Ein Beitrag zur robusten mehrkriteriellen Optimierung des Schaltablaufs von Automatikgetrieben

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

M.Sc. Andreas Wurm

geboren am 20. Mai 1987 in Freudenberg

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Peter Steinberg
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Dieter Bestle
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Burghard Voß

Tag der mündlichen Prüfung: 13.11.2015

Berichte aus der Fahrzeugtechnik

Andreas Wurm

Ein Beitrag zur robusten mehrkriteriellen Optimierung des Schaltablaufs von Automatikgetrieben

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.: Cottbus-Senftenberg, BTU, Diss., 2015

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 978-3-8440-4171-2
ISSN 0945-0742

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Technische Mechanik und Fahrzeugdynamik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg im Rahmen einer Kooperation mit der IAV GmbH. Einen wesentlichen Anteil am Gelingen dieser Arbeit hat Prof. Dr.-Ing. habil. Dieter Bestle. Vielen Dank für die zahlreichen fachlichen Diskussionen und die investierte Zeit für gemeinsame Veröffentlichungen und Vorträge.

Ebenso danke ich dem Prüfungsvorsitzenden Prof. Dr.-Ing. Peter Steinberg für die Gestaltung der Disputation und dem zweiten Gutachter dieser Arbeit Prof. Dr.-Ing. Burghard Voß. Beide haben sich ohne Zögern bereit erklärt, die jeweilige Aufgabe zu übernehmen.

Ohne die Unterstützung der IAV GmbH wäre diese Arbeit nicht zu Stande gekommen. Hier bedanke ich mich besonders bei Dr.-Ing. Thieß-Magnus Wolter und Dr.-Ing. Klaus von Rüden für die weitreichende Unterstützung meiner Forschungstätigkeit. Ihr habt alle nötigen Mittel zur Verfügung gestellt, die den Erfolg dieser Arbeit ermöglichten. Ich danke ebenfalls dem Team MO-G11 für die gute Zusammenarbeit und die vielen inspirierenden Gespräche, wodurch ich nicht nur meinen fachlichen Horizont stets erweitern konnte. Besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Sebastian Kahlbau, Dr.-Ing. Felix Matthies und Dr. rer. nat. Frank Mertins. Ihr seid jederzeit wertvolle Ansprechpartner bei der Erläuterung technischer Fragestellungen.

Ein weiterer Dank gilt dem Lehrstuhl Technische Mechanik und Fahrzeugdynamik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg mit all seinen Mitarbeitern, die mich über die Jahre meiner Tätigkeit immer wieder mit vielen konstruktiven Ideen und Problemlösungen unterstützt haben. An diese Stelle möchte ich mich besonders bei Lutz Anklam für seine Hilfe bei der Lösung aufgetretener IT-Probleme bedanken und bei Peggy Fobo, die oftmals Licht ins Dunkle der Universitätsbürokratie gebracht hat.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Familie und meinen Freunden sehr danken, die einen wesentlichen Beitrag zur fortwährenden Motivation geleistet haben.

Kurzfassung

Ein Beitrag zur robusten mehrkriteriellen Optimierung des Schaltablaufs von Automatikgetrieben

Schlüsselwörter: Automatisierte Getriebeapplikation, Mehrkriterien-Optimierung, Robustheit, Reihenfolgeoptimierung von Fahrmanövern

Auf dem Gebiet der automatisierten Getriebeapplikation hat sich das Konzept der numerischen Optimierung als vielversprechende Unterstützung des Ingenieurs erwiesen. Durch die automatisierte Suche nach optimalen Lösungen für die Bedatung von Schaltablaufparametern kann die Qualität des Schaltablaufs und die Effizienz des Getriebeapplikationsprozesses gesteigert und somit dem stetig wachsenden Applikationsaufwand Rechnung tragen werden.

Die hier automatisiert ermittelten Entwürfe sind heutzutage jedoch meist noch Ergebnis von zeitaufwendigen und störanfälligen Prüfstandsversuchen in Verbindung mit experimenteller Modellbildung. Zudem kann eine rein auf Determinismus basierende Auslegung des automatisierten Applikationsprozesses den Anforderungen aus der Praxis nur begrenzt genügen, da die Eigenschaften technischer Systeme in der Realität streuen, aber häufig nur das ideale Verhalten betrachtet wird.

Daher ist ein wesentlicher Aspekt dieser Arbeit, Strategien und Prozesse für die robuste automatisierte Getriebeapplikation zu entwickeln. Es wird gezeigt, wie sich die Bewertung der Schaltqualität vom Fahrversuch in die Simulation verlagern lässt und eine geeignete Parametrisierung der Schaltablaufparameter eine deutliche Reduktion der Entwurfsvariablen erlaubt, was im Gegenzug zu einer guten Lösungsqualität führt. Zudem liefert eine Überführung der deterministischen Problemformulierung zur probabilistischen Darstellung robustere Lösungen. Dabei trägt die Verwendung von Ersatzmodellen zur erheblichen Rechenzeitreduktion bei und demonstriert die Machbarkeit auch im Bereich einer industriellen Anwendung. Weiterhin wird gezeigt, wie durch eine Reihenfolgeoptimierung die Zeit für das Anfahren von Fahrmanövern reduziert wird. Die untersuchten Optimierungsmethoden sind nicht nur für die simulationsbasierte automatisierte Getriebeapplikation, sondern auch für Prüfstands- oder Fahrversuche geeignet.

Abstract

A contribution to robust multi-criteria gear shift optimization of automatic transmissions

Keywords: automated transmission calibration, multi-criteria optimization, robustness, sequence optimization of driving maneuvers

In the field of automated transmission calibration, the concept of numerical optimization has proven to be a promising support tool for the engineer. Through the automated search for optimal values for the shifting parameters, the quality of the shift procedure and the efficiency of the transmission calibration process can be increased significantly, thus contributing to the reduction of the ever-growing costs and effort.

Nowadays, the designs are mostly the result of time-consuming and failure prone bench tests in conjunction with experimental modeling. In addition, a pure determinism based interpretation of the automated calibration process can only partly meet the requirements of practical application because in reality the properties of technical systems scatter, whereas mostly only the ideal behavior is considered.

Therefore, an important aspect of this work is to develop strategies and processes for robust automatic transmission calibration. It is shown how driving tests and the evaluation of the shift quality can be frontloaded to simulation, and that an appropriate parameterization of the shifting parameters allows a significant reduction of design variables, which in turn leads to a good solution quality. In addition, a transfer of the deterministic problem formulation to a probabilistic representation provides more robust solutions. The use of surrogate models considerably reduces computing time and demonstrates the feasibility in the field of industrial application. Furthermore, it is shown that the time for traveling through a test plan of driving maneuvers can be reduced by combinatorial optimization. The studied optimization methods are not only suitable for the simulation-based automatic transmission calibration, but also for test bench or driving tests.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis **XI**

Abkürzungen **XVII**

1 Einleitung **1**

1.1 Stand der Technik in der Getriebeapplikation 3
1.2 Motivation und Zielsetzung der Arbeit 11

2 Automatisierung des manuellen Getriebe-Applikationsprozesses **13**

2.1 Applikation des Schaltablaufs als Mehrkriterien-Optimierungsproblem 13
2.2 Verwendung evolutionärer Optimierungsverfahren zur Problemlösung 20
2.3 Verlagerung des Fahrversuchs von der Straße in die Simulation 27

3 Optimierung von Kennlinien und Kennfeldern zur Applikation des Schaltablaufs **39**

3.1 Effiziente Parametrisierung von Kennlinien und Kennfeldern 39
3.2 Formulierung des Mehrkriterien-Optimierungsproblems 45
3.3 Optimierung des Schaltablaufs am Beispiel einer 2-3 Zug-Hoch-Schaltung 49
3.4 Optimierung des Schaltablaufs am Beispiel einer 3-2 Zug-Rück-Schaltung 62

4 Robustheitsbasierte Optimierung bei unsicheren Betriebszuständen **71**

4.1 Unsicherheiten im Antriebsstrang und ihre Auswirkung auf die Schaltqualität 72
4.2 Übergang von der deterministischen zur robusten Mehrkriterien-Optimierung 80
4.3 Ersatzmodellgestützte statistische Bewertung der Schaltqualität 81
4.4 Robuste Optimierung am Beispiel einer 2-3 Zug-Hoch-Schaltung 87

5 Optimierung der Reihenfolge anzufahrender Betriebspunkte 93

5.1 Anfahren von Betriebspunkten als kombinatorisches Optimierungsproblem 93
5.2 Heuristiken zur Lösung kombinatorischer Optimierungsprobleme 97
5.3 Ermittlung der Konditionierungszeiten zwischen einzelnen Betriebspunkten 102
5.4 Reihenfolgeoptimierung am Beispiel unterschiedlicher Versuchspläne 108

6 Zusammenfassung und Bewertung 113

Anhang 117

A.1 Optimierung des Schaltablaufs am Beispiel einer 3-2 Schub-Rück-Schaltung 117
A.2 Optimierung des Schaltablaufs am Beispiel einer 2-3 Schub-Hoch-Schaltung 119

Abbildungsverzeichnis 123

Tabellenverzeichnis 129

Literaturverzeichnis 131