

Reihe 12

Verkehrstechnik/  
Fahrzeugtechnik

Nr. 810

Dipl.-Ing. Marek Kowalczyk,  
Darmstadt

## Online-Methoden zur effizienten Vermessung von statischen und dynamischen Verbrennungsmotor- modellen

Berichte aus dem

Institut für  
Automatisierungstechnik  
und Mechatronik  
der TU Darmstadt





# Online-Methoden zur effizienten Vermessung von statischen und dynamischen Verbrennungsmotormodellen

Vom Fachbereich  
Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von

**Dipl.-Ing. Marek Kowalczyk**

geboren am 16. September 1983 in Peiskretscham

Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Rolf Isermann  
Korreferenten: Prof. Dr. techn. Christian Beidl  
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski

Tag der Einreichung: 19. Juni 2017  
Tag der mündlichen Prüfung: 22. Januar 2018



D 17

Darmstädter Dissertationen



# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 12

Verkehrstechnik/  
Fahrzeugtechnik

Dipl.-Ing. Marek Kowalczyk,  
Darmstadt

Nr. 810

Online-Methoden zur  
effizienten Vermessung  
von statischen  
und dynamischen  
Verbrennungsmotor-  
modellen

Berichte aus dem

Institut für  
Automatisierungstechnik  
und Mechatronik  
der TU Darmstadt



Kowalczyk, Marek

## **Online-Methoden zur effizienten Vermessung von statischen und dynamischen Verbrennungsmotormodellen**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 12 Nr. 810. Düsseldorf: VDI Verlag 2018.

192 Seiten, 68 Bilder, 3 Tabellen.

ISBN 978-3-18-381012-3, ISSN 0178-9449,

€ 67,00/VDI-Mitgliederpreis € 60,30.

**Für die Dokumentation:** Vermessung – Verbrennungsmotoren – Statisch – Dynamisch – Online-Methoden – Versuchsplanung – Aktives Lernen – Konkaver Variationsraum – Modellbildung – Optimierung

Die vorliegende Arbeit behandelt neue Methoden zur Reduktion des Modellierungsaufwandes und der Vermessungszeit an Motorenprüfständen. Hierfür wird eine iterative, aktiv lernende Methodik entwickelt, die erlaubt, sowohl das stationäre als auch dynamische Verhalten mit lokalen und globalen Modellen zu beschreiben. Mithilfe einer daten- und modellbasierten Messplanadaption unter Berücksichtigung von konkaven lokalen und globalen Variationsräumen sowie optimierten Stellgrößen wird der Aufwand und Umfang reduziert. Aus den daraus gemessenen Daten werden iterativ Modelle identifiziert, welche in relevanten Bereichen eine hohe Güte haben. Um die Anwendbarkeit der Methodik zu erhöhen und die benötigten Benutzereingriffe zu reduzieren, werden zusätzlich Methoden zur Anpassung der Modellstruktur entwickelt. Dadurch kann die erreichbare Modellgüte erhöht und Annahmen zur Vorausbestimmung der Modellstruktur vermieden werden. Die Anwendung der Online-Methodik wird exemplarisch für verschiedene statische und dynamische Beispiele vorgestellt.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at [www.dnb.de](http://www.dnb.de).

D 17

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9449

ISBN 978-3-18-381012-3

---

# Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Rolf Isermann in der Forschungsgruppe Regelungstechnik und Prozessautomatisierung am Institut für Automatisierungstechnik und Mechatronik der Technischen Universität Darmstadt.

Mein Dank geht zuallererst an meinen Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Rolf Isermann, der mir Vertrauen entgegengebracht und die Möglichkeit zur Promotion gegeben hat. Seine Unterstützung und Förderung, bei gleichzeitig eigenverantwortlicher Führungsweise, haben diese Arbeit ermöglicht und mich für meinen weiteren Berufsweg geprägt. Herrn Prof. Dr. techn. Christian Beidl, Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe an der Technischen Universität Darmstadt, möchte ich für das Interesse an meiner Arbeit und die freundlichen Übernahme des Korreferats danken.

Weiterhin danke ich dem Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), welches im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) und die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV) mein Forschungsvorhaben finanziell unterstützt hat. An dieser Stelle gilt der Dank auch an den gesamten Arbeitskreis sowie insbesondere an den Obmann Herrn Dipl.-Ing. S. Lindner, die durch Ihren Blick auf die Themen aus der Perspektive der Industrie meine Arbeit geprägt haben.

Einen immensen Anteil an der Entstehung dieser Arbeit haben auch die vielen ehemaligen Kollegen am Institut. Dank der hilfsbereiten, unkomplizierten und freundschaftlichen Zusammenarbeit war der Alltag am Institut nie eintönig. Dies gilt sowohl für die VKM-Kollegen (Danke Florian, Simon, Andreas, Christopher, Matthias, Heiko, Alex), die sich für keine inhaltliche Diskussion oder Stunde am Prüfstand zu schade waren, als auch für die Nicht-VKM-Kollegen (Danke Markus, Mark, Carlo, Jacob, Philipp), die für den nötigen Blick über den Tellerrand gesorgt haben. Nicht zu vergessen natürlich die Damen (Danke Ilse, Brigitte, Corina, Sandra) und technischen Mitarbeiter (Danke Alfred, Alex), dank denen das Leben am Institut reibungslos ablief.

Abschließen möchte ich mit einem großen Dank an meine Familie. Sowohl an meine Eltern und an meinen Bruder, die mich stetig unterstützt und gefördert haben während des Studiums und der Promotion. Als auch an Julia und unseren Sohn Nils, die lange auf viel Verzicht mussten damit diese Arbeit zu Ende geführt werden konnte.

Darmstadt, Juni 2017

*Marek Kowalczyk*

*Für Julia und meine Familie*

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbole und Abkürzungen</b>	<b>VIII</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>XII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Stand der Technik . . . . .	4
1.1.1 Elektronisches Motormanagement . . . . .	4
1.1.2 Steuergerät-Applikation . . . . .	5
1.1.3 Motorvermessung . . . . .	6
1.1.4 Modellbasierte Sollwert-Optimierung . . . . .	8
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit . . . . .	8
<b>2 Gesamtstrategie zur Online-Vermessung</b>	<b>12</b>
2.1 Prüfstandsanforderungen . . . . .	13
2.2 Iterativer Ablauf der Gesamtstrategie . . . . .	14
2.3 Schnittstellen und Struktur der Gesamtstrategie . . . . .	16
2.3.1 Online-Vermessungssystem <i>ORTEM</i> . . . . .	18
2.3.2 Online-Auswertungssystem <i>OTOM</i> . . . . .	21
2.4 Zusammenfassung . . . . .	23
<b>3 Methoden zur Bestimmung zulässiger Aktor-Stellbereiche</b>	<b>24</b>
3.1 Grundlagen der Variationsraumbestimmung . . . . .	25
3.2 Grenzgrößen bei der Variationsraumbestimmung . . . . .	27
3.2.1 Arten der Grenzgrößen . . . . .	27
3.2.2 Bestimmung von Zündaussetzern als Grenzgröße . . . . .	27
3.3 Messpläne zur Bestimmung von Variationsräumen . . . . .	31
3.4 Schnelle Bestimmung des statischen Variationsraums . . . . .	32
3.5 Ansätze zur einfachen Beschreibung von statischen konkaven Variationsräumen	37
3.5.1 Einfache konkave Variationsraumdarstellung . . . . .	38
3.5.2 Dimensionsreduktion von Variationsräumen . . . . .	42
3.5.3 Interpolation von Variationsräumen . . . . .	43
3.6 Zusammenfassung . . . . .	46
<b>4 Online-Versuchsplanung bei der Motorvermessung</b>	<b>48</b>
4.1 Grundlagen der statistischen Versuchsplanung und modellbasierten Optimierung	49
4.1.1 Arten der Datenaufzeichnung . . . . .	49
4.1.2 Einflussgrößenauswahl und Effektermittlung . . . . .	51
4.1.3 Messpunktverteilung . . . . .	52
4.1.4 Anregungssignale zur Vermessung . . . . .	56
4.1.5 Verfahren zur modellbasierten Optimierung . . . . .	59

4.2	Anregungssignal zur Identifikation von stationären und dynamischen Modellen	60
4.2.1	Vergleich der Signale zur dynamischen Prozessanregung	63
4.3	Aktiv lernende Messpläne	65
4.3.1	Gesamtstrategie zur Online-Messplanerweiterung	66
4.3.2	Iterative Stellbereichsanpassung	67
4.3.3	Modellunabhängige Bestimmung der Messpunkte	72
4.3.4	Modellbasierte Bestimmung der Messpunkte	74
4.3.5	Zielgerichtete Messplanerweiterung im Rahmen der Online-Methodik	80
4.3.6	Beispiel der Online-Versuchsplanung	81
4.4	Zusammenfassung	83
<b>5</b>	<b>Online-Identifikation von mathematischen Verbrennungsmotor-Modellen</b>	<b>85</b>
5.1	Grundlagen der experimentellen Modellbildung	86
5.1.1	Parameterschätzung	87
5.1.2	Modellbildungsverfahren für stationäre Prozesse	89
5.1.3	Modellbildungsverfahren für dynamische Prozesse	95
5.1.4	Verfahren zur Bewertung der Modellgüte	98
5.1.5	Bias-Varianz Dilemma	100
5.1.6	Strukturbestimmung von Modellen	101
5.2	Online-Bias-Varianz-Dilemma	104
5.3	Online-Modellanalyse	105
5.4	Online lokal polynomiale Netzmodelle	107
5.4.1	Online-Adaption der Modellparameter	107
5.4.2	Online-Adaption der Regressoren	108
5.4.3	Online-Adaption der Netzmodellstruktur	108
5.4.4	Online-Adaption der Ordnung der Modelleingangsgrößen	114
5.4.5	Gesamtstrategie zur Online-Modellkomplexitätsadaption	114
5.4.6	Beispiel der Online-Identifikation	116
5.5	Zusammenfassung	119
<b>6</b>	<b>Anwendungsbeispiel der Online-Vermessung</b>	<b>121</b>
6.1	Parametrierung der Online-Vermessung	122
6.2	Verlauf der Online-Vermessung	123
6.3	Auswertung der Online-Vermessung	124
6.4	Vergleich der Online-Vermessung mit einer klassischen Offline-Vermessung	130
6.5	Zusammenfassung	132
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>133</b>
<b>A</b>	<b>Motorenprüfstand und Versuchsträger</b>	<b>136</b>
<b>B</b>	<b>Software Dokumentation</b>	<b>138</b>
<b>C</b>	<b>Höherdimensionale konkave Variationsräume</b>	<b>141</b>

Inhaltsverzeichnis	VII
<b>D Dynamische Variationsräume</b>	<b>144</b>
<b>E Bestimmung der Abtastzeit ohne Prozesswissen bei dynamischen Messungen</b>	<b>146</b>
<b>F Datenvorbereitung</b>	<b>149</b>
<b>G Erweiterungen der LS-Parameterschätzung</b>	<b>150</b>
<b>H Vermessung von Kennfeldmodellen</b>	<b>152</b>
<b>I Identifikation von richtungsabhängigen Prozessen</b>	<b>157</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>161</b>

# Symbole und Abkürzungen

## Symbole

$A$	Anzahl an Ausgangsgrößen in einem System/Modell
$c$	Kennfeldstützstellenposition, Geometrischer Schwerpunkt eines Simplex
$C$	Anzahl an verzögerten Werten der Eingangsgröße
$D$	Dynamische Ordnung eines Polynoms Anzahl an verzögerten Werten der Ausgangsgröße
$e_i$	Residuum
$E$	Anzahl an Eingangsgrößen in einem Modell
$G_{\text{RMSE,global}}$	Grenzwert des globalen $J_{\text{RMSE,global}}$
$H$	Teilmenge an Stellgrößen in einem System
$i, j, o, p$	Zählvariable
$\mathbf{I}$	Einheitsmatrix
$J_A$	Kenngröße der Adaption
$J_{\text{MAE}}$	Mittlerer absoluter Fehler
$J_{\text{RMSE,lokal}}$	Wurzel des mittleren quadratischen lokalen Fehlers
$J_{\text{RMSE,global}}$	Wurzel des mittleren quadratischen globalen Fehlers
$J_Q$	Kenngröße der Modellgüte
$J_S$	Kenngröße der Messgrößenstandardabweichung
$k$	Diskrete Zeit $k = t/T_0 = 0, 1, 2, \dots$
$\mathbf{K}$	Kandidatensatz mit potentiellen Stellgrößenkombinationen
$l$	Teilungsverhältnis, Streckfaktor
$L$	Stufen eines Rasters Anzahl an Teildatensätzen Anzahl an lokalen Teilmodellen
$M$	Anzahl an lokalen Teilmodellen
$\mathbf{M}$	Messplan, bestehend aus zu vermessenden Stellgrößenkombinationen
$\mathbf{M}_0$	Initialer Messplan zu Beginn der Vermessung
$n$	Stufenanzahl eines Schieberegisters Zählvariable
$n_{\text{Mot}}$	Drehzahl des Verbrennungsmotors in $\text{min}^{-1}$
$N$	Anzahl an Zeitintervallen beim APRBS Anzahl an gesamten Stellgrößenkombinationen
$O$	Anzahl an ausgewählten bzw. zusätzlichen Stellgrößenkombinationen
$P$	Anzahl an Stellgrößen in einem System Leistung in kWh
$p_{\text{Zyl}}$	Zylinderdruck
$\Delta p_{\text{Zyl,max}}$	Maximale Differenz des Zylinderdrucks
$q_{\text{HE}}$	Haupteinspritzmenge in $\frac{\text{mm}^3}{\text{Hub}}$
$Q_s$	Ladung im piezoelektrischen Quarzsensord

$Q$	Anzahl an gesamten Regressoren
$r_o$	Radius der $o$ -ten Stellgrößenkombination in Kugelkoordinaten
$R$	Anzahl ausgewählter Regressoren
$R^2$	Bestimmtheitsmaß
$S$	Statische Ordnung eines Polynoms
$s_{\text{Aussetzer}}$	Anzahl an auftretenden Aussetzern
$t$	Kontinuierliche Zeit in s
$T_0$	Abtastzeit in s
$T_E$	Einschwingzeit in s
$T_p$	Periodenlänge in s
$u$	Stellgröße eines Systems
$\mathbf{u}_+$	Eingangsgrößenvektor aus erweitertem Datensatz
$v_{\text{Aussetzer}}$	Auftretender Aussetzern
$V$	Anzahl an gesamten Kennfeldstützstellen
$w$	Kennfeldstützstellenhöhe
$\mathbf{W}$	Gewichtungsmatrix
$x$	Eingangsgröße eines Modells
$y$	Gemessene Ausgangsgröße eines Systems
$y_{\text{sim}}$	Simulierte Ausgangsgröße eines Systems
$\bar{y}$	Gemittelte Ausgangsgröße eines Systems
$\hat{y}$	Ausgangsgröße eines Modells
$\hat{y}_{\text{QbC}}$	Ausgangsgröße eines Modellkomitees
$\mathbf{y}_+$	Ausgangsgrößenvektor aus erweitertem Datensatz
$Z$	Anzahl an Iterationen
$\hat{\Theta}$	Parameter eines Modells
$\hat{\Theta}_+$	Parameter eines Modells nach der Schätzung mit erweitertem Datensatz
$\lambda$	Regularisierungsparameter
$\lambda_{\text{min}}$	Taktzeit eines APRBS
$\lambda_{\text{max}}$	Maximale Haltezeit eines APRBS
$\mu$	Arithmetrischer Mittelwert
$\sigma$	Standardabweichung
$\sigma^2$	Varianz
$\sigma_{\text{seg}}^2$	Varianz in einem Segment
$\sigma_{\text{lim}}^2$	Schwelle der zulässigen Varianz
$\varphi_o$	Winkel der $o$ -ten Stellgrößenkombination in Kugelkoordinaten
$\varphi_{\text{KW}}$	Winkel der Kurbelwelle
$\varphi_{\text{OT}}$	Winkel der Kurbelwelle bei oberem Totpunkt
$\varphi_{\text{VB}}$	Winkel der Kurbelwelle bei Verbrennungsbeginn
$\Psi$	Datenmatrix zur Parameterschätzung
$\Psi_+$	Datenmatrix aus erweitertem Datensatz zur Parameterschätzung

**Abkürzungen**

ADBS	Amplitudenmoduliertes Deterministisches Binär-Signal
ADRBS	Amplitudentmoduliertes Diskretes-Rausch-Binär-Signal
AGRBS	Amplitudentmoduliertes Generalisiertes-Rausch-Binär-Signal
AIC	Akaiques' information criterion
APRBS	Amplitudentmoduliertes Pseudo-Rausch-Binär-Signal
DBS	Deterministisches Binär-Signal
DoE	Versuchsplanung (design of experiments)
DTS	Delaunay triangulation sampling
GMR	Globale Modellregion
HHT	Hinging hyperplane trees
LASSO	least absolute shrinkage and selection operator
LARS	least angle regression
LHS	Latin hypercube sampling
LLM	Lokal lineares Modell
LM	Lokales Modell
LMR	Lokale Modellregion
LOLIMOT	Lokal lineares Netzmodell (local linear model tree)
LOPOMOT	Lokal polynomiales Netzmodell (local polynomial model tree)
LPM	Lokal polynomiales Modell (local polynomial model)
LS	Methode der kleinsten Quadrate (least squares)
MAE	Mean absolute error
MIMO	Mehrere Ein- und Ausgangsgrößen (multi input multiple output)
MISO	Mehrere Eingangs-, eine Ausgangsgröße (multi input single output)
MLP	Multilayer-Perzeptron-Netze
MO	Model optima
MPC	Model parameter change
MQD	Model quality decrease
MQI	Model quality increase
MSE	Mean squared error
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NMSE	Normalized mean squared error
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxide (NO und NO <sub>2</sub> )
NRMSE	Normierte Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers
NSGA	Non-dominated sorting genetic algorithm
ONLOPOMOT	Online lokal polynomiales Netzmodell (o. local polynomial model tree)
ONPOLY	Online Polynommodell (online polynomial model)
OTOM	Online target oriented measurement
ORTEM	Online real-time engine measurement
PRBS	Pseudo-Rausch-Binär-Signal
PRESS	Predicted residual error sum of squares
PRMS	Pseudo-Rausch-Mehrstufen-Signal

---

RBF	Radial-Basis-Funktions-Netze
RCP	Rapid Control Prototyping
RLS	Rekursive Methode der kleinsten Quadrate
RMSE	Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (root mean squared error)
SAE	Summed absolute error
SIMO	Eine Eingangs-, mehrere Ausgangsgrößen (single input multiple output)
SISO	Eine Ein- und Ausgangsgröße (single input single output)
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis (signal noise ratio)
VR	Variationsraum

# Kurzfassung

Die Reduktion von Abgas-Emissionen sowie von Kraftstoffverbrauch gewinnt immer stärkere Bedeutung und führt in der Umsetzung zu einer immer höheren Anzahl an Aktoren und Sensoren und infolgedessen zu einer immensen Zunahme an Variabilitäten. Die Applikation von elektronischen Motorsteuerungen wird folglich zu einer hochdimensionalen Aufgabe und mit der Dimensionalität steigt die Komplexität. Um die Optimierung der Applikation in annehmbarer Zeit und mit akzeptablen Aufwand durchführen zu können sind sowohl schnelle Vermessungsmethoden als auch modellbasierte Optimierungsmethoden nötig. Die Zeit und der Aufwand können weiter reduziert werden, indem die Messung, Identifikation und Optimierung zu einer Online-Methodik am Motorenprüfstand kombiniert werden, wodurch diese automatisch interagieren und sich anpassen.

Zur Umsetzung einer schnellen Applikation wurde eine Online-Methode entwickelt, welche die Modellierung des statischen und dynamischen Verhaltens mit lokalen sowie globalen Verbrennungsmotormodellen ermöglicht. Die Automatisierung erfolgt dabei durch die Parallelisierung der Vermessung und Auswertung zur Modellbildung, sodass sie ohne Trennung von Messungen am Prüfstand, Auswertungen im Büro und zwischenzeitlichen Benutzereingriffen ablaufen kann. Der Ablauf des Prozesses entspricht einem iterativen Vorgehen während der Vermessung, wodurch passende Offline-Methoden verwendet werden können. Mithilfe verschiedener weiterer Methoden kann eine Reduktion des gesamten Aufwands und der benötigten Zeit erreicht werden, bei gleichzeitiger Erhöhung der Modellqualität.

Eine schnelle Bestimmung des Variationsraums wird durch eine limitbasierte Regelung der Aktorführungsgrößen erreicht. Solange die gemessenen Größen weit von ihren kritischen Werten entfernt sind, wird die Verstellgeschwindigkeit aller Aktoren erhöht, um schneller zu den Variationsraumgrenzen zu gelangen. Wenn die gemessenen Größen sich ihren kritischen Werten nähern, wird die Verstellgeschwindigkeit geregelt reduziert. Mithilfe dieser integrierten Regelung wird ein schnelles Verfahren erreicht. Mithilfe der gemessenen Positionen der Aktoren an den Variationsraumgrenzen wurde eine mathematische Beschreibung des konkaven Variationsraums und der sich daraus ergebenden konkaven Hülle entwickelt. Speziell bei hochdimensionalen Problemen ist die mathematische Beschreibung des konkaven Variationsraums essentiell für eine automatische Online-Vermessung am Prüfstand, weil ein manuelles Vermessen hochdimensionaler Räume viel Zeit in Anspruch nimmt. Mithilfe einer Stationärwerkerkennung kann die stationäre Vermessung schneller erfolgen. Die Online-Methodik erkennt automatisch den stationären Zustand aller Messgrößen, führt die Datenaufzeichnung aus und wechselt zum nächsten Messpunkt. Infolgedessen wird keine globale Stabilisierungszeit mehr benötigt, da die Messgrößen bis zum Erreichen aller stationären Werte für eine individuelle Zeit konstant gehalten werden. Für die dynamische Modellbildung wurde ein Kurzzeit-Testsignal entwickelt, welches eine flexible und zielorientierte Anpassung erlaubt. Ohne eine individuell angepasste Anregung können dynamische Modelle keine hohe Güte erreichen. Darüber hinaus wurden geeignete Methoden zur zielgerichteten sowie modellbasierten Anpassung von Messplänen basierend auf

dem aktuell gültigen Modell entwickelt. Auf diese Weise wird eine schnellere Vermessung zur Modellbildung ermöglicht, da statt klassischen raumfüllenden Designs nur Messpunkte erfasst werden, welche für das Modell und die Anwendung relevant sind. Der gesamte Messaufwand kann reduziert werden, indem das Messen in Bereichen hoher Modellgüte vermieden wird, da der Einfluss einer neuen Messung in diesen Bereich gering ist. Um die Anwendbarkeit der Methodik zu erhöhen sowie die benötigten Benutzereingriffe zu reduzieren, werden zusätzlich Methoden zur Anpassung der mathematischen Modellstruktur entwickelt. Dadurch kann die erreichbare Modellgüte erhöht werden und Annahmen zur Modellstruktur werden vermieden.

Mit der hier vorgestellten neuen Methodik zur zielgerichteten Vermessung, welche sowohl schnell als auch automatisch abläuft, leistet diese Dissertation einen wesentlichen Beitrag zur modellbasierten Applikation von Motorsteuergeräten. Durch den Einsatz dieser Online-Methodik, deren Anwendbarkeit anhand verschiedener Beispiele verdeutlicht wird, kann die Vermessung und Identifikation in deutlich kürzerer Zeit als beim klassischen Vorgehen erfolgen.

# Abstract

The reduction of exhaust emissions and fuel consumption is gaining in importance and leads in the implementation to an increasing number of actuators and sensors and consequently to an immense increased number of variabilities. The calibration of the electronic engine control units becomes a high dimensional task and with the dimensionality, the complexity increases. To complete the optimization of the calibration in an acceptable amount of time and reasonable effort, fast measurement methods as well as model-based optimization methods are needed. Even more time and effort can be saved, if the measurement, identification and optimization are coupled to an online-method at an engine test bench, resulting in an automatic interaction and adaptation of them.

For enabling a fast calibration, an online methodology was developed, which allows the modeling of the stationary as well as the dynamic behaviour with local and global combustion engine models. The automatization is done by parallelization of the measuring and analysis for identification, enabling a procedure without separation of measuring at the test bench and evaluation at the office and user inputs in between. The sequence of the process corresponds to an iterative approach during the measurement, which enables the use of suitable offline methods. With the help of different additional methods a reduction of the overall effort and time is achieved, while enhancing the model quality.

A fast determination of the variation space is accomplished with a limit based control of actuators. As long as the measured signals are far away from their critical values, the adjustment speed of all actuators is increased to move faster towards the variation space border. If the measured signals approach their critical values, a controlled reduction of the speed is performed. With the integrated controller, a fast determination of the variation space is accomplished. With the measured positions of the actuators at the variation space borders, a mathematical description of the concave variation space and hull have been developed. Especially for high dimensional problems, the mathematical description of the concave variation space is essential for an automated online-measurement at the test bench, as the manual measurement of high-dimensional spaces takes much time. With the help of a stationary detection, stationary measurements can be performed faster. The online methodology recognizes automatically the stationary value of all measured variables, performs the data acquisition and continues to the next measurement point. No global stabilization time is needed any more as the measured values are held for an individual time until they all are stable. For dynamic modeling, a short-time excitation signal is developed, which enables a flexible and target-oriented parametrization. Without an individually adapted excitation, dynamic models can't achieve a good quality. Furthermore, suitable methods for the target-oriented and model-based adaptation of the measurement design based on the actual valid model are developed. This enables a faster measurement for modeling, as instead of classic variationspace-filling designs only points are captured which are relevant for the actual model and application. A reduction of the measurement effort is achieved by avoiding regions where the quality of the model is already high, as the influence of new measurement

points in this area is small. For increasing the applicability of the methodology and reducing the necessary user inputs, methods for adaptation of the mathematical model structure are developed. This increases the achievable model quality and assumptions for the model structure are avoided.

With the here presented new measurement methodology for target-oriented measurements, which performs fast and fully automatically, this dissertation contributes essentially to the model-based calibration of engine control units. Using the online methodology, whose applicability is exemplarily shown with different examples, the measurement and modeling can be accomplished in significantly lesser time than with common approaches.

