

1. Einleitung

Bei technischen Anwendungen, in denen kaltes Wasser mit Wasserdampf in Verbindung steht, besteht stets die Möglichkeit einer schnellen und schlagartigen Kondensation. Eine solche kann ein erhebliches Gefahrenpotenzial für Anlagen, Personal und Umwelt darstellen. Eine der gefährlichsten Erscheinungsformen ist der kondensationsinduzierte Druckstoß, der kurzzeitig ein Vielfaches des Betriebsdrucks einer Anlage erreichen kann. Die Ursache dieses Phänomens beruht auf der Implosion von Dampfeinschlüssen und der Kollision des umgebenden Wassers mit sich selbst. Dabei wirken hohe Trägheitskräfte der Flüssigkeit welche bei ihrer abrupten Abbremsung enorme Druckerhöhungen nach sich zieht. Die Folge sind das Bersten von Rohrleitungen, die Explosion von Behältern, das Versagen von Halterungen und die Zerstörung von Anlagenkomponenten wie Ventilen und Messtechnik.

Der kondensationsinduzierte Druckschlag, oder kurz der Kondensationsschlag, findet sich in einer Vielzahl von Industriezweigen. So sind seit den 1970er-Jahren immer wieder meldspflichtige Störfälle in deutschen und amerikanischen Nuklearanlagen aufgetreten, die direkt oder indirekt mit einem Kondensationsschlag zusammenhängen. In konventionellen Kraftwerken und in der chemischen Industrie sind Kondensationsschläge in dampfführenden Rohrleitungen bei Anfahrprozessen mitunter an der Tagesordnung. Auch bei der Bitumenförderung aus Ölsänden sowie in der Lebensmittelindustrie bei der Heißgasabtauung von Ammoniakkälteanlagen finden sich zahlreiche Zwischenfälle mit teilweise gravierenden Ausmaßen.

Um Kondensationsschläge und deren Auswirkungen zu vermeiden, wird das Phänomen seit geraumer Zeit experimentell, numerisch und analytisch untersucht. Das experimentelle Bestreben geht dabei in die Richtung diejenigen Bedingungen für das Auftreten eines Kondensationsschlags zu identifizieren und daraus Vermeidungsstrategien zu entwickeln. Dies betrifft sowohl die geometrischen Eigenheiten eines Anlagenabschnitts, als auch die Art und Weise wie ein Prozess, in welchem Dampf und Wasser auftreten, gefahren werden muss. Während analytische Ansätze zur Beschreibung eines Kondensationsschlags aufgrund der Komplexität des Phänomens im Gesamten schnell an ihre Grenzen gelangen, werden in den vergangenen drei Dekaden vor allem numerische Berechnungsansätze verfolgt. Diese reichen von einfachen Faustformeln über eindimensionale Systemcodes bis hin zu aufwendigen dreidimensionalen Strömungssimulationen. Diese Ansätze versuchen einerseits das Auftreten eines Kondensationsschlags im Vorweg vorauszusagen und andererseits die einhergehende Druckerhöhung bei dessen Auftreten zu bestimmen.

Trotz aller bisherigen Bemühungen bestehen noch keine einheitlichen Kriterien für das sichere Betreiben einer Anlage, die das Potenzial für einen Kondensationsschlag bietet. Auch gibt es bisher kein Berechnungswerkzeug, das alle Aspekte eines Kondensationsschlags abbildet und in seinem Auftreten und seiner Ausprägung vorhersagen kann. Der Grund hierfür liegt in erster Linie darin, dass das Phänomen noch nicht gänzlich verstanden und beschrieben ist. Insbesondere fehlt es an Wissen um maßgebliche Detailphänomene. Im Weiteren besteht keine solide und öffentlich verfügbare Datenbasis für Validierungen. Daraus resultieren Ungenauigkeiten und fälschliche Annahmen in der Modellierung, die schließlich eine exakte Berechnung verhindern. Es gilt daher in erster Linie dem bisherigen Mangel an phänomenologischem Verständnis der Ursache von Kondensationsschlägen entgegenzuwirken und



daraufhin eine breite Datenbasis für die Validierung von numerischen Simulationen zur Verfügung zu stellen. Neben der ganzheitlichen Beschreibung des Phänomens werden dabei im gleichen Maße Kenntnisse über Detailphänomene benötigt.

2. Stand des Wissens

Kondensationsschläge stellen ein komplexes thermohydraulisches Phänomen in einem Mehrphasensystem dar. Um es in Gänze verstehen zu können, bedarf es der Kenntnis um die zugrundeliegenden Mechanismen der beteiligten Systeme. Diese sind durch die Eigenschaften der einzelnen Phasen, deren Zusammenwirken und der Interaktion mit der Systemgrenze gekennzeichnet. Sowohl das rein strömungsmechanische Verhalten als auch die thermodynamische Wechselwirkung sind zu berücksichtigen und zu erfassen. Dem Verständnis um einzelne Detailphänomene sowie der ganzheitlichen Interpretation ist ein gleich hoher Stellenwert zuzuordnen. Im Folgenden werden alle zum Verständnis des Kondensationsschlagphänomens notwendigen Wissensgebiete vorgestellt und schließlich in der Behandlung von nicht-deterministischen Kondensationsschlägen zusammengeführt.

2.1. Mehrphasenströmungen

Mehrphasenströmungen treten in technischen Applikationen in den unterschiedlichsten Formen auf. Aus der Gesamtheit der möglichen Kombinationen bestehend aus flüssigen, festen und gasförmigen Aggregatzuständen in den unterschiedlichsten Apparaturen wird im Rahmen dieser Arbeit speziell auf die Kombination aus einer gasförmigen und einer flüssigen Phase in einer horizontalen Rohrleitung eingegangen. Bei der Beschreibung eines solchen Systems sind sowohl die strömungsmechanischen Grundlagen in Form von Erhaltungsgleichungen als auch die Wechselwirkung der beiden Phasen von Bedeutung.

2.1.1. Strömungsmechanische Grundlagen

Eine jede Strömung ist gekennzeichnet durch die Erhaltungsgleichung für Masse, Impuls und Energie. Im Falle eines Mehrphasensystems gelten diese Gleichungen für jede beteiligte Phase. Das Zusammenwirken wird durch zusätzliche Transportansätze oder auch Schließungsterme beschrieben.

Die Erhaltungsgröße der Masse wird durch die Kontinuitätsgleichung charakterisiert. Im Fall eines Mehrstoff- bzw. Mehrphasensystems wird die Masse jeder vorhandenen Phase i mit je einer differenziellen Massenbilanz

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho_i \vec{v}_i) + r_i \quad (2.1)$$

erfasst. Darin steht die partielle Ableitung für die Änderung der i -ten Partialdichte über die Zeit, $\vec{v}_i$ für den Geschwindigkeitsvektor und r_i für die Massenquellichten.

Die Erhaltungsgröße des Impulses setzt sich aus dem in ein Kontrollvolumen eintretenden konvektiven Impulsfluss, dem austretenden konvektiven Impulsfluss sowie aus der Summe der auf das Element wirkenden Kräfte zur zeitlichen Änderung des Impulses zusammen. Formal beschreibt

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) = -\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) - \nabla \cdot \underline{\underline{\sigma}} + \rho f \quad (2.2)$$



die differenzielle Impulsbilanz. In Gleichung 2.2 steht $\underline{\underline{\sigma}}$ für den Spannungstensor und der Ausdruck ρf für die Volumenkraftdichte. Letztere ist beispielsweise zu berücksichtigen, wenn die Gravitation maßgeblichen Einfluss nimmt.

Die Bilanzierung der Gesamtenergie eines Kontrollvolumens setzt sich zusammen aus der der Bilanzierung der potenziellen, der kinetischen und der inneren Energie. Häufig wird anstatt der inneren Energie auch die Enthalpie bilanziert. Formal setzt sich die Erhaltungsgleichung der Gesamtenergie e wie folgt zusammen:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e) = -\nabla \cdot (\rho e \vec{v}) - \nabla \cdot (\underline{\underline{\sigma}} \cdot \vec{v} + q^*) + \sum \left(\rho_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial t} + \varphi_i r_i^V \right) \quad (2.3)$$

Gleichung 2.3 beinhaltet die in q^* zusammengefasste Wärmeleitung sowie den Energietransport infolge von Diffusionsströmen und die in $\sum(\dots)$ zusammengefasste Summe der Produktionsdichten. Letztere setzen sich aus den zeitlichen Änderungen der Potenziale φ_i und dem Beitrag infolge von chemischen Reaktionen mit den Reaktionsraten r_i^V zusammen, wobei beide in den meisten Fällen vernachlässigt werden können.

In technischen Anwendungen reduzieren sich Gleichung 2.1 bis 2.3 aufgrund von getroffenen Vereinfachungen häufig zu handhabbaren Ausdrücken. Gängige Vereinfachungen bei horizontalen Rohrströmungen ohne Reaktion und Phasenübergang sind

- die Annahme konstanter Dichten ρ_i ,
- die Vernachlässigung der Massenquellldichte r_i und der Produktionsrate r_i^V ,
- die Vernachlässigung von Kräftefeldern f und
- die Reduzierung der Gesamtenergieerhaltung auf die Bilanzierung der Enthalpie h zu

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h \vec{v} + \nabla \cdot q^* = \frac{\partial p}{\partial t}. \quad (2.4)$$

Kann ferner ein stationärer Prozess angenommen werden, fallen so ebenfalls die Zeitableitungen weg. Folglich bleiben drei Erhaltungsgleichungen übrig, mit welchen bereits der Großteil praxisrelevanter Problemstellungen hinreichend genau beschrieben werden kann. Wie sich später zeigen wird, ist jedoch bei der Untersuchung von Druckschlägen im Allgemeinen und Kondensationsschlägen im Speziellen insbesondere die Annahme einer konstanten Dichte unzulässig.

2.1.2. Horizontale zweiphasige Rohrströmungen

Koexistieren eine gasförmige und eine flüssige Phase in einer horizontalen Rohrleitung, so stellen sich in Abhängigkeit des Phasenanteils unterschiedliche Verteilungsmöglichkeiten ein. Die Verteilungsmöglichkeiten oder auch Strömungsformen der kontinuierlichen und diskontinuierlichen Phase werden je nach Autor unterschiedlich beschrieben, wobei deren Abgrenzung zueinander oft vom subjektiven Empfinden geprägt ist. An dieser Stelle soll die Klassifizierung nach Brauer [Bra71] in vier Grundzustände erfolgen: der Blasen-, Schichten-, Film- und Nebelströmung. Zu diesen Grundzuständen werden vier weitere Verteilungszustände definiert, die Unterkategorien der Blasen- bzw. der Schichtenströmung sind. Eine schematische Übersicht ist in Abbildung 2.1 im Längs- und Querschnitt der Rohrleitung dargestellt.

Die einzelnen Strömungsformen können wie folgt charakterisiert werden:

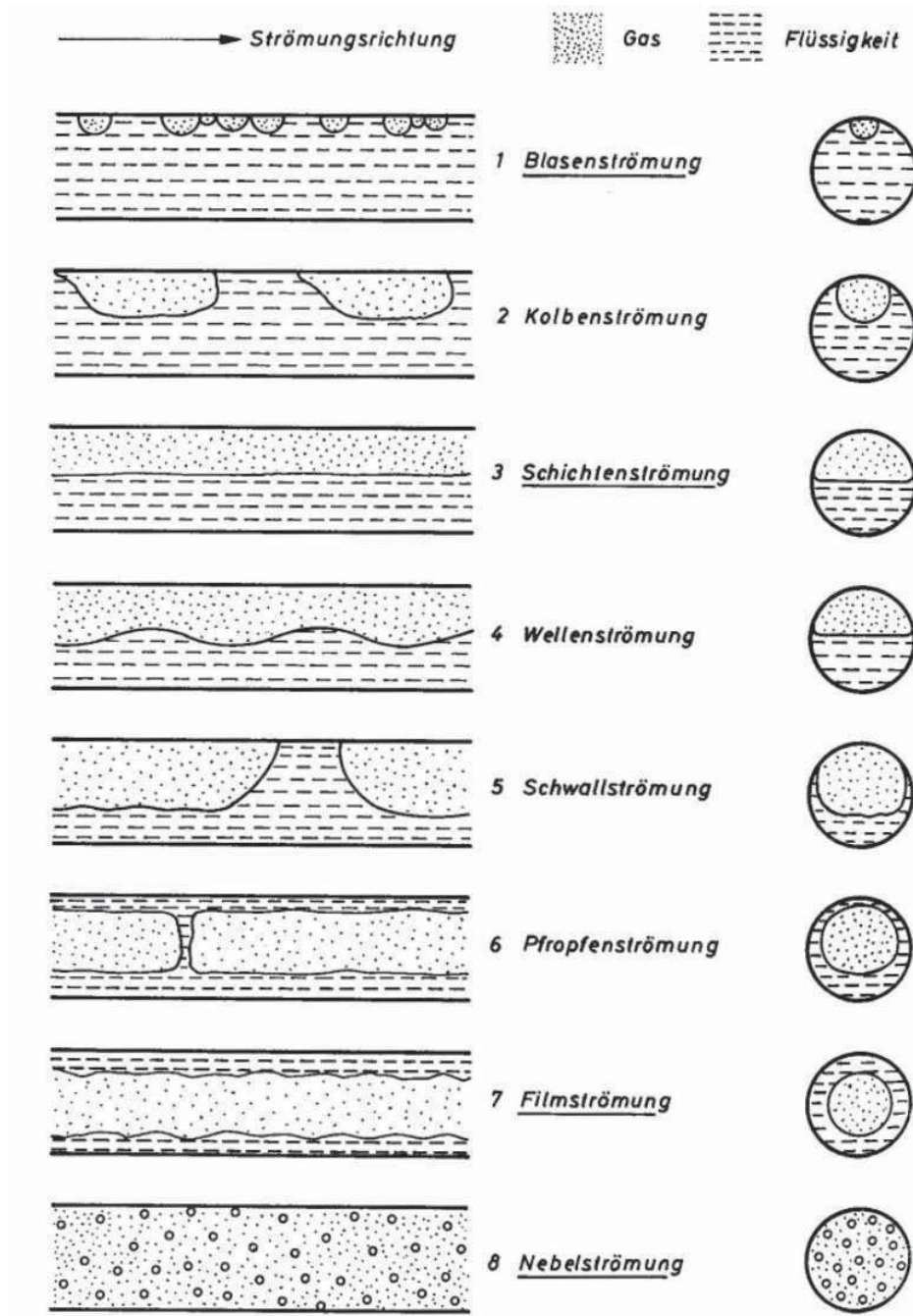


Abbildung 2.1.: Phasenverteilungszustände bei Gas-Flüssigkeitsströmungen in einem horizontalen Rohr nach Brauer [Bra71]



Blasenströmung (engl. bubbly flow): Ist der Gasanteil sehr gering, so bewegt sich die diskontinuierliche Gasphase in Form von Gasblasen und die kontinuierliche Flüssigphase durch das Rohr. Die Gasblasen befinden sich aufgrund des Auftriebs mehrheitlich in der Gegend des oberen Rohrscheitelpunkts. Infolge von Turbulenz kommt jedoch ein Rücktransport zustande, so dass Gasblasen ebenfalls in der Rohrmitte vorkommen.

Kolbenströmung (engl. elongated bubble flow): Bei Erhöhung des Gasgehaltes koaleszieren die zuvor dispers vorliegenden Gasblasen und bilden mehrere Gaskolben. Diese durchströmen das Rohr in periodischen Abständen und sind unterteilt von Wasserbrücken.

Schichtenströmung (engl. stratified flow): Der zweite Grundzustand wird bei weiterer Erhöhung des Gasgehalts erreicht. Bei dieser Strömungsform liegen die kontinuierliche Gas- und Flüssigkeitsphase in Abhängigkeit ihrer Dichten geschichtet in der Rohrleitung vor. Die Phasengrenzfläche ist geschlossen.

Wellenströmung (engl. wavy flow): Aufgrund von Schubspannung, hervorgerufen durch die Relativgeschwindigkeit von Gas- und Flüssigkeitsphase an der Phasengrenzfläche, entstehen zunächst kleine Instabilitäten. Diese werden nach Chun und Yu [Chu00b] der Kelvin-Helmholtz-Instabilität zugeschrieben. Mit zunehmender Gasgeschwindigkeit vergrößern sich die Instabilitäten bis hin zur periodischen Wellenbildung.

Schwallströmung (engl. slug flow): Bei weiterer Erhöhung des Gasdurchsatzes steigt die Wellenamplitude zunehmend an. Nach Bernoulli sinkt an einer Querschnittsverengung, dargestellt durch den verringerten Abstand zwischen einem Wellenberg und dem Rohrscheitel, der lokale Druck. Dies bewirkt eine weitere Anhebung des Wellenberges bis zum vollständigen Verschluss des Rohrquerschnitts. Zwischen den als Schwall bezeichneten Wellenbrücken liegt die Gasphase diskontinuierlich vor.

Pfropfenströmung (engl. plug flow): Wird der Gasdurchsatz weiter erhöht, verteilt sich die Flüssigkeit über den gesamten Rohrumfang. Die Gasphase liegt in langen Pfropfen vor, welche in größeren Abständen von Flüssigkeitsmembranen unterteilt werden.

Filmströmung (engl. annular flow): Die im vorigen Strömungsregime noch intakten Flüssigkeitsmembranen werden im dritten Grundzustand, der Filmströmung, aufgebrochen. An dieser Stelle liegen beide Phasen erneut kontinuierlich vor. Die Flüssigkeitsphase benetzt die komplette Wand und die Gasphase strömt durch die Mitte des Rohres.

Nebelströmung (engl. mist flow): Der letzte Grundverteilungszustand entspricht der Invertierung der Blasenströmung. Die kontinuierliche Gasphase und die diskontinuierliche Flüssigphase in Form von Tropfen bewegen sich gemeinsam durch das Rohr. Entsprechend der höheren Flüssigkeitsdichte befinden sich die Tropfen vornehmlich in der unteren Hälfte des Rohres, wobei es auch hier aufgrund von Turbulenz zu einem Rücktransport entgegen der Schwerkraft kommt.

Um vorherzusagen, welche der beschriebenen Strömungsformen sich in einer horizontalen Rohrleitung einstellt, wird neben den Leerrohrgeschwindigkeiten der Flüssigkeits- und Gasphase die Kenntnis über die Fließrichtung benötigt. Die Leerrohrgeschwindigkeit wird dabei beschrieben als der Volumenstrom, bezogen auf den Strömungsquerschnitt, wobei angenommen wird, dass sich die jeweilige Phase allein vorliegt. Anhand geeigneter Parameter, die neben den Leerrohrgeschwindigkeiten zusätzlich weitere Stoffparameter wie die Dichte und Viskosität beinhalten, kann anhand von Strömungsformkarten das Strömungsregime bestimmt

werden. Es wird bei horizontalen Rohrströmungen im Allgemeinen zwischen gleich- und gegenläufiger Strömung unterschieden, wobei sich die Mehrzahl der existierenden Strömungsformkarten mit der gleichgerichteten Strömung befassen. Im Folgenden sollen ausschließlich horizontale Strömungen betrachtet werden.

Gleichgerichtete Strömung

Es besteht eine Vielzahl von Strömungsformkarten zur Beschreibung von gleichläufigen, horizontalen Strömungen, wobei sich alle Karten in großen Teilen überschneiden. Je nach System, für welches die einzelne Strömungsformkarte ursprünglich entwickelt wurde, können die Einflussparameter durch Korrekturfaktoren so modifiziert werden, dass sie auch auf andere Stoffsysteme übertragen werden können. Alle Strömungsformkarten verwenden in erster Linie ein zweiachsiges Diagramm dessen Ordinaten- und Abszissenparameter in direkter oder indirekter Form von Gas- und Flüssigkeitsstrom abhängen. Der Inhalt der Karte bezeichnet die einzelnen Strömungsregime, wobei je nach Autor die von Brauer [Bra71] definierten Phasenverteilungszustände mitunter zusammengefasst werden.

Die ursprünglich von Baker [Bak54] entwickelte und von Scott [Sco63] modifizierte Strömungsformkarte für Luft-/Wassersysteme und Öl-/Gassysteme definiert sechs Strömungsregime in Abhängigkeit der Parameter G_g/λ und $G_l\psi$ für kleine Rohrquerschnitte ($D < 0,05$ m). Abbildung 2.2 zeigt die Strömungsformkarte nach Baker, dargestellt von Whalley [Wha87].

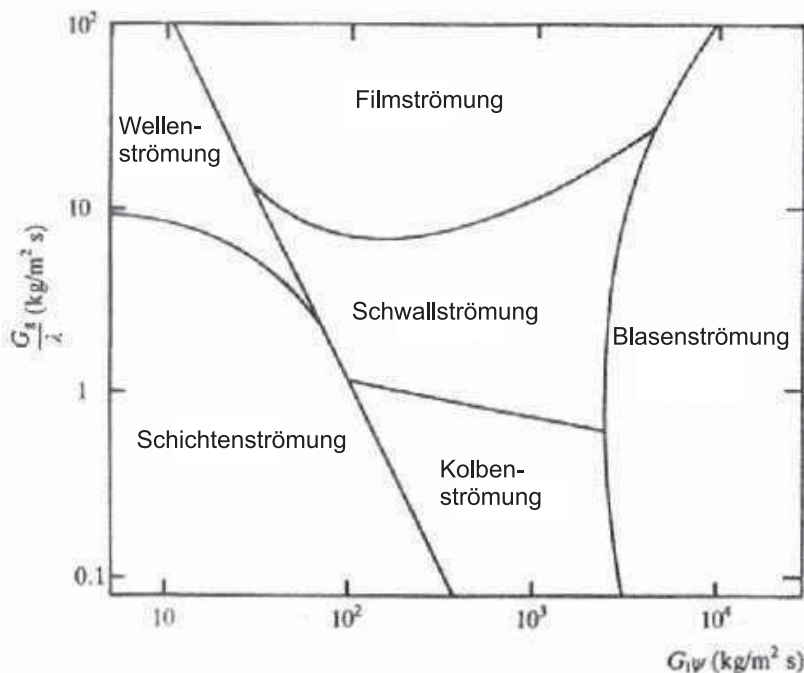


Abbildung 2.2.: Strömungsformkarte nach Baker für horizontale Rohrströmungen, dargestellt nach Whalley [Wha87]

Der Parameter der Abszisse setzt sich aus dem Massenstrom $\dot{m}_f$ der flüssigen Phase bezogen auf den Rohrquerschnitt und einem empirischen Korrekturfaktor ψ zur Berücksichtigung von abweichender Flüssigkeitsdichte ρ , Flüssigkeitsviskosität η und Oberflächenspannung σ zusammen:

$$G_l \psi = \frac{\dot{m}_f}{\frac{\pi}{4} D^2} \cdot \frac{\sigma_{\text{Wasser}}}{\sigma} \cdot \left(\frac{\eta_f}{\eta_{\text{Wasser}}} \left[\frac{\rho_{\text{Wasser}}}{\rho_f} \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

Der Ordinatenparameter beinhaltet den Gasmassenstrom $\dot{m}_g$ und einen Korrekturfaktor λ für eine abweichende Gas- und Flüssigkeitsdichte:

$$G_g / \lambda = \frac{\dot{m}_g}{\frac{\pi}{4} D^2} \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_{\text{Luft}}} \cdot \frac{\rho_l}{\rho_{\text{Wasser}}} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

Mit Hilfe dieser Parameter kann das sich in einer horizontalen Rohrleitung einstellende Strömungsregime bestimmt werden.

Weitere gebräuchliche Strömungsformkarten sind diejenigen von Taitel [Tai76], Hoogendorn [Hoo59], Govier [Gov62] und Mandhane [Man74].

Gegenläufige Strömung

Im Unterschied zur gleichgerichteten Strömung sind horizontale gegenläufige Strömungen bislang nur wenig untersucht. Für den Fall einer vertikalen gegenläufigen Strömung existieren zwar Strömungsformkarten und empirische sowie semi-empirische Korrelationen, diese lassen sich jedoch nicht ohne weiteres auf horizontale Strömungen übertragen, da in beiden Fällen unterschiedliche Merkmale dominieren.

Bei der Betrachtung von gegenläufigen horizontalen Strömungen sind drei Strömungsformen von zentraler Bedeutung: die horizontale Schichtenströmung, die Wellenströmung und die Schwallströmung. Wie im Fall einer gleichgerichteten Strömung liegen bei der gegenläufigen Schichtenströmung beide Phasen kontinuierlich mit einer zusammenhängenden Phasengrenzfläche vor. Die gasförmige Phase kann ungehindert über die flüssige Phase strömen, wobei es zu keiner merklichen Interaktion kommt. Mit Beginn der Wellenströmung setzt bei der gegenläufigen Strömung jedoch ein zusätzliches Phänomen ein: die Strömungsumkehr. Diese kann wiederum in eine teilweise und in eine vollständige Strömungsumkehr unterteilt werden.

Bei der teilweisen Strömungsumkehr beginnt ein Teil der flüssigen Phase seine Strömungsrichtung in Richtung der Gasphase umzukehren. Der Großteil der flüssigen Phase fließt jedoch weiterhin in ihre ursprüngliche Richtung. In einem gedachten Kontrollvolumen resultiert daraus eine verringerte Transportrate der Flüssigkeit $\dot{m}_{f,\text{aus}}$, als mit $\dot{m}_{f,\text{ein}}$ ursprünglich in das Kontrollvolumen eintritt. Diesen Anteil stellt die rückströmende Flüssigkeit $\dot{m}_{f,\text{rück}}$ dar. Im Bereich der teilweise umgekehrten Strömung gilt gemäß Abbildung 2.3:

$$0 \leq \frac{\dot{m}_{f,\text{rück}}}{\dot{m}_{f,\text{ein}}} \leq 1 \quad (2.7)$$

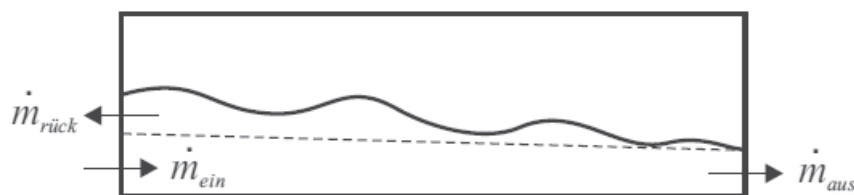


Abbildung 2.3.: Massenstromverhältnisse in einer umgekehrten Strömung [Sta07]

Ab dem Punkt, an welchem der rückströmende Anteil gleich dem einströmenden Anteil ist ($\dot{m}_{f,\text{rück}}/\dot{m}_{f,\text{ein}} = 1$), liegt eine vollständige Strömungsumkehr vor. Diese wird phänomenologisch dem Übergang zur Schwallströmung zugeordnet und kennzeichnet die Limitierung des gegenläufigen Strömungsregimes (engl. counter-current flow limitation oder auch flooding). Eine Rückkehr von der vollständigen zur teilweise umgekehrten Strömung durch die Verringerung einer der beiden Massendurchsätze ist dabei meist nicht ohne weiteres möglich, da hier ein stark ausgeprägter Hystereseeffekt vorliegt [Sta07].

Bestehende Untersuchungen setzen am Übergang zur Strömungsumkehr an und beschreiben diesen anhand von analytischen und empirischen Gleichungen. Die überwiegende Anzahl der Arbeiten geht dabei von den Untersuchungen von Wallis [Wal69] in einem rechteckigen Kanal aus. Wallis macht das Einsetzen der Strömungsumkehr an den dimensionslosen Leerrohrgeschwindigkeiten $v_{l,f}^*$ und $v_{l,g}^*$ der flüssigen und gasförmigen Phase gemäß

$$v_{l,g}^* = \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_f - \rho_g}} \cdot \frac{v_{l,g}}{\sqrt{gH}} \quad (2.8)$$

$$v_{l,f}^* = \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_f - \rho_g}} \cdot \frac{v_{l,f}}{\sqrt{gH}} \quad (2.9)$$

fest. In Gleichung 2.8 und 2.9 steht ρ_i für die Dichte der jeweiligen Phase, g für die Erdbeschleunigung und H für die Kanalhöhe. Nach Wallis Definition berücksichtigten die dimensionslosen Leerrohrgeschwindigkeiten somit die Froude-Zahl und das Verhältnis der Phasendichten. Die Froude-Zahl beschreibt dabei das Verhältnis von Trägheitskräften zu Schwerkraften und wird formal als

$$\text{Fr} = \frac{v}{\sqrt{gH}} \quad (2.10)$$

definiert. Der Übergang zur Strömungsumkehr wird daraufhin an der Summe der Wurzeln beider Leerrohrgeschwindigkeiten gemäß Gleichung 2.11 festgemacht.

$$v_{l,g}^{*\frac{1}{2}} + v_{l,f}^{*\frac{1}{2}} = 1 \quad (2.11)$$

Diese analytische Korrelation wird von weiteren Autoren als Ausgangspunkt für semi-empirische Korrelationen genutzt, wobei die einzelnen Summanden von Gleichung 2.11 mit Korrekturfaktoren belegt werden. Diese Faktoren können daraufhin in Abhängigkeit der untersuchten Geometrie und des untersuchten Stoffsystems angepasst werden.

Eine wichtige Weiterentwicklung der Wallis-Korrelation zur Bestimmung des Einsetzens der Strömungsumkehr wird von Chun [Chu00b] vorgestellt. In dieser Untersuchung wird zusätzlich der Einfluss von Kondensation in einer Dampf-/Wasser-Gegenströmung berücksichtigt und mit einer Luft-/Wasser-Gegenströmung verglichen. Chun definiert eine kritische Gasgeschwindigkeit für das Einsetzen der Strömungsumkehr zu

$$v_{g,\text{krit}} = \sqrt{\frac{\rho_f g H_g \cos \theta C_{P,\text{krit}}}{\rho_g}} \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{4}{\pi} + f_i\right) \cdot (1 - C_c) + C_c - 1}}{(4/\pi) + f_i - 1} \quad (2.12)$$

mit

$$C_{P,\text{krit}} = 1 + \frac{32}{9\pi} \frac{\eta_{\text{krit}}^*}{S_i} \frac{DH_g}{S_i} \cdot \left(1 - \frac{2H_f}{D}\right) \quad (2.13)$$

und

$$C_c = \frac{\rho_g}{\rho_f} \cdot \frac{3,72 \bar{v}_{g,krit}^2}{g H_g \cos \theta C_{P,krit}}. \quad (2.14)$$

Hierin stehen ρ_f und ρ_g für die Dichten der flüssigen und gasförmigen Phase, g für die Erdbeschleunigung, H_f und H_g für die Höhen der Flüssigkeits- und Gasphase, θ für den Neigungswinkel des Rohres, D für den Rohrdurchmesser, S_i für die Sehnenlänge der Phasengrenzfläche im Rohrquerschnitt, η_{krit}^* für die kritische Wellenhöhe bezogen auf H_g und $\bar{v}_{g,krit}$ für die mittlere kritische Gasphasengeschwindigkeit. Für die Berechnung des Reibungsfaktors f_i empfiehlt Chun die empirische Reynolds-Korrelation nach Lee [Lee92]

$$f_i = 4,13 \cdot 10^{-11} \text{Re}_g^{0,96} \text{Re}_f^{0,31} \left(\frac{\eta_f}{\eta_g} \right)^{1,86} \quad (2.15)$$

mit η_f und η_g als den Viskositäten der flüssigen und gasförmigen Phase. Diese nur numerisch lösbare Korrelation berücksichtigt ebenfalls den Einfluss von Kondensationseffekten und deckt sich größtenteils mit der modifizierten Wallis-Korrelation

$$m \cdot v_{l,f}^{*\frac{1}{2}} + v_{l,g}^{*\frac{1}{2}} = C \quad (2.16)$$

mit den Korrekturfaktoren $m = 0,60$ und $C = 0,52$. Daraus kann die Strömungsformkarte nach Abbildung 2.4 entwickelt werden, die das Einsetzen der Schwallströmung für Luft- und Wasserströmungen bzw. Dampf- und Wasserströmungen beschreibt.

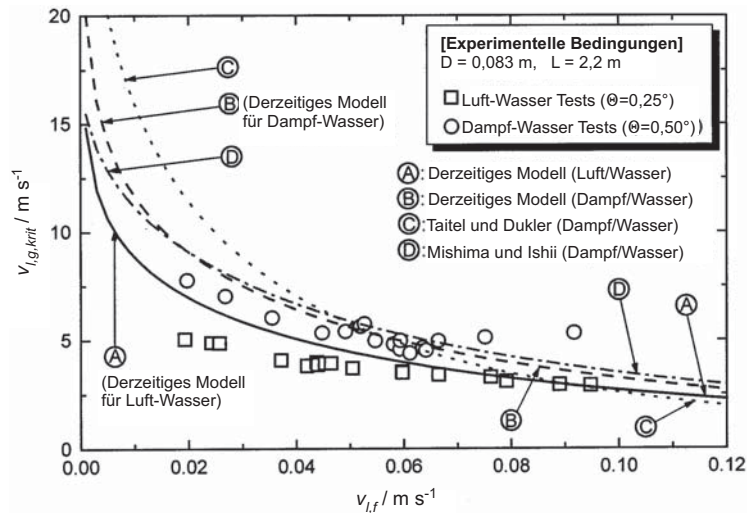


Abbildung 2.4.: Strömungsformkarte für den Übergang zur vollständigen Strömungsumkehr nach Chun [Chu00b]

Während die Strömungsformkarte nach Chun das Einsetzen der Strömungsumkehr am phänomenologischen Wechsel des Strömungsregimes Schichten- zu Schwallströmung festmacht, ist von Stäbler [Sta07] dieser Übergang detaillierter beschrieben. So werden in der Strömungsformkarte aus Abbildung 2.5 zusätzlich die Übergänge von teilweiser und vollständiger Strömungsumkehr gekennzeichnet.

In der Strömungsformkarte kennzeichnet die OSTF-Linie den eingangs erwähnten hystere-sebedingten Übergang vom Bereich der vollständigen Strömungsumkehr zurück zur stabilen Schichtenströmung. u_{LS} und u_{GS} beschreiben die Volumenstromdichte der Gas- bzw. Flüssigkeitsphase gemäß $u_{iS} = \dot{V}_i/A$.