

Ein generisches Reifenmodell für Fahrdynamiksimulationen von Offroad-Fahrzeugen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Andreas Schumacher
aus Bremen

Eingereicht am:	30.Okt. 2008
Mündliche Prüfung am:	30. März 2009
Referenten:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H.-H. Harms Prof. Dr.-Ing. H. Oehlschläger Dr.-Ing. M. G. Kliffken
Vorsitzender:	Prof. Dr. techn. R. Leithner

Forschungsberichte des Instituts für Landmaschinen und
Fluidtechnik

Andreas Schumacher

**Ein generisches Reifenmodell für Fahrdynamik-
simulationen von Offroad-Fahrzeugen**

Shaker Verlag
Aachen 2009

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8574-6

ISSN 1616-1912

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik der Technischen Universität Braunschweig. Ich möchte mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Hans-Heinrich Harms, der mir die Möglichkeit zur Promotion eröffnete. Unter seiner Leitung bearbeitete ich ein industriell gefördertes Projekt, aus dem diese Arbeit entstanden ist. Er stand mir bei der Bearbeitung des Projektes stets mit fachlicher und konstruktiver Kritik zur Seite und gewährte mir dabei viel Freiraum zum selbstständigen Arbeiten. Für dieses Vertrauen möchte ich mich bedanken.

Weiterhin bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Oehlschläger, der als Mitberichter die Arbeit durchgelesen und wertvolle Anregungen gegeben hat. Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Markus Gustav Kliffken, der mir nicht nur während und nach dem Projekt mit Rat und Tat zur Seite stand, sondern auch den dritten Mitbericht durchgeführt hat.

Bei Herrn Prof. Dr. techn. R. Leithner möchte ich mich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission bedanken.

Weiterhin möchte ich mich bei der Firma Bosch Rexroth, speziell den Mitarbeitern von Herrn Dr. Kliffken bedanken. Bei der Durchführung des Projektes waren sie durch fachliche Unterstützung sowie durch die Bereitstellung von Equipment und Messdaten ein wichtiger Partner.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Instituts für Landmaschinen und Fluidtechnik möchte ich für die gute Zusammenarbeit und das hervorragende Klima danken. Besonders das gute Arbeitsklima und die konstruktive Zusammenarbeit mit den wissenschaftlichen Mitarbeitern werde ich in guter Erinnerung behalten. Auch den Studierenden, die durch ihren Arbeiten zum Gelingen des Projektes beitrugen, danke ich.

Weiterhin danke ich meinem lieben Freund, der mich während der Arbeit ganz besonders unterstützt hat und oftmals Nachsicht während der Erstellung dieser Arbeit hatte.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Problemstellung und Motivation	3
1.2	Zielsetzung der Arbeit	6
1.3	Anforderungen und Einsatzbereich des Modells.....	8
2	Stand der Technik von landwirtschaftlichen Reifenmodellen	12
2.1	Technik und Simulation in der Landwirtschaft.....	12
2.2	Überblick über bestehende Reifenmodelle für Traktorreifen	14
2.2.1	Aufbau eines Reifens.....	14
2.2.2	Reifenbezeichnungen.....	18
2.2.3	Kurzüberblick über bestehende Reifenmodelle.....	18
2.2.4	Parametrierung der Reifenmodelle	24
2.3	Analyse und Vermessung von Reifeneigenschaften.....	29
3	Generisches Reifenmodell mit Berechnungsroutinen der Reifenparameter	31
3.1	Längskraftberechnung	32
3.2	Querkraftberechnung.....	46
3.3	Vertikalkraft	55
3.3.1	Bisherige generische Berechnungsformeln für die Vertikalsteifigkeit.....	59
3.3.2	Einfluss der Reifengröße	60
3.3.3	Einfluss des Reifeninnendrucks	63
3.3.4	Generische Berechnungsformel für die Reifensteifigkeit	67
3.3.5	Generische Berechnungsformel für die Reifendämpfung.....	69
4	Verifikation des Reifenmodells.....	72
4.1	Quasistationärer Vergleich	74
4.2	Modellvergleich	78

4.3	Horizontal- und vertikaldynamische Fahrversuche	83
4.3.1	Versuchsträger	84
4.3.2	Mehrkörpersystem-Modelle der beiden Versuchsträger	87
4.3.3	Parameterermittlung	87
4.3.4	Modellbildung	94
4.3.5	Fahrversuch zur Längsdynamik	95
4.3.6	Fahrversuch zur Querdynamik	100
4.3.7	Fahrversuch zur Vertikaldynamik	105
4.4	Zusammenfassende Bewertung	113
4.4.1	Bewertungsgrundlage	113
4.4.2	Bewertung der Ergebnisse	114
5	Hinweise für den Anwender	117
5.1	Sechs-dimensionales Reifenmodell	118
5.2	Modellgrenzen	119
5.2.1	Statische und dynamische Reifensteifigkeit	119
5.2.2	Reifenbauart	119
5.2.3	Grenzen in der Dimension und den Betriebsbedingungen	119
5.3	Abweichungen und bekannte Schwachstellen	121
5.3.1	Instationärer Kraftaufbau/horizontale Kräfte	121
5.3.2	Temperaturabhängigkeit	121
5.3.3	Rollwiderstand	122
5.3.4	Reifenunrundheiten	122
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	124
7	Literaturverzeichnis.....	127
	Anhang A.....	135
	Anhang A2.....	135