

1 Einleitung und Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Grenzen des stationären Flüssigkeitstransportes in offenen Kapillarkanälen. Als offene Kapillarkanäle oder offene Kapillaren werden Strukturen bezeichnet, in denen Flüssigkeitsströmungen mit freier Oberfläche zur angrenzenden Gasphase durch Kapillarkräfte ermöglicht werden. Diese Kräfte resultieren aus der Oberflächenspannung sowie -krümmung und beeinflussen wesentlich die Strömungseigenschaften.

Unter terrestrischen Bedingungen ist die Wirkung der Kapillarkräfte in der Regel durch Gravitationskräfte überlagert und die technische Relevanz daher auf Kanäle sehr kleiner Abmessungen beschränkt. Ein weites Anwendungsfeld eröffnet sich dagegen in der Raumfahrttechnologie, da im interplanetaren Raum oder auf geostationären Umlaufbahnen die Gravitationskräfte klein bzw. stark kompensiert sind. Hier lassen sich Kapillarkanäle nutzen, um Flüssigkeiten zu positionieren oder über große Distanzen zu transportieren.

Die bedeutendsten Anwendungsbeispiele sind derzeit Systeme zur Treibstoffhandhabung in Oberflächenspannungstanks von Satelliten und anderen Raumfahrzeugen, in denen der Treibstoff über offene Kapillarkanäle zum Tankauslass gefördert wird. Hierbei handelt es sich in der Regel um eine erzwungene, also aktiv von außen aufgeprägte Strömung. Um eine kontinuierliche Treibstoffversorgung zu gewährleisten, muss bei der Auslegung der Tanks berücksichtigt werden, dass eine stabile, einphasige Strömung in Kapillarkanälen nur bis zu einem bestimmten maximalen Volumenstrom realisiert werden kann. Wird dieser überschritten, kollabieren die freien Oberflächen, und Gas bricht in die Flüssigkeit ein. Eine kontinuierliche, blasenfreie Treibstoffversorgung sowie der fehlerfreie Betrieb des Triebwerks sind in diesem Fall nicht mehr möglich.

In der Literatur sind Untersuchungen von erzwungenen offenen Kapillarströmungen bisher kaum vorgenommen worden. Insbesondere das Phänomen der Volumenstrombeschränkung ist bislang nicht verstanden. Experimentelle Daten sowie theoretische Ansätze liegen – bis auf die im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Publikationen – nicht vor, und nur wenige Beiträge bieten numerische Lösungen zu dieser Thematik.

Diese Arbeit setzt sich daher zum Ziel, stationäre Flüssigkeitsströmungen in offenen Kapillarkanälen theoretisch, numerisch und experimentell zu untersuchen. Insbesondere soll sie im Hinblick auf die Beschränkung des Volumenstroms zum grundlegenden Verständnis offener Kapillarströmungen beitragen.

1 Einleitung und Zielsetzung

Es wird dabei der Fragestellung nachgegangen, ob die Grenze des stationären Flüssigkeitstransportes durch einen „Choking-Effekt“ verursacht wird. Choking ist ursprünglich aus der Gasdynamik bekannt und bezeichnet verallgemeinert das Phänomen, dass der Massenstrom einer beliebigen Strömung durch einen Maximalwert begrenzt wird, wenn die Strömungsgeschwindigkeit v lokal eine charakteristische Wellengeschwindigkeit erreicht. In kompressiblen Strömungen beispielsweise ist diese durch die Schallgeschwindigkeit v_s definiert. Der maximale Massenstrom wird erreicht, wenn die MACH-Zahl ($Ma = v/v_s$) den Wert $Ma = 1$ annimmt. In offenen Gerinneströmungen tritt dieser Effekt wiederum beim Erreichen der Flachwasserwellengeschwindigkeit v_f auf. Die charakteristische Kennzahl hierfür ist die FROUDE-Zahl ($Fr = v/v_f$), so dass der maximale Volumenstrom für $Fr = 1$ erreicht wird. Da gewisse Ähnlichkeiten zu diesen Strömungen bestehen, liegt die Vermutung nahe, dass Choking auch in offenen Kapillarströmungen auftreten kann.

In Anlehnung an gebräuchliche Geometrien in Oberflächenspannungstanks werden die Untersuchungen an einem Kapillarkanal aus zwei parallelen Platten durchgeführt. Die Strömung entsteht durch aktive Flüssigkeitsentnahme mit konstantem Volumenstrom am Kanalauslass, wobei der Einlass von einem Reservoir passiv mit Flüssigkeit versorgt wird. Entlang der offenen Strecke des Kanals sind seitlich freie Flüssigkeitsoberflächen zur angrenzenden Gasphase ausgebildet.

Methodisch umfasst die Arbeit einen experimentellen und zwei theoretische Arbeitsschwerpunkte. Sie ist in neun Kapitel unterteilt. Nach einer Einführung in die technische Anwendung offener Kapillarkanäle in Oberflächenspannungstanks gibt das erste Kapitel eine Übersicht über die Grundlagen kapillarer Phänomene und die verfügbare Literatur zu offenen Kapillarströmungen. Da das Auftreten von Choking in kapillaren Strömungen bisher nicht betrachtet worden ist, werden die Auswirkungen dieses Effektes in ähnlichen Strömungen dargestellt.

In Kapitel 3 wird ein eindimensionales, stationäres Strömungsmodell zur theoretischen Beschreibung der Strömung aufgestellt. Wesentliche Bestandteile dieses Abschnitts sind die Darstellung der Grundannahmen und Definition der Strömungskennzahlen sowie die Modellierung der freien Flüssigkeitsoberflächen und des irreversiblen Druckverlustes der Strömung. Das resultierende nichtlineare Differentialgleichungssystem wird numerisch gelöst und liefert den maximalen Volumenstrom der Strömung sowie alle fundamentalen Strömungsgrößen längs des Kanals. Hierzu zählen insbesondere die Profile der Flüssigkeitsoberflächen.

Kapitel 4 befasst sich mit den physikalischen Ursachen, die zur Beschränkung des Volumenstroms der Strömung führen. Hier wird dargestellt, inwieweit Ähnlichkeiten zu bekannten Strömungen existieren und welche Schlussfolgerungen sich daraus für offene Kapillarströmungen ableiten lassen. Als zentrale Größe wird dabei der Geschwindigkeitsindex $S = v/v_c$ als Quotient aus der Strömungsgeschwindigkeit v und der longitudinalen Kapillar-

wellengeschwindigkeit v_c analog zur MACH- und FROUDE-Zahl eingeführt. Die theoretischen Betrachtungen zeigen, dass der Choking-Effekt auftritt, sobald der Geschwindigkeitsindex lokal den Wert $S = 1$ annimmt. Unter diesen Bedingungen ist der Volumenstrom maximal und kann prinzipiell unter Erhalt der Stationarität der Strömung nicht erhöht werden.

Die Kapitel 5 und 6 beschreiben den Aufbau, die Durchführung und die Auswertung der Experimente, die unter kompensierter Gravitation im Fallturm in Bremen und an Bord der Höhenforschungsrakete TEXUS-37 durchgeführt wurden. Ziel ist es, die Profile der Flüssigkeitsoberflächen, den maximalen Volumenstrom der stabilen Strömung sowie den Geschwindigkeitsindex zu bestimmen. Dabei wurde angestrebt, durch Variation der Kanalabmessungen und durch Verwendung verschiedener Testflüssigkeiten einen möglichst großen Kennzahlbereich abzudecken.

Die Darstellung der experimentellen Beobachtungen sowie die Diskussion der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 7. Die Verifizierung des Strömungsmodells wird anhand des Vergleichs der experimentell und theoretisch bestimmten Profile sowie der maximalen Volumenströme vorgenommen, für die sich eine gute Übereinstimmung herausstellt. Diesem Vergleich geht eine ausführliche Darstellung der Profilvermerkmale und der Reproduzierbarkeit der Experimente voraus. Die anschließende Diskussion des experimentell und numerisch ermittelten Geschwindigkeitsindex bestätigt den theoretisch vorhergesagten Choking-Effekt. Die numerischen Rechnungen zeigen, dass der Geschwindigkeitsindex für den maximalen Volumenstrom gegen den Wert $S = 1$ strebt. Oberhalb dieses Volumenstroms existieren keine Lösungen der stationären Modellgleichungen. Dieses Ergebnis wird durch die Experimente bestätigt, auch wenn aufgrund der unvermeidbaren instationären Randbedingungen das Strömungslimit nicht exakt erreicht wird. Als weiterer Aspekt der Untersuchungen wird die Auswirkung des irreversiblen Druckverlustes auf die Strömung betrachtet. Zu diesem Zweck wird eine numerische Parametervariation durchgeführt, aus der hervorgeht, dass die Strömung durch verschiedene Kennzahlbereiche klassifiziert werden kann, in denen die Oberflächenprofile und Geschwindigkeitsindizes signifikant unterschiedliche Merkmale aufweisen. Insbesondere zeigt sich, dass der Choking-Effekt in sehr stark viskosen Strömungen seine Wirkung verliert. Abschließend befasst sich die Arbeit mit Näherungslösungen für einzelne Kennzahlbereiche. Diese können im Hinblick auf technische Anwendungen zur Abschätzung des kritischen Volumenstroms in offenen Kapillarkanälen und zum Verständnis des Strömungsphänomens beitragen.

In Kapitel 8 wird die Arbeit zusammengefasst. Kapitel 9 gibt einen Ausblick auf weiterführende Experimente und theoretische Ansätze. Spezielle Details des theoretischen Modells und der Experimentauswertung sind in den Anhängen A bis C aufgeführt.

2 Stand der Forschung

Der Flüssigkeitstransport in offenen Kapillarkanälen ist nur in Umgebungen möglich, in denen der hydrostatische Druck der Flüssigkeit klein gegenüber dem Kapillardruck der Flüssigkeitsoberfläche ist. Nur unter diesen Bedingungen können die Kapillarkräfte die Flüssigkeit im Kanal halten. Um diese Voraussetzung zu erfüllen, darf die charakteristische Länge der Flüssigkeitsoberfläche, entlang derer die Beschleunigung wirkt, nicht wesentlich größer als die Kapillarlänge $l_c = \sqrt{2\sigma/(\rho g)}$ ¹⁾ (vgl. Landau & Lifschitz, 1991) sein. Infolge der vergleichsweise starken Gravitation ist auf der Erde $l_c \sim \mathcal{O}(10^{-3} \text{ m})$ und die erdgebundene Anwendung offener Kapillarkanäle daher auf geringe geometrische Abmessungen beschränkt. In der Computertechnologie beispielsweise werden sie als Mikroheatpipes zur Kühlung von Prozessoren eingesetzt (Dunn & Reay, 1994).

Ist die Gravitation jedoch klein oder teilweise kompensiert²⁾, wie im interplanetaren Raum bzw. auf orbitalen Bahnen, lassen sich wesentlich größere Kapillarlängen erreichen, so dass unter diesen Bedingungen vergleichsweise große Kapillarkanäle realisiert werden können. In der Raumfahrttechnologie werden solche Kanäle daher genutzt, um Flüssigkeiten beliebig zu positionieren und über große Distanzen zu transportieren. Typische Anwendungsgebiete sind thermale Systeme wie Heatpipes oder kapillargetriebene Kreisläufe (Gilmore, 1994) und Systeme zur Handhabung von Flüssigkeiten, wie beispielsweise Abwässer, Kondensate oder Treibstoffe (Jaekle, 1991; Rollins *et al.*, 1985; Kostner & Sani, 1990).

Um zu verdeutlichen, wie sich die Grenzen des Flüssigkeitstransports in offenen Kapillarkanälen auf die Auslegung solcher Systeme auswirkt, gibt der folgende Abschnitt eine Übersicht über den Einsatz von Kapillarkanälen zur Förderung von Treibstoffen in Oberflächenspannungstanks von Raumfahrzeugen. Im Anschluss daran werden die Grundlagen zur Beschreibung kapillarer Strömungen zwischen parallelen Platten dargestellt und die relevanten Publikationen zu offenen Kapillarströmungen aufgeführt. Da die grundlegenden Aspekte zum Auftreten von Choking in kapillaren Strömungen bisher nicht betrachtet wurden, wer-

¹⁾Hierin bezeichnet σ die Oberflächenspannung, ρ die Dichte der Flüssigkeit und g die herrschende Beschleunigung.

²⁾Für den Begriff kompensierte Gravitation sind in der Literatur auch die Begriffe Schwerelosigkeit oder Mikrogravitation (μg) gebräuchlich. Schwerelosigkeit wird dann erreicht, wenn die aufgrund der Gravitation auf einen Körper wirkende Volumenkraft durch eine entgegengerichtete Kraft kompensiert wird, die aus der Beschleunigung des Bezugssystems resultiert.

den abschließend die bisherigen Erkenntnisse über diesen Effekt in ähnlichen Strömungen zusammengefasst.

Bemerkung: Zur Unterscheidung zwischen dimensionslosen und dimensionsbehafteten Größen wird die folgende Notation verwendet: Alle dimensionsbehafteten Variablen der betrachteten Kanalströmung werden mit einem Hochkomma ' gekennzeichnet, alle dimensionslosen Variablen sowie dimensionsbehaftete Parameter und feste Größen werden nicht gekennzeichnet.

2.1 Treibstoffhandhabung in Oberflächenspannungstanks

In Oberflächenspannungstanks von Raumfahrzeugen werden sog. Treibstoff-Handhabungs-Geräte (amerikanisch: **Propellant Management Devices**, PMDs) eingesetzt, um den Tankauslass während eines Manövers stets ausreichend mit gasblasenfreiem Treibstoff zu versorgen. Das PMD besteht aus mehreren offenen Kapillarkanälen, die sich kapillargetrieben, d. h. ohne aktive Förderung von außen, füllen. Eine Übersicht über die gebräuchlichen PMD-Techniken bieten die Artikel von Rollins *et al.* (1985) und Kostner & Sani (1990). Die Funktionsweise, Anwendung und Auslegung verschiedener PMD-Komponenten ist ausführlich in den Arbeiten von Jaekle (1991, 1993, 1995, 1997) beschrieben.

Die Kapillarkanäle werden meist durch schmale Leitbleche (engl. „Vanes“) gebildet, die senkrecht („Simple Vane“) oder parallel zur Tankschale („Ribbon Vane“) montiert sind (vgl. Abb. 2.1(a), (b)), aber auch komplexere Strukturen wie in Abb. 2.1 (c) dargestellt oder mit Bohrungen versehene Röhren und rechteckige Galleriearme mit siebbedeckten Öffnungen werden eingesetzt. Aufgrund der guten Benetzungseigenschaften der Treibstoffe füllen sich die Kapillarkanäle eigenständig, und bei geeignetem Design lässt sich somit eine Flüssigkeitsverbindung zwischen dem Treibstoffvolumen und dem Tankauslass herstellen. Der Vorteil von „Vanes“ gegenüber druckbeaufschlagten Membranen³⁾ besteht nach Jaekle (1991) in ihrem

³⁾In Membrantanks ist der Treibstoff blasenfrei in einer flexiblen Membran eingeschlossen. Diese Tanks können alternativ zu den PMDs eingesetzt werden, wenn nur einkomponentige Treibstoffe (in der Regel Hydrazin) zum Einsatz kommen sollen und wenn das Missionsprofil das höhere Gewicht und eine geringere Lebensdauer der Membran zulässt. Einen Einblick in den Aufbau und die Funktionsweise solcher Tanks, eine Darstellung ihrer Vor- und Nachteile gegenüber PMDs sowie eine Aufstellung über den Einsatz von Membrantanks in bisherigen Raumfahrtmissionen gibt der Übersichtsartikel von Ballinger *et al.* (1995). Über die jüngste Entwicklung eines neuartigen Membranstoffes sowie das konkrete Design eines neuen, sehr leichten Membrantanks mit geringen Herstellungskosten wird bei Ballinger & Sims (2003) und Tam *et al.* (2004) berichtet. Als weitere Alternative zu den PMDs wurde von Gluck & Gille (1965) vorgeschlagen, den Treibstoff durch Erzeugen einer geringen Beschleunigung über dem Tankauslass zu positionieren. Diese Methode hat sich jedoch in der Praxis nicht durchgesetzt.

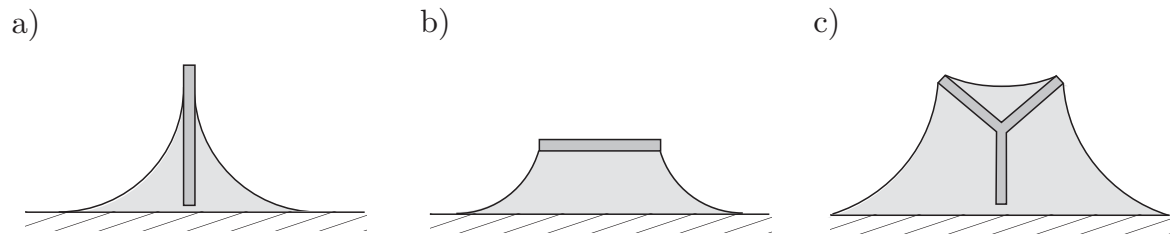


Abbildung 2.1: Gebräuchliche Leitbleche („Vanes“) zur Treibstoffhandhabung in PMDs nach Jaekle (1991) (Querschnitt). (a) „Simple Vane“. (b) „Ribbon Vane“. (c) „Complex Combination“.

geringen Gewicht, ihrer hohen Zuverlässigkeit (keine bewegten Teile) und ihrer Werkstoffkompatibilität zu Treibstoffen (der Tank kann vollständig aus Titan gefertigt werden). Somit sind sie beständig gegenüber den aggressiven Treibstoffen Distickstofftetroxid (MON, N_2O_4), Monomethylhydrazin (MMH, CH_6N_2) oder Hydrazin (N_2H_4).

Je nach Missionsanforderungen sind zwei Tanktypen gebräuchlich: Das so genannte „Flexible Demand System“ nach Abb. 2.2(a) und das „Refillable Component System“ gemäß Abb. 2.2(b). In Ersterem wird der Treibstoff direkt zum Tankauslass gefördert, so dass das Triebwerk unabhängig von der Art des Manövers kontinuierlich versorgt werden kann. Aufgrund der Beschränkung des Volumenstroms und der destabilisierenden Wirkung des resultierenden hydrostatischen Drucks sind solche Tanksysteme nur für geringe Beschleunigungen geeignet. Um Gaseinbrüche in die offene Flüssigkeitsströmung zu vermeiden, werden in der Anwendung die Volumenströme auf wenige cm^3/s und Beschleunigungen in der Größenordnung von $10^{-4} g_0$ (g_0 ist die Erdbeschleunigung) beschränkt (vgl. Jaekle, 1991; Netter, 1999). Ein solches „Flexible Demand System“ ist beispielsweise im Satelliten GLOBALSTAR eingesetzt worden (vgl. Netter, 1999).

Um höhere Volumenströme und Beschleunigungen realisieren zu können, werden in „Refillable Component Systemen“ wiederbefüllbare Komponenten wie beispielsweise Reservoirs, poröse Medien oder plissierte Siebstrukturen eingesetzt. Diese sind direkt vor dem Tankauslass montiert und werden durch die Kapillarkanäle während der antriebslosen Bewegung des Satelliten gefüllt. Die Versorgung unterbricht in der Regel während eines Manövers, so dass das Triebwerk dann nur aus dem vor dem Tankauslass gehaltenen Treibstoffvolumen gespeist werden kann. Nach Ende des Manövers werden die Speicherkomponenten wieder selbsttätig durch die „Vanes“ befüllt. Der indische Satellit INSAT beispielsweise ist mit einem solchen Tank ausgestattet. Einen Überblick über die Funktionsweise und Verifikation sowie über experimentelle Untersuchungen des dort eingesetzten wiederbefüllbaren Reservoirs geben die Artikel von Netter & Dreyer (1992), Netter *et al.* (1999) und Netter *et al.* (2000).

Grundsätzlich muss bei beiden Typen von PMDs der Volumenstrom bekannt sein, der maximal in den Kapillarkanälen realisiert werden kann. Im „Flexible Demand System“ darf

2 Stand der Forschung

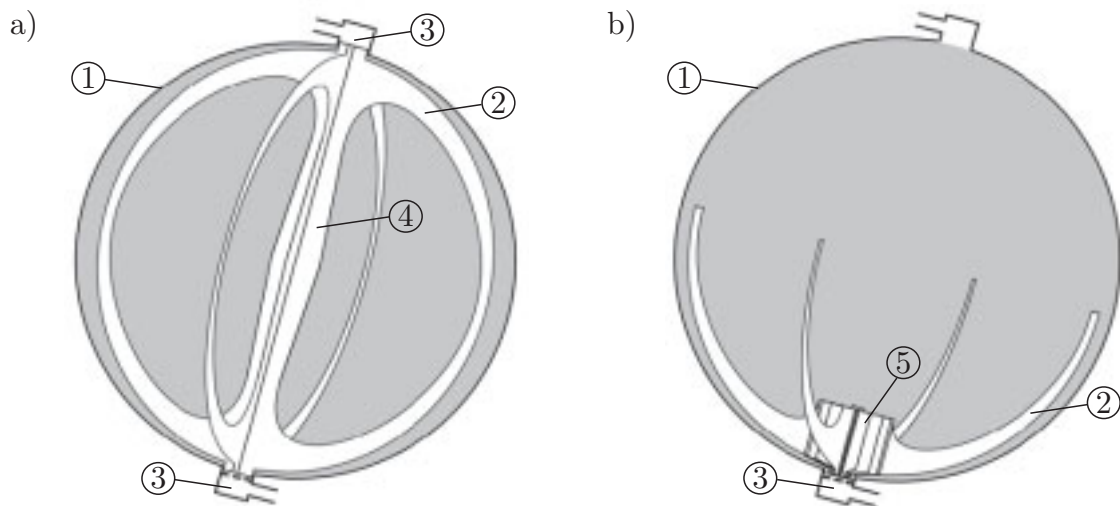


Abbildung 2.2: Gebräuchliche Typen von Oberflächenspannungstanks zur Treibstoffhandhabung nach Jaekle (1991). (a) „Flexible Demand System“. (b) „Refillable Component System“. (1) Tankschale, (2) Vanes, (3) Tankauslass, (4) Zentralkanal, (5) wiederbefüllbares Reservoir.

dieser nicht überschritten werden, um ein Einbruch von Gas in die Versorgungsleitung des Triebwerks zu vermeiden, und beim „Refillable Component System“ muss das Wiederbefüllen der Speicherkomponenten innerhalb einer definierten Zeitspanne vor dem Beginn des nächsten Manövers abgeschlossen sein. Da das Prinzip der Volumenstrombeschränkung bisher wenig erforscht ist, sind derzeit zur Auslegung von Tanksystemen hohe Sicherheitsfaktoren erforderlich. Zwar verfügt die Literatur über eine Vielzahl von Artikeln, die konkrete Designs für spezielle Missionsprofile beschreiben, wie beispielsweise von Voss & Hattis (1984) für das Space Shuttle, von Baralle & Fournier (1989) für die Telekommunikationsplattform EUROSTAR, von Devey *et al.* (1990) für den OLYMPUS-Satelliten, von Tam *et al.* (1996, 1998, 2002) für den Kommunikationssatelliten HS 601 und für interplanetare Missionen sowie von Debreceni *et al.* (1995, 1996, 1997, 1998, 2001, 2003, 2004) für verschiedenen Anwendungen. Es liegen jedoch bisher nur zwei Arbeiten von Jaekle (1991) und Srinivasan (2003) vor, die sich mit den Grenzen des Flüssigkeitstransportes in offenen Kapillarkanälen befassen und hierzu numerische und semi-analytische Abschätzungen des maximalen Volumenstroms vorlegen. Sie werden in Kapitel 2.3 diskutiert.

2.2 Oberflächenspannung, Randwinkel und Kapillarität

Dieser Abschnitt fasst die im Rahmen dieser Arbeit erforderlichen Grundlagen kapillarer Phänomene zusammen. Hierzu gehören die Oberflächen- und Grenzflächenspannung, der Kapillardruck gekrümmter Flüssigkeitsoberflächen, der Randwinkel zwischen Flüssigkeiten und