



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

**Berichte des Fachgebiets für Strömungsmechanik
Uwe Janoske (Hrsg.)**

Beawer Barwari

**FLUIDDYNAMISCHE
INSTABILITÄTEN HAFTENDER
TROPFEN UNTER GRAVITATION,
MECHANISCHER
SCHWINGUNGSANREGUNG
UND AERODYNAMISCHER
KRAFTEINWIRKUNG**



Fluiddynamische Instabilitäten haftender Tropfen unter Gravitation, mechanischer Schwingungsanregung und aerodynamischer Krafteinwirkung

Dissertation zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
an der Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
der Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt am 28. Oktober 2020 von

Beawer Barwari

aus Dohuk, Kurdistan

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske (Bergische Universität Wuppertal)
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Ehrhard (Technische Universität Dortmund)

Tag der mündlichen Prüfung: 10. März 2021

Berichte des Fachgebiets für Strömungsmechanik

Beawer Barwari

**Fluidynamische Instabilitäten haftender Tropfen
unter Gravitation, mechanischer
Schwingungsanregung und aerodynamischer
Krafteinwirkung**

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8001-8

ISSN 2195-4100

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

In vielen technischen Bereichen, z. B. der Verfahrenstechnik oder der Luft- und Raumfahrttechnik, nimmt die dynamische Benetzung von Oberflächen durch Flüssigkeitstropfen unter Einfluss von äußeren Kräften eine wichtige Rolle ein. Viele interessante Fragestellungen zu den fluiddynamischen Instabilitäten im Zusammenhang mit Kräfteüberlagerungen sind bis zum jetzigen Stand ungeklärt. Die lückenhafte Beschreibung der Tropfenphysik bedarf daher einer ausführlichen Analyse der einzelnen Phänomene. Die vorliegende experimentelle Studie liefert den ersten Beitrag zum Verständnis des Einflusses einer Superposition von Anströmung, Hangabtriebskraft und Oberflächenvibration auf das Tropfenverhalten. Das Ziel der Arbeit ist das Aufstellen von Modellen zur Vorhersage der kritischen Geschwindigkeit für das Loslösen von Tropfen aus ihrer Ausgangslage unter Berücksichtigung einer großen Anzahl an Einflussparametern.

Zur Realisierung der Untersuchung von haftenden Tropfen auf Oberflächen unter Superposition wird ein Prüfstand aufgebaut und diverse Messtechniken genutzt. Für die Erforschung der Benetzungseigenschaften und der Rheologie des Tropfens werden verschiedene Flüssigkeitslösungen aus Wasser-Glyzerin und Wasser-Ethanol miteinander verglichen. Des Weiteren werden zwei unterschiedlich stark benetzte Materialien gegenübergestellt und eine Reihe von Tropfenvolumina dosiert. Für weitere Untersuchungen werden die Anregungsparameter Frequenz und Beschleunigung, die Plattenneigung und die Anströmgeschwindigkeit variiert.

Aufbauend auf der Analyse der einzelnen Kräfte werden vier weiterführende Superpositionen untersucht. Die Bewegung des Tropfens wird für alle Kräftekonstellationen beschrieben und verschiedenen Mustern und Phänomenen zugeordnet. Neben der Visualisierung von Interaktionsprozessen werden Tropfenphasenübergänge in Bewegungskarten zusammengefasst sowie Stabilitätsgrenzen für den Beginn der Tropfenbewegung definiert. Auf Grundlage eines Kräftegleichgewichts werden zwei Modelle zur Bestimmung der Eigenfrequenz des Tropfens vorgestellt. Für den Fall der reinen Anströmung wird, ausgehend von dimensionslosen Kennzahlen, eine empirische Gesetzmäßigkeit für die kritische Geschwindigkeit hergeleitet. Anschließend werden Parameterfunktionen mit dem Modell verknüpft, um die Einflüsse weiterer Kräfte zu beschreiben.

Die Ergebnisse zeigen eine Kompensation der Kontaktkräfte, wenn die Anströmung sowohl mit der mechanischen Schwingungsanregung als auch der Hangabtriebskraft überlagert wird. Im Bereich der ersten beiden Eigenfrequenzen des Tropfens sowie mit zunehmender Anregungsbeschleunigung und Neigung der Oberfläche ist eine Abnahme der kritischen Geschwindigkeit zu erwarten. Eine geringe Oberflächenenergie des Materials und eine kleine Kontaktwinkelhysterese erleichtern den Tropfenablösungsprozess.

Abstract

The dynamic wetting of liquid droplets on surfaces under the influence of external forces is of great importance in many technical fields, e.g. process engineering or aeronautical engineering. Many interesting questions about the fluid dynamic instabilities associated with the superposition of forces have not yet been clearly understood. Hence, the fragmentary description of droplet physics requires a detailed analysis of the individual phenomena. The present experimental investigation provides the first contribution towards gaining an understanding of the influence of superposition of airflow, downward force of gravity and surface vibration on the droplet behavior. The objective of this work is to develop models to predict the critical velocity for the droplet detachment considering a large range of influence parameters.

A test bench is set up and various measurement techniques are used to perform the investigation of adhering droplets on surfaces under superposition. For the analysis of the wetting properties and rheology of the droplet, different liquid solutions of water-glycerin and water-ethanol are compared. Moreover, two differently wetted materials are contrasted and several droplet volumes are measured. For further investigations, the excitation parameters frequency and acceleration, the surface inclination and the airflow velocity are modified.

Four continuative superpositions are examined based on the analysis of each of the forces. The motion of the droplet is described for all force constellations and classified into different patterns and phenomena. Apart from the visualization of interaction processes, droplet phase transitions are summarized in motion maps and also the threshold values for the beginning of the droplet motion are defined. Based on the force equilibrium, two models are introduced which allow for the determination of the eigenfrequency of the droplet. In the case of pure airflow, an empirical global law for the critical velocity is derived using the dimensionless numbers. Subsequently, parameter functions are connected to the model to describe the influences of further forces.

The obtained results show, that contact forces are compensated when the airflow is superimposed with both the mechanical surface vibration and the downward force of gravity. In the range of the first two eigenfrequencies of the droplet as well as with increasing the excitation acceleration or the inclination of the surface, a decline of the critical velocity can be expected. The droplet detachment process is facilitated by a low surface energy of the material and a small contact angle hysteresis.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Bergischen Universität Wuppertal unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske. Zu Beginn möchte ich ihm für seine hilfreiche Unterstützung, seine hohe Diskussionsbereitschaft und den mir gewährten Freiraum bei der Bearbeitung des Forschungsthemas danken. Die mir entgegengebrachte Aufmerksamkeit und Motivation waren wichtige Bausteine für das Gelingen dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Ehrhard danke ich für sein Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens.

Ebenso möchte ich mich recht herzlich bei sämtlichen Kollegen des Lehrstuhls für ihre freundliche Hilfsbereitschaft und die tolle Zusammenarbeit bedanken. Hervorheben möchte ich die fruchtbaren Diskussionen über die Problemstellungen, die netten und persönlichen Alltagsgespräche und die hervorragende Arbeitsatmosphäre.

Ein besonderer Dank gilt den Studenten Fatih Bozkurt, Umut Soysal, Mohammad Bilal Al-Amin, Bekir Dogan, Daniel Radau, Artur Bechtold, Thomas Heinz, Oliver Wladarz und Mustafa Abdul Ameer für ihre Unterstützung im Rahmen von Abschlussarbeiten. Ohne ihre tatkräftige Arbeit im Labor und ihre Beiträge hätte die vorliegende Dissertation das Thema nicht in so großer Tiefe behandeln können.

Zudem danke ich auch meinen Freunden und all jenen, die mich im Verlauf meines gesamten Studiums begleitet haben.

Der größte Dank gebührt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, für den Rückhalt von der ersten Klasse bis zum Erlangen der Promotion. Ihre moralische Unterstützung und Motivation sehe ich als Schlüssel zu meinem Erfolg. Vielen Dank, dass ihr immer an mich geglaubt habt.

Vielen Dank euch (Ihnen) allen!

Beawer Barwari

Ev kare bi supasî ve diyarîye bo
dayîk û babêt min

Meinen Eltern
in ewiger Dankbarkeit gewidmet

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	III
Abstract	V
Danksagung	VII
Inhaltsverzeichnis.....	XI
Abbildungsverzeichnis.....	XIII
Tabellenverzeichnis.....	XV
Nomenklatur.....	XVII
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen der Tropfeninstabilitäten	3
2.1 Benetzungsverhalten und Kontaktwinkel	3
2.2 Dimensionslose Kennzahlen.....	5
2.3 Schwingungsformen.....	7
2.4 Physikalische Beschreibung der Tropfenbewegung.....	9
2.5 Literaturüberblick und Stand der Forschung.....	13
2.5.1 Tropfen unter Gravitationseinfluss.....	14
2.5.2 Tropfen unter Schwingungsanregung	16
2.5.3 Tropfen in einer Scherströmung.....	18
2.5.4 Tropfen unter Superposition	21
2.6 Zielsetzung der experimentellen Untersuchung	22
3 Versuchsaufbau und Auswerteroutine.....	25
3.1 Methoden zur Messung der Fluid- und Materialeigenschaften	25
3.2 Experimentelle Aufbauten und Methodik.....	28
3.3 Grundzüge der Hitzdrahtanemometrie.....	31
3.4 Fast-Fourier-Transformation	33
3.5 Tropfenkonturdetektion.....	34
3.6 Visualisierung des Strömungsprofils	37
4 Fluiddynamische Instabilitäten von Tropfen	41
4.1 Tropfenoszillation unter Anströmung	41
4.1.1 Tropfeninteraktion.....	48
4.1.2 Nachlaufströmung	50
4.1.3 Eigenfrequenz des Tropfens	54
4.1.4 Analytisches Modell zur Berechnung der Eigenfrequenz des Tropfens	55
4.2 Tropfenbewegung unter Anströmung	65

4.2.1	Definition der Tropfenablösung.....	67
4.2.2	Geschwindigkeitsrampe.....	69
4.2.3	Bestimmung der kritischen Geschwindigkeit	73
4.2.4	Empirisches Modell zur Berechnung der kritischen Geschwindigkeit.....	76
4.3	Superposition von Anströmung und Hangabtriebskraft	79
4.3.1	Tropfendeformationsprozess	80
4.3.2	Tropfenablösungsprozess	83
4.4	Superposition von Hangabtriebskraft und Schwingungsanregung	84
4.4.1	Unterteilung der Bewegungsphasen	93
4.4.2	Bestimmung des Phasenübergangs.....	96
4.5	Superposition von Anströmung und Schwingungsanregung	98
4.6	Superposition von Anströmung, Hangabtriebskraft und Schwingungsanregung	101
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	107
	Literaturverzeichnis	111