Schriftenreihe
des Instituts für
Fahrzeugtechnik
TU Braunschweig

Nr: 72

M.Sc.
Christian Oliver Dorsch
2021

Analyse der Anfahrqualität elektrifizierter Antriebe

Herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay

Analyse der Anfahrqualität elektrifizierter Antriebe

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von:	Christian Oliver Dorsch
geboren in:	Braunschweig

eingereicht am:	30.11.2020
mündliche Prüfung am:	19.07.2021

Vorsitz:	Prof. Dr. L. Frerichs
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. F. Küçükay
	Prof. Dr.-Ing. P. Eilts

2021

Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik
TU Braunschweig

Band 72

Christian Oliver Dorsch

Analyse der Anfahrqualität elektrifizierter Antriebe

Shaker Verlag
Düren 2021

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., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8177-0
ISSN 1619-6325

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 • E-Mail: info@shaker.de

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig.

An dieser Stelle möchte ich mich ausdrücklich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay, Direktor des Instituts für Fahrzeugtechnik, bedanken. Das Entstehen dieser Arbeit war erst durch das von ihm mir entgegengebrachte Vertrauen, die zahlreichen Möglichkeiten mich fachlich und überfachlich weiterzubilden sowie die geführten Diskussionen möglich. Darüber hinaus gilt mein Dank Prof. Dr. Ludger Frerichs, Leiter des Instituts für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission sowie Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts, Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen, für die Übernahme des Zweitgutachtens in diesem Promotionsverfahren.

Ich möchte mich außerdem bei den zahlreichen Kolleginnen und Kollegen aus dem Sekretariat und der Werkstatt bedanken. Stellvertretend danke ich Kathrin Durner und Maic Rennebach für die tatkräftige und kompetente Unterstützung bei organisatorischen und fachlichen Vorhaben. Des Weiteren danke ich den anderen wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für die freundschaftliche und motivierende Zusammenarbeit sowie speziell Dr.-Ing. Gunther Alvermann und Christian Sieg für das Korrekturlesen dieser Arbeit. Ganz besonders möchte ich mein eigenes Team hervorheben und danke dazu stellvertretend Matthias Ristau, der in den letzten Jahren zu einem guten Freund geworden ist.

Ohne die Unterstützung aus meinem privaten Umfeld wäre die Anfertigung dieser Arbeit kaum möglich gewesen. Daher möchte ich mich bei meinen Freunden bedanken, die mich teilweise seit meiner Kindheit begleiten und mir nach wie vor zur Seite stehen. Stellvertretend Patrick, Philip, Nils, Timo, Christian, Lukas, Holger und Volker. Weiterhin danke ich meiner Familie und besonders meinen Eltern, Edeltraut und Peter Dorsch, die mir stets jegliche Hilfe haben zukommen lassen und speziell meinem Vater, für die Geduld beim Korrekturlesen dieser Arbeit. Ferner bedanke ich mich bei meinem Bruder Benjamin und der Familie meiner Partnerin Vui Nghi. Ihre Geschwister Tu Nghi, Tien Kien und Vi Kien haben mich immer unterstützt. Abschließend gilt mein größter Dank meiner Partnerin Vui Nghi für ihre motivierende und hilfsbereite Art in allen Lebenslagen. Sie hat mir die Zuversicht und die Energie gegeben, diese Arbeit anzufertigen und mir stets Verständnis und Unterstützung entgegengebracht.

Braunschweig, im Juli 2021 Christian Dorsch

Analyse der Anfahrqualität elektrifizierter Antriebe

von Christian Oliver Dorsch

Kurzfassung

Mit zunehmender Elektrifizierung der Antriebe entstehen neue Anforderungen an das längsdynamische Fahrzeugverhalten und dessen Abstimmung. Während bei Hybridfahrzeugen die mechanische Komplexität tendenziell zunimmt und damit der Aufwand im Abstimmungsprozess steigt, reduziert sich dieser Aufwand bei elektrischen Fahrzeugen ohne Verbrennungsmotor durch den möglichen Verzicht auf Anfahr- und Schaltelemente. Ferner steigen die Erwartungen der Kunden an ein dynamischeres und zugleich komfortableres Fahrzeugverhalten.
Das Anfahren stellt einen häufigen und zugleich technisch anspruchsvollen Vorgang im Kundenbetrieb dar. In der vorliegenden Arbeit wird zunächst ein Vergleich zwischen synthetischen Anfahrten für den Abstimmungsprozess und repräsentativen Anfahrten auf Basis von Dauerlaufdaten vorgestellt. Es wird erläutert, weshalb die Einbeziehung des tatsächlichen Kundenverhaltens bei der Abstimmung sinnvoll ist. Darauf aufbauend wird eine Methodik beschrieben, mithilfe der das kundennahe Anfahrverhalten analysiert und repräsentative Anfahrkollektive abgeleitet werden können. Diese Kollektive können eingesetzt werden, um die Einflüsse der Antriebsabstimmung hinsichtlich des Kundennutzungsverhaltens zu bewerten.
Zur Bestimmung der Anfahrqualität und Identifizierung von Optimierungspotenzialen werden sowohl ein Objektivnotenmodell, als auch die eigens eingeführte Beschleunigungsgüte eingesetzt. Diese Kennzahl ermöglicht einen einfachen und schnellen Vergleich der Dynamik zwischen einem idealen und dem tatsächlichen Beschleunigungsaufbau. Mithilfe dieser beiden Bewertungswerkzeuge wird das Anfahrverhalten bei Straßenmessungen von zwei konventionellen, einem hybridischen und einem elektrischen Fahrzeug quantifiziert und gegenübergestellt. Anschließend wird ein Fahrzeugmodell zur Simulation des Anfahrverhaltens elektrischer Fahrzeuge beschrieben und mit Messdaten synthetischer Anfahrten validiert.
Nach einer Sensitivitätsanalyse des Simulationsmodells mit softwareseitigen und konstruktiven Variationsparametern erfolgt die Simulation und objektive Bewertung von repräsentativen Anfahrten. Die Ergebnisse werden mit der Auswertung der synthetischen Anfahrten verglichen und diskutiert. Es zeigt sich, dass im Kundenbetrieb nur ein kleiner Teil des möglichen Betriebsbereichs genutzt wird. Außerdem werden Optimierungspotenziale herausgearbeitet und das Ansprechverhalten des Antriebs mithilfe eines Optimierungsalgorithmus hinsichtlich der Objektivnoten verbessert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Anfahrqualität elektrischer Fahrzeuge weiter verbessert werden kann und dass die Berücksichtigung des tatsächlichen Kundenverhaltens im Rahmen des Abstimmungsprozesses zu einem besseren Verständnis der Anforderungen an das Anfahren beitragen kann.

Analysis of the Launch Quality of Electrified Drivetrains

by Christian Oliver Dorsch

Abstract

With the increasing electrification of drivetrains, new demands are made on the longitudinal dynamic vehicle behavior and its calibration. While the mechanical complexity of hybrid vehicles tends to grow and thus the effort in the calibration process increases, this effort is reduced in the case of electric vehicles without an internal combustion engine due to the possible dispensing with launch and shift elements. Concurrently, customers' expectations of an even more dynamic and yet more comfortable vehicle behavior rise.

The launch is a frequent and at the same time technically demanding process during the customer operation. In the present thesis, a comparison between synthetic approaches for the calibration process and representative approaches based on endurance data is given. It is explained why it makes sense to include actual customer usage behavior in the calibration. Building on this, a methodology is described with which the customer-oriented launch behavior can be analyzed and representative launch collectives can be derived. These collectives can be used to evaluate the influences of the drivetrain calibration with regard to customer usage behavior. To determine the launch quality and identify optimization potentials, both an objective rating model and the specially introduced figure acceleration quality are used. This figure enables a simple and quick comparison of the dynamics between an ideal and the actual acceleration build-up. With the help of these two evaluation tools, the launch behavior in road measurements of two conventional, one hybrid and one electric vehicle is quantified and compared. Then a vehicle model for simulating the launch behavior of electric vehicles is described and validated with measurement data from synthetic launches.

After a sensitivity analysis of the simulation model with software and design variation parameters, the simulation and objective evaluation of representative approaches takes place. The results are compared with the evaluation of the synthetic approaches and discussed. It turns out that only a small part of the possible operating area is used in customer operations. In addition, optimization potentials are shown and the response behavior of the drivetrain is improved with the help of an optimization algorithm with regard to the objective ratings. The results show that the launch quality of electric vehicles can be further improved and that taking actual customer behavior into account as part of the calibration process can contribute to a better understanding of the launch requirements.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen iii

1 Einführung 1

1.1 Zielsetzung . . . 3
1.2 Aufbau der Arbeit . . . 4

2 Stand der Technik 7

2.1 Fahrzeugantriebe . . . 7
2.1.1 Konventionell . . . 7
2.1.2 Hybridisch . . . 13
2.1.3 Elektrisch . . . 16
2.2 Objektivierung der Fahrbarkeit . . . 17
2.2.1 Anwendungsbereiche . . . 19
2.2.2 Objektivnotenmodell für das Anfahren . . . 21
2.3 3F-Methodik . . . 26
2.4 Statistische Datenanalyse . . . 28
2.4.1 Proximitätsmaße . . . 29
2.4.2 Cluster-Algorithmen . . . 30
2.4.3 Zeitreihen-Clustering . . . 32
2.5 Ergebnisse der Literaturrecherche . . . 32

3 Charakterisierung des Anfahrens 35

3.1 Definition des Anfahrens . . . 35
3.1.1 Startzeitpunkt . . . 35
3.1.2 Endzeitpunkt . . . 37
3.2 Synthetische Anfahrvorgänge . . . 38
3.3 Repräsentative Anfahrvorgänge . . . 39
3.3.1 Geschwindigkeitsregelung durch den Fahrer . . . 40
3.3.2 Motor- und Getriebesteuerung . . . 41
3.4 Ermittlung repräsentativer Anfahrkollektive . . . 42
3.4.1 Definition des 3F-Parameterraums . . . 43
3.4.2 Messdatenfilterung . . . 47
3.4.3 Hauptkomponentenanalyse . . . 47

3.4.4 Clusteranalyse 50
3.4.5 Repräsentatives Anfahrkollektiv 52

4 Bestimmung der Anfahrqualität 55
4.1 Potenzial elektrifizierter Antriebe 55
4.2 Beschleunigungsgüte 56
4.3 Messungen mit Realfahrzeugen 58
4.3.1 Versuchsträger 58
4.3.2 Messdurchführung 60
4.3.3 Ergebnisse der Objektivierung 62
4.4 Simulationsmodell für das Anfahren 71
4.4.1 Aufbau des Modells 71
4.4.2 Validierung des Modells 79

5 Analyse der Anfahrqualität 87
5.1 Sensitivitätsanalyse 87
5.1.1 Variation des PT_2-Glieds 88
5.1.2 Variation der Aufbaufederung und -dämpfung 92
5.1.3 Variation der Schwerpunktlage 94
5.1.4 Fazit der Sensitivitätsanalyse 94
5.2 Simulation repräsentativer Anfahrten 95
5.2.1 Vergleichbarkeit der Fahrzeugreaktion 95
5.2.2 Versuchsraum 97
5.2.3 Einfluss des Fahrstils 99
5.2.4 Einfluss der Zielgeschwindigkeit 101
5.2.5 Fazit der Simulation repräsentativer Anfahrten 103
5.3 Optimierung 104
5.3.1 Vorgehensweise 104
5.3.2 Optimierung der Gesamtnote 106
5.3.3 Optimierung des Komforts und der Dynamik 108
5.3.4 Fazit der Optimierung 110

6 Zusammenfassung 113

Literaturverzeichnis 117

Anhang 127