

# Entwicklung eines Fahrzeugführungssystems zum Erlernen der Ideallinie auf Rennstrecken

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik  
und Wirtschaftsingenieurwesen der  
Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus  
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

## **Dissertation**

vorgelegt von

Dipl.-Ing. (FH)

**Peter Waldmann**

geboren am 06.10.1977 in München

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Lappus  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Steinberg  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Raymond Freymann

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Dezember 2008



Schriftenreihe des Lehrstuhls Fahrzeugtechnik und -antriebe  
der BTU Cottbus

Band 1

**Peter Waldmann**

**Entwicklung eines Fahrzeugführungssystems  
zum Erlernen der Ideallinie auf Rennstrecken**

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.: Cottbus, BTU, Diss., 2008

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 978-3-8322-8229-5

ISSN 1868-6710

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

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

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand bei der BMW Forschung und Technik GmbH in München.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Steinberg für die Betreuung dieser Arbeit. Darüber hinaus möchte ich Prof. Dr.-Ing. habil. Raymond Freymann, der mir als Leiter der BMW Forschung und Technik GmbH die Durchführung dieser Arbeit ermöglichte, für das entgegenbrachte Vertrauen, das große Interesse und die Übernahme des Koreferates danken.

In besonderer Weise möchte ich Herrn Dr. Dirk Wisselmann, der diese Arbeit initiierte, und Herrn Dr. Helmut Spannheimer für die Unterstützung, für die zahlreichen Diskussionen und Anregungen sowie für die vielen motivierenden Worte danken.

Besonders bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Dr. Kilian Funk, der durch seine fachlich wertvollen Ratschläge und seine stete Diskussionsbereitschaft einen großen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet hat. Gleichzeitig danke ich allen Kollegen für ihre Hilfsbereitschaft und das angenehme Arbeitsklima.

Letztendlich danke ich an dieser Stelle meinen Eltern, ohne deren Unterstützung meine wissenschaftliche Ausbildung in dieser Form nicht möglich gewesen wäre.

München, im Mai 2008

Peter Waldmann



# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Einleitung .....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1. Motivation .....  | 1         |
| 1.2. Ziel der Arbeit .....   | 3         |
| 1.3. Aufbau der Arbeit.....  | 4         |
| 1.4. Stand der Technik des autonomen Fahrens .....                           | 5         |
| <b>2. Die Sollvorgabe – Wahl der Schulungslinie .....</b>                    | <b>11</b> |
| 2.1. Definition der Ideallinie.....  | 11        |
| 2.1.1. Die klassische Ideallinie .....                                       | 11        |
| 2.1.2. Die Renn- oder Kampflinie .....                                       | 12        |
| 2.1.3. Die Sicherheitslinie.....   | 12        |
| 2.1.4. Die zeitoptimale Linie .....  | 14        |
| 2.2. Analytische Überlegungen zur Fahrlinienwahl .....                       | 14        |
| 2.3. Gegenüberstellung der verschiedenen Linientypen in der Simulation.....  | 24        |
| 2.3.1. Das Simulationsmodell.....  | 24        |
| 2.3.2. Ausgewählte Szenarien.....  | 28        |
| 2.3.3. Auswertung der Ergebnisse .....                                       | 30        |
| 2.4. Die Wahl der Schulungslinie.....  | 35        |
| <b>3. Bestimmung der aktuellen Position .....</b>                            | <b>38</b> |
| 3.1. Anforderungen an die Positionsbestimmung.....                           | 38        |
| 3.2. Verfahren zur Positionsbestimmung .....                                 | 39        |
| 3.3. Auswahl der Sensorik.....   | 41        |
| <b>4. Berechnung der Regeldifferenzen .....</b>                              | <b>51</b> |
| 4.1. Die hochgenaue digitale Karte .....                                     | 51        |
| 4.2. Entwicklung eines Algorithmus zur Berechnung der Regeldifferenzen ..... | 54        |
| 4.2.1. Anforderungen an den Berechnungsalgorithmus .....                     | 54        |
| 4.2.2. Beschreibung des Algorithmus.....                                     | 54        |
| 4.2.3. Zusammenfassung der Ergebnisse.....                                   | 57        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>5. Die eingesetzte Aktuatorik.....</b>   | <b>58</b>  |
| 5.1. Aufbau des Versuchsträgers .....   | 58         |
| 5.2. Die Lenkung .....  | 60         |
| 5.3. Die Bremse und der Antriebsstrang.....                                       | 62         |
| <b>6. Der Reglerentwurf.....</b>  | <b>63</b>  |
| 6.1. Anforderungen an die Regelung.....   | 63         |
| 6.2. Bekannte Verfahren zur Folgeregelung im Grenzbereich.....                    | 64         |
| 6.3. Reglerentwurf zur Querführung .....  | 65         |
| 6.3.1. Das dynamische Zustandsmodell mit Störgrößenaufschaltung.....              | 66         |
| 6.3.2. Das Gütefunktional.....  | 71         |
| 6.3.3. Lösung der Optimierungsaufgabe mittels dynamischer<br>Programmierung ..... | 72         |
| 6.3.4. Einfluss der Optimierungsparameter .....                                   | 79         |
| 6.3.5. Anwendung auf die Querführungsaufgabe.....                                 | 83         |
| 6.4. Das Längsreglerkonzept .....   | 85         |
| 6.5. Validierung des Querreglers in der Simulation .....                          | 87         |
| 6.5.1. Simulationsumgebung des Zweispurmodells.....                               | 88         |
| 6.5.2. Stabilität und Systemverhalten des geschlossenen Regelkreises .....        | 90         |
| 6.5.3. Performanz des Querreglers .....   | 92         |
| 6.5.4. Variation der Modellparameter des Einspurmodells.....                      | 94         |
| 6.5.5. Untersuchung des Totzeitverhaltens der Positionsbestimmung .....           | 95         |
| 6.6. Validierung der Regler im Versuchsfahrzeug .....                             | 95         |
| 6.6.1. Sicherheitskonzept.....  | 96         |
| 6.6.2. Performanz des Längsreglers.....   | 98         |
| 6.6.3. Performanz des Querreglers .....   | 99         |
| 6.7. Zusammenfassung der Ergebnisse.....  | 102        |
| <b>7. Anwendung im Fahrertraining .....</b>                                       | <b>103</b> |
| 7.1. Die vier konventionellen Übungsszenarien.....                                | 103        |
| 7.2. Phase 1 - Autonomes Vorfahren.....   | 104        |
| 7.3. Phase 2 - Online Feedback .....  | 105        |
| 7.4. Phase 3 - Offline Auswertung .....   | 107        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>8. Zusammenfassung und Ausblick .....</b> | <b>110</b> |
| <b>Literaturverzeichnis .....</b>            | <b>113</b> |
| <b>Liste der Formelzeichen.....</b>          | <b>118</b> |