



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

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

Veronika Krämer

**NUMERISCHE UNTERSUCHUNG
DES TROPFENVERHALTENS
AN HINDERNISGEOMETRIEN
UNTER EINFLUSS VON
ÄUSSEREN KRÄFTEN**





BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Numerische Untersuchung des Tropfenverhaltens an Hindernisgeometrien unter Einfluss von äußeren Kräften

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

vorgelegt am 22. März 2022 von

Veronika Krämer
aus Samara, Russland

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske (Bergische Universität Wuppertal)
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle (Technische Universität Kaiserslautern)

Tag der mündlichen Prüfung: 5. Juli 2022

Berichte des Fachgebiets für Strömungsmechanik

Veronika Krämer

**Numerische Untersuchung des
Tropfenverhaltens an Hindernisgeometrien
unter Einfluss von äußeren Kräften**

Shaker Verlag
Düren 2022

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., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8871-7

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

Mehrphasenströmungen spielen in einigen technischen Anwendungen, z. B. in den Bereichen der Sensorik und Verfahrenstechnik, eine entscheidende Rolle. Bei vielen zweiphasigen Strömungen sind umfangreiche Kenntnisse bezüglich des Verhaltens von einzelnen Tropfen unerlässlich, um eine fehlerfreie Funktion der entsprechenden Prozesse zu gewährleisten. Die Tropfendynamik wird dabei maßgeblich von den Strömungsverhältnissen, der Phasengrenzfläche und dem Benetzungsverhalten bestimmt. Die Komplexität des untersuchten Problems steigt, wenn Hindernisgeometrien, überlagerte Krafterwirkungen oder mehrere Fluideigenschaften berücksichtigt werden. Mittels numerischer Strömungssimulation lassen sich komplexe Strömungsvorgänge effizient und im Detail untersuchen.

In der vorliegenden Dissertation werden die Ergebnisse einer numerischen Untersuchung des Tropfenverhaltens bei Belastung durch äußere Kräfte sowie durch die Interaktion mit einem Hindernis präsentiert. Insgesamt wurden eine Variation an Tropfeneigenschaften, zwei verschiedene Oberflächen, Krafterwirkungen durch Gravitation, Gasströmung und Vibration sowie mehrere Hindernishöhen berücksichtigt. Im ersten Schritt wurde eine bereits bekannte numerische Implementierung der Kontaktwinkelbeschreibung in Hinsicht auf ihre universelle Anwendbarkeit weiterentwickelt. Anschließend wurde die optimierte Simulationsmethodik anhand existierender Messdaten validiert, wobei neue Erkenntnisse bezüglich der Tropfendynamik gewonnen werden konnten. Insgesamt wurden bei der numerischen Studie haftende, gleitende und deformierte Tropfen betrachtet. Für einen haftenden Tropfen in einer Scherströmung wurde ein Zusammenhang zwischen der Innenströmung und dem Rezirkulationsgebiet im Nachlauf des Tropfens nachgewiesen. Des Weiteren wurde die Tropfenbewegung betrachtet, welche entweder durch eine Gasströmung, eine Oberflächenneigung, eine Schwingungsanregung oder eine Überlagerung der Gasströmung mit der Schwingung verursacht wird. Analog zu den Referenzmessungen wies der Beginn der Gleitbewegung eine Abhängigkeit von den Tropfen- und Oberflächeneigenschaften sowie von den Frequenzen der harmonischen Schwingungsanregung auf. Eine rein numerische Untersuchung des Tropfenverhaltens bei Überlagerung einer Gasströmung und einer nicht harmonischen Schwingung zeigte dagegen eine Unabhängigkeit der Gleitbewegung von den Schwingungsparametern auf. Darüber hinaus wurden die Tropfendeformation und der Tropfenzerfall an einem wandgebundenen Hindernis mit einem rechteckigen Querschnitt untersucht. In diesem Zusammenhang wurde eine empirische dimensionslose Darstellung hergeleitet, welche eine Kategorisierung der auftretenden Phänomene sowie eine Vorhersage über das Tropfenverhalten in Abhängigkeit von Prozessparametern erlaubt.

Abstract

Multiphase flows play an important role in many technical applications, for example in the areas of sensor technology and process engineering. Indeed, for certain two-phase flows an extensive knowledge of the dynamic behavior of liquid droplets in gas flows is essential in order to ensure the correct functionality of the fundamental processes and of the corresponding system. In general, flow conditions, interface properties as well as the wetting behavior determine the dynamics of a droplet. The complexity of the examined problem increases, if obstacle geometries, superpositions of external forces or various fluid properties are considered. Such complex flow processes can be efficiently examined in detail by means of the numerical flow simulation.

In the present work, the results of a numerical investigation concerning droplet behavior due to external forces and the interaction with a wall-mounted obstacle are presented. Thereby, a wide range of droplet properties, two different surfaces, external effects such as the gravitation, the gas flow and vibrational excitations as well as various obstacle heights are considered. In the first step, an already existent numerical implementation of the contact angle hysteresis was further developed with regard to its universal applicability. The optimized numerical method was then validated on the basis of available experimental results and allowed to gain new insights into the dynamic behavior of droplets. Adhering, sliding as well as deformed droplets were considered in the course of the investigation. For an adhering droplet, the flow phenomena induced by the shear flow were analyzed both inside and around the droplet. The correlation between the inner flow and the wake flow was studied. Besides, droplet movement caused by either the gas flow, the surface inclination, the surface vibration or the superposition of a gas flow and a surface vibration was evaluated. Analogous to measurements, the onset of droplet movement is in particular dependent on the droplet properties, the substrate characteristics and the frequencies of a harmonic vibrational excitation. According to a purely numerical investigation, however, the start of the droplet movement was found to be independent on the individual vibration parameters in case of the superposition of a gas flow and a non-harmonic oscillation. Furthermore, the droplet deformation and breakup behavior due to the interaction with a wall-bounded obstacle with a rectangular cross-section was investigated. In this context, an empirical dimensionless representation was derived, which allows a categorization of the occurring phenomena and the prediction of the droplet dynamics on wall-bounded obstacles as a function of the process parameters.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorandin bei der Robert Bosch GmbH und als Promotionsstudentin am Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Bergischen Universität Wuppertal unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske.

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all denjenigen bedanken, die auf eine bestimmte Art und Weise zum Entstehen dieser Dissertation beigetragen haben.

Zuallererst möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske für die Betreuung meiner Promotion bedanken. Ich bin ihm sehr dankbar für das entgegengebrachte Vertrauen, die lehrreichen Gespräche sowie die stetige Unterstützung beim Verwirklichen meiner Ideen und beim Erstellen von wissenschaftlichen Manuskripten.

Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle danke ich herzlich für das Interesse an meinem Thema und die freundliche Übernahme des Zweitgutachtens.

Weiterhin gilt mein Dank der ECF-Abteilung des Bosch-Geschäftsbereichs Powertrain Solutions am Standort Feuerbach und dem Abteilungsleiter Hans-Peter Didra für die Möglichkeit meine Dissertation bei der Robert Bosch GmbH zu schreiben.

Ein großer Dank gilt insbesondere meinen Betreuern bei Bosch: Dr. Christoph Gmelin, Dr. Christopher Holzkmnecht und Simon Rentschler. Die vielen ausgiebigen Diskussionen und die dabei entstandenen Ideen haben maßgeblich zum Fortschritt und dem Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Ich schätze es sehr, dass sie mir jederzeit mit viel Rat und Tat zur Seite standen.

Allen Kolleginnen und Kollegen der Simulationsgruppe danke ich für ihre Unterstützung, die schöne Arbeitsatmosphäre und die unterhaltsame Zeit abseits der Arbeitszeit. Den Bosch-Kollegen Ievgen Palaziuk, Karel Vacha, Dr. Konrad Meister, Dr. Martin Eckardt, Dr. Alexander Eifert und Dr. Anja Lippert danke ich außerdem für die eine oder andere fachliche Auskunft.

Des Weiteren möchte ich mich bei den aktuellen sowie ehemaligen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Strömungsmechanik der Bergischen Universität Wuppertal bedanken, auch wenn wegen der Pandemie der Kontakt leider hauptsächlich digital stattfand. Bei Dr. Sebastian Burgmann, Martin Rohde und Dr. Beawer Barwari bedanke ich mich für die zielführende Zusammenarbeit und die fruchtbaren Diskussionen. Dr. Kamil Braschke, Dr. Thomas Maurer, Dr. Varchasvi Nandana, Ashish Vinayak und Nils Janssen danke ich für den fachlichen Austausch.

Ich bedanke mich ebenfalls bei meinen studentischen Hilfskräften Manish Kanakaraj, Rahman Celik und Pawan Srinivasa Murthy für ihre Mitwirkung an meinen Arbeitsthemen.

Als Nächstes möchte ich mich bei den Menschen bedanken, die mich direkt oder indirekt zu und bei meinem Promotionsvorhaben ermutigt und mit Rat unterstützt haben.

Bei meiner Mentorin Veronika Kollas bedanke ich mich dafür, dass sie mir zu der Industriepromotion bei der Robert Bosch GmbH verholfen hat. Prof. Dr.-Ing. Martin Gabi und meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des Fachgebiets Strömungsmaschinen des Karlsruher Instituts für Technologie danke ich für das Wecken meiner Neugier an strömungsmechanischen Fragestellungen, für den Spaß am wissenschaftlichen Arbeiten sowie für das Teilen der Erfahrungen und Tipps bezüglich der Promotionszeit. Das Interesse an der numerischen Strömungssimulation habe ich insbesondere meinem ehemaligen Betreuer Dr.-Ing. Balazs Pritz zu verdanken, der immer für eine vorantreibende Diskussion zu einem numerischen Problem zu haben ist. Meiner Mentorin Dr. Stefanie von Andrian danke ich für die wertvollen Ratschläge im Hinblick auf ein gutes Gelingen meiner Arbeit. Dr. Camelia Schulz danke ich für die vielen Tipps als Forschungskollegin sowie als Freundin und für die gemeinsamen produktiven Schreibtage.

Ich bin außerdem sehr dankbar, dass ich im Rahmen des Bosch-Doktorandenprogramms viele tolle Menschen kennenlernen und mit ihnen gemeinsam die Promotionszeit sowohl bei der Arbeit als auch außerhalb der Arbeit genießen durfte. Ein gesonderter Dank gilt an dieser Stelle den Stammmitgliedern der traditioneller „Sorgenrunde“ beim Mittagessen oder beim Kaffee in Feuerbach: Andre Theile, Rene Groezinger, Dennis Hierath, Lea Haus, Christopher Allgaier und Kristina Braak.

Nicht zuletzt möchte ich meinen Freunden und meiner ganzen Familie danken, die mich durchgängig ermutigt und unterstützt haben. Danke euch für die stets motivierenden Worte, das Vertrauen in mich und insbesondere die Geduld mit mir in diesen letzten Jahren! Einigen danke ich ebenfalls für das Korrekturlesen der Manuskripte: Natalia Schastov, Andische Schabani, Camelia Schulz und Philipp Schmetz.

Schließlich gilt mein größter Dank meinen Eltern Svetlana und Oleg sowie meinem Freund Benedikt für den Rückhalt und ihre grenzenlose Unterstützung bei allen meinen Vorhaben und zu jedem Zeitpunkt!

***"Der Tropfen höhlt den Stein nicht durch Kraft,
sondern durch stetes Fallen."***

Publius Ovidius Naso (43 v. Chr. - 17 n. Chr.)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	XI
Quellcodeverzeichnis	XIII
Nomenklatur	XV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Wissenschaftlicher Hintergrund	2
1.2.1 Benetzungsverhalten	2
1.2.2 Dimensionslose Kennzahlen	6
1.2.3 Numerische Tropfensimulation	8
1.2.4 Forschungsstand zum Tropfen auf ebenen Flächen	12
1.2.5 Forschungsstand zur Tropfendehformation und zum Tropfenzerfall	16
1.3 Ziele und Aufbau der Arbeit	21
2 Numerische Methoden	25
2.1 Modellgleichungen	25
2.1.1 Erhaltungsgleichungen	25
2.1.2 Modellierung der Oberflächenspannung	27
2.1.3 Modellierung der Schwingungsanregung	29
2.1.4 Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen	31
2.2 Implementierung der Kontaktwinkelhysterese	32
2.2.1 <i>Feedback Deceleration Technique</i> -Methode	32
2.2.2 Herleitung der Kontaktwinkel-Inkrement-Formulierung	35
2.3 Simulationsmodell	38
2.3.1 Simulationsgebiet	39
2.3.2 Randbedingungen	43
2.3.3 Diskretisierungsmethoden	48
2.4 Simulationsparameter	51
2.4.1 Lösungsverfahren	51
2.4.2 Eingangsparameter	51
2.4.3 Auswerteparameter	53

3	Numerische Ergebnisse zum Tropfen auf ebenen Flächen	57
3.1	Numerische Voruntersuchungen	58
3.1.1	Definition der Kontaktlinie	58
3.1.2	Gitterunabhängigkeitsstudie	59
3.1.3	Einfluss der Geschwindigkeitsrampe	60
3.1.4	Parallelisierung	62
3.1.5	Validierung der Kontaktwinkel-Inkrement-Formulierung	63
3.1.6	Unabhängigkeit von der Gitterart	64
3.2	Haftender Tropfen	66
3.2.1	Tropfen unter dem Einfluss der Gravitation	67
3.2.2	Tropfen bei unterkritischer Anströmung	72
3.3	Tropfenbewegung aufgrund von Anströmung	77
3.3.1	Tropfenform	78
3.3.2	Kritische Anströmgeschwindigkeit	79
3.4	Tropfenbewegung aufgrund von Hangabtriebskraft	83
3.4.1	Tropfenform	84
3.4.2	Kritischer Neigungswinkel	85
3.5	Tropfenverhalten bei Überlagerung von Anströmung und harmonischer Vibrationsanregung	86
3.5.1	Gitterunabhängigkeitsstudie	87
3.5.2	Tropfendehformation bei reiner Vibrationsanregung	89
3.5.3	Einfluss der Geschwindigkeitsrampe	94
3.5.4	Kritische Geschwindigkeit	96
3.6	Tropfenverhalten bei Überlagerung von Anströmung und nicht harmonischer Vibrationsanregung	98
4	Numerische Ergebnisse zum Tropfen am Hindernis	105
4.1	Theoretische Voruntersuchungen	108
4.1.1	Klassifizierung der Phänomene	108
4.1.2	Identifikation der Einflussgrößen	110
4.1.3	Dimensionsanalyse	117
4.1.4	Dimensionsloses Diagramm	119
4.2	Tropfen am Hindernis unter Anströmung	123
4.2.1	Einfluss der Kantengeometrie	123
4.2.2	Einfluss der Gitterauflösung	125
4.2.3	Dimensionslose Darstellung	127
4.2.4	Vergleich der Phänomene	127
4.2.5	Einfluss der Kontaktwinkelhysterese	130

4.3	Tropfen am Hindernis bei Überlagerung von Anströmung und harmonischer Schwingungsanregung	133
4.3.1	Vertikale harmonische Schwingungsanregung	134
4.3.2	Horizontale harmonische Schwingungsanregung	138
4.4	Tropfen am Hindernis unter Anströmung auf einer geneigten Fläche . . .	141
5	Zusammenfassung und Ausblick	145
Anhang		149
A1	Optimierter Kontaktwinkel-Algorithmus	149
A2	Eigenschaften der untersuchten nicht harmonischen Vibrationsanregungen	150
A3	Vollständiges dimensionsloses Diagramm	152
Literaturverzeichnis		153

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematische Darstellung des theoretischen Kontaktwinkels und des Kontaktwinkels für realitätsnahe Oberflächen	4
1.2	Schematische Darstellungen der Kontaktwinkelhysterese	6
1.3	Überblick über den Aufbau der vorliegenden Dissertation	22
2.1	Numerische Realisierung der Vibrationsanregung	29
2.2	Auslenkungsverlauf einer nicht harmonischen Vibrationsanregung	31
2.3	Funktionsweise der <i>Feedback Deceleration Technique</i> -Methode	33
2.4	Numerische Kontaktlinienzelle inkl. der wichtigen Größen zur Berechnung der Kontaktliniengeschwindigkeit und des Kontaktwinkels	34
2.5	Schematische Darstellung einer fortschreitenden Kontaktlinienzelle sowie der Änderung der Obefächenspannungskraft infolge einer Kontaktwinkelanpassung	37
2.6	Simulationsgebiet	39
2.7	Geschwindigkeitsprofile im Strömungskanal ohne Hindernis	45
2.8	Visualisierung der Positionen zur Auswertung der Geschwindigkeitsprofile im Nachlauf des Hindernisses	45
2.9	Geschwindigkeitsprofile im Strömungskanal mit Hindernis	46
2.10	Schematische Darstellung der verwendeten Kontaktwinkel-Randbedingung	48
2.11	Flussdiagramm für die optimierte Kontaktwinkel-Randbedingung	49
2.12	Auswertemethoden zur Bestimmung der kritischen Geschwindigkeit bzw. des kritischen Neigungswinkels	54
3.1	Optimales Massenfraktionsintervall zur Beschreibung der Kontaktlinie	58
3.2	Gitterunabhängigkeitsstudie für einen Tropfen unter Anströmung auf einer ebenen Oberfläche	60
3.3	Optimale Geschwindigkeitsrampe am Einlass der Simulationsgeometrie zur Untersuchung der kritischen Geschwindigkeit eines Tropfens auf einer ebenen Oberfläche	61
3.4	Optimale Prozessoranzahl	62
3.5	Validierung der neuen Kontaktwinkel-Inkrement-Formulierung anhand unterschiedlicher Tropfengrößen, Materialsysteme, Zellstrukturen und Belastungen	65
3.6	Simulationskonstellationen zur Untersuchung eines statischen Tropfen auf einer ebenen Oberfläche	66

3.7	Parasitäre Strömungen rund um einen liegenden Tropfen	67
3.8	Einfluss parasitärer Strömungen auf die Tropfengeschwindigkeit und die Kontaktlinie	68
3.9	Tropfenform eines auf einer vertikalen PMMA-Oberfläche hängenden Wassertropfens in Abhängigkeit der Tropfeninitialisierung und der räumlichen Auflösung	70
3.10	Zeitliche Verläufe der Kontaktwinkel und der Geschwindigkeit des Tropfenschwerpunktes eines auf einer vertikalen PMMA-Oberfläche hängenden Wassertropfens für zwei unterschiedliche Gitterauflösungen	71
3.11	Strömungsumkehr im Inneren eines Tropfens sowie die entsprechende Nachlaufströmung für steigende Anströmung unterhalb der kritischen Gasgeschwindigkeit	73
3.12	Instantanes Strömungsfeld um einen angeströmten Tropfen einschließlich der erkennbaren Phänomene	74
3.13	Zeitlich gemittelte experimentelle und numerische Strömungsfelder im Mittelschnitt eines Wassertropfens bei drei verschiedenen Kanal-Reynoldszahlen	75
3.14	Einfluss der Gitterverfeinerung auf die Größe der Grenzfläche	76
3.15	Abhängigkeiten des Umkehrwinkels der Innenströmung, der Ablöselänge im Nachlaufgebiet des Tropfens sowie der Druckdifferenz am Tropfen von der Reynolds-Zahl der Kanalströmung	77
3.16	Simulationsproblem zur Untersuchung der Tropfenbewegung aufgrund von Anströmung	77
3.17	Vergleich der Tropfenformen aus Experiment und Simulation jeweils im statischen und dynamischen Zustand bei verschiedenen Stoffsystemen	78
3.18	Kritische Geschwindigkeiten aus Experiment und Simulation in Abhängigkeit des Tropfenvolumens für drei verschiedene Flüssigkeiten auf einer PMMA-Oberfläche	80
3.19	Kritische Geschwindigkeiten aus Experiment und Simulation in Abhängigkeit des Glycerinanteils für drei verschiedene Tropfengrößen auf einer PMMA-Oberfläche	80
3.20	Tropfengeschwindigkeitsverlauf einschließlich der Bewegungsphasen für einen Wassertropfen und für einen Wasser-Glycerin-Tropfen mit 50 % Glycerin	81
3.21	Kritische Geschwindigkeiten aus Experiment und Simulation in Abhängigkeit des Ethanolanteils für einen Tropfen auf einer cSW-Oberfläche	81
3.22	Vergleich der Tropfenbewegung aus Experiment und Simulation mittels einer dimensionslosen Darstellung	82

3.23	Simulationsproblem zur Untersuchung der Tropfenbewegung aufgrund von Hangabtriebskraft auf einer sich neigenden Oberfläche	83
3.24	Vergleich der Tropfenform aus Experiment und Simulation bei verschiedenen Neigungswinkeln einer sich neigenden ebenen Oberfläche	84
3.25	Vergleich der Simulationsergebnisse für Wassertropfen verschiedener Größen auf einer sich neigenden PMMA-Oberfläche mit theoretischen sowie experimentellen Ergebnissen	86
3.26	Simulationskonstellationen zur Untersuchung der Tropfenbewegung auf einer ebenen Oberfläche bei Überlagerung von Anströmung und einer Schwingungsanregung	87
3.27	Gitterunabhängigkeitsstudie zur Untersuchung der Tropfenbewegung aufgrund der Superposition von Anströmung und Schwingungsanregung	88
3.28	Simulationskonstellationen zur Untersuchung der Tropfendehformation auf einer ebenen Oberfläche aufgrund von harmonischer Schwingungsanregung in eine vertikale oder eine horizontale Richtung	89
3.29	Deformation eines Wassertropfens aus Experiment und Simulation bei vertikaler Schwingungsanregung mit der ersten Eigenfrequenz des Tropfens und mit vier verschiedenen Schwingungsbeschleunigungen	91
3.30	Deformation eines Wassertropfens aus Experiment und Simulation bei vertikaler Schwingungsanregung mit der zweiten Eigenfrequenz des Tropfens und mit vier verschiedenen Schwingungsbeschleunigungen	92
3.31	Deformation eines Wassertropfens aus Experiment und Simulation bei horizontaler Schwingungsanregung mit einer Schwingungsbeschleunigung von $25 m/s^2$ und mit vier verschiedenen Schwingungsfrequenzen	93
3.32	Einfluss der Tropfenviskosität bei horizontaler Vibrationsanregung	94
3.33	Einfluss der Geschwindigkeitsrampe am Einlass der Simulationsgeometrie auf die numerische Lösung bei Überlagerung von Anströmung und Schwingungsanregung	95
3.34	Kritische Geschwindigkeiten aus Experiment und Simulation bei Überlagerung von Anströmung und harmonischer Schwingungsanregung	97
3.35	Vergleich der Vibrationsbeschleunigung bei einer harmonischen und einer nicht harmonischen Schwingungsanregung	100
3.36	Kritische Geschwindigkeiten aus Simulation bei Überlagerung von Anströmung und nicht harmonischer Schwingungsanregung in Abhängigkeit der maximalen Schwingungsauslenkung	101
3.37	Kritische Geschwindigkeiten aus der Simulation bei Überlagerung von Anströmung und nicht harmonischer Schwingungsanregung in Abhängigkeit der maximalen Schwingungsbeschleunigung	102

3.38	Deformation eines Wassertropfens aus der Simulation für ausgewählte nicht harmonische Schwingungsanregungen bei fehlender Gasströmung	102
4.1	Untersuchungsfall zum Tropfen am Hindernis einschließlich der strömungsrelevanten Parameter	105
4.2	Simulationsfälle zur Untersuchung des Tropfenverhaltens an einem Hindernis	107
4.3	Visualisierung der Deformations- bzw. Zerfallsprozesse beim Auftreffen des Tropfens auf ein Hindernis mit einem rechteckigen Querschnitt	109
4.4	Tropfen am Hindernis bei verschiedenen Strömungssituationen einschließlich der jeweils auf die Tropfenoberfläche wirkenden Kräfte	112
4.5	Dimensionsloses Diagramm: Experimentelle Ergebnisse	122
4.6	Tropfenverhalten am Hindernis in Abhängigkeit vom Kantenradius	124
4.7	Tropfenverhalten am Hindernis in Abhängigkeit von der Gitterauflösung	126
4.8	Dimensionsloses Diagramm: Vergleich zwischen Experiment und Simulation	128
4.9	Visueller Vergleich zwischen den experimentellen und numerischen Phänomenen für einen Wassertropfen am Hindernis bei ausgewählten Konstellationen	129
4.10	Dimensionsloses Diagramm: Einfluss der Kontaktwinkelhysterese	131
4.11	Einfluss der Kontaktwinkelhysterese auf ausgewählte Tropfenphänomene am Hindernis	133
4.12	Einfluss der vertikalen Schwingungsfrequenz auf das Tropfenphänomen am Hindernis	135
4.13	Einfluss der vertikalen Schwingungsamplitude auf das Tropfenphänomen am Hindernis	136
4.14	Visualisierung des Einflusses der Schwingungsamplitude auf die Tropfenverformung am Hindernis bzw. auf das Phänomen	137
4.15	Einfluss der horizontalen Schwingungsfrequenz parallel zur Strömungsrichtung auf das Tropfenphänomen am Hindernis	139
4.16	Einfluss der horizontalen Schwingungsamplitude parallel zur Strömungsrichtung auf das Tropfenphänomen am Hindernis	140
4.17	Wirkung der Gewichtskraft auf einen Tropfen am Hindernis bei einer geneigten Oberfläche	142
4.18	Dimensionsloses Diagramm: Überlagerung von Gasströmung und Oberflächenneigung	143

A2.1	Eigenschaften der nicht harmonischen Schwingungsanregung bei einer gleich bleibenden maximalen Beschleunigung	150
A2.2	Eigenschaften der nicht harmonischen Schwingungsanregung für drei verschiedene Maximalwerte der Vibrationsbeschleunigung	151
A3.1	Dimensionsloses Diagramm: Vollständiger Datensatz des Untersuchungsergebnisses zum Tropfen am Hindernis unter Anströmung auf einer geneigten Oberfläche	152

Tabellenverzeichnis

1.1	Literaturübersicht der numerischen Methoden zur Untersuchung des Tropfenverhaltens bzw. der Tropfenbewegung	11
1.2	Literaturübersicht zur Untersuchung der Tropfenbewegung auf ebenen Oberflächen aufgrund von äußeren Kräften	15
1.3	Literaturübersicht zur Untersuchung der Tropfendeformation und des Tropfenzerfalls	20
2.1	Übersicht der angewandten numerischen Schemata	51
2.2	Im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchte Stoff- und Materialsysteme	52
2.3	Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit bei einer harmonischen Schwingungsanregung untersuchten Tropfengrößen mit den entsprechenden Eigenfrequenzen	53
4.1	Parametervariation bei der Untersuchung des Tropfenverhaltens an einem Hindernis	106
4.2	Mittels der Kräftebetrachtungen identifizierte und für das Tropfenverhalten an einem Hindernis relevante Parametervariablen	117
4.3	Das Strömungsproblem am Hindernis beschreibende dimensionslose Kennzahlen	118

Quellcodeverzeichnis

A1.1 Implementierung des <i>Feedback Deceleration Technique</i> -Algorithmus . . .	149
--	-----

Nomenklatur

Lateinische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	Einheit
<i>A</i>	Fläche/ Querschnittsfläche	m ²
<i>A</i>	Amplitude	m
<i>a</i>	Beschleunigung	m/s ²
<i>B</i>	Breite des Strömungskanals	m
<i>b</i>	Hindernisbreite	m
<i>C</i>	Konstante	1
<i>c</i>	Konstante	1
<i>c_w</i>	Widerstandskoeffizient	1
<i>d</i>	Durchmesser	m
<i>d_b</i>	Tropfenbreite	m
<i>d_h</i>	Tropfenhöhe	m
<i>d_{hydr}</i>	hydraulischer Durchmesser	m
<i>d_l</i>	Tropfenlänge	m
<i>F</i>	Kraft	N
<i>f</i>	Faktor	1
<i>g</i>	Erdbeschleunigung	m/s ²
<i>H</i>	Höhe des Strömungskanals	m
<i>h</i>	Hindernishöhe	m
<i>I</i>	Turbulenzintensität	%
<i>K</i>	Koeffizient	1
<i>L</i>	Länge des Strömungskanals	m
<i>L</i>	charakteristische Länge	m
<i>l₀</i>	integrale Längenskala	m
<i>N</i>	Anzahl	1
<i>n</i>	Index	1
<i>p</i>	Druck	Pa
<i>R</i>	Radius	m
<i>t</i>	Zeitschritt	s
<i>U</i>	Geschwindigkeit	m/s
<i>V</i>	Volumen	m ³

\dot{V}	Volumenstrom	m^3/s
v	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
x	Auslenkung	m
Z	Zufallsvariable	1

Griechische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	Einheit
α	Volumenfraktion	1
β	Neigungswinkel	$^\circ$
Γ	Allgemeiner Diffusionskoeffizient	
κ	Krümmung	$1/\text{m}$
μ	dynamische Viskosität	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
ν	kinematische Viskosität	m^2/s
ρ	Dichte	kg/m^3
θ	Kontaktwinkel	$^\circ$
σ	Grenzflächenspannung, Oberflächenspannung	N/m
τ	Schub-/Scherspannung	N/m^2
ϕ	Allgemeine Erhaltungsgröße	
ω	Kreisfrequenz	$1/\text{s}$

Operatoren

Symbol	Bedeutung
$ $	Betrag
Δ	Differenz
δ	Inkrement
\int	Integraloperator
∇	Nabla-Vektor
\cdot	Skalarprodukt

Indizes

tiefgestellt

Symbol	Bedeutung
0	Referenzkonfiguration, Anfangszustand
<i>A</i>	Anströmung
<i>abs</i>	absolut
<i>D</i>	Druck
<i>Ein</i>	Einlass
<i>End</i>	Endzustand
<i>Exp</i>	Experiment
<i>F</i>	fortschreitend
<i>f</i>	Flüssigkeit/flüssig
<i>G</i>	Gravitation
<i>g</i>	Gas/gasförmig
<i>H</i>	Hindernis
<i>h</i>	harmonisch
<i>K</i>	Kontakt
<i>K</i>	Kante
<i>KL</i>	Kontaktlinie
<i>KW</i>	Kontaktwinkel
<i>krit</i>	kritisch
<i>L</i>	Luft
<i>max</i>	maximal
<i>min</i>	minimal
<i>mittl</i>	mittel
<i>N</i>	Neigung
<i>n</i>	normal zur Fläche
<i>nh</i>	nicht harmonisch
<i>R</i>	rückschreitend
<i>Rampe</i>	Geschwindigkeitsrampe
<i>rel</i>	relativ
<i>S</i>	statisch
<i>S</i>	Schub, Scherung
<i>s</i>	Substrat
<i>Sim</i>	Simulation

t	turbulent
$tang$	tangential
Tr	Tropfen
Vib	Vibration
Z	Zelle
ZF	Zellfläche

hochgestellt

Symbol	Bedeutung
n	im aktuellen Zeitschritt
$n + 1$	im nachfolgenden Zeitschritt

Kennzahlen

Symbol	Bedeutung
Bo	Bond-Zahl
Ca	Kapillar-Zahl
Co	Courant-Zahl
Co_α	Phasengrenzfläche-Courant-Zahl
La	Laplace-Zahl
Re	Reynolds-Zahl der Kanalströmung
Re_{Tr}	Reynolds-Zahl basierend auf der Tropfenlänge
Re_H	Reynolds-Zahl basierend auf der Hindernishöhe
We	Weber-Zahl
Oh	Ohnesorge-Zahl
Z_{Def}	Deformationszahl
Z_{Int}	Interaktionszahl
Γ_ρ	Dichteverhältnis
Γ_μ	Viskositätsverhältnis

Abkürzungen

CFD	Computational Fluid Dynamics
CSF	<i>Continuum Surface Force</i>
cSW	<i>coated silicon wafer</i> (Siliziumwafer mit Beschichtung)
EF	Eigenfrequenz
FDT	<i>Feedback Deceleration Technique</i>
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFT	<i>fast Fourier transform</i>
FVM	Finite-Volumen-Methode
KL	Kontaktlinie
KW	Kontaktwinkel
KWH	Kontaktwinkelhysterese
LS	<i>Level Set</i>
PBT	Polybutylenterephthalat
PIV	<i>Particle Image Velocimetry</i>
PMMA	Polymethylmethacrylat (Plexiglas/Acrylglass)
RB	Randbedingung
SPH	<i>Smoothed Particle Hydrodynamics</i>
VoF	<i>Volume of Fluid</i>