

Rostocker Meerestechnische Reihe
herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. habil. Mathias Paschen

Band 8/2015

Bernhard Mehl

**Sloshing: Experimentelle und theoretische Studien
zum Einfluss ausgewählter Parameter auf die
Wellenbewegungen in teilgefüllten Tanks**

Shaker Verlag
Aachen 2015

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., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3749-4

ISSN 1868-7636

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

SLOSHING: EXPERIMENTELLE UND
THEORETISCHE STUDIEN ZUM EINFLUSS
AUSGEWÄHLTER PARAMETER AUF DIE
WELLENBEWEGUNGEN IN TEILGEFÜLLTEN TANKS

DISSERTATION
ZUR
ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES
DOKTOR-INGENIEUR (DR.-ING.)
DER FAKULTÄT FÜR MASCHINENBAU UND SCHIFFSTECHNIK
DER

Universität
Rostock



Traditio et Innovatio

vorgelegt von
Bernhard Mehl,
geboren am 06.11.1982 in Crivitz
aus Schwerin

Rostock, 21. Oktober 2014

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. habil. Mathias Paschen
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl für Meerestechnik
Universität Rostock

Prof. Dr.-Ing. Bettar Ould el Moctar
Institut für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme (ISMT)
Universität Duisburg Essen

Tag der Verteidigung

27.04.2015

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Meerestechnik an der Universität Rostock. Dem Lehrstuhlinhaber Prof. Dr.-Ing. habil. Mathias Paschen bin ich für die Freiheiten, familiäre und berufliche Verpflichtungen so gut miteinander vereinbaren zu können, sowie für die Unterstützung sehr dankbar. Viele fachliche Diskussionen habe ich Dr.-Ing. Sebastian Schreier zu verdanken. Vielen Dank für die Zusammenarbeit und die zahlreichen Anregungen. Ich bin dankbar für die gemeinsame Zeit mit meinen Bürokollegen Christoph Otto, Stephan Schacht und Driss Hassana, welche immer wieder bei Fragen halfen, unterstützten und durch Humor bestachen. Durch die engagierte Mitarbeit von Annika Püttmann und Johannes Oppitz entstanden wertvolle Beiträge, wofür ich mich sehr bedanken möchte. Prof. Dr. Bettar Ould el Moctar von der Universität Duisburg-Essen bin ich im Weiteren für seine Bereitschaft, die Arbeit als Zweitgutachter zu betreuen, sehr dankbar.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Experimentelle Parameterstudien	11
2.1	Versuchsaufbau	13
2.2	Amplitudenmodulierte Anregungsbewegung	15
2.2.1	Definition der Anregungsfunktion	16
2.2.2	Darstellung der normierten Geschwindigkeit und Beschleunigung	22
2.2.3	Realisierung der amplitudenmodulierten Anregung mit dem verwendeten Versuchsstand	23
2.2.4	Zusammenhang zwischen Kurbelradius und Amplitude	25
2.2.5	Modifikation der amplitudenmodulierten Anregungsbewegung	27
2.3	Frequenzmodulierte Anregungsbewegung	31
2.3.1	Definition der frequenzmodulierten Anregungsbewegung	32
2.3.2	Vergleich der frequenz- und amplitudenmodulierten Anregungsbewegung	34
2.4	Zusammenfassung der untersuchten Anregungsbedingungen .	36
2.5	Messtechnik	36
2.5.1	Drucksensoren für die Messung der Einschlagsdrücke	37
2.5.2	Beschleunigungssensoren	39
2.5.3	Messung der Position des Tanks	41
2.5.4	Kameratechnik für die Aufzeichnung der Wellenbewegung	42
2.6	Erfassung und Auswertung der Messwerte	44
2.7	Auswertungskriterien	44
3	Ergebnisse der experimentellen Parameterstudien	49

3.1	Variation der Periodendauer	49
3.2	Variation der Anregungsamplitude	52
3.3	Einfluss der Anzahl der Versuchswiederholungen auf die Mittelwerte	55
3.4	Variation der Wassertiefe	58
3.4.1	Einfluss der Tankbreite auf 3D-Effekte	60
3.4.2	Messung und Einstellung der Wassertiefe	61
3.4.3	Variation der Wassertiefe bei einer Tankbreite von 87mm	63
3.4.4	Variation der Wassertiefe bei einer Tankbreite von 200mm	66
3.4.5	Vergleich der Ergebnisse der untersuchten Tankbreiten	68
3.5	Einfluss der Tankseitenwände auf die Druckverläufe	72
3.5.1	Untersuchungen zum Einfluss der Befestigung der Seitenwände	73
3.5.2	Untersuchungen zum Einfluss der Steifigkeit der Tankseitenwände auf die Druckverläufe	75
3.5.3	Schlussfolgerungen aus den Experimenten zum Einfluss der Tankseitenwände	86
3.6	Schlussfolgerungen aus den experimentellen Ergebnissen	88
3.6.1	Definitionen der Änderungsraten	88
3.6.2	Diskussion der Änderungsraten	89
4	Parameterstudien auf Basis der linearen Modaltheorie	95
4.1	Annahmen und Voraussetzungen der linearen Modaltheorie	97
4.2	Betrachtungen zum Gültigkeitsbereich	99
4.3	Laplace- und Bernoulli-Gleichung für das mitbewegte Bezugssystem	101
4.4	Formulierung der Randbedingungen	104
4.4.1	Linearisierte dynamische Randbedingung	104
4.4.2	Linearisierte kinematische Randbedingung	106
4.4.3	Kinematische Randbedingungen an den benetzten Flächen des Tanks	108
4.5	Wellengeschwindigkeitspotential	109
4.6	Lineares Modalsystem	113
4.7	Numerisches Integrationsverfahren	119
4.7.1	Differentialgleichungssystem in Zustandsform	119
4.7.2	Integrationsverfahren nach Runge-Kutta	121

5	Ergebnisse der theoretischen Parameterstudien	125
5.1	Einfluss der Schrittweite auf die Lösungen	125
5.2	Betrachtung der entkoppelten Schwingungsmoden- Diskussion der Einflüsse auf die Wellenform	126
5.3	Festlegung der erforderlichen Anzahl der Schwingungsmoden	131
5.4	Untersuchungen zum Einfluss der Anzahl der berechneten Moden auf die Wellenkontur	135
5.5	Einfluss der Wassertiefe	137
5.5.1	Bedingung C16	140
5.5.2	Bedingung C17	141
5.5.3	Bedingung C17mod	144
5.6	Einfluss der Amplitude der Anregung	145
5.7	Einfluss der Periodendauer der Anregung	148
5.8	Auswirkungen der Modifikation der amplitudenmodulierten Bewegung	150
5.9	Vorhersage von Versuchsbedingungen	152
5.9.1	Gastascheneinschlag - Bedingung C26	154
5.9.2	Direkter Einschlag - Bedingung C27	155
5.9.3	Experimentelle Ergebnisse	158
5.10	Anwendung der Anregungsbewegung aus den Experimenten	160
6	Vergleiche zwischen Theorie und Experiment	169
6.1	Vergleich der theoretischen und gemessenen Periodendauern	171
6.2	Vergleich der Ergebnisse der Variation der Wassertiefe	173
6.3	Vergleich der Wellenformen	177
6.4	Vergleiche zur Variation der Anregungsperiodendauer	179
6.5	Vergleiche zur Variation der Anregungsamplitude bei Gastascheneinschlägen	180
6.6	Abschließende Bemerkungen zu den Vergleichen	183
7	Zusammenfassung	185
8	Ausblick	189
	Literaturverzeichnis	193
	Anhang	205

A.1	Untersuchungen zur Periodendauer: Versuchsaufbau und Auswertung	205
A.2	Bemerkungen zur Skalierung von Versuchsbedingungen und Einschlagsdrücken	206
A.3	Vergleich der Einschlagsdrücke für die Bedingung C17mod .	212
A.4	Einfluss der Wassertiefe auf die Wellenformen	213
A.5	Schwingungen von Tankdeckel sowie Seitenwänden des Tanks bei einem Einzelwelleneinschlag	214
A.6	Harmonischer Druckverlauf bei einem Gastascheneinschlag .	215
A.7	Untersuchungen zur Seitenwandsteifigkeit: Druckverläufe der Bedingung C17mod und C27	216
A.8	Vergleich der Wellenformen für die frequenzmodulierte Anregung nach Bedingung C26 und C27	217
A.9	Quelltexte der Matlabroutinen	218
A.9.1	Matlab Auswertungsprogramm	218
A.9.2	lineare Modaltheorie: Berechnung und Auswertung .	227