

Schriftenreihe
des Instituts für
Fahrzeugtechnik
TU Braunschweig



Nr: 79

M.Sc.
Matthias Werra
2023

Potentiale prädiktiver Betriebsstrategien für elektrifizierte Antriebe

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

Potentiale prädiktiver Betriebsstrategien für elektrifizierte 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:	Matthias Werra
geboren in:	Braunschweig
eingereicht am:	05.05.2022
mündliche Prüfung am:	25.11.2022
Vorsitz:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Köhler
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükkay
	Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts

Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik
TU Braunschweig

Band 79

Matthias Werra

**Potentiale prädiktiver Betriebsstrategien
für elektrifizierte Antriebe**

Shaker Verlag
Düren 2023

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., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8894-6

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

Danksagung

Die vorliegende Dissertation ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig entstanden. Mein besonderer Dank gilt zuallererst meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay. Die zahlreichen fachlichen Abstimmungen in Forschungsprojekten und in der Lehre, die abwechslungsreichen Aufgaben und das ununterbrochen entgegengebrachte Vertrauen bei sämtlichen Tätigkeiten am Institut haben maßgeblich zu meiner fachlichen und insbesondere persönlichen Weiterentwicklung beigetragen.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts, Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Braunschweig, für die Übernahme der Mitberichterstattung sowie die zahlreichen fachlichen Abstimmungen bei Forschungsanträgen. Mein Dank gilt ebenfalls Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Köhler, Leiter des Instituts für Thermodynamik der Technischen Universität Braunschweig, für die Übernahme des Vorsitzes in diesem Promotionsverfahren.

Besonders bedanke ich mich bei Arno Ringleb für die jahrelange und ausnahmslos gute Zusammenarbeit in verschiedenen Projekten, den fachlichen Austausch im Rahmen dieser Dissertation sowie das intensive Korrekturlesen und vor allem den privaten Austausch auch außerhalb des Instituts. Weiterhin danke ich Axel Sturm und Johannes Hengst für die wertvollen fachlichen Gespräche, das Korrekturlesen meiner Dissertation sowie den unzähligen privaten Austausch. Christian Sieg, Marcel Sander, Mingfei Li und Tim Seidel danke ich für die gute Zusammenarbeit.

Weiterhin will ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für den fachlichen und überfachlichen Austausch danken – ob im Büro oder in der Kaffeeküche. Allen voran danke ich Kathrin Durner und Sylvie Rohde-Schulte für die Unterstützung in jeglichen institutsbezogenen Belangen. Maic Rennebach, Leiter des Technikums, danke ich für den offenen Austausch, die ununterbrochene Unterstützung in jeglichen Projektphasen und die privaten Ratschläge. Besonders hervorheben will ich die Auf- und Abbauten am Rollenprüfstand mit Katharina Rohrbach.

Ganz besonderer Dank gilt meinen langjährigen Freunden für die Motivation und die moralische Unterstützung in den letzten Jahren – allen voran Christian Degenhardt. Meiner Familie danke ich für die endlose Unterstützung und das entgegengebrachte Verständnis. Mama, Papa und Marvin: Danke, dass ihr mich bei diesem Vorhaben so unterstützt habt.

Unmessbarer Dank gilt meiner Partnerin Carolin Unger für die andauernde Unterstützung und Motivation sowie die Übernahme tagtäglicher Aufgaben. Ohne das Verständnis und die Geduld während der vielen Stunden der Abwesenheit und den entgegengebrachten nötigen Ausgleich wäre dieses Vorhaben nicht möglich gewesen – Danke!

Potentiale prädiktiver Betriebsstrategien für elektrifizierte Antriebe

von Matthias Werra

Kurzfassung

Die 48V-Elektrifizierung von Fahrzeugantrieben ist eine wichtige Technologie zur Reduktion von CO₂-Emissionen. Höchst effiziente Betriebsstrategien von 48V-Hybridantrieben müssen die vielfältigen Fahrleistungsanforderungen des Kundenbetriebs an die Antriebsstrangkomponenten und die während des Betriebs ausgestoßenen Schadstoffe berücksichtigen. Die Kenntnis bevorstehender Fahrsituationen ermöglicht eine Minimierung von CO₂- und Schadstoffemissionen. In dieser Arbeit wird eine prädiktive Betriebsstrategie entwickelt und das Potential im Kundenbetrieb bei der Optimierung von CO₂- und Schadstoffemissionen unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens des Verbrennungsmotors und des Abgasnachbehandlungssystems aufgezeigt.

Zur Abbildung eines realitätsnahen Fahrzeugverhaltens im Kundenbetrieb wird ein Gesamtfahrzeugmodell für 48V-Hybridantriebe mit einer CO₂-optimalen Betriebsstrategie entwickelt. Thermische Modelle des Verbrennungsmotors und des Abgasnachbehandlungssystems erlauben die Berücksichtigung relevanter thermischer Einflüsse in der Gesamtbetrachtung. Ein temperaturabhängiges Partikelemissionsmodell wird mittels künstlicher neuronaler Netze aufgebaut und verifiziert, um zeitgleich eine Optimierung von CO₂- sowie Partikelemissionen zu ermöglichen.

Auf Basis von Fahrzeugmessungen wird eine Fahrprofilprädiktion aufgebaut, um vorausliegende Fahrprofile auf Routen zu präzisieren. Hierfür werden Fahrmanöver im Kundenbetrieb definiert und mit Kennparametern charakterisiert. Es werden Kennparameterstatistiken erzeugt, um beliebige Routen durch Fahrmanöver zu modifizieren, die als Basis für Abschätzungen bevorstehender Fahrleistungsanforderungen an die Antriebsstrangkomponenten dienen.

Eine entwickelte prädiktive Komponente der Betriebsstrategie adaptiert interne Steuerparameter vor Fahrtbeginn, sodass kritische Betriebszustände von Antriebsstrangkomponenten während der Fahrt vermieden werden. Hierfür werden kritische Fahrprofilarten und Maßnahmen zur gezielten Vermeidung daraus resultierender kritischer Betriebszustände definiert. Die Partikelemissionen und das thermische Verhalten werden anhand präzisierter Fahrprofile auf einer Route mittels künstlicher neuronaler Netze abgeschätzt. Eine Schnittstelle transformiert die Abschätzung in konkrete Handlungsanweisungen zur Adaption der Steuerparameter der Betriebsstrategie.

Eine Potentialanalyse zeigt, dass die entwickelte prädiktive Betriebsstrategie die CO₂- und Partikelemissionen im Kundenbetrieb effektiv reduziert und das thermische Verhalten des Verbrennungsmotors sowie des Katalysators optimiert. Temperaturschwellen zum optimalen Betrieb der abgebildeten Komponenten werden auf einer Route deutlich früher erreicht. Die Partikelemissionen können bei hohen Leistungsanforderungen bei lediglich geringer Erhöhung der CO₂-Emissionen effizient reduziert werden. Zusätzlich werden verschiedene Parametrierungen der prädiktiven Betriebsstrategie miteinander verglichen und der Einfluss der Umgebungstemperatur und des Fahrstils auf das Optimierungspotential diskutiert. Auf Basis der Potentialanalyse werden abschließend anwendungsspezifische, optimale Parametrierungen für den Kundenbetrieb abgeleitet.

Potentials of predictive operating strategies for electrified drives

by Matthias Werra

Abstract

To reduce CO₂ emissions, 48V electrification of drive systems is an essential technology. Highly efficient operation strategies of 48V hybrid drive systems have to consider a variety of requirements in customer use regarding driving performance as well as emitted pollutants in vehicle operation. The knowledge of upcoming driving situations enables a minimization of CO₂ emissions and pollutants. In this thesis, potentials of a predictive operating strategy regarding the optimization of CO₂ emissions and pollutants in customer use are analyzed taking into account thermal behavior of relevant drive system components in terms of CO₂ emissions and pollutants.

In order to represent a realistic vehicle behaviour in customer use, a model of a complete vehicle for 48V hybrid drive systems with an CO₂ optimal operating strategy is developed. Thermal models are implemented to take into account thermal behaviour of the internal combustion engine and the catalyst. To optimize CO₂ and particle emissions simultaneously, a temperature-dependent particle emission model is generated by neural networks and verified afterwards.

Based on vehicle measurements, a driving profile prediction is implemented. With this, future driving profiles on a route can be predicted. For this, driving manoeuvres in customer use are identified and described by characteristic parameters. Statistics for these characteristic parameters are created in order to modify any route by driving manoeuvres. This is the basis for an estimation of upcoming requirements regarding driving performance of powertrain components.

A predictive operating strategy component is developed which adapts internal control parameters before a start of a trip to prevent critical operating conditions of powertrain components while driving. For this purpose, critical operating conditions of powertrain components and measures for targeted prevention of these conditions are defined. Neural networks are implemented in order to estimate thermal behaviour of considered components and particle emissions based on a predicted driving profile. An interface is developed to transform the calculated estimations into instructions to adapt control parameters of the operating strategy.

A potential analysis shows that the developed predictive operating strategy reduces CO₂ and particle emissions effectively and optimizes thermal behaviour of the internal combustion engine and the catalyst. Temperature thresholds for optimal operation of the considered components are reached earlier on a route. With high performance requirements, particle emissions are reduced efficiently with CO₂ emissions only slightly increased. Additionally, different parameterisations of the predictive operating strategy are compared with each other and the impact of ambient temperature and driving style on the potential for optimization is discussed. Finally, application-specific and optimal parameterisations are derived for customer use based on the results of the potential analysis.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Formelzeichen und Abkürzungen	iii
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation und Ziele der Arbeit	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
2 Theoretische Grundlagen.....	5
2.1 Hybride Antriebsstränge.....	5
2.1.1 Hybridfunktionen.....	5
2.1.2 Antriebsstrangtopologien und Elektrifizierungsgrade.....	7
2.1.3 Betriebsstrategien für Hybridfahrzeuge.....	9
2.2 Ottomotorische Grundlagen.....	11
2.2.1 Abgaszusammensetzung.....	11
2.2.2 Abgasnachbehandlung.....	12
2.3 Künstliche neuronale Netze.....	13
2.3.1 Maschinelles Lernen.....	13
2.3.2 Aufbau und Funktionsweise.....	14
2.3.3 Training und Bewertung.....	15
2.4 3F-Methodik.....	16
3 Stand der Forschung.....	19
3.1 Optimierung von Hybridfahrzeugen durch Fahrprofilprädiktion	19
3.2 Einordnung und Abgrenzung der Arbeit	23
4 Gesamtmethodik und Datenbasis.....	25
4.1 Toolkette	25
4.2 Verwendete Datenbasis.....	28
4.2.1 Messdaten aus Fahrzeugmessungen.....	29
4.2.2 Digitale Kartendaten	30
4.2.3 Höhendatenbank	32
4.3 Zusammenfassung des Kapitels.....	33
5 Modellierung eines 48V-Hybridfahrzeugs.....	35
5.1 Simulationsmodell MOVE3F.....	35
5.2 48V-Hybridfahrzeug.....	39
5.2.1 Fahrumgebung und Fahrer	40
5.2.2 Fahrzeugmodell.....	40
5.2.3 Validierung des Fahrzeugmodells.....	46
5.3 Thermische Modellierung.....	49
5.3.1 Aufbau des thermischen Modells.....	49

5.3.2	Validierung des thermischen Modells.....	52
5.4	Modellierung von Partikelemissionen.....	54
5.5	Zusammenfassung des Kapitels.....	59
6	Fahrprofilprädiktion im Kundenbetrieb	61
6.1	Methodik zur Erstellung von Referenzfahrprofilen und prädizierten Fahrprofilen	61
6.2	Fahrmanöver im Kundenbetrieb.....	63
6.2.1	Definition betrachteter Fahrmanöver.....	63
6.2.2	Kennparameter von Fahrmanövern	66
6.2.3	Statistikerstellung für Kennparameter der Fahrmanöver	69
6.3	Modifikation von Basisfahrprofilen	70
6.4	Parameter modifizierter Fahrprofile	73
6.5	Zusammenfassung des Kapitels.....	75
7	Prädiktive Betriebsstrategie für 48V-Hybridfahrzeuge	77
7.1	Methodik zur prädiktiven Steuerung der Betriebsstrategie	78
7.2	Steuerparameter der prädiktiven Betriebsstrategie	80
7.2.1	Betrachtetes 48V-Hybridfahrzeug.....	80
7.2.2	Kritische Fahrprofilarten im Kundenbetrieb.....	81
7.2.3	Maßnahmen zur Vermeidung der kritischen Fahrprofilarten.....	86
7.2.4	Auswahl relevanter Steuerparameter	87
7.3	Steuerung der Betriebsstrategie durch künstliche Intelligenz.....	88
7.3.1	Erzeugung von Trainingsdaten	88
7.3.2	Struktur, Training und Bewertung der künstlichen neuronalen Netze	90
7.4	Adaption von Steuerparametern der Betriebsstrategie.....	96
7.5	Zusammenfassung des Kapitels.....	98
8	Potentiale der prädiktiven Betriebsstrategie.....	99
8.1	Potentiale und Herausforderungen von 48V-Hybridfahrzeugen im Kundenbetrieb.....	99
8.2	Analyse von Steuerparameterapplikationen	102
8.2.1	Optimale VKM-Zuschaltgrenze und Stärke der Lastpunktanhebung	103
8.2.2	Optimale Stärke der Lastpunktabsenkung.....	108
8.3	Einflüsse auf die Steuerparameteradaption	111
8.3.1	Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Steuerparameteradaption	111
8.3.2	Einfluss des Fahrstils auf die Steuerparameteradaption	113
8.4	Vermeidung kritischer Betriebszustände durch Prädiktion	116
8.4.1	Niedrige Leistungsanforderung auf einer Route	117
8.4.2	Hohe Leistungsanforderung auf einer Route	119
8.4.3	Kritisches Fahrmanöver zu Beginn einer Route.....	121
8.5	Fazit der Potentialanalyse prädiktiver Betriebsstrategien für 48V-Hybridfahrzeuge	123
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	127
	Literaturverzeichnis	131
	Anhang.....	141