprochen und im Allgemeinen wird zwischen dem *stillen Sieden* oder *konvektiven Sieden*, dem *Blasensieden* und dem *Filmsieden* unterschieden [43, 52]. Die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Siedevorgängen wurden von Nukiyama [51] experimentell festgestellt. Er entwickelte daraufhin die „Nukiyama-Kurve“, siehe Abbildung 2.5, welche einen Zusammenhang zwischen der aufgeprägten Wärmestromdichte und den verschiedenen Siedevorgängen darstellt. Aus der Nukiyama-Kurve lassen sich die verschiedenen Siedevorgänge in Regionen unterteilen und in Abhängigkeit der Wärmestromdichte $\dot{q}$ und der daraus resultierenden Temperaturdifferenz $\Delta T = T_w - T_{sat}$ (Wandtemperatur des Heizelements-Sättigungstemperatur des Fluides) darstellen.