TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Verständnis und Beeinflussung von Marangoni-Strömungen und Transportprozessen unter µ-g Bedingungen: „Marangoni in Films“

Abschlussbericht MiF 1 (FKZ: 50WM2047)

Robin Behle, Apl. Prof. Dr. Sc. Tatiana Gambaryan-Roisman

14.03.2024

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	i
2	Kurzdarstellung	1
2.1	Aufgabestellung	1
2.2	Voraussetzungen	1
2.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	1
2.4	Anknüpfung an wissenschaftlichen und technischen Stand	2
2.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	2
3	Eingehende Darstellung	2
3.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen mit Gegenüberstellung der Ziele	3
3.2	Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	7
3.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	7
3.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	8
3.5	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	8
3.6	Projektbezogene erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	8
4	Erfolgskontrollbericht	9
4.1	Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen	9
4.2	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse und gesammelte Erfahrungen	9
4.3	Fortbeschreibung des Verwertungsplans	9
4.4	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	9
4.5	Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer	10
4.6	Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung	10
5	Anhang	10
Abbildungsverzeichnis		10

2 Kurzdarstellung

In diesem Abschnitt werden die Aufgabenstellung, die Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde, die Planung und der Ablauf des Vorhabens, die Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand sowie die Zusammenarbeit mit anderen Stellen kurz dargestellt.

2.1 Aufgabestellung

Die Aufgabenstellung des Projekts umfasst die Untersuchung von Marangoni-Konvektion und deren Einfluss auf Wärme- und Stofftransport in Flüssigkeitsfilmen. Insbesondere sollen die Mechanismen der Marangoni-Konvektion, Marangoni-induzierte Filmdynamik und ihre Auswirkungen auf die Leistung von Wärmeübertragungsapparaten und verfahrenstechnischen Anlagen analysiert werden. Dabei wird der Fokus auf die Modifikation von Wandstrukturen zur Kontrolle der Marangoni-Konvektion gelegt. Das Projekt umfasst auch die wissenschaftliche Begleitung des ISS-Versuchs "Marangoni in Films" sowie die Durchführung von Referenzversuchsreihen unter Labor- und μ-g-Bedingungen sowie numerische Simulationen zur Untersuchung der gekoppelten Marangoni-induzierten Filmströmungen und Transportphänomene.

2.2 Voraussetzungen

Das Fachgebiet Technische Thermodynamik (TTD) der TU betreibt seit vielen Jahren experimentelle sowie theoretisch-numerische Forschung im Bereich der Marangoni-Strömung. Durch die Teilnahme an zahlreichen Parabelflugkampagnen, die durch die ESA oder das DLR ausgerichtet wurden, lag und liegt am TTD zudem große Erfahrung bezüglich Experimenten in Schwerelosigkeit vor. Eine weitere wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Bearbeitung des hier beschriebenen Projekts war zudem der bereits erprobte enge Verbund mit europäischen sowie außereuropäischen Forschungspartnern auf dem Gebiet.

2.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Planung und Ablauf des Projekts „Verständnis und Beeinflussung von Marangoni-Strömungen und Transportprozessen unter μ-g Bedingungen: „Marangoni in Films““ (kurz: MiF 1) entsprachen weitestgehend der im Antrag vom 14.05.2020 im dortigen Abschnitt 3.2. dargestellten Struktur mit verschiedenen Arbeitspaketen (AP). Abbildung 1 zeigt diese Arbeitspakete.

Im Rahmen von AP1 wurde das *Experimental Scientific Requirements (ESR)* Dokument für das ISS-Experiment *Marangoni in Films* in Abstimmung mit ESA und mit den Partnern an der *Université Libre de Bruxelles* weiter ausgearbeitet. Zusammen mit eben genannten sowie den von der ESA beauftragten industriellen Partner RedWire Space (ehemals QinetiQs) und Lambda-X wurde die *Scientific Valdiation Test Campaign* des *Engineering Models* im Juli 2022 durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet. Im Rahmen von AP 3 wurde ein Prüfstand aufgebaut und im Rahmen von ESAs 77. Parabelflugkampagne in Oktober 2021 erfolgreich getestet. Im AP2 wurde der in AP3 aufgebaute Versuchsstand erweitert und für Versuche im Labor am TTD verwendet. Für AP4 wurde ein transientes, dreidimensionales Finite-Elemente-Modell entwickelt, um die Verdunstung der Flüssigkeit und die Homogenisierung des Dampfes im ISS-Experiment zu simulieren. Im Rahmen von AP 5 wurden die Messergebnisse ausgewertet und auf internationalen Konferenzen vorgestellt.

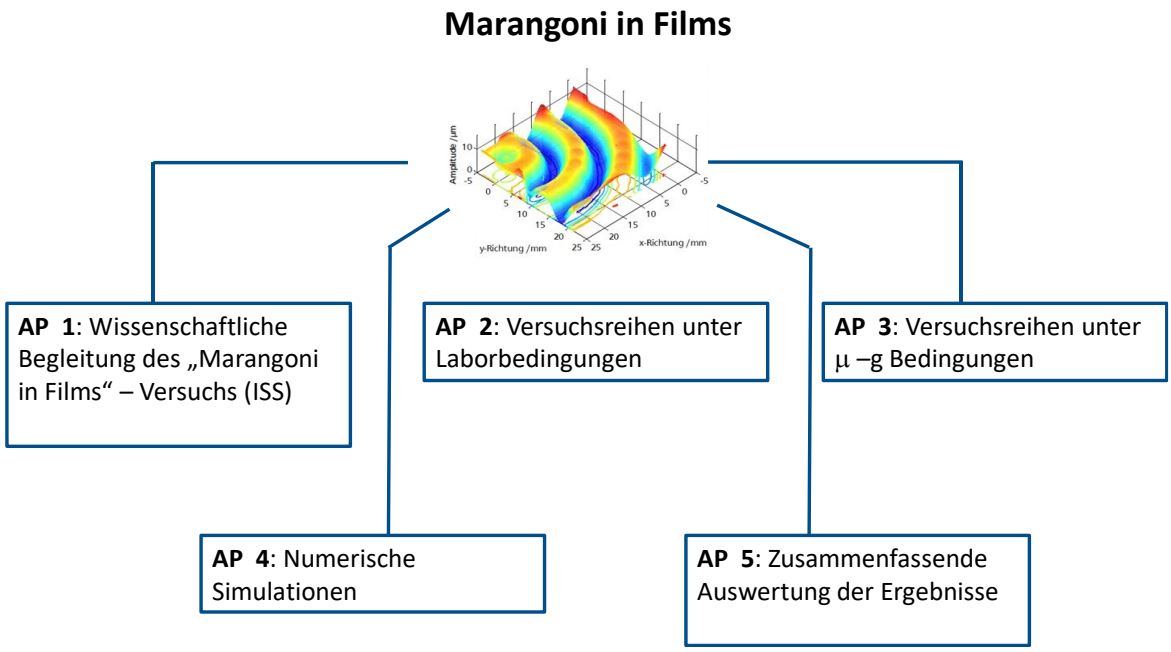

Abbildung 1: Projektstrukturplan

2.4 Anknüpfung an wissenschaftlichen und technischen Stand

Das Projekt knüpft an den aktuellen wissenschaftlichen und technischen Stand an, u.a. an publizierte Ergebnisse der theoretischen, numerischen und experimentellen Untersuchungen von Marangoni-Effekt in Flüssigkeitsfilmen[1] [2] [3]. Diese Untersuchungen wurden im Rahmen des DFG Emmy Noether-Projekts „Verdampfung von dünnen Filmen an strukturierten Oberflächen“, des DLR-Projekts „Marangoni-Konvektion und Instabilität in verdampfenden Flüssigkeitsfilmen an strukturierten Heizflächen unter Mikrogravitation: Vorbereitung von DOLFIN-Versuchen im Rahmen des integrierten Experiments SAFIR“ sowie des Teilprojekts B01 „Numerische Untersuchung zur Filmverdampfung von Mehrkomponentensystemen und zur Entstehung von Ablagerungen“ von DFG TRR-150 veröffentlicht.

2.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen von AP1 bestand eine enge Zusammenarbeit mit ESA, den industriellen Partner RedWire Space und Lambda-X sowie den wissenschaftlichen Partnern, insbesondere mit der Gruppe Transfers Interfaces and Processes (TIPs), Université Libre de Bruxelles.
Im Rahmen von AP3 wurden der Parabelflug in Zusammenarbeit mit der ESA und dem Flugzeugbetreiber Novespace durchgeführt.

3 Eingehende Darstellung

Nachfolgend wird die Verwendung der Zuwendung im Detail dargestellt. Zudem werden die erzielten Ergebnisse den Zielen gegenübergestellt, die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises angeführt sowie die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit nachgewiesen. Des Weiteren wird der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne

[1] Kabova, Yu. O., Alexeev, A., Gambaryan-Roisman, T., Stephan, P. 2005, Thermocapillarity-induced vortexes and liquid film dynamics on structured heated walls, Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics 30, pp. 225-241.

[2] Fath, A., Horn, T., Gambaryan-Roisman, T., Stephan, P., Bothe, D. 2015, Numerical and experimental analysis of short-scale Marangoni convection on heated structured surfaces, Int. J. Heat Mass Transfer 86, pp. 764-779, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.03.034.

[3] Bender, A., Stephan, P., Gambaryan-Roisman, T. 2018, Numerical investigation of the evolution and breakup of an evaporating liquid film on a structured wall, Int. J. Heat Fluid Flow 70, pp. 104-113, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2018.01.013.

des Verwertungsplans erklärt. Abschließend werden erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse aufgelistet.

3.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen mit Gegenüberstellung der Ziele

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse den Zielen im Einzelnen gegenübergestellt. Die Darstellung erfolgt entsprechend der Arbeitspakete gegliedert.

AP 1 Wissenschaftliche Begleitung des „Marangoni in Films“ Versuchs – ISS

Im Rahmen des ESA-Verbundprojekts *Marangoni in Films* sollen wissenschaftliche Messungen auf der ISS durchgeführt werden. Ziel ist es die Marangoni-Konvektion, Verdunstung und Musterbildung in Flüssigkeitsfilmen zu untersuchen, die durch Substratmodifikation gesteuert werden.
Die Vorbereitung auf das ISS-Experiments wurde im Rahmen von AP1 wissenschaftlich begleitet und koordiniert. Zusammen mit den wissenschaftlichen Partner sowie der ESA, wurde das *Experimental Scientific Requirements (ESR)* weiter ausgearbeitet. Es fand ein intensiver Austausch mit dem durch die ESA beauftragten industriellen Partner zum Aufbau des Experimentes für den Einsatz auf der ISS statt. Das von dem Industriepartner vorgelegte Konzept zur Einspritzung des Flüssigkeitsfilms wurde im Rahmen des Parabelflugs (AP3) untersucht. Im Juli 2022 fand die *Science Validation Test Campaign* zusammen mit ESA, den wissenschaftlichen Partner und der Industriepartner statt. Hierbei wurde das *Engineering Model* des ISS-Versuchs getestet und erste wissenschaftliche Messungen konnten durchgeführt werden. Erste Ergebnisse wurden auf zwei internationalen Konferenzen [C1, C2] vorgestellt. Eine Publikation [J1] ist aktuell in Ausarbeitung. Die zentralen Ergebnisse sind AP5 zusammengefasst.

AP2 Versuchsreihen unter Laborbedingungen

Dieses AP widmet sich der Untersuchungen zur langwelligen Marangoni-Strömung unter Laborbedingungen. Zu diesem Zweck wurde die Versuchsanlage, die für die Parabelflugversuche konstruiert und aufgebaut wurde (siehe AP3), erweitert und modifiziert. Ein Schwerpunkt der Versuchsreihen unter Laborbedingungen lag auf Untersuchung der Oberflächenverformung, die durch langwellige Marangoni-Strömung verursacht war. Diese Messungen können während eines Parabelflugs aufgrund der begrenzten Zeit in der Schwerelosigkeit nicht durchgeführt werden. Das LITHI-Messsystem zur Erfassung der Oberflächendeformation steht für die Labormessungen nicht zur Verfügung, da es speziell für das ISS-Experiment entwickelt wurde. Die zuvor für das Vorhaben vorgesehene Messtechnik (NIMO) hat sich nicht bewährt, da die zeitliche Auflösung zu gering für die Versuche ist. Es wurde ein Konfokalliniensensor von einem benachbarten Institut ausgeliehen um die Deformation des verdunstenden Flüssigkeitsfilms zu messen. Messungen mit diesem Sensor zeigen, dass sich die langwellige Marangoni-Strömung auch unter Laborbedingungen nachweisbar bildet (u.a. [S3]). In Abbildung 2 ist der zeitliche Verlauf des verdunstenden Flüssigkeitsfilm über dem Strukturberg gezeigt. Abbildung 3 zeigt die sich einstellende Flüssigkeitsdeformation bei unterschiedlicher Substratüberhitzung. Durch die unterschiedlichen Laborversuchsreihen in dem Versuchsaufbau am TTD wurde das Ziel von AP2 erreicht.

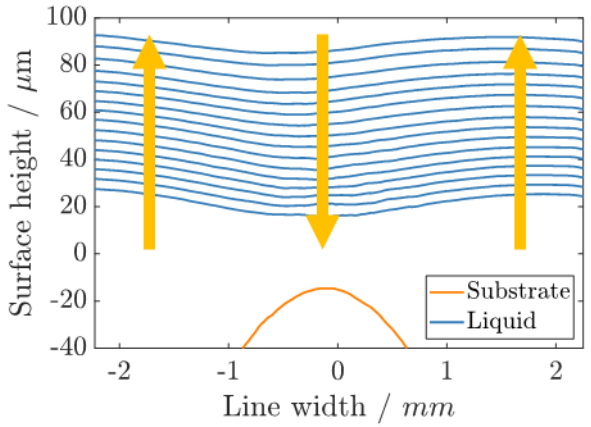

Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf des Flüssigkeitsfilm über dem erhitzten Strukturberg, gemessen mit dem chromatischen Konfokalliniensesnsor. $T_W - T_\infty = 35\ K, p = 1\ atm,\ f = 1000\ Hz$

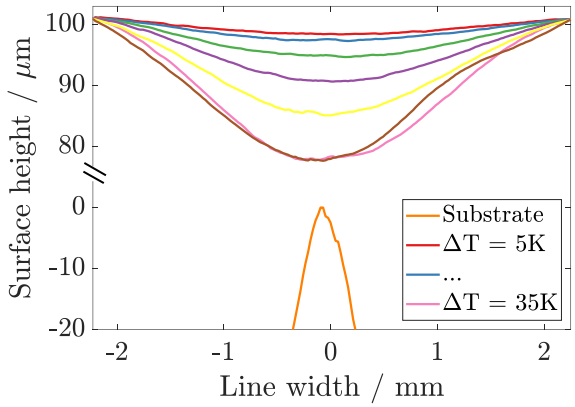

Abbildung 3: Verformung der Filmoberfläche über dem Strukturberg bei unterschiedlicher Temperaturdifferenz $\Delta T = T_W - T_\infty$, mit einer Schichtdicke $h = 100\ \mu m$ am Filmrand.

AP3 Versuchsreihen unter μ-g Bedingungen

Im Rahmen von AP3 wurden Experimente unter reduzierter Schwerkraft während eines Parabelflugs durchgeführt. Das primäre Ziel dieser Untersuchung war es, das vorgeschlagene Design des Engineering-Teams für die Flüssigkeitseinspritzung und die Platzierung des Films auf der Substratoberfläche zu überprüfen. Für den Parabelflug wurde das gleiche Einspritzsystem wie beim Experiment auf der ISS verwendet. Das restliche Design der Testzelle musste an die spezifischen Bedingungen während des Parabelflugs angepasst werden. Das Einspritzverhalten und die Filmbildung wurden unter verschiedenen Parametern analysiert, darunter das Einspritzvolumen V, die Einspritzrate $\dot{V}$, der Luftdruck in der Zelle p_{air} sowie die Druckdifferenz zwischen Zelle und Flüssigkeitssystem Δp. Es wurde erfolgreich nachgewiesen, dass sowohl die Einspritzung als auch die Filmbildung unter reduzierter Schwerkraft funktionieren. Der Flüssigkeitsfilm benetzt die Oberfläche und wird, wie in Abbildung 4 dargestellt, entlang der Kante (Microgroove) festgehalten. Selbst bei signifikanter Überfüllung ($V > 3V_{norm}$) und erhöhter Einspritzrate ($\dot{V} = 4\dot{V}_{norm}$) bildet sich ein stabiler Flüssigkeitsfilm auf der Oberfläche, wie in der Abbildung 5 zu sehen ist. Ein Versagen der Filmbildung tritt nur bei einer Druckdifferenz von $\Delta p = 300 mbar$ zwischen der Atmosphäre in der Testzelle und dem Flüssigkeitssystem auf. Videos zur Einspritzung unter reduzierter Schwerkraft lassen sich [https://hessenbox.tu-darmstadt.de/dl/fi4WqHbwnk2dTDE3S7mRp8UF/.dir] entnehmen. Das Ziel von AP 3 wurde folglich erreicht.

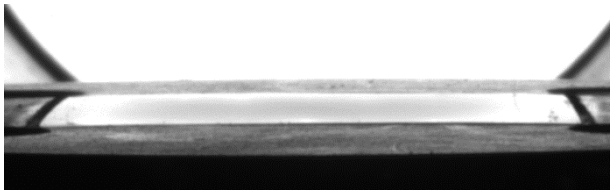

Abbildung 4 Filmbildung unter reduzierter Schwerkraft unter Verwendung der vorgesehenen Einspritzparameter für das ISS-Experiment. $V = 250\ \mu l$,$\dot{V} = 100\ \mu l/s$.

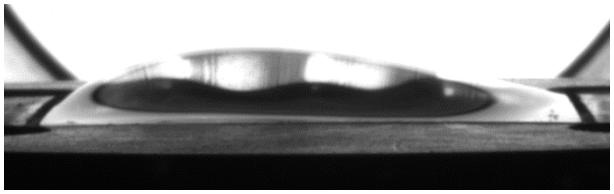

Abbildung 5 Filmbildung unter reduzierter Schwerkraft unter Verwendung der maximal möglichen Einspritzparameter des Einspritzsystems für das ISS-Experiment. $V = 900\ \mu l$,$\dot{V} = 400\ \mu l/s$.

AP4 Numerische Simulationen

Im Rahmen des AP4 wurde ein transientes, dreidimensionales Finite-Elemente-Modell entwickelt, um die Verdunstung der Flüssigkeit und die Homogenisierung des Dampfes im gleichnamigen ISS-Experiment zu simulieren [u.a. S2]. Das vom Science Team vorgeschlagene Design der Testzelle erwies sich als äußerst effektiv bei der Erzielung der angestrebten Verdunstungsrate. Es wurde nachgewiesen, dass sich nach einer anfänglichen Phase intensiver Verdunstung eine Periode mit einer konstanten Verdunstungsrate etabliert. Diese Beobachtung wird in Abbildung 6 veranschaulicht, welche den zeitlichen Verlauf der Verdunstungsrate darstellt. Aktuell werden die Modellergebnisse (violett) mit den Versuchsdaten (blau) der Breadboard Campaign (Juli 2020) und der Science Validation Test Campaign (Juli 2022) verglichen. Zusammen mit den wissenschaftlichen Partner werden ebenfalls die Interferometrie-Daten (grün) des ISS-Experiments ausgewertet und mit den Simulation und Druckdaten verglichen. Die Ergebnisse sollen in [J1] veröffentlicht werden. Zusätzlich wurde ein Modell entwickelt um die Verdunstung der im Einspritzkanal verbleibende Flüssigkeit zu simulieren [S5].

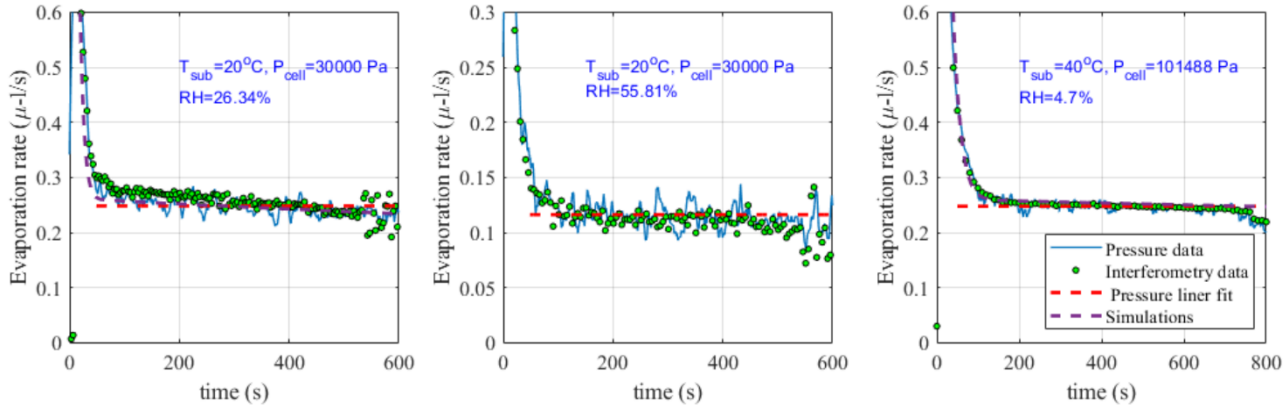

Abbildung 6: Verdunstungsrate über Zeit. Verdunstungsrate bestimmt mittels den Druckdaten, Interferometriedaten und Simulation.

AP5 Zusammenfassende Auswertung der Ergebnisse

In AP5 wurden die Ergebnisse der Messreihen zusammengeführt und bezüglich zentraler, charakteristischen Größen der Thermokapillarität ausgewertet. Es liegen Messdaten von der *Science Validation Test Campaign* sowie von der Laborversuchsanlage, zusammen mit numerischen Daten vor. Die Messdaten der Parabelflugmesskampagne werden in dieser Untersuchung nicht einbezogen, da sie hauptsächlich zur Überprüfung des Designs für das ISS-Experiment dienten. Die Untersuchung der Marangoni-Strömung stand dabei nicht im Vordergrund.
Die Ergebnisse der *Science Validation Test Campaign* wurden sowohl in [C1] als Poster als auch in [C2] als Vortrag präsentiert, wobei sich diese Beiträge ausschließlich auf die Ergebnisse bezüglich der Marangoni-Strömung konzentrierten. Die mittels Laser-Interferometrie gemessenen Daten bezüglich der Verdunstung werden derzeit für eine separate Veröffentlichung vorbereitet [J1] und werden mit den numerischen Simulationen von AP4 verglichen. Ein Teil der Messdaten von der Laborversuchsanlage sind in [S3] veröffentlicht.

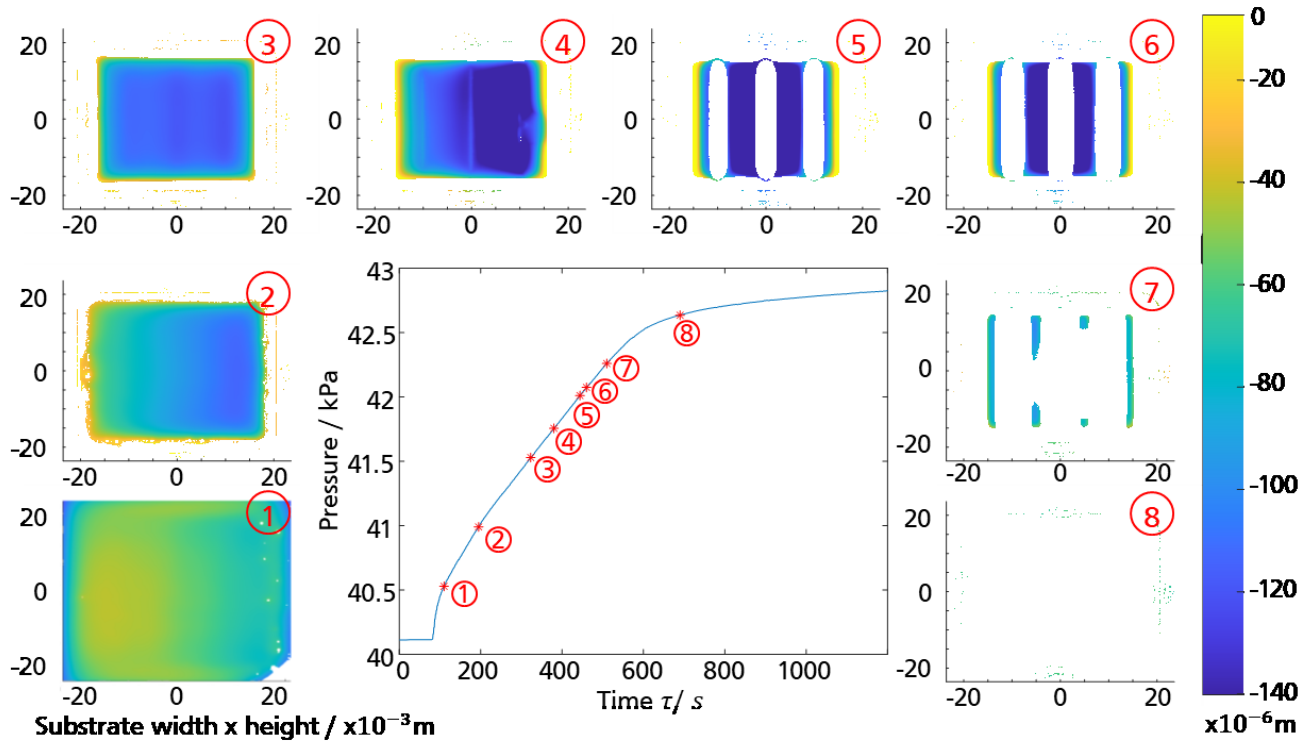

Abbildung 7: Druckverlauf während der Flüssigkeitsfilmverdunstung. Draufsicht der Flüssigkeitsoberflächendeformation. $p_{N_2} = 40kPa, T = 30°C$.

[C1] und [C2] beschreiben den Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung sowie erste Ergebnisse. In Abbildung 7 wird beispielhaft der zeitliche Druckanstieg während der Verdunstung der Flüssigkeit und die Topographie der Flüssigkeitsoberfläche dargestellt. Der Druckanstieg zeichnet sich zunächst durch eine deutliche Zunahme direkt nach der Einspritzung der Flüssigkeit aus. Anschließend etabliert sich eine Phase mit konstanter Verdunstungsrate. Nach einer anfänglichen Überfüllung (1) heftet sich die verdunstende Flüssigkeit an den Rändern des Substrats an und es kommt zu einer Verformung der Flüssigkeitsoberfläche (2-4). Daraufhin bricht der Flüssigkeitsfilm an den Bergen des Substrats auf, was zur Austrocknung der Flüssigkeit führt (5-8). Abbildung 8 zeigt eine Schnittdarstellung des Substrats (orange) und der Flüssigkeitsoberfläche (blau) für drei charakteristische Phasen: unmittelbar nach dem Einspritzen und Absetzen des Films (a), dem Beginn der Oberflächenverformung (b) und dem fortgeschrittenen Stadium der Verformung, das dem Aufreißen des Films nahekommt (c). Die beobachtete Oberflächenverformung stimmt gut mit den Vorhersagen der long-wave theory überein.

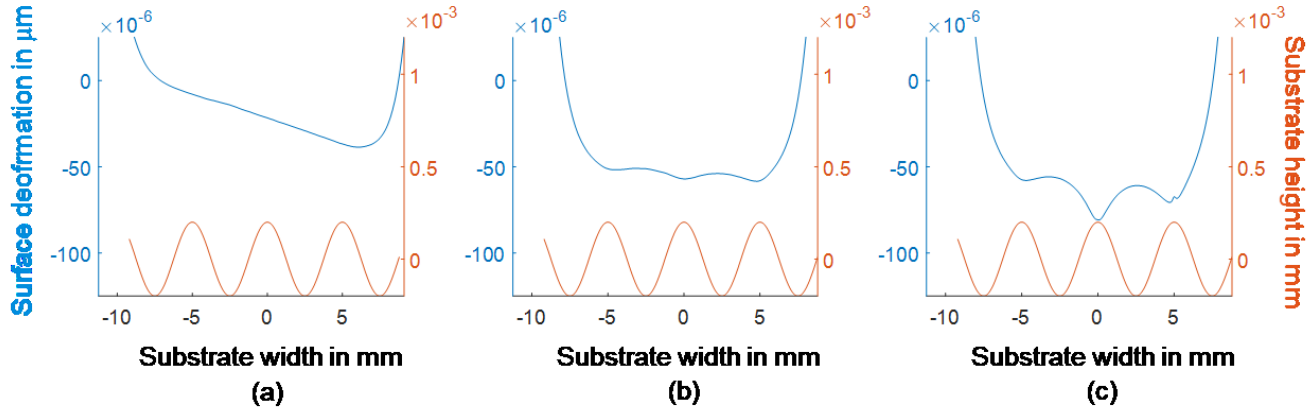

Abbildung 8: Entwicklung der Flüssigkeitsoberfläche (blau) über dem Substrat (orange). (a) nach Einspritzen und Absetzten des Films, (b) Beginn der Oberflächendeformation, (c) bevorstehender Filmaufriss

Die Verdunstungsrate des Flüssigkeitsfilms lässt sich mithilfe des idealen Gasgesetztes bestimmen. Die Messdaten der Oberflächendeformation geben Ausschluss über die maximale Deformation des Flüssigkeitsfilms und den Zeitpunkt des Filmaufrisses. Abbildung 9 zeigt den Zusammenhang zwischen der maximal erreichten Amplitude der Flüssigkeitsoberflächendeformation in Abhängigkeit der Verdunstungsrate. Es ist zu erkennen, dass die Verdunstungsrate und die Amplitude sich proportional zueinander verhalten. In Abbildung 10 ist der Zeitpunkt bis zum Filmaufriss in Abhängigkeit der Verdunstungsrate gezeigt. Der Zeitpunkt bis zum Filmaufriss nimmt nichtlinear mit steigender Verdunstungsrate ab. Dieses Verhalten stimmt mit den Ergebnissen der numerischen Vorhersage qualitativ gut überein[4].

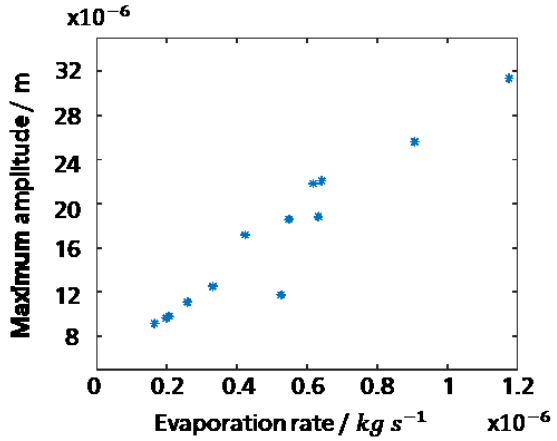

Abbildung 9: Maximal erreichte Amplitude der Flüssigkeitsoberflächendeformation in Abhängigkeit der Verdunstungsrate

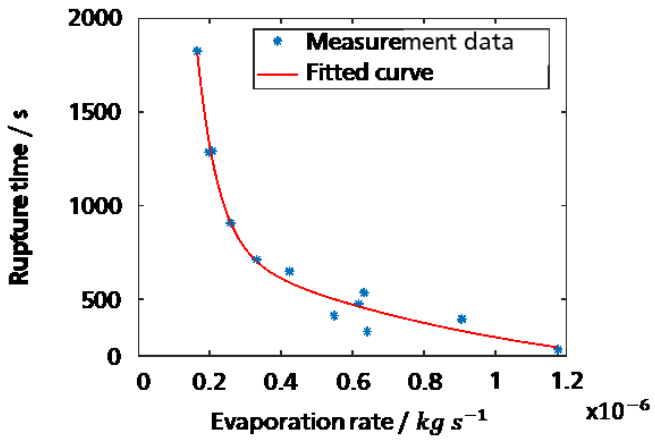

Abbildung 10: Zeitpunkt des Filmaufriss in Abhängigkeit der Verdunstungsrate

3.2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die bewilligten Mittel betrugen [redacted]€. Die Gesamtausgaben bis zum 31.09.2023 betrugen [redacted]€ was einem Kassenbestand von entsprach [redacted]€. Die verausgabten Personalkosten betrugen hierbei [redacted]€ bei einer bewilligten Summe von [redacted]€ Die Differenz wurde für Sach- und Reisekosten eingesetzt. Eine genaue Auflistung der Kosten ist den übermittelten Beleglisten zu entnehmen.

3.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Rahmen des Projektvorhabens wurden am Fachgebiet TTD der Antragstellerin wesentliche Beiträge zu dem ISS-Versuch *Marangoni in Films* geleistet. Dies sind u.a.: Durchführung von vorbereitenden Versuche während der 77. ESA Parabelflugkampagne zur Validierung des von dem Industriepartner vorgeschlagene Design. Das Vorhaben war zudem zwingend notwendig, um das ISS-Experiment wissenschaftlich zu begleiten und Auswertungen der *Science Validation Test Campaign* durchzuführen um somit eine Grundlage für den späteren Erfolg des Experiments an Bord der ISS zu schaffen.

[4] Bender, A., Stephan, P., Gambaryan-Roisman, T. 2018, Numerical investigation of the evolution and breakup of an evaporating liquid film on a structured wall, Int. J. Heat Fluid Flow 70, pp. 104-113, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2018.01.013.

3.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans wurden seitens der Antragstellerin keine Schutzrechte angemeldet oder in Anspruch genommen. Eine wirtschaftliche Nutzung der Ergebnisse ist aufgrund der grundlagenorientierten Forschung derzeit nicht abzuschätzen. Es ist davon auszugehen, dass die Arbeitsergebnisse zum Erfolg der zukünftigen Mission maßgeblich beitragen werden. Die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit ergibt sich aus der geplanten Durchführung von Messungen auf der ISS.

3.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im abgeschlossenen Forschungsvorhaben stand unter anderem die wissenschaftliche Begleitung des ISS-Experiments *Marangoni in Films* und die Untersuchung von Marangoni-Strömung in μ-g im Mittelpunkt. Der Antragstellerin sind keine weiteren Forschungsarbeiten mit dieser Zielsetzung bekannt.

3.6 Projektbezogene erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden alle wissenschaftlichen Publikationen in chronologischer Reihenfolge angeführt. Darunter sind Beiträge in wissenschaftlichen Journalen ([J…]), Konferenzbeiträge ([C…]), Dissertationen ([D…]) und studentische Arbeiten ([S…]). Geplante Veröffentlichungen bzw. laufende Arbeiten sind an entsprechender Stelle als solche gekennzeichnet. Diese werden im Folgeprojekt *Verständnis und Beeinflussung von Marangoni-Strömungen und Transportprozessen unter μ-g Bedingungen: „Marangoni in Films“ II* (FKZ: 50WM2353) weiterbearbeitet.

In Vorbereitung zur Veröffentlichung in Journalen

[J1] Parimalanathan, S., Rednikov, A., Gambaryan-Roisman, T., Behle, R., Collinet, P., “Ground tests for a future space experiment: evaporation rates through a centimetric square chimney by vapour interferometry and simulation”

Konferenzbeiträge

[C1] Behle, R., Stephan, P., Gambaryan-Roisman, T., “Experimental study of thermocapillarity – induced deformation of evaporating films on structured copper surfaces”, Gordon Research Conference - Micro and Nanoscale Phase Change Phenomena, Tuscany, Italy (2023)

[C2] Behle, R., Stephan, P., Gambaryan-Roisman, T., “Experimental study of thermocapillarity – induced deformation of evaporating films on structured copper surfaces”, 11th Conference of the International Marangoni Association, Bordeaux, France (2023)

Dissertation, laufend

[D1] Behle, R.; “Experimentelle Untersuchung der Marangoni-induzierten Grenzflächenverformung und Marangoni-Instabilitäten in Flüssigkeitsfilmen“ (Titel vorläufig)

Studentische Arbeiten

[S1] Schönleber, J., “Design and construction of a system to reduce the gravity level during a parabolic flight“, Masterthesis, TUD (2021)

[S2] Li, Y., “Simulation of the evaporation of a liquid in an experiment for the International Space Station”, Masterthesis, TUD (2023)

[S4] Peters, A., “Untersuchung der Filmdicke in einer Versuchsanlage zur Marangoni-getriebenen Oberflächendeformation”, TUD (2023)
[S5] Mazhit, M., „Simulation der Verdunstung einer Flüssigkeit in den Einspritzkanälen in einem Experiment für die Internationale Raumstation“, TUD (2023)

4 Erfolgskontrollbericht

In diesem Abschnitt werden der Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen, das wissenschaftlich-technische Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten Erfahrungen, die Fortschreibung des Verwertungsplans, Arbeiten die zu keiner Lösung geführt haben, Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer sowie die Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung thematisiert.

4.1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Mit den durchgeführten Arbeiten konnte ein signifikanter Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des beantragten Vorhabens geleistet werden. Das tiefergehende Verständnis von oberflächenspannungsgetriebenen Strömungen unter Weltraumbedingungen, insbesondere des Marangoni-Effekts, ist von großer Bedeutung für die Forschung auf der Internationalen Raumstation (ISS) sowie für die Entwicklung von Technologien für Raumfahrtsysteme. Die Ergebnisse dieser Arbeiten tragen dazu bei, die von der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) koordinierten europäischen Verbundaktivitäten im Bereich oberflächenspannungsgetriebener Strömungen auf der ISS aktiv mitzugestalten, insbesondere im Hinblick auf den geplanten ISS-Versuch "Marangoni in Films". Darüber hinaus sind die Ergebnisse des Projektes in das in 2023 abgeschlossene ESA MAP Projekt "Convection and Interface Mass Exchange (EVAPORATION)", an dem das Fachgebiet Technische Thermodynamik beteiligt war, eingeflossen. Die erzielten Ergebnisse legen den Grundstein für die bevorstehende Durchführung des Versuchs auf der ISS und tragen somit zur Vorbereitung und Umsetzung dieses Vorhabens bei.

4.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse und gesammelte Erfahrungen

Für das wissenschaftlich-technische Ergebnis sowie die erreichten Nebenergebnisse verweisen wir auf Kapitel 3.1. Die wesentlichen Inhalte sind in diesem Kapitel zusammengefasst. Im Rahmen des Vorhabens konnten wir viele neue Erfahrungen sammeln bzw. vorhandenes Wissen durch zusätzliche Erfahrungen erweitern. Neben fachlichen Aspekten war hier auch die Projektleitung bzw. der Koordination verschiedener internationaler Partnerinstitute im Zusammenhang mit dem *Marangoni in Films* wichtig. Auch die Zusammenarbeit mit der ESA und den von der ESA beauftragten industriellen Partner ein wichtiger Bestandteil. Es konnten weitere internationale Kontakte geknüpft sowie bestehende intensiviert werden, mit dem Resultat geplanter gemeinsamer wissenschaftlicher Publikationen in Fachjournalen.

4.3 Fortbeschreibung des Verwertungsplans

Für die Fortschreibung des Verwertungsplans verweisen wir auf das Kapitel 3.4.

4.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Für das Projektvorhaben vorgesehene Messtechnik (NIMO) wurde ursprünglich für Messungen mit Silikonölen verwendet, bei der es zu keiner Verdunstung kommt. Die Messtechnik ermöglicht Messungen der 2D-Oberflächendeformation mit hoher Genauigkeit, aber begrenzter zeitlicher Auflösung. Die Vorversuche haben gezeigt, dass für einen breiten Parameterbereich bei der Verwendung von HFE-7100 die zeitliche Auflösung nicht ausreichend ist.

4.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Das abgeschlossene Vorhaben wird im Folgeprojekt MiF II fortgeführt. Die Ergebnisse werden im Rahmen dessen weiter genutzt bzw. präsentiert.

4.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Es haben sich keine wesentlichen Abweichungen zum im Antrag dargestellten Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplan ergeben. Aufgrund der Kosten für die Spritzenpumpe und das Injektionsventil wurde eine Mittelverschiebung von *Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben* zu *Gegenstände und andere Investitionen > 800 Euro im Einzelfall* beantragt und genehmigt. In September 2023 wurde ebenfalls eine Mittelumwidmung von *Personalausgaben* und *Dienstreisen* zu *Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben* beantragt und genehmigt.

5 Anhang

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektstrukturplan 2
Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf des Flüssigkeitsfilm über dem erhitzten Strukturberg, gemessen mit dem chromatischen Konfokalliniensesnsor. $TW - T\infty = 35\ K, p = 1\ atm,\ f = 1000\ Hz$ 4
Abbildung 3: Verformung der Filmoberfläche über dem Strukturberg bei unterschiedlicher Temperaturdifferenz $\Delta T = TW - T\infty$, mit einer Schichtdicke $h = 100\ \mu m$ am Filmrand. 4
Abbildung 4 Filmbildung unter reduzierter Schwerkraft unter Verwendung der vorgesehenen Einspritzparameter für das ISS-Experiment. $V = 250\ \mu l\ , V = 100\ \mu l/s$. 4
Abbildung 5 Filmbildung unter reduzierter Schwerkraft unter Verwendung der maximal möglichen Einspritzparameter des Einspritzsystems für das ISS-Experiment. $V = 900\ \mu l\ , V = 400\ \mu l/s$. 4
Abbildung 6: Verdunstungsrate über Zeit. Verdunstungsrate bestimmt mittels den Druckdaten, Interferometriedaten und Simulation. 5
Abbildung 7: Druckverlauf während der Flüssigkeitsfilmverdunstung. Draufsicht der Flüssigkeitsoberflächendeformation. $pN2 = 40kPa, T = 30°C$. 6
Abbildung 8: Entwicklung der Flüssigkeitsoberfläche (blau) über dem Substrat (orange). (a) nach Einspritzen und Absetzten des Films, (b) Beginn der Oberflächendeformation, (c) bevorstehender Filmaufriss 6
Abbildung 9: Maximal erreichte Amplitude der Flüssigkeitsoberflächendeformation in Abhängigkeit der Verdunstungsrate 7
Abbildung 10: Zeitpunkt des Filmaufriss in Abhängigkeit der Verdunstungsrate 7