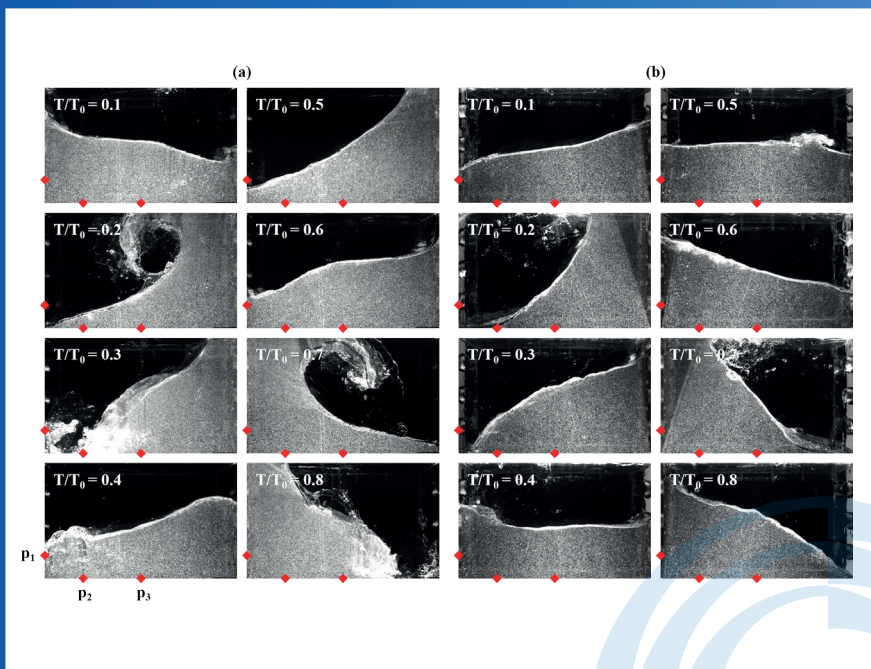


Zweiphasenströmung in Kühlmittel tanks von Sportwagen

Dr.-Ing. Ronja Hoch



Zweiphasenströmung in Kühlmittel tanks von Sportwagen

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

der Universität Rostock

vorgelegt von

Ronja Hoch, geb. am 14.08.1989 in Crivitz

aus Rostock

Rostock, 26.08.2021

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Strömungsmaschinen

Ronja Hoch

**Zweiphasenströmung in Kühlmitteltanks
von Sportwagen**

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.: Rostock, 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 978-3-8440-8820-5

ISSN 2749-957X

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

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl Strömungsmaschinen der Universität Rostock. Hier möchte ich allen Menschen meinen Dank aussprechen, die mich in dieser Zeit unterstützt haben.

Besonders möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank-Hendrik Wurm für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Unterstützung bei der Durchführung der gesamten Arbeit danken. Für die Übernahme des Zweitgutachtens danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle.

Besonderen Dank auch an die Kollegen und die Mitarbeiter der Standortwerkstatt für die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre, viele wertvolle Anregungen und stete Hilfsbereitschaft, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Bei meiner Familie möchte ich mich ganz besonders herzlich für die Möglichkeit zum Studium, eure bedingungslose Unterstützung und euer Vertrauen bedanken. Meinen lieben Freunden und meinem Partner möchte ich für eure Geduld und euren fortwährenden Rückhalt, auch in schwierigen Phasen, danken.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	ix
Formelverzeichnis	x
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung	5
2.1 Sloshing-Grundlagen	5
2.1.1 Einflussfaktoren	6
2.1.2 Ähnlichkeitskennzahlen	8
2.1.3 Typische Strömungsphänomene	9
2.2 Experimentelle Untersuchung	12
2.2.1 Bestimmung der Grenzflächenlage	12
2.2.2 Druckmessung	13
2.2.3 Geschwindigkeitsmessung	15
2.3 Strömungssimulation	17
2.3.1 Simulationsmethoden	17
2.3.2 Validierung	20
2.4 Kfz-spezifische Untersuchungen	20
2.5 Lufteintrag bei freier Grenzfläche	23
2.6 Offene Fragen	26
3 Mathematische Behandlung von Zweiphasenströmungen	29
3.1 Strömungsmechanische Grundlagen	29
3.2 Turbulenzmodellierung	30
3.3 Modellierung von Zweiphasenströmungen	32
4 Methoden	35
4.1 Experimenteller Aufbau	35
4.1.1 Untersuchte Geometrien	35
4.1.2 Prüfstände	37
4.1.3 Messtechnik	43
4.2 Numerische Untersuchungen	45
4.2.1 Rechnernetz	45

Inhaltsverzeichnis

4.2.2	Numerisches Setup	48
5	Ergebnisse der Sloshing-Untersuchungen	53
5.1	Einfluss der Behälter-Innengeometrie	53
5.2	Validierung der Strömungssimulation	58
5.2.1	Phasenverteilung	58
5.2.2	Druckverlauf	61
5.2.3	Geschwindigkeitsfelder	63
5.3	Einfluss der Anregung	66
5.3.1	Behälter ohne Trennwände	68
5.3.2	Behälter mit vertikalen Trennwänden	71
5.3.3	Realgeometrie	71
6	Ergebnisse der Untersuchungen des durchströmten Behälters	75
6.1	Einfluss der Füllhöhe	77
6.2	Einfluss des Neigungswinkels	81
6.3	Einfluss der Behälter-Innengeometrie	83
6.4	Einfluss der Anregung	85
7	Zusammenfassung	87
	Literaturverzeichnis	i
A	Einfluss der Anregung (Profil 1)	xi
B	Einfluss der Anregung (Profil 2)	xvii
	Selbständigkeitserklärung	xxiii

Abbildungsverzeichnis

1.1	Entwicklung des Kraftfahrzeugbestandes in Deutschland 2009 bis 2020. [Kraftfahrt-Bundesamt, 2020b]	2
2.1	Strömungsformen für Gas-Flüssigkeitsströmungen in horizontalen (a) und vertikalen (b) Rohren [Kraume, 2012]	6
2.2	(a) Kugelförmiger LNG-Tank der Firma Moss Maritime (b) Prismatischer Membrantank der Firma GTT. Bilder entnommen aus Mokhatab et al. [2014]	7
2.3	Sechs Freiheitsgrade eines Schiffes. [Brinkmann, 2005]	8
2.4	Wellenbildung in Abhängigkeit der Anregungsfrequenz. [Ercolanelli et al., 2018]	10
2.5	Beispiele für typische Grenzflächenbewegungen für (a) flache, (b) mittlere, (c) kritische und (d) tiefe Füllhöhen im horizontal angeregten rechtwinkligen Tank mit Anregungsfrequenz nahe der Eigenfrequenz. [Faltinsen und Timokha, 2009]	11
2.6	Prüfstände mit (a) einem rotatorischen Freiheitsgrad [Bulian et al., 2014] und (b) 6 Freiheitsgraden [Molin und Remy, 2012]	12
2.7	Druckverläufe verschiedener Sensortypen. Abbildung entnommen aus [Kim et al., 2015]	15
2.8	Prüfstände zur Bestimmung der Geschwindigkeit auf der Grenzfläche (a) und zur Bestimmung der vertikalen Geschwindigkeit (b) [Eswaran und Saha, 2011]	16
2.9	Prüfstand zur Bestimmung der Geschwindigkeit auf einer vertikalen Schnittebene in der Tankmitte [Simonini et al., 2019]	17
2.10	Entwicklung der Geschwindigkeit nahe der freien Grenzfläche während eines <i>Flip-Through-Events</i> [Lugni et al., 2006]	18
2.11	Geschwindigkeit der Sloshing-Welle bei $t/T = a$ 3.76, b 3.78, c 3.80, and d 3.82 [Song et al., 2013]	19
2.12	Ansichten der Entwicklung der freien Grenzfläche. Vergleich zwischen experimentellen Daten (links) und numerischen Simulationen (rechts) [Bouscasse et al., 2013].	20
2.13	Schematische Darstellung der schallemittierenden Strömungsphänomene [Wachowski et al., 2010]	21
2.14	Vergleich und Wavelet-Analyse der drei Geräuschkategorien [Wachowski et al., 2010]	21

Abbildungsverzeichnis

2.15	Dominierende Slosingevents in Experiment und Simulation [Wachowski et al., 2010]	22
2.16	Bildung eines freien Grenzflächenwirbels und seine Weiterleitung in die Turbine [Suerich-Gulick et al., 2014]	23
2.17	Wirbelklassifizierung nach Hecker [1987], Abbildung entnommen aus [KSB, 2021]	24
2.18	Luftkern-Wirbelstruktur im (a) numerischen und (b) experimentellen Modell [Sarkardeh, 2017]	25
2.19	Aufnahmen von verschiedenen Wirbelstadien: a) Stadium 1, b) Stadium 2, c) Stadium 3, d) Stadium 4.	25
4.1	Maße der Vergleichsgeometrie und Position der Drucksensoren und vertikalen Trennwände (alle Angaben in mm).	35
4.2	Skizze der Vergleichsgeometrie mit Trennwand-Einbau	36
4.3	Behälterboden der Vergleichsgeometrie mit Edelstahladaptern zur Aufnahme der Drucksensoren.	36
4.4	Realgeometrie in Frontalansicht und Draufsicht. Zur Verdeutlichung der Lage von Trennwänden und Tauchrohr wurden diese blau und rot markiert.	37
4.5	Aufbau des Kühlkreislauf-Prüfstands. (1) Ausgleichsbehälter Porsche 991 Carrera, (2) Motorblock, (3) Kühlmittelpumpe, (4) Elektromotor, (5) Wärmeübertrager, (6) Durchflussmesser	39
4.6	Links: Modifiziertes Thermostatventil. Rechts: Lage des Pumpenzulaufs mit (1) Acrylglasabdeckung und (2) Riemenscheibe zum Pumpenantrieb	39
4.7	Schleppkanal mit Hochleistungsschleppsystem des Lehrstuhls Strömungsmaschinen [Lehrstuhl Strömungsmechanik, 2019]	40
4.8	Messaufbau am HLSS. (1) Behälter, (2) Kamera, (3) Lichtschnittoptik, (4) Laserkopf.	41
4.9	Aufbau des dynamischen Prüfstands mit der Vergleichsgeometrie (links) und der Realgeometrie (rechts). (1) Rotationseinheit, (2) Drucksensoren, (3) Kamera, (4) Ultraschallsensor	42
4.10	Links: Lichtschnittoptik mit (1) Zylinderlinse und (2) Umlenkspiegel. Rechts: Lichtschnitt und reflektierende Tracerpartikel.	43
4.11	Schnitt durch die vernetzten Behältergeometrien. (a) Vergleichsgeometrie, strukturiertes Netz (grob). (b) Realgeometrie, unstrukturiertes Netz (grob).	46
4.12	Schwenkbewegung des Behälters.	46
4.13	Druckverläufe für Vergleichsgeometrie. Vergleich dreier verschiedener Netzgrößen.	47
4.14	Lage der Grenzfläche für Vergleichsgeometrie. Vergleich dreier verschiedener Netzgrößen.	48
4.15	Druckverläufe für Vergleichsgeometrie. Vergleich dreier verschiedener Turbulenzmodelle.	49
4.16	Lage der Grenzfläche für Vergleichsgeometrie. Vergleich dreier verschiedener Turbulenzmodelle.	50

5.1	Druckverlauf an Position p_1 und entsprechende Aufnahmen der Flüssigkeitsverteilung für Füllhöhe F1 für den AGB ohne und mit vertikalen Trennwänden. Die Position der Drucksensoren ist rot markiert.	54
5.2	Druckverlauf an Position p_1 und entsprechende Aufnahmen der Flüssigkeitsverteilung für Füllhöhe F2 für den AGB ohne und mit vertikalen Trennwänden. Die Position der Drucksensoren ist rot markiert.	55
5.3	Experimentell bestimmte Druckverläufe und Einfluss der Trennwände bei Füllhöhe F1.	55
5.4	Verlauf der experimentell bestimmten Flüssigkeitsverteilung für Füllhöhe F1 (a) ohne Trennwände, (b) mit vertikalen Trennwänden. Die Position der Drucksensoren ist rot markiert.	56
5.5	Experimentell bestimmte Druckverläufe und Einfluss der Trennwände bei Füllhöhe F2.	56
5.6	Verlauf der experimentell bestimmten Flüssigkeitsverteilung für Füllhöhe F2 (a) ohne Trennwände, (b) mit vertikalen Trennwänden. Die Position der Drucksensoren ist rot markiert.	57
5.7	Verlauf der Flüssigkeitsverteilung für Füllhöhe F1 und AGB ohne Trennwände. Die Position der Drucksensoren ist mit roten Rauten markiert. Die durchgezogene rote Linie stellt die simulierte Grenzfläche dar.	59
5.8	Verlauf der Flüssigkeitsverteilung für Füllhöhe F2 und AGB ohne Trennwände. Die Position der Drucksensoren ist mit roten Rauten markiert. Die durchgezogene rote Linie stellt die simulierte Grenzfläche dar.	59
5.9	Verlauf der Flüssigkeitsverteilung für Füllhöhe F1 und AGB mit vertikalen Trennwänden. Die Position der Drucksensoren ist mit roten Rauten markiert. Die durchgezogene rote Linie stellt die simulierte Grenzfläche dar.	60
5.10	Verlauf der Flüssigkeitsverteilung für Füllhöhe F2 und AGB mit vertikalen Trennwänden. Die Position der Drucksensoren ist mit roten Rauten markiert. Die durchgezogene rote Linie stellt die simulierte Grenzfläche dar.	60
5.11	Druckverlauf an drei Sensorpositionen für Füllhöhe F1 und den AGB ohne Einbauten. (schwarze Kurve: Experiment, rote Kurve: Simulation)	62
5.12	Druckverlauf an drei Sensorpositionen für Füllhöhe F2 und den AGB ohne Einbauten. (schwarze Kurve: Experiment, rote Kurve: Simulation)	62
5.13	Druckverlauf an drei Sensorpositionen für Füllhöhe F1 und den AGB mit vertikalen Trennwänden. (schwarze Kurve: Experiment, rote Kurve: Simulation)	62
5.14	Druckverlauf an drei Sensorpositionen für Füllhöhe F2 und den AGB mit vertikalen Trennwänden. (schwarze Kurve: Experiment, rote Kurve: Simulation)	63
5.15	Geschwindigkeitsfeld für AGB ohne Trennwände und $T/T_0 = 0,65$ (links: Experiment, rechts: Simulation).	64
5.16	Geschwindigkeitsfeld für AGB ohne Trennwände und $T/T_0 = 0,73$ (links: Experiment, rechts: Simulation). Die gestrichelte schwarze Linie markiert den kritischen Lichtbereich. Das gestrichelte graue Rechteck repräsentiert den in Abbildung 5.17 detailliert dargestellten Ausschnitt.	65

Abbildungsverzeichnis

5.17	Detailaufnahme des Geschwindigkeitsfeldes für $T/T_0 = 0,73$ (oben: Experiment, unten: Simulation). Die gestrichelte schwarze Linie zeigt die diskutierten Wirbelbereiche.	65
5.18	Geschwindigkeitsfeld für AGB ohne Trennwände und $T/T_0 = 0,78$ (links: Experiment, rechts: Simulation). Die gestrichelte schwarze Linie markiert den kritischen Lichtbereich, die grauen Linien kennzeichnen die diskutierten Strömungsphänomene.	66
5.19	Zeitlicher Verlauf der untersuchten Beschleunigungs- und Schwenkprofile .	67
5.20	Druckverlauf an drei Sensorpositionen für Füllhöhe F1, Profil 3 und AGB ohne Einbauten. (graue Kurve: translatorische Beschleunigung, blaue Kurve: dynamisches Kippen)	68
5.21	Verlauf der experimentell bestimmten Flüssigkeitsverteilung für Füllhöhe F1, Profil 3 und AGB ohne Einbauten. (a) translatorische Beschleunigung, (b) dynamisches Kippen. Die Position der Drucksensoren ist rot markiert.	69
5.22	Druckverlauf an drei Sensorpositionen für Füllhöhe F2, Profil 3 und AGB ohne Einbauten. (graue Kurve: translatorische Beschleunigung, blaue Kurve: dynamisches Kippen)	70
5.23	Verlauf der experimentell bestimmten Flüssigkeitsverteilung für Füllhöhe F2, Profil 3 und AGB ohne Einbauten. (a) translatorische Beschleunigung, (b) dynamisches Kippen. Die Position der Drucksensoren ist rot markiert.	70
5.24	Druckverlauf an drei Sensorpositionen für Füllhöhe F1, Profil 3 und AGB mit vertikalen Trennwänden. (graue Kurve: translatorische Beschleunigung, blaue Kurve: dynamisches Kippen)	71
5.25	Verlauf der experimentell bestimmten Flüssigkeitsverteilung für Füllhöhe F1, Profil 3 und AGB mit vertikalen Trennwänden. (a) translatorische Beschleunigung, (b) dynamisches Kippen. Die Position der Drucksensoren ist rot markiert.	72
5.26	Druckverlauf an drei Sensorpositionen für Füllhöhe F2, Profil 3 und AGB mit vertikalen Trennwänden. (graue Kurve: translatorische Beschleunigung, blaue Kurve: dynamisches Kippen)	73
5.27	Verlauf der experimentell bestimmten Flüssigkeitsverteilung für Füllhöhe F2, Profil 3 und AGB mit vertikalen Trennwänden. (a) translatorische Beschleunigung, (b) dynamisches Kippen. Die Position der Drucksensoren ist rot markiert.	73
5.28	Druckverlauf an zwei Sensorpositionen für die Realgeometrie. (graue Kurve: translatorische Beschleunigung, blaue Kurve: dynamisches Kippen) Die Position der Drucksensoren ist in der Skizze markiert.	74
6.1	Innenvolumen der Realgeometrie. Die Trennwände sind blau markiert, das Einlassfallrohr rot. Die einzelnen Kammern sind für eindeutige Auswertung nummeriert. (a) Einlass, (b) Auslass	76
6.2	Pfropfenströmung am Behälterauslass bei einer Füllmenge von 640 ml. Links im Bild befindet sich der Ultraschallsensor.	76

6.3	Aufnahme des Wirbeltrichters in Kammer 6 bei einer Füllmenge von 720 ml. Die Skizze zeigt den Blickwinkel der Aufnahme.	77
6.4	Verlauf der Stromlinien (blau) in Kammer 3 und 6 in Frontalansicht und Draufsicht für eine Füllmenge von 1030 ml. In rot sind die Isoflächen für $Q = 127 \text{ l/s}$ dargestellt.	78
6.5	Aufnahme der Wassergrenzfläche in Frontalansicht nach 4,5 s Strömung bei einer Füllmenge von 720 ml. Oben: Experiment, unten: Simulation.	79
6.6	Aufnahme der Wassergrenzfläche in Frontalansicht nach 1,5 s Strömung bei einer Füllmenge von 720 ml. Oben: Experiment, unten: Simulation.	80
6.7	Bilanzierung des Massenstroms durch Kammer 6 für eine Füllmenge von 1030 ml.	81
6.8	Simulation der Lage der Wassergrenzfläche nach 1,5 s Strömung bei um 45° geneigtem AGB mit 1030 ml Füllmenge. a) Bremsen, b) Rechtskurve, c) Beschleunigung	82
6.9	Variationen der Trennwand (1-3) sowie AGB ohne Einbauten (rechts). Geometrie 1: Entfernung des Sensorblocks, Geometrie 2: Vergrößerung des Trennwanddurchbruchs, Geometrie 3: Kombination aus 1 und 2.	83
6.10	Luft eintrag verschiedener Behältergeometrien im Zeitverlauf bei um 45° geneigtem AGB mit 1030 ml Füllmenge.	83
6.11	Simulation der Lage der Wassergrenzfläche verschiedener Behältergeometrien nach 4 s Strömung bei um 45° geneigtem AGB mit 1030 ml Füllmenge. a) Original, b) Geometrie 2, c) Ohne Trennwand	84
6.12	Luft eintrag verschiedener Behältergeometrien im Zeitverlauf bei dynamisch beschleunigtem und geneigtem AGB mit 1030 ml Füllmenge.	85
6.13	Lage der Wassergrenzfläche verschiedener Behältergeometrien bei $T/T_0 = 0,4$ bei dynamisch beschleunigtem und geneigtem AGB mit 1030 ml Füllmenge. a) Translation, b) Rotation oben: Originalgeometrie, unten: Ohne Trennwand.	86
A.1	Druckverlauf an drei Sensorpositionen für Füllhöhe F1, Profil 1 und AGB ohne Einbauten. (graue Kurve: translatorische Beschleunigung, blaue Kurve: dynamisches Kippen)	xii
A.2	Verlauf der experimentell bestimmten Flüssigkeitsverteilung für Füllhöhe F1, Profil 1 und AGB ohne Einbauten. (a) translatorische Beschleunigung, (b) dynamisches Kippen. Die Position der Drucksensoren ist rot markiert.	xii
A.3	Druckverlauf an drei Sensorpositionen für Füllhöhe F2, Profil 1 und AGB ohne Einbauten. (graue Kurve: translatorische Beschleunigung, blaue Kurve: dynamisches Kippen)	xiii
A.4	Verlauf der experimentell bestimmten Flüssigkeitsverteilung für Füllhöhe F2, Profil 1 und AGB ohne Einbauten. (a) translatorische Beschleunigung, (b) dynamisches Kippen. Die Position der Drucksensoren ist rot markiert.	xiii
A.5	Druckverlauf an drei Sensorpositionen für Füllhöhe F1, Profil 1 und AGB mit vertikalen Trennwänden. (graue Kurve: translatorische Beschleunigung, blaue Kurve: dynamisches Kippen)	xiv

Abbildungsverzeichnis

A.6 Verlauf der experimentell bestimmten Flüssigkeitsverteilung für Füllhöhe F1, Profil 1 und AGB mit vertikalen Trennwänden. (a) translatorische Beschleunigung, (b) dynamisches Kippen. Die Position der Drucksensoren ist rot markiert. xiv

A.7 Druckverlauf an drei Sensorpositionen für Füllhöhe F2, Profil 1 und AGB mit vertikalen Trennwänden. (graue Kurve: translatorische Beschleunigung, blaue Kurve: dynamisches Kippen) xv

A.8 Verlauf der experimentell bestimmten Flüssigkeitsverteilung für Füllhöhe F2, Profil 1 und AGB mit vertikalen Trennwänden. (a) translatorische Beschleunigung, (b) dynamisches Kippen. Die Position der Drucksensoren ist rot markiert. xv

B.1 Druckverlauf an drei Sensorpositionen für Füllhöhe F1, Profil 2 und AGB ohne Einbauten. (graue Kurve: translatorische Beschleunigung, blaue Kurve: dynamisches Kippen) xviii

B.2 Verlauf der experimentell bestimmten Flüssigkeitsverteilung für Füllhöhe F1, Profil 2 und AGB ohne Einbauten. (a) translatorische Beschleunigung, (b) dynamisches Kippen. Die Position der Drucksensoren ist rot markiert. xviii

B.3 Druckverlauf an drei Sensorpositionen für Füllhöhe F2, Profil 2 und AGB ohne Einbauten. (graue Kurve: translatorische Beschleunigung, blaue Kurve: dynamisches Kippen) xix

B.4 Verlauf der experimentell bestimmten Flüssigkeitsverteilung für Füllhöhe F2, Profil 2 und AGB ohne Einbauten. (a) translatorische Beschleunigung, (b) dynamisches Kippen. Die Position der Drucksensoren ist rot markiert. xix

B.5 Druckverlauf an drei Sensorpositionen für Füllhöhe F1, Profil 2 und AGB mit vertikalen Trennwänden. (graue Kurve: translatorische Beschleunigung, blaue Kurve: dynamisches Kippen) xx

B.6 Verlauf der experimentell bestimmten Flüssigkeitsverteilung für Füllhöhe F1, Profil 2 und AGB mit vertikalen Trennwänden. (a) translatorische Beschleunigung, (b) dynamisches Kippen. Die Position der Drucksensoren ist rot markiert. xx

B.7 Druckverlauf an drei Sensorpositionen für Füllhöhe F2, Profil 2 und AGB mit vertikalen Trennwänden. (graue Kurve: translatorische Beschleunigung, blaue Kurve: dynamisches Kippen) xxi

B.8 Verlauf der experimentell bestimmten Flüssigkeitsverteilung für Füllhöhe F2, Profil 2 und AGB mit vertikalen Trennwänden. (a) translatorische Beschleunigung, (b) dynamisches Kippen. Die Position der Drucksensoren ist rot markiert. xxi

Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht über die bisherige Studienlage mit den Schwerpunkten Schiffstanks, Tanklastern und Pkw-Kraftstofftanks ohne Anspruch auf Vollständigkeit und Vergleich mit den Bedingungen im Ausgleichsbehälter von Sportwagen.	27
4.1	Technische Daten des Schleppwagen-Hauptsystems (X-Achse). [Lehrstuhl Strömungsmechanik, 2019]	41
4.2	Technische Daten der Rotationseinheit isel RDH-M.	42
4.3	Übersicht der verwendeten Messtechnik.	44
4.4	Komponenten des optischen Systems und ihre Eigenschaften.	44
4.5	Elementgröße und -anzahl der untersuchten Rechennetze (Vergleichsgeometrie ohne Einbauten) und benötigte Rechendauer.	47
4.6	Unterschiede der simulierten Druckmaxima für drei Punkte bezogen auf das feine, strukturierte Netz (Vergleichsgeometrie ohne Einbauten).	47
4.7	Elementgröße und -anzahl der untersuchten Rechennetze der Realgeometrie.	48
4.8	Übersicht der untersuchten Simulationsparameter.	49
5.1	Reduktion der Wanddrücke durch die vertikalen Trennwände.	57
5.2	Abweichung der simulierten von den gemessenen Druckmaxima.	63
5.3	Basisdaten der untersuchten Beschleunigungs- und Schwenkprofile.	67
6.1	Übersicht über die untersuchten Füllhöhen und die auftretenden Phänomene.	79
6.2	Übersicht über die untersuchten Neigungswinkel und die auftretenden Phänomene.	82
6.3	Übersicht über die untersuchten Geometrievariationen und den auftretenden Lufteintrag.	84

Formelverzeichnis

2.1:	Sloshing-Eigenfrequenz	8
2.2:	Froudezahl	9
2.3:	Druckskalierung	9
2.4:	Zeitskalierung	9
3.1:	Kontinuitätsgleichung	29
3.2:	Impulsbilanz	30
3.3:	Stokes'scher Reibungsansatz	30
3.4:	Navier-Stokes-Gleichung	30
3.5:	Massengemittelte Strömungsgeschwindigkeit	31
3.6:	Zeitliche Mittelung der Strömungsgrößen	31
3.7:	Zerlegung der Strömungsgrößen	31
3.8:	Gemittelte Kontinuitätsgleichung	31
3.9:	Gemittelte Navier-Stokes-Gleichung	31
3.10:	Reynolds-Spannungen	31
3.11:	Boussinesq-Ansatz	32
3.12:	Gasvolumenanteil	32
3.13:	Gasvolumenstromanteil	32
3.14:	Phasenschlupf	32
3.15:	Relativgeschwindigkeit	32
3.16:	Homogenes Zweiphasenmodell	32
3.17:	Kontinuitätsgleichung (zweiphasig, homogen)	32
3.18:	Navier-Stokes-Gleichung (zweiphasig, homogen)	32
3.19:	Mittlere Stoffeigenschaften	33
3.20:	Kontinuitätsgleichung (zweiphasig, inhomogen)	33
3.21:	Navier-Stokes-Gleichung (zweiphasig, inhomogen)	33
4.1:	Winkel zur Modellierung des Fahrzustandes	38
5.1:	Winkel zur Modellierung des Fahrzustandes	67
6.1:	Q-Kriterium	78
6.2:	Geschwindigkeitsgradiententensor	78