

**Untersuchungen zu Phasenwechselfvorgängen
von Methan und Wasserstoff
bei variablen Beschleunigungen
in Bezug auf zukünftige Raumfahrzeuge**

Kavitation und Sieden von Methan und Wasserstoff
(KASIMOFF-2)

Schlussbericht zum Vorhaben 50RL2290

Prof. Dr.-Ing. habil. Michael E. Dreyer
Dr.-Ing. Niklas H. Weber

Universität Bremen
Fachbereich Produktionstechnik
- Maschinenbau und Verfahrenstechnik -
Fachgebiet Strömungsmechanik

ZARM, Am Fallturm, D-28359 Bremen, Germany
E-Mail: michael.dreyer@zarm.uni-bremen.de

26. November 2025

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht ist der Endbericht für das Vorhaben „Untersuchungen zu Phasenwechselfvorgängen von Methan und Wasserstoff bei variablen Beschleunigungen in Bezug auf zukünftige Raumfahrzeuge - Kavitation und Sieden von Methan und Wasserstoff (KASIMOFF-2)“. Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) unter dem Förderkennzeichen FKZ 50 RL 2290 vom 01.10.2022 bis zum 30.06.2025 gefördert.

Untersuchungen bezüglich des Verhaltens kryogener Fluide sind notwendig, um den Betrieb von Raketenoberstufen und Depots über einen längeren Zeitraum unter den Bedingungen kompensierter Schwerkraft zu ermöglichen. Durch die verlängerte Missionsdauer gewinnt die thermodynamische Konditionierung des kryogenen Treibstoffs eine erhöhte Bedeutung.

Der zentrale Bestandteil der im angegebenen Projektzeitraum durchgeführten Arbeiten war das Konstruieren und Nutzen eines Versuchsaufbaus, mit dem das Verhalten einer künstlichen Keimstelle bei Siede- und Druckabsenkungsprozessen unter kompensierter Gravitation untersucht werden kann. Es wurden Versuche mit flüssigem Wasserstoff und flüssigem Methan durchgeführt. Die so gewonnenen Ergebnisse dienen als Basis für numerische Simulationen. Mit der Durchführung von Experimenten und numerischen Untersuchungen soll das Verständniss für Phasenwechselprozesse in einer für die Raumfahrt relevanten Umgebung erweitert werden.

Allgemeine Angaben gemäss BNBest-BMBF-98

- Zuwendungsempfänger: Universität Bremen, Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation
- Förderkennzeichen: 50RL2290
- Vorhabenbezeichnung: Untersuchungen zu Phasenwechselfvorgängen von Methan und Wasserstoff bei variablen Beschleunigungen in Bezug auf zukünftige Raumfahrzeuge (KASIMOFF-2)
- Laufzeit: 01.10.2022 - 30.06.2025
- Berichtszeitraum: 01.10.2022 - 30.06.2025

Der Schlussbericht ist entsprechend der Anlage 2 zu Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98, Stand 04/2006 aufgebaut. Er besteht aus einem in deutscher Sprache abgefassten ersten Teil, der alle Punkte aus der Anlage 2 berücksichtigt. Der zweite Teil ist in englischer Sprache abgefasst und enthält die in diesem Vorhaben erzielten Ergebnisse. Dieser Teil wird nicht veröffentlicht (vertraulich), liegt aber dem Drittmittelgeber vor.

Inhaltsverzeichnis

I	Kurze Darstellung	4
1	Aufgabenstellung	5
1.1	Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen	5
1.2	Wissenschaftliche und/oder technische Ziele	6
2	Voraussetzungen	8
3	Planung und Ablauf der Vorhaben	9
3.1	KASIMOFF 1	9
3.1.1	KASIMOFF 2	10
4	Stand der Wissenschaft und Technik	11
4.1	Phasenwechsel von reinen Fluiden	11
4.2	Behältersieden	12
4.3	Entspannungsverdampfung	13
4.4	Anwendungsbezogene Untersuchungen	13
4.5	Modellierung von Dampfblasen	16
4.5.1	Blasenwachstum bei variablem Systemdruck	16
4.5.2	Korrelationen für Ablöseradius, Ablösefrequenz und Keimstellendichte . .	17
4.6	Eigene Vorarbeiten	18
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	20
6	Eingehende Darstellung	23
6.1	Verwendung der Zuwendung	23
6.1.1	Blasenwachstum von Methan aufgrund einer Druckabsenkung	24
6.1.2	Numerische Untersuchungen des Blasenwachstums von Methan	25
6.2	Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	31
6.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	31
6.4	Voraussichtlicher Nutzen im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans . . .	31
6.5	Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	32
6.6	Veröffentlichungen	32
6.6.1	Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Zeitschriften	32
6.6.2	Vorträge auf internationalen Konferenzen	32

Nomenklatur

Symbole

a_c	characteristic acceleration, m s^{-2}
Bo	Bond number
c_{pL}	specific heat capacity at constant pressure of a liquid, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
D_{TL}	thermal diffusivity, liquid, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
f_D	bubble detachment frequency, Hz
$(\Delta_{LG}h)$	specific enthalpy of evaporation/condensation, J kg^{-1}
Ja	Jakob number
Ja_{CR}	specific Jakob number used by Cole and Rohsenow
L_L	Laplace length, capillary length, m
n_c	nucleation site density, m^{-2}
p	pressure, Pa
p_{CRT}	critical pressure, Pa
p_R	reduced pressure
p_{SAT}	saturation pressure, Pa
R	radius, m
R_{BD}	bubble radius at detachment, m
R_S	specific gas constant, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
R_ρ	density ratio
t	time, s
T	thermodynamic temperature, K
T_{SAT}	saturation temperature, K
Δ	difference
ρ_G	gas density, kg m^{-3}
ρ_L	liquid density, kg m^{-3}
σ	surface tension, kg s^{-2}

Indizes

0	zero
1	first
2	second
L	liquid
W	at the wall

Teil I
Kurze Darstellung

Kapitel 1

Aufgabenstellung

Das Ziel des Vorhabens war es, die Phasenwechselprozesse in kryogenen Fluiden in einer für die Raumfahrt relevanten Umgebung zu untersuchen. Die Verdampfung einer Flüssigkeit kann entweder durch das Anheben der Temperatur über die Sättigungstemperatur (Sieden) oder durch das Absenken des Drucks unter den Sättigungsdruck (Kavitation) realisiert werden. Die Mechanismen des Energietransports unterscheiden sich bei den beiden Prozessen.

Um die Phasenwechselvorgänge zu untersuchen, wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, in dem sich eine künstliche Keimstelle befindet. Mit diesem Versuchsaufbau wurden Experimente im Fallturm mit flüssigem Methan und flüssigem Wasserstoff durchgeführt.

Mit Methan wurden Druckabsenkungs- und Siedeversuche unter Mikrogravitationsbedingungen durchgeführt. Dabei konnte das Wachstum einer einzelnen Dampfblase beobachtet werden. Das Wachstum der Dampfblase kann mit dem thermodynamischen Zustand des Experiments korreliert werden.

Die im Vorhaben Kasimoff 1 durchgeführten Druckabsenkungstests mit Wasserstoff unter kompensierter Gravitation führten nicht zu dem Wachstum einer einzelnen Dampfblase. Stattdessen war eine Schar von Blasen zu erkennen, die aufgrund der Überhitzung durch das Absenken des Drucks allesamt anfangen zu wachsen. Durch Modifikationen des verwendeten Versuchsaufbaus konnte das Wachstum einer einzelnen Wasserstoffdampfblase unter Schwerelosigkeit erfolgreich beobachtet werden.

Die Parameterstudie zum Methandampfblasenwachstum durch Druckabsenkung und Sieden wurde ausgewertet und konnte als Basis für numerische und analytische Untersuchungen genutzt werden. Dies wurde möglich, indem die Auswertung der Druckabsenkungsversuche erweitert wurde.

Anhand der gewonnenen Daten bezüglich des Dampfblasenwachstums wurden numerische Simulationen mit OpenFOAM durchgeführt. Diese Simulationen sind in der Lage, den auftretenden Wärme- und Stofftransport abzubilden. Es wurden sowohl Simulationen in 1D wie auch in 2D durchgeführt. Die 2D Simulationen konnten einen thermisch gekoppelten Festkörper abbilden und dessen Effekt auf den Wärmetransport modellieren.

1.1 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

Das Vorhaben hat einen Bezug zu mehreren Handlungsfeldern der Raumfahrtstrategie der Bundesregierung¹. Im Handlungsfeld **Technologische Unabhängigkeit und Zugang zum All**

¹Für eine zukunftsfähige deutsche Raumfahrt, Die Raumfahrtstrategie der Bundesregierung, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Berlin, November 2010

sichern wird als Schwerpunkt für Deutschland die Systemkompetenz für die Oberstufe der Ariane 5 genannt. Die Handhabung der Treibstoffe Wasserstoff und gegebenenfalls Methan in zukünftigen ballistischen Phasen von Raketenoberstufen stellt eine Herausforderung für die Raumfahrtindustrie dar. Mit den in diesem Vorhaben erarbeiteten experimentellen und numerischen Ergebnissen soll ein Beitrag zur Bewältigung dieser Herausforderung gemacht werden. Es ist durch die Zusammenarbeit mit der Firma ArianeGroup sichergestellt, dass die Arbeiten eine Relevanz für zukünftige Oberstufen haben und die Ergebnisse bei den Anwendern Berücksichtigung finden. Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass sich nach der Ministerratskonferenz 2014 Änderungen im Bereich der Weiterentwicklung der Ariane-Rakete ergeben haben². Mittlerweile ist die Ariane 6 Rakete in Betrieb, deren Oberstufe mit Wasserstoff als Treibstoff und Sauerstoff als Oxidator angetrieben wird. Es wurde eine maximale Verwendung der Ergebnisse aus dem Ariane 5 ME Programm angestrebt. Aufgrund der aktuellen Missionsanforderungen sind ballistische Phasen mit einer anschließenden Wiederspüßung erforderlich. Hier liegt ein Anwendungspotential des beantragten Vorhabens.

Im Handlungsfeld **Starke Position in der Weltraumforschung nachhaltig ausbauen** soll die Grundlagenforschung und die angewandte Forschung unter Weltraumbedingungen ausgebaut werden. Die am Fachgebiet aufgebaute Kompetenz in der Durchführung kryogener Experimente unter den Bedingungen kompensierter Gravitation (Weltraumbedingung in einer ballistischen, nicht angetriebenen Phase) ist deutschlandweit einmalig. Die geplanten Teilvorhaben sind noch anspruchsvoller als bisher. Der Vorsprung auch gegenüber anderen Nationen wird hiermit noch weiter ausgebaut.

Erwähnenswert ist das Handlungsfeld **Die deutsche und europäische Rolle in der Exploration bestimmen**. Die Erkundung von Planeten, Monden und Asteroiden erfordert neben der Beherrschung der robotischen Systeme eine fundierte Erkenntnis der ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen bei unterschiedlichen Beschleunigungen, insbesondere wenn Oberflächen zwischen flüssigen und gasförmigen Phasen auftreten. Auch hier soll das beantragte Vorhaben dergestalt beitragen, dass die Datenbasis insbesondere hinsichtlich kryogener Fluide ausgebaut wird. Dies stellt den höchsten Schwierigkeitsgrad dar. Die Erkenntnisse können unter gewissen Voraussetzungen ebenso auf lagerfähige Fluide angewendet werden.

1.2 Wissenschaftliche und/oder technische Ziele

In den Arbeitspaketen **Sieden von Wasserstoff und Methan** (AP 3100 und AP 3200 aus KASIMOFF 1) wurde das Phasenwechselverhalten infolge der Zufuhr thermischer Energie über einen Festkörper experimentell und numerisch untersucht. Diese Art der Energiezufuhr ist typisch für kryogene Systeme und führt zum Verlust von flüssiger Treibstoffmasse, wenn keine geeigneten Gegenmaßnahmen getroffen werden. In diesem Anschlussvorhaben wurden weitere Auswertungen durchgeführt (AP 3600) und ein suborbitaler Raketenflug (AP 3500) vorbereitet.

In dem Arbeitspaket **Kavitation von Wasserstoff und Methan** (AP 3300 und AP 3400 aus KASIMOFF 1) wurde das Phasenwechselverhalten infolge der Änderung des Druckes experimentell und numerisch untersucht. Druckabsenkungen werden eingesetzt, um den Treibstoff thermisch zu konditionieren. Durch die Druckabsenkung verdampft ein Teil der Flüssigkeit und entzieht dem System thermische Energie. Wird das System anschließend wieder bedrückt, ist die Flüssigkeit unterkühlt und kann durch die Turbopumpen gefördert werden. Anders als

²Declaration on the Programme for Ariane and Vega development, European Space Agency, Paris, 04.03.2015 ESA/C(2015)29

das Sieden ist die Kavitation ein erwünschter Vorgang, der aber in den verschiedenen Flugphasen verstanden werden muss. In diesem Anschlussvorhaben wurden weitere Auswertungen (AP 3600) durchgeführt und ein suborbitaler Raketenflug (AP 3500) vorbereitet. Weiterhin wurde eine Fallturmttestserie mit flüssigem Wasserstoff durchgeführt (AP 3700). Um die Skalierbarkeit auf eine technische Anwendung sicherzustellen, ist es von besonderer Bedeutung, das Verhalten einer einzelnen Siedekeimstelle gut zu erfassen und modellieren zu können. Es ist sinnvoll, Druckabsenkungsversuche mit beiden betrachteten Fluiden durchzuführen, um Einflussgrößen, die sich aus dem thermodynamischen Zustand ergeben, zu erkennen und zu quantifizieren.

Die Übertragbarkeit auf andere System, d.h. andere Tankwandmaterialien, andere Wärmeströme, andere thermodynamischen Zustände, ist insofern gegeben, dass die betrachteten Phänomene sich immer auf der Skala der Keimstelle abspielen bzw. dort entstehen. Dies ist die Skala der Wandrauigkeit (im Millimeter und Submillimeterbereich) und die Skala der Poren (im Mikrometerbereich). Diese Skalen sind im wesentlichen von der Fertigung der Tanks abhängig. Lokale Maxima der Wärmestromdichten treten in Treibstofftanks immer im Bereich der Strukturanbindung auf. Ein Phasenwechsel an einer Keimstelle kann, je nach Grösse der Druckabsenkung, schnell eine oder mehrere große Menge an Dampfblasen erzeugen. Aufgrund der fehlenden Auftriebskonvektion verbleiben diese Blasen zunächst in der Nähe der Keimstelle und verschieben die Flüssigkeitsoberfläche im Tank. Insbesondere bei Explorationsmissionen muss die Abdampftrate (boil off) möglichst niedrig gehalten werden. Das Abgas kann nicht, wie von Lakovic et al. 1068 [12] beschrieben, als Kaltgas zur Schuberzeugung und damit zur Positionierung des flüssigen Treibstoffs verwendet werden. Insofern muss erstens der Blasenentstehungs- und -wachstumsvorgang verstanden und zweitens der Einfluss des nicht vorhandenen Auftriebs berücksichtigt werden.

Kapitel 2

Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Im Rahmen eines Vorgängervorhabens *Untersuchungen zur Handhabung von flüssigem und gasförmigen Wasserstoff bei kompensierter Gravitation* (WST, FKZ 50RL1621) wurden bereits umfangreiche Untersuchungen zur Handhabung kryogener Fluide durchgeführt und die Versuchsanlagen aufgebaut. Vorversuche haben die Umsetzbarkeit von Druckabsenkungen mit der bestehenden Anlage untersucht und bestätigt. Dieses Vorhaben baut auf dem Stand der Wissenschaft und Technik sowie auf den eigenen Vorarbeiten auf. Frühere numerische Simulationen zeigten die Eignung der verwendeten Werkzeuge für die auftretenden Fragestellungen.

Kapitel 3

Planung und Ablauf der Vorhaben

3.1 KASIMOFF 1

Das Vorhaben *Untersuchungen zu Phasenwechselforgängen von Methan und Wasserstoff bei variablen Beschleunigungen in Bezug auf zukünftige Raumfahrzeuge* (KSMW) wurde im Zeitraum vom 01.07.2019 bis zum 30.09.2022 bearbeitet. Das Projekt bestand aus den Arbeitspaketen AP3100 (Sieden von flüssigem Wasserstoff), AP3200 (Sieden von flüssigem Methan), AP3300 (Kavitation von flüssigem Wasserstoff) und AP3400 (Kavitation von flüssigem Methan).

Der Ablauf des Vorhabens kann wie folgt nachvollzogen werden:

1. Sichten des Standes der Forschung und der Wissenschaft in den für die Auslegung und den Betrieb der Experimente relevanten Bereichen.
2. Fertigung und Zusammenbau des Experiments.
3. Durchführung von numerischen Simulationen und Anwendung von analytischen Modellen, um den Betrieb des Experiments planen zu können.
4. Durchführung von Bodentests für Druckabsenkungs- und Siedeexperimente mit Methan im Herbst 2020.
5. Durchführung von Druckabsenkungs- und Siedeexperimenten mit Methan im Fallturm unter kompensierter Schwerkraft im Winter 2020.
6. Durchführung von Bodentests für Druckabsenkungs- und Siedeexperimente mit Wasserstoff im Sommer 2021.
7. Auswertung der im Herbst 2020 durchgeführten Druckabsenkungsexperimente. Dies beinhaltet einen Vergleich mit analytischen Modellen.
8. Durchführung einer weiteren Kampagne von Druckabsenkungsexperimenten mit Methan im Fallturm unter kompensierter Schwerkraft im Herbst 2021.
9. Anfertigen eines Manuskripts, welches zur Veröffentlichung bei der Fachzeitschrift "Cryogenics" eingereicht wurde.

3.1.1 KASIMOFF 2

Die Anschlusszuwendung für das Projekt *Untersuchungen zu Phasenwechselvorgängen von Methan und Wasserstoff bei variablen Beschleunigungen in Bezug auf zukünftige Raumfahrzeuge* (Kasimoff 2) wurde im Zeitraum vom 01.10.2022 bis zum 30.06.2025 bearbeitet. Die Anschlusszuwendung bestand aus den Arbeitspaketen AP3500 (Vorbereitung eines suborbitalen Raketenexperiments), AP3600 (Erweiterung der Auswertungsroutine für die Methanversuche), AP3700 (Kavitation von flüssigem Wasserstoff) und AP3800 (Berichte und Publikationen).

Der Ablauf des Vorhabens kann wie folgt nachvollzogen werden:

1. Es wurde basierend auf den Erfahrungen der Wasserstoff-Fallturmexperimente aus dem Vorhaben KASIMOFF 1 eine umfangreiche Modifikation des Versuchsaufbaus geplant um individuelle Wasserstoffdampfblasen untersuchen zu können.
2. Fortführung der Auswertung der Daten aus dem Vorhaben KASIMOFF 1.
3. Fertigung und Zusammenbau des Experiments.
4. Durchführung von Bodentests für Druckabsenkungs- und Siedeexperimente mit Wasserstoff im Juni 2025.
5. Durchführung von einer Fallturmkampagne bestehend aus Druckabsenkungs- und Siedeexperimente mit Wasserstoff im Juni 2025.
6. Auswertung der im Juni 2025 durchgeführten Siedeexperimente mit flüssigem Wasserstoff.
7. Unterstützung der Machbarkeitsstudie eines suborbitalem Raketenexperiments mit flüssigem Wasserstoff.
8. Anfertigen eines Manuskripts, welches zur Veröffentlichung bei der Fachzeitschrift “npj Microgravity” eingereicht wurde.

Kapitel 4

Stand der Wissenschaft und Technik

Eine Übersicht über die Phasenwechselprozesse, welche für die Handhabung von kryogenen Treibstoffen in der Raumfahrt von Bedeutung sind, ist im folgenden gegeben. Dabei wird ein besonderer Schwerpunkt auf die analytische Modellierung einer Dampfblase gelegt. AuSSerdem sind die durchgeführten eigenen Vorarbeiten dargestellt.

4.1 Phasenwechsel von reinen Fluiden

In einem Einstoff-Zweiphasen System kann angenommen werden, dass sich die freie Oberfläche zwischen Dampf und Flüssigkeit auf der Sättigungstemperatur des vorliegenden Drucks befindet. Um Flüssigkeit zu verdampfen, kann entweder Wärme in die Flüssigkeit geführt werden, bis die Sättigungstemperatur überschritten ist oder der Druck abgesenkt werden. Dies senkt die im System vorliegende Sättigungstemperatur ab und erzeugt somit eine Überhitzung der Flüssigkeit, die sich noch auf der initialen Temperatur befindet, welche nun höher als die neue Sättigungstemperatur ist. Das in beiden Fällen entstehende thermodynamische Ungleichgewicht wird abgebaut, indem Flüssigkeit verdampft. Dies geschieht sowohl an der freien Oberfläche sowie an möglicherweise vorhandenen Keimstellen, z.B. an den Behälterwänden.

Zur Einführung in das Thema ist ein Zitat von Brennen 1995 [4], S. 7, sehr hilfreich. Die Übersetzung lautet sinngemäss:

Eine Flüssigkeit bei konstanter Temperatur kann einem sinkenden Druck p ausgesetzt werden, der unter den Sättigungsdruck p_{SAT} des Fluides¹ fällt. Der Wert von $\Delta p = (p_{\text{SAT}} - p)$ wird Spannung genannt, und die Grösse, bei der ein ZerreiSSen der Bindungen erfolgt, ist die Zugspannung der Flüssigkeit. Der Vorgang des ZerreiSSens einer Flüssigkeit durch Absenkung des Druckes bei annähernd gleicher Temperatur wird als Kavitation bezeichnet. Beim Phasenwechsel geht die Flüssigkeit in die gasförmige Phase über.

Eine Flüssigkeit bei konstantem Druck kann einer Temperatur T ausgesetzt werden, die oberhalb der Sättigungstemperatur T_{SAT} des Fluids liegt. Der Wert von $\Delta T = T - T_{\text{SAT}}$ wird als Überhitzung bezeichnet, und der Punkt, bei dem die Flüssigkeit in die Gasphase übergeht, wird als kritische Überhitzung bezeichnet. Der Vorgang des ZerreiSSens einer Flüssigkeit durch Erhöhung der Temperatur bei annähernd gleichem Druck wird als Sieden bezeichnet.

¹Mit dem Begriff Fluid wird sowohl die flüssige als auch die gasförmige Phase einer Substanz bezeichnet. Der Sättigungsdruck bezieht sich immer auf die Substanz.

Der thermodynamische Prozess der beiden Vorgänge ist unterschiedlich, obgleich das Phänomen der Blasenentstehung sehr ähnlich aussieht. Eine gleichförmige Änderung des Druckes im gesamten Volumen wird durch eine Änderung der Randbedingung bewirkt, wenn die Bewegung des Randes wesentlich langsamer als die Schallgeschwindigkeit erfolgt². Temperaturänderungen durch eine Wärmequelle erzeugen thermische Grenzschichten, deren Wachstum durch die Temperaturleitfähigkeit (thermische Diffusion) D_{TL} bestimmt wird. Der Phasenübergang während der Entstehung und des Wachstums der Blasen wird bestimmt durch die Gleichung

$$\ln \frac{p_{SAT}}{p_0} = \frac{(\Delta_{LG}h)}{R_S} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \quad (4.1)$$

die für kleine Werte der Spannung und der Überhitzung gültig ist. Es werden zwei Arten der Blasenentstehung beobachtet: homogene (siehe Brennen 1995 [4], S. 9, und Carey 1992 [5], S. 127ff.) und heterogene Keimbildung (Carey 1992 [5], S. 169ff.). Da homogene Keimbildung in technischen Systemen sehr unwahrscheinlich ist, wird hier nur über heterogene Keimbildung berichtet.

Ein Ansatz der Skalierung des Phasenwechselprozesses ist in der Jakob-Zahl wiederzufinden. Die Jakob-Zahl wird aus dem Verhältnis der durch die Überhitzung zur Verfügung gestellten Enthalpie und der Verdampfungsenthalpie gebildet. Häufig wird diese Zahl mit dem Dichteverhältnis multipliziert:

$$Ja_2 = \frac{\rho_G c_{pL} \Delta T}{\rho_L (\Delta_{LG}h)} = R_\rho Ja_1 \quad (4.2)$$

Hier beschreibt ρ_G die Dichte des Gases³, ρ_L die Dichte der Flüssigkeit, c_{pL} die spezifische, isobare Wärmekapazität der Flüssigkeit, ΔT die vorliegende Überhitzung und $(\Delta_{LG}h)$ die spezifische Verdampfungsenthalpie. Da die verfügbare Energie mit der für den Phasenwechsel notwendigen Energie in Relation gesetzt wird, ist die Kennzahl sowohl auf das Behältersieden als auch auf die Entspannungsverdampfung anwendbar.

4.2 Behältersieden

Behältersieden beschreibt den Prozess der Wärmeübertragung auf ein Fluid in einem Behälter, das im Kontrast zum Strömungssieden nicht durch externe Kräfte beschleunigt wird. Unter dem Einfluss der Erdschwerkraft wird durch die mit der Erwärmung der Flüssigkeit einhergehende Verringerung der Dichte eine freie Konvektionsströmung entstehen. Eine erste Einteilung des Prozesses in 4 unterschiedliche Bereiche wurde von Nukiyama im Jahr 1934 vorgestellt. Untersucht wurde die vorliegende Wärmestromdichte als Funktion der vorliegenden Wandüberhitzung. Es wurde in stilles Sieden, Blasensieden, instabiles- und stabiles Filmsieden unterschieden. Die Grenze zwischen dem instabilen und dem stabilen Filmsieden bildet der Leidenfrostpunkt. Ein lokales Maximum der Wärmestromdichte wurde beim Blasensieden identifiziert. Dies wird schon bei moderaten Wandüberhitzungen erreicht. Da in dem Blasensieden die relativ hohe Verdampfungsenthalpie durch Anlegen einer geringen Überhitzung zum Transport von Wärme genutzt werden können, ist dieses Regime technisch besonders relevant.

²Abweichungen von einer gleichförmigen Druckverteilung wurden in der Nähe des kritischen Punktes beobachtet.

³Als Gas wird der Aggregatzustand des Stoffes bezeichnet. Im Falle eines Einstoffsystem ist das Gas aber auch kondensierbar. Ebenso könnte also der Begriff Dampf verwendet werden.

Der Blasensiedeprozess ist von der vorhandenen Beschleunigung abhängig. Exemplarische Untersuchungen des Prozesses unter reduzierter Schwerkraft sind in Lee et al. 1997 [13] zu finden. Die Dynamik der Dampfblasen und somit auch die Dynamik der Wärmeübertragung wird durch den Auftrieb bestimmt. Der Auftrieb ist abhängig vom vorliegenden Dichteunterschied zwischen Flüssigkeit und Gas sowie der vorliegenden Beschleunigung. AuSSerdem wird der Wärmetransport durch freie Konvektion direkt von den vorhandenen Volumenkräften beeinflusst.

4.3 Entspannungsverdampfung

Entspannungsverdampfung bezieht sich hier auf ein Absenken des Drucks in einem Zweiphasen-System. Dadurch wird das thermodynamische Gleichgewicht so verschoben, dass die Flüssigkeit überhitzt ist und Verdampfung zu erwarten ist. Eine Untersuchung der Entspannungsverdampfung ist von Mayinger 1981 [14] durchgeführt worden. Dort wird versucht, eine Skalierung zu etablieren, die es erlauben würde, die Daten für den sicherheitskritischen Fall des Druckverlusts und der einhergehenden Entspannungsverdampfung zu skalieren und damit übertragbar auf andere Anwendungen zu machen. Durch das Absenken des Drucks ist es möglich, groSSe Überhitzungen in der flüssigen Phase zu erzeugen. Eine der ersten relevanten Beobachtungen wurde von Rinderer und Haenssler 1962 [25] veröffentlicht. Es wurde festgestellt, dass in Flüssig-Stickstoff-Behältern recht groSSe Überhitzungen aufgebracht werden konnten, die dann zu einer schlagartigen, explosionsartigen Verdampfung führen. Etwas ähnliches wurde von Hord et al. 1964 [8] in flüssigem Stickstoff und flüssigem Wasserstoff untersucht. Hord et al. haben die Überhitzung durch ein Absenken des Dampfdrucks in dem System erzeugt. Dadurch ist es möglich, die Überhitzung gleichmäSSig verteilt in die Flüssigkeit einzubringen.

4.4 Anwendungsbezogene Untersuchungen

Im folgenden Abschnitt werden einige Untersuchungen vorgetragen, die sich mit dem Phänomenen und den Herausforderungen der kryogenen Treibstoffhandhabung für die Anwendung in der Raumfahrt beschäftigen.

In dem Bericht von Lacovic et al. 1968 [12] werden die Systeme der Treibstoffhandhabung anhand der Flüge AC-4 und AC-8 des Atlas-Centaur Raketensystems beschrieben. Besonderer Fokus liegt auf dem Verhalten des kryogenen Treibstoffs in der Centaur Oberstufe. In beiden Missionen wurde ein Druckablasssystem verwendet. Der Wärmefluss von der Umgebung in den flüssigem Wasserstoff führt zur Verdampfung. Dadurch steigt der Druck im System. Damit kein mechanisches Versagen des Tanks eintritt, wird ein geringer Massenstrom des Dampfes in die Umgebung abgelassen. Dies verhindert ein ungewolltes Ansteigen des Tankdrucks, allerdings wird dadurch die Menge Wasserstoff im Tank reduziert, die potentiell für den Antrieb genutzt werden könnte. Im Fall des AC-4 Starts wurde die Mission verloren, da die Centaur Oberstufe aus der gewünschten Lage taumelte und die Kontrolle verlor. Dies ist darauf zurückzuführen, dass flüssiger Wasserstoff, dessen Position ohne das Vorhandensein der Schwerkraft leicht von Störungen beeinflusst werden kann, in das Druckablasssystem gelangte und dort verdampfte. Die daraus resultierende Menge Dampf führte zu einem zu hohen Schub, der vom Lageregelungssystem nicht kompensiert werden konnte. Während der AC-8 Mission konnte allerdings ein Wiederzünden einer kryogenen Raketenoberstufe demonstriert werden. Dafür wurden unter anderem Modifikationen des Druckablasssystems durchgeführt. Durch das Gewinnen eines

erhöhten Schubs durch den Abdampfstrom konnte der flüssige Treibstoff in einer gewünschten Position gehalten werden.

McGrew und Larking 1966 [16] haben sowohl die Druckabsenkung in einem mit Freon sowie in einem mit flüssigem Wasserstoff gefüllten Behälter in einem Fallturm untersucht. Aus den Freon Experimenten unter reduzierter Schwerkraft wurde die Erkenntnis gewonnen, dass das Entstehen von Dampfblasen in der Flüssigkeit die Oberfläche in Richtung der oberen Tankhälfte bewegt. Ausgehend von diesem Verhalten wird postuliert, dass es eine maximale Obergrenze für die Druckabsenkungsrate gibt, bei der die Flüssigkeitsposition nicht zu sehr gestört wird. In dem Bericht sind auch Ergebnisse einer Druckabsenkungskampagne in einem Fallturm mit flüssigem Wasserstoff durchgeführt. Während der Druckabsenkung konnte in der Gasphase ein Nebel beobachtet werden. AuSSerdem konnte Blasenwachstum an den Wänden und dem Heizelement beobachtet werden.

Navickas und Madsen 1967 [20] verwendeten Daten einer Saturn V S-IVB Oberstufe aus dem AS-203 Testflug, um die Druckablassvorgänge im Wasserstofftank zu untersuchen. Die S-IVB Oberstufe hatte Systeme, die das Gas, das durch Verdampfung der Flüssigkeit entsteht, entweder schubneutral oder gerichtet in die Umgebung abzugeben. Die gerichtete Abgabe konnte genutzt werden, um die Oberstufe zu beschleunigen, so dass sich die Flüssigkeit am Boden des Tanks sammelt. Die Temperaturverteilung in der Flüssigkeit, sowie der Gasphase wurde gemessen. Während der Druckabsenkung konnte ein Abkühlen der Gasphase beobachtet werden. Die Abkühlung propagierte von der freien Oberfläche und wurde möglicherweise durch die Verdampfung von Flüssigkeit und der damit einhergehenden Bildung von Dampf auf der vorliegenden Sättigungstemperatur bewirkt.

Labus et al. 1972 and 1974 [11, 10] untersuchten die Druckabsenkung in mit Kältemitteln gefüllten Behältern in kompensierter Schwerkraft. Die Untersuchungen wurden im Fallturm des heutigen NASA Glenn Research Centers durchgeführt. In dem Bericht [11] wurde Refrigerant 11 während des freien Falls einer Druckabsenkung unterzogen. Dabei wurde die vorliegende Restbeschleunigung variiert. Durch den Einfluss der Beschleunigung auf die Form der freien Oberfläche wurde der Massentransport von der Flüssigkeit in die Gasphase und somit der Verlauf des Drucks beeinflusst. Es wurde in allen Tests auSSer dem Test mit einer Bond Zahl von $Bo = 0$ Blasenbildung in der Flüssigkeit beobachtet. AuSSerdem konnte eine Variation der Verzögerung der Blasenbildung nach dem Öffnen des Ventils gemessen werden. Eine hohe Bond-Zahl hatte die geringste Verzögerung. Ein weiteres Ergebnis der Studie war es, dass die Druckabsenkungsrate maßgeblich beeinflusst, ob neuer Dampf an der makroskopischen freien Oberfläche oder an Keimstellen an der Wand gebildet wird. In dem Bericht [10] wurden weitere Druckabsenkungen von Behältern, gefüllt mit Kältemitteln, unter Schwerelosigkeit vorgestellt. Anhand dieser Daten wurden zwei analytische Modelle für die Druckabsenkung vorgestellt. Das erste Modell betrachtet die nur die adiabatisch Massenentnahme, das zweite beinhaltet auch den Massentransfer von der Flüssigkeit in die Gasphase. Eine Einschränkung des Phasenwechselmodells besteht darin, dass es von einer ebenen, kreisrunden Oberfläche ausgeht, was in den Experimenten unter Schwerelosigkeit nicht gegeben ist. Die Modelle für die Druckentwicklung sind allerdings nicht anwendbar in Fällen, in denen in der Flüssigkeit und an den Behälterwänden chaotische Blasenbildung eintritt.

Bentz und Wilkinson 1983 [2] untersuchten die Druckabsenkung in einem flüssig Stickstoff-Dewar. Bei der Durchführung einer Druckabsenkung konnte eine Abweichung von der von Labus et al. 1974 [10] vorgestellten adiabaten Druckabsenkungskurve beobachtet werden. Diese Abweichung konnte verstärkt werden, wenn sich Einbauten, wie z.B. Siebe, in der Flüssigkeit befanden.

Bicknell und Czysz 1990 [3] haben in einer Reihe von Fallturm- und Parabelfluguntersuchungen den Druckablass in Modelltanks mit repräsentativen Einbauten untersucht. Als Fluid wurde Freon-11 verwendet. Ein Fokus der Untersuchungen lag darauf, die Stabilität der Flüssigkeitsposition, welche durch die kapillar wirkenden Einbauten gegeben wird, während der Druckabsenkung zu beobachten. AuSSerdem wurde ein Mehrstoffsystem untersucht, in dem flüssiges Freon-11 mit gasförmigen Stickstoff bedrückt wurde.

Behruzi et al. 2007 [1] schlagen vor, dass die Prozedur zum Wiederezünden des Haupttriebwerks der Oberstufe eine Druckabsenkung im Wasserstofftank beinhaltet. Da zwischen den möglichen Schubmanövern der Oberstufe potentiell mehrere Stunden liegen, wird eine signifikante Menge thermischer Energie von der Umgebung in den flüssigen Wasserstoff transferiert. Dadurch ist ein signifikanter Teil der Flüssigkeit an oder nahe der Sättigungstemperatur. Diese Flüssigkeit kann nicht in den Turbopumpen gefördert werden, ohne dass potentiell schädliche Kavitation auftritt. Durch eine Druckabsenkung verdampft die Flüssigkeit. Dies geschieht, indem der umgebenden Flüssigkeit thermische Energie entnommen wird, welche diese abkühlt. AnschlieSSend kann der Tank wieder auf den Operationsdruck bedrückt werden. Bei einer schnellen Bedrückung bleibt ein groSSer Teil der Flüssigkeit unterkühlt. Somit kann diese Flüssigkeit in den Pumpen gefördert werden.

Muratov 2011 [18] stellt grundlegende Überlegungen vor, die sich mit der langfristigen Lagerung von flüssigem Wasserstoff in kompensierter Schwerkraft beschäftigen. Ein besonderer Fokus liegt auf der Entstehung von Dampfblasen in der Nähe von Hot Spots, also Stellen, an denen die thermische Abschirmung eingeschränkt ist, z.B. an den mechanischen Fixierungen des Tanks. AuSSerdem wurden fundamentale Überlegungen auf der Blasenskala angestellt. Es wurde auch auf den Einfluss eines nicht-kondensierbaren Bedrückungsgases eingegangen.

Konzepte für eine Marsmission mit Besatzung wurden kürzlich von der NASA ausgearbeitet. Zwei Konzepte wurden detailliert untersucht: (i) eine Kombination eines chemischen Antriebs mit Methan und Sauerstoff mit einem nuklear-elektrischen Antrieb und (ii) ein nuklear-thermischer Antrieb. Der nuklear-thermische Antrieb wird in NASEM 2021 [19] beschrieben. Dabei wird flüssiger Wasserstoff über einen Fusionsreaktor geleitet und bis auf 2700 K erwärmt. Die so dem Wasserstoff zugeführte Energie kann über die Entspannung in einer Düse in Schub umgewandelt werden. Diese Art des Antriebs bietet eine Steigerung der Effizienz verglichen mit herkömmlichen chemischen Triebwerken. Es kann ein spezifischer Impuls von 900 s erreicht werden. Der Wasserstoff als Antriebsmedium muss sowohl im Treibstoffdepot als auch für die gesamte Missionsdauer in flüssiger Form gelagert werden.

Das nuklear-elektrische Konzept wird von Oleson et al. 2021 [21] beschrieben. In diesem Konzept wird ein Atomreaktor genutzt, um Energie zu erzeugen, die in einer Reihe hoch effizienter Xenon Hall-Triebwerke genutzt werden kann. Da die elektrischen Triebwerke keinen groSSen Schub liefern können, ist es vorgesehen, die einen groSSen Schub erfordernden Manöver mit einer chemischen Raketenstufe, die flüssigen Sauerstoff und flüssiges Methan verwendet, durchzuführen. Dies bedeutet, dass die kryogenen Treibstoffe für einen signifikanten Teil der Mission im Orbit gelagert werden müssen. AuSSerdem ist in der Missionsplanung vorgesehen, die Tanks für Methan und Sauerstoff erst im Erdorbit mithilfe von Transfermanövern zu befüllen. Da in beiden Konzepten kryogene Fluide für sehr lange Zeiten unter Schwerelosigkeit gelagert werden sollen, ist es zwingend notwendig, die thermodynamischen und Phasenwechselprozesse im Tank vorherzusagen und handhaben zu können.

4.5 Modellierung von Dampfblasen

Sowohl beim Vorgang des Behältersiedens (Abschnitt 4.2) als auch der Entspannungsverdampfung (Abschnitt 4.3) ist die Dynamik des Phasenwechsels maßgeblich vom Verhalten der entstehenden Dampfblasen geprägt. Eine Übersicht über die Physik des Dampfblasenwachstums ist in Prosperetti 2017 [23] zu finden. Von Interesse ist es, eine Funktion zu finden, die das Verhalten des Blasenradius R in Abhängigkeit der Zeit t beschreibt. Dort wird auf das Model von Mikic et al. 1970 [17] verwiesen, welches den dimensionslosen Radius R^+ und die dimensionslose Zeit t^+ verwendet:

$$\frac{dR^+}{dt^+} = \sqrt{t^+ + 1} - \sqrt{t^+} \quad (4.3)$$

Die Definitionen sind:

$$R^+ = \frac{AR}{B^2} \quad (4.4)$$

$$t^+ = \frac{A^2 t}{B^2} \quad (4.5)$$

mit den Koeffizienten

$$A = \sqrt{\frac{2 \rho_G (\Delta_{LG} h) (T_\infty - T_{SAT})}{3 \rho_L T_{SAT}}} \quad (4.6)$$

und

$$B = Ja_2 \sqrt{\frac{12}{\pi} D_{TL}} \quad (4.7)$$

Die Entdimensionierung erfolgt über eine Skalierung der Zeitskala und des Blasenradius mit Parametern, welche in Abhängigkeit des Dichteverhältnisses, der Verdampfungsenthalpie, der Überhitzung, der Sättigungstemperatur und der Temperaturleitfähigkeit gebildet werden.

Für $t^+ > 50$, also in dem Temperatur-Diffusions Wachstumsregime, ergibt sich $R^+ \propto \sqrt{t^+}$. Die Energie, die durch Wärmeleitung aus dem überhitzten Fernfeld der Flüssigkeit zu der freien Oberfläche der Dampfblase, welche die Sättigungstemperatur hat, transportiert wird, limitiert den Phasenwechsel und somit den Wachstumsprozess.

Eine ähnliche Proportionalität wurde auch von Scriven 1959 [26] beschrieben. Der Radius der Dampfblase ist ebenfalls proportional zu \sqrt{t} .

$$R(t) = 2\beta \sqrt{D_{TL} t} \quad (4.8)$$

Der Parameter β wird in Abhängigkeit von Systemparametern gebildet, für kleine Ja_2 Zahlen gilt $\beta \approx Ja_2$. Eine Einschränkung der beiden präsentierten Modelle ist, dass sie von einer zeitlich konstanten Überhitzung ausgehen. Dies ist in technischen Systemen nicht immer gegeben. Um dies zu berücksichtigen, ist es notwendig, auf eine numerische Integration zurückzugreifen.

4.5.1 Blasenwachstum bei variablem Systemdruck

Das Wachstum einer Dampfblase unter variablem Systemdruck unterscheidet sich in einigen Aspekten von dem zuvor beschriebenen Prozess. Die fundamentalen Unterschiede sind in einer Übersicht von Pinhasi [22], Abschnitt 5.4 zusammengefasst. Diese Punkte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Sättigungsdichte des Dampfes ist nicht konstant und muss somit als variabel betrachtet werden.

- Die Sättigungstemperatur, die an der freien Oberfläche anliegt, ist nicht konstant und abhängig vom Systemdruck.
- Es wird Volumenänderungsarbeit an der Dampfblase verrichtet.

In numerischen Untersuchungen von Cha und Henry 1981 [6] konnte dies dazu führen, dass der Dampfblasenradius nicht mit der erwarteten Proportionalität von $R \propto \sqrt{t}$ anwuchs sondern mit einer höheren Proportionalität.

4.5.2 Korrelationen für Ablöseradius, Ablösefrequenz und Keimstellendichte

Um die gewonnen Erkenntnisse über die Thermodynamik an einzelnen Dampfblasen auf technische Systeme zu übertragen, sind auSSerdem noch Korrelationen notwendig, die Aussagen darüber treffen, wie aktive Keimstellen im System verteilt sind und die Dynamik des Ablöseprozesses einzelner Dampfblasen von einer Keimstelle beschreiben. Die weiteren GröSSen, für die Korrelationen entwickelt werden müssen, sind die Siedekeimstellendichte, die Blasenablösefrequenz und der Blasenablöseradius.

Die Siedekeimstellendichte ist schwer a priori zu ermitteln. Die Anzahl der Keimstellen pro Flächeneinheit ist abhängig vom verwendetem Material und den genutzten Fertigungsverfahren. AuSSerdem hat die Benetzbarkeit der Wand durch die vorhandene Flüssigkeit einen Effekt. Kirichenko et al. 1976 [9] präsentieren die folgende Korrelation:

$$n_c = C \left[\frac{\rho_G (\Delta_{LG} h)}{\sigma} \frac{(T_W - T_L)}{T_{SAT}} \right]^2 \quad (4.9)$$

Die Korrelation gilt für reduzierte Drücke $p_R = p/p_{CRT} > 0.06$. σ beschreibt die Oberflächenspannung, der Term $(T_W - T_L)$ beschreibt die Überhitzung der Wand gegenüber der Flüssigkeit. Die Konstante C wird empirisch mit einem Wert von 1×10^{-7} angegeben.

Als Korrelation für den Ablöseradius R_{BD} kann die Relation von Cole und Rohsenow 1969 [7] verwendet werden:

$$R_{BD} = 2.325 \times 10^{-4} L_L \text{Ja}_{CR} \quad (4.10)$$

Die Laplace-Länge ist

$$L_L = \left[\frac{\sigma}{a_c (\rho_L - \rho_G)} \right]^{1/2} \quad (4.11)$$

und die von den Autoren definierte Jakob Zahl ist

$$\text{Ja}_{CR} = \frac{\rho_L c_{pL} T_{SAT}}{\rho_G (\Delta_{LG} h)} \quad (4.12)$$

Hier beschreibt a_c die charakteristische Beschleunigung, die das System erfährt. Es ist anzumerken, dass der letzte Term in Gleichung 4.10 eine modifizierte Jakob Zahl ist. Die Korrelation ist gültig für $p_R < 0.2$.

McFadden und Grassmann 1962 [15] geben die folgende Korrelation für die Ablösefrequenz f_D :

$$f_D = 0.56 \left[\frac{(\rho_L - \rho_G) a_c}{2\rho_L R_{BD}} \right] \quad (4.13)$$

Für die Anwendung von Gleichung 4.13 auf Wasserstoff unter der Erdschwerkraft resultiert eine Ablösefrequenz von $\mathcal{O}(10^2 \text{ s}^{-1})$. Die Ablösefrequenz für kryogenen Wasserstoff und Stickstoff

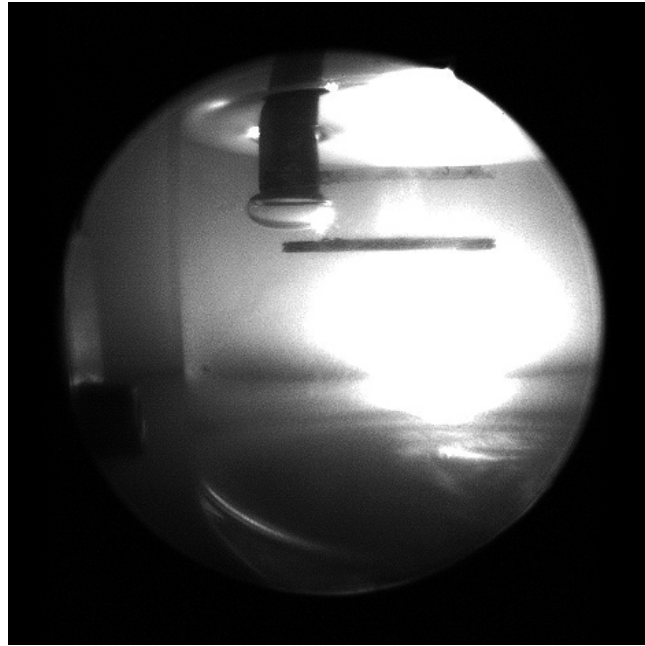


Abbildung 4.1: Erzeugung einer gefangenen Dampfblase in flüssigem Wasserstoff.

wurde von Rammig und Weiss 1991 [24] untersucht. Dort wird für Wasserstoff eine Ablösefrequenz von $f_D \approx 3.5 \text{ s}^{-1}$ angegeben.

Es liegen keine Arbeiten zur Wechselwirkung von Wasserstoffblasen miteinander vor, die während einer Druckabsenkung an einer oder mehreren Keimstellen entstehen. Zu erwähnen sei die Dissertation von Sielaff 2014 [27], in der ein eigenes Kapitel dem Thema Blasenwechselwirkung und -koaleszenz gewidmet ist. Die Blasen wurden aber allesamt durch Zufuhr von thermischer Energie über eine Wand erzeugt. Das Temperaturfeld um die Blasen hat dabei eine andere Form als bei Blasen, die durch eine Druckabsenkung erzeugt wurden.

4.6 Eigene Vorarbeiten

In Rahmen des Arbeitspaketes AP3100 des Projekts *Spezielle Untersuchungen zur kryogenen Fluidhandhabung in Raketenoberstufen Kryogene Fluidhandhabung* (KFH, FKZ 50RL1320) wurde ein Hezelement für die Untersuchung von Dampfblasen in flüssigem Wasserstoff entwickelt. Der Einsatz ist in Abbildung 4.1 zu sehen. Dabei handelt es sich um ein Edelstahlrohr, in dem sich ein Heizwiderstand befindet. Die in dem Widerstand dissipierte Leistung ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Das zyklische Verhalten entspricht hier den einzelnen Blasen, die wachsen und sich dann ablösen.

Außerdem wurden die numerischen Werkzeuge, die im Arbeitspaket von AP3200 des Projekts *Untersuchungen zur Handhabung von flüssigem und gasförmigen Wasserstoff bei kompensierter Gravitation Wasserstofftests* (WST, FKZ 50RL1621) erprobt und mit experimentellen Daten abgeglichen wurden, genutzt, um die Position der Flüssigkeit während der Experimente unter kompensierter Schwerkraft vorherzusagen. Da die entwickelte Halterung der künstlichen Keimstelle die Position der Flüssigkeit unter kompensierter Schwerkraft auf eine unbeabsichtigte Weise maßgeblich verändert, wurde auf Basis der zuvor geprüften numerischen Ansätze eine konstruktive Lösung entwickelt.

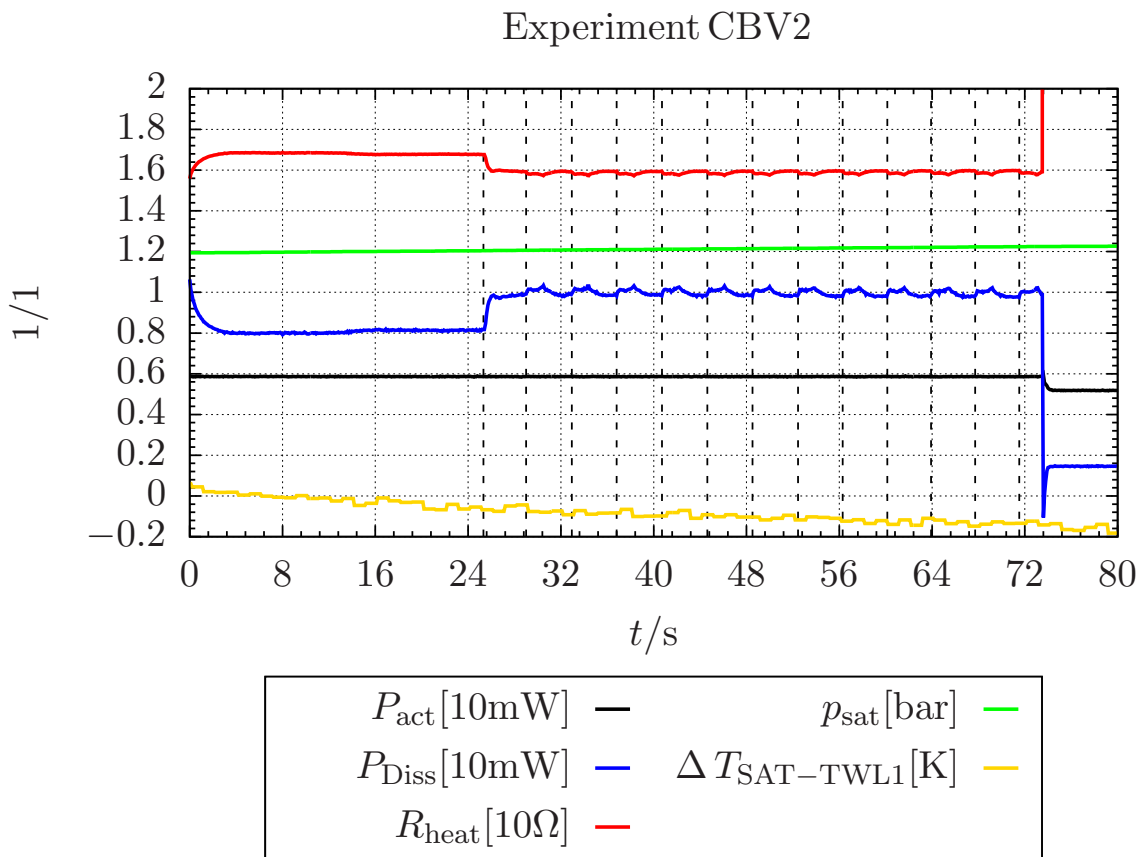


Abbildung 4.2: Darstellung der Versuchsparameter während der Erzeugung und Ablösung einer Dampfblase in flüssigem Wasserstoff.

Kapitel 5

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Laufe des Vorhabens wurden die experimentelle Vorgehensweise sowie die gewonnenen Ergebnisse mit Mitarbeitern der Arbeitsgruppe von Dr. Kassemi des NASA Glenn Research Centers, Ohio, USA und Mitarbeitern der Arbeitsgruppe von Dr. Himeno der University of Tokyo, Tokyo, Japan diskutiert. Anfangs- und Randwerte für einen aus den Experimenten abgeleiteten numerischen Rechenfall wurde geteilt. AuSSerdem wurden Ergebnisse mit der Arbeitsgruppe von Professor El Moctar der Universität Duisburg-Essen diskutiert. Mitarbeiter der Ariane-Group Bremen haben in regelmäSSigen Abständen an internen Meetings teilgenommen. Im Berichtszeitraum wurden die im folgenden aufgezählten Treffen oder Besprechungen durchgeführt.

Projektzeitraum KASIMOFF 1:

1. 26.11.2019, WebEx Meeting: Projektkickoff KASIMOFF, ZARM und DLR Bonn
2. 11.06.2020 WebEx Meeting: Austausch und Diskussion von numerischen Untersuchungen, ZARM, NASA GRC und University of Tokyo
3. 06.08.2020 WebEx Meeting: Austausch und Diskussion von numerischen Untersuchungen, ZARM, NASA GRC und University of Tokyo
4. 08.10.2020 WebEx Meeting: Austausch und Diskussion der ersten Ergebnisse mit flüssigem Methan (Bodenversuche), ZARM, NASA GRC und University of Tokyo
5. 24.11.2020 WebEx Meeting: Fortschrittsbericht KASIMOFF, ZARM und DLR Bonn
6. 25.11.2020 WebEx Meeting: Austausch und Diskussion der ersten Ergebnisse mit flüssigem Methan (Fallturmversuche), ZARM, NASA GRC und University of Tokyo
7. 11.02.2021 WebEx Meeting: Austausch und Diskussion der experimentellen und numerischen Ergebnisse (Fallturmversuche), ZARM, NASA GRC und University of Tokyo
8. 15.04.2021 WebEx Meeting: Austausch und Diskussion der experimentellen und numerischen Ergebnisse (Fallturmversuche), ZARM, ArianeGroup, NASA GRC und University of Tokyo
9. 21.05.2021 WebEx Meeting: Austausch und Diskussion der experimentellen und numerischen Ergebnisse, ZARM, Universität Duisburg-Essen
10. 10.06.2021 WebEx Meeting: Austausch und Diskussion der experimentellen und numerischen Ergebnisse, ZARM, NASA GRC und University of Tokyo

11. 29.07.2021 WebEx Meeting: Austausch und Diskussion der experimentellen Ergebnisse mit flüssigem Wasserstoff, ZARM, NASA GRC und University of Tokyo
12. 16.09.2021 WebEx Meeting: Fortschrittsbericht KASIMOFF, ZARM und DLR Bonn
13. 22.09.2021 WebEx Meeting: Austausch und Diskussion der experimentellen und numerischen Ergebnisse, ZARM und Universität Duisburg-Essen
14. 24.11.2021 WebEx Meeting: Austausch und Diskussion der experimentellen und numerischen Ergebnisse, ZARM und Universität Duisburg-Essen
15. 13.01.2022 WebEx Meeting: Ergebnisse der Wasserstoffexperimente, ZARM, ZARM Technik, ArianeGroup und DLR Bonn
16. 19.01.2022 WebEx Meeting: Kavitationsphänomene, ZARM und Universität Duisburg-Essen
17. 02.03.2022 WebEx Meeting: Kavitationsphänomene, ZARM und Universität Duisburg-Essen
18. 09.05.2022 WebEx Meeting: Kavitationsphänomene, ZARM und Universität Duisburg-Essen
19. 21.06.2022 WebEx Meeting: Kavitationsphänomene, ZARM und Universität Duisburg-Essen

Projektzeitraum KASIMOFF 2:

1. 18.10.2022, WebEx-Meeting mit Mitarbeitern der Universität Duisburg-Essen zwecks Austausch
2. 28.10.2022, ZARM Projektkickoff mit Mitarbeitern des DLR Bonn und ArianeGroup
3. 01.02.2023, Online-Meeting im Zuge des ESA Topical Teams Propellant Management im Bezug auf Sounding Rocket Experiment
4. 15.02.2023, Online-Meeting mit Mitarbeitern der Universität Duisburg-Essen zwecks Austausch
5. 22.02.2023, Online-Meeting mit Mitarbeitern der Universität Duisburg-Essen zwecks Austausch
6. 11.04.2023, Besuch bei Prof. Himeno, University of Tokyo - Department of Aeronautics and Astronautics
7. 08.06.2023, Online-Meeting mit NASA Glenn zwecks Austausch
8. 12.06.2023, Online-Meeting mit Mitarbeitern der ISAE-SUPAERO zwecks Austausch
9. 28.09.2023, Besuch von Mitarbeitern von Airbus Operations, Hamburg.
10. 06.02.2024 - 07.02.2024, ZARM Fortschrittsmeeting mit Mitarbeitern des DLR Bonn
11. 29.04.2024, Online-Meeting im Zuge des ESA Topical Teams Propellant Management zwecks Austausch

12. 09.07.2024, Online-Meeting im Zuge des ESA Topical Teams Propellant Management zwecks Austausch
13. 12.09.2024, Online-Meeting im Zuge des ESA Topical Teams Propellant Management zwecks Austausch
14. 22.10.2024, Online-Meeting mit Mitarbeitern von ArianeGroup und des DLR Bonn
15. 23.10.2024, Online-Meeting im Zuge des ESA Topical Teams Propellant Management zwecks Austausch
16. 13.12.2024, Online-Meeting im Zuge des ESA Topical Teams Propellant Management zwecks Austausch
17. 11.02.2025, Online-Meeting im Zuge des ESA Topical Teams Propellant Management zwecks Austausch
18. 25.03.2025, ZARM ESA Topical Teams Propellant Management Meeting zwecks Vorbereitung des TEXUS ERR Meetings
19. 26.03.2025, ZARM SCREAMH2 ERR Meeting mit Teilen des ESA Topical Teams Propellant Management, des Airbus TEXUS Teams, SSC und ESA
20. 30.04.2025, Online-Meeting im Zuge des ESA Topical Teams Propellant Management zwecks Austausch
21. 12.05.2025, Online-Meeting im Zuge des ESA Topical Teams Propellant Management zwecks Austausch

Kapitel 6

Eingehende Darstellung

6.1 Verwendung der Zuwendung und das erzielte Ergebnis im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

KASIMOFF 1

Die angestrebten Ziele des Vorhabens waren:

1. Sieden von flüssigem Wasserstoff (AP 3100)
2. Sieden von flüssigem Methan (AP 3200)
3. Kavitation von flüssigem Wasserstoff (AP 3300)
4. Kavitation von flüssigem Methan (AP 3400)
5. Vorbereitung eines suborbitalen Raketenexperimentes (AP 3500, optional)

Es wurde nur eine Kampagne von Fallturmexperimenten mit flüssigem Wasserstoff durchgeführt. In dieser Kampagne wurde die Kavitation von flüssigem Wasserstoff (AP330) untersucht. Fallturmexperimente zum Sieden mit flüssigem Wasserstoff wurden nicht durchgeführt, allerdings wurden in Bodentests Erkenntnisse für AP3100 gewonnen. Die Auswertung der Druckabsenkungsversuche mit Methan (AP 3400) konnte in diesem Projekt nicht für alle Versuche abgeschlossen werden. Es wird daher im Anschlussvorhaben komplett bearbeitet. Zur Vorbereitung eines suborbitalen Raketenexperimentes (AP3500) wurde mit der Vorbereitung eines Antrags bei der ESA begonnen. Alle anderen Ziele konnten erreicht werden. Die Ergebnisse sind im zweiten Teil dieses Abschlussberichtsberichtes aufgeführt. Dieser Teil ist in englischer Sprache verfasst und liegt dem Drittmittelgeber vor. Der Inhalt ist vertraulich zu behandeln.

KASIMOFF 2

Die angestrebten Ziele des Vorhabens waren:

1. Vorbereitung eines suborbitalen Raketenexperimentes (AP 3500)
2. Erweiterung der Auswertungsroutine für die Methanversuche (AP 3600)

3. Kavitation von flüssigem Wasserstoff (AP 3700)

Die Erkenntnisse bezüglich den Anforderungen an einen Versuchsaufbau mit flüssigem Wasserstoff konnten aus den Daten der Wasserstoffversuche aus dem Vorhaben KASIMOFF 1 gewonnen werden. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde der Versuchsaufbau angepasst und ausführlichen Tests unterzogen. Mit diesem neuen Versuchsaufbau wurde eine Wasserstoffkampagne durchgeführt, in deren Rahmen Daten für das Sieden sowie die Kavitation einer individuellen Dampfblase unter Schwerelosigkeit gewonnen wurden (AP 3700).

Auswertungsroutinen, die für Versuche im Vorhaben KASIMOFF 1 entwickelt wurden, konnten erweitert werden. Damit konnten weitere Ergebnisse aus dem Vorhaben Kasimoff1 vollständig ausgewertet werden (AP 3600). Die Vorbereitung des suborbitalen Raketenexperiments (SCREAMH2, AP3500) wurde weiterhin vorangetrieben und es fand ein Experiment Requirement Review ERR statt, in dem mit Teilnehmern von Airbus, SSC und ESA die in den Vorhaben KASIMOFF 1 und KASIMOFF 2 verwendete Versuchsanlage vorgestellt wurde (AP3500). Die detaillierten Ergebnisse sind im zweiten Teil dieses Abschlussberichtsberichtes aufgeführt. Dieser Teil ist in englischer Sprache verfasst und liegt dem Drittmittelgeber vor. Der Inhalt ist vertraulich zu behandeln.

6.1.1 Blasenwachstum von Methan aufgrund einer Druckabsenkung

In einer Versuchsreihe, welche im Zuge von zwei separaten Fallturmkampagnen durchgeführt wurde, konnte das Wachstum einer individuellen Methan-Dampfblase an einer künstlichen Siedekeimstelle, verursacht durch eine Druckabsenkung beobachtet werden. Diese experimentellen Daten wurden als Weber und Dreyer [28] in der Fachzeitschrift “Cryogenics” veröffentlicht. Dort erhielt der Artikel die Auszeichnung “Paper of the year 2023”¹. In Abbildung 6.1 sind Bildaufnahmen eines einzelnen Experiments zu repräsentativen Zeitpunkten zu sehen. Die Zeitachse ist so gelegt, dass $t = 0$ s dem Start der Schwerelosigkeit entspricht.

In Abbildung 6.1 sind im Bild zum Zeitpunkt $t = -0.16$ s (vor dem Abwurf) die freie Oberfläche des Methans und die beiden Einbauten zu erkennen. Die eine Komponente ist ein Edelstahl Rohr an dessen Ende sich die künstliche Keimstelle befindet und die andere Komponente ist ein gewundener Draht, der unterhalb der freien Oberfläche positioniert ist und diese während der kompensierten Schwerkraft positioniert um eine Störung des Blasenwachstums zu verhindern. In den weiteren Zeitschritten kann die durch die Oberflächenspannung gesteuerte Bewegung der freien Oberfläche beobachtet werden. Nach etwa 1 s wird die Bewegung vom Draht nahezu komplett abgedämpft. In den letzten beiden Bildern ist das System bereits überhitzt und es kann das Wachstum einer Dampfblase beobachtet werden.

Das Wachstum der Dampfblase kann von einem Endoskop für Detailaufnahmen besser beobachtet werden. Diese Aufnahmen sind an repräsentativen Zeitpunkten für alle Fünf Druckabsenkungsexperimente in Abbildung 6.2 dargestellt. Die Dampfblase wächst, da die überhitzte Flüssigkeit verdampft. Die Rate des Wachstums wird dadurch begrenzt, wie schnell die thermische Energie aus dem Fernfeld mittels Wärmeleitung an die freie Oberfläche der Blase transportiert werden kann. In Abwesenheit der Schwerkraft existieren keine Auftriebskräfte und in der Flüssigkeit gibt es keine Konvektionsströmungen die die Blase bewegen können. Daher sind deutlich längere Beobachtungszeiträume möglich.

In Abbildung 6.2 ist zu erkennen, dass in allen Experimenten ein sehr ähnliches Verhalten zu beobachten ist. Eine Auswertung der Blasenradien bestätigt dies. Damit wird deutlich, dass es gelungen ist, wiederholbare Ergebnisse zu gewinnen.

¹<https://www.sciencedirect.com/journal/cryogenics/about/news/cryogenics-best-paper-award-2023>

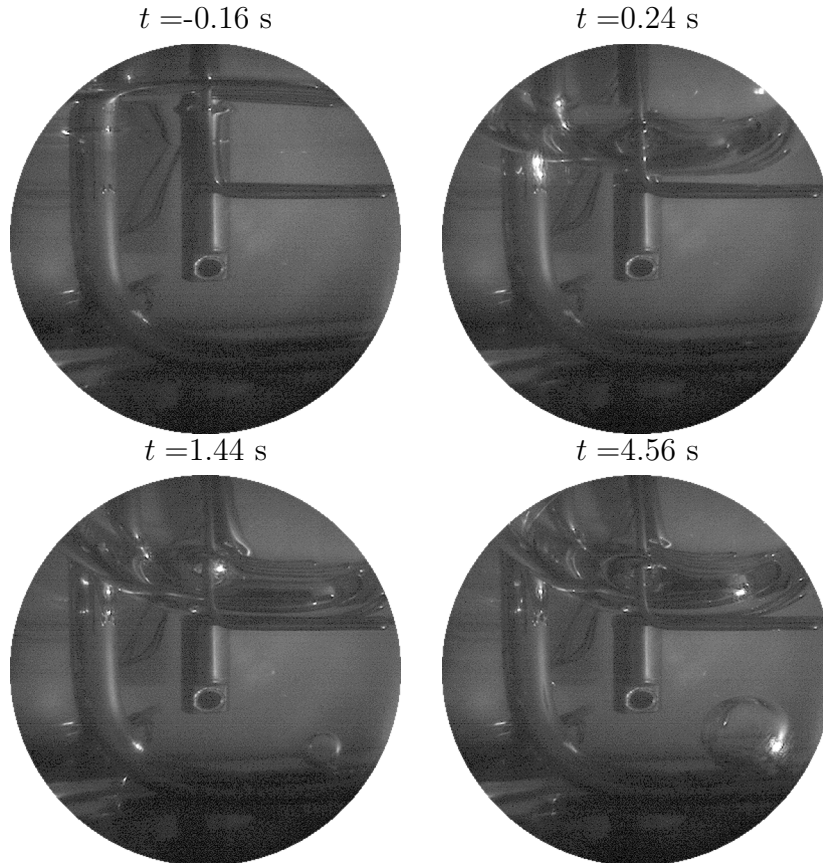


Abbildung 6.1: Übersicht über den Versuch V55 vor und während der kompensierten Schwerkraft. Ergebnisse dieses Versuchs wurden in Weber und Dreyer [28] publiziert.

Die Bilddaten aus Abbildung 6.2 wurden ausgewertet und der Radius der Dampfblasen wurde als eine Funktion der Zeit bestimmt. Die gewonnenen Verläufe konnten mit der jeweils vorliegenden Überhitzung korreliert werden. Außerdem konnte ein Least-Square Fit auf die Daten angewandt werden. Die im Experiment vorliegenden Bedingungen konnten genau charakterisiert werden. Durch das bestimmen des im Experiment vorliegenden Stimulus für das Blasenwachstum und des Veröffentlichens der quantitativen Radiuskorrelationen konnte ein klar definiertes thermodynamisches Experiment beschrieben werden, welches sich für numerische Untersuchungen eignet.

6.1.2 Numerische Untersuchungen des Blasenwachstums von Methan

Basierend auf den im Abschnitt 6.1.1 vorgestellten und in Weber und Dreyer [28] publizierten Experimente wurden numerische Untersuchungen durchgeführt. Dafür wurde eine 2D-achsensymmetrische OpenFOAM Simulation erstellt. Dabei wird ein numerisches Tool verwendet, das ein Einphasen-, Zweiphasensystem mithilfe der Volume-of-Fluid (VoF) Methode simuliert. Es wird eine schwach kompressible Gasphase betrachtet, außerdem ist Phasenwechsel in der Simulation enthalten. Des Weiteren wird der Festkörper in dem Rechnungsgebiet mit simuliert. Dort wird die Wärmeleitungsgleichung gelöst. Der Festkörper ist thermisch an die Fluid-Region gekoppelt.

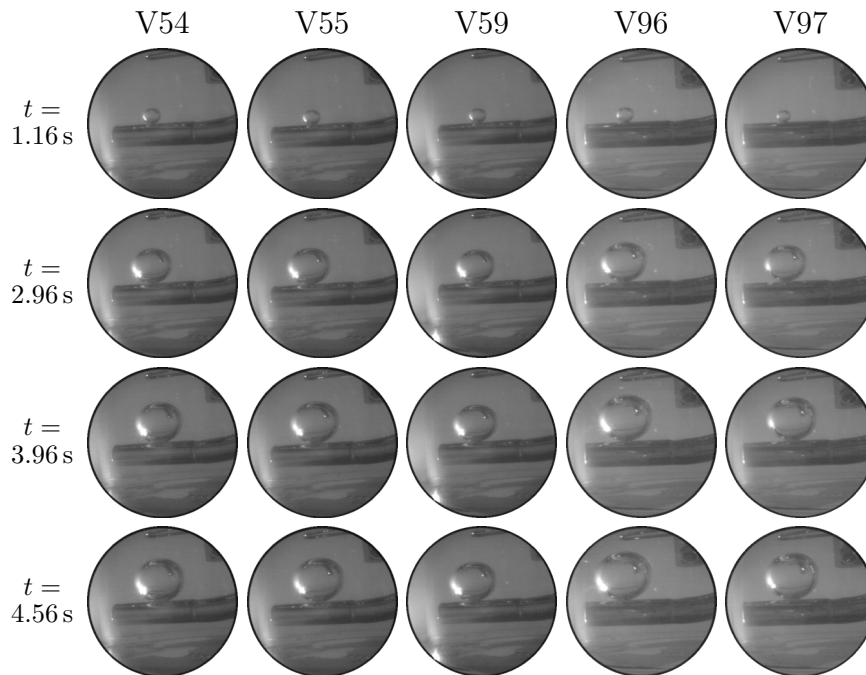


Abbildung 6.2: Dampfbblasenwachstum in flüssigem Methan verursacht durch das Absenken des Systemdrucks während kompensierter Schwerkraft. Die fünf Versuche sollten die Reproduzierbarkeit der experimentellen Daten untersuchen. Die Ergebnisse sind in Weber und Dreyer [28] publiziert.

Die dreidimensionale Geometrie der Kavität mit der Dampfblase wurde vereinfacht durch ein achsensymmetrisches Berechnungsgebiet dargestellt. Als Randwert der Simulation wurde das Druckprofil aus dem in Abbildung 6.1 und 6.2 gezeigten Experiment gewählt. Dadurch, dass numerisch die Sättigungstemperatur an der freien Oberfläche in Abhängigkeit des lokal vorliegenden Drucks ermittelt wird, führt eine Druckabsenkung zu einer Überhitzung und zu Phasenwechsel. Die Ergebnisse der Simulation zu einigen Zeitpunkte sind in Abbildung 6.3 dargestellt.

In Abbildung 6.3 ist zu erkennen, dass die thermische Grenzschicht in der Flüssigkeit nahe der freien Oberfläche aufgelöst wird. Die freie Oberfläche der Dampfblase ist in weiß dargestellt. In Abbildung (b) ist zu erkennen, dass das Absenken des Systemdrucks, welches zu einer Expansion der Blase führt, eine Abkühlung des Dampfes im Blaseninneren zur Folge hat.

Die Güte der Ergebnisse der numerischen Simulation konnten durch einen Vergleich des ermittelten Dampfbblasenradius abgeschätzt werden. Nachdem die Simulationsergebnisse durch den Vergleich mit den experimentellen Daten aus der Publikation Weber und Dreyer [28] abgesichert wurde, konnten weitere physikalische Grössen ausgewertet werden. Dadurch konnte eine Auswertung der Dicke der thermischen Grenzschicht durchgeführt werden.

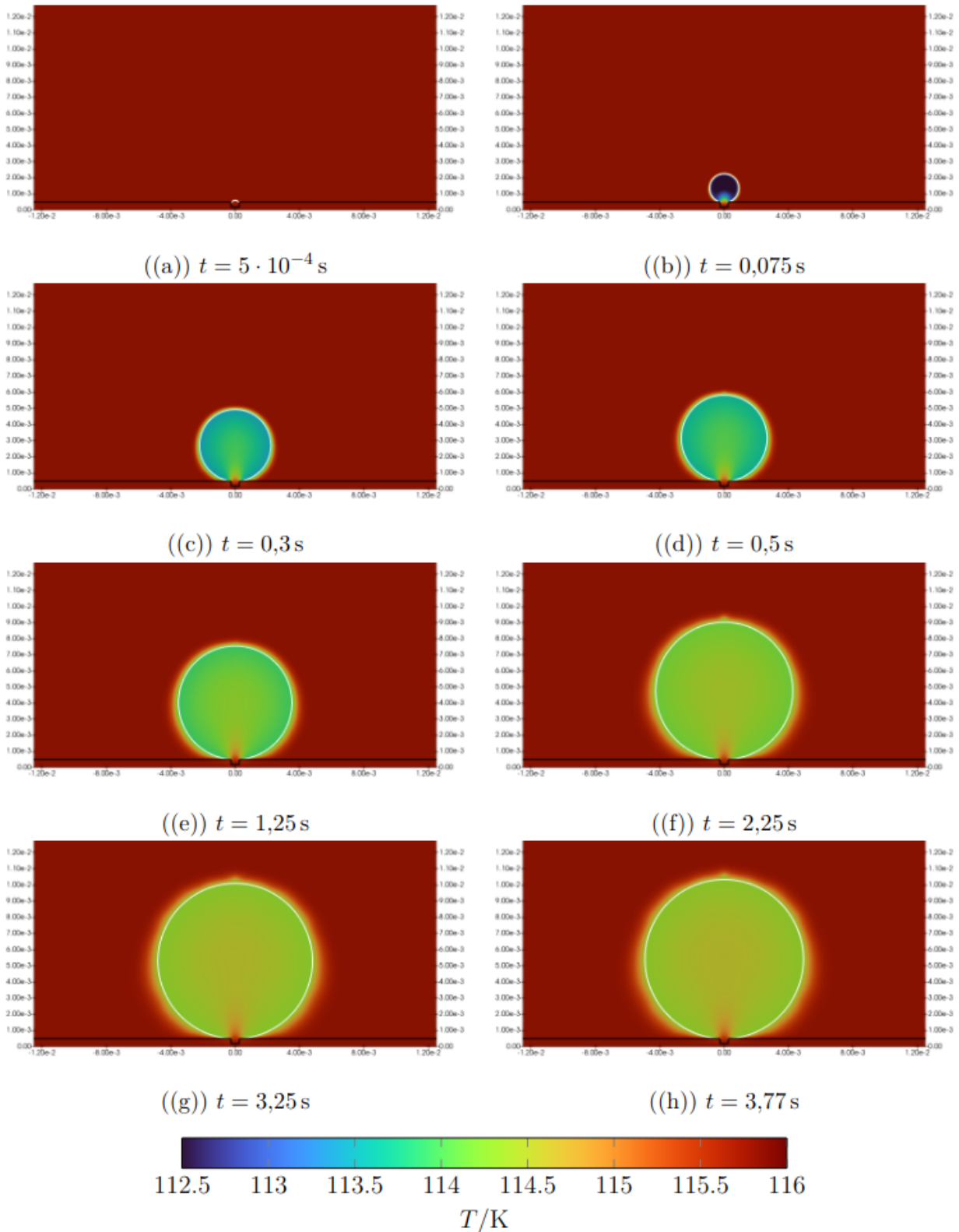


Abbildung 6.3: Ergebnisse der numerischen Simulation eines Experiments aus Abschnitt 6.1.1. Die Ergebnisse der Simulation sind zum Zweck der Visualisierung gespiegelt.

Blasenwachstum von Wasserstoff unter kompensierter Gravitation

Basierend auf den Erkenntnissen, die während der Methandampfblasenversuche beschrieben in Abschnitt 6.1.1 wurden, konnte eine Modifikation des Einbaus mit der künstlichen Siedekeimstelle konstruiert werden. Aufgrund des Unterschieds der thermophysikalischen Eigenschaften von Wasserstoff und Methan war eine Bohrung mit einem kleineren Durchmesser notwendig. Außerdem wurde eine ähnliche Geometrie in von Rammig und Weiss 1991 [24] auch für erfolgreiche Siedeuntersuchungen mit flüssigem Wasserstoff genutzt. Im folgenden werden eigene Arbeiten vorgestellt, in denen das Blasenwachstum durch Überhitzung oder Druckabsenkung untersucht wurde.

Siedeversuche: Es wurden zwei Versuche mit dem Fokus auf dem Wachstum einer einzelnen Dampfblase unter Schwerelosigkeit durchgeführt. Die Energie für das Wachsen der Dampfblase wurde durch das Anlegen eines Wärmestroms an einen Heizer auf der Innenseite der künstlichen Keimstelle zugeführt. Abbildung 6.4 zeigt in der ersten Reihe Aufnahmen des 85° Endoskops. Eine Schwappbewegung, wie sie in Abbildung 6.1 beobachtet wurde, kann auch in den Wasserstoffversuchen beobachtet werden. Die Position der freien Oberfläche konnte ebenfalls durch die integrierten Bauteile gesteuert werden.

Nachdem an dem PT1000 auf der Innenseite der Blindkappe eine Heizleistung angelegt wurde, konnte auf der unteren Bildreihe das Wachstum einer individuellen Dampfblase beobachtet werden. Die Dampfblase ist unter Bedingungen des isobaren Siedens gewachsen und erreichte einen Durchmesser von weniger als 6 mm.

Druckabsenkungsversuch: Basierend auf den Erkenntnissen aus den Druckabsenkungsversuchen mit Methan, die in Abschnitt 6.1.1 beschrieben wurden, wurde ein Druckabsenkungsversuch mit dem für Wasserstoff modifizierten Versuchsaufbau durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.5 dargestellt. Für etwa ≈ 2 s kann eine individuelle Dampfblase an der künstlichen Siedekeimstelle beobachtet werden. Diese Dampfblase wächst in der durch die Absenkung des Systemdrucks überhitzten Flüssigkeit. Im Gegensatz zu der in Abbildung 6.4 gezeigten Siedeblase wächst die Dampfblase in 6.5 in einer gleichmäßig überhitzten Flüssigkeit. Außerdem ist die Wachstumsrate der Blase auch durch die Rate der zeitlichen Druckänderung bestimmt. Durch die Variation des Drucks wird die Blase entweder komprimiert oder expandiert.

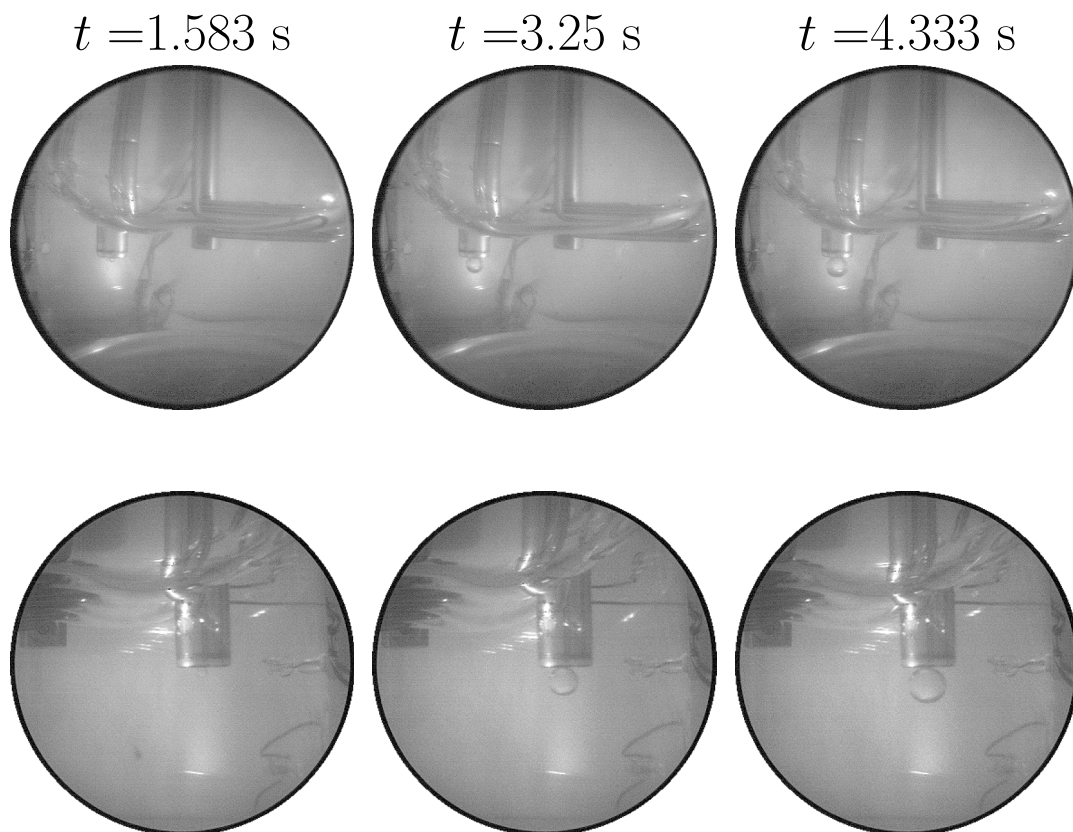


Abbildung 6.4: Dampfblasenwachstum in flüssigem Wasserstoff verursacht durch das Anlegen eines Wärmestroms unter isobaren Bedingungen während kompensierter Schwerkraft.

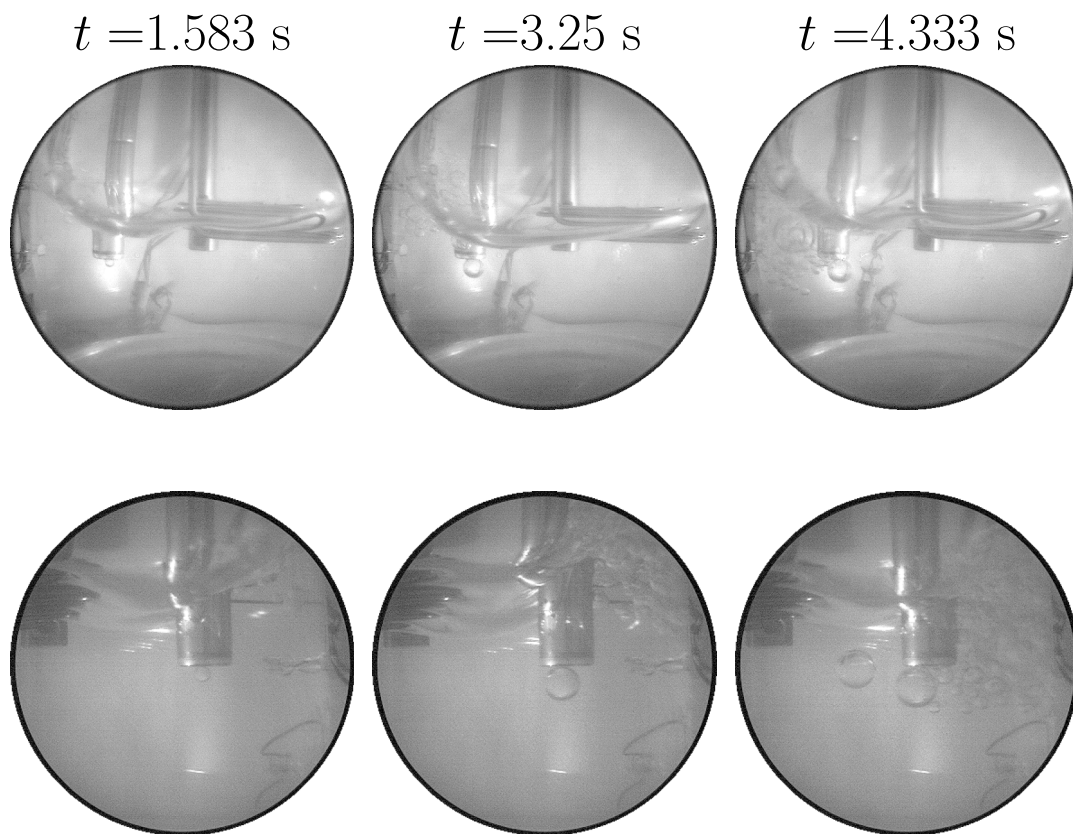


Abbildung 6.5: Dampfblasenwachstum in flüssigem Wasserstoff verursacht durch das Absenken des Systemdrucks während kompensierter Schwerkraft.

Tabelle 6.1: Zahlenmässige Aufstellung der erzielten Ergebnisse mit der Fallturmanlage

Experimentmodus	Anzahl
Bodenversuche	71
Fallturmversuche	42

Tabelle 6.2: Zahlenmässige Aufstellung der erzielten Ergebnisse mit der Fallturmanlage im Vorhaben KASIMOFF 2

Experimentmodus	Anzahl
Bodenversuche	16
Fallturmversuche	11

6.2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des Vorhabens KASIMOFF 1 sind in Tabelle 6.1 dargestellt. Von den 42 Fallturmversuchen wurden 30 Versuche mit flüssigem Methan und 12 Versuche mit flüssigem Wasserstoff durchgeführt.

Im Vorhaben KASIMOFF 2 wurden weitere Ergebnisse mit der modifizierten Fallturmanlage erzielt. Diese sind in Tabelle 6.2 aufgelistet. Von diesen Ergebnissen wurden alle mit flüssigem Wasserstoff gewonnen.

6.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Experimente unter Erdschwere und bei kompensierter Gravitation im Fallturm haben es ermöglicht, Phasenwechsel an einer definierten Keimstelle sowohl bei einer Überhitzung durch einen angelegten Wärmestrom (Sieden), wie auch bei einer Überhitzung erzeugt durch eine Druckabsenkung (Kavitation) zu beobachten. Die Experimente unter kompensierter Gravitation erlaubten eine deutlich längere Beobachtung einzelner Dampfblasen, da diese nicht durch den unter Erdschwere vorhandenen Auftrieb bewegt wurden. Die in diesen Versuchen gewonnenen Erkenntnisse eignen sich zum Vergleich mit geeigneten numerischen und analytischen Modellen. Da raumfahrtrelevante kryogene Fluide und keine Ersatzfluide verwendet wurden, ist die Skalierung auf Raumfahrtanwendungen gut gegeben.

Das gewinnen von Daten sowohl für das Sieden mit Methan sowie auch mit Wasserstoff und die Kavitation mit den beiden Fluiden erlaubt es, eine Studie über einen ausführlichen Parameterraum durchzuführen und dabei für die Anwendungen relevante Parameter zu betrachten.

6.4 Voraussichtlicher Nutzen im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Ergebnisse wurden auf internationalen Konferenzen vorgetragen. Eine wissenschaftliche Publikation befindet sich in der Begutachtung. Die fachlich interessierte Öffentlichkeit kann

sich informieren und die Ergebnisse gegebenenfalls verwenden. Die Ergebnisse werden in einem Anschlussvorhaben des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR e.V.) mit dem Titel „Untersuchungen zu Phasenwechselvorgängen von Wasserstoff bei variablen Beschleunigungen in Bezug auf zukünftige Raumfahrzeuge Kavitation, Sieden und Kondensation von Methan und Wasserstoff (KASIMOFF 3)“ verwendet.

6.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritt bei anderen Stellen

Die auf dem Gebiet des Phasenwechsels von kryogenen Fluiden während der Laufzeit des Vorhabens bekannt gewordenen Publikationen werden im Anhang des Berichtes aufgeführt und bewertet.

6.6 Veröffentlichungen

6.6.1 Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Zeitschriften

1. “Growth of Individual Vapor Bubbles in Liquid Hydrogen During Boiling in Microgravity”, Weber, N. H. und Pingel, A., eingereicht in npj Microgravity.
2. “Methane Vapor Bubble Growth due to Depressurization and Boiling”, Weber, N. H., Dissertation, Universität Bremen. doi.org/10.26092/elib/3793, 2024.
3. “Depressurization induced vapor bubble growth in liquid methane during microgravity”, Weber, N. H. und Dreyer, M. E., Cryogenics 134 (2023), p. 103716. doi:10.1016/j.cryogenics.2023.103716.

Die Veröffentlichung “Depressurization induced vapor bubble growth in liquid methane during microgravity” wurde mit dem “Cryogenics Best Paper Award 2023” ausgezeichnet. Diese Auszeichnung wurde am 27 July 2024 auf der 29th International Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Material Conference 2024 in Genf, Schweiz verliehen.

6.6.2 Vorträge auf internationalen Konferenzen

1. Niklas H. Weber, Michael E. Dreyer: Numerical Investigation of Non-isothermal Axial Sloshing of Liquid Methane, Cryogenic Heat and Mass Transfer Conference, Twente, Niederlande, November 2019.
2. Niklas H. Weber, Michael E. Dreyer: Vapor Bubble Growth in liquid Methane due to Pressure Reduction in a microgravity Environment, 29th Space Cryogenics Workshop, Virtuell, November 2021.
3. Niklas H. Weber, Michael E. Dreyer: Blasenwachstum in flüssigem Methan infolge Druckabsenkung unter Schwerelosigkeit, Deutsche Kälte- und Klimatagung 2021, Dresden, Deutschland, November 2021.
4. Niklas H. Weber, Michael E. Dreyer: Vapor Bubble Growth in liquid Methane due to Pressure Reduction in a microgravity Environment, 6th Airbus/Ariane Sloshing & Ditching Symposium, Virtuell, Januar 2022.

5. Niklas H. Weber, Michael E. Dreyer: Vapor Bubble Growth in liquid Methane due to Pressure Reduction in a microgravity Environment, 1st International Workshop on Challenges in Micro-gravity Fluid Dynamics Modelling, Noordwijk, Niederlande, Mai 2022.
6. Niklas H. Weber, Michael E. Dreyer: Vapor Bubble Growth in Liquid Methane due to Pressure Reduction in a Microgravity Environment (**Poster**), Annual Meeting on Reaction Engineering and ProcessNet Subject Division Heat and Mass Transfer 2022, Würzburg, Deutschland, Juli 2022.
7. Niklas H. Weber, Michael E. Dreyer: Vapor Bubble Growth in liquid methane in a Microgravity Environment, ICMF 2023 11th International Conference on Multiphase Flow, Kobe, Japan, April 2023.
8. Niklas H. Weber, Michael E. Dreyer: Vapor Bubble Growth in Liquid Methane in a Microgravity Environment, COSPAR 2024 45h Scientific Assembly, Busan, Korea, Juli 2024.
9. Niklas H. Weber, André Pingel: Individual Vapor Bubbles in Liquid Hydrogen during Boiling in Microgravity, ICMF 2025 12th International Conference on Multiphase flow, Toulouse, Frankreich, Mai 2025.

Berichte

1. Zwischenbericht 2019
2. Zwischenbericht 2020
3. Zwischenbericht 2021
4. Zwischenbericht 2022
5. Zwischenbericht 2023
6. Zwischenbericht 2024

Literaturverzeichnis

- [1] P. BEHRUZI, C. DODD AND G. NETTER, *Future Propellant Management Device Concepts for Restartable Cryogenic Upper Stages*, in 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA, 2007, pp. 1–10.
- [2] M. BENTZ AND C. WILKINSON, *Experimental study of flash boiling in liquid nitrogen*, in 19th AIAA/SAE/ASME Joint Propulsion Conference, Nr. AIAA-83-1378, AIAA, 1983.
- [3] B. A. BICKNELL AND P. M. CZYSZ, *Low-G Venting Tests to Support on-Orbit Fluid Resupply Systems*, in 26th AIAA/SAE/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference, Nr. AIAA-90-2379, AIAA, 1990.
- [4] C. E. BRENNEN, *Cavitation and bubble dynamics*, Oxford engineering science series 44, Oxford university press, New York Oxford, 1995.
- [5] V. P. CAREY, *Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena - An Introduction to the Thermophysics of Vaporization and Condensation Processes in Heat Transfer Equipment*, Series in Chemical and Mechanical Engineering, Hemisphere Publishing Corporation, Washington Philadelphia London, 1992.
- [6] Y. S. CHA AND R. E. HENRY, *Bubble Growth During Decompression of a Liquid*, Journal of Heat Transfer, **103** (1981), pp. 56–60.
- [7] R. COLE AND W. M. ROHSENOW, *Correlation of Bubble Departure Diameters for Boiling of Saturated Liquids*, Chem. Eng. Prog. S. Ser., **65** (1969), pp. 211–213.
- [8] J. HORD, R. B. JACOBS, C. C. ROBINSON AND L. L. SPARKS, *Nucleation Characteristics of Static Liquid Nitrogen and Liquid Hydrogen*, J. Eng. Gas Turb. Power, **86** (1964), pp. 485–494.
- [9] Y. A. KIRICHENKO, M. L. DOLGOY, N. M. LEVCHENKO, V. V. TSYBULSKIY, L. A. SLOBOZHANIN AND N. S. SHCHERBAKOVA, *A Study of the Boiling of Cryogenic Liquids*, Heat Transfer - Sov. Res., **8** (1976).
- [10] T. L. LABUS, J. C. AYDELOTT AND G. E. AMLING, *Zero-gravity venting of three refrigerants*, Tech. Report TN D-7480, 1974.
- [11] T. L. LABUS, J. C. AYDELOTT AND R. F. LACOVIC, *Low Gravity venting of Refrigerant 11*, Tech. Report TM X-2479, 1972.
- [12] R. F. LACOVIC, F. C. YEH, J. STEVEN V. SZABO, R. J. BRUN, A. J. STOFAN AND J. A. BERNS, *Management of cryogenic propellants in a full-scale orbiting space vehicle*, Nr. TN D-4571 in Technical Note, NASA, 1968.

- [13] H. S. LEE, H. J. MERTE AND F. CHIARAMONTE, *Pool Boiling Curve in Microgravity*, J. Thermophys. Heat Tr., **11** (1997), pp. 216–222.
- [14] F. MAYINGER, *Stand der thermohydraulischen Kenntnisse bei Druckentlastungsvorgängen*, Chem. Ing. Tech., **53** (1981), pp. 424–432.
- [15] P. W. MCFADDEN AND P. GRASSMANN, *The Relation between Bubble Frequency and Diameter during Nucleate Boiling*, Int. J. Heat Mass. Tran., **5** (1962), pp. 169 – 173.
- [16] J. L. MCGREW AND B. K. LARKIN, *Cryogenic Liquid Experiments in Orbit, Volume II: Bubble Mechanics, Boiling Heat Transfer and Propellant Tank Venting in an Zero-Gravity Environment*, Nr. NASA CR-652 in Technical Report, NASA, 1966.
- [17] B. B. MIKIC, W. M. ROHSENOW AND P. GRIFFITH, *On bubble growth rates*, Int. J. Heat Mass Tran., **13** (1970).
- [18] C. B. MURATOV, V. V. OSIPOV AND V. N. SMELYANSKIY, *Issues of Long-Term Cryogenic Propellant Storage in Microgravity*, in Technical memorandum, Nr. NASA/TM-2011-215988, NASA, 2011.
- [19] NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE 2021, *Space Nuclear Propulsion for Human Mars Exploration*, Washington DC: The national academies press, (2021).
- [20] J. NAVICKAS AND R. A. MADSEN, *Propellant Behavior during Venting in an Orbiting Saturn S-IVB Stage*, in Advances in Cryogenic Engineering, K. D. Timmerhaus, Ed., Springer US, Boston, MA, 1967, pp. 188–198.
- [21] S. R. OLESON, L. M. BURKE, L. S. LEE S., E. R. TURNBULL, S. MCCARTY, A. J. COLOZZA, J. E. FITTJE, J. T. YIM, M. SMITH, T. W. PACKARD, B. T. KLEFMAN, J. Z. GYEKENYESI, B. F. FALLER, P. C. SCHMITZ, D. A. SMITH, L. TIAN, C. R. AUSTIN, W. P. SIMON, C. R. HELDMAN, O. THEOFYLAKTOS, C. L. SCHMID, T. J. PARKEY, N. J. WECKESSER AND L. A. JACKSON, *Compass Final Report: Nuclear Electric Propulsion (NEP) - Chemical Vehicle 1.2*, Nr. TM-20210017131 in Technical report, NASA, 2021.
- [22] G. A. PINHASI, A. ULLMANN AND A. DAYAN, *Modeling of Flashing Two-Phase Flow*, Reviews in Chemical Engineering, **21** (2005).
- [23] A. PROSPERETTI, *Vapor Bubbles*, Annu. Rev. Fluid Mech., **49** (2017), pp. 221–248.
- [24] R. RAMMIG AND R. WEISS, *Growth of vapour bubbles from artificial nucleation sites*, Cryogenics, **31** (1991), pp. 64–69.
- [25] L. RINDERER AND F. HAENSSLER, *Explosive boiling in nitrogen dewars and nitrogen shielded helium Dewars*, Cryogenics, **2** (1962), pp. 288–289.
- [26] L. SCRIVEN, *On the Dynamics of Phase Growth*, Chem. Eng. Sci, **10** (1959), pp. 1 – 13.
- [27] A. SIELAFF, *Experimental Investigation of Single Bubbles and Bubble Interactions in Nucleate Boiling*, PhD thesis, Technische Universität Darmstadt, 2014. Dissertation liegt unter Grenzph/misc/Literature/Papers.

- [28] N. H. WEBER AND M. E. DREYER, *Depressurization induced vapor bubble growth in liquid methane during microgravity*, *Cryogenics*, **134** (2023), p. 103716.