



Entwicklung einer Methode zur Verkürzung des modellbasierten
Applikationsprozesses in der Großmotorenentwicklung

Christian Friedrich

Entwicklung einer Methode zur Verkürzung des modellbasierten Applikationsprozesses in der Großmotorenentwicklung

Christian Friedrich



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen

**Entwicklung einer Methode
zur Verkürzung des
modellbasierten Applikationsprozesses
in der Großmotorenentwicklung**

-

Übertrag vom Einzylinder- auf den Vollmotor
mittels generierter Transferfunktionen

Christian Friedrich

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Rolf Isermann, Technische Universität Darmstadt

Die Dissertation wurde am 31.08.2017 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 06.12.2017 angenommen.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung der EVoMoT-Methode, einer Methode zum Übertrag von Ergebnissen vom Einzylinder- auf den Vollmotor im Rahmen der modellbasierten Applikation in der Großmotorenentwicklung.

Motivation für die Entwicklung dieser Methode sind die hohen Prüfstandskosten und langen Prüfstandszeiten bei der Applikation moderner Großmotoren am Prüfstand. Wenngleich Großmotoren niedrigere spezifische Kraftstoffverbräuche im Vergleich zu Motoren im Nutzfahrzeug- und Automobilbereich aufweisen, sind die absoluten Kraftstoffverbräuche deutlich höher. Auch die Stabilisierungszeiten zum Erreichen stationärer Betriebszustände sind bei Großmotoren deutlich länger. Trotz Einführung modellbasierter Applikationsmethoden im Großmotorenbereich stellen die resultierenden Versuchsumfänge immer noch einen erheblichen Aufwand dar. Die entwickelte Methode verfolgt das Ziel, diesen Versuchsaufwand am Vollmotor noch weiter zu reduzieren, indem Ergebnisse aus deutlich kostengünstigeren Versuchen am Einzylindermotor genutzt und im Rahmen des Applikationsprozesses auf den Vollmotor übertragen werden.

Unter Verwendung umfangreicher Versuchsergebnisse des Einzylindermotors und deutlich reduzierter Versuchsaufwände des Vollmotors werden für ausgewählte Zielgrößen Transferfunktionen zwischen Einzylinder- und Vollmotor entwickelt, welche es erlauben berechnete Datenpunkte für den Vollmotor zu generieren, mit denen im Anschluss Regressionsmodelle für den Vollmotor gebildet werden können, welche wiederum für Optimierungen und zur Kennfelderstellung für das Motorsteuergerät genutzt werden können. Modellansätze, wie Radiale-Basisfunktions-Netze und Gauß-Prozess-Modelle werden dabei erstmals für die Modellierung des Verhaltens von Großmotoren herangezogen.

Die entwickelte Methode wird zunächst an einem einfachen Demonstrationsbeispiel vorgestellt und im Anschluss durch Anwendung am realen Großmotor validiert und ihre Funktionsfähigkeit unter Beweis gestellt. Für ausgewählte stationäre Motorzielgrößen, wie spezifischer Kraftstoffverbrauch, spezifische Stickoxidemissionen, Ruß-Emissionen, maximaler Zylinderdruck und Abgastemperatur konnten die Ergebnisse der Einzylinderversuche mit generierten Transferfunktionen erfolgreich auf den Vollmotor übertragen und valide Modelle dieser Zielgrößen des Vollmotors gebildet werden, welche im Anschluss zur Erstellung von Sollwertkennfeldern für das Motorsteuergerät herangezogen wurden.

Stichwörter: Großmotor, Applikation, Statistische Versuchsplanung, Regression, Modellbildung, Polynome, Radiale-Basisfunktions-Netze (RBF-Netze), Gauß-Prozess-Modelle (GPMs), Einzylindermotor, Vollmotor, Methode, Transferfunktion, Optimierung, Kennfelderstellung.

Abstract

The present thesis describes the development of the EVoMoT-method, a methodology for transferring results from single cylinder to full scale engines in terms of model-based calibration in large bore engine development.

The motivation for the methodology's development is given by high test bench costs and long test bench times for calibration purposes of modern large bore engines at the test benches. Although large bore engines have lower specific fuel consumptions compared to commercial vehicle or automotive engines, the absolute fuel oil consumptions are significantly higher. Furthermore, the stabilization times to reach steady state behaviour are much longer in terms of large bore engines. In spite of the introduction of model-based calibration techniques for large bore engine development the resulting number of measurements still requires an extensive scope. Therefore, the developed methodology pursues the objective to further reduce the amount of measurements of the full scale engine by transferring the results of significantly more cost-efficient single cylinder engine measurement results to the full scale engine.

Using an extensive amount of measurement results of the single cylinder engine and significantly reduced measurements of the full scale engine transfer functions between single cylinder and full scale engine for chosen steady state engine outputs are developed, enabling the generation of calculated data points of the full scale engine. These measurement data are used to build full scale engine regression models to perform optimizations and create engine maps of setpoints for the engine control unit. Modeling techniques as radial basis function networks and Gaussian process models have been utilized to model the behaviour of large bore engines for the first time.

The developed methodology is presented with a simple demonstration example and validated by application to a real large bore engine. Single cylinder measurement results of chosen steady state engine outputs as specific fuel oil consumption, specific nitrogenoxid emissions, soot emissions, maximum cylinder pressure and exhaust temperature have been transferred successfully by generated transfer functions to the full scale engine. Valid full scale engine models of these engine outputs have been built and used to create engine maps for the engine control unit.

Keywords: large bore engine, calibration, design of experiments (DoE), regression, modeling, polynomials, radial basis function networks (RBF-networks), Gaussian process models (GPMs), single cylinder engine, full scale engine, methodology, transfer function, optimization, engine map.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	iii
Abstract	v
Abkürzungen, Formelzeichen und Symbole	vii
Inhaltsverzeichnis	xv
1 Einleitung	1
1.1 Aktuelle Herausforderungen in der Großmotorenentwicklung	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Forschung und Technik	5
2.1 Applikation allgemein	5
2.2 Messdatenbasierte Applikation	6
2.2.1 Vollfaktorielle Rasterung	6
2.2.2 Eingrößenoptimierung	7
2.3 Modellbasierte Applikation	8
2.3.1 Modellbasierte Offline-Methoden	9
2.3.2 Modellbasierte Online-Methoden	11
2.4 Applikation von Pkw-Motoren versus Großmotoren	17
2.4.1 Einsatz von Simulationen im Applikationsprozess	17
2.4.2 Einsatz von Einzylindermotoren im Applikationsprozess	18
2.4.3 Vergleich der Betriebsbereiche für die Applikation	18
2.4.4 Vergleich der Applikationsumfänge	21
2.4.5 Randbedingungen von Versuchen	23
2.5 Anforderungen an Messdaten für die Applikation	23
2.5.1 Messdatenqualität	23
2.5.2 Stationäre Motorvermessung	25
2.5.3 Messdatenplausibilität	26
2.6 Fazit zum Stand der Forschung und Technik	27
3 Theoretische Grundlagen	29
3.1 Grundlagen der Regression	30
3.1.1 Methode der kleinsten Fehlerquadrate	30
3.1.2 Methode der kleinsten regularisierten Fehlerquadrate	31
3.1.3 Maximum Likelihood Methode	32
3.1.4 Maximum A-Posteriori Methode	33

3.1.5	Schrittweise Regression	33
3.1.6	Box-Cox-Transformation	34
3.1.7	Statistische Bewertung der Regression	36
3.2	Modellansätze	38
3.2.1	Polynome	38
3.2.2	RBF-Netze	40
3.2.3	Gauß-Prozess-Modelle	43
3.3	Versuchsplanarten	46
3.3.1	Klassische Versuchspläne	46
3.3.2	Zusammengesetzte Versuchspläne	48
3.3.3	Optimale Versuchspläne	49
3.3.4	Raumfüllende Versuchspläne	50
3.4	Optimierungsverfahren	52
3.4.1	Optimierungsverfahren erster Ordnung	52
3.4.2	Optimierungsverfahren zweiter Ordnung	53
4	Vorarbeiten hinsichtlich Messdatenqualität	57
4.1	Messunsicherheiten an Motorprüfständen	57
4.1.1	Messunsicherheitsanalysen	58
4.1.2	Ringversuche	61
4.1.3	Fazit der Analyse der Messunsicherheiten	62
4.2	Methoden zur Erhöhung der Messdatenqualität	63
4.2.1	Stationärpunkterkennung	63
4.2.2	Signalgüte	65
4.2.3	Messdatenplausibilität	66
5	EV_oMoT - Übertrag von Modellen von Einzylinder- auf Vollmotoren	69
5.1	Motoreinstellungen und Randbedingungen	69
5.2	Kreisprozesssimulation	70
5.3	Grundidee der Methode	72
5.4	Versuchsplanung	75
5.4.1	Versuchsplanung für den Einzylindermotor	75
5.4.2	Versuchsplanung für den Vollmotor	77
5.5	Modellbildung für den Einzylindermotor	77
5.6	Übertrag vom Einzylinder- auf den Vollmotor	80
5.6.1	Delta-Transferfunktionen	81
5.6.2	Punkteübertrag mit Delta-Transferfunktionen	83
5.6.3	Faktor-Transferfunktionen	84
5.6.4	Punkteübertrag mit Faktor-Transferfunktionen	87
5.7	Modellbildung für den Vollmotor	88
5.7.1	Vollmotormodelle auf Basis von Delta-Transferfunktionen	88
5.7.2	Vollmotormodelle auf Basis von Faktor-Transferfunktionen	89
5.7.3	Statistischer Vergleich der Vollmotormodelle	90
5.8	Validierung der Vollmotormodelle	91
6	EV_oMoT - Anwendungsbeispiel	93
6.1	Beschreibung der Versuchsmotoren	93
6.1.1	Beschreibung des Einzylindermotors	94
6.1.2	Beschreibung des Vollmotors	96

6.2	Ableich Einzylindermotor mit Kreisprozesssimulation	97
6.3	Versuchsplanung	98
6.3.1	Versuchsplanung für den Einzylindermotor	98
6.3.2	Planung der Stichversuche für den Vollmotor	99
6.4	Modellbildung für den Einzylindermotor	100
6.5	Übertrag vom Einzylinder- auf den Vollmotor	102
6.5.1	Delta-Transferfunktionen ausgewählter Zielgrößen	103
6.5.2	Faktor-Transferfunktionen ausgewählter Zielgrößen	105
6.5.3	Interpretation der Transferfunktionen	106
6.6	Modellbildung für den Vollmotor	113
6.6.1	Vollmotormodelle auf Basis von Delta-Transferfunktionen	113
6.6.2	Vollmotormodelle auf Basis von Faktor-Transferfunktionen	115
6.6.3	Validierung der Vollmotormodelle	116
6.7	Optimierung und Kennfelderstellung für den Vollmotor	118
6.8	Zusammenfassung und Fazit zum Anwendungsbeispiel	120
7	Zusammenfassung und Ausblick	123
7.1	Zusammenfassung	123
7.2	Ausblick	124
A	Ergänzungen zum EVoMoT-Demonstrationsbeispiel	127
A.1	Einzylindermodelle des EVoMoT-Demonstrationsbeispiels	127
A.2	Vollmotormodelle des EVoMoT-Demonstrationsbeispiels	128
A.2.1	Vollmotormodelle auf Basis von Delta-Transferfunktionen	129
A.2.2	Vollmotormodelle auf Basis von Faktor-Transferfunktionen	130
B	Ergänzungen zum EVoMoT-Anwendungsbeispiel	131
B.1	Druck-, Brenn- und Summenbrennverläufe der Lastpunkte G85 und G75	131
B.2	Versuchspläne des Einzylinder- und Vollmotors	132
B.2.1	Tabellarischer Versuchsplan des Einzylindermotors	132
B.2.2	Tabellarischer Versuchsplan des Vollmotors	134
B.3	Berechnete Delta- und Faktor-Werte	135
B.3.1	Delta-Werte zur Bildung der Delta-Transferfunktionen	135
B.3.2	Faktor-Werte zur Bildung der Faktor-Transferfunktionen	136
B.3.3	Delta-Werte für den Punkteübertrag	137
B.3.4	Faktor-Werte für den Punkteübertrag	139
B.4	Validierung der Vollmotormodelle	141
	Literaturverzeichnis	143
	Abbildungsverzeichnis	159
	Tabellenverzeichnis	163
	Betreute studentische Arbeiten	167
	Veröffentlichungen	169

Herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister
LVK - Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen
Technische Universität München

Zugleich:
Dissertation, München, Technische Universität München, 2018

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben - auch bei nur auszugsweiser Verwendung - vorbehalten.

Die Informationen in diesem Buch wurden mit großer Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht völlig ausgeschlossen werden. Verlag und Autor übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Layout und Satz: Christian Friedrich
Copyright © Christian Friedrich 2018
ISBN: 978-3-943813-23-4
1. Auflage