Schlussbericht zu Nr. 3.2

Vorhabenthema: **Grundlagenexperimente zur Modellentwicklung für Icing (NANNY-expice)**

Prof. Dr. **Jeanette Hussong**, Technische Universität Darmstadt, Leiterin des Fachgebietes Strömungslehre und Aerodynamik, unbefristet (**TUDa**)
Apl. Prof. Dr. **Ilia Roisman**, Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik, Leiter der Gruppe "Dynamik der Tropfen und Sprays", unbefristet (**TUDa**)

Vorhabendauer: **2.5 Jahre**
Gesamtkosten des Vorhabens: **200.784,80 EUR**

I. Kurze Darstellung zu

1. **Aufgabenstellung**:

Ziel des Projektes war die Verbesserung und Verallgemeinerung der bestehenden Berechnungsmodelle zur Vorhersage der Vereisungsprozesse insbesondere der Vereisungsmasse an Festkörperoberflächen in der Anwendung am Rotorblatt. Gegenstand der Untersuchungen sind Experimente zum Aufprall kleiner Tropfen auf ein rotierendes festes Ziel in technisch relevanten Bereichen. Das Ergebnis des Tropfenaufpralls war zu bestimmen (Anhaftung, teilweiser oder vollständiger Rückprall, Zerfall) sowie die Grenzwerte für die Regimewechsel zu ermitteln und zu modellieren. Werte der Residualmasse sollten gemessen und modelliert werden.

2. **Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde:**

Existierende Modelle der Vereisung und des Eisanwuchses basieren auf einer großen Anzahl von experimentellen Tests und sind in den meisten Fällen in der Lage, die Rate der Eisakkretion gut vorherzusagen. Allerdings sind mehrere Aspekte der Vereisung, insbesondere diejenigen, die für die Anlagerung an den Hubschrauberblättern relevant sind, noch nicht gut verstanden und werden in der vorhandenen Literatur oder in den Berechnungsmodellen nicht gut abgedeckt. Zu diesen Aspekten gehören die Wirkung der Zentrifugal- und Corioliskräfte auf die Flüssigkeitsströmung auf dem rotierenden Substrat und die aerodynamischen Effekte beim Tropfenaufprall mit sehr hoher Tangentialgeschwindigkeit. Diese Aspekte wurden in NANNY-expice adressiert.
Das Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik (SLA) an der TUDa besitzt eine sehr breite Expertise im Bereich Eiskristall, Schnee und Supercooled Liquid Droplet Aufprall, Vereisung, accretion, shedding und assoziierten Phänomenen. Forschungsaktivitäten umfassen die experimentelle Untersuchung und theoretische Modellbildung von Tropfen- und Sprayaufprallphänomenen auf trockene oder benetzte Substrate [E1]. Darüber hinaus werden am SLA Phänomene, die den Effekt der Vereisung auf die Benetzungsströme [E2] begleiten, detailiert untersucht. Für die Modellierung der Vereisung sind Modelle zur Residualmasse von Sprays [E3] und einzelner Tropfen [E4] entwickelt worden.
Die PIs verfügen über verschiedene optische und nichtoptische Messtechniken zur Untersuchungen instationären aerodynamischer Strömungsprozesse und Benetzungsphänomene [E6] einschließlich optischer Messverfahren um die 3D-Dynamik instationärer Mehrphasenströmungen in Submillimeter-Strömungsgeometriehen zu untersuchen [E7]. Im Rahmen verschiedener Projekte wie den EU Projekten **ICE-Genesis, MUSIC-HAIC** oder **ITN-SURFICE** konnten verschiedene experimentelle Methoden zur Untersuchung unterschiedlicher Vereisungsprozesse etabliert werden. Ein System zur Untersuchung von Tropfen-Oberflächeninteraktion und Vereisung unter Einfluss hoher Substrat-Tangentialgeschwindigkeiten und Zentrifugalkräften bestand zu Beginn des Projektes noch nicht und wurde hier etabliert.

3. **Planung und Ablauf des Vorhabens:**

Das Vorhaben von TUDa wurde im Rahmen des Hauptarbeitspaketes HAP2, Arbeitspaket 2.1 Dynamische Hauptrotoroptimierung, durchgeführt. Während das Fernziel in einer zuverlässigen Vorhersage der Vereisung bzw. Enteisung von Rotorflächen liegt, ist das Teilziel der Arbeiten der TUDa die dafür notwendigen Grundlagen über das Verhalten unterkühlter kleiner Tropfen beim Aufprall auf drehende Flächen zu schaffen. Es sollten Validierungsdaten zum Abgleich mit Simulationen und eine Modellbildung zur Eisablagerung erfolgen. Das Vorhaben beinhaltete daher folgende Arbeitspakete:
AP1: Prüfstandsaufbau (Monate 0 - 6)
AP2: Schräger Einzeltropfenaufprall auf rotierende Oberflächen (Monate 7 - 14)
AP3: Schräger Aufprall kleiner Tropfen auf eine rotierende Oberfläche (Monate 18 - 27)
AP4: Modellentwicklung für Eisansatz (Monate 15-17 und 28-30)

4. **Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde:**

Es wurden keine bekannten Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte für die Durchführung des Vorhabens benutzt. Es wurde öffentliche Fachliteratur aus wissenschaftlichen Journalen mit Qualitätssicherung genutzt, die unter https://scholar.google.de/ öffentlich zugänglich sind.

5. **Zusammenarbeit mit anderen Stellen:**

Wissenschaftlicher Austausch und regelmäßige Statusbesprechungen wurden mit folgenden Partnern innerhalb des Projektes im monatlichen Rhythmus durchgeführt:

- Fabien Dezitter, Tobias Ries, Airbus Helicopters
- Philipp Buchen, Mariachiara Gallia, Technische Universität Braunschweig
- Bastian Stumpf, Reda Kamal, Mingyue Ding, Marl Gloerfeld, TU Darmstadt

II. Eingehende Darstellung

1. **Verwendung der Zuwendung** und erzielte **Ergebnisse** im Einzelnen, mit **Gegenüberstellung** der **vorgegebenen Ziele**

Die Zuwendung wurde im Wesentlichen für die Finanzierung der projektbearbeitenden Mitarbeiter genutzt. Hierbei kamen erfahrene Mitarbeiter zum Einsatz, die bereits ausgewiesene Kompetenzen im Bereich Tropfenaufprall, optischer Messtechnik und Prüfstandsaufbau aufweisen konnten. Im Rahmen des Projektes konnten grundlegende Erkenntnisse zum Übergang Tropfenaufprall zu aerodynamisch getriebenem Tropfen Rebound erzielt und in folgendem Paper veröffentlicht werden:

- Stumpf, B., Qezeljeh, S. A., Kamal, R., Dezitter, F., Martuffo, A., Roisman, I. V., & Hussong, J. (2025). Drop impact onto a moving substrate: Aerodynamic rebound. *International Journal of Multiphase Flow*, *184*, 105113.

Die wesentlichen erzielten Ergebnisse des Projektes sind im Folgenden zusammengefasst und den vorgegebenen Zielen gegenüber gestellt. Folgende Ziele wurden im Projekt erfolgreich umgesetzt:

– Ein rotierender und optisch zugänglichen Probekörpers wurde erfolgreich gefertigt, der unterschiedliche Winkel zwischen Tropfen Bewegungsrichtung und Substratoberfläche ermöglicht. Der Probekörper besteht aus einer Faserkarbonplatte, mit bis zu 19.000

Umdrehungen pro Minute erreichen wodurch Umfangsgeschwindigkeit von bis zu 180m/s am Plattenrand erzielt werden können, wie in Abbildungen 1 (a) und (b) gezeigt.

- Untersuchung des einzelnen Tropfenaufpralls großer Tropfen auf den rotierenden Probekörper wurden erfolgreich durchgeführt und ein großer Parameterbereich konnte abgedeckt werden. Ein Tropfeninjektionssystem basierend auf einer piezoelektrischen Anregung wurde realisiert um kleine Tropfen im Größenbereich von weniger als 100 Mikrometern zu realisieren. Die Untersuchungen an großen und kleinen Tropfen auf den Probekörper über einen sehr breiten Bereich von Relativgeschwindigkeiten haben schließlich zu einer hochkarätigen Publikation mit den Kooperationspartnern geführt (https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2024.105113).
- Ein experimentell validiertes Modell zur Voraussage der kritischen Parametervariationen die die Grenze zwischen Aufprall und "bouncing" kleiner, schneller Tropfen vorhersagt, wurde erfolgreich etabliert. Dieses Modell ist in der oben genannten Publikation veröffentlicht.
- Das Modell zur Vorhersage der Grenze zwischen Aufprall und "bouncing" von Tropfen war das Ergebnis umfassender experimenteller Untersuchungen und wurde erfolgreich von den Projektpartner der TU Braunschweig in einen numerischen Code integriert. Das entwickelte Modell zur Beschreibung des Verhaltens eines Tropfens bei dem Aufprall auf eine rotierende ebene Scheibe wurde in den Vereisungscode DICEPS der TU-Braunschweig implementiert. Die dafür notwendigen Anpassungen am Modell betreffen den Wechsel von einem statischen in ein rotierendes Koordinatensystem und werden im Bericht der TU-Braunschweig ausführlich dargelegt. Erste Tests an einem Tragflügelprofil lieferten plausible Ergebnisse. Die Anwendung des Modells im Rahmen eines Finite-Volumen-Verfahrens erweist sich als anspruchsvoll da ein für das Modell erforderlicher Parameter, die Grenzschichtdicke, nur mit erheblichem numerischen Aufwand in angemessener Genauigkeit ermitteln lässt. Versuche die Grenzschichtdicke mithilfe von Grenzschichtmodellen effizienter zu bestimmen waren für den oben genannten Test erfolgreich. Die verwendeten Grenzschichtmodelle greifen hierbei auf Fall abhängige Konstanten zurück, die für jeden Testfall individuell ermittelt werden müssen. Das schränkt die Anwendbarkeit des Tropfenaufprallmodells in seiner derzeitigen Form ein. Genauere Informationen zu den Tests und zur Implementierung des Tropfenaufprallmodells sind dem Bericht der TU-Braunschweig zu entnehmen.
- Das Modell wurde darüber hinaus von Airbus in den Code integriert. Es wurden numerische Simulationen unter SLD-Eisakkumulationsbedingungen an einem Tragflügel durchgeführt, um die Akkumulationsrate des Eises zu bestimmen. Es wurde ein Vergleich zwischen dem Airbus-Basismodell und der modifizierten Version unter Einbeziehung des Rebound-Modells der TU Darmstadt (Referenzlösung aus dem SLD ONERA-Code) durchgeführt. Hierbei konnte eine sichtbare Verbesserung in den Bereichen weit weg von der Vorderkante erzielt werden.
- Eine Methodik zur experimentellen Bestimmung der erstarrten Tropfenmasse wurde erarbeitet. Derzeit laufen experimentelle Untersuchungen zur Vermessung der gefrorenen Tropfenmasse und Form. Die Erstellung eines validierten Modells zur Voraussage der Ablagerungsmasse und Erstarrungsform einzelner Tropfen durch Vereisung ist nach Abschluss der Experimente geplant, die im Rahmen des ITN TRACES fortgeführt werden.
- Die Erstarrung aufprallender Tropfen und der hieraus resultierende Wärmeübergang konnte experimentell beim Tropfenaufprall mittels Hochgeschwindigkeits-Infrarot-messungen erfasst werden. Beispielhafte Aufnahmen der Temperaturverteilung und hieraus berechneten Wärmestromverteilung and er Substrat-Tropfen grenzfläche sind in Abbildungen 1 (c) und (d) gezeigt.
- Auf der Grundlage der Arbeit von Roisman (2010) konnte mit Hilfe der experimentellen Ergebnisse ein verbessertes analytisches Modell entwickelt werden, um die zeitliche Entwicklung der Kontakttemperatur und des Wärmeflusses an der Grenzfläche zwischen

Tropfen und Substrat zu beschreiben. Diese Ergebnisse gehen über die initial genannten Ziele hinaus und sind für die Modellierung des Vereisungsprozesses zentral. Das Modell berücksichtigt den Kontaktwiderstand, der in früheren Studien oft vernachlässigt wurde, und ermöglicht so eine realistischere Charakterisierung der thermischen Wechselwirkungen. Die Ergebnisse zeigen eine ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen dem Modell und den Experimenten über einen breiten Bereich von Tropfendurchmessern, Substratgeschwindigkeiten und thermischen Bedingungen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Substratgeschwindigkeit und der Tröpfchendurchmesser einen vernachlässigbaren Einfluss auf das thermische Verhalten innerhalb des getesteten Parameterraums haben. Darüber hinaus werden durch die Einbeziehung des Kontaktwiderstands die Singularitäten im anfänglichen Wärmestrom, die von früheren Modellen vorhergesagt wurden, aufgelöst, so dass ein endlicher und physikalisch realistischer Wert entsteht. Eine Publikation hierzu ist derzeit in Vorbereitung.

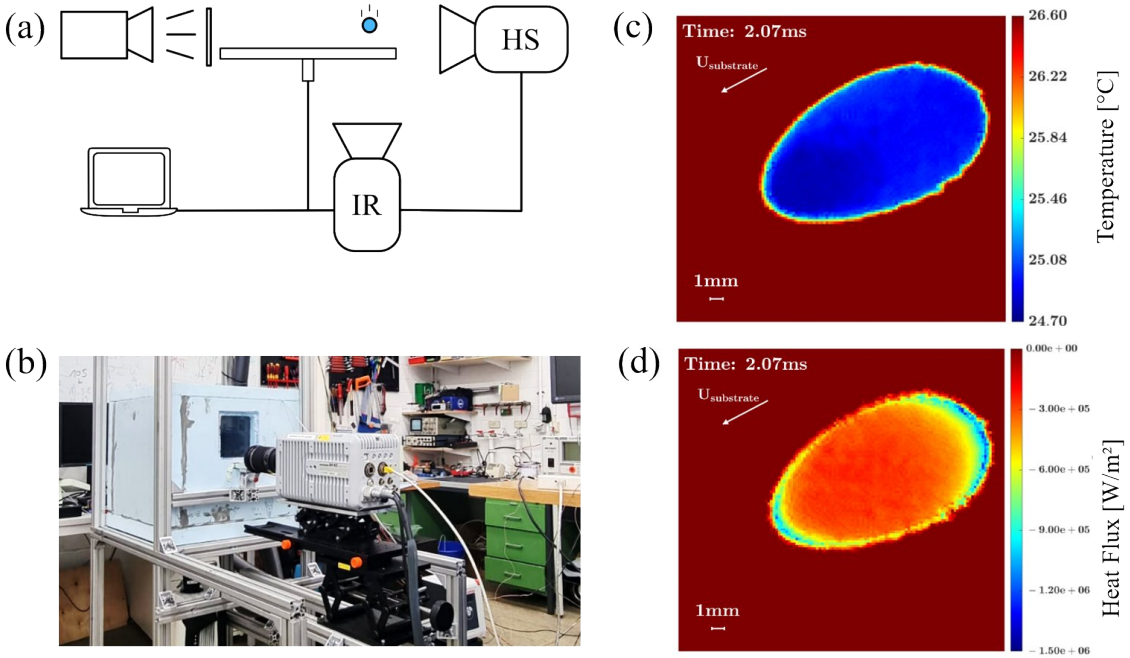

Abbildung 1: (a) Schematische Darstellung des Prüfstandes zur simultanen charakterisierung der tropfen-Wandinteraktion und zeitlichen Entwicklung der Grenzflächentemperatur zwischen rotrendem Substrat und Tropfen. (b) Foto des Prüfstandes integriert in die Klimakammer mit einstellbarer Szbstrat und uzmgebungs sowie Tropfentemperatur. (c) Beispielhafte Infrarot Hochgeschwindigkeitsaufnahme der Grenzflächentemperatur unterhalb eines auf das otierende Substrat. (d) Aus der Temperaturverteilung berechnete, instantane Wärmestromverteilung unterhalb des Tropfens.

2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises:

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises umfassen die Positionen 0812 (Gehalt wissenschaftlicher Mitarbeitender, 187.526 Euro), und 0850 (Investitionsmittel, 4720 Euro).

0812: Das Projekt NANNY-expice wurde nach erfolgreicher Suche eines geeigneten Kandidaten ab Juli 2022 von dem Postdoktoranden Mark Gloerfeld bearbeitet. Da das Projekt damit 6 Monate später als geplant startete, hat für 6 Monate Herr Niklas Apell von September 2022 bis Februar 2023 bearbeitet. Damit konnte der Projektrückstand aufgeholt und der

Aufbau des Prüfstandes für den schrägen Tropfenaufprall auf ein bewegtes Substrat zügig abgeschlossen werden. Im März 2023 wechselte Herr Gloerfeld in die Industrie und Herr Bastian Stumpf übernahm die Projektbearbeitung im März 2023 bis zum Abschluss des Projektes Ende Juni 2024.

0850: Aufgrund der extrem hohen Tropfendynamik und hohen Bildaufnahmeraten war eine hoch-genaue Synchronisierung des Tropfengenerators und der Lichtquelle mit dem Aufnahmerechner mit Hilfe einer LabVIEW Messeinrichtung zwingend erforderlich (Pos.1 Geräteliste).

3. **Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die durchgeführten Versuche und Parameterstudien basierend auf Einzeltropfen Aufprall auf bewegte Oberflächen sind von zentraler Bedeutung für die Entwicklung empirisch validierte Modelle zum Aufprall und der Vereisung unterkühlter tropfen auf Rotorblättern. Solche Modelle und deren Validierung fehlen derzeit. Durch eine Kennzahlgleichstellung konnte eine Übertragung der Ergebnisse und Modelle auf technisch relevante Parameterbereich sichergestellt werden. Ein generischer Prüfstand ermöglichte es eine große Anzahl an Versuchsdurchführungen über einen breiten Parameterbereich zu realisieren. Durch Nutzung moderner optischer Messtechnik konnte die Tropfen-Wand Interaktion sehr genau analysiert und bewertet werden.

4. **Voraussichtliche Nutzen bzw. Verwertbarkeit der Ergebnisse** im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Ergebnisse des Projekts werden hauptsächlich zum besseren Verständnis der grundlegenden physikalischen Prozesse verwendet, die am Tropfenaufprall und der Tropfen Erstarrung beteiligt sind.

Im Rahmen des ITN Traces wird der Prüfstand weiter genutzt und liefert wertvolle Ergebnisse zur benetzten Fläche auftreffender und erstarrender Tropfen sowie des Wärmeübergangs beim Tropfenaufprall und der Erstarrung.

Das entwickelte Modell zur Vorhersage des aerodynamischen Rebounds konnte erfolgreich in einen numerischen Code durch die Kooperationspartner der TU Braunschweig integriert werden. Das entwickelte Modell erlaubt es so numerisch vorauszusagen, ob Tropfen in Wandkontakt treten und ermöglicht so eine verbesserte Voraussage der potentiellen Vereisungsrate an rotierenden ebenen Oberflächen. Damit ist ein wichtiger Schritt getan hin zu zukünftig verbesserten Voraussagen das Eiswachstums durch unterkühlte Tropfen.

Eine Ergebnisverwertung fand mit der Veröffentlichung der Ergebnisse in wissenschaftlichen Fachzeitschriften und der Präsentation auf internationalen Fachtagungen statt. Ein Zeitschriftenartikel ist in *International Journal of Multiphase Flow* veröffentlicht ein zweiter ist in Vorbereitung und soll ebenfalls in ein hochkarätiges Journal eingereicht werden.

Die Vorstellung des Projektes im Rahmen von Projektanbahnungen mit der Industrie hat dazu beigetragen die Expertise des Fachbereiches im Bereich der Modellierung und Voraussage komplexer Koaleszenzdynamiken von Fluiden überzeugend darzulegen, so dass hieraus zukünftig Folgeprojekte in Industriekooperation zu erwarten sind bzw beantragt wurden (z.B. Im Rahmen des LuFo-Calls 2024 für disruptive Technologien). Das Projekt hat damit maßgebend zur Profilbildung im Profilthema Thermo-Fluids and Interfaces der TU Darmstadt und des Fachgebietes beitragen.

5. Der **Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens** bei anderen Stellen während der Durchführung des Vorhabens

Zwischen 2022 und 2025 wurde nur begrenzt Forschung zu den hydrodynamischen und thermodynamischen Vorgängen beim Tropfenaufprall auf schnell bewegte Substrate durchgeführt. Studien untersuchten die Morphologie, das Ausbreitungsverhalten sowie die Kontaktzeit von Tropfen unter verschiedenen Bedingungen [1, 2]. Besondere Aufmerksamkeit galt dabei dem Aufprall auf super-hydrophobe Oberflächen, wobei erhebliche Reduktionen der Kontaktzeit und deutliche Veränderungen in der Tropfenmorphologie berichtet wurden [3, 4]. Zusätzlich wurden der Einfluss von Oberflächenspannung und Kontaktwinkeln erforscht, was weitere Einblicke für unterschiedliche Flüssigkeiten lieferte [5]. Numerische Simulationen ergänzten diese experimentellen Ansätze und ermöglichten ein tieferes Verständnis der Strömungsvorgänge innerhalb des Tropfens [6]. Eine weitere Studie erweiterte den Forschungsumfang durch thermische Analysen mittels interfacial thermal mapping, um den Wärmefluss beim Topfernaufprall auf kalte, super-hydrophobe Oberflächen zu untersuchen, obwohl keine weitergehenden Untersuchungen zum Gefriervorgang durchgeführt wurden [7]. Innerhalb des betrachteten Zeitraums bleibt die Massenablagerung oder Restmasse von unterkühlten Tropfen auf schnell bewegten Substraten unerforscht, was ein vielversprechendes Gebiet für zukünftige Untersuchungen darstellt.

Referenzen

[1] Dong Li, Yuhe Shang, Xin Wang, and Jiafei Zhang. Dynamic behavior of droplet impacting on a moving surface. Exp. Therm. Fluid Sci., 153:111126, April 2024.
[2] Yi Zhou, Zheyan Jin, and Zhigang Yang. Impingement of a water droplet onto a rotational surface. Phys. Fluids, 36(1), January 2024.
[3] Sara Moghtadernejad, Mehdi Jadidi, Jack Hanson, and Zachary Johnson. Dynamics of droplet impact on a superhydrophobic disk. Phys. Fluids, 34(6), June 2022.
[4] Yifu Shu, Zhifeng Hu, Yanhui Feng, Xiaomin Wu, Zhichao Dong, and Fuqiang Chu. Prince rupert's drop bouncing on high-speed moving superhydrophobic surfaces. Int. Commun. Heat Mass Transf., 148:107049, November 2023.
[5] Abrar A A Mohsen, Yuxin Song, Chenglong Tang, and Zuohua Huang. Dynamics of droplet impact on a rotating surface with different contact angles. Phys. Fluids, 36(12), December 2024.
[6] Ningli Chen and Alidad Amirfazli. Numerical study of droplet impingement and spreading on a moving surface. Phys. Fluids, 35(9), September 2023.
[7] Vijay Kumar, Qianxi Fu, Harrison Szeto, and Yangying Zhu. Heat transfer during droplet impact on a cold superhydrophobic surface via interfacial thermal mapping. Droplet, 3(3), July 2024.

6. **Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen** der Ergebnisse nach Nr. 6.

– Stumpf, B., Qezeljeh, S. A., Kamal, R., Dezitter, F., Martuffo, A., Roisman, I. V., & Hussong, J. (2025). Drop impact onto a moving substrate: Aerodynamic rebound. *International Journal of Multiphase Flow*, *184*, 105113. https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2024.105113

– Kamal, R., Hussong, J., Roisman, I. V., (2025) Heat transfer at the interface during drop impact on a moving substrate, *in Vorbereitung*