Querdynamisches Verhalten von Industriereifen und dessen Einfluss auf die Fahrdynamik von Gabelstaplern

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Nils Busch

aus Winsen (Luhe)

Hamburg 2015

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Bruns
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Meywerk

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Dezember 2014

Gedruckt mit Unterstützung der
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

Berichte aus dem Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik

Band 40

Nils Busch

Querdynamisches Verhalten von Industriereifen und dessen Einfluss auf die Fahrdynamik von Gabelstaplern

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.: Hamburg, Helmut-Schmidt-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 978-3-8440-3657-2
ISSN 1861-5260

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

Für Katharina

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr in Hamburg.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Bruns, der mich zu jeder Zeit mit einem offenen Ohr und neuen konstruktiven Anregungen unterstützte und mir durch den Freiraum zur Entwicklung eigener Lösungen sein Vertrauen entgegenbrachte.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Meywerk danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Für die gute Atmosphäre am Lehrstuhl und die ständige Unterstützung danke ich meinen ehemaligen Kollegen aus Labor und Sekretariat, Werner Albe, Bernfried Heinken, Jochen Klostermann, Holger Kumpfert und Kerstin Semcken.

Mein Dank für Unterstützung, anregende Diskussionen und fünf unvergessliche Jahre gilt meinen ehemaligen Kollegen des Lehrstuhls: Elena Danilov, Michael Eisenberg, Alexander Frenkel, Holger Freyer, Melf Gerthsen, Loubna Goosmann, Guido Gravenkötter, Torsten Hahn, Klaus Heißenberg, Oliver Höppner, Konstantin Krivenkov, Anne Piepenburg, Björn Piepenburg, Nicole Riemer, Gunnar Rückner, Timo Schilling und Stephan Ulrich.

Den Herren Henry Loitz und Jens von der Wense danke ich für die Arbeit, die sie in die Konstruktion und Realisierung des Prüfstandes investiert haben.

Den Studenten Oliver Bergengrün, Hendrik Borghardt, Christoph Brauns, Helge Heinken und Matthias Weitzel danke ich für die Unterstützung, die sie in Form von Studien- und Masterarbeiten oder als Studentische Hilfskraft erbracht haben.

Bei meiner Familie bedanke ich mich für den Freiraum und die Unterstützung, mit der sie meinen Weg und jeden neuen beruflichen Schritt geprägt und begleitet hat. Besonders bedanke ich mich bei meiner Frau Katharina für ihre Geduld und den Rückhalt bei der Fertigstellung dieser Arbeit.

Kurzfassung

Querdynamisches Verhalten von Industriereifen und dessen Einfluss auf die Fahrdynamik von Gabelstaplern

Moderne Gabelstaplerreifen sind hochentwickelte technische Produkte, an die vielfältige und hohe Ansprüche gestellt werden. Zusätzlich zu herkömmlichen Anforderungen wie Preis, Lebensdauer und Schwingungskomfort gewinnt das Seitenführungsverhalten bei Kurvenfahrt an Bedeutung, da Gabelstapler zunehmend dynamischer betrieben werden. Insbesondere bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen ist sowohl die dynamische seitliche Standsicherheit als auch eine komfortable Lenkbarkeit und präzise Spurhaltung von Interesse.

Für die überwiegend verwendeten Superelastikreifen (SE-Reifen) ist das Wissen auf dem Gebiet der Querdynamik noch lückenhaft. Neben der speziellen Bauart dieser Vollreifen ist auch die Fahrwerktechnik der Gabelstapler für die Fahrdynamik zu beachten. Aufgrund der Unterscheidung von Lastachse und gelenkter Achse werden an Vorder- und Hinterachse z. T. deutlich verschiedene Reifendimensionen verwendet. Neben den SE-Reifen sind auch Bereifungsoptionen in Luft-Bauart üblich. Dadurch ergibt sich ein breites Spektrum an Variationsmöglichkeiten der Bereifung.

Die vorliegende Arbeit stellt neue Erkenntnisse über das querdynamische Verhalten der SE-Reifen vor und zeigt einen neuen, vollfunktionalen Modellansatz zur Einbringung des querdynamischen Reifenverhaltens in die computergestützte Gesamtfahrzeug-Simulation. Grundlegende in einer durchgeführten Mehrkörpersystem-Simulation (MKS-Simulation) beobachtete Effekte werden anhand einfacher Modellansätze der Querdynamik erklärt. Nichtlineare dynamische Effekte können anhand des untersuchten Reifenverhaltens, der daraus abgeleiteten Modellfunktionalitäten des Reifenmodells und des Zusammenhangs mit dem Gesamtfahrzeugmodell qualitativ dargestellt werden.

Durch die erstellte Modellierungsmethode wird eine frühzeitige Vorhersage des Reifeneinflusses auf die Fahreigenschaften ermöglicht. Charakteristische Verhaltenskennwerte und ein Bewertungsansatz für den Beitrag der Reifen zur Fahrstabilität erleichtern eine günstige Auswahl der Bereifungskombination in der Fahrzeugentwicklung.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Formelzeichen ... III
Verzeichnis der Abkürzungen ... VII

1 Einleitung ... 1
1.1 Problemstellung ... 1
1.2 Stand der Technik und Wissenschaft ... 5
1.2.1 Fahrstabilität von Gabelstaplern ... 5
1.2.2 Industriereifen für Gabelstapler ... 6
1.2.3 Reifenverhalten ... 8
1.2.4 Bestehende Reifenprüfstände ... 10
1.2.5 Reifenmodelle in der MKS-Simulation ... 11
1.2.6 Möglichkeiten mehrdimensionaler Approximation ... 13
1.3 Ziel und Aufbau der Arbeit ... 15

2 Experimentelle Untersuchung des Reifenverhaltens ... 17
2.1 MTL-Industriereifenprüfstand ... 17
2.1.1 Konzept und Eigenschaften ... 17
2.1.2 Prüfabläufe ... 21
2.2 Vermessung des Reifenverhaltens ... 24
2.2.1 Untersuchte Reifendimensionen ... 24
2.2.2 Festlegung der berücksichtigten Einflussgrößen ... 25
2.2.3 Vertikale Einfederung ... 27
2.2.4 Seitenführungsverhalten ... 29
2.2.5 Sturzmoment ... 41
2.2.6 Reibwertpotential ... 44
2.2.7 Vergleich zu Luftreifen ... 49
2.3 Diskussion der Ergebnisse ... 52
2.3.1 Erkenntnisse zum querdynamischen Verhalten ... 52
2.3.2 Analyse der kinematischen Einflüsse ... 53
2.3.3 Einordnung der SE-Reifen gegenüber Luftreifen ... 55
2.3.4 Ableitung charakteristischer Kennwerte ... 56

3 Querdynamisches Reifenmodell mit KNN ... 64
3.1 Festlegung der Methodik ... 65
3.1.1 Anforderungen ... 65
3.1.2 Begründung zur Wahl der Art des Reifenmodells ... 67
3.1.3 Methode der multivariaten Approximation ... 68
3.2 Abstrakte Modellstruktur mit KNN ... 70
3.2.1 Ebene 1: Eingaben und Ausgaben ... 70
3.2.2 Ebene 2: Teilnetze ... 71
3.2.3 Ebene 3: Netzstrukturen ... 72
3.2.4 Ebene 4: Umsetzung und Besonderheiten des Quellcodes ... 75
3.3 Radmodell für die MKS-Simulation ... 76
3.3.1 Implementierung ... 76
3.3.2 Modellkommunikation ... 78
3.4 Messroutine und Parameterbestimmung ... 80
3.4.1 Messabläufe ... 81
3.4.2 Aufbereitung der Messdaten ... 81

3.4.3 Training ... 83
3.5 Modellvalidierung ... 86
3.5.1 Validierung des Einzelrades ... 86
3.5.2 Reibwertabgleich ... 87
3.5.3 Vergleich zum Stand der Technik ... 88
3.6 Zusammenfassung ... 89

4 MKS-Fahrdynamiksimulation ... 91
4.1 Experimentelle Untersuchungen des Fahrverhaltens ... 91
4.1.1 Messaufbau ... 91
4.1.1.1 Referenzfahrzeug ... 91
4.1.1.2 Bestimmung von Systemparametern ... 92
4.1.1.3 Messmittel ... 94
4.1.1.4 Messgrößen ... 95
4.1.2 Messdurchführung ... 96
4.1.2.1 Prüfmanöver ... 96
4.1.2.2 Fahrverhalten ... 99
4.2 Gesamtfahrzeugmodell zur dynamischen Simulation ... 101
4.2.1 Kinematische Abbildung ... 101
4.2.2 MKS-Modellstruktur ... 103
4.2.3 Validierung des Reifen- und Fahrzeugmodells ... 104
4.3 Simulation zum Einfluss der Reifendimensionen ... 108
4.4 Simulation zum Einfluss des Reifentyps ... 109
4.5 Vergleich der Simulationsgüte zum Stand der Technik im doppelten Krümmungswechsel ... 111
4.6 Zusammenfassung ... 112

5 Einflüsse der Reifen auf die Fahrdynamik von Gabelstaplern ... 113
5.1 Konstruktive Besonderheiten ... 113
5.2 Fahrstabilität der Kurvenfahrt ... 116
5.2.1 Kursstabilität ... 117
5.2.2 Seitliche Standsicherheit ... 126
5.3 Auswirkung der Reifenkenngrößen auf das Fahrzeugverhalten ... 132
5.3.1 Kursstabilität ... 133
5.3.2 Seitliche Standsicherheit ... 139
5.4 Bewertung des Beitrages der Reifen zur Standsicherheit unter Berücksichtigung der Kursstabilität ... 146
5.4.1 Bewertete Verhaltensparameter ... 147
5.4.2 Bewertungsfaktor ... 149

6 Zusammenfassung ... 152
7 Ausblick ... 154
Abbildungsverzeichnis ... 155
Tabellenverzeichnis ... 158
Literaturverzeichnis ... 159

Anhang A Quellcode Reifenmodell ... IX
Anhang B Trainingsroutine ... XIV
B.1 Systemvoraussetzungen ... XIV
B.2 Quellcode KNN-Training ... XV

Verzeichnis der Formelzeichen

Lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
a_x	m/s²	Beschleunigung in Längsrichtung
a_y	m/s²	Beschleunigung in Querrichtung
a_z	m/s²	Beschleunigung in vertikaler Richtung
b	N/mm²	math.: nichtlin.-Koeffizient der vertikalen Einfederung
b	mm	mech.: Breite des Reifenquerschnittes
b_v	mm	Spurweite vorn
b_h	mm	Spurweite hinten
c_i	°/s	Rampe des idealisierten Lenkverlaufs
c_{sy}	mm/kN	Seitliche Nachgiebigkeit des Reifens i. Abh. v. d. Seitenkraft
c_α	N/°	Seitensteifigkeit des Reifens für einen best. Betriebspunkt
c_z	N/mm	Vertikale Reifenfedersteifigkeit
$C_{\Delta Fy}$	-	Dynamischer Seitenkraft-Korrekturterm
C_μ	-	Reibwertfaktor von realer zur Labor-Prüfoberfläche
d	mm	geom.: Innendurchmesser des Reifens; Felgen(sitz)durchmesser
d_z	Ns/m	Vertikale Reifendämpfung
e	m	Abstand zwischen den LKS der MPF und des Radaufstandspunkts
E	-	Trainingsfehler
f	-	math.: Aktivierungsfunktion eines Neurons, i. Abh. v. d. Netzeingabe
f_{def}	-	mech.: Ausrichtungsindikator der Schräglaufdynamik
F_{ay}	N	Querbeschleunigungskraft des Fahrzeuges
F_i	-	Reifenkennwerte (i=[1;6])
F_x	N	Längskraft am Rad
F_y	N	Seitenführungskraft am Rad / an der Achse
F_{yC}	-	Dyn. korrigierte approximierte Seitenkraft (normiert)
F_z	N	Radaufstandskraft, Radlast
h_R	mm	Höhe des Radmittelpunkts über der Fahbahn
h_S	mm	Schwerpunkthöhe des Fahrzeuges
J_x	kgm²	Massenträgheitsmoment um die x-Achse
J_y	kgm²	Massenträgheitsmoment um die y-Achse
J_z	kgm²	Massenträgheitsmoment um die z-Achse
k	1/m	Bahnkrümmung
K_{nm}	-	Bewertungsfaktoren für Fahrzeugachse n und Kategorie m
l	m	Radstand (bei Gabelstaplern auch gebr.: Y)
l_v	m	Abstand des Schwerpunktes zur Vorderachse (x-Achse)
l_h	m	Abstand des Schwerpunktes zur Hinterachse (x-Achse)
mi	-	math.: Gewichtungen der Reifenkennwerte
m	kg	mech.: Masse

M_A	Nm	Wirksames Antriebsmoment des Fahrzeugmotors
M_L	Nm	Linkes Radmoment
M_R	Nm	Rechtes Radmoment
M_x	Nm	Sturzmoment des Rades
M_y	Nm	Antriebs- / Bremsmoment des Rades
M_z	Nm	Rückstellmoment des Rades
n	-	math.: Anzahl Stützstellen (Versuchsplan)
n	1/s	mech.: Raddrehzahl
n_F	-	Anzahl Stützstellen eines Faktors
net_j	-	Netzeingabe der verdeckten Schicht
net_k	-	Netzeingabe der Ausgabeschicht
N	div.	Normierung (Netz-Eingaben / -Ausgaben; Reifenparameter)
o_{ki}	-	Ausgabe der Teilnetze, Istwert (i=[1;3])
R	-	Kurvenradius
R_α	-	Seitenreibwert-Verhältnis
s_N	m	Trajektorie: Anteil des horiz. Weges in globaler Nord-Ausrichtung
s_O	m	Trajektorie: Anteil des horiz. Weges in globaler Ost-Ausrichtung
s_y	mm	Seitliche Auslenkung des Reifens (auch: Δy) im Fahrbahnkontakt (Angriffspunkt der resultierenden Radlast)
s_z	mm	Vertikaler Federweg des Reifens (auch: Δz)
S	-	Radschlupf
t	s	Zeit (i. d. R. als unabh. Größe verwendet)
t_k	-	math.: Netzausgaben-Sollwert
T	°C	Reifen-Kerntemperatur
T_ψ	s	LS-Ansprechdauer
u_i	-	Netzeingaben
v_{ch}	m/s	Charakteristische Fahrgeschwindigkeit (Lenkstabilität)
v_{err}	m/s	Erreichbare Längsgeschwindigkeit in der Kurve
v_{grenz}	m/s	Kritische Längsgeschwindigkeit in der Kurve (Kursstabilität)
v_{krit}	m/s	Kritische Längsgeschwindigkeit in der Kurve (Kippstabilität)
v_u	m/s	Reifenumfangsgeschwindigkeit
v_x	m/s	Längsgeschwindigkeit
v_y	m/s	Quergeschwindigkeit
w_{ij}	-	Netzgewichtung zwischen Ebene i und Ebene j
w_{jk}	-	Netzgewichtung zwischen Ebene j und Ebene k
W_i	-	Wichtungsmatritzen der Teilnetze (i=[1;3])
x	-	Längsachse (Reifen / Fahrzeug)
y	-	Querachse (Reifen / Fahrzeug)
z	-	Hochachse (Reifen / Fahrzeug)

Griechische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
α	rad; °	Schräglaufwinkel
β	rad; °	Schwimmwinkel
δ	rad; °	Lenkwinkel (Achslenkwinkel der gelenkten Achse)
λ	1/(kgm)	Lenkstabilitätsbedingung
γ	rad; °	Radsturzwinkel
μ	-	Reibbeiwert
μ_x	-	Reibbeiwert in Längsrichtung
μ_y	-	Reibbeiwert in Querrichtung
η	-	Lernrate
Φ_{ij}	-	Erregungsschwellwerte der Neuronen der verdeckten Schicht
Φ_{jk}	-	Erregungsschwellwerte der Ausgabeneuronen
ω	1/s	Winkelgeschwindigkeit
ψ	rad; °	Gierwinkel

Optionale zusätzliche Indizes

Index	Beschreibung
0	math.: Basiswert
0	mech.: im Schräglaufursprung
90°	bei 100% Schräglauf
alt	Bezug zum vorangegangenen Trainingsschritt
dyn	dynamisch
F	Faktor
h	hinten
K	Kurshaltung
max	Maximalwert
min	Minimalwert
MPF	Messplattform
neu	Bezug zum aktuellen Trainingsschritt
N	normiert
ν	Bezug zu einem einzelnen Trainingsmuster
Prüf	Bezug auf eine Laborprüfbedingung
Real	Bezug auf eine reale Prüfbedingung
stat	statisch
S	Standsicherheit
v	vorn
X	Laufende Nummerierung

Umrechnungen

Einheit	SI-Einheit	Bezeichnung
1´´	= 25,4mm	Zoll
1g	= 9,81m/s²	Erdbeschleunigung
1km/h	= 3,6m/s	Geschwindigkeit
1t	= 1000kg	Tonne

Verzeichnis der Abkürzungen

Fachbegriffe

DLL	Dynamic Link Library
DoE	Design of Experiments
FEM	Finite Elemente Methode
FLT	Forklift Truck
GAS	Geschwindigkeitsanpassungssystem
GKS	Globales Koordinatensystem
HA	Hinterachse
KNN	Künstliche Neuronale Netze
LKS	Lokales Koordinatensystem
LS	Lenkwinkelsprung
MKS	Mehrkörpersystem
MPF	Messplattform
PU	Polyurethan
SE	Superelastik
VA	Vorderachse

Organisationen

BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
FG IFL	Forschungsgemeinschaft Intralogistik, Fördertechnik und Logistiksysteme
GroLa-BG	Großhandels- und Lagerei-Berufsgenossenschaft
HSU	Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg
IFAS	Institut für Fahrzeugtechnik und Antriebssystemtechnik der HSU
MTL	Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik der HSU