

Drop Impact on Dry Surfaces with Phase Change

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technische Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr. -Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

M.Sc. Hai Li

aus Shanxi, China

Berichterstatter:	Prof. Dr.–Ing. C. Tropea
1. Mitberichterstatter:	Prof. Dr.–Ing. B. Weigand
2. Mitberichterstatter:	PD. Dr. habil. I. V. Roisman
Tag der Einreichung:	04.06.2013
Tag der mündlichen Prüfung:	11.07.2013

Darmstadt 2013

D17

Forschungsberichte Strömungslehre und Aerodynamik

Band 30

Hai Li

Drop Impact on Dry Surfaces with Phase Change

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2016

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2016

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4304-4

ISSN 1610-3114

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Hiermit versichere ich, die vorliegende Doktorarbeit unter der Betreuung von Prof. Dr.-Ing. C. Tropea und PD. Dr. habil. I. V. Roisman nur mit den angegebenen Hilfsmitteln selbständig angefertigt zu haben.

Darmstadt, den 04. Jun. 2011,

Acknowledgements

The research work at hand has been carried out at the Institute of Fluid Mechanics and Aerodynamics (SLA, Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik, Technische Universität Darmstadt) from Sep. 2008 to July 2013.

I would like to thank my advisors Prof. Dr.-Ing. C. Tropea and PD Dr. Ilia Roisman for the opportunity of my doctoral study. Their invaluable guidance on experiment techniques and theoretical analyses played an indispensable role on conducting successful research. Furthermore, their lectures “Technische Strömungslehre” and “Fluid Mechanics in Emerging Technologies” were very enlightening.

I am grateful for Dr. Marschall (SLA, TU Darmstadt) for his lecture “Höhere Strömungslehre und Dimensionsanalyse” and numerous discussions on theoretical fluid mechanics, Prof. Dr.-Ing. P. Stephan (TTD, Fachgebiet Technische Thermodynamik, TU Darmstadt) for his lectures “Technische Thermodynamik I&II”, “Wärme- und Stoffübertragung”, and “Höhere Wärmeübertragung”, Prof. Dr. Bernd Jähne (HCI, Heidelberg Collaboratory for Image Processing, Universität Heidelberg) for his lectures “Modern Image Sensors” and “Computational Imaging”. These lectures improved my knowledge in these fields.

I would like to thank Prof. Sanjeev Chandra (University of Toronto, Canada), Prof. Marco Marengo (University of Bergamo, Italy), Prof. Alidad Amirfazli (York University, Canada), Prof. Dr.-Ing. B. Weigand (ITLR, Institut für Thermodynamik der Luft- und Raumfahrt, Universität Stuttgart) Dr.-Ing. Norbert Roth (ITLR, Universität Stuttgart), and Prof. Steve Garoff (Carnegie Mellon University, the U.S.A.) for fruitful discussions.

I appreciate my senior colleagues, Dr. Nils van Hinsberg, Dr. Bruno Frackowiak, Dr. Feng Xu, Dr. Belal Zeitone, M.Sc. Andreas Lembach for their friendly and patient help at the beginning of my study. My colleagues, Dr.-Ing. Klaus Hufnagel, Dr. Gisa John (Gisa Kadavelil), Dr. Walter Schäfer, Dipl.-Ing. Lars Opfer, Dipl.-Wirt.-Ing. Ilja Buchmüller, Dipl.-Wirt.-Ing. Christina Weickgenannt, Dipl.-Ing. Chi-Yao Chang, M.Sc. Haitao Yu have been helpful with inspiring discussions on experimental techniques and theoretical analyses.

Externally, Dr.phil.nat. Wolfgang Müller (TEMF, Institut Theorie Elektromagnetischer Felder, TU Darmstadt), Dr. Fei Yang (IWAR, Fachgebiet Abwassertechnik, TU Darmstadt), Dr.-Ing. Jens Bauer (SDY, Fachgebiet Strukturdynamik, TU Darmstadt), M.Sc. Ram Dayal (TTD, TU Darmstadt), Dipl.-Ing. Victor Weber (RSM,

Fachgebiet Reaktive Strömungslehre und Messtechnik, TU Darmstadt), Dipl.-Ing. Stefan Bareiss (RSM, TU Darmstadt), Dipl.-Phys. Leila Nagel (Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg), Dipl.-Phys. Wolfgang Mischler (HCI, Universität Heidelberg), M.Eng. Jia Tian (PTW, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen, TU Darmstadt) have assisted me with equipment and valuable expertise on various topics.

A special thanks must be extended to Mrs. Ilona Kaufhold and Mr. Martin Weiß and their wonderful teams, who have been always supportive on construction and manufacture of laboratory components. Besides, Mr. Mirko Feick (PTW, TU Darmstadt), Mr. Walter Nolde (VKM, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeuantriebe, TU Darmstadt) and their teams have been helpful. Mr. Horst Nothnagel (AK Busch, TU Darmstadt) helped with the liquid nitrogen. Dr.-Ing. Rolf Boelcke, Dipl.-Ing. Fred Becker and their team in EWM (Elektronikwerkstatt Maschinenbau, TU Darmstadt), and Dipl.-Ing. Christoph Halscheidt (VKM, TU Darmstadt) have been of great help on the electronics.

I would like to give a special thanks to our secretarial team: Birgit Neuthe, Petra Fuhrmann, Heike Kagerbauer, Silke Wallner, who have helped on administration issues, and especially Stephanie Lath who has helped on numerous financial issues. I appreciate our IT team: Kathleen Feustel, Denis Schinko, Micheal Kron, and Marcus Keiner, who have maintained the computer and internet system always in a perfect state.

I appreciate the assistance from my four Bachelor students: Helge Eichhorn, Katrin Heinbücher, Erik Wagenknecht, Oliver Bartella, two ADP (Advanced Design Project) teams: Jan Breitenbach, Christoph Buchenhorst, Samim Doost, and Hannah Kittel in one team, and Chris Ascher, Sebastian Gatzka, Carina Klostermann, and Patrick Stegmann in the other team, four exchange students from the U.S.A.: Jennifer Batryn (California Polytechnic State University, RISE program), Christopher Guichet (University of California, Berkeley, IREP program), Narayanon Kidambi (University of California, Berkeley, IREP program) and Mackenzie Miller (University of Colorado at Boulder, IREP program), Hiwi Students Martin Gebbers, Torben Schfäfer, Ruochen Yang, Gong Wang for their CAD work, and Jan Breitenbach for producing the CAD photos.

I thank all my colleagues for the warmhearted office atmosphere, and all my friends both in Germany and in China for their valuable support.

I appreciate the 4-year scholarship from China Scholarship Council. The experimental work was financially supported by EU project EXTICE (FP7-AAT-2007-RTD-1) and DFG project SFB - TRR 75.

Abstract

Airframe icing caused by the Supercooled Large Droplet (SLD) has been identified as a severe hazard of aviation. The impact of SLD in the in-flight icing condition remains unknown in multiple aspects. The impact velocity is very high, and most of the drop impacts are oblique. The accompanying drop splash invalidates the current engineering tools for design of the anti-icing system. Furthermore the involvement of supercooling in drop impact demands exploration. In the framework of the EU Project EXTICE and DFG project SFB - TRR 75, this thesis contributes to understanding of the impact of SLD by two experimental investigations, respectively on the effect of supercooling on drop impacts and the drop splash after high-speed impact.

In the first experiment supercooled drops were created, and the drop impact with phase change was observed by both shadowgraph imaging and infrared imaging. The dynamic spreading diameter of the drop impact on aluminum surfaces was measured. Together with an analytical approach it was found that the phase change was negligible for drop impacts in typical icing conditions. The impact of supercooled drops on superhydrophobic surfaces revealed that the duration of the first stage of solidification in the drop impact was significantly shorter than that in a sessile liquid. Ice crystals formed in the supercooled water had a similar morphology to a snowflake. The drop receding on the hydrophobic surface was influenced by the contact temperature, which was measured by the infrared imaging. At low contact temperatures, asymmetrical receding was observed.

In the second experiment high speed impacts of single drops with diameters ranging from $130\mu\text{m}$ to $200\mu\text{m}$ on dry surfaces of rapid motion were recorded by shadowgraph imaging up to 1 Mfps. The target velocity varied from 10m/s to 63m/s. The impact surface had an inclination ranging from 0° to 75° in order to investigate the effects of oblique impact. Six outcomes of drop impact were identified: deposition, prompt splash, corona-corona splash, corona-prompt splash, single-side splash and the aerodynamic breakup. The aerodynamic breakup on a horizontal target was an interaction between the spreading lamella and the gas boundary layer. A qualitative force analysis made on the spreading lamella pointed out that in a corona splash the stabilizing factor is surface tension, and the destabilizing factors are aerodynamic force and inertial force. The lamella thickness and critical spreading velocity correlate with each other in a complementary manner, leading

to non-monotonic threshold impact velocities at different impact angles. The velocity of the splashing jets and the asymmetric spreading radii were measured from video. The mass-loss coefficient was measured for the drop impact on horizontal targets.

Kurzfassung

Die Flugzeugvereisung, die durch das Auftreffen großer unterkühlter Tropfen (Supercooled Large Droplets, SLD) verursacht wird, ist eine große Gefahr für die Flugsicherheit. Das Erscheinungsbild nach dem Aufprall unterkühlter Tropfen hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab, deren Einfluss jedoch noch nicht hinreichend bekannt ist. Die Tropfen treffen mit einer hohen Geschwindigkeit sowie unter einem Winkel relativ zur Oberfläche auf. Das begleitende Phänomen des Tropfensplash schränkt die gängigen numerischen Modelle zur Vorhersage des entstehenden Eisprofils stark ein. Zudem beeinflusst der Grad der Unterkühlung der auftreffenden Tropfen ebenfalls die Eisbildung. In dem Rahmen des EU Projektes EXTICE und des DFG Projektes SFB - TRR 75, befasst sich diese Doktorarbeit zum einen mit der experimentellen Untersuchung des Einflusses der Unterkühlung auf dem Tropfenaufprall, zum anderen wird der schräge Tropfenaufprall mit hohen Geschwindigkeiten untersucht.

In dem ersten Experiment wurde der unterkühlte Tropfen erzeugt. Der Tropfenaufprall mit Phasenwechsel wurde mittels Schattenbild- und Infrarotaufnahme beobachtet. Der dynamische Ausbereitungsdurchmesser vom Tropfenaufprall auf eine Aluminiumoberflächen wurde gemessen. Zusammen mit einer analytischen Untersuchung wurde festgestellt, dass der Phasenwechsel beim Tropfenaufprall für die typische Flugzeugvereisung vernachlässigbar war. Der Aufprall unterkühlter Tropfen auf hydrophobe Oberflächen wies darauf hin, dass die erste Stufe der Vereisung hierbei eine wesentlich kürzere Dauer als in einer ruhenden Flüssigkeit hatte. Die entstandenen Eiskristalle hatten eine ähnliche Form wie Schneeflocken. Der Tropfenrückprall von hydrophoben Oberflächen wurde durch die Kontakttemperatur beeinflusst. Die Kontakttemperatur wurde durch die Infrarotaufnahme gemessen. Bei niedrigen Kontakttemperaturen wurde ein asymmetrischer Tropfenrückprall beobachtet.

In dem zweiten Experiment wurde der Hochgeschwindigkeitsaufprall von einzelnen Tropfen auf ein trockenes und sich schnell bewegendes Ziel durch Schattenbildaufnahme mit einer Auflösung bis zu 1 Mfps aufgenommen. Die Tropfengröße betrug $130\mu\text{m}$ bis $200\mu\text{m}$, die Zielgeschwindigkeit zwischen 10m/s und 63m/s. Das Ziel war zwischen 0° und 75° geneigt, um schräge Aufpralle untersuchen zu können. Sechs Verhaltensformen des Tropfens nach dem Aufprall wurden identifiziert: Ausbreitung, Prompt Splash, Corona-corona Splash, Corona-prompt

Splash, einseitiger Splash sowie der aerodynamisch bedingte Zerfall. Der aerodynamische Zerfall, der nur beim Tropfenaufprall auf ein horizontales Ziel beobachtet wurde, war das Resultat einer Interaktion zwischen der sich ausbreitenden Lamelle und der Luftgrenzschicht über dem Ziel. Eine qualitative Kraftfeldanalyse auf der sich ausbreitenden Lamelle wies darauf hin, dass in dem Corona Splash die Oberflächenspannung der stabilisierende Faktor ist und die aerodynamische Kraft sowie die Trägheitskraft sich destabilisierend auswirken. Die Lamellendicke und die kritische Ausbreitungsgeschwindigkeit korrelieren miteinander in einer ergänzenden Weise. Dies führte bei unterschiedlichen Aufprallwinkeln zu abweichenden Grenzgeschwindigkeiten, für die Splash auftrat. Die Geschwindigkeit des Splash-Flüssigkeitsstrahls und die dynamischen Ausbreitungsradien wurden den Aufnahmen entnommen. Der Massenverlust wurde für die Aufpralle auf horizontale Ziele gemessen.

Contents

1. Introduction	1
1.1. Motivation	1
1.2. Structure of the Thesis	4
2. Background	7
2.1. Supercooled Large Droplets in Aircraft Icing	7
2.1.1. Definition of the SLD Icing Environment	7
2.1.2. Experimental Investigation on SLD Icing	11
2.1.3. State of Art Modeling of the SLD Impact	15
2.2. Drop Impact on Dry Surfaces	18
2.2.1. Splash Threshold	18
2.2.2. Oblique Drop Impact	23
2.2.3. High-speed Drop Impact	25
2.3. Solidification of Supercooled Water	27
2.3.1. States of Liquid Water in Cryogenic Conditions	28
2.3.2. The Stefan Problem	29
2.3.3. Dendrite Formation in Supercooled Liquid	37
 I. Impact of Supercooled Water Drops	 45
3. Experimental Setup	49
3.1. Supercooling Method	49
3.1.1. Temperature of the Water Drop in Free Fall	50
3.1.2. Heterogeneous Temperature Field inside the Water Drop	53
3.1.3. Construction of the Supercooling Method	56
3.2. Pneumatic Drop Generator	58
3.2.1. Construction	59
3.2.2. Operation	61
3.3. Observation Plans	68
3.4. Measurement of the Water Drop Temperature	75
3.4.1. Challenges Accompanying the Low Temperature	76

3.4.2. Calibration of the Infrared Camera	78
3.4.3. Uncertainties in Temperature Measurement	80
3.4.4. Demonstration of the Temperature Measurement	92
3.5. Operation of the Experimental Setup	94
4. Results and Discussion	99
4.1. Influence of Phase Change on Drop Spreading	99
4.1.1. The Dynamic Spreading Diameter	99
4.1.2. Influence of Phase Change at Wider Impact Conditions	101
4.2. Impact of Supercooled Drop on Superhydrophobic Surfaces	105
4.2.1. The First Stage of Solidification during Drop Impact on SHSs .	105
4.2.2. Influence of Phase Change on Drop Receding	111
4.2.3. Physics of the Rime Ice	118
4.3. Conclusion	119
II. High Speed Impact of Single Drops on Dry Surfaces	121
5. Experimental Setup	125
5.1. High-speed Impact Method	125
5.2. Vibrating Orifice Drop Generator	129
5.2.1. Construction and Typical Performance	129
5.2.2. Satellite Drop Formation and Merging	133
5.3. Electrostatic Deflection of Charged Drops	138
5.3.1. Quantity of Charge	140
5.3.2. Selective Deflection with Pulse Sequence	144
5.4. Imaging System	149
5.5. Synchronization	156
5.6. Performance of the Experimental Setup	158
6. Results and Discussion	163
6.1. Outcomes of the Oblique Drop Impact	163
6.1.1. Morphologies of the Drop Splash	163
6.1.2. Aerodynamic Breakup of the Spreading Lamella	167
6.2. Splash Threshold	169
6.3. Velocity of the Uprising Jet	175
6.4. Dynamic Spreading Radius	178
6.5. Mass-loss of Drop Impact on the 0° Target	182

6.6. Conclusion	184
7. Summary and Outlook	187
7.1. Summary	187
7.2. Outlook	188
A. Image Collection of High-speed Oblique Impacts	191
A.1. 75° target	191
A.2. 60° target	195
A.3. 45° target	199
A.4. 30° target	203
A.5. 15° target	207
A.6. 10° target	211
A.7. 5° target	216
A.8. 0° target, water, bigger drop	221
A.9. 0° target, water, smaller drop	225
A.10. 0° target, 80% methanol	229
B. Dynamic Spreading Radius	233
C. Supercooled Drop Impact on Super Hydrophobic Surfaces	237
Bibliography	261