



HELMUT SCHMIDT  
UNIVERSITÄT

Universität der Bundeswehr Hamburg

Sergey Stepanyuk

---

Entwicklung eines aktiven Standsicher-  
heitssystems für Gabelstapler mit  
reduzierter Masse

Berichte aus dem Institut für  
Konstruktions- und Fertigungstechnik

# ENTWICKLUNG EINES AKTIVEN STANDSICHERHEITSSYSTEMS FÜR GABELSTAPLER MIT REDUZIERTER MASSE

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

Sergey Stepanyuk, M. Sc.

aus Almaty

Hamburg 2019

Tag der Mündlichen Prüfung: 26.10.2018

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

Berichte aus dem Institut für Konstruktions- und  
Fertigungstechnik

Band 49

**Sergey Stepanyuk**

**Entwicklung eines aktiven Standsicherheitssystems  
für Gabelstapler mit reduzierter Masse**

Shaker Verlag  
Düren 2019

**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., 2018

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6877-1

ISSN 1861-5260

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## Vorwort

---

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

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Bruns, der mir stets fachliche Freiheit und großes Vertrauen geschenkt hat. Gleichzeitig hat er mit konstruktiven Impulsen und fachlicher Inspiration nach vorne gebracht.

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

Für die angenehme Atmosphäre und die Unterstützung bei allen technischen und organisatorischen Aufgaben danke ich Werner Albe, Bernfried Heinken, Holger Kumpfert, Laurence Peters, Erik Kaben, Christopher Klitsch, Vanessa Beine und Kathrin Schweitzer. Darüber hinaus danke ich allen Kolleginnen und Kollegen für die gute und freundschaftliche Zusammenarbeit.

Dr.-Ing Konstantin Krivenkov möchte ich einen besonderen Dank für viele Anregungen und kreative Lösungsansätze aussprechen. Dies gilt auch meinem Bruder Alexey Stepanyuk, wessen Ideen für eine andere Perspektive bei Problembewältigungen gesorgt haben.

Schließlich danke ich meinen Freunden und Familie, die mich stets unterstützt und mir den Rücken gestärkt haben.

Sergey Stepanyuk



## Kurzfassung

Gegengewichtsstapler gehören zu den wichtigsten und vielseitigsten Flurförderzeugen beim innerbetrieblichen Warentransport. Ein Gegengewichtsstapler verursacht den Großteil der Emissionen und Energiekosten in der Betriebsphase. Wird die Fahrzeugmasse reduziert, kann dadurch der Rollwiderstand gesenkt und somit die anfallenden Energiekosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert werden. Verringerung des Gegengewichtes führt allerdings zu einer schlechteren statischen und dynamischen Standsicherheit. Im Rahmen dieser Arbeit wird aufgezeigt, dass die Masse eines Gegengewichtsstaplers bei gleichbleibenden Standsicherheit signifikant gesenkt werden kann.

Durch eine systematische Untersuchung der bestehenden Fahrzeugausführungen konnten mehrere Fahrzeugelemente identifiziert werden, an denen eine Massenreduktion möglich ist. Die einzelnen Maßnahmen wurden bewertet und bei der Entwicklung der Konzepte berücksichtigt. Es wurde ein Konzept ausgewählt, bei dem eine signifikante Einsparung ermöglicht wird. Steuerungskonzepte der einzelnen Elemente wurden vorgeschlagen.

Um die entwickelten Konzepte stabilisieren zu können, müssen die dynamischen Fahreigenschaften bestimmt werden. Zur Untersuchung des Fahrzeugverhaltens wurde ein Simulationsmodell auf Basis eines bestehenden Staplers aufgebaut und mit einem dafür entwickelten Reifenmodell versehen. Mit dem neuen Reifenmodell konnte eine sehr hohe Genauigkeit bei einer geringeren Rechenleistung erzielt werden. Das Gesamtmodell wurde anhand eines realen Staplers validiert.

Auf Basis der Erkenntnisse aus der Simulation wurden die entscheidenden Einflussparameter bestimmt, welche die dynamische Standsicherheit beeinflussen. Daraus konnte ein aktives Standsicherheitsmodell entwickelt werden, welches das Fahrzeug während der Fahrt stabilisiert und dabei die Last berücksichtigt. Mit Hilfe dieses Modells wurde das Fahrzeug über den Bremsengriff zu einem frühen Zeitpunkt, auch in sehr kritischen Fahrsituationen, stabilisiert.

Durch eine abschließende ökonomische und ökologische Studie konnten Einsparpotentiale in der Produktions- und der Betriebsphase hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Betriebskosten festgestellt werden.

**Schlagwörter:** Gabelstapler, Standsicherheit, Reifenmodell, Simulation, Aktive Systeme

## Abstract

Counterbalanced forklift trucks are one of the most important and versatile transport vehicles in the in-house logistic. A forklift causes the bulk of emissions and energy costs in the operating phase. Reduced overall vehicle mass leads to lower rolling resistance and therefore decreased energy costs and CO<sub>2</sub> emissions. Mass reduction on a counterweight results, however, in a poorer static and dynamic stability. Within the scope of this work, it is shown that the mass of a counterbalanced forklift can be significantly reduced preserving the same dynamic stability.

Through a systematic investigation of the existing vehicles, several elements with significant mass reduction potential were identified. The individual improvements were evaluated and used to develop several forklift concepts with reduced mass. The concept with the most mass reduction is selected for a more detailed investigation. Control concepts of the individual elements have been proposed.

In order to stabilize the developed concepts, the dynamic handling characteristics were determined. For investigations of forklift dynamic behavior, a simulation model based on an existing truck was constructed and extended with a tire model developed for this purpose. With the new tire model, a very high computation accuracy could be achieved. The overall multibody simulation model was validated using a real forklift.

On the basis of the findings from the simulation, the major influencing parameters of the dynamic stability were determined. These findings lead to a development of an active stability system, which stabilizes the vehicle while taking the load into account. With this system, the vehicle was stabilized at an early stage, even in very critical driving situations.

At the end, an economic and ecological study was conducted to identify savings potentials in the production and operating phases with regard to CO<sub>2</sub> emissions and operating costs.

**Key words:** Forklift, tilt stability, tire model, simulation, active systems

---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Konzeptentwicklung eines Leichtstaplers</b>	<b>5</b>
2.1	Referenzfahrzeug . . . . .	5
2.2	Gesetzliche Regelungen . . . . .	7
2.3	Voraussetzungen bei der Konzeptgestaltung . . . . .	8
2.4	Möglichkeiten zur Verbesserung der statischen Standsicherheit . . . . .	10
2.4.1	Gewichtsreduktion durch eine Verlagerung der Komponenten . . . . .	10
2.4.2	Gewichtsreduktion der Batterie . . . . .	14
2.4.3	Gewichtsreduktion am Hubgerüst . . . . .	17
2.4.4	Weitere statische Stabilisierungsmöglichkeiten . . . . .	20
2.5	Möglichkeiten zur Verbesserung der dynamischen Standsicherheit . . . . .	22
2.6	Konzepte der Gabelstapler mit reduzierter Masse . . . . .	29
2.6.1	Konzept 1: Abnehmbares Gegengewicht . . . . .	29
2.6.2	Konzept 2: Man-Up-Stapler . . . . .	30
2.6.3	Konzept 3: Stapler mit einem Windenausgleich . . . . .	32
2.6.4	Konzept 4: Schubgabelstapler mit einer Stütze . . . . .	33
2.6.5	Konzept 5: Abgestützter Schubmaststapler . . . . .	35
2.6.6	Bewertung der Konzepte . . . . .	36
2.7	Komponenten des Konzeptstaplers . . . . .	38
2.7.1	Vorschub . . . . .	38
2.7.2	Stütze . . . . .	38
2.7.3	Steuerungslogik . . . . .	40
<b>3</b>	<b>MKS-Simulation des Gabelstaplers</b>	<b>43</b>
3.1	Mehrkörpersimulation . . . . .	43
3.2	MKS-Modell des Gabelstaplers . . . . .	43

3.3	Reifenmodell . . . . .	45
3.3.1	Vermessung der Reifen . . . . .	48
3.3.2	Stationäres Verhalten der Reifen . . . . .	51
3.3.3	Dynamische Dämpfung in Reifen . . . . .	53
3.3.4	Notwendigkeit eines dynamischen Modells . . . . .	56
3.3.5	Einflüsse der Felgengeometrie . . . . .	57
3.3.6	Verformung des Reifens, Quersteifigkeit . . . . .	58
3.3.7	Vertikale Steifigkeit der Reifen . . . . .	61
3.3.8	Schätzung der Reifenkenngrößen . . . . .	62
3.3.9	Validierung des Reifenmodells . . . . .	64
3.3.10	Gegenüberstellung der Reifentypen . . . . .	65
3.3.11	Implementierung des Reifenmodells in MSC.Adams . . . . .	68
3.4	Dynamische Standsicherheit . . . . .	71
3.5	Vermessung des Referenzfahrzeugs . . . . .	73
3.5.1	Messsensorik und Fehlerabschätzung . . . . .	75
3.6	Validierung des MKS-Modells . . . . .	77
3.6.1	Masse und Schwerpunkt . . . . .	77
3.6.2	Trägheitsmomente . . . . .	77
3.6.3	Bestimmung des Lenkeinschlags . . . . .	78
3.6.4	Antriebskennlinie . . . . .	79
3.6.5	Standsicherheitssystem . . . . .	80
3.6.6	Validierung des stationären Verhaltens (Kreisfahrt) . . . . .	82
3.6.7	Validierung des dynamischen Verhaltens (L-Tests) . . . . .	84
<b>4</b>	<b>Bestimmung der dynamischen Standsicherheit</b>	<b>89</b>
4.1	Dynamische seitliche Standsicherheit . . . . .	89
4.2	Einfluss der lateralen Reifensteifigkeit . . . . .	92
4.2.1	Unterkritisches Verhalten eines 4-Rad-Staplers . . . . .	92
4.2.2	Einfluss der Hinterräder auf die Kippneigung . . . . .	92
4.3	Verlagerung des Schwerpunktes . . . . .	94
4.4	Kippvorgang bei einem L-Test . . . . .	96
4.5	Quantitativer Einfluss der einzelnen Faktoren auf die dynamische Standsicherheit . . . . .	97
4.6	Einspurmodell . . . . .	99
4.7	Einfluss der Reifenkräfte auf den Fahrzustand . . . . .	104
4.8	Überlagerte Bremsung und Lenkung . . . . .	105

---

4.9	Bremskrafttransfer . . . . .	111
4.10	Einfluss des Lenkwinkels auf die Traktion der Vorderräder (Kreisfahrt und L-Test) . . . . .	112
4.11	Einfluss der Lenkgeschwindigkeit auf die Standsicherheit . . . . .	114
4.12	Einfluss der Fahrbahneigenschaften auf die dynamische Standsicherheit	115
4.13	Einfluss der maximalen Geschwindigkeit . . . . .	117
4.14	Hinterradbremung . . . . .	118
4.15	Einfluss der Lastmasse auf die dynamische Standsicherheit . . . . .	119
<b>5</b>	<b>Algorithmus des aktiven Standsicherheitsystems</b>	<b>123</b>
5.1	Anforderungen an das Sicherheitssystem . . . . .	123
5.2	Eingangs- und Ausgangsgrößen . . . . .	125
5.3	Vorgehensweise des Standsicherheitsystems . . . . .	127
5.4	Bestimmung der Einflussgrößen . . . . .	128
5.5	Dynamisches Standsicherheitsystem . . . . .	130
5.6	Stellgrößen des Standsicherheitsystems . . . . .	135
5.7	Lastabhängiges Standsicherheitsystem . . . . .	137
<b>6</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung</b>	<b>141</b>
6.1	Ökologische Aspekte . . . . .	141
6.1.1	Produktion und Distribution . . . . .	141
6.1.2	Betriebsphase . . . . .	143
6.2	Ökonomische Aspekte . . . . .	149
6.2.1	Produktion . . . . .	149
6.2.2	Betriebsphase . . . . .	150
6.2.3	Abschätzung der Spielzeit . . . . .	151
6.2.4	Fazit . . . . .	153
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>155</b>
	<b>Literatur</b>	<b>159</b>
	<b>Anhang</b>	<b>177</b>
<b>A</b>	<b>Funktionen in MSC.Adams</b>	<b>177</b>
A.1	Stationäres Reifenmodell: FORCE_Q_HL . . . . .	177
A.2	Dynamisches Reifenmodell: FGES_HR . . . . .	177

---

A.3	Sturzmoment: M_HR . . . . .	177
A.4	Trapezförmige Lenkverschiebung . . . . .	178
A.5	Geschwindigkeitsanpassung durch das Standsicherheitssystem VAR_- Antrieb_R . . . . .	178
A.6	Max_V_Spline . . . . .	178
<b>B</b>	<b>Ergebnisse der Fahrversuche</b>	<b>179</b>
B.1	Messreihe 2 . . . . .	179
B.2	Messreihe 3 . . . . .	181
B.3	Messreihe 4 . . . . .	183
<b>C</b>	<b>Konzepte</b>	<b>185</b>
<b>D</b>	<b>Ergebnisse der Mehrkörpersimulationen</b>	<b>187</b>
<b>E</b>	<b>Hinterradbremung</b>	<b>189</b>
	<b>Curriculum Vitae</b>	<b>193</b>