Potenziale einer aktiven Achskinematik zur Optimierung des Fahrverhaltens

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Jürgen Hoffmann
aus Plockhorst

Eingereicht am: 10.11.2015

Mündliche Prüfung am: 21.04.2016

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. F. Küçükay
Prof. Dr.-Ing. Ostermeyer

2016

Veröffentlichungen über den Inhalt der Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der Volkswagen AG zugelassen.

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik
TU Braunschweig

Band 46

Jürgen Hoffmann

**Potentiale einer aktiven Achskinematik
zur Optimierung des Fahrverhaltens**

Shaker Verlag
Aachen 2016

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., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4554-3

ISSN 1619-6325

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 Tätigkeit in der Konzernforschung der Volkswagen AG in Wolfsburg. Mein Dank gilt meinen Vorgesetzten und der Volkswagen AG, die mir die Möglichkeit zur Erstellung dieser Dissertationsschrift gegeben haben.

Mein besonderer Dank gilt dem Direktor des Institutes für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig, Prof. Dr.-Ing. F. Küçükay, der mich zu dieser Arbeit ermuntert und sich für die Übernahme des Referats bereit erklärt hat. Auch Herrn Dr.-Ing. Roman Henze und Herrn Dipl. Ing. Waldemar Jarisa möchte ich für die wissenschaftliche Betreuung, die fachlichen Diskussionen und Hinweise, die zum erfolgreichen Verfassen der Arbeit beigetragen haben, herzlich danken.

Mein Dank gilt weiterhin Herrn Prof. Dr.-Ing. Ostermeyer, Direktor des Institutes für Dynamik und Schwingungen der Technischen Universität Braunschweig, für die Betreuung als Koreferent und Herrn Prof. Dr.-Ing. Köhler, Direktor des Institutes für Thermodynamik der Technischen Universität Braunschweig, der den Vorsitz im Promotionsausschuss übernommen hat.

Ein ganz besonderer Dank gilt Herrn Eckhard Babbel und Frau Dr.-Ing. Alexandra Niersmann für die freundschaftliche Unterstützung, die vielen fachlichen Gespräche und aufmunternden Worte, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Auch bei meinen ehemaligen Kollegen bei Volkswagen möchte ich mich für Anregungen, Diskussionen und Unterstützung bei den Fahrversuchen bedanken.

Mein Dank gilt ferner den Herren J. Quedenbaum, C. Kopka und R.Thiessen, die mich im Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten unterstützt haben.

Ganz besonders danke ich auch meiner Frau Heike, die geduldig auf viele Stunden gemeinsamer Freizeit verzichtet hat.

Für meine Tochter Anna

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Aufbau der Arbeit	4
2 Stand der Technik	7
2.1 Grundlagen der Fahrdynamik	7
2.1.1 Das lineare Einspurmodell als Basis für die Synthese des Kurvenfahrverhaltens... 8	
2.1.2 Bewertungsverfahren für die Querdynamik	15
2.1.3 Genormte Fahrmanöver	17
2.1.4 Bewertung subjektiv – objektiv	18
2.2 Dynamisches Wunschverhalten	19
2.2.1 Wunschverhalten der Giergeschwindigkeit	20
2.2.2 Wunschverhalten der Querbeschleunigung	21
2.2.3 Wunschverhalten des stationären Schwimmwinkels	22
2.3 Bewertung der Fahrdynamikeigenschaften im Fahrversuch.....	22
2.3.1 Kriterien der Fahrdynamikbewertung	23
2.3.2 Verwendete Manöver	25
2.3.3 Probandenversuche	27
2.4 Grundlagen der Achsauslegung	28
2.4.1 Achskonzepte	28
2.4.2 Raderhebungskurven	29
2.4.3 Prüfstand zu Messung der Achskinematik.....	31
2.4.4 Benchmark (KnC-Messungen)	33
2.5 Fahrverhaltensbeeinflussung durch Veränderung der Achskinematik.....	39
2.5.1 Einfluss von statischer Spur an der VA auf die Sprungantwort.....	40
2.5.2 Einfluss von statischer Spur an der HA auf die Sprungantwort.....	41
3 Aufbau und Eigenschaften des Versuchsträgers	44
3.1 Das Fahrwerk des Basisfahrzeugs	44
3.2 Realisierung der aktiven Achskinematik.....	45
3.2.1 Spurverstellung an der Vorderachse	46
3.2.2 Spur- und Sturzverstellung an der Hinterachse.....	46
3.2.3 Verstellung des Wanklenkens an der Hinterachse.....	48
4 Gesamtfahrzeugsimulation	51
4.1 Beschreibung des verwendeten Simulationsmodells	51
4.1.1 Zweispurmodell mit Wank- und Nickachse.....	52
4.1.2 Beschreibung der Fahrzeugbewegung	53
4.1.3 Im Modell abgelegte Kennlinien	54
4.1.4 Das verwendete Reifenmodell.....	55
4.2 Simulationsablauf.....	55
4.2.1 Validierung des Simulationsmodells	56
4.2.2 Messtechnik und Versuchsdurchführung.....	57
4.2.3 Das Optimierungstool.....	59
4.2.4 Ergebnisse.....	60
5 Fahrdynamische Potenziale der Achsverstellung	62
5.1 Einfluss der Elastokinematik auf die Fahrdynamik	62
5.1.1 Schnell verstellbare Achskinematik	62

5.1.2 Langsam verstellbare Achskinematik	63
5.2 Kundenrelevante Bereiche der Achsverstellung	64
5.2.1 Ausgewählte Fahrwerkseinstellungen	66
5.2.2 Objektive Bewertung der Fahrwerkseinstellungen	67
5.2.3 Ermittlung der Kennwerte und Interpretation	72
5.3 Erzielbare Nebeneffekte der Achsverstellung	75
5.3.1 Auswirkung von Vorspur auf Niedrigreibwert	76
5.3.2 Auswirkung von Vorspur auf unebener Straße	80
5.4 Ermittlung von CO ₂ -Potenzialen mit der aktiven Achskinematik	81
5.4.1 Beschreibung des Flachbahnprüfstandes	81
5.4.2 Rollwiderstandsmessung unterschiedlicher Fahrwerkseinstellungen	82
6 Beurteilung der Fahrdynamikeigenschaften bei geänderter Achskinematik.....	85
6.1 Auflösungsvermögen durch den Fahrer	86
6.1.1 Versuchsdesign	86
6.1.2 Auswahl der zu untersuchenden Achskinematikparameter	87
6.1.3 Versuchsdurchführung	90
6.1.4 Fühlschwelle der veränderten Achskinematik.....	92
6.1.5 Fühlschwelle der stationären Schwimmwinkelverstärkung	95
6.2 Subjektivbeurteilung unterschiedlicher Fahrwerk-Setups	97
6.2.1 Versuchsdesign	98
6.2.2 Analyse der Rohdaten	102
6.2.3 Klassifizierung und statistische Aufbereitung der Subjektivnoten	106
6.2.4 Korrelations- und Regressionsanalysen	109
6.2.5 Ergebnisse	115
6.3 Subjektivnotenauswertung auf Basis des identifizierten Fahrstils	125
6.3.1 Messdatenverarbeitung	125
6.3.2 Kennparameterbildung.....	126
6.3.3 Korrelationsanalyse	127
6.3.4 Objektive Klassifizierung der Fahrstil-Rangfolge	128
6.3.5 Ergebnisse nach objektiver Fahrstilrangfolge	131
6.3.6 Objektiver Einfluss der Fahrwerk-Setups.....	134
7 Zusammenfassung und Ausblick	136
Literaturverzeichnis	141