

DISSERTATION

**Entwicklung einer
virtuellen Streckenbeschreibung
einer Verbrennungskraftmaschine
für Aufgaben der Applikation**

DIPL.-ING. MANUEL NEBEL

ausgeführt zum Zweck der Erlangung des
akademischen Grades eines Doktors der technischen
Wissenschaften an der Technischen Universität Graz



Oktober 2010

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, Oktober 2010

Manuel Nebel

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2008 bis 2010 während meiner Tätigkeit als Entwicklungsingenieur in der Abteilung Serienapplikation von Dieselmotoren der AVL List GmbH in Graz.

Mein besonderer Dank gilt an erster Stelle Frau Dipl.-Ing. M.-S. Vogels, Herrn Dr. C. Hametner und Herrn Dr. T. Combé, der zudem die inhaltliche Betreuung dieser Arbeit übernahm. Ohne ihre fachlich fundierte Unterstützung, zahlreiche intensive Diskussionen und persönlichen Einsatz über die reguläre Arbeitszeit hinaus, wäre ein solches Ergebnis nicht möglich gewesen.

Für die hervorragende wissenschaftliche Betreuung und Förderung dieser Arbeit danke ich Herrn Professor H. Eichlseder, Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik an der Technischen Universität Graz. Durch seine stets wohlwollende Unterstützung hat er wesentlich zum zügigen Gelingen der Arbeit beigetragen.

Herrn Professor S. Jakubek, Professor für Regelungstechnik und Prozessautomatisierung am Institut für Mechanik und Mechatronik der Technischen Universität Wien, danke ich für die Übernahme des Koreferats und seine fachlichen Anregungen speziell im Hinblick auf Identifikations- und Modellierungsmöglichkeiten.

Für die Anregung zu diesem Thema möchte ich Herrn Dipl.-Ing E. Martini und für die arbeitstechnische Ermöglichung sowie den Rückhalt bei der nicht immer einfachen Gratwanderung zwischen Alltagsaufgaben und Promotion Herrn Dipl.-Ing. J. Bachler danken.

Viele weitere Personen haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen, angefangen bei Prüfstandsbetreuung über Datenverarbeitung bis zur Korrekturlesung. Ihnen sei an dieser Stelle mein Dank ausgesprochen.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie und meinen Freunden für die Unterstützung auf unterschiedlichsten Ebenen während dieser nicht immer einfachen Zeit.

Auch der erste Schritt gehört zum Wege (Arthur Schnitzler)

Graz im Oktober 2010

MANUEL NEBEL

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Abkürzungen und Formelzeichen	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziel der Arbeit	2
1.2.1 Aufgabenstellung	2
1.2.2 Wissenschaftlicher Erkenntnisgewinn.....	3
2 Zusammenfassung / Abstract	5
3 Stand der Technik.....	7
3.1 Verbrennung im modernen Dieselmotor	7
3.1.1 Brennverfahren	8
3.1.2 Abgasemissionen.....	11
3.1.3 Abgasnachbehandlung	13
3.1.4 Alternative Brennverfahren	15
3.2 Elektronische Motorregelung	15
3.2.1 Allgemeine Funktionsweise	15
3.2.2 Regelung des Brennverfahrens	20
3.3 Modellbildung von Verbrennungsmotoren	22
3.3.1 Physikalische Modellbildung	23
3.3.2 Empirische Modellbildung.....	24
3.3.3 Statistische Versuchsplanung.....	28
3.3.4 Veröffentlichte Motormodelle	31
3.3.5 Virtuelle Entwicklungsumgebungen	35

3.4	Meßtechnik und Optimiermethoden am Motorprüfstand	38
3.4.1	Meßtechnik	38
3.4.2	Automatisierungs- und Optimiermethoden	43
3.5	Heutiger Applikationsprozeß	46
4	Modellierungskonzept und -architektur	49
4.1	Anforderungen aus der Applikation	49
4.1.1	Virtuelle Applikation	50
4.1.2	Anforderungen an ein Motormodell	51
4.2	Klassifikation und Vergleich der Anforderungen mit existierenden Konzepten	53
4.2.1	Klassifizierung der Anforderungen	53
4.2.2	Einordnung und Vergleich der Anforderungen	58
4.3	Konzept- und Architekturentwicklung	61
4.3.1	Prozeßseparation nach dynamischen Haupteffekten	61
4.3.2	Dynamikseparation nach physikalischen Haupteffekten	63
4.3.3	Erweiterte Dynamikseparation	64
4.3.4	Ausgewähltes Modellierungskonzept	65
5	Strategien zur System-Identifikation	67
5.1	Modellierungsprozeß	67
5.2	Identifikationsstrategie und Modellierungsverfahren	69
5.2.1	Aktuator- und Sensordynamik Identifikation	69
5.2.2	Identifikation statisches Verbrennungsmodell	73
5.2.3	Identifikation Gasdynamik	76
5.3	Prinzip der thermodynamischen Kenngrößen	80
5.3.1	Qualifikationsverfahren	80
5.3.2	Qualifikationskriterien	81

6	Versuchsumgebung und Randbedingungen.....	87
6.1	Prüfstandsumgebung.....	87
6.2	Versuchsträger	91
6.3	Versuchsraum und Versuchsprogramm	91
6.3.1	Eingrenzungen des Versuchsraums	91
6.3.2	Versuchsprogramm.....	93
7	Experimentelle Untersuchungen	101
7.1	Datenraumabdeckung	101
7.2	Thermodynamische Kenngrößen	104
7.2.1	Qualifikationsverfahren	104
7.2.2	Validierung der Qualifikationsmethodik	111
7.3	Sensordynamik.....	112
7.4	Statische Modellbildung.....	113
7.4.1	Strukturelle Möglichkeiten globaler Modellbildung.....	114
7.4.2	Vergleich statischer Approximatoren	115
7.4.3	Einfluß der Anzahl thermodynamischer Kenngrößen	117
7.5	Dynamische Modellbildung.....	120
7.5.1	Bewertung dynamischer Modellqualität	120
7.5.2	Lokal dynamische Modelle.....	122
7.5.3	Global dynamischer Modellverbund.....	124
7.6	Global dynamisches Gesamtmodell am HiL-Prüfstand	127
7.6.1	Implementierung des Motormodells am HiL-Prüfstand.....	127
7.6.2	Reproduzierbarkeit und Meßgenauigkeit des Motorprüfstandes	130
7.6.3	Validierung des Modellansatzes anhand transienter Zyklen	133
7.7	Weitere Modellierungsoptionen	141
7.7.1	Technische Realisierung.....	142
7.7.2	Experimentelle Validierung	143

8	Anwendungsbeispiele am HiL-Prüfstand	147
8.1	AGR-Reglerabstimmung	148
8.2	Konventionelle Emissionsoptimierung	150
8.3	Verbesserte Emissionsoptimierung.....	153
9	Schlußfolgerung und Ausblick	157
9.1	Abgleich der Anforderungen aus der Applikation	157
9.2	Bedeutung und Auswirkungen der Integration in den Applikationsprozeß	160
9.3	Ausblick.....	164
10	Literaturverzeichnis	165

Abkürzungen und Formelzeichen

Φ	Gewichtungsfunktion eines LOLIMOT Netzes
φ	jeweiliger Kurbelwinkel
λ	Lambda (Kraftstoff-Luftverhältnis)
λ_o	obere Zündgrenze
λ_u	untere Zündgrenze
σ	Standardabweichung
Θ	adaptierbarer Modellparameter (einer Funktionsapproximation)
\hat{Y}	simulierte Prozeßausgangsgröße eines Systems
AGR	Abgasrückführung
A_{150}	Position Verbrennungsschwerpunkt (50% Energieumsatz)
A_{190}	Position Verbrennungsende (90% Energieumsatz)
APRB	amplituden-moduliertes Pseudo-Rausch-Binär (Signal)
A_{soc}	Position Start der Verbrennung
c	Zentrumskoordinaten der Gewichtungsfunktion
C	(atomarer) Kohlenstoff
CFD	Computational Fluid Dynamics (Modellierungsmethode)
CLD	Chemilumineszenz Detektor (Abgas Meßgerät)
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
Comb. dur.	Brenndauer (Abstand A_{soc} zu A_{190})
CR	Common Rail (Hochdruckspeicher eines Einspritzsystems)
CRT	Continuously Regenerating Trap (Partikelfilter)
CVS	Constant-Volume-Sampling (Abgas-Verdünnungs-Verfahren)
DeNO _x	Denitrifikation (Abgas-Nachbehandlungssystem)
dINN	Dynamic Intelligent Neural Network (künstlich neuronales Netz)
DoE	Design of Experiments (statistische Versuchsplanung)

e	Simulationsfehler
ECU	Engine Control Unit (Motorregelung)
EOBD	Europäische On-Board-Diagnose
$\bar{\epsilon}_{rel}$	relativer mittlerer Fehler
ESP	elektronisches Stabilitätsprogramm
f	Funktionszusammenhang
FID	Flammenionisations Detektor (Abgas Meßgerät)
FNN	Fast Neural Network (künstlich neuronales Netz)
FPM	Free Poly Models (polynomialer Approximator)
FTIR	Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie (Abgas Meßgerät)
H	Enthalpie eines Systems
H ₂ O	Wasser
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition (alternatives Brennverfahren)
HFM	Heißfilm-Luftmassenmesser
HiL	Hardware-in-the-Loop (Entwicklungsumgebung)
HPLI	Highly Premixed Late Injection (alternatives Brennverfahren)
IMEP	indizierter Mitteldruck (ident zu p_{mi})
INN	Intelligent Neural Network (künstlich neuronales Netz)
KNN	künstlich neuronale Netze (Approximationsverfahren)
LMM	lokal lineare Modelle (künstlich neuronales Netz)
LOLIMOT	LOcal LInear Model Tree (künstlich neuronales Netz)
LS	Least Squares (Approximations Methode)
L_{st}	stöchiometrisches Luftverhältnis
LSU	Lambda-Sonde Universal (Breitband Lambda Sonde)
M	Teilmodellanzahl eines LOLIMOT Netzes
m	Anzahl der Meßpunkte (in einem DoE Design)
m	Formfaktor einer Vibe Funktion (zur Annäherung des Brennverlaufs)
m_B	Brennstoffmasse

MiL	Malfuction-Indicator-Lampe (OBD-Lampe)
MiL	Model-in-the-Loop (Entwicklungsumgebung)
MISO	Multiple Input Single Output (empirische Funktionskategorie)
m_L	Luftmasse
m_{Leck}	Leckage Massenstrom (über Zylinderspalte)
MLP	mehrschichtiges Perzeptron-Netz (künstlich neuronale Netze)
MSE	mittlerer quadratischer Fehler
MSS	MicroSootSensor (Meßgerät zur Erfassung der Rußemission)
n	Anzahl der Eingänge eines LOLIMOT Netzes
N	Drehzahl
n	Systemordnung
NDIR	nicht-dispersiver Infrarot-Analysator (Abgas Meßgerät)
NEDC	New European Driving Cycle (neuer europäischer Fahrzyklus)
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	(Gesamt-) Stickoxide
NRMSE	normalisierter radizierter mittlerer quadratischer Fehler
N_{Turbo}	Turbinen Drehzahl des Turboladers
O ₂	molekularer Sauerstoff
OBD	On-Board-Diagnosis
OP	Operating Point (Betriebspunkt)
P ₃	Gasdruck im Auslaßkrümmer (vor Turbine)
P ₄	Gasdruck hinter Turbine
P ₄₀	Kompressionsdruck im Zylinder vor Beginn der Einspritzung
PG _{Max}	maximaler Druckgradient der Verbrennung
PKW	Personenkraftwagen
P _{Max}	maximaler Zylinderdruck
p_{mi}	innerer Mitteldruck (ident zu IMEP)

P_{Rail}	Raildruck
PRB	Pseudo-Rausch-Binär (Signal)
p_{Zyl}	Zylinderdruck
Q_{B}	Brennstoffenergie
$Q_{\text{B}}/d\varphi$	Brennverlauf über Kurbelwinkel
$Q_{\text{H}}/d\varphi$	Heizverlauf über Kurbelwinkel
Q_{W}	Wandwärme
R^2	statistisches Bestimmtheitsmaß
RBF	radiales Basisfunktion-Netz (künstlich neuronales Netz)
SCR	Selective Catalytic Reduction (Abgas-Nachbehandlungssystem)
SiL	Software-in-the-Loop (Entwicklungsumgebung)
SISO	Single Input Single Output (empirische Funktionskategorie)
SOI	Start Of Injection (Beginn der Einspritzung)
T_3	Gastemperatur im Auslaßkrümmer (vor Turbine)
T_4	Gastemperatur hinter Turbine
TDC	Top Dead Center (oberer Totpunkt der Kolbenbewegung)
$T_{\text{Delay, MI}}$	Zündverzug der Haupteinspritzung
TDNN	Time Delay Neural Network (KNN mit externer Dynamik)
THC	(Gesamt-) Kohlenwasserstoffe
u	Eingangsgröße
U	innere Energie eines offenen Systems
V	Geschwindigkeit
V_{h}	Hubvolumen
VKM	Verbrennungskraftmaschine
VTG	Turbolager mit variabler Turbinengeometrie
x	Eingangsgrößen eines LOLIMOT Netzes
XiL	HiL, MiL oder SiL Umgebung
Y	gemessene Prozeßausgangsgröße eines Systems

1 Einleitung

Der Wunsch des Menschen nach individueller Mobilität ist trotz zunehmendem Bewußtsein für hierdurch verursachte ökologisch negative Folgen ungebrochen. Symbol dieser Mobilität ist das eigene Fahrzeug, das heute fast ausschließlich durch Hubkolbenmotoren mit innerer Verbrennung angetrieben wird. Über 100 Jahre Entwicklung mit stetig steigenden Anforderungen von Gesetzgeber und Kunden hat den Reifegrad heutiger Verbrennungsmotoren auf ein Niveau gebracht, das alternativen Antriebskonzepten frühestens mittelfristig eine merkliche Existenz am Markt zugesteht. Andererseits ist mit heutigen Motorkonzepten eine Systemkomplexität erreicht, die zunehmend schwieriger zu beherrschen ist und somit evolutionäre Methoden in Entwicklung und Absicherung fordert. Schwarzbauer nennt daher das Kraftfahrzeug „das komplexeste Massenprodukt in Laienhänden“ [87].

1.1 Motivation

Zur Erreichung der vielfältigen Zielwerte heutiger Antriebskonzepte, wie beispielsweise Emissionsgrenzwerte, Verbrauch und Fahrverhalten, sind neben hochentwickelten Hardwarekomponenten leistungsfähige Motorregelungen zur Sicherstellung eines systemoptimalen und fehlerfreien Betriebs notwendig. Die stetige Weiter- und teilweise Neuentwicklung der Brennverfahren bedingt dabei einen erhöhten Bedarf an Sensoren und Aktuatoren, deren Verarbeitung und Steuerung zu einem enormen Anstieg der in Motorregelungen abgelegten Kennlinien und -feldern oder Regelkreisen geführt hat. Die notwendige dynamische Mehrgrößentheorie steht dabei aufgrund der zunehmend verkürzten Entwicklungszyklen unter enormem Zeit- und Kostendruck.

Es zeichnet sich daher ab, daß die bisherige erfahrungsbasierte Herangehensweise in der Motorentwicklung schon wegen begrenzter Prototypen und Facilities oder Unsicherheiten in der Potentialausschöpfung zunehmend durch modellbasierte Verfahren ersetzt wird. Ein erster Schritt ist über die Design-of-Experiments (DoE) Methodik mit der Einführung stationärer Betriebspunktmodelle in der Applikation erreicht, welche die erforderliche Meßzeit für eine rechengestützte Multiparameteroptimierung verkürzen kann. Als Schlüssel für zukünftige Herausforderungen wird allerdings ein integraleres Motormodell gesehen, welches neben rein stationärem auch das dynamische Verhalten eines Motors für Applikationsaufgaben hinreichend genau beschreiben kann und zusätzliche Randbedingungen wie beispielsweise die Motortemperatur berücksichtigt. Ein solches Modell könnte für die gesamte Powertrainapplikation verwendet werden. [78]

Die hierzu notwendigen Rahmenbedingungen erweisen sich allerdings als große Herausforderungen. Die neben der hohen Anzahl an Variationsgrößen hinzukom-

mende Berücksichtigung der Dynamik steigert die Modellkomplexität und stellt mit der Anforderung an hinreichende Genauigkeit höchste Anforderungen an das Modellierungskonzept. Hinzu kommt, daß ein Einsatz im praxisnahen Applikationsprozeß eine schnell und einfach durchführbare Parametrierung des Modells ohne Expertenwissen verlangt. Soll die reale Motorregelung als Träger der Bedatung und Regelkreise mit dem Motormodell z.B. am Hardware-in-the-Loop (HiL) Prüfstand gekoppelt sein, setzt dies eine Stimulation aller ECU-Sensoren bei echtzeitfähiger Simulationsgeschwindigkeit voraus, was entsprechende Annahmen und Vereinfachungen in der Modellstruktur erfordert. Auch kann das Motormodell nur dann in der Applikation verwendet werden, wenn zumindest die essentiellen Prozeßausgangsgrößen parallel abgebildet werden können.

Eine entsprechende Umsetzung vorausgesetzt, bieten sich völlig neue Möglichkeiten für den Applikationsprozeß, besonders wenn zusätzlich auch neue und weiterführende Optimierungsansätze entwickelt werden. Die Vision einer in ihrer Simulationsfähigkeit realen Prüfständen oder Fahrzeugen gleichwertigen, virtuellen Entwicklungsumgebung wird durch die Aussicht auf neue Möglichkeiten zur Vermeidung sequentieller und iterativer Entwicklungsschritte mittels durchgängigerer Systemkenntnis getrieben. Auswirkungen von Abstimmungsänderungen in der Motorregelung könnten zur Bewertung klassischer Zielkonflikte unterschiedlicher Applikationsphasen direkt analysiert und gegebenenfalls angepaßt werden.

1.2 Ziel der Arbeit

Trotz der beschriebenen Motivation konnte sich bisher eine durchgängige modellbasierte Vorgehensweise in der Applikation von Verbrennungsmotoren nicht durchsetzen. Die in letzter Zeit erheblich beschleunigte Entwicklung von Ansätzen auf diesem Gebiet untermauert jedoch den dringenden Bedarf. Als Voraussetzung wird eine geeignete Streckenbeschreibung des motorischen Verhaltens (Motormodell) angesehen, die Eingangs- und Zielgrößen der Applikation auch dynamisch sicher abbildet und im Applikationsprozeß verwendet werden kann. Obwohl verschiedenste Modellierungsverfahren für unterschiedliche Anwendungen bereits auf dem Markt etabliert sind, scheinen diese offenbar für die Anwendung in der Applikation ungeeignet, woraus sich die Aufgabenstellung ergibt.

1.2.1 Aufgabenstellung

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer virtuellen Streckenbeschreibung zur modellbasierten Applikation typischer Aufgaben im Bereich der Serienentwicklung (Diesel-) PKW Motoren mit dynamischer Gültigkeit. Zunächst soll hierfür ein Anforderungsprofil erstellt werden, welches sinnvoll klassifiziert und in allgemein modellierungstechnische Abbildungskriterien eingeordnet werden muß. Hieraus ist ein Konzept zu erarbeiten, das sowohl die Festlegung der Ein- und Ausgangsgrößen, als auch die Modellarchitektur beinhaltet. Dabei sollen als Eingänge nur

Stellgrößen der Motorregelung bzw. von der Umgebung aufgeprägte Größen dienen. Die Streckenbeschreibung soll dynamische Fahrzyklen (z.B. NEDC) ausreichend genau abbilden können und echtzeitfähig sein, um in allen Entwicklungsumgebungen (z.B. MiL, HiL) anwendbar zu sein. Das erarbeitete Konzept ist im Hinblick auf bereits vorliegende Ansätze zu diskutieren.

Der Konzeptnachweis soll durch Prüfstandsversuche an einem aktuellen Versuchsträger erbracht werden. Dazu ist zunächst eine Strategie zur Parametrierung des Modellkonzepts zu erarbeiten, die am dynamischen Motorprüfstand möglichst automatisiert abgefahren werden kann. Das Modell ist mittels der Versuchsdaten gemäß Konzeptvorschlag zu erstellen und somit die Umsetzbarkeit zu demonstrieren. Zum Nachweis der Leistungsfähigkeit sind geeignete Verifikationsdaten zu erheben und dem simulierten Ergebnis gegenüber zu stellen.

Abschließend ist die Leistungsfähigkeit des erarbeiteten Motormodells für einen typischen Anwendungsfall beispielhaft zu demonstrieren und besonders vor dem Hintergrund der Einsatzfähigkeit in kommerziellen Applikationsprozessen zu bewerten.

1.2.2 Wissenschaftlicher Erkenntnisgewinn

Im Unterschied zu bisherig bekannten Untersuchungen soll die Arbeit auf Belange der Applikation fokussiert sein, was sich primär in den Anforderungen der Streckenbeschreibung ausdrückt. Die Klassifizierung und Einordnung in allgemeine Abbildungskriterien soll einen Vergleich mit bestehenden Konzepten und Produkten ermöglichen und somit den Bedarf eines entsprechenden Neuansatzes verdeutlichen.

Vorrangig ist die wissenschaftliche Herausforderung in der Entwicklung eines Modellierungskonzeptes zu sehen, das diese Anforderungen umsetzt und bisher nicht bekannt ist. Ein Kernpunkt dabei ist, die verschiedenen Dynamiken des motorischen Prozesses über unterschiedliche Modellstrukturen in Segmente der physikalischen Haupteffekte zu separieren und diese Subsysteme über geeignete thermodynamische Kenngrößen zu verbinden. Die zentrale Schwierigkeit stellt die Kombination der dynamischen Gültigkeit des Modells im gesamten Betriebsbereich, eine hinreichende Variabilität der ECU-Parameter und eine ausreichende Genauigkeit für applikative Zwecke dar. Zur Lösung müssen neue Erkenntnisse über Modellierungsstrategien speziell im Hinblick auf die dynamische, betriebsbereich-übergreifende Abbildung des motorischen Prozesses gewonnen werden.

Schließlich ist zu diskutieren, inwiefern der heutige Applikationsprozeß durch modellbasiertes Vorgehen auf Grundlage dieser Streckenbeschreibungen verbessert werden kann.

2 Zusammenfassung

Eine modellbasierte Applikation in einer virtuellen Entwicklungsumgebung ist aus mehreren Gründen vielversprechend. Die Voraussetzung für den Erfolg und die Anwendbarkeit im heutigen Applikationsvorgehen ist eine geeignete motorische Prozeßbeschreibung, die alle Ein- und Ausgänge in ihrem dynamischen Verhalten zuverlässig darstellt. Eine Klassifizierung der diesbezüglichen Anforderungen und die Bewertung heute verfügbarer Ansätze zeigen, daß derzeit kein Verfahren für die Applikation vollständig geeignet ist.

Daher ist das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung einer echtzeitfähigen, dynamischen Streckenbeschreibung des Motors für typische Aufgaben der Applikation, wie dynamische Emissions- und Fahrbarkeitsabstimmung sowie Abgasnachbehandlungs- und OBD-Applikation. Dabei wird die Systemgrenze um den betriebswarmen Motor gezogen, so daß mögliche Subsysteme (wie Abgasnachbehandlung) zur Abdeckung jener Applikationsumfänge mit den Ausgangsgrößen dieser Streckenbeschreibung separat modelliert werden könnten, hier aber nicht erfasst sind.

Der neue Ansatz der empirischen Modellarchitektur separiert die verschiedenen Dynamiken des motorischen Prozesses über unterschiedliche Modellstrukturen in Segmente der physikalischen Haupteffekte. Dies ist der Schlüsselmechanismus, um einerseits die Komplexität abdecken und andererseits die einfache Handhabbarkeit darstellen zu können. Die mittels einer in diesem Zusammenhang entwickelten Qualifikationsmethodik identifizierten, thermodynamischen Kenngrößen verknüpfen die Substrukturen zu einer Ursache-Wirkungskette, die die physikalische Interpretierbarkeit des Modells unterstützt. Die notwendige global dynamische Gültigkeit wird durch die erstmals mögliche Kombination von bereichslokalen Modellen erreicht, deren Eingangsgrößen neben der Motordrehzahl ausschließlich aus Stellgrößen der Motorregelung bzw. Randbedingungen bestehen, um die Verwendung verschiedener Simulationsumgebungen (z.B. HiL-Prüfstand) zu erlauben.

Technische Umsetzung und Potential des vorgeschlagenen Modellierungskonzeptes werden mittels am HiL-Prüfstand durchgeführten Untersuchungen real gemessenen Motorprüfstandszyklen gegenübergestellt und anhand der erreichten Simulationsgenauigkeit unter verschiedenen Randbedingungen validiert. Eine exemplarische Emissionsoptimierung demonstriert nicht nur die gute Handhabbarkeit, sondern zeigt zusätzliche Vorzüge einer virtuellen Entwicklungsumgebung auf.

Die Diskussion zu Auswirkung und Bedeutung der erreichten Verfügbarkeit einer virtuellen Entwicklungsumgebung für die Applikation offenbart, daß diese weit über die dem Motorprüfstand gleichwertige Verwendung hinausgeht, was aber entsprechende Veränderungen im heutigen Applikationsprozeß erfordert. Dazu bedarf es allerdings noch großer Anstrengungen in der Entwicklung geeigneter integrierter Werkzeuge und Methoden.

Abstract

Model-based calibration in a virtual developmental environment is promising for several reasons. Prerequisite is an adequate plant description, which covers in- and outputs for engine calibration especially under transient conditions reliably while being applicable to the established application process of today. A comparison in classified requirements with existing products showed that currently no existing solution can satisfy calibration needs.

Thus the aim of this thesis is to develop a real-time capable while dynamically applicable virtual plant description of an engine for typical tasks in the field of series production applications as dynamic emission-, drivability-, exhaust after-treatment- and OBD-calibration. Here the system boundary is set around the warm engine without considering subsystems like exhaust aftertreatment, which however could be modeled separately by using the outputs of this plant description to cover these calibration tasks as well.

This new approach of empirical modeling architecture separates the different dynamics of the combustion process by different modeling structures into segments of physical main effects. It is believed to be the key to cover complexity on the one hand and allow easy handling on the other hand. These segments are linked to a cause-and-effect-chain via thermodynamic characteristics allowing a physical interpretation of the model. They are identified by a new developed qualification methodology. The required global and dynamic validity is achieved by a first time possible combination of local dynamic models, which inputs are (besides engine speed) ECU actuators only, allowing easy integration into various calibration environments, e.g. HiL systems.

Technical realization and potential of the suggested modeling concept is verified by comparing simulation accuracy under different boundary conditions using measurements of HiL-simulated and engine test bed cycles. An exemplary emission optimization is demonstrating not only good usability but also additional benefits of a virtual developmental environment.

The following discussion regarding consequence and importance of the achieved availability of a virtual developmental environment for calibration purposes reveals a higher potential than just replacing the engine test bed while requiring appropriate changes in today's calibration process. For that however further effort in developing suitable integral tools and methods is necessary.

3 Stand der Technik

Die Verbrennung stellt den entscheidenden Vorgang im Arbeitsprozeß des Verbrennungsmotors dar [103]. Ein Überblick über Prozeßführung und Charakterisierung heutiger Brennverfahren, die zu verringernden emittierten Schadstoffe als wesentlicher Treiber des Entwicklungsprozeß, Möglichkeiten der Abgasnachbehandlung sowie alternative Brennverfahren sei daher eingangs in diesem Kapitel gegeben. Die in heutigen Verbrennungsmotoren nicht mehr wegzudenkende elektronische Motorregelung wird anschließend in allgemeiner Funktionsweise und speziell in Hinblick auf Regelung des Brennverfahrens beleuchtet. Danach wird auf die Modellbildung von Verbrennungsmotoren bei physikalischer oder empirischer Herangehensweise eingegangen, außerdem werden im Rahmen dieser Arbeit relevante und veröffentlichte Motormodelle vorgestellt und mögliche virtuelle Entwicklungsumgebungen als Plattform derartiger Motormodelle charakterisiert. Als entscheidend für diese Arbeit können auch Meßtechnik und Optimiermethoden am Motorprüfstand angesehen werden, weshalb auf ausgewählte Aspekte hier näher eingegangen wird. Schließlich werden die verschiedenen Phasen und Vorgehensweisen des heutigen Applikationsprozeß vorgestellt.

Aufgrund des für diese Arbeit gewählten Versuchsträgers fokussiert dieses Kapitel teilweise ausschließlich auf den (PKW-) Dieselmotor.

3.1 *Verbrennung im modernen Dieselmotor*

Während die konstruktive Auslegung von Verbrennungsmotoren im Wesentlichen die Herstellkosten, das Gewicht, das Package sowie das Leistungs- und Drehmomentpotential bestimmt, werden die tatsächliche Leistung, das tatsächliche Drehmoment, Emissionen, Verbrauch, dynamisches Verhalten und Diagnose durch die jeweilige Applikation festgelegt. Hierbei spielt die Auslegung des Brennverfahrens eine entscheidende Rolle, welche die durch hoch dynamische Strömungsvorgänge, molekularen Transport und chemische Reaktionen gekennzeichnete Verbrennung entscheidend beeinflusst. [87] [103]

Die wesentlichen Merkmale des dieselmotorischen Prozesses sind Luftverdichtung, Brennstoffeinspritzung in den Zylinder, Selbstzündung und Qualitätsregelung. Der Verbrennungsablauf kann in die Phasen Einspritzung, Gemischbildung, Zündung und Verbrennung unterteilt werden. Entscheidenden Einfluß auf die Phasen haben der Zustand im Brennraum hinsichtlich Druck und Temperatur, die Masse, Zusammensetzung und Bewegung der Ladung sowie die Einspritzung. [63] [71] [101]

3.1.1 Brennverfahren

Die grundsätzliche und umfassende Auslegung eines dieselmotorischen Brennverfahrens beinhaltet im Allgemeinen die nachfolgenden Applikationsparameter:

- Brennraum mit Muldengeometrie, Verdichtungsverhältnis und Schadvolumen
- Zylinderfüllung mit thermodynamischen Zustandsgrößen, Zusammensetzung der Füllung und Strömungszustand (Ladungsbewegung)
- Kraftstoffeinspritzung mit Düsengeometrie (Lochanzahl, Lochdurchmesser, Lochanordnung, Einspritzwinkel, Nadelsitz), Einspritzdruck und -charakteristik, Einspritzzeitpunkt, Einspritzstrategie und Einspritzverlauf (Rampe, Rechteck, freie Verlaufsformung)
- Ladungswechsel

Diese können in fixe motorspezifische und veränderbare Betriebsparameter unterschieden werden, wobei letztere in der Regel durch die elektronische Motorregelung eingestellt werden, um das Brennverfahren optimal an den jeweiligen Betriebspunkt anzupassen. [60] [101]

3.1.1.1 Prozeß

Bei konventionellen Dieselmotoren beginnt der Verbrennungsprozeß mit der Brennstoffeinspritzung in hoch verdichtete Luft (innere Gemischbildung). Mit der eingespritzten Menge wird die Last des Motors geregelt (Qualitätsregelung). Durch die späte direkte Brennstoffeinspritzung ergibt sich ein inhomogenes Gemisch, das zu einer nicht vorgemischten Verbrennung durch Selbstzündung führt. Diese Vorgänge sind überaus komplex, da die Gemischaufbereitung im Brennraum erfolgt und alle Phänomene dreidimensionalen Charakter aufweisen.

Unmittelbar nach Eintritt in den Brennraum zerfällt der Einspritzstrahl in kleine Tröpfchen, an deren Oberfläche durch Wärmeübertragung Dampf-Sättigungsdruck erreicht wird. Sobald dieser Brennstoffdampf mit der umgebenden Luft ein Gemisch innerhalb der Zündgrenzen erreicht, Abbildung 3-1, und die chemischen Initialreaktionen abgelaufen sind, erfolgt die Selbstzündung. Während dieser vorgemischte Teil des eingespritzten Kraftstoffs spontan mit hohem Druckanstieg verbrennt, ist die folgende, diffusionskontrollierte Hauptverbrennung durch die turbulenzgesteuerten Mischungsvorgänge wesentlich langsamer und endet im thermodynamisch ungünstigen Nachbrennen (verschleppte Verbrennung). [31] [63] [75] [103]

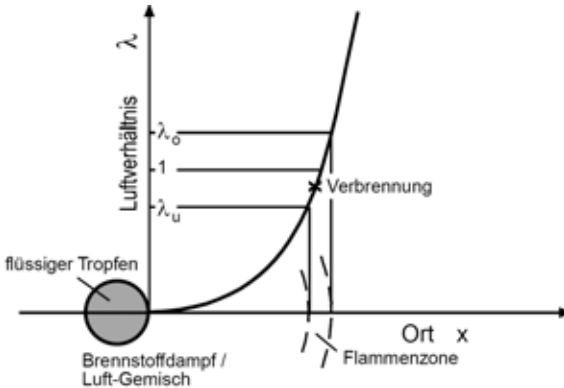


Abbildung 3-1: Prinzipdarstellung der nicht-vorgemischten Verbrennung [103]

3.1.1.2 Charakterisierung

Zur Auslegung wie Analyse eines Brennverfahrens werden aufgrund der komplexen Zusammenhänge charakterisierende Kennzahlen benötigt, anhand derer unterschiedliche Prozesssegmente miteinander verglichen werden. Für das Thema dieser Arbeit wichtige Größen sollen hier kurz vorgestellt werden.

Dominanten Einfluß auf die Verbrennung hat zunächst der Betriebspunkt des Motors ausgedrückt in Drehzahl N und Last, welche in diesem Zusammenhang meist als innerer bzw. indizierter Mitteldruck (p_{mi}) angegeben wird. Der Mitteldruck stellt die auf das Hubvolumen V_h bezogene Arbeit je Arbeitsspiel dar und kann aus dem Zylinderdruck p_{zyl} gemäß Formel 3-1 berechnet werden:

Formel 3-1:

$$p_{mi} = \oint \frac{p_{zyl} \cdot dV}{V_h}$$

Während die Drehzahl die zeitliche Dauer für sämtliche an der Verbrennung beteiligten Prozesse eingrenzt, bestimmt sie zusätzlich ganz wesentlich das im Brennraum vorliegende Turbulenzniveau. Die vorgegebene Last dagegen fordert zunächst eine entsprechende Einspritzmenge und bestimmt daher die in den Prozeß eingebrachte Brennstoffenergie und somit das thermische Niveau des Motors.

Die zur Umsetzung des eingebrachten Kraftstoffs zur Verfügung stehende Luftmenge, ausgedrückt im Kraftstoff-Luftverhältnis, wird ebenfalls häufig zur Betriebspunktcharakterisierung verwendet. Hierbei muß bei inhomogenen Gemischen zwischen lokalem und globalem Kraftstoff-Luftverhältnis unterschieden werden. Das globale Kraftstoff-Luftverhältnis λ ist gemäß Formel 3-2 definiert als Verhältnis von zugeführter Luftmasse m_L zu stöchiometrischem Luftbedarf L_{st} und zugeführter Brennstoffmasse m_B und bestimmt wesentlich die Konzentrationen der Schadstoffemissionen.

Formel 3-2:
$$\lambda = \frac{m_L}{L_{st} \cdot m_B}$$

Zur Analyse des Brennverfahrens im derart definierten Betriebspunkt ist in Kombination mit dem Zylinderdruckverlauf der sogenannte Heizverlauf $dQ_H/d\varphi$ bzw. Brennverlauf $dQ_B/d\varphi$ von entscheidender Bedeutung. Der Heizverlauf setzt sich aus der abgeführten Wandwärme sowie dem Brennverlauf zusammen, der wiederum die Ableitung der umgesetzten Brennstoffenergie Q_B nach dem Kurbelwinkel φ darstellt. Der Heizverlauf kann aus dem gemessenen Zylinderdruckverlauf über den 1. Hauptsatz der Thermodynamik gemäß Formel 3-3 berechnet werden.

Formel 3-3:
$$\frac{dQ_H}{d\varphi} = \frac{dQ_B}{d\varphi} - \frac{dQ_W}{d\varphi} = \frac{dU}{d\varphi} + \frac{p_{Zyl}dV}{d\varphi} + h_A \frac{dm_{Leck}}{d\varphi}$$

Während der Brennverlauf die Wandwärmeverluste Q_W in der Energiebilanz berücksichtigt, werden diese bei Berechnung des Heizverlaufes nicht explizit ausgewiesen, was Vorteile bezüglich Rechengeschwindigkeit bei nur geringen Abweichungen bringt, weshalb im Weiteren stets der Heizverlauf verwendet wird.

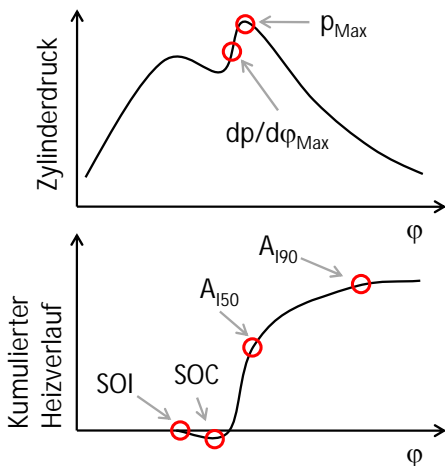


Abbildung 3-2: Ausgewählte Kenngrößen des Zylinderdruckverlaufs (oben) und des kumulierten Heizverlaufs (unten)

In Abbildung 3-2 sind beispielhaft für eine Dieselerbrennung ein kumulierter Heizverlauf und der zugehörige Zylinderdruck über dem Kurbelwinkel φ dargestellt. Es ist ersichtlich, daß nach Beginn der Einspritzung (SOI) der Heizverlauf zunächst negativ wird, was primär in der zur Brennstoffverdampfung erforderlichen Energie begründet ist, die dem Prozeß Wärme entzieht. Der Verbrennungsbeginn

(SOC) wird definiert als der Kurbelwinkel, an dem der Heizverlauf sein globales Minimum aufweist, was gleichbedeutend mit dem ersten Druckanstieg durch die Verbrennung ist. Der Zeitraum zwischen SOI und SOC wird Zündverzug genannt und ist eine wichtige Kenngröße jedes Brennverfahrens. Die Einflüsse auf den Zündverzug sind so vielfältig wie die Einstellparameter eines Brennverfahrens, tendenziell verkürzt sich der Zündverzug mit zunehmender Drehzahl und Last. Nach der Zündung folgt die vorgemischte Verbrennung mit steilem Gradienten in Heizverlauf und Zylinderdruck, bekannt auch als „Dieselschlag“. Der maximale Gradient des Zylinderdrucks $dp/d\varphi_{Max}$ kann daher als charakteristisch für diese Phase angesehen werden und bestimmt maßgeblich das Verbrennungsgeräusch des Motors. Über Verkürzung des Zündverzuges kann ein weicherer Zylinderdruckverlauf und somit ein geringeres $dp/d\varphi_{Max}$ erreicht werden.

Eine wichtige Kenngröße der Hauptverbrennung ist die Lage des Verbrennungsschwerpunktes A_{150} , die den Kurbelwinkel der 50%-igen Brennstoffumsetzung angibt. Die Schwerpunktlage ist entscheidend für den Wirkungsgrad, da Spitzendruck p_{Max} und -temperatur hiervon stark beeinflusst werden, die wiederum Auswirkungen auf Bauteilbeanspruchung und Schadstoffemission haben. Zu frühe Schwerpunktlagen sind daher möglichst zu vermeiden.

Das Verbrennungsende wird je nach Literatur mit dem Kurbelwinkel 90%-iger oder 95%-iger Brennstoffumsetzung festgelegt und liegt vergleichsweise spät aufgrund der zunehmend langsameren Umsetzung durch fallenden Zylinderdruck und -temperatur sowie geringere Sauerstoffkonzentration. Aufgrund des in Abbildung 3-2 ersichtlichen asymptotischen Verhaltens des kumulierten Heizverlaufs gegen Ende der Verbrennung ist eine rechnerische Bestimmung des Kurbelwinkels 90%-iger Brennstoffumsetzung A_{190} aus Meßdaten stabiler, weshalb jene Umsatzrate für diese Arbeit gewählt wurde. Mit Definition eines Verbrennungsendes kann nun auch die Verbrennungsdauer (Comb. dur.) als Differenz von A_{190} zu A_{SOC} bestimmt werden, die ebenfalls einen hohen Einfluß auf den Wirkungsgrad der Verbrennung und damit verbundene Faktoren hat. [7] [31] [71] [75] [103]

3.1.2 Abgasemissionen

Die Komponenten des Verbrennungsgases herkömmlicher Motoren können in Produkte vollständiger und unvollständiger Verbrennung unterteilt werden, was entscheidende Bedeutung für die Höhe ihrer Konzentration im Abgas hat.

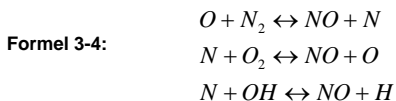
Eine vollständige und ideale Verbrennung würde abhängig vom Betriebspunkt beim Dieselmotor lediglich ca. 9% H₂O (Wasser) und 8% CO₂ (Kohlendioxid) produzieren, NO₂ (Stickstoff) würde als inerte Komponente 74% und O₂ (Sauerstoff) je nach Luftüberschuß ($\lambda > 1$) die restlichen Massenanteile von 9% des Abgas ausmachen [34]. Während CO₂ zwar nicht als Schadstoff im klassischen Sinne deklariert ist, ist doch seine Wirkung in Hinblick auf den Treibhauseffekt zunehmend ins öffentliche Interesse gerückt, weshalb zum Klimaschutz international verbindliche

Ziele zur CO₂-Reduktion vereinbart wurden. Für die Automobilindustrie wurden Flottendurchschnitte definiert, die bei Überschreitung zu gestaffelten Kompensationszahlungen führen. Hierzu sei erwähnt, daß bei gegebenem Kraftstoff die CO₂-Emission direkt proportional zum Brennstoffverbrauch ist, sich aber durch alternative Brennstoffe wie Erdgas günstigere Verhältnisse diesbezüglich ergeben.

Bei der in Verbrennungsmotoren real ablaufenden unvollständigen Verbrennung entstehen zusätzliche Schadstoffe, deren Konzentration zwar wesentlich geringer, ihre jeweiligen Wirkungen auf den menschlichen Organismus aber deutlich schwerwiegender sind. Als wesentliche Komponenten sind NO_x (Stickoxide), THC (Kohlenwasserstoffe), CO (Kohlenmonoxid) und Partikel unterschiedlicher Zusammensetzung zu nennen, deren Emission vom Gesetzgeber je nach Komponente in unterschiedlicher Höhe limitiert ist. In Europa wird dazu der neue europäische Fahrzyklus (NEDC) durchfahren, wobei diese Emissionen über eine CVS-Anlage in Beuteln gesammelt werden und schließlich in g/km umgerechnet eine je nach Emissionsstufe definierte Grenze nicht überschreiten dürfen. Damit werden auch in der Praxis relevante instationäre Zustände erfaßt, bei denen sich in aufeinanderfolgenden Arbeitszyklen unterschiedliche Temperaturen im Brennraum, im Motor und vor allem im Abgasnachbehandlungssystem ergeben. Hierfür sind die stationär ermittelten Emissionen in der Regel nicht ausreichend.

Die Effekte, die zur Schadstoffbildung der dieselmotorischen Verbrennung führen, sind je nach Komponente sehr unterschiedlich.

Die Stickoxide NO_x entstehen primär in den stöchiometrischen oder leicht überstöchiometrischen Flammenzonen hoher Temperatur und sind gut durch die 1946 erstmals von Zeldovich [107] formulierten drei Elementarreaktionen gemäß Formel 3-4 beschrieben.



Wesentliche Einflußfaktoren sind somit der Sauerstoffgehalt, die Temperatur und die Verweilzeit in der Reaktionszone.

Unter THC sind alle Formen nicht vollständig oxidiertes Kohlenwasserstoffe zusammengefaßt, die meist der Zusammensetzung des Brennstoffes ähnlich sind. Sie entstehen in stark mageren Zonen, wo entweder die Bedingungen zur Selbstzündung nicht erreicht werden oder wo die Flamme z.B. in Brennraumpalten erlischt.

Die Kohlenmonoxidanteile sind insgesamt bei Dieselmotoren sehr niedrig und steigen erst bei lokal unterstöchiometrischen Kraftstoff-Luftverhältnissen stärker an. Bei ausreichendem globalen Kraftstoff-Luftverhältnis wird in der Expansionsphase die Konzentration durch Nachoxidation verringert.

Als Partikel wird die Menge aller Stoffe bezeichnet, die nach Durchlaufen einer Konditionierstrecke auf einem definierten Filter zurückbleiben. Da hiermit die physiologische Wirkung - primär abhängig von der Größe der Partikel - unberücksichtigt bleibt, wurden für die Zukunft bereits alternative Verfahren zur größenabhängigen Anzahlerfassung entwickelt. Die Zusammensetzung eines Partikels ergibt sich zum größten Teil aus atomarem Kohlenstoff (C), an den sich Kohlenwasserstoffe, Sulfate und Asche aus diversen Quellen anlagern. Die genaue Entstehung von Partikeln ist bis heute Teil intensiver Forschung und nur in Hypothesen erklärbar. Für die eigentliche Rußbildung und -oxidation sind im Wesentlichen der lokale Sauerstoffgehalt und die lokale Temperatur entscheidend.

Trotz der unterschiedlichen Effekte der jeweiligen Schadstoffbildung und der sehr inhomogenen Verbrennung kann die Konzentration im Rohabgas typischer Weise als eine Funktion des globalen Kraftstoff-Luftverhältnisses gemäß Abbildung 3-3 dargestellt werden. [80] [96] [103] [108]

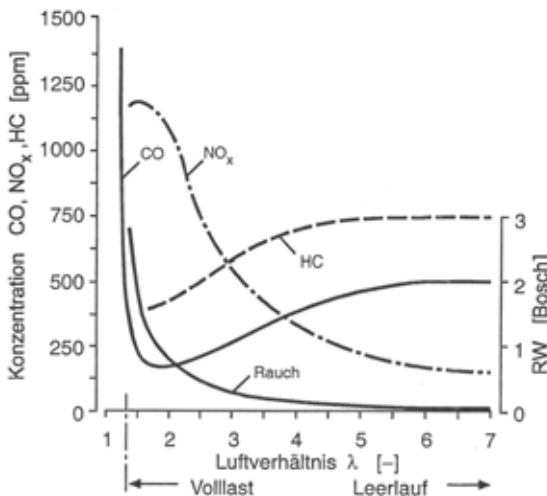


Abbildung 3-3: Schadstoffbildung im Dieselmotor über dem globalen Kraftstoff-Luftverhältnis [80]

3.1.3 Abgasnachbehandlung

Nachfolgend wird nur kurz auf die wichtigsten Punkte heutiger Abgasnachbehandlungssysteme eingegangen, da diese keine direkte Relevanz für diese Arbeit haben. Zur Einhaltung zukünftiger Abgasnormen sind sie jedoch unverzichtbar und haben daher für die Applikation hohe Bedeutung. Speziell das temperaturabhängige Wirkungsgradverhalten dieser Systeme wirkt sich auch auf die Basisabstimmung aus, weshalb z.B. die Abgastemperatur von hoher Bedeutung ist.

Heutige Dieselmotoren sind mit Oxidationskatalysatoren ausgestattet, die Konvertierungsraten bis 90% aller THC und CO Rohemissionen ermöglichen. Aufgrund des ohnehin schon geringen Niveaus dieser Schadstoffe, ist daher der Fokus der Abgasnachbehandlung des Dieselmotors in den NO_x und Partikelemissionen zu sehen.

In Abbildung 3-4 ist die weitere Entwicklung der Emissionsvorschriften in Europa und USA für NO_x und Partikel dargestellt. Aufgrund der zukünftigen Grenzwerte für Partikel ist der Einsatz entsprechender Filter mit geschlossenen Kanälen unumgänglich. Hier kann man im Wesentlichen zwei Systeme unterscheiden: Beim CRT-System (continuously regenerating trap) findet ein kontinuierlicher Rußabbrand statt, während bei anderen Systemen der Ruß zunächst im Filter gespeichert und in gewissen Intervallen abgebrannt wird. Dabei kommt der Bestimmung des Regenerationszeitpunktes entscheidende Bedeutung zu, weshalb genaue Kenntnis der Beladung des Filters vorteilhaft ist. Außerdem ist eine spezielle Regenerationsstrategie inklusive eines darauf abgestimmten Brennverfahrens sowie die Zugabe eines Additivs oder eine katalytisch wirksame Beschichtung des Partikelfilters erforderlich.

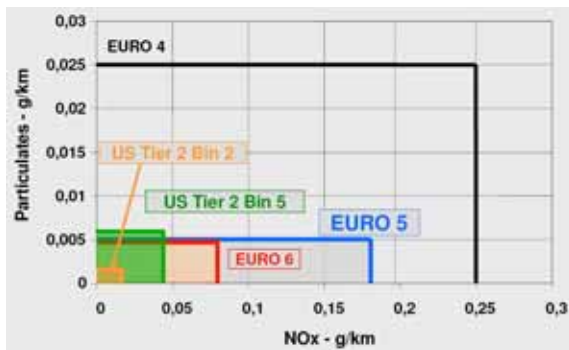


Abbildung 3-4: Zukünftige Emissionsvorschriften in Europa und USA

Während lange Zeit der Dieselmotor NO_x primär durch Abgasrückführung (AGR) für die jeweilige Emissionsstufe ausreichend reduzieren konnte, haben sich in letzter Zeit zwei katalytische Methoden zur zusätzlichen Nachbehandlung etabliert. Zum einen ist der Speicherkatalysator zu nennen, der NO_x temporär einspeichern kann und durch unterstöchiometrischen Betrieb regeneriert wird. Hierzu ist ebenfalls eine spezielle Regenerationsstrategie mit eigenem Brennverfahren erforderlich. Zum Anderen bietet das SCR-Verfahren (selective catalytic reduction) über Eindosierung von aus Harnstoff gebildetem Ammoniak eine Möglichkeit zur kontinuierlichen Reduktion von NO_x . Dadurch bleibt zwar das Brennverfahren unberührt, eine Strategie zur Eindosierung und Sicherstellung des temperaturabhängigen Wirkungsgrades ist aber dennoch erforderlich. [17] [18] [80]

3.1.4 Alternative Brennverfahren

Vor dem Szenario steigender Systemkosten durch aufwendige Abgasnachbehandlung beim Dieselmotor werden parallel alternative Brennverfahren zur Rohemissionsreduktion intensiv erforscht. Kernpunkt der Entwicklung ist die Vermeidung von Brennraumzuständen hoher NO_x - oder Rußbildung aufgrund ungünstiger lokaler Kombinationen aus Kraftstoff-Luftverhältnis und Brennraumtemperatur. Hierzu wurde die Idee der homogenen Dieselerverbrennung wieder aufgegriffen, bei der auf der einen Seite keine Flammenfront mit hohen Temperaturen und auf der anderen Seite keine unterstöchiometrischen Zonen im Gemisch entstehen. Die hierfür nötige Gemischhomogenisierung kann auf verschiedene Arten realisiert werden, die bekanntesten sind durch das HCCI (homogeneous charge compression ignition) und das HPLI (highly premixed late injection) Verfahren charakterisiert und unterscheiden sich im Zeitpunkt der Brennstoffeinspritzung. In beiden Fällen sind hohe AGR Raten zur Zündverzugsverlängerung nötig, weshalb die Anwendung der Brennverfahren auf die Teillast begrenzt werden muß. Zusätzlich sind zylinderdruckgeführte Motorregelungen zur sicheren Prozeßführung speziell unter transienten Bedingungen nötig. [11] [20] [33] [83] [103]

3.2 *Elektronische Motorregelung*

Seit Einführung elektronischer Motorregelungen (ECU) in den achtziger Jahren zur Abstimmung von Dieselmotoren wurde deren Funktionalität kontinuierlich erweitert und verbessert. Heute werden nahezu alle Komponenten des Motors elektronisch gesteuert oder geregelt, um Aufgaben wie Sicherstellung der gesetzeskonformen Abgasemission bei Umsetzung des Drehmomentwunsches des Fahrers mit geringem Verbrauch und hohem Fahrkomfort zu erfüllen. Hierzu erfaßt die ECU mittels Sensoren erforderliche Betriebsgrößen wie beispielsweise die Drehzahl oder Umgebungszustände, verarbeitet diese Informationen und berechnet schließlich die erforderlichen Stellsignale der Aktuatoren. Zusätzlich wird der Motor hinsichtlich fehlerfreier Funktionalität mittels On-Board-Diagnose (OBD) überwacht. Typische Komponenten einer ausgeführten elektronischen Motorregelung für Dieselmotoren zeigt Abbildung 3-5. [44] [74] [75] [76]

3.2.1 Allgemeine Funktionsweise

Bei heutigen Motorregelungen mit drehmomentbasierter Funktionsstruktur wird das über das Fahrpedal eingelesene Fahrerwunschmoment in ein inneres Motorsollmoment umgerechnet und im Weiteren als Führungsgröße unter Beachtung der Drehzahl verwendet. Dabei ist die ECU mit anderen Steuergeräten des Antriebsstrangs wie beispielsweise dem elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP) sowie des restlichen Fahrzeugs vernetzt, um Daten zu berücksichtigen bzw. bereitzustellen. Neben der Koordination des inneren Motormomentes, in das Anforderungen des Getriebes, der Nebenaggregate sowie Fahrbarkeitsfunktionalitäten etc.

eingehen, sind die entsprechende Ansteuerung der Aktuatoren des Einspritzsystems und des Luftpfads zentrale Funktionen jeder Motorregelung. [76]

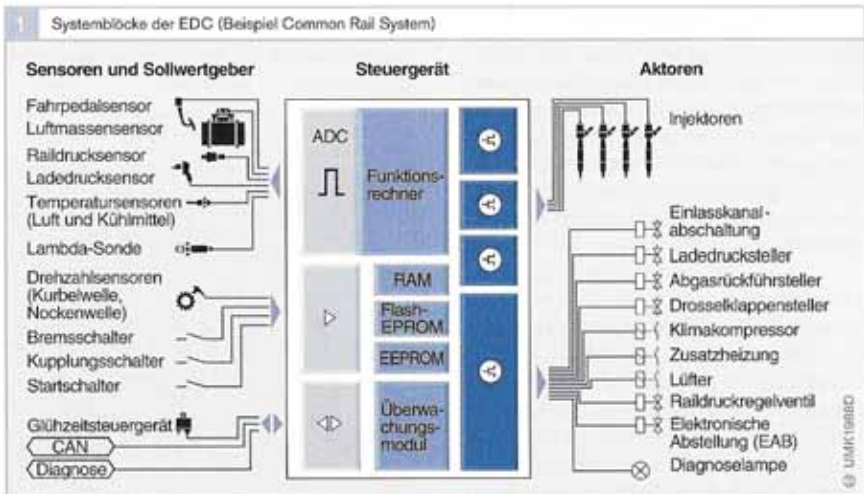


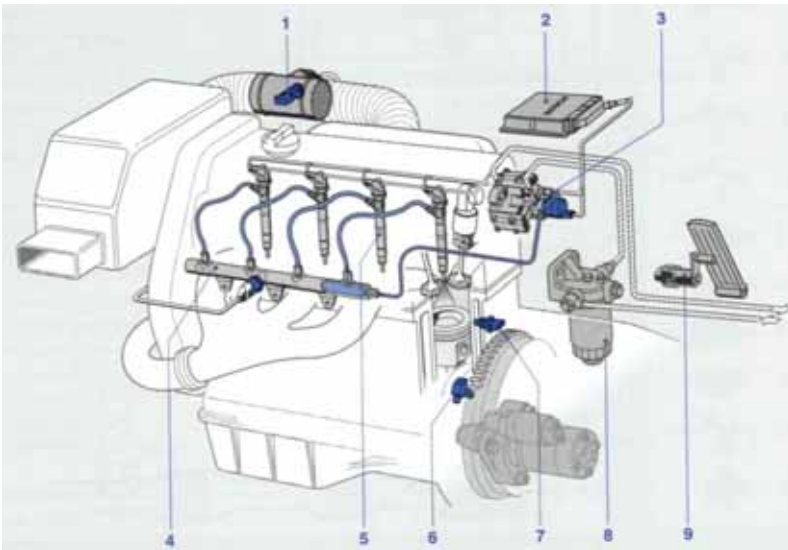
Abbildung 3-5: Komponenten einer elektronischer Motorregelung [76]

3.2.1.1 Einspritzsystem

Für heutige Diesel-PKW haben sich Common-Rail (CR) Einspritzsysteme aufgrund ihrer großen Variationsmöglichkeiten bei Gestaltung des Einspritzdrucks, der Anzahl der Einspritzungen und der jeweiligen Einspritzzeitpunkte etabliert. Dies wird durch Entkoppelung der Druckerzeugung über eine Hochdruckpumpe und der Einspritzung mit Injektoren erreicht, wobei als Druckspeicher das „Rail“ dient, siehe Abbildung 3-6. Kennzeichnend für ein CR-System ist die vom Betriebspunkt weitestgehend unabhängige Einstellung des Raildrucks (P_{Rail}) über ein Regelventil im Rail oder die Zumeßeinheit der Hochdruckpumpe. Hierzu bedarf es einer im Einspritzmodul der ECU abgelegten Regelung, die den gewünschten Solldruck über diese Stellmöglichkeiten mit dem im Rail gemessenen Istdruck abgleicht. Der maximale Einspritzdruck solcher Systeme liegt derzeit etwa in der Größenordnung von 2000 bar.

Da beim Dieselmotor die Last über die eingespritzte Menge des Brennstoffs geregelt wird (siehe Abschnitt 3.1.1.1), rechnet die Motorregelung das innere Motorsollmoment zunächst in eine Menge und im weiteren Verlauf in eine Ansteuerdauer für die Injektoren um. Die Injektoren enthalten schnell schaltende Ventile (Magnetventil oder Piezosteller), über die die Einspritzdüsen geöffnet und geschlossen werden, so daß die Einspritzung jedes Zylinders einzeln gesteuert werden kann. Die Öff-

nungsdauer des Injektors und der anliegende Raildruck bestimmen so die eingebrachte Kraftstoffmenge.



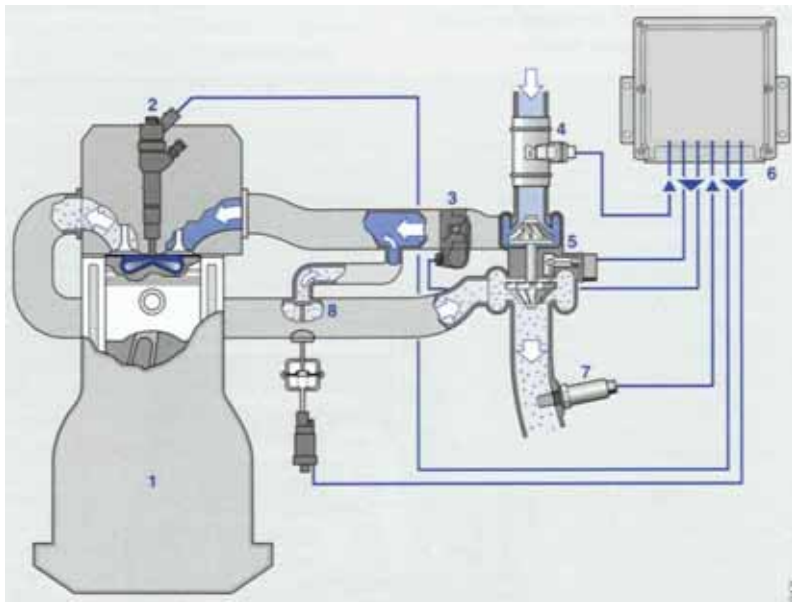
- | | | |
|--------------------|---------------------|--------------------|
| 1 Heißfilm-Luft- | 4 Hochdruckspeicher | 7 Motortemperatur- |
| massenmesser | (Rail) | sensor |
| 2 Motorsteuergerät | 5 Injektor | 8 Kraftstofffilter |
| 3 Hochdruckpumpe | 6 Kurbelwellendreh- | 9 Fahrpedalsensor |
| | zahlsensor | |

Abbildung 3-6: Komponenten eines Common-Rail-Systems [76]

Mit mehrmaligem Ansteuern des Injektors sind sogenannte Mehrfacheinspritzungen möglich. Heutige Systeme ermöglichen bis zu fünf Einspritzungen je Verbrennungszyklus, wodurch eine hohe Flexibilität der Einspritzverlaufsgestaltung ermöglicht wird. Grundsätzlich kann hier zwischen Vor- (Pilot) und Nacheinspritzungen (Post) unterschieden werden, was in der zeitlichen Abfolge gegenüber der Haupteinspritzung begründet ist. Während der fast beliebig wählbare Beginn der Haupteinspritzung bei CR-System meist auf den oberen Totpunkt (TDC) bezogen wird, sind die ebenfalls weitestgehend frei wählbaren Beginne der Nebeneinspritzungen meist relativ zum Beginn der Haupteinspritzung angesteuert. Zusätzlich kann die Menge der Nebeneinspritzungen in weiten Grenzen variiert werden, so daß sich eine Vielzahl an Freiheitsgraden ergibt und daraus entstehende Auswirkungen z.B. auf das innere Motormoment entsprechend in der Motorregelung berücksichtigt werden müssen. [74] [75] [76]

3.2.1.2 Luftsysteem

Neben dem Einspritzsystem stellt für heutige Dieselmotoren die Regelung des Luftsysteems ein wesentliches Modul der Motorregelung dar. Die bekanntesten Komponenten sind die Regelung und Aktuatoransteuerung für Abgasrückführung (AGR) und Aufladesystem. Mögliche Aufladekonzepte und entsprechende Regelungskonzepte sind mittlerweile vielfältig. Für einstufige Aufladung hat der Turbolader mit variabler Turbinengeometrie (VTG) weite Verbreitung gefunden. Weitere teilweise optionale Komponenten wie Heißfilm-Luftmaßenmesser (HFM), Ansaugdrossel, Drallklappe, Lambdasonde etc. sind ebenfalls in die Motorregelung eingebunden, siehe Abbildung 3-7. Somit ergibt sich auch für den Luftpfad je nach Systemauslegung eine Vielzahl von Freiheitsgraden zur Beeinflussung der motorischen Prozeßführung.



- | | | |
|----------------------|---------------------|-----------------------|
| 1 Dieselmotor | 4 Heißfilm-Luftmas- | 6 EDC-Motor- |
| 2 Einspritzkomponent | senmesser | steuergerät |
| (hier Common Rail | 5 Turbolader | 7 Breitband-Lambda- |
| Injektor) | (hier VTG-Lader) | Sonde |
| 3 Regelklappe | | 8 Abgasrückführventil |

Abbildung 3-7: Typische Systemkomponenten des Luftpfades [76]

Aufgrund der hohen Interaktion der Komponenten besonders im transienten Betrieb ist man heute bestrebt, modellbasierte Funktionen zur Regelung des Luftpfades einzusetzen. Dabei wird das reale Systemverhalten des Luftpfades soweit idealisiert, daß die verbleibenden Modellgleichungen in Echtzeit im Steuergerät gerechnet werden können. Besondere Bedeutung kommt der Abbildung des Saugrohres zu, das aufgrund des großen Volumens ausgeprägte Speichereffekte aufweist und deshalb meist durch sogenannte Behältermodelle nachgebildet wird. Dem höheren Aufwand zur Parametrierung dieser Strukturen stehen als wesentliche Vorteile folgende Punkte gegenüber [76]:

- Höhere Qualität dynamischer Meßsignale
- Berechnung nicht meßbarer Signale (z.B. AGR-Rate)
- Verbesserte dynamische Regelung
- Plausibilisierung und Korrektur von Sensoren

3.2.1.3 Abgasmanagement

Wie aus Abschnitt 3.1.3 bekannt, sind für heutige Emissionsstandards innermotorische Maßnahmen nicht mehr ausreichend. Die zur Abgasnachbehandlung eingesetzten Systeme erfordern ihrerseits eine Steuerung und Überwachung der jeweiligen Funktionen. Auch hier werden vermehrt modellbasierte Ansätze zur Zustandserfassung, Temperaturregelung und gegebenenfalls Regenerationssteuerung eingesetzt, die hohe Auswirkungen auf das Brennverfahren haben, aber vom Fahrer unbemerkt ablaufen sollen. Die entsprechende Applikation solcher Systeme stellt heute einen wesentlichen Umfang in der Entwicklung dar. [74]

3.2.1.4 On-Board-Diagnose

Die im Steuergerät integrierte Diagnose zur Selbstprüfung und Überwachung der Ein- und Ausgangssignale ist seit jeher Teil einer elektronischen Motorsteuerung. Erkannte Fehler werden im Speicher abgelegt und können über entsprechende Schnittstellen ausgelesen werden.

Zur Sicherstellung der zertifizierten Emissionsstufen im Alltagsbetrieb müssen auch die individuellen Funktionalitäten der Motorregelung plausibilisiert und überwacht werden. Dies wird seit Januar 2000 auch in der EU unter dem Begriff EOBD vorgeschrieben und umfaßt alle abgasrelevanten Systeme und Komponenten, die bei Fehlfunktion zu einer Erhöhung der limitierten Schadstoffe führen würde. Die Malfunction-Indicator-Lamp weist im Falle einer OBD-Grenzwertüberschreitung den Fahrer auf eine Störung hin. Für die Applikation bedeutet diese Vorschrift deutlich erweiterte Umfänge, wie beispielsweise die experimentelle Ermittlung von jeweiligen Schwellwerten der Schadstoffe zur Aktivierung der Malfunction-Indicator-Lamp (MiL). [89] [91]

3.2.2 Regelung des Brennverfahrens

Wie bereits in Abschnitt 3.1.1 erwähnt, kann das Brennverfahren wesentlich durch einstellbare Parameter der Motorregelung beeinflusst werden. In diesem Abschnitt sollen daher kurz die wichtigsten Zusammenhänge beschrieben werden. Ein Intersection Plot illustriert die Effekte der diskutierten Variationsparameter für wesentliche Parameter des Brennverfahrens eines typischen Teillastpunktes, siehe . In dieser Grafik werden die Ausgangsgrößen über alle Variationsparameter dargestellt, um die Abhängigkeiten der Variationsparameter auf die Ausgangsgrößen bewerten zu können. So ist der singuläre Einfluß jedes Variationsparameters bei sonst gleichen Randbedingungen auf das Brennverfahren zu erkennen.

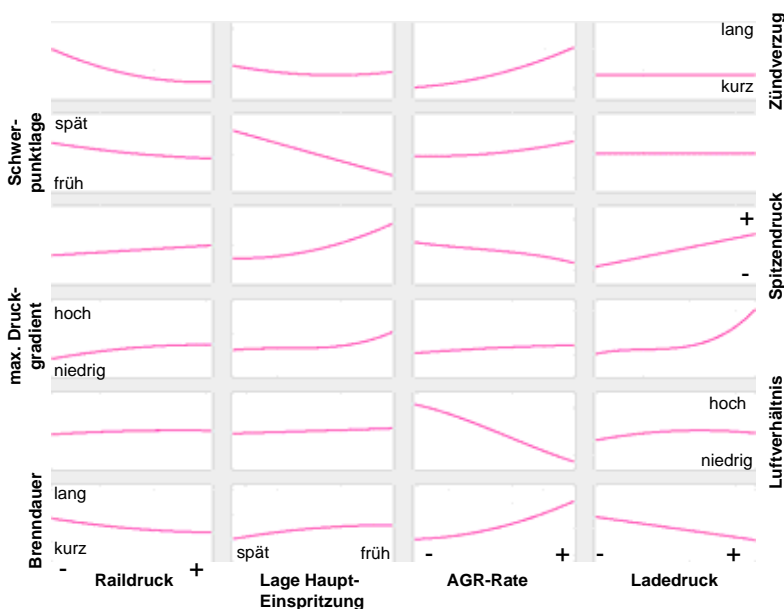


Abbildung 3-8: Auswirkungen ausgewählter ECU-Variationsparameter auf das Brennverfahren

3.2.2.1 Raildruck

Mit steigendem Einspritzdruck P_{Rail} kann zunächst rein physikalisch bei gleicher Injektoransteuerung und Düsengeometrie mehr Kraftstoff pro Zeit in den Brennraum eingebracht werden. Gleichzeitig fungiert die Einspritzung als wesentlicher Turbulenzgenerator, so daß mit Steigerung des Raildrucks die kinetische Energie des Einspritzstrahls und die Zerstäubungsqualität zunehmen. Durch diese Effekte verringert sich der Zündverzug und die Verbrennung läuft insgesamt schneller ab, d.h. die Brenndauer wird kürzer und der Schwerpunkt verschiebt sich nach früh.

Allerdings ist auch ein im Verbrennungsgeräusch nachteiliger, erhöhter maximaler Druckgradient aufgrund des höheren vorgemischten Anteils der Verbrennung zu beobachten. Je nach Lage der Haupteinspritzung kann dies auch eine Zunahme des Zylinderspitzendruckes bedeuten. [13] [28] [29]

3.2.2.2 Lage Haupteinspritzung

Mit Variation des Ansteuerbeginns der Haupteinspritzung (*SOI*) verschieben sich Brennbeginn und Verbrennungsschwerpunkt entsprechend, der grundsätzliche Heizverlauf bleibt jedoch erhalten. Aufgrund der Überlagerung mit dem Kompressionsverlauf führen späte Lagen der Haupteinspritzung zu geringeren Wirkungsgraden und somit bei gleicher Last zu höheren Einspritzmengen und damit Auslaßtemperaturen. Frühe Einspritzbeginne dagegen haben in der Regel höhere Spitzendrücke und Druckgradienten zufolge. [7] [22] [28]

3.2.2.3 Abgasrückführung

Die Abgasrückführung (AGR) ist eine sehr wirksame Maßnahme zur Beeinflussung des Brennverfahrens. Sie ist daher für heutige Konzepte unverzichtbar. Mit steigender AGR verlängert sich der Zündverzug wesentlich und damit das Verhältnis von vorgemischter zu diffusionskontrollierter Verbrennung. Allerdings werden durch die Erhöhung des Inertgasanteils im Brennraum das Luftverhältnis und damit die Brenngeschwindigkeit abgesenkt, was wiederum zu geringeren lokalen Spitzentemperaturen führt. Dieser Effekt wird durch die veränderte Zusammensetzung der Zylinderladung unterstützt, da Verbrennungsprodukte wie CO_2 oder H_2O höhere spezifische Wärmekapazitäten als Luft haben. Trotz höheren vorgemischten Anteils ist daher die Brenndauer mit AGR länger und der maximale Druckgradient nicht größer.

Die Bestimmung der AGR-Rate im Brennraum ist äußerst komplex und meßtechnisch bisher nicht serientauglich realisiert. Bis heute wird daher die Frischluftmasse als Ersatzregelgröße herangezogen. Allerdings wird, wie bereits in Abschnitt 3.2.1.2 beschrieben, zunehmend über Modellierungen des Luftpfades versucht, eine AGR-Rate zu errechnen, um diese als direkte Regelgröße zu verwenden. [8] [76] [93] [103]

3.2.2.4 Ladedruck

Obwohl Aufladung primär mit Leistungssteigerung in Verbindung gebracht wird, sind hohe und präzise regelbare Ladedrücke für heutige Konzepte auch in der Teillast unverzichtbar, da eine höhere Ladungsmasse die AGR-Verträglichkeit verbessert und höhere Luftverhältnisse ermöglicht. Unabhängig davon verringert höherer Ladedruck den Zündverzug und beschleunigt die Verbrennung aufgrund des höheren Zylinderdruckniveaus. Gleichzeitig steigen Spitzendrücke und -temperaturen. Anstelle von Leistungssteigerung kann ein erhöhter Ladedruck

auch als verbrauchsmindernde Maßnahme in Kombination mit Downsizing eingesetzt werden. Dabei wird das verbesserte Verhältnis von höherem innerem Mittel- druck zu annähernd gleichbleibendem Reibmitteldruck ausgenutzt. [19] [55] [103]

3.2.2.5 Menge und Abstand Voreinspritzung

Die frei wählbare Voreinspritzung ist eine entscheidende Größe für den Zündverzug bzw. die Stabilität der Haupteinspritzung. Man kann über den wählbaren Abstand zur Haupteinspritzung zunächst steuern, ob die Voreinspritzung zu einer Vorverbrennung mit Druck und Temperaturerhöhung im Brennraum führt oder bei sehr großem Abstand nur zur vorläufigen Radikalbildung und damit letztendlich Verringerung des vorgemischten Anteils der Hauptverbrennung dient. Dies ist gerade bei tiefen Brennraumtemperaturen entscheidend für die Selbstzündung. Über die Beeinflussung des Zündverzuges stellt die Voreinspritzung auch einen wichtigen Parameter zur Steuerung des maximalen Zylinderdruckgradienten dar. Allerdings sinkt der Einfluß der Piloteinspritzung mit steigender Last aufgrund anderer zündverzugsverkürzender Einflüsse. [7] [29] [88]

Analoge Abhängigkeiten ergeben sich aus dem Einfluß der Menge der Voreinspritzung, wobei je nach Abstand die wirkungsgradnachteilige Umsetzung des Brennstoffs beachtet werden muß.

3.3 Modellbildung von Verbrennungsmotoren

Zur Simulation technischer Prozesse kann kategorisch zwischen physikalischen und empirischen Modellansätzen unterschieden werden. Im Bereich Verbrennungsmotoren beruhen physikalische Ansätze im Wesentlichen auf Bilanzgleichungen für Masse, Energie und Impuls, thermodynamischen Zustandsgleichungen und chemischen Reaktionen. Dies setzt die Kenntnis entsprechender Phänomene, gekoppelter Prozesse sowie eine daraus abgeleitete analytische Beschreibung voraus. Zusätzlich müssen die Kenn- und Einflußgrößen bekannt und verfügbar sein, um entsprechende Modelle korrekt parametrieren zu können. Bei Vorliegen dieser Informationen können hohe Abbildungsqualitäten in weiten Gültigkeitsbereichen und zusätzlich interessierende Zwischengrößen des Prozesses dargestellt werden.

Empirische Ansätze dagegen basieren rein auf Approximation des Zusammenhangs zwischen Ein- und Ausgängen eines Prozesses und kommen daher meist mit Vermessung dieser Größen aus. Aufgabe der Approximatoren ist, einen mathematisch beschreibbaren Funktionszusammenhang einschließlich Koeffizientenabschätzung herzustellen, was auch als Identifikation bezeichnet wird. Da somit immer das gesamte Systemverhalten inklusive Meßrauschen, Sensorverhalten etc. identifiziert wird, sind für diese Ansätze die Auswahl und Qualität der verwendeten Meßpunkte sehr entscheidend. Ein allgemein gültiger Zusammenhang kann mit diesem Ansatz nicht aufgestellt werden, dafür wird aufgrund der geringen

Komplexität nur eine kurze Rechenzeit benötigt. Tabelle 3-1 faßt die grundsätzlichen Unterschiede zusammen [46] [80] [86] [103]:

Abbildungskriterien	Physikalisch – analytisch	Empirisch - datenbasiert
Allgemeingültigkeit/ Extrapolationsfähigkeit	+	-
Voraussagekraft ohne Prozeßkenntnis	-	+
Informationsgehalt/ Detaillierungsgrad	+	-
Erreichbare Abbildungsqualität	o	o
Erforderliche Rechenzeit	-	+
Parametrisierungsaufwand	-	+
Komplexität/ Handhabbarkeit	-	+

Tabelle 3-1: Vergleich physikalischer und empirischer Modellbildung

3.3.1 Physikalische Modellbildung

Physikalische Modelle lassen sich zunächst nach der Ordnung örtlicher Auflösung weiter unterteilen.

Bei nulldimensionalen (0D) Modellen ist keine örtliche Variabilität abgebildet, sondern lediglich eine Zeitabhängigkeit der Ausgangsgrößen vorhanden. Diese Art der Modellierung wird häufig zur Motorprozeßrechnung verwendet, bei der auf Basis des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik energetisch richtige Prozeßbeurteilungen ohne Kenntnis lokaler Phänomene möglich sind. Je nach Anzahl der Unterteilungen des Brennraums in Zonen örtlich konstanter Stoffeigenschaften wie beispielsweise verbrannte oder unverbrannte Ladung, spricht man von Ein- oder Mehrzonenmodellen.

Für genauere Berechnungen des Ladungswechsels werden eindimensionale (1D) Modelle verwendet, die eine Berücksichtigung der Geometrie des Ein- und Auslaßsystems sowie der gasdynamischen Vorgänge innerhalb der Rohrleitungen ermöglichen. In Koppelung mit Motorprozeßmodellen sind diese Ansätze zur Verbrennungssimulation in der Vorentwicklung etabliert. Prozeßtechnisch interessierende Größen wie Liefergrad, Restgasgehalt oder Zylinderladung dienen dabei als Anfangsbedingung der Hochdruckprozeßrechnung, was bereits eine treffsichere Auslegung beispielsweise des Turboladers ermöglicht.

Zur detaillierten Berechnung der komplexen Strömungsfelder im Brennraum kommen dreidimensionale (3D) strömungsdynamische Modelle (Computational

Fluid Dynamics, CFD) zum Einsatz. Dazu werden physikalische Erhaltungssätze mit reaktionskinetischen Ansätzen gekoppelt und für eine hohe Anzahl finiter Elemente numerisch gelöst. So sind ausgehend von der räumlich turbulenten Ladungsbewegung Gemischaufbereitung, Verbrennung und teilweise Schadstoffbildung modellierbar. Aufgrund der hohen Aufwände zur Parametrierung und der langen Rechenzeit sind diese Modelle besonders für die Detailoptimierung von Bauteilen bei turbulenten Strömungsvorgängen und heterogenen Temperaturfeldern geeignet. [62] [70] [71] [90] [103]

3.3.2 Empirische Modellbildung

Wie einleitend erwähnt, ist bei empirischen Ansätzen das Vorliegen einer analytischen Beschreibung des zugrunde liegenden Prozesses bzw. seiner Kenngrößen oder Parameter nicht zwingend erforderlich. In jenem Falle wird das häufig zu untersuchende MISO-System (multiple input single output) als „Black-box“ behandelt. Aus einem Satz Eingangsgrößen u und einer Ausgangsgröße y wird mit Hilfe adaptierbarer Modellparameter Θ ein mathematischer Zusammenhang f erzeugt. Die simulierte Ausgangsgröße \hat{y} ergibt sich dann gemäß Formel 3-5:

Formel 3-5:
$$\hat{y} = f(u, \Theta)$$

Zur Bestimmung der im Vektor Θ zusammengefaßten adaptierbaren Modellparameter kommt häufig die LS-Methode (least squares) zum Einsatz, wobei die Fehlerquadrate zwischen Prozeßausgang y und Simulation \hat{y} gemäß Formel 3-6 minimiert werden. [46] [58]

Formel 3-6:
$$\sum_{j=1}^N (y_j - f(u_j, \Theta))^2 \rightarrow \min$$

N: Anzahl der Beobachtungen/Messungen

Es ist offensichtlich, daß der gewählten Modellstruktur große Bedeutung zukommt, wenn physikalische Effekte eines realen Prozesses derart approximiert werden sollen. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen linearen und nichtlinearen sowie statischen und dynamischen Modellen. Im Verbrennungsmotor weisen aufgrund der komplexen Zusammenhänge und des weiten Arbeitsbereiches reale Prozesse immer nichtlineares Verhalten auf, was die umfangreiche und ausgereifte Theorie zur Identifikation linearer Prozesse hier nicht anwendbar macht. Statisch und besonders dynamisch nichtlineare Prozesse sind dagegen schon aufgrund der Vielfalt möglicher Nichtlinearitäten deutlich schwieriger zu identifizieren.

Im Folgenden sollen häufig eingesetzte Modellstrukturen zunächst für den statischen und dann für den dynamischen Anwendungsbereich vorgestellt werden.

3.3.2.1 Nichtlineare statische Modellstrukturen

Die einfachste und wohl im Bereich der Motorregelung am häufigsten eingesetzte Struktur zur Nachbildung nichtlinearer Funktionen ist das Rasterkennfeld. Es eignet sich für Eingangsräume mit weniger als drei Dimensionen, ist einfach und effizient in Motorregelungen zu implementieren und erlaubt dabei eine anschauliche Darstellung. Rasterkennfelder modellieren Funktionszusammenhänge über lokale Interpolation gitterförmig angeordneter Datentupel, die auch als Stützstellen bezeichnet werden, Abbildung 3-9 links.

Polynomansätze sind ebenfalls weit verbreitet und eignen sich auch für höher dimensionale Eingangsräume. Sie verfügen über sehr gute Glattheitseigenschaften, sind einfach über lineare Parameterschätzverfahren adaptierbar und benötigen keine Bezugspunkte. Der starke Anstieg der Koeffizienten mit Modellordnung und Anzahl an Eingängen kann als Vorteil für die Dateneinpassung und als Nachteil bei geringer Datendichte gesehen werden. Ein Polynom 4. Ordnung mit 5 Eingängen erfordert beispielsweise bereits die Bestimmung von 126 Koeffizienten. Polynommodelle weisen in den Randbereichen und besonders in der Extrapolation steile Gradienten auf, was die Aussagefähigkeit dort stark einschränkt. Die Struktur eines Polynoms dritter Ordnung mit i Eingängen u ist in Formel 3-7 dargestellt.

Formel 3-7:

$$\hat{y} = c_0 + \sum_{k=1}^i c_k u_k + \sum_{k=1}^i \sum_{l=k}^i c_{k,l} u_k u_l + \sum_{k=1}^i \sum_{l=k}^i \sum_{m=l}^i c_{k,l,m} u_k u_l u_m$$

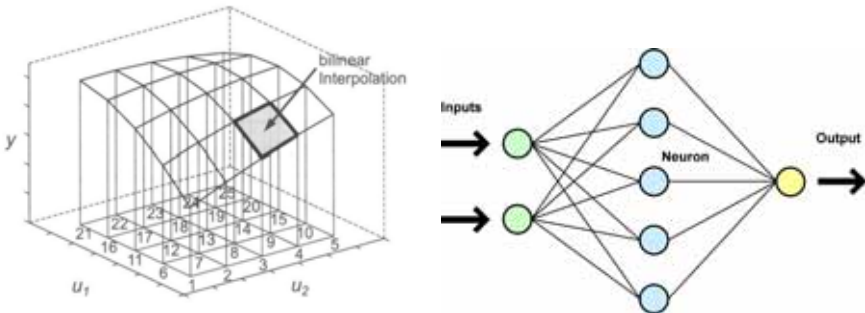


Abbildung 3-9: Rasterkennfeld für zwei Eingangsgrößen [46], links
Prinzipdarstellung künstlich neuronales Netz, rechts

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Formulierung eines Potenzproduktansatzes gemäß Formel 3-8. Dieser Typ hat große Verbreitung in der Ähnlichkeitstheorie zur Bestimmung dimensionsloser Kennzahlen gefunden. Dabei wird die mathematische Analogie physikalisch unterschiedlicher Prozesse genutzt. Große Bedeutung hat beispielsweise die Reynolds-Analogie in der Strömungslehre und Wärmeübertragung gewonnen [15].

Formel 3-8:

$$\hat{y} = c \cdot \prod_{k=1}^i u_k^{\alpha_k}$$

Künstlich neuronale Netze (KNN) sind vom Neuronennetz des menschlichen Gehirns inspiriert und analog strukturiert. Miteinander verbundene Neuronen bilden mittels einfacher Basis- und Aktivierungsfunktionen eine Netzstruktur mit hoher Approximationsfähigkeit gemäß Abbildung 3-9 rechts. Das Adaptieren der in der Regel gleichen Basis- und Aktivierungsfunktionen wird in diesem Zusammenhang auch als Training bezeichnet. Beispielhaft für die Approximation eines stark nicht-linearen Zusammenhangs mittels Überlagerung von drei einfachen Basisfunktionen sei in die Leistungsfähigkeit künstlich neuronaler Netze grafisch demonstriert. [39] [41] [46] [66]

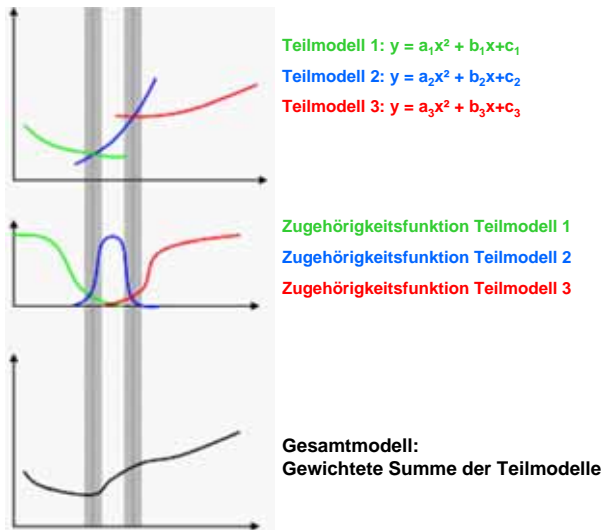


Abbildung 3-10: Approximation eines nichtlinearen Zusammenhangs mittels einfacher Basisfunktionen

Es existiert eine große Anzahl verschiedener Topologien bzw. Typen von KNN, als wichtigste seien hier das mehrschichtige Perzeptronen-Netz (MLP), das radiale Basisfunktion-Netz (RBF) und das lokale Modellnetzwerk (LLM) erwähnt. MLP-Netze verwenden gewichtete Skalarprodukt-Projektionen zur Bestimmung der Zugehörigkeit des Eingangsvektors zu jedem Neuron, deren Wert über eine global bewertende Aktivierungsfunktion den Ausgang des Neurons bildet. Somit ist eine Interpretierbarkeit der Netz-Parameter kaum möglich. RBF-Netze unterscheiden sich primär durch die lokalen Basisfunktionen, deren Aktivierungsfunktion meist Gaußfunktionen mit als Zentrum und Standardabweichung interpretierbaren

Parametern sind. LLM verwenden den RBF-Netzen ähnliche Aktivierungsfunktion, approximieren aber ausschließlich über lokal lineare Teilfunktionen. Die somit linear von der Aktivierungsfunktion abhängige lineare Teilfunktion ist schnell durch das LS-Verfahren optimierbar. Für weiterführende Informationen auch zu anderen Typen von KNN sei auf [41] verwiesen.

3.3.2.2 Dynamische Modellstrukturen

Die zuvor behandelten Modelle zur Abbildung zeitinvarianter Systeme zeigen zu jeder Zeit das gleiche Verhalten und sind deshalb in ihren Parametern zeitlich unveränderlich (invariant). Aus der Systemeigenschaft Zeitinvarianz folgt, daß die zeitliche Verschiebung des Eingangssignals des Systems zu einer gleichartigen Verschiebung des Ausgangssignals führt, ohne dessen zeitlichen Verlauf in anderer Form zu beeinflussen, was aber nicht bedeutet, daß der betrachtete Prozeß statisch sein muß. So ist es durchaus üblich, Kennwerte eines dynamischen Prozesses mit statischen Modellen abzubilden, um hiermit den dynamischen Verlauf zu charakterisieren. Ein gutes Beispiel hierfür ist die statische Kennwertbildung hoch dynamischer Vorgänge im Triebstrang zur Bewertung der Fahrbarkeit, wie sie im AVL-Produkt DRIVE implementiert ist [72]. Der genaue zeitliche Verlauf des Prozesses ist hiermit allerdings nicht beschrieben.

Ist man explizit an der Abbildung nichtlinearer dynamischer Vorgänge im Prozeß interessiert, werden meist dynamische Modellkomponenten der bestehenden statischen Struktur hinzugefügt. Große Verbreitung haben Wiener- und Hammerstein-Modelle gefunden, die statisch nichtlineare mit dynamisch linearen Modellen seriell verknüpfen. Alternativ können nichtlineare statische Ansätze mit Speicherelementen für vergangene externe oder aktuell interne Zustände dynamisch erweitert werden. Bei der Verwendung von Modellen mit sogenannter externer Dynamik wird der Eingangsraum um die Information der Vergangenheitswerte der Prozeßeingänge und -ausgänge zum Zeitpunkt t erweitert, während die nichtlineare statische Funktionsapproximationsstruktur unverändert bleibt. Die Anzahl n der berücksichtigten Vergangenheitswerte je Eingang bzw. des Ausgangs entspricht dabei der angenommenen dynamischen Ordnung des Systems, siehe Formel 3-9.

Formel 3-9:
$$\hat{y} = f(u_{i,t-1}, u_{i,t-2}, \dots, u_{i,t-n}, \hat{y}_{t-1}, \hat{y}_{t-2}, \dots, \hat{y}_{t-n})$$

Dagegen können Modelle mit interner Dynamik durch Einbindung von Verzögerungselementen und rekurrenten Verbindungen interne Modellzustände speichern, um so die explizite Verwendung von vergangenen Prozeßwerten zu vermeiden. Die häufigste Verwendung zur dynamischen Prozeßapproximation stellen neuronale Netze mit externer Dynamik dar, die auch als zeitverzögerte neuronale Netze (TDNN) bezeichnet werden. [40] [48] [53] [104]

3.3.3 Statistische Versuchsplanung

Zur Parametrierung von Modellen werden im allgemeinen Meßdaten des zu untersuchenden Prozesses benötigt, um Zusammenhänge zwischen möglichen Einflußgrößen und interessierenden Zielgrößen zu gewinnen oder abzugleichen. Eine statistische Versuchsplanung (DoE) stellt dabei sicher, daß ein möglichst hoher Informationsgehalt durch möglichst geringen Versuchsaufwand erreicht wird. Dabei sind entsprechende Versuchspläne auf das Modellierungsverfahren abzustimmen.

Startpunkt einer Versuchsplanung ist die Auswahl geeigneter Einflußgrößen auf die interessierende Prozeßausgangsgröße. Dies kann bei bekannten Prozessen erfahrungsbasiert erfolgen, sofern sich die Einflußgrößen im Prozeß entsprechend frei variieren lassen und direkt verstellbar sind. Dies ist allerdings besonders bei komplexeren Prozessen nicht immer der Fall. So kann beispielsweise die für die Stickoxidbildung essentielle maximale Brennraumtemperatur nur indirekt über verfügbare Steller der Motorsteuerung variiert werden. Daher kann eine andere Strategie sein, die verfügbaren prozeßbeeinflussenden Aktuatoren bzw. Variationsgrößen – im Falle des Verbrennungsmotors die Stellgrößen der Motorregelung – bei Festhalten aller Umwelt- und Randbedingungen zu variieren, um so Daten über gewünschte Zusammenhänge indirekt zu erlangen. Dabei ist allerdings zu beachten, daß bei indirekter Anregung meist weitere direkte Einflußgrößen verändert werden und deren jeweiliger Beitrag nicht mehr zu differenzieren ist. Zusätzlich ist gerade bei empirischen Verfahren die Anzahl von Modelleingängen gering zu halten, weshalb nicht relevante Eingänge möglichst ausgeschlossen werden sollten. Dazu wird in [104] ein von der Approximationsmethode unabhängiges Verfahren vorgestellt, welches bei entsprechenden Randbedingungen mit Hilfe der Lipschitzbedingung die Relevanz einer Eingangszusammensetzung quantifiziert und somit eine qualifizierte Auswahl erlaubt.

Neben der Auswahl der Variationsgrößen ist die Plazierung der Meßpunkte von zentraler Bedeutung. Dazu bedarf es zunächst der Festlegung des interessierenden Versuchsraums, der meist durch Ober- und Untergrenzen aller Variationsgrößen die Form eines mehrdimensionalen Hyperquaders annimmt. Aus verschiedenen Gründen müssen aber auch Kombinationen von Variationen ausgenommen werden können.

Bei der Verteilung der Meßpunkte im Versuchsraum gibt es verschiedene Strategien. Vollfaktorielle Versuchspläne vermessen alle Kombinationen, die sich aus der Anregung jeder Einflußgröße an über die Faktorstufe x zu bestimmenden Positionen ergeben. Dadurch ist der Versuchsraum zwar sehr gut abgedeckt, aber die Anzahl der Messungen wächst mit Anstieg der Variationsgrößen n gemäß x^n . Daher werden teilfaktorielle oder zentral-zusammengesetzte Versuchspläne bei höheren n vorgezogen, zumal für zahlreiche praktische Anwendungen, bei denen nicht alle Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Variationsgrößen Relevanz

besitzen, der Informationsgehalt ausreichend ist. D-optimale Versuchspläne ermitteln über ein Optimierungsverfahren die Lage der Meßpunkte. Dabei muß ein Kandidaten-Set, bestehend aus möglichen Meßpunkten, der gewünschten Anzahl an Meßpunkten m und der erwarteten polynomialen Modellordnung bekannt sein. Die Optimierung erfolgt dann über möglichst geringe Varianz in Schätzung der Modellparameter, was durch eine Minimierung der Determinante der Kovarianzmatrix bestehend aus den m Eingangswerten möglich ist. Abbildung 3-11 illustriert verschiedene Versuchspläne im zweidimensionalen Raum. [46] [56] [66]

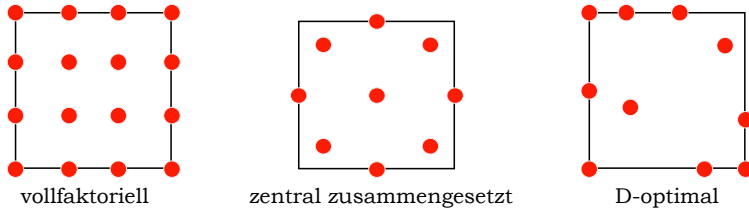


Abbildung 3-11: Verschiedene zweidimensionale DoE Designs

Während die statistische Versuchsplanung für statische Modelle nachgewiesenermaßen eine Effizienzsteigerung bedeutet, sind die Methoden der dynamischen Versuchsplanung weit weniger ausgereift und etabliert. Da aber dynamische Modelle in den meisten Fällen ein statisches Modell enthalten (Nullsetzen der zeitlichen Ableitungen von Ein- und Ausgängen), gelten die zuvor diskutierten Aspekte der (statischen) Versuchsplanung auch in diesem Falle. Zusätzlich ist allerdings entscheidend, mit welchem Gradienten die entsprechend verteilten Meßpunkte angefahren werden und wie lange dieser Zustand konstant gehalten wird, also mit welcher Frequenz das System angeregt wird. Der Eingangssignalsverlauf kann daher in Amplituden- und Frequenzspektrum unterschieden werden. Aus theoretischen Überlegungen der dynamischen Systemidentifikation ist bekannt, daß alle relevanten Frequenzen des Motors im interessierenden Betriebsbereich angeregt werden müssen. Damit scheidet einfache Eingangsfunktionen wie der Einheitsprung aus, da sie nur zu einem einzigen Zeitpunkt Energie ins System bringen, also keine ausreichende Frequenzanregung bieten. Der Dirac-Delta-Impuls stimuliert zwar alle Frequenzen gleichmäßig, ist aber in der Praxis nicht realisierbar. Auch harmonische Funktionen regen kontinuierlich ein System an, sind jedoch auf ihre jeweilige Frequenz begrenzt. Ideal ist daher sogenanntes „weißes Rauschen“, ein aus unendlich vielen harmonischen Schwingungen zusammengesetztes Signal, das zu jedem Zeitpunkt bei allen Frequenzen gleichviel Energie enthält. Da der Frequenzumfang dieses idealisierten Signals unbeschränkt ist, ist auch die Leistung dieses Signals unbeschränkt, weshalb es ideal für die lineare dynamische Identifikation geeignet ist. [58]

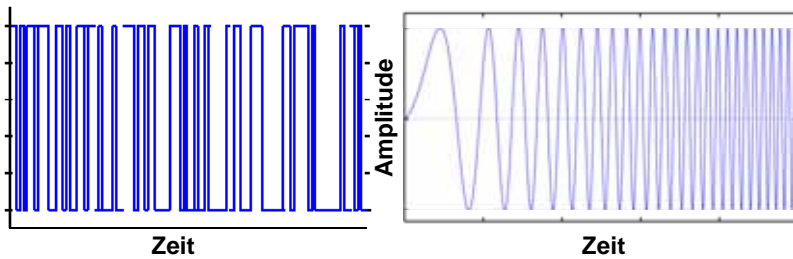


Abbildung 3-12: PRB (links) und Chirp (rechts) Signal

In der Praxis ist allerdings ein solches Signal nicht darstellbar, da reale Ansteuerungen endliche Breite und Amplitude besitzen. Es wurden daher weißem Rauschen angenäherte Eingangssignale wie das Pseudo-Binär-Rauschsignal (PRB) entwickelt, siehe Abbildung 3-12 links. Dieses kann beispielsweise einfach über eine von Isermann entwickelte Methode eines rückgekoppelten Schieberegisters erzeugt werden [46]. Ebenfalls gebräuchlich und leicht zu berechnen ist ein Sinusmoduliertes Signal (Chirp), siehe Abbildung 3-12 rechts. In beiden Fällen wird zur Berücksichtigung nichtlinearen Verhaltens diesen Grundsignalen ein vom Prozeß abhängiges Amplitudenspektrum aufgeprägt, so daß eine Identifikation nichtlinearer dynamischer Systeme möglich wird. In Abbildung 3-13 ist dazu das amplitudenmodulierte Pseudo-Rausch-Binär (APRB) Signal dargestellt. Ein APRB Signal wird aus einem PRB Signal durch Aufprägung zufällig verteilter Amplituden erzeugt, das wiederum ausgehend von der maximalen Anregungsfrequenz zufällig verteilte Vielfache dieser minimalen Haltezeit wiedergibt. [10] [39] [40] [95]

In jedem Fall ist eine leistungsfähige Prüfstands Umgebung zur Umsetzung der dynamischen Anregung erforderlich.

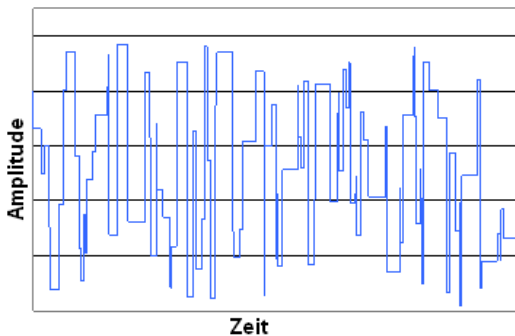


Abbildung 3-13: Typisches APRB Signal

3.3.4 Veröffentlichte Motormodelle

Die Vielfalt der allein für die Motorenentwicklung eingesetzten Motormodelle ist entsprechend der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Möglichkeiten sehr hoch, und wird daher häufig anhand der Modellstruktur kategorisiert. Es kommen oft auch Mischformen besonders bei mehrstufigen Modellansätzen vor, wo selbst physikalische mit empirischen Black-box Modellen gekoppelt sein können. Als weitere Möglichkeit bietet sich daher eine Einteilung nach dem Einsatzgebiet an, siehe auch [62] [70] [90] [103]. Aufgrund des Umfangs sollen in dieser Arbeit im Folgenden nur grundlegend relevante Ansätze für die Auslegung bzw. Applikation des dieselmotorischen Brennverfahrens vorgestellt werden, die auch eine Simulation der Schadstoffemissionen erlauben.

3.3.4.1 Physikalisch – Phänomenologische Modelle

Physikalisch–Phänomenologische Modelle sind durch ihre thermodynamische Grundlage hauptsächlich nach der Ordnung örtlicher Auflösung unterscheidbar, siehe auch Abschnitt 3.3.1. Dabei können heutige 3D-CFD Modelle (wie aus AVL FIRE) bereits hochgenau orts aufgelöste turbulente Strömungs- und Temperaturfelder berechnen und erlauben so eine im Falle von NO_x auf chemischen Elementarreaktionen begründete Emissionsberechnung mit guter Ergebnisqualität. Aufgrund der Komplexität sind allerdings lange Rechenzeiten für einzelne Zyklen unvermeidbar, was die Anwendung derartiger Modelle auf lokale Detailoptimierungen (z.B. Ansaugkanalgeometrie) beschränkt.

Für globalere Aussagen haben sich daher 1D Modelle basierend auf nulldimensionaler Kreisprozeßrechnung und eindimensionaler Ladungswechselrechnung etabliert. Die zugrunde liegenden Annahmen hierfür sollen an dieser Stelle kurz erläutert werden. Bekanntermaßen kann die Verbrennung über den zeitlichen Verlauf der Energiefreisetzung mittels Brenn- bzw. Heizverlauf charakterisiert werden, vergleiche Abschnitt 3.1.1.2. Zur Simulation des Arbeitsprozesses haben sich mittels mathematischer Funktionen angenäherte Ersatzbrennverläufe etabliert, die eine schnelle Variation entscheidender Größen wie Brennbeginn, Brenndauer und Brenngeschwindigkeit und eine Bewertung daraus resultierender Prozeßveränderungen erlauben. Bereits 1970 hat Vibe anhand von reaktionskinetischen Überlegungen den Verlauf der Umsetzrate gemäß Formel 3-10 beschrieben [94]. Dabei ist neben Brennbeginn φ_{BB} und -dauer $\Delta\varphi_{BD}$ der Formfaktor m parametrierbar, mit dem der Brennverlauf festgelegt wird, siehe Abbildung 3-14.

Formel 3-10:

$$\frac{Q_B(\varphi)}{Q_{B, \text{Gesamt}}} = 1 - e^{-6.908 \left(\frac{\varphi - \varphi_{BB}}{\Delta\varphi_{BD}} \right)^{m+1}}$$

Bei Brennverfahren mit ausgeprägter vorgemischter Verbrennung wird die Energieumsetzung meist in zwei Teile gespalten und mittels sogenannter Doppel-Vibe-

Funktionen durch Überlagerung zweier einfacher Vibe-Funktionen approximiert. Trotz der einfachen Beschreibung und weniger Modellparameter erlaubt eine auf Vibe-Ersatzbrennverläufen basierende Prozeßrechnung für physikalische Zustandsgrößen wie maximaler Zylinderdruck oder erreichbare Leistung bereits gute Ergebnisse [106].

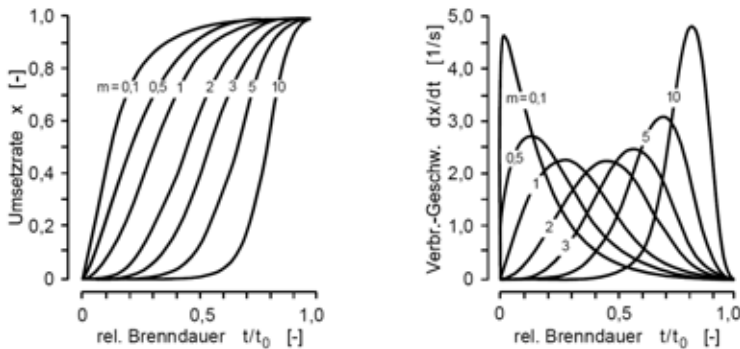


Abbildung 3-14: Vibe Ersatzbrennverlauf mit diversen Formfaktoren m [103]

Zur expliziten Berechnung relevanter Prozeßgrößen wie Temperatur oder Druck ist zusätzlich die Kenntnis des Wärmeübergangs erforderlich. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge ist die Entwicklung geeigneter Modellansätze seit Jahrzehnten Teil der Forschung. So hat sich bis heute der erstmals 1965 von Woschni vorgeschlagene auf Ähnlichkeitsbetrachtungen basierende dimensionslose Ansatz zur Bestimmung des Wärmeübergangs wegen seiner relativ einfachen Anwendbarkeit gehalten [105]. Zahlreiche Modifikationen führten im Laufe der Zeit zu Erweiterungen oder abgeleiteten Ansätzen (beispielsweise Hohenberg 1980, [45]). Für diese Arbeit besonders interessant sind die zur Charakterisierung der Verbrennung verwendeten Kenngrößen, die ursprünglich auf Bohrungsdurchmesser, Zylinderdruck, Zylindertemperatur, mittlere Kolbengeschwindigkeit und eine den Drall beschreibende Größe begrenzt waren. So war dieser Ansatz allerdings nicht auf alle Motorkonzepte anwendbar, weshalb zusätzliche hardware- und betriebspunktcharakterisierende Kenngrößen eingeführt wurden, wodurch allerdings auch die Handhabbarkeit verringert wurde.

Sind Prozeßgrößen wie Temperatur, Druck und Gaszusammensetzung über die Kreisprozeßrechnung bekannt, können über chemische Gesetzmäßigkeiten Modelle zur Schadstoffemission eingesetzt werden. Die NO_x -Emission beispielsweise kann nach Zeldovich (siehe auch Abschnitt 3.1.2) bereits hinreichend genau über lokale Temperatur und Konzentration der Reaktionspartner simuliert werden. Dazu ist allerdings mindestens ein Zweizonenmodell des Brennraums zur Unterteilung in unverbrannte und verbrannte Zone mittels Flammenfront erforderlich. Unter Berücksichtigung spezifischer motorischer Randbedingungen ist eine gute

Abbildungsqualität erreichbar [43] [68] [108]. Im Gegensatz zur NO_x -Simulation gestalten sich die Modellansätze für sonstige Schadstoffe deutlich komplizierter. Im Falle des Dieselmotors konzentrieren sich die Bemühungen derzeit auf die Modellierung der Rußemission, die aufgrund der Koppelung von Rußentstehung und Rußabbrand äußerst schwierig ist. Analytische Beschreibungen der jeweils zugrundeliegenden Elementarreaktionen sind bisher nicht veröffentlicht, weshalb derzeit qualitative Aussagen mittels einfacher globaler, reaktionskinetischer Ansätze Stand der Technik sind. Als Haupteinflussfaktoren werden lokale Temperatur sowie die lokalen Kraftstoffdampf- und Sauerstoffkonzentrationen genannt [54]. Doch selbst für mehrstufige, auf molekulare Vorgänge fokussierte Ansätze mit intermediären Spezies sind Fehler von 100% und mehr trotz langer Rechenzeit nicht vermeidbar. Einen Überblick über verfügbare Ansätze geben Bockhorn [14] und Kennedy [51].

In Koppelung mit physikalisch basiertem 1D Ladungswechsel sind diese grundlegenden Ansätze Stand der Technik für kommerziell verfügbare Produkte wie AVL BOOST [6] oder GT POWER zur Auslegung von Bauteilen und Abschätzungen von Prozeßausgängen wie Drücke, Temperaturen, Akustik oder Schadstoffemissionen. In letzter Zeit ist man bestrebt, durch Pre-Processing und schnellere Rechenkerne diese Anwendungen unter eingrenzenden Randbedingungen auch auf echtzeitfähigen Plattformen implementieren zu können.

3.3.4.2 Empirische Modelle

Empirische Modellansätze zur Motormodellierung sind aufgrund ihrer vielfältigen strukturellen Möglichkeiten, siehe Abschnitt 3.3.2, deutlich schwieriger zu kategorisieren. Mischformen mit physikalisch basierten Teilmodellen werden als halbempirisch bezeichnet, mehrstufige empirische Ansätze mit physikalisch interpretierbaren Zwischengrößen als „Grey-Box“ Ansätze. Der Grad der Komplexität ist dementsprechend weit gefächert, beispielsweise kann bereits eine simple statische Kennfelddarstellung als Motormodell interpretiert werden, wenn es die gewünschten Zielgrößen mittels zwei Variationsgrößen abbildet. Durch alleinige Variation des Approximators sind vielfältige, auch höher dimensionale einfache Modellansätze realisierbar, was heutzutage durch entsprechende kommerzielle Software wie AVL CAMEO unterstützt wird und so als Stand der Technik für Anwendungen in der Verbrennungsentwicklung und Applikation bezeichnet werden kann. Ergebnisqualität und Modellierungsaufwand sind stark von der Versuchsplanung und dem gewählten Approximator abhängig, eine dynamische Modellbildung ist derzeit hiermit nicht etabliert.

Veröffentlichte Ergebnisse statischer Modellansätze fokussieren daher meist auf die Wahl der Eingangsgrößen zur Darstellung gewünschter Zielgrößen, wobei die Abbildung der Emissionen als größte Herausforderung gesehen wird. Waschatz nennt beispielsweise Spritzbeginn, Ladedruck, AGR-Rate und Ladelufttemperatur als Eingangsgrößen eines quadratischen Polynoms zur Beschreibung von NO_x und

Rußemission [97] [98]. Desantes hingegen verwendet zunächst einen Potenzproduktansatz mit Gastemperatur bei 75% Energieumsatz, Zylinderdruck bei Verbrennungsbeginn und Sauerstoffpartialdruck als Eingang zur Simulation der Rußmasse, bevor er mit einem künstlich neuronalen Netz mit den Eingängen Drehzahl, Kraftstoffmasse, Luftmasse, Einspritzdruck, Spritzbeginn, AGR-Rate und Düsendurchmesser bei Heavy-Duty Motoren eine gute Abbildungsqualität bei NO_x und Ruß findet [24] [25] [26]. Ebenfalls über ein KNN stellt Atkinson bereits 1998 ein Modell mit Saugrohrtemperatur und -druck, VTG-Position, Motor- und Abgastemperatur, Drehzahl sowie Kraftstofftemperatur und -druck als Eingänge zur Modellierung von NO_x und Ruß vor [4]. Auch Köhler verwendet zur Rußsimulation ein KNN, allerdings mit Drehzahl, Last, Luftverhältnis, Kraftstoffmasse, Restgas und Zylinderdruckverlauf als Eingängen [57]. Weitere statische Modelle auf Basis KNN für NO_x und Ruß sind von He (Eingänge: Drehzahl, Last, Spritzbeginn, Einspritzdruck, Pilotmenge, Ladedruck, AGR-Rate, Zylinderspitzenruck und maximale Brennraumtemperatur) [42], Jacobsen (Eingänge: Luftfeuchtigkeit, Saugrohrdruck, Saugrohrtemperatur, Kraftstoffmenge und Drehzahl) [47] und Daudel (Eingänge: Kraftstoffmenge, Luftmasse, Lage des 50% Energieumsatzpunktes, AGR-Rate, Sauerstoffgehalt und Drehzahl) [23] bekannt. Wenzel stellt über einen Potenzproduktansatz mit den Eingängen Sauerstoffkonzentration, Zündverzug, maximalem Zylinderdruckgradienten, Verhältnis Frisch- zu Gesamtladung und zwei Winkeln zwischen Verbrennungsbeginn, maximaler Heizrate und Verbrennungsende ein NO_x - und Rußmodell auf, dessen Genauigkeit als gut zu bezeichnen ist [100]. Opalinski verwendet hierfür ebenfalls einen Potenzproduktansatz mit Gastemperatur und Zylindervolumen bei Verbrennungsbeginn, maximaler Brennrate, Zylindervolumen bei der maximalen Brennrate, Lambda, sowie das Verhältnis Frischladung zu Gesamtladung [67] [102].

Als rein empirisches, aber auch dynamisch gültiges Emissionsmodell soll hier der Ansatz von Hafner vorgestellt werden. Er verwendet ein KNN mit externer Dynamik, wobei Drehzahl, Ladedruck, Luftmasse, Kraftstoffmenge und Einspritzzeitpunkt als Eingänge dienen. Die Ergebnisqualität der mittels APRB Signale identifizierten NO_x - und Opazitätmodelle wird auch dynamisch als gut bezeichnet [39] [84]. Ein weiteres Modell dieser Kategorie, allerdings auf parametrischen Volterra Reihen basierend, stellt Baumann vor. Mittels Chirp Anregung werden als Variationsparameter Drehzahl, Moment, Ladedruck, AGR-Rate, Einspritzzeitpunkt und Raildruck zur Modellierung von NO_x verwendet. Die im NEDC-Zyklus verifizierten Modelle zeigen eine gute Ergebnisqualität [9] [10].

Als halbempirischer Ansatz kann das NO_x -Modell von Gärtner bezeichnet werden, das basierend auf dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik den Verbrennungsschwerpunkt errechnet und zusätzlich Zylinderladungsmasse und Sauerstoffgehalt als Eingang aufweist. Die Qualität wurde anhand von Nutzfahrzeugmotoren als gut validiert, eine Echtzeitfähigkeit allerdings nicht überprüft [36] [37]. Friedrich verwendet einen halbempirischen Ansatz, um an gewissen Stellen komplexe

physikalische Modelle durch Polynome zu ersetzen und somit die Echtzeitfähigkeit zu gewährleisten. Als Eingänge werden Drehzahl, Einspritzmenge sowie Druck, Temperatur und Massenströme vor und nach Zylinder verwendet [35]. Schüßler stellt ebenfalls ein echtzeitfähiges halbempirisches Modell vor, das auch transiente NO_x-Verläufe wiedergeben kann [86]. Dazu werden Drehzahl, Einspritzmenge, -druck, -beginn und -dauer sowie AGR-Rate, Kühlwassertemperatur, Druck und Temperatur vor und nach Zylinder benötigt. Empirische Anteile ersetzen dabei räumlich oder zeitlich komplexe Phänomene durch effektive Mittelwerte, womit eine gute Modellqualität erreicht wird.

3.3.5 Virtuelle Entwicklungsumgebungen

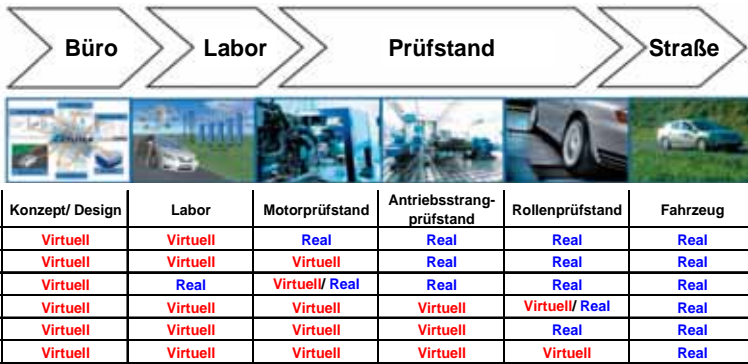


Abbildung 3-15: Integrationsebene der jeweiligen Entwicklungsumgebung [32]

Für die Motorenapplikation kommen grundsätzlich verschiedene Entwicklungsumgebungen zum Einsatz, die meist nach dem jeweiligen Projektfortschritt in einer festgelegten Reihenfolge durchlaufen werden. So werden die Entwicklungsumfänge ausgehend von einer Simulation zur Konzeptbewertung zunächst auf einen Komponentenprüfstand, dann auf den Motorenprüfstand und über den Rollenprüfstand schließlich auf das reale Fahrzeug verlagert, womit die jeweilige Integrationsebene steigt. Heutige Anforderungen besonders bezüglich Kosteneinsparung erfordern eine verstärkte Anstrengung in der Verlagerung typischer Entwicklungsumfänge aus „realen“ in „virtuelle“ Umgebungen, was auch als „Front loading“ bezeichnet wird. Damit dort der geplante Entwicklungsschritt überhaupt durchgeführt werden kann, ersetzen Simulationen reale Komponenten, so daß beispielsweise mittels eines Fahrzeugmodells ein Motor am Prüfstand wie im realen Fahrzeug betrieben werden kann, wodurch auf eine teure Prototypenkarosserie verzichtet werden kann, siehe . Gleichsam möglich ist die Verlagerung typischer Motorprüfstandsumfänge auf kostengünstigere Umgebungen, sofern ein virtueller

Motor existiert. Hierfür mögliche Umgebungen und resultierende Randbedingungen sollen im Folgenden vorgestellt werden.

3.3.5.1 HiL-Umgebung

Wird der reale Motor durch ein Modell simuliert, seine Regelung, Sensorik und Aktuatorik aber als Echtbauteil belassen, spricht man von Hardware-in-the-Loop (HiL) Prüfständen. Die Einbindung von realen Motorregelungen benötigt eine echtzeitfähige Simulation der übrigen virtuellen Komponenten, um das System in einem geschlossenen Regelkreis betreiben zu können. Typische Komponenten eines HiL Prüfstands und deren Zusammenwirkung sind in dargestellt.

Das Motormodell dient dabei zunächst der Sicherstellung eines korrekten Betriebszustandes der Motorregelung, indem Stellgrößen eingelesen und daraus gebildete Sensorstimulationen plausibel in Echtzeit ausgegeben werden. Über I/O-Hardware, der Schnittstelle zwischen Simulation und Motorregelung werden die Signale des Motormodells entsprechend den Anforderungen der ECU aufbereitet und an diese gesendet bzw. von dieser empfangen. So sind elektrische wie auch einfache Funktionstests der Motorregelung möglich, ohne hohe Anforderungen an das Motormodell zu stellen.

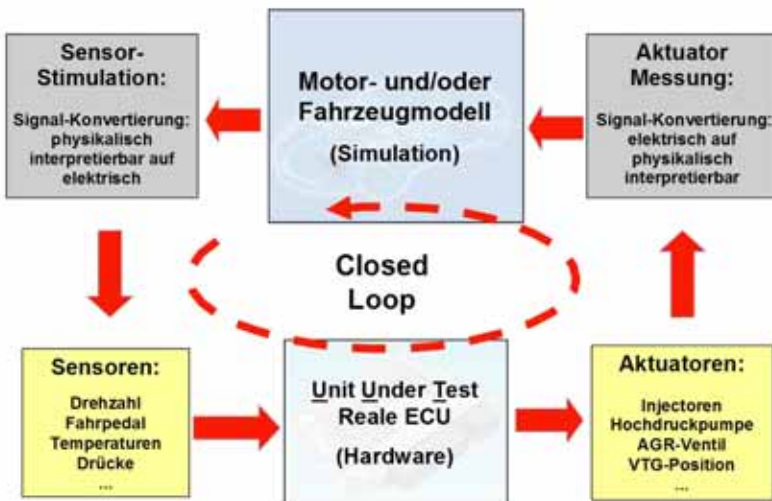


Abbildung 3-16: Komponenten eines HiL-Prüfstandes

Um HiL-Systeme als echte Alternative zum Prüfstand oder gar Fahrzeug für Aufgaben der Applikation zu sehen, sind deutlich erweiterte Anforderungen an die Simulation des Motors zu stellen. Neben der möglichst realen Stimulation der ECU-

Sensoren unter beliebigen Betriebszuständen, müssen weitere Zielgrößen der Applikation wie beispielsweise Emissionen dynamisch abgebildet werden, was eine korrekte Wiedergabe der Thermodynamik des Motors unter Berücksichtigung der vorhandenen Stellmöglichkeiten der ECU bedingt. Die Schwierigkeit dabei besteht unter anderem darin, eine möglichst hohe Modellgüte in Echtzeit zur Verfügung zu stellen, was die Auswahl der in Abschnitt 1.1.1 beschriebenen Modellansätze deutlich einschränkt. Gelingt dies mit überschaubarem Parametrierungsaufwand, sind allerdings neben Kostenvorteilen auch bessere Reproduzierbarkeit, Verschleißfreiheit und erweiterte Automatisierungsmöglichkeiten gegenüber realen Umgebungen zu nennen. Zudem erweitern sich die Möglichkeiten in der Absicherung der Applikation erheblich, da auch Kombinationen von selten in der Realität vorzufindenden Bedingungen am HiL-Prüfstand systematisch abgeprüft werden können. Aufgrund der Komplexität heutiger Motorregelungen kann deren Verwendung als Echtbauteil hier als Vorteil gesehen werden. [59] [61]

3.3.5.2 MiL/ SiL-Umgebung

Eine Entwicklungsumgebung mit geschlossenem Regelkreis, die ohne jegliche Echtbauteile auskommt, sind Model-in-the-Loop (MiL) oder Software-in-the-Loop (SiL) Systeme. Dabei wird neben dem Motor auch die Motorregelung simuliert, wobei im Falle von SiL-Systemen der Fokus auf der korrekten Lauffähigkeit des bereits kompilierten und im Zielformat vorliegenden Softwarecodes liegt. Auch hierfür ist eine ausreichend genaue Motorsimulation erforderlich, die bereits echtzeitfähig sein muß. MiL-Systeme dagegen bilden meist nur die für die jeweilige Aufgabe benötigten Module des Motors und der Motorregelung nach und können daher den Umfang der Simulation deutlich verringern. Je nach Anwendung kann hier die Rechengeschwindigkeit deutlich über oder unter der Echtzeitgrenze liegen. [21] [30]

3.4 Meßtechnik und Optimiermethoden am Motorprüfstand

Motorenprüfstände sind für die Applikation von Verbrennungsmotoren trotz hoher Kosten nach wie vor die bevorzugte und am meisten verwendete Entwicklungsumgebung. Über die Grundparameter Drehzahl und Drehmoment können unabhängig von ihrem normalen Einsatzumfeld ein- und ausgehende Massenströme, Abgas- und Geräuschemission, Temperaturverhalten und nicht zuletzt auch spezifische Kenngrößen des Brennverfahrens ermittelt werden. Mit an modernen Prüfständen hauptsächlich verwendeten elektrischen Asynchronmaschinen zur Lastregelung des Motors bei vorgegebenem Drehzahlverlauf sind auch dynamische Zyklen inklusive Schlepptrieb darstellbar. Eine entsprechende Prüfstandssteuerung koordiniert die verbundenen Subsysteme bzw. Komponenten, wie beispielsweise Medienkonditionierungen oder Meßgeräte und dient als primäres Interface zum Prüfstandsbediener.

3.4.1 Meßtechnik

Kernaufgabe eines Motorenprüfstandes für die Applikation ist die Erfassung interessierender Meßgrößen unter definierten Betriebszuständen. Dabei wächst die Anzahl der Meßstellen und der meßtechnischen Verfahren mit den Anforderungen stetig. Für die Umfänge dieser Arbeit entscheidende Meßtechniken und -prinzipien werden hier kurz erläutert.

3.4.1.1 Abgasmeßgeräte

Zur Einhaltung der in Abschnitt 3.1.3 beschriebenen gesetzlichen Emissionsgrenzwerte, ist die Erfassung und Abstimmung der jeweiligen Schadstoffe am Motorenprüfstand unumgänglich. Obwohl die gesetzliche Emissionszertifizierung für PKWs auf einem Rollenprüfstand mittels CVS-Testmethode am Fahrzeug stattfindet und die Emissionen nur integral limitiert sind, ist der Applikateur zur Kennfeldabstimmung an betriebszustandsabhängigen Abgasrohmissionen interessiert.

Hierfür kommen zur Bestimmung der CO- und CO₂-Konzentrationen sogenannte nicht-dispersive Infrarot-Analysatoren (NDIR) zum Einsatz, die die Eigenschaft bestimmter Gase ausnutzen, Infrarotstrahlung in einem schmalen charakteristischen Wellenlängenbereich zu absorbieren. Aufgrund der hohen Querempfindlichkeit der eingesetzten Analysatoren gegen Wasserdampf, der über einen großen Wellenbereich Infrarotstrahlung absorbiert, muß bei Messungen im unverdünnten Abgas dieses zunächst getrocknet werden, bevor die Konzentration von CO und CO₂ bestimmt werden kann.

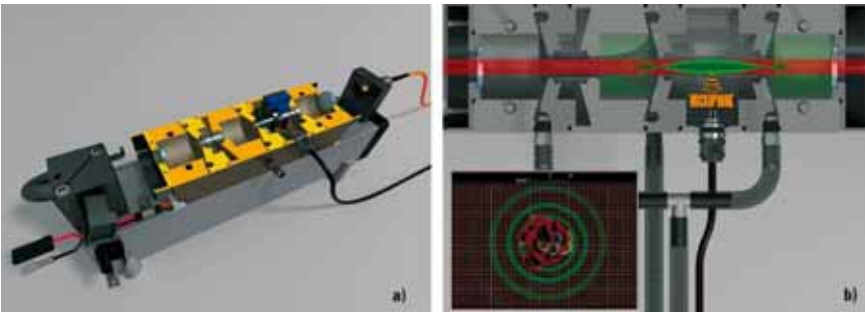
Die Stickoxidkonzentration kann über einen Chemilumineszenz Detektor (CLD) nur in Form von NO analysiert werden, weshalb zunächst andere Formen (primär

NO_2) zu NO reduziert werden müssen. Die in einer Reaktionskammer wiederum zu NO_2 oxidierten Moleküle geben bei ihrer Rückkehr in einen elektrisch neutralen Grundzustand ihre überschüssige Energie in Form von Licht ab, das mittels eines Detektors proportional zur Konzentration gesetzt werden kann.

Zur Konzentrationsmessung des vorkommenden Kohlenwasserstoffs wird ein Flammenionisations Detektor (FID) eingesetzt, der mittels Wasserstoffflamme die Kohlenwasserstoffe oxidiert und die dabei entstehenden Radikal-Ionen an einer Sammelelektrode entlädt, deren entstehender Strom proportional zur Konzentration der Kohlenstoffatome ist.

Alternativ zu diesen Verfahren kommen vermehrt auch Multikomponentenanalysatoren wie beispielsweise Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) zum Einsatz, speziell bei Verwendung von SCR-Nachbehandlungssystemen, um die hier möglichen Ammoniakdurchbrüche zu detektieren.

Für die Verwendung der bisher vorgestellten Meßprinzipien ist eine entsprechende Konditionierung der Meßgeräte, Meßstellen und Entnahmeleitungen nötig, was praktisch eine hohe Transportverzögerung der zu analysierenden Abgaskomponenten bedeutet. Zusätzlich tritt eine merkliche Ansprechverzögerung in den Analysatoren aufgrund der beschriebenen Verfahrenskette auf, weshalb dynamische Messungen mit diesen Meßgeräten problematisch sind.



**Abbildung 3-17: a) Schnitt durch die Meßzelle des Micro-Soot-Sensors;
b) Stehende Akustikwelle im Meßrohr der Meßzelle**

Bei Dieselmotoren und zukünftig auch bei (direkteinspritzenden) Ottomotoren ist zusätzlich die Kenntnis der emittierten Partikel und zumindest der Rußmasse erforderlich. Dafür sind heute gravimetrische Verfahren über konditionierte Filterpapiere Stand der Technik, die allerdings keine kontinuierliche Bestimmung der Partikelemissionen zulassen und daher meist in Verbindung mit CVS-Systemen eingesetzt werden. In Ermangelung direkter Meßprinzipien ist daher bis heute die Bestimmung der Abgastrübung (Opazität) über fotoelektrische Messung an Prüfständen etabliert. Zwar kann hiermit eine kontinuierliche Erfassung gewährleistet

werden, die Korrelation mit der Rußmasse ist allerdings eher von qualitativer Güte. Unter anderem deshalb sind alternative Meßtechniken in Entwicklung, von denen das im AVL Micro-Soot-Sensor (MSS) verwendete, photoakustische Prinzip hier näher vorgestellt werden soll. Das Meßgerät ist auf den festen Kohlenstoffanteil (Ruß) empfindlich und erlaubt eine kontinuierliche Erfassung der Rußkonzentration im Abgas. Es basiert auf der periodischen Bestrahlung einer absorbierenden Probe (Rußpartikel), typischerweise im (nahen) Infrarot-Spektralbereich. Dadurch wird eine periodische Erwärmung und Abkühlung des Absorbers, und eine periodische Ausdehnung und Kontraktion des Trägergases induziert. Es entstehen Druckwellen um das Partikel, welche als Schallwellen betrachtet werden können. In einer resonanten, in ihrer Länge auf die Bestrahlungsperiode abgestimmten Meßzelle entsteht durch Reflexion an den Zellenenden eine stehende Welle (eine plötzliche Erweiterung eines rohrförmigen Kanals stellt einen akustischen Reflektor dar), . Je mehr Partikel sich im Messrohr befinden, umso größer ist die Amplitude der stehenden Welle. Diese wird mit einem hochempfindlichen Mikrophon registriert und ist direkt proportional zur Rußkonzentration. [81]

3.4.1.2 Indizierung

Während früher der Ausdruck Indizierung lediglich die Messung des Zylinderdruckverlaufes meinte, ist er heutzutage zum Sammelbegriff für sämtliche kurbelwinkelbezogene Meßgrößen geworden. So wird neben Zylinderdruck auch die Injektorbestromung gemessen und standardmäßig eine Heizverlaufsanalyse gemäß dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik berechnet.

Ein klassisches Indiziersystem besteht aus Drucksensor, Verstärker, Kurbelwinkelgeber sowie der Datenerfassung und -auswertung. Der weite Druckbereich, die hohen Einsatztemperaturen im Brennraum und die extrem schnellen Vorgänge der Verbrennung erfordern für eine ausreichend genaue Messung den Einsatz von piezoelektrischen Drucksensoren. Diese Sensoren geben eine dem Druck proportionale Ladung ab. Neben den physikalischen Eigenschaften des Sensors selbst, hat vor allem auch die Art und Weise des Einbaus im Motor großen Einfluß auf die erzielbare Meßgenauigkeit. Die Druckaufnehmer sind daher entweder direkt im Brennraum oder mittels eines Adapters in der Zünd- oder Glühkerze eingebaut. Die elektrische Ladung des Drucksensors wird im Verstärker hochgenau in ein proportionales Spannungssignal gewandelt. Die Winkelposition der Kurbelwelle dient als Basis für die kurbelwinkelbezogene Datenerfassung und Berechnung der Indizierkennwerte. Die typischerweise verwendeten optischen Inkrementalgeber liefern pro Umdrehung eine feste Anzahl von beispielsweise 360 Kurbelwinkelmarken und einer Synchronisationsmarke. Die Analyse der gemessenen Druckverläufe im Brennraum erlaubt vielfältige und umfangreiche Beurteilungen der innermotorischen Vorgänge. Auf der Grundlage des gemessenen Druckverlaufs läßt sich eine Fülle von wichtigen Daten berechnen. Diese Ergebnisgrößen werden im Allgemeinen Indizierkennwerte genannt, die sich prinzipiell in zwei Kategorien unterteilen

lassen: direkte und indirekte Indizierkennwerte. Die direkten Indizierkennwerte werden unmittelbar aus dem Verlauf des Zylinderdrucks über dem Arbeitsspiel ermittelt. Die indirekten Indizierkennwerte sind Größen, die auf Grundlage des Druckverlaufs nur über Einbeziehung weiterer Größen wie Bremsmoment, Geometrie des Kurbeltriebes, usw. ermittelt werden können. Zum Beispiel muß zur Berechnung des Brennbeginns zuerst der Heizverlauf aus dem Druckverlauf berechnet werden. Eine typische Auswahl von direkten und indirekten Indizierkennwerten ist in Tabelle 3-2 dargestellt. [5] [50]

Direkte Indizierkennwerte	Indirekte Indizierkennwerte
Spitzendruck p_{Max}	indizierte Mitteldrücke $p_{\text{mi}}, p_{\text{HD}}, p_{\text{LW}}$
Lage Spitzendruck $\varphi_{p_{\text{Max}}}$	Brennbeginn SOC
Druckanstieg $dp/d\varphi$	Brenndauer Comb. dur.
Lage des max. Druckanstiegs $dp/d\varphi_{\text{Max}}$	Energieumsatz
Druckanstiegsgeschwindigkeit $dp/d\varphi^2$	Energieumsatzpunkte, z.B.: A_{150}
	Reibmitteldruck
	Verbrennungsgeräusch

Tabelle 3-2: Typische Indizierkennwerte

3.4.1.3 Sonstige Sensorik

Eine weitere wichtige Meßgröße in der Applikation ist das globale Kraftstoff-Luftverhältnis Lambda während der Verbrennung. Zur Bestimmung kommen mehrere Verfahren in Frage, wie Berechnung aus den Abgaskonzentrationen, Berechnung aus den gemessenen Kraftstoff- und Luftmassenströmen sowie die direkte Messung über eine Sonde. Für dynamische Zyklen sind die ersten zwei Möglichkeiten nur über komplexe Korrekturen realisierbar, weshalb immer häufiger eine Lambda-Sonde auch für nicht stöchiometrisch betriebene Motoren zum Einsatz kommt. Aufgrund ihres weiten Meßbereichs sind Breitbandsonden für qualitätsgeregelte Konzepte prädestiniert, weshalb hier das Prinzip der Bosch Lambda-Sonde Universal (LSU) exemplarisch vorgestellt wird. Es handelt sich dabei um eine planare Zweizellen-Grenzstromsonde, deren Meßzelle aus einer Zirkondioxyd-Keramik besteht. Sie ist die Kombination einer Nernst-Konzentrationszelle und einer Sauerstoff-Pumpzelle, die Sauerstoffionen transportiert. Die Sauerstoff-Pumpzelle ist zu der Nernst-Konzentrationszelle so angeordnet, daß zwischen beiden ein Diffusionsspalt von etwa 10 bis 50 μm entsteht, siehe Abbildung 3-18. Der Diffusionsspalt steht mit dem Abgas durch ein Gaszutrittsloch in Verbindung; die poröse Diffusionsbarriere begrenzt dabei das Nachfließen der Sauerstoffmoleküle aus dem Abgas. Die Nernst-Konzentrationszelle ist auf der einen Seite durch einen Referenzluftkanal über eine Öffnung mit der umgebenen Atmosphäre verbunden; auf der anderen Seite ist sie dem Abgas im Diffusionsspalt ausgesetzt. Die Sonde liefert erst bei einer Betriebstemperatur von 600 bis 800 $^{\circ}\text{C}$ ein brauchbares Signal, weshalb sie mit einem integrierten Heizer ausgestattet ist. Nach Anlegen einer Spannung an den Platinelektroden der Pumpzelle kann Sauer-

stoff aus dem Abgas in den Diffusionsspalt hinein- oder herausgepumpt werden, wobei das elektronische Steuergerät der Sonde mit Hilfe der Nernst-Konzentrationszelle die anliegende Spannung so regelt, daß die Zusammensetzung des Gases im Diffusionsspalt genau stöchiometrisch ist. Der Pumpstrom ist nun der Sauerstoffkonzentration im Abgas proportional. [76]

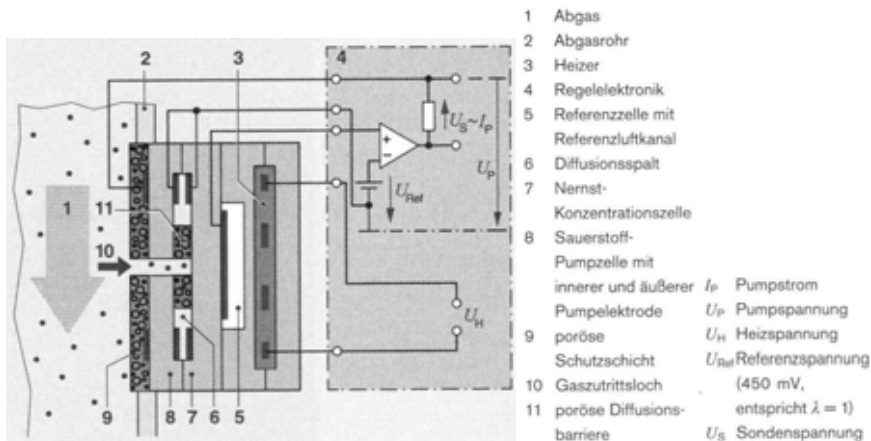


Abbildung 3-18: Schematischer Aufbau einer planaren Breitband-Lambda-Sonde [76]

Zur Kraftstoffverbrauchs-Messung am Motorenprüfstand kommen mehrere Verfahren in Frage. Neben volumetrischen und gravimetrischen Prinzipien kann auch der Coriolis-Effekt zur Durchflussbestimmung genutzt werden. Am häufigsten sind heute gravimetrische Verfahren nach der Wäge-Methode, wobei der zugeführte Kraftstoff einem kontinuierlich gewogenen Tank entnommen wird. Durch Kombination zweier Tanks kann eine kontinuierliche Kraftstoffverbrauchsmessung auch bei Nachfüllvorgängen durch Umschalten auf den zweiten Tank gewährleistet werden. [38] [69]

Auch für die Luftmassenmessung sind mehrere Prinzipien Stand der Technik. Im Fahrzeug verbaute Sensoren nutzen die Leistungsabgabe erhitzter Sensorelemente als Meßgröße, wobei zwei unterschiedlich bestromte Heizelemente auf einer festgelegten Temperatur gehalten und die dafür notwendige elektrische Leistung gemessen wird. Mit zunehmendem Luftmassenstrom steigt daher die elektrische Leistungsaufnahme des Sensors. Die integrierte Elektronik rechnet die Werte u.a. anhand der Temperatur der Luft über ein Kennfeld in einen Massestrom um. Ein weiteres Verfahren bestimmt die Temperatur, den Druck und die Strömungsgeschwindigkeit der Luft bzw. des Gases und errechnet daraus über die adiabatische Zustandsgleichung den Massestrom. Dieser sogenannte Karman-Vortex-Luftmassenmesser bestimmt die Strömungsgeschwindigkeit mittels Ultraschall-Doppler-Anemometrie quer zu dem zu diesem Zweck verwirbelten Luftstrom.

Alternativ kann die Luftmenge auch über einen Drehkolbengaszähler gemessen und wiederum über die adiabatische Zustandsgleichung in Masse umgerechnet werden. [76] [103]

3.4.2 Automatisierungs- und Optimiermethoden

Die Anforderungen im Prüffeldbetrieb sind von vielfältigen und wechselnden Aufgabenstellungen geprägt. Aufgrund der hohen Qualitätsanforderungen und der steigenden wirtschaftlichen Anforderungen müssen die Arbeitsprozesse im Prüffeldbetrieb ständig optimiert werden. Durch die hohen Investitions- und Betriebskosten für die Prüfstandstechnik entfällt auf den Versuchsbetrieb ein signifikanter Anteil der Gesamtentwicklungskosten. Ein zielgerichtetes und dabei möglichst effizientes Vorgehen ist daher oberstes Gebot eines jeden Applikateurs. [3]

3.4.2.1 Prüfstandsautomatisierung

Eine wesentliche Grundlage für die effektive Nutzung des Prüffeldes sind bedarfsgerechte Prüflaufautomatisierungen, deren Hauptaufgabe in der Abwicklung häufig wiederkehrender Aufgaben, im unbemannten Prüfstandsbetrieb und in der Darstellung von dynamischen Prüfläufen besteht. Je nach Anforderung kommen hier verschiedene Werkzeuge zum Einsatz. Für dynamische Versuche, Dauerläufe und Programme mit geringer Parametriedichte wird meist die in der Prüfstandssteuerung integrierte Prüflaufautomatisierung verwendet. Hier finden sich Prüfläufe wie Kennfeldvermessung, Vollastlinien oder Prüfstandschecks. Im dynamischen Bereich werden NEDC und andere Straßenzyklen abgebildet. Für Aufgaben der Prüflaufautomatisierung unter Einbindung der Motorregelung, was meist eine höher dimensionale Parametervariation bedeutet, kommen externe Steuerungen zum Einsatz, die neben einer höheren Flexibilität oft auch entsprechende Optimiermethoden bieten. [1]

3.4.2.2 Optimiermethoden

Die Applikation eines Motors beinhaltet ganz wesentlich die Optimierung verschiedener Parameter der Motorregelung, um den Motor optimal an den jeweiligen Betriebszustand unter Berücksichtigung individueller Randbedingungen anzupassen, siehe auch Abschnitt 3.2. Die hierfür eingesetzte Methodik kann nach Schulmeister in konventionelle und modellbasierte Applikation unterschieden werden. Bei konventioneller Applikation werden die Steuergeräteparameter ausgehend von Projektzielen erfahrungsbasiert verstellt und die Systemreaktion am Versuchsträger unmittelbar vermessen. Dies wird iterativ und häufig auch automatisiert so oft wiederholt, bis ein Parametersatz gefunden ist, der die Ziele erfüllt. Je nach motorischen Randbedingungen, Erfahrungsschatz des Applikateurs und Funktionalität der Motorregelung kann diese Vorgehensweise in Qualität und Zeitaufwand enorm variieren. Bei der modellbasierten Applikation wird der Versuchsträger einmalig vermessen, um Daten zur Parametrierung eines repräsentativen Modells des Ver-

suchsträgers zu gewinnen. Die Applikation erfolgt dann in der Simulation am Modell und kann durch den Einsatz von mathematischen Optimierverfahren mit hohem Automatisierungsgrad effizient durchgeführt werden. Insbesondere bei komplexen Applikationsaufgaben ermittelt die Methode eine Vielzahl von optimalen Ergebnissen für die mathematisch definierten Zielfunktionen. Dem Applikationsingenieur bleibt die Möglichkeit, die gefundenen Parametersätze entsprechend seiner Erfahrung auszuwählen und zu modifizieren. Als weiterer Vorteil kann die Wiederverwendbarkeit der Modelle bei geänderten Zielwerten gesehen werden. [85]

3.4.2.3 Modellbasierte Applikation

Durch zunehmende Akzeptanz modellbasierter Applikation in der Motorenentwicklung sind Anwendungsbereiche und Optimierverfahren heute im Fokus jeder Methodikentwicklung. Aufgrund der Komplexität und Parametervielfalt heutiger Motorregelungen haben sich bereits statisch lokale Modellansätze, also bei konstanter Drehzahl und Last, mittels statistischer Versuchsplanung DoE und einfacher Modellbildung über Polynome in der Entwicklung etabliert. Hierfür existieren auch mathematische Optimieralgorithmen, die für ein zu optimierendes Kriterium (z.B. Kraftstoffverbrauch) unter Beachtung diverser Randbedingungen (meist Emissionen, Geräusch etc.) einen lokal optimalen Parametersatz für die Motorregelung finden. Es kann allerdings in letzter Zeit ein zunehmendes Interesse nach global statischen Modellansätzen und Optimierverfahren verzeichnet werden, die einerseits eine vom lokalen Betriebspunkt unabhängige Simulation der Zielgrößen und andererseits auch eine globale Optimierung beispielsweise mehrerer Varianten für einen Emissionszyklus erlauben. Neben der komplexeren Modellierung z.B. über zweistufige Architekturen [2] sind auch die Anforderungen an die Optimieralgorithmen deutlich höher. Die derzeitige Strategie, eine gewichtete Summe über ausgewählte charakteristische Betriebspunkte zu bilden, bedeutet bereits eine Erhöhung der Freiheitsgrade um die Anzahl dieser Betriebspunkte, was die Existenz lokaler Optima wahrscheinlicher macht und die Berechnungszeit deutlich steigen läßt. [79]

Für die Parametrierung dieser Motormodelle sind Stationärmessungen am Motorprüfstand Stand der Technik. Doch auch wenn die Anzahl der Meßpunkte mittels DoE Methoden reduziert werden kann und der Prüfstand automatisiert die Daten einfährt, ist der zeitliche Aufwand erheblich, was die Effizienz der gesamten modellbasierten Applikation immer wieder in Frage stellt. Daher sind kürzlich vermehrt Anstrengungen zu bemerken, diese Vorgänge zu beschleunigen. Zugrunde liegt die Erkenntnis, daß ein Großteil der benötigten Zeit zur Vermessung eines Versuchspunktes zur Verstellung und Stabilisierung des Betriebszustandes verwendet wird, während nur ein kleiner Teil der tatsächlichen Datengewinnung dient, siehe Abbildung 3-19.

Die Grundidee des beschleunigten Verfahrens besteht daher darin, eine kontinuierliche Messung inklusive der transienten Motorzustände zu verwenden und damit langwierige Einschwingphasen zu vermeiden. Dazu wird ein Verfahren benötigt, das in der Lage ist, aus kurzen transienten Anregungen den stationären Zustand vorherzusagen, was nur mittels dynamischer Modellbildung möglich ist. Dies setzt aber neben dynamischen Prüfständen auch eine dynamisch schnelle und rauscharme Sensorik sowie eine ausreichend hoch abgetastete, kontinuierliche Datenaufzeichnung voraus. Ist dies gegeben, kann in deutlich kürzerer Zeit eine Identifikation des motorischen Verhaltens erfolgen, was aber gleichzeitig einen höheren Aufwand in der Datennachbearbeitung bedingt. Durch die Reduktion auf stationäre Werte können die bereits angeführten statischen Optimierstrategien verwendet werden. [77] [95] [99]

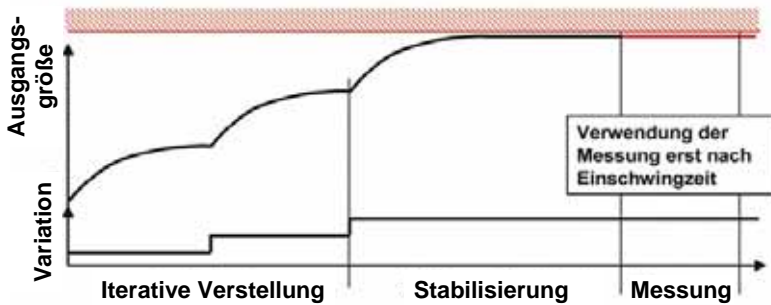


Abbildung 3-19: Phasen einer stationären Messung [77]

Mit den wachsenden Anforderungen an die Applikation genügt eine vereinfachte statische Betrachtung, die sich auf eine rein stationäre Zuordnung von Ein- und Ausgangsgrößen beschränkt, längst nicht mehr allen Erfordernissen. Vielmehr ist eine Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens speziell bei Motoren mit Turboladern unabdingbar, will man aussagekräftige Ergebnisse, zum Beispiel über das Abgasverhalten in den gesetzlichen Abgastestzyklen erhalten und den instationären Motorbetrieb optimieren [84]. Über den Ansatz der beschleunigten Parametrierung statischer Modelle wuchs so schnell der Wunsch, die vorhandenen dynamischen Modelle nicht nur zur Prädiktion statischer Werte, sondern zur Beschreibung des dynamischen Motorverhaltens zu verwenden. Dann sind allerdings deutlich erweiterte Anforderungen an die dynamische Versuchsplanung zu stellen, siehe auch Abschnitt 3.3.3. Aufgrund der offensichtlichen Vorteile ist die global dynamische Modellbildung für Verbrennungsmotoren heute Ziel vieler Ansätze der modellbasierten Applikation. Damit wird zukünftig auch eine dynamische Optimierstrategie erforderlich sein, deren Entwicklung heute allerdings noch in den Anfängen steckt.

3.5 Heutiger Applikationsprozeß

Unter Applikation versteht man in der Automobilindustrie die Integration eines bestehenden (Grund-) Motors in unterschiedliche Fahrzeugtypen durch Optimierung und Abstimmung der Systemparameter und -regler des Motors. Der zugehörige Entwicklungsprozeß durchläuft meist verschiedene Applikationsphasen in unterschiedlichen Entwicklungsumgebungen nach einer festgelegten Reihenfolge, womit eine heutige Serienapplikation etwa zwei bis drei Jahre dauert, siehe Abbildung 3-20.

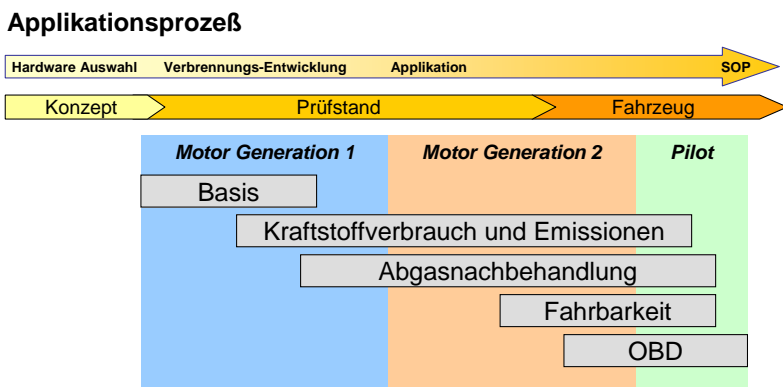


Abbildung 3-20: Applikationsphasen und damit verbundene Entwicklungsumgebungen

Wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben, kann die Applikation auch Hardware-Änderungen umfassen, um die Eigenschaften des Motors an die fahrzeugspezifischen Anforderungen anzupassen. In dieser Konzeptphase werden detaillierte Simulationen auf Basis physikalischer Ansätze durchgeführt, die eine virtuelle Variation gewisser Bauteile zur Potentialabschätzung primär von Leistungs- und Emissionsverhalten erlauben. Der Parametrier- und Rechenaufwand dieser Modelle ist zwar hoch, wird jedoch in dieser Phase aufgrund der zuverlässig gewonnenen Erkenntnisse und in Ermangelung von Alternativen akzeptiert. Meist werden die Hardware-Abstimmungsarbeiten im Rahmen der Brennverfahrensentwicklung am Motorprototyp weitergeführt, um optimale Voraussetzungen für die folgende Motorabstimmung mittels Motorregelung zu schaffen. [82]

Im Anschluß an die Konzeptdefinition können auf Basis der gewählten Hardware erste Entscheidungen hinsichtlich der notwendigen Regelungs- und Steuerungsstrukturen sowie ihrer Entwicklung abgeleitet werden. Dies kann die Erweiterung einer Funktionalität, beispielsweise erweiterte Kennfelder im Einspritzpfad, oder das Hinzufügen von Regelungen wie beispielsweise die Verwendung eines Turboladers mit variabler Turbinengeometrie anstelle eines Festgeometrieladers sein, die

dann eine geeignete Regelung erforderlich macht. Aufgrund der im Zuge der verschärften Abgasgesetzgebung einzuführenden Abgasnachbehandlungssysteme hat die Funktionsentwicklung auch hier stark an Bedeutung gewonnen. [73]

Das Grundgerüst der ECU-Applikation bildet die Basisabstimmung, die Umfänge wie Abstimmung der Luft- und Kraftstofffunktionalitäten sowie eine Auslegung von Vollast, Teillast und Leerlauf nach projektspezifischen Kriterien und in letzter Zeit auch zunehmend die Parametrierung modellbasierter Funktionalitäten in der Motorregelung beinhaltet. Dabei überwiegen stationäre, betriebswarme Zustände des Motors, die erst mit der leicht verzögert einsetzenden Abstimmung der ECU-internen Regler für Raildruck und Luftsystem closed-loop über die Motorregelung eingestellt werden können.

Die anschließende Optimierung auf Leistung, Geräusch, Kraftstoffverbrauch und Emissionen inklusive möglicher Abgas-Nachbehandlung, nimmt den größten Anteil der Applikationsaufwände ein. Hierbei werden am Prüfstand zunächst stationär die Basiskennfelder der Stellgrößen bedatet, bevor mittels dynamischen Testläufen eine Bewertung des transienten Verhaltens und der Reglerqualität erfolgen kann. In der hieraus resultierenden dynamischen Feinabstimmung werden transiente Korrekturfunktionen appliziert oder gegebenenfalls die stationäre Auslegung der Steuerkennfelder nochmals adaptiert, wobei eine gute Stationärbedatung immer zu gewährleisten bleibt. Aufgrund der hohen Anzahl an Aktuatoren und damit vielfältigen Freiheitsgrade unter Berücksichtigung stationärer und dynamischer Effekte für teilweise gegenläufige Ziele, ist ein iteratives Vorgehen für den bestmöglichen Kompromiß unvermeidbar. Entscheidend für diesen Prozeß sind die im Abschnitt 3.4.2.2 beschriebenen Optimiermethoden.

Ist eine definierte Qualität in der Abstimmung erreicht, werden die Ergebnisse im Fahrzeug zunächst validiert und dann gegebenenfalls weiter feinangepasst. Verfügbare Simulationen, beispielsweise ein Fahrzeugmodell für den Prüfstand, können mit der Zielumgebung abgeglichen werden, um so genauere Ergebnisse zu liefern. Weitere triebstrangspezifische Funktionalitäten wie Momenteneingriffe oder Fahrdynamikregler werden appliziert, was wiederum Rückwirkungen auf bereits gefundene Emissionsabstimmungen haben kann. So ist auch in diesem Stadium häufig ein iteratives Vorgehen zur Kompromißfindung vonnöten.

Schließlich kann ab einem gewissen Fortschritt in der Applikation auch die On-Board Diagnose appliziert werden, was in heutigen Motorregelungen einen großen Prozentsatz der Parameter und somit des Aufwandes ausmacht. Da gemäß (zukünftigen) gesetzlichen Anforderungen alle emissionsrelevanten Bauteile und Sensoren überwacht werden müssen, ist neben entsprechenden Strategien eine große Menge von Prozeßkenngrößen erforderlich, die im heutigen Applikationsprozeß meist aufwendig vermessen werden müssen.

Um einen sicheren und zuverlässigen Betrieb auch in extremen klimatischen Bedingungen zu gewährleisten, finden parallel zur beschriebenen Entwicklung zu

definierten Zeitpunkten sogenannte Hitze-/ Höhe-/ Kälte- Erprobungen statt. Hier werden abhängig von den Umweltzuständen notwendige Korrekturen der Verbrennungsprozeßführung in der Motorregelung hinterlegt. Dabei ist ebenfalls auf die Interaktion mit den unter normalen Bedingungen applizierten Parametern zu achten.

4 Modellierungskonzept und -architektur

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer global dynamischen Streckenbeschreibung des Motors, die in der Applikation einsetzbar ist. Dazu werden zunächst Anforderungen aus der Applikation an ein solches Motormodell aufgenommen, diese sinnvoll klassifiziert und in allgemeine modellierungstechnische Abbildungskriterien eingeordnet. Anschließend können so die Anforderungen mit vorhandenen Konzepten verglichen werden. Darauf aufbauend wurde ein neues Modellierungskonzept mit neuartiger Modellarchitektur entwickelt.

4.1 Anforderungen aus der Applikation

Wie in Abschnitt 3.5 beschrieben, sind die heutigen Herausforderungen in der Applikation vielfältig. Stetig steigende Anforderungen von Gesetzgeber und Kunden führen zu wachsender Systemkomplexität hinsichtlich verfügbarer Stellmöglichkeiten und Funktionalitäten der Motorregelung. Speziell durch die verschärften Emissionsstandards ist ein verstärkter Fokus auf dynamische Effekte des Motorprozesses zu beobachten. Auf der anderen Seite führen teilweise gegenläufige Entwicklungsziele bei Leistungs-, Verbrauchs-, Fahrbarkeits- und Emissionsverhalten und mangelnde Interaktionskenntnis zu mehrfach iterativen Optimierungsprozessen. Die heutige Variantenvielfalt ist beispielsweise am aktuellen 1.6l VW Dieselmotor mit 50 Fahrzeugtypen und 200 Applikationen ersichtlich [92]. Der daraus entstehende Applikationsaufwand führt zu vielfach wiederholten und doch sehr ähnlichen Meßprogrammen, auch weil während des Prozesses vielfach die Entwicklungsumgebung gewechselt und eine jeweilige Anpassung der Applikation hieran erfolgen muß. Schließlich laufen heutige Projekte immer unter hohem Kosten- und Zeitdruck, was eine geringe Verfügbarkeit an Prototypen, eine Einsparung teurer Facilities und eine kürzere Entwicklungsphase bedeutet.

Wünschenswert wäre daher eine durchgängige, den gesamten Applikationsprozeß begleitende Entwicklungsumgebung, die alle Aufgabenfelder abdecken kann und eine multikriterielle Betrachtung oder gar Optimierung erlaubt. Der seit einiger Zeit zu beobachtende Verlagerungstrend typischer Fahrversuchsumfänge von der Straße auf den Prüfstand („road to rig“) erlaubt heute durch leistungsfähige Fahrzeugsimulationen und adaptierte Optimierstrategien die Vorteile eines konditionierten Prüffeldes mit realen dynamischen Belastungsumfängen eines Fahrzeuges zu verbinden. Die mit Einführung der DoE-Methode akzeptierten Vorteile einer modellbasierten Entwicklung als Schlüssel zur effizienten Optimierung führten parallel zu datengetriebenen Steady-State Modellen, basierend auf Prüfstandsmessungen, die eine nochmalige Verlagerung typischer Prüfstandsumfänge in Motormodelle („rig to lab“) zur Folge hatte.

4.1.1 Virtuelle Applikation

Die Vision einer vollständig virtuellen Applikation anhand von Motor- und Fahrzeugmodell ist dennoch bis heute nicht verwirklicht, obwohl die Vorteile offensichtlich sind.

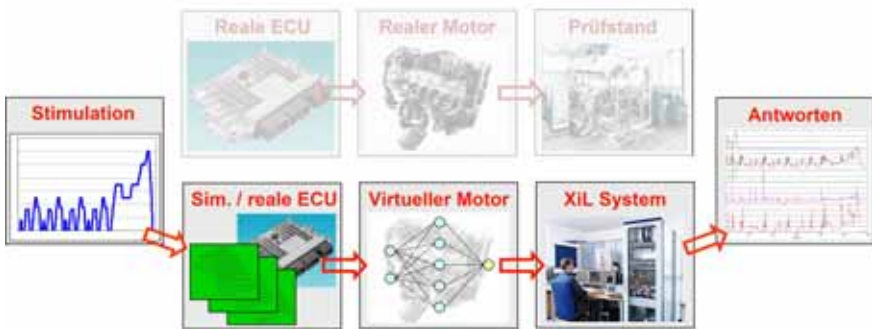


Abbildung 4-1: Komponenten einer virtuellen Entwicklungsumgebung

Gemäß Abbildung 4-1 werden reale Komponenten durch Modelle ersetzt, also der reale Motor durch ein Motormodell und Prüfstands- bzw. Fahrzeugumgebung durch entsprechende XiL-Systeme. Gleich bleiben sollen die Möglichkeiten der Stimulation und die daraus erwarteten Prozeßausgänge.

Somit ist ein robusterer und zugleich effizienterer Applikationsprozeß mittels Verwendung modellbasierter Methoden darstellbar. Eine bessere Reproduzierbarkeit auch dynamischer Belastungsumfänge, eine höhere Systemstabilität aufgrund nicht vorhandener Sensordrift- oder Alterungseffekte sowie keine Gefahr von Bauteilschäden erhöhen zusätzlich die Attraktivität des Ansatzes. Die erweiterten Möglichkeiten in der Applikationsvalidierung und -absicherung erhöhen nicht nur die Qualität sondern zeigen auch frühzeitig Handlungsbedarf auf. Wirtschaftlich sind besonders der geringere Prüfstandsbedarf und die zeitlich eingeschränkte Prototypenverwendung von Bedeutung. Zusätzlich ermöglicht eine virtuelle Umgebung auch neue Optimierungsmöglichkeiten und Applikationsstrategien.

Um diese Vorteile nutzen zu können, ist eine Integration dieser virtuellen Entwicklungsumgebung in den bestehenden Applikationsprozeß von hoher Bedeutung. Bekanntermaßen werden heute bereits physikalisch-empirische Modelle zur Hardware-Konzeption und Potential-Bewertung in der Verbrennungsauslegung genutzt und teilweise sogar zur Vorbedatung der Motorregelung verwendet. Benötigt wird aber ein Modellansatz, der den gesamten Abstimmungsumfang in allen Bereichen unterstützen kann. Heute verwendete Modelle in der Applikation bedürfen da noch erheblicher Weiterentwicklung. Ziel soll die gemeinsame Verwendung einer XiL-basierten Entwicklungsumgebung sein, die den Applikationsprozeß

durchgängig begleitet und neben der modellbasierten Applikation eine frühzeitigere Einbindung von Fahrzeugumfängen erlaubt, Abbildung 4-2.



Abbildung 4-2: Virtuelle Entwicklungsumgebung im Applikationsprozess

4.1.2 Anforderungen an ein Motormodell

Die Voraussetzung für den Erfolg und die Anwendbarkeit der virtuellen Entwicklungsumgebung im heutigen Applikationsprozeß ist ein geeignetes Motormodell, das das motorische Verhalten unter allen relevanten Umständen zuverlässig abbildet.

Dies bedeutet zunächst die Notwendigkeit, alle am Prüfstand erfaßbaren Ausgangsgrößen, wie inneres und effektives Drehmoment, Kraftstoff- und Luftmassenstrom, Konzentration der Abgaskomponenten, Verbrennungsgeräusch sowie an charakteristischen Positionen vermessene Druck- und Temperaturverläufe simulieren zu können. Dabei müssen äußere Einflüsse auf den Betrieb z.B. der Umgebung wie Temperatur, Druck, Feuchte an den entscheidenden Motorkomponenten berücksichtigt werden, also beispielsweise die Temperatur des Ladeluftkühlers oder der Wassergehalt in der Ansaugluft. Die Möglichkeiten der Brennverfahrens-adaption über die Motorregelung sollen dabei vollständig erhalten bleiben, was zum einen die Einflüsse durch die Aktuatorik des Motors und zum anderen die Einflüsse über die closed-loop Regelungen betrifft. Dies bedingt aber eine ausreichend genaue Stimulation der Motorsensorik, über die die Motorregelung die Betriebsweise des Motors einregelt. Das Ziel in der Genauigkeit der Abbildung physikalischer Größen, wie beispielsweise des Luftmassenstroms, ist somit auf unter 5% relativen Fehler anzusetzen, während ein relativer Fehler von 10% in den Konzentrationen der Abgaskomponenten aufgrund der auch im realen System hohen Streubreite noch akzeptabel wäre. Abbildung 4-3 illustriert die geforderte Verknüpfung von Motormodell und Motorregelung.

Zusätzlich ist eine ausreichende zeitliche Auflösung des Modells gefordert, da nicht nur viele motorische Effekte, sondern auch die internen Regelkreise der Motorregelung hiervon stark beeinflusst sind. Einschränkend kann an dieser Stelle festgestellt werden, daß sowohl für Applikationsaufgaben als auch für die Motorregelung eine zumindest arbeitsspiel-synchrone Abtastung ausreichend ist, da alle Prozeßausgänge über ein Arbeitsspiel gemittelt betrachtet werden. Temporäre Phänomene innerhalb eines Arbeitsspiels, die mindestens eine kurbelwinkelsynchrone Abtastung erfordern würden, sind für die Applikation von untergeordneter Bedeutung.

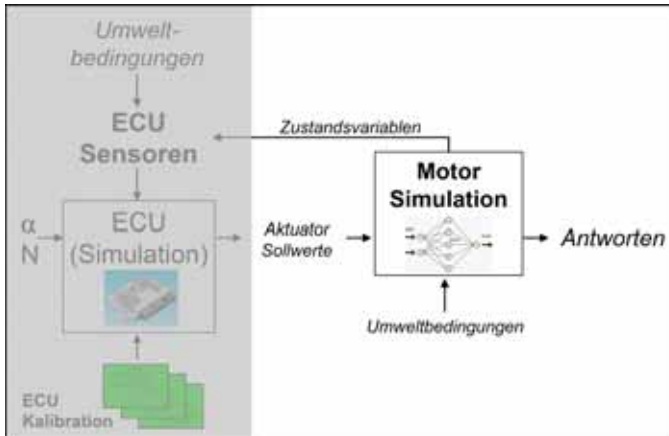


Abbildung 4-3: Schematische Verknüpfung Motormodell und Motorsteuerung

Aufgrund der wenigstens im gesetzlichen Emissionszyklus geforderten integralen Ergebnisbetrachtung, ist der Gültigkeitsbereich des Motormodells in Hinblick auf Drehzahl und Last in seiner Ausdehnung entsprechend zu wählen und zusätzlich durchgängig zu gestalten, was eine globale Modellierung des Betriebsbereichs bedingt. Zusätzlich ist für Optimierung und Absicherung der Applikation sowie Stabilität des Motormodells eine ausreichend große Variationsbreite in den Applikationsparametern, wie beispielsweise der AGR-Rate, sicherzustellen.

Neben technischen Anforderungen sind zusätzlich auch psychosoziale Aspekte einer solchen Veränderung des Applikationsprozesses zu berücksichtigen. So wird die Einführung neuer Methoden als eine der schwierigsten Aufgaben in der Arbeitswelt gesehen, da sie immer auch mit einer Änderung der Arbeitsweise und -kultur verbunden ist. Gerade im Bereich der Applikation wird der pragmatische Lösungsweg durch die Erfahrungen in der täglichen Arbeit und vergangene Erfolgserlebnisse bevorzugt. Ein höherer Aufwand wird für die vermeintlich sichere Zielerreichung über bewährte Methoden akzeptiert, zumal gerade theoretische Kenntnisse über Simulationen meist nicht vorhanden sind, weshalb die modellbasierte Methode in Frage gestellt wird. [27]

Es erscheint daher wichtig, vertraute Vorgänge und Methoden nach Möglichkeit beizubehalten, auch wenn technisch gesehen vielleicht andere Lösungen möglich wären. Ein übersichtlicher und möglichst einfacher Modellierungsprozeß ist daher komplexen Zusammenhängen vorzuziehen. Dies gilt ebenso für die Parametrierung des Motormodells, wo aufgrund der bekannten statischen DoE Methoden eine datengetriebene Identifikation als leichter gegenüber einer physikalisch motivierten Parametrierung empfunden wird. Vielfach sind ohnehin geometrische oder werkstoffspezifische Parameter in diesem Status der Entwicklung nur schwierig verfügbar. Mit der Einbindung in HiL-Systeme kann der Applikateur gleiche Werkzeuge wie am Motorprüfstand einsetzen und ist von der Bedienung des Motormodells an sich weitestgehend entkoppelt. Als zusätzlichen Vorteil ergibt sich die gewohnte Bedienung und Funktion der Motorregelung, die in heutigen Systemen einen beträchtlichen zusätzlichen Simulationsaufwand bedingen würde.

Im Sinne der dadurch geforderten Echtzeitfähigkeit des Modells ist eine möglichst geringe Komplexität anzustreben, zumal für Optimierstrategien eine möglichst kurze Rechenzeit in jedem Falle vorteilhaft ist.

4.2 *Klassifikation und Vergleich der Anforderungen mit existierenden Konzepten*

Der Begriff Motormodell wird allgemein für grundlegend unterschiedliche Methoden verwendet, die meist nach der beabsichtigten Anwendung kategorisiert sind. Durch die Vielfalt der Phänomene im Motorprozeß ist die Modellierung der Ausgangsgrößen herausfordernd. Daher sind zahlreiche Modellierungsansätze bekannt, vergleiche Abschnitt 1.1.1. In allen Fällen wird mit dem Konzept auf einen bestimmten Teil des Prozesses fokussiert, der üblicherweise mit vereinfachten Strukturen der restlichen Prozeßsegmente kombiniert ist. Schon allein durch Anforderungen an die Rechengeschwindigkeit besteht die Notwendigkeit, Vereinfachungsverfahren zu verwenden. [64]

4.2.1 Klassifizierung der Anforderungen

Im Folgenden werden übliche Vereinfachungsverfahren vorgestellt und Kriterien zur Bewertung unterschiedlicher Modellansätze eingeführt, um die geforderten Anforderungen mit bestehenden Konzepten vergleichen zu können. Dabei sind die Kriterien zwar als allgemeingültig zu verstehen, ihre jeweilige Bewertung aber stets vor dem Hintergrund der in dieser Arbeit fokussierten Anwendergruppe zu sehen.

4.2.1.1 Zeitliche Auflösung

Besonders bei empirischen Ansätzen wird häufig der diskontinuierliche verbrennungsmotorische Prozeß im stationären Betriebszustand über eine Anzahl von gemittelten Arbeitsspielen auf statische Modelle überführt. Diese auch unter dem

Namen „stationäre DoE“ bekannte Methode ist bereits recht ausgereift und in der Applikation weit verbreitet, eignet sich allerdings ausschließlich für stationäre Optimierungen [78]. Mittels quantifizierenden Event-Bewertungen kann ebenfalls aus dynamischen Ereignissen ein statisches Modell gebildet werden, wie es beispielsweise heute für Fahrbarkeitsbewertungen üblich ist. Auch hiermit ist keine vollständige transiente Optimierung möglich, aber bereits eine Bewertung der sich aus dem transienten Prozeß ergebenden Reaktionen.

Für modellbasierte Applikation in Aufgabenbereichen wie transiente Emissionsabstimmung, Reglerauslegung etc. sind dynamische Modelle des Motors notwendig. Hierbei werden explizit transiente Prozeßeffekte im Modell abgebildet, was allerdings eine höhere Komplexität in der Modellierung bedingt. Als Zwischenstufe zur vollständigen dynamischen Modellierung hat sich eine Methode zur Meßzeitreduktion durch Prädiktion stationärer Zustände aus kürzeren transienten Messungen herausgebildet. Dabei sind die Anforderungen an Versuchsplanung und Approximator weniger hoch, da hauptsächlich das Ansprech- und Totzeitverhalten der Meßgeräte identifiziert werden muß [95]. Eine Bewertung oder Optimierung transienter Effekte ist mit dieser Methode nicht möglich.

Abbildung 4-4 faßt die Methoden zusammen und gliedert die Modelle in „Typ 1“ für statische und „Typ 2“ für dynamische Modelle. Für die im vorherigen Abschnitt geforderten und für diese Arbeit relevanten Aspekte ist „Typ 2“ erforderlich, die gemäß Röpke zwar erhebliches Potential besitzen, aber derzeit einen noch geringen Reifegrad besitzen [78].

Modell \ Prozeß	Prozeß		Klassifikation
	Zeitinvariant (stationär)	Zeitabhängig (dynamisch)	
Zeitinvariant (stationär)	Standard	Geeignet für Ereignis-Auswertung	Typ 1
Zeitabhängig (dynamisch)	Nicht anwendbar	Geeignet für a) Stationäre Vorhersage b) Dynamische Streckenbeschreibung	Typ 2

Abbildung 4-4: Modell Klassifizierung nach zeitlicher Auflösung

Für die Klassifikation der Modelle nach zeitlicher Auflösung bestehen neben dieser Mindestanforderung („Typ 2“) weitere Differenzierungsmerkmale. Die für übliche Rechenoperationen notwendige Diskretisierung in Zeitschritte kann zunächst nach zeit- oder kurbelwinkelsynchronem Raster unterschieden werden. Während sich für innermotorische Phänomene wie Einspritzstrahlerfall eine kurbelwinkelbasierte Schrittweite aufgrund des thermodynamischen Prozeßbezuges als

anschaulicher erweist, sind Effekte im Luftpfad wie Turboladeransprechverhalten oder Sensordynamik zunächst unabhängig vom Kurbelwinkel. Für gewisse Prozeßausgänge wie beispielsweise Abgasemissionen ist wiederum eine arbeitsspielgemittelte Schrittweite attraktiv, da Zwischenzustände chemischer Reaktionen für die Applikation in der Regel nicht von Interesse sind. [21]

Die in Abschnitt 4.1.1 als Entwicklungsplattform diskutierte HiL-Umgebung bedingt ein echtzeitfähiges Modell, was bedeutet, daß ein Rechenschritt im Modell jeweils mindestens mit der Geschwindigkeit des realen Systems bzw. mit der Schrittweite der verbundenen Motorregelung ausgeführt werden kann. Dies ist unter anderem von der verwendeten Simulationsplattform und Rechnerperformance abhängig, setzt aber in jedem Fall der zeitlichen Auflösung klare Grenzen, so daß viele kurbelwinkelbasierte Modelle in Echtzeit mit heutigen Rechnern noch nicht realisierbar sind.

4.2.1.2 Betriebsbereichabdeckung

Der Betriebszustand eines Motors wird grundsätzlich zunächst durch den Betriebspunkt charakterisiert, vergleiche Abschnitt 3.1.1.2, der üblicherweise mit Drehzahl und Last beschrieben wird. Lokale Variationen des Brennverfahrens in diesen Betriebspunkten über die Aktuatorik der Motorregelung müssen für viele Aufgaben der Applikation dem Betriebsbereich zugerechnet werden, um aus der zu optimierenden Kombination der Stellgrößen die jeweiligen Entwicklungsziele zu erreichen. Allerdings müssen lokal veränderliche Betriebsgrenzen aus Bauteilschutz- oder Stabilitätsgründen berücksichtigt werden. Zusätzlich ergeben sich durch äußere Umwelteinflüsse auf den Motor weitere Parameter, die den Betriebsbereich charakterisieren. Thermische Zustände von Motor und Ansaugluft sowie der Umgebungluftdruck sind als die entscheidendsten Größen hier zu nennen.

Aufgrund des weiten Einsatz- und damit Betriebsbereiches heutiger PKW-Motoren müssen auch hier Vereinfachungen bei der Modellierung getroffen werden. Durchwegs verbreitet ist die Methode, den Motorbetrieb zunächst in den Umweltbedingungen auf „konditioniert warme Standardbedingungen“ eines Motorenprüfstandes zu begrenzen, was eingeschwungene thermische Zustände von Kühlwasser, Öl und Ansaugluft sowie einen konstanten Luftdruck nahe dem Meeresspiegelniveau bedeutet. Dies kann allerdings bereits für Optimierung gesetzlicher Emissionszyklen zu einer Einschränkung der Aussagekraft und der Optimierungsmöglichkeiten führen. Weiterhin wird besonders bei den schon thematisierten stationären DoE Methoden häufig noch zusätzlich der Betriebsbereich des Modells auf in Drehzahl und Last konstante und somit lokale Zustände begrenzt, womit dann auch keine transiente Optimierung mehr möglich ist. Modelle, die keiner derartigen Einschränkung unterliegen, also in Drehzahl und Last beliebig variiert werden können, werden als „global“ bezeichnet, Abbildung 4-5.

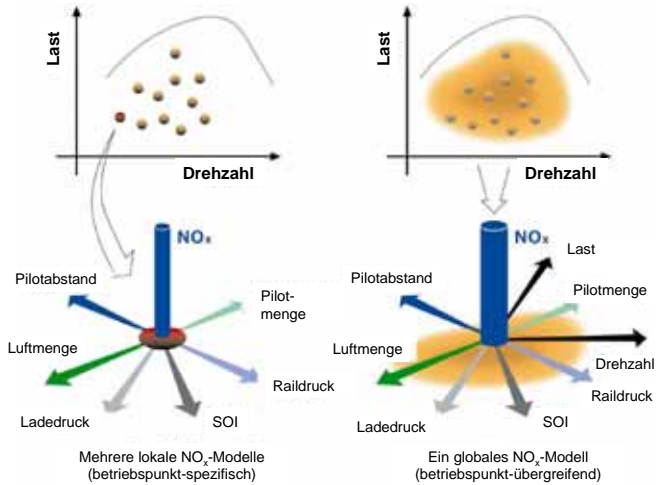


Abbildung 4-5: Differenzierung von „lokalem“ und „globalem“ Betriebsbereich [56]

4.2.1.3 Abbildungsumfang

Unter Abbildungsumfang sollen in diesem Zusammenhang die durch das Modell beschreibbaren Prozeßausgänge verstanden werden. Dabei sind die Anforderungen in dieser Hinsicht in erster Linie von den beabsichtigten Einsatzfeldern abhängig. Es ist beispielsweise vorstellbar, daß für die reine Beschreibung der Längsdynamik eines Fahrzeugs das effektiv abrufbare Drehmoment aus dem Motormodell ausreichend wäre und somit ein geringer Abbildungsumfang benötigt würde. Für Hardware-Konzeptbewertungen sind bereits zusätzliche, meist physikalische Größen wie beispielsweise Luft- und Kraftstoffdurchsatz notwendig. Mit wachsendem Einsatzgebiet des Motormodells steigen die Anforderungen an den Abbildungsumfang, da alle für die Abstimmungsaufgabe relevanten Größen dargestellt werden müssen, wie bei einer Emissionsabstimmung alle relevanten Schadstoffkonzentrationen abzubilden sind. Soll das Modell mit der Motorregelung im closed-loop Zustand betrieben werden, muß zusätzlich die Stimulation der ECU-Sensorik im Abbildungsumfang berücksichtigt werden.

4.2.1.4 Detaillierungsgrad

Ein weiteres Kriterium ist der Detaillierungsgrad der Motormodelle, also welche Variationen im Modell möglich sind und welche Effekte berücksichtigt werden. Auch hier hängen die Anforderungen stark vom beabsichtigten Einsatzgebiet ab. Es ist ersichtlich, daß beispielsweise zur simulatorischen Auslegung der Kolbenmulde ein örtlich wie zeitlich hoch aufgelöstes 3D Modell des Brennraums mit veränderlicher Muldengeometrie unter Berücksichtigung diverser Phänomene wie

turbulenter Strömungszustände oder Einspritzstrahlzerfall benötigt wird. Dies würde eine sehr hohe Detaillierung des Modells in diesem Bereich erfordern, während es für globalere Betrachtungen des Motors, wie eine Fahrzeug-Längsdynamik-Betrachtung ungeeignet wäre. In diesem Falle wäre womöglich ein einfaches Kennfeld, abhängig von Fahrpedal und Drehzahl ausreichend. Unterkriterien des Detaillierungsgrades können also die angewandte Modellierungsmethode von null-dimensionalen bis örtlich hoch aufgelösten drei-dimensionalen Modellen und die hierin möglichen Variationen von Betriebspunktwechsel über Aktuator- und Zustandsänderungen bis zur Bauteilvariation und schließlich Phänomenbetrachtung sein.

In Hinblick auf den beabsichtigten Einsatzzweck ist zusätzlich ein konsistenter Grad der Detaillierung anzustreben, also eine einheitliche Vereinfachungsstufe der motorischen Effekte und Prozeßsegmente, besonders im Falle von mehrstufigen Modellansätzen. Dies wird gerade bei physikalisch motivierten Modellansätzen häufig vernachlässigt und führt zu partiell hochkomplexen Systemen für Zwischengrößen, während die eigentliche Zielgröße durch eine einfache Approximation gebildet wird.

4.2.1.5 Abbildungsqualität

Eine zur Bewältigung der beabsichtigten Entwicklungsaufgabe ausreichende Abbildungsqualität muß mit jedem Modellansatz sichergestellt werden. Der in der Praxis häufig angewandte Vergleich des Modellausgangs mit Messungen am realen Motor setzt als bestmögliche Qualität somit die Meßgenauigkeit an, die durchaus unterschiedlich je nach betrachtetem Prozeßausgang ausfallen kann. Wesentlich ist auch die jeweilige Prozeßstabilität, die zu stochastischen Schwankungen in der Messung führen kann, die meist im Modell nicht berücksichtigt sind. Eine entsprechende Signalqualitäts- und Stabilitätsbetrachtung des realen Systems sollte daher z.B. durch entsprechende Wiederholungsmessungen durchgeführt werden.

Als Fehlermaß für statische Modelle haben sich verschiedene mathematische Größen wie beispielsweise der Korrelationskoeffizient R^2 etabliert, während für dynamische Modelle derzeit noch kein allgemein akzeptiertes Qualitätsmaß bekannt ist. Bei mehrstufigen Modellansätzen ist die Fehleraddition über die einzelnen Modellteile zu beachten, weshalb eine kurze Berechnungskette grundsätzlich angestrebt werden sollte.

4.2.1.6 Handhabbarkeit

Wie im Abschnitt 4.1.2 thematisiert, sind neben modellierungstechnischen Kriterien auch psychosoziale Aspekte für die Anwendbarkeit und Akzeptanz von hoher Bedeutung. Diese sollen im Kriterium Handhabbarkeit zusammengefaßt werden.

Ein wichtiger Aspekt für die Handhabbarkeit ist der Aufwand zur Parametrierung des Modells, der von den zuvor diskutierten Kriterien abhängt, also z.B. von der

Anzahl der im Modell möglichen Variationen. Es wurde schon diskutiert, daß hier eine physikalisch motivierte Parametrierung, die konstruktive Daten über Geometrie und Werkstoffe oder Kennwerte beispielsweise über thermisches Bauteilverhalten erfordert, als weniger gut handhabbar eingestuft wird als eine meßdatengetriebene Parametrierung. Neben der zu diesem Zeitpunkt im Entwicklungsprozeß schwierigen physikalischen Parametergewinnung sind Applikateure eher den Umgang mit am Prüfstand gewonnen Meßdaten gewohnt und vertrauen auf diese Weise parametrisierten Modellen mit kompakten Strukturen tendenziell eher als komplexeren physikalisch basierten Systemen. Wird durch die Modellstruktur eine automatisierte Vermessung der benötigten Daten ermöglicht, kann dies als weiterer positiver Aspekt der Handhabbarkeit gelten, da somit auch Randzeiten des Prüfbetriebes nutzbar werden und damit die Kernzeit dem Applikateur für andere Aufgaben am Prüfstand bleibt.

Nachdem die meisten Applikateure keine Modellierungsexperten sind, ist ein einfacher und durchgängiger Modellierungsprozeß anzustreben, der möglichst standardisiert auf in der Applikation bewährten Modellierungsverfahren beruht. Das Trainieren einer Modellstruktur zur Bildung eines mathematischen Zusammenhangs interpretierbarer Modelleingänge und -ausgänge kann dabei als akzeptabel eingestuft werden, während separate Modelle für nicht interpretierbare Modellzwischengrößen zu vermeiden sind. Die bereits im Kriterium Detaillierungsgrad geforderte Durchgängigkeit hat also auch einen Einfluß auf die Handhabbarkeit.

Schließlich sollte die Bedienung bzw. der Betrieb des Modells für die beabsichtigten Applikationsaufgaben nicht im Vordergrund stehen. Die Möglichkeit gleiche Applikationswerkzeuge wie am Prüfstand oder im Fahrzeug bei möglichst gleichen Variationsparametern zu verwenden, erhöht zweifelsfrei die Akzeptanz der gesamten Methode. In diesem Hinblick sollte auch die Integration des Modells in eine den gesamten Applikationsprozeß begleitende Entwicklungsumgebung gemäß Abschnitt 4.1.1 möglich sein, um die Übergabe von erreichten Applikationsständen für nachfolgende Aufgaben zu erleichtern.

4.2.2 Einordnung und Vergleich der Anforderungen

Ein in den im vorherigen Abschnitt vorgestellten Kriterien durchgeführter Vergleich unterschiedlicher Modellierungsansätze mit den Anforderungen der Applikation aus Abschnitt 4.1.2 ist in Abbildung 4-6 dargestellt.

Eine Bewertung verfügbarer empirischer Konzepte mit Modell- „Type 2“-Charakter, wie beispielsweise das in Abschnitt 3.3.4.2 vorgestellte Modell von Hafner, zeigt in diesen Aspekten zunächst eine ausreichende Abbildungsqualität im erforderlichen Betriebsbereich. Aufgrund des einstufig empirischen Ansatzes mit einhergehendem geringem Detaillierungsgrad wird eine gute Handhabbarkeit erreicht und eine mindestens echtzeitfähige Rechenschrittweite erscheint möglich. Allerdings sind die dynamischen Effekte des Motors nicht ausreichend differenziert, weshalb das

Kriterium der zeitlichen Auflösung hier als unzureichend bewertet wird. Auch sind nicht alle geforderten Ausgangsgrößen darstellbar, so daß auch im Abbildungsumfang noch Erweiterungsbedarf festzustellen ist. Andere Modellansätze dieser Kategorie, wie beispielsweise von Baumann [9] vorgeschlagen, führen zu gleichen Bewertungen und können daher die hier gezeigte Einschätzung als repräsentativ für diese Konzeptgruppe gelten lassen.

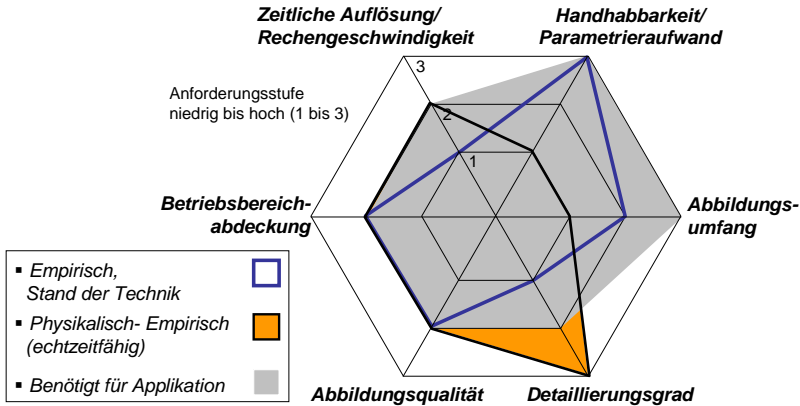


Abbildung 4-6: Vergleich existierender Modellierungskonzepte mit den Anforderungen

Als Grundlage der Bewertung für halbempirische Ansätze wird hier der Ansatz von Schüsler [86] herangezogen, der ebenfalls als repräsentativ für diese Kategorie gesehen wird. Hier ist eine gute dynamische Vorhersagekraft neben vielen Variationsmöglichkeiten inklusive Hardware-Variation (z.B. Turbolader) gegeben. Die demonstrierten Ausgangsgrößen sind im Betriebsbereich global abgedeckt und in ihrer Abbildungsqualität als ausreichend zu bewerten. Dazu ist allerdings ein hoher Detaillierungsgrad notwendig, der schon wegen des hohen Parametrieraufwandes eine für Applikateure schlechtere Handhabbarkeit verursacht. Zusätzlich sind nicht alle geforderten Prozeßausgänge dargestellt, so daß sich hier ebenfalls noch Erweiterungsbedarf ergibt.

Nachdem durchgängig physikalische Modelle für die im Abbildungsumfang geforderten Größen heute noch nicht verfügbar sind und zusätzlich meist weit von der erforderlichen Rechengeschwindigkeit entfernt sind, wurde diesbezüglich hier keine Bewertung durchgeführt.

Die Auswertung der Einordnung der Anforderungen aus der Applikation zeigt den Bedarf, die gute Handhabbarkeit empirischer Ansätze zu erhalten, während ein geringer Detaillierungsgrad gegenüber physikalisch motivierten Modellen akzeptabel wäre. Eine ausreichend gute Abbildung aller interessierenden Ausgangsgrößen inklusive richtig wiedergegebener dynamischer Effekte im erforderlichen Betriebs-

bereich ist dabei vorauszusetzen. Gegenüber dem Großteil der bekannten Modellierungsansätze werden Erweiterungen in diesen Bereichen benötigt, was somit einen neuen Ansatz rechtfertigt.

Der Fokus auf das Kriterium Detaillierungsgrad in Abbildung 4-7 zeigt zunächst, daß ein Zusammenhang zwischen Modellierungsmethode, abbildbaren dynamischen Effekten, möglichen Variationen und der Handhabbarkeit besteht. So kann bei einem geringeren Detaillierungsgrad meist eine für Applikateure gute Handhabbarkeit dargestellt werden, die sich in höherer Rechengeschwindigkeit und einfacherer Parametrierung zeigt. Häufig werden hierfür auf Messdaten basierte, empirische Modelle verwendet. Auf der anderen Seite ist beispielsweise für Konstruktionsoptimierungen eine hohe Detaillierung auf das jeweilige Bauteil und seine Umgebungsvariablen (wie Temperatur, Druck) erforderlich. Da zu diesem Zeitpunkt der Entwicklung selten Prototypen und somit Messdaten zur Verfügung stehen, kommen hierfür nur generell physikalische Modelle in Frage. Eine entsprechende aufwendige Parametrierung und lange Rechenzeit wird in Ermangelung von Alternativen in dieser Phase in Kauf genommen.

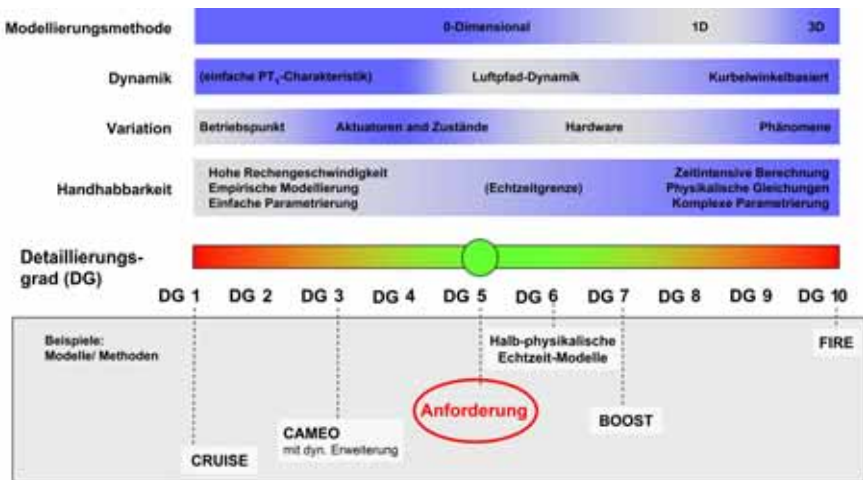


Abbildung 4-7: Vergleich von Ansätzen im Kriterium Detaillierungsgrad

Mit dem Fortschritt im Motorenentwicklungsprozeß verringert sich der Detaillierungsgrad in der Regel zunehmend, da auch die Freiheitsgrade durch festgelegte Randbedingungen abnehmen. Bei der Produktion des Motors sind schließlich Bauteile, Brennverfahren und Motorregelung soweit fixiert, daß der Fahrer ein hoch komplexes System allein über das Fahrpedal steuern kann und somit nur noch der Betriebspunkt bei gegebenen Umweltbedingungen veränderbar ist. Die benötigten Variationsmöglichkeiten nehmen also ebenfalls mit dem

Entwicklungsfortschritt ab, während die benötigte Abbildungsqualität und der Abbildungsumfang zunimmt, da die mit Abschätzungen in der Entwurfsphase beginnenden Applikationsparameter letztendlich genau auf das jeweilige Motor-Fahrzeug-Konzept passen müssen. Zwar sind Modelle mit geringem Detaillierungsgrad auch in der Entwurfsphase zum Beispiel für Potentialabschätzungen von Fahrleistungen einsetzbar, allerdings dann mit großen Einschränkungen bezüglich Abbildungsqualität und -umfang, was sie für die Verwendung in der Applikation ausschließt.

Aufgrund dieser Randbedingungen haben sich verschiedene Modellierungsstufen im Entwicklungsprozeß etabliert, die heute durch kommerzielle Softwareprodukte bedient werden. Als Beispiele sind in Abbildung 4-7 AVL-Produkte den jeweiligen Detaillierungsgraden zugeordnet. Bezogen auf die hier geforderten Kriterien besteht die Herausforderung somit darin, eine Modellarchitektur zu entwickeln, die mit mittlerem Detaillierungsgrad die vorhandenen dynamischen Effekte des Verbrennungsmotors in geeigneter Weise empirisch abbilden kann, während eine Hardwarevariation oder örtlich aufgelöste Modelle nicht erforderlich sind.

4.3 Konzept- und Architekturentwicklung

Der Vergleich der vorhandenen Modellierungsansätze mit den aus der Applikation geforderten Randbedingungen hat die Notwendigkeit eines neuen Konzeptes offenbart. Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung einer dynamischen Streckenbeschreibung des Verbrennungsmotors, die in den Applikationsprozessen einsetzbar ist und die diskutierten Anforderungen möglichst vollständig erfüllt.

4.3.1 Prozeßseparation nach dynamischen Haupteffekten

Empirische Verfahren zur Motormodellbildung werden für diesen Einsatzzweck aus schon gezeigten Gründen als am vielversprechendsten bewertet, wodurch die größte Herausforderung in der dynamischen richtigen Beschreibung des interessierenden motorischen Verhaltens liegt. Als Schlüsselmechanismus wird der Motorprozeß dazu in physikalisch orientierte Segmente der dynamischen Haupteffekte aufgeteilt, um einerseits die Komplexität abdecken und andererseits die einfache Verwendbarkeit darstellen zu können. Gegenüber physikalisch basierten Modellierungsansätzen können die Dynamikeigenschaften des Systems ohne komplexe Kombination von Differentialgleichungssystemen separiert werden. Abbildung 4-8 illustriert diesem Ansatz.

Die Vielfältigkeit dynamischer Effekte deutet die prinzipielle Schwierigkeit an, mehrere Phänomene des Motorprozesses mit einer einstufig empirischen Modellierung gemäß Abbildung 4-9 abzudecken. Darüber hinaus erfordert in diesem Fall die verwendete Modellierungsstufe die gesamte Abdeckung der hohen Eingangs-

raumdimensionalität in einem dynamischen Vektor. Ein mehrstufiger Ansatz erscheint daher attraktiver, um die jeweilige Modellkomplexität und die Dimension des Eingangsvektors zu verringern.

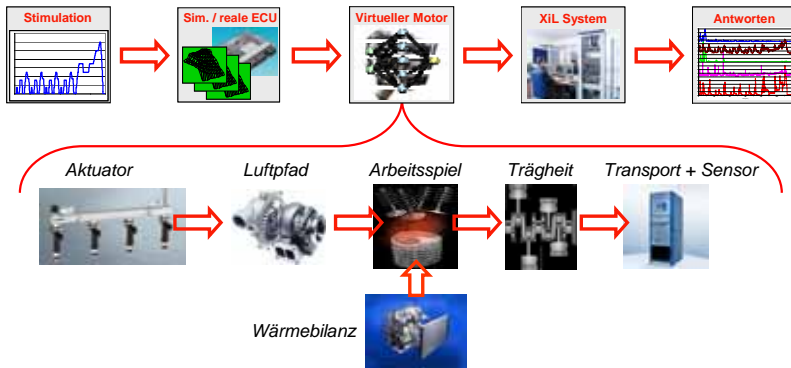


Abbildung 4-8: Motorprozesssegmente nach dynamischen Haupteffekten

Dem neuen Ansatz zugrunde liegt die Annahme, daß sich die in den gemessenen Prozeßausgängen sichtbare Dynamik durch Überlagerung verschiedener dynamischer Haupteffekte gemäß Abbildung 4-8 ergibt. Daher wird die Aktuatorndynamik und damit verbundene Effekte wie Lose und Hysterese ebenso vom eigentlichen Verbrennungsprozeß separiert, wie die durch Gasmassentransport und Ansprechverhalten bestimmte Sensordynamik. Die Bilanzgleichungen des Energieeintrages in die Wärmekapazitäten des Motors sowie die durch Massenträgheiten verursachten Verzögerungen im Drehmomentaufbau sollen ebenfalls durch eigene Module berücksichtigt werden. Der primär interessierende motorische Prozeß kann somit auf die Gas- (bzw. Füllungs-) und Arbeitsspieldynamik reduziert werden, wobei alle relevanten Wechselwirkungen abzudecken sind, siehe Abbildung 4-10.

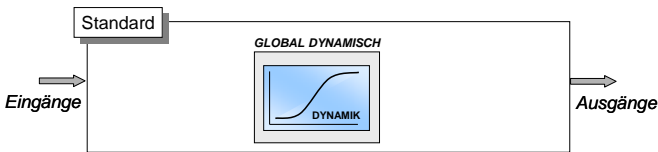


Abbildung 4-9: Einstufig empirischer Standardansatz

Die Verbrennung ist der wichtigste und theoretisch anspruchsvollste Teil im thermodynamischen Kreisprozeß einer Brennkraftmaschine. Die Ausgangsgrößen des Prozesses wie Drehmoment, Kraftstoffverbrauch, Abgaszusammensetzung etc. sind durch die Dynamik der turbulenten Gasströmung, des Molekulartransports sowie der chemischen Reaktionen bestimmt. Diese können aufgrund der hohen Komplexität derzeit im Detail noch nicht ausreichend analytisch beschrieben werden.

Auch die Erfassung der dafür notwendigen Meßdaten – besonders unter dynamischen Betriebsbedingungen – ist in vielen Fällen nicht möglich. Daher werden die Thermodynamik charakterisierende Kenngrößen verwendet (z.B. Kraftstoff-Luftverhältnis oder Schwerpunkt der Verbrennungslage), die den Verbrennungsprozeß makroskopisch beschreiben und eine einfachere meßtechnische Erfassung sowie schnellere Verarbeitung erlauben.

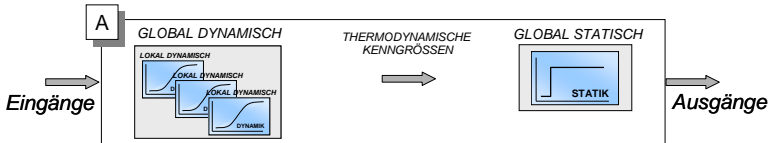


Abbildung 4-10: Zweistufiger empirischer Ansatz zur Trennung von Gas- und Arbeitsspieldynamik des Verbrennungsprozesses

Mit der Verwendung thermodynamischer Kenngrößen als Zwischengrößen der beiden separierten Prozeßsegmente Gas- und Arbeitsspieldynamik dieses neuartigen Modellierungsansatzes ist wiederum eine Koppelung darstellbar, die dynamisch wie global anwendbar ist. Die Idee hinter der Architektur ist die Annahme, daß in dem Fall, daß der Verbrennungsprozeß vollständig durch die thermodynamischen Kenngrößen beschrieben werden kann, die erforderlichen Ausgangsgrößen ebenfalls durch diese Kenngrößen bestimmt werden können. Betrachtet man zusätzlich einen einzelnen Verbrennungszyklus als diskretes Ereignis, dann kann für den Zusammenhang zwischen Kenngrößen und Prozeßausgängen ein statisches Mittelwertmodell angesetzt werden.

4.3.2 Dynamikseparation nach physikalischen Haupteffekten

Unter Verwendung der verschiedenen XiL-Entwicklungsumgebungen werden dem Modellsegment zur Darstellung der Gasdynamik innerhalb des Motormodells die dynamischen (und verstellbaren) Stellgrößen der Motorregelung als Eingang zugeführt, Abbildung 4-8. Diese sind auch nach ihrer jeweiligen Dynamikkompensation als stark nichtlinear zu den thermodynamischen Kenngrößen einzustufen. Um die hochkomplexen Nichtlinearitäten dieses Prozesses zu vereinfachen, ist es sinnvoll, den Prozeß in weitere Segmente aufzuspalten, die die physikalischen Haupteffekte repräsentieren. Durch die Aufteilung des gesamten Betriebsbereiches in kleinere, eingegrenzte Drehzahl-Last-Bereiche (lokale Bereichsmodelle) können die dominierenden Einflüsse auf die Dynamik und Größenordnung der Prozeßausgänge gegenüber weiteren Einflüssen relativiert werden. Dies erhöht die Empfindlichkeit des gesamten Modells auf lokale Brennverfahrensänderungen und erlaubt die Berücksichtigung lokal unterschiedlicher Dynamik. Zusätzlich können so betriebspunktabhängige Fahrbarkeitsgrenzen des Motors wie Bauteilschutz oder

Verbrennungsstabilität besser berücksichtigt werden. Die lokalen Bereichsmodelle werden mit einem in diesem Zusammenhang neu entwickelten Verfahren zu einer global wirksamen Struktur zusammengeführt, wobei als Partitionierung Drehzahl und Last verwendet werden.

4.3.3 Erweiterte Dynamikseparation

Die Verwendung einer Struktur mit nochmals differenzierten Prozeßsegmenten kann weitere Möglichkeiten der Reduktion in der Komplexität der Modellierungsschritte eröffnen.

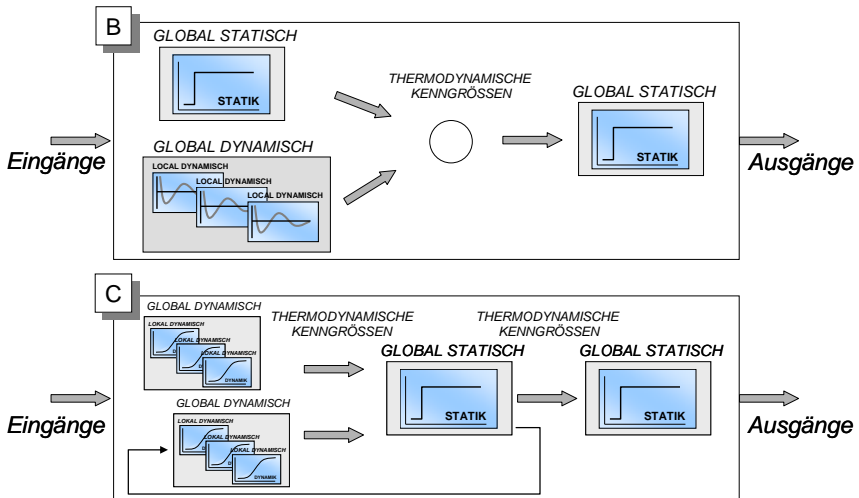


Abbildung 4-11: Mehrstufig empirische Ansätze zur erweiterten Differenzierung von dynamischen Effekten

Eine Trennung nach durch Einspritz- und Luftpfad-Aktuatorik verursachten Gasdynamikänderungen ist in verschiedenen Ausprägungen vorstellbar, Abbildung 4-11. Im Ansatz „B“ wird dabei auf einen stationären Zustand des Motors referenziert, der um die durch Einspritz- bzw. Luftpfadaktuatorik verursachte Gasdynamik in separaten Modellen kompensiert wird. Dies erlaubt eine deutliche Reduktion der jeweiligen Modelleingangsvektoren und erhöht zusätzlich die stationäre Genauigkeit des Gesamtansatzes. Im Ansatz „C“ dagegen wird mittels eines auf die Einspritzgestaltung bezogenen Referenzzustands die Gasdynamik auf die Einflüsse der Luftpfadaktuatorik reduziert, während der Einfluß der Einspritzung primär statisch berücksichtigt wird. Dies erlaubt ebenfalls eine Reduktion der Eingangsdimensionalität.

4.3.4 Ausgewähltes Modellierungskonzept

Aufgrund der in Abschnitt 6.3 beschriebenen Randbedingungen dieser Studie wurde der Fokus auf Ansatz „A“ gemäß Abbildung 4-10 gerichtet, da sich für die mehrstufigen Ansätze „B“ und „C“ eine geringere Robustheit bei niedrig dimensionalen Eingangsvektoren und eine somit nicht verbesserte Abbildungsqualität für die vorliegende Anzahl an Variationsparametern ergab (siehe auch Abschnitt 7.7). Das für diese Arbeit favorisierte Modellierungskonzept verwendet also einen zweistufig empirischen Ansatz, der die Trennung verschiedener dynamischer Effekte der Verbrennung über unterschiedliche Modellstrukturen realisiert und diese Segmente wieder über thermodynamische Kenngrößen verknüpft, Abbildung 4-12.

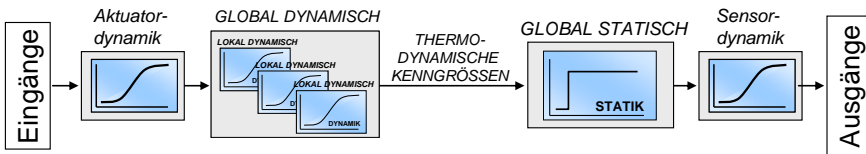


Abbildung 4-12: Ausgewählte Modellierungsarchitektur

Die eigentliche Verbrennung ist in einem global statischen Modell abgelegt, während die Gasdynamik über einen Verbund lokal dynamischer Bereichsmodelle realisiert wurde, die als Eingang die um ihre Eigendynamik kompensierten Aktuatoren der Motorregelung verwendet. Das Verhalten der Meßgeräte und Sensorik wird in einem separaten Block berücksichtigt, um Vergleichbarkeit zur Prüfstands-umgebung zu ermöglichen, ist aber vom Verbrennungsprozeß entkoppelt und für die Bearbeitung der Applikationsaufgaben nicht unbedingt erforderlich.

Trotz des empirischen Ansatzes ist mit der Einbindung thermodynamischer Kenngrößen eine physikalisch basierte und interpretierbare Ursache-Wirkungskette implementiert. Als zusätzlicher Vorteil dieser Struktur kann die Parametrierung des Verbrennungsprozesses über stationäre Messungen erfolgen, was speziell für die Identifikation des Emissionsverhaltens ein großer Vorteil ist.

5 Strategien zur System-Identifikation

Grundlagen der Modellbildung von Verbrennungsmotoren sind bereits in Abschnitt 3.3 vorgestellt. Im Folgenden sollen aus diesen generellen Möglichkeiten vor dem Hintergrund des in Abschnitt 4.3 vorgestellten Modellierungskonzepts anwendbare Ansätze selektiert und in einen durchgängigen Modellierungsprozeß überführt werden. Im Anschluß wird ein Verfahren zur Selektion der benötigten thermodynamischen Kenngrößen entwickelt.

5.1 Modellierungsprozeß

Aufgrund des komplexen Systemverhaltens ist ein strukturiertes Vorgehen im Modellierungsprozeß schon aus ökonomischen Gründen unerläßlich. Dieser kann dazu in verschiedene Schritte unterteilt werden, siehe Abbildung 5-1.

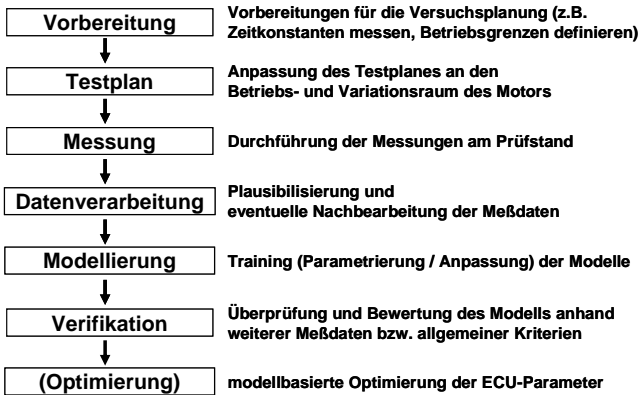


Abbildung 5-1: Generelle Schritte im Modellierungsprozeß

Nach Festlegung der Randbedingungen sowie des Betriebs- und Variationsraums des Motormodells, was durch entsprechende Vortests wie grobe Ermittlung der jeweiligen Zeitkonstanten oder eine Definition der Fahrbarkeitsgrenzen unterstützt werden kann, ist die Versuchsplanung die erste große Stufe im Modellierungsprozeß.

Die hohe Dimensionalität des Betriebs- und Variationsraums sowie die mit der Prüfdauer verbundenen hohen Kosten eines Prüfstandes erfordern eine minimierte Anzahl mit möglichst optimal verteilter Lage an Messungen, die alle notwendigen Informationen zur Identifikation des jeweiligen System enthalten. Für den dynamischen Fall sind zusätzlich zur Frequenzanregung geeignete Testsignale zu definieren und parametrieren. Die Qualität der Versuchsplanung ist daher entscheidend

für die erreichbare Abbildungsqualität des Modells und somit der anschließenden Optimierung. Gemäß der Auftrennung dynamischer Effekte des Motors nach Prozeßsegmenten aus Abschnitt 4.3, sind die einzelnen Module separat unter verschiedenen Randbedingungen zu identifizieren. Um Synergien der jeweiligen Identifikationsprozeduren zu nutzen, empfiehlt sich eine definierte Reihenfolge.

Die zur Modellparametergewinnung notwendigen Messungen am Prüfstand sollten nach Möglichkeit soweit automatisierbar sein, daß sie sich gemäß dem Anforderungskriterium Handhabbarkeit (vgl. Abschnitt 4.2.1.6) in Randzeiten des Prüffeldbetriebes durchführen lassen. So sind neben den zur Modellbildung ohnehin hohen Anforderungen an ein Prüffeld auch solche an das Automatisierungssystem und eine entsprechende Überwachungsstrategie zu stellen.

Schon bei globalen statischen Modellen, aber besonders bei dynamischen Modellen ist der Umfang der Meßdaten erheblich und ohne leistungsstarke Nachverarbeitung z.B. zur Plausibilisierung nicht zu bewältigen. Eine „online“ Überwachung wichtiger Größen am Prüfstand beispielsweise auf Meßgerätefehler kann hier bereits deutliche Fortschritte erreichen, weitere standardisierte „offline“ Auswerterroutinen wie gegenseitige Meßwertplausibilisierung von Prüfstand und Motorregelung verringern das Risiko, eine schlechte Abbildungsqualität auf das Modellierungsverfahren zurückzuführen. Aufgrund der hohen benötigten Abtastfrequenz bei dynamischen Messungen sind häufig nicht alle gewünschten Größen direkt aufzeichenbar oder berechenbar, weshalb entsprechende Nachbearbeitungsprogramme die Möglichkeit zur Berechnung zusätzlicher Kanäle mit dieser Datenfülle bieten müssen.

Ein weiterer sehr wesentlicher Schritt ist die Modellbildung selbst. Die Vielzahl der Möglichkeiten zur mathematischen Approximation realer Prozesse über unterschiedliche Modellstrukturen ist in Abschnitt 3.3.2 dargestellt. Während Verfahren für statisch lokale Modelle Stand der Technik sind, müssen globale wie dynamische Verfahren als prototypenhaft angesehen werden und stellen daher hier die größte Herausforderung dar. Obwohl die mathematische Struktur und Parametrierung des Approximators für diese Arbeit nicht im Vordergrund stehen sollen, ist eine Potentialbewertung unterschiedlicher Möglichkeiten unvermeidbar, um den bestmöglichen Kompromiß zwischen Abbildungsqualität und Handhabbarkeit zu erreichen. Aufgrund der gewählten Modellarchitektur des neuen Ansatzes muß die Kombination der verschiedenen Modellteile der separierten Prozeßsegmente zu einem echtzeitfähigen Motormodell als zusätzliche Herausforderung angesehen werden. Dies stellt für die Implementierung in XiL-Entwicklungsumgebungen einen nicht unwesentlichen Aufwand dar, wobei das wissenschaftliche Interesse eher auf den Konzeptnachweis des eigentlichen Motormodells fokussiert ist.

Dementsprechend ist die Validierung dieses Ansatzes vielfältig und muß bereits in der Versuchsplanung sorgfältig berücksichtigt werden. Während jeder Modellteil zunächst individuell verifiziert werden muß, kann das Zusammenspiel der

einzelnen Teile nur integral bewertet werden, was letztlich die Validierung dieses Ansatzes ausmachen wird. Hierzu sind charakteristische Messungen notwendig, die eine Bewertung in den geforderten Kriterien aus Abschnitt 4.2 zulassen sollen. Weiterhin ist eine Definition mittels einer Auswahl von bekannten oder noch zu entwickelnden Fehlermaßen zur Abbildungsqualitätsbewertung speziell für dynamische Modelle notwendig.

Obwohl die Optimierung nicht Umfang dieser Arbeit sein soll, so ist sie doch als Anwendungsfall zu berücksichtigen und die Möglichkeit einer Optimierung mittels des vorgeschlagenen Konzeptes zu überprüfen.

5.2 Identifikationsstrategie und Modellierungsverfahren

Auch wenn im Modellierungsprozeß Identifikationsstrategie und Modellierungsverfahren voneinander separiert sind, besteht doch inhaltlich eine nicht trennbare Verbindung. Einen ausschlaggebenden Einfluß auf deren Wahl hat das grundsätzliche Vorwissen über den zu identifizierenden realen Prozeß und die Möglichkeiten in der Anregung und Messung der beteiligten Ein- und Ausgangsgrößen. So kann die Vorgehensweise in Struktur- und Parameteridentifikation unterschieden werden, wobei die Struktur dem Systemverhalten möglichst optimal angepaßt sein sollte und meist auch die Wahl des Approximators einschränkt.

Im Folgenden sollen für die gemäß Modellierungskonzept separierten Prozeßsegmente aus Abschnitt 4.3 Identifikationsmethoden und Modellierungsansätze selektiert werden.

5.2.1 Aktuator- und Sensordynamik Identifikation

Zur Identifikation der Aktuator- und Sensordynamik ist zunächst eine Unterscheidung in verschiedene Klassen je nach System notwendig, die unterschiedliche Strukturen erfordern. Die physikalisch wirksamen Effekte sind in der Regel bekannt, weshalb die Struktur hier sehr genau gewählt und abgebildet werden kann. Das aus der Trägheit des betrachteten Systems resultierende dynamische Verhalten kann dabei meist in Transportverzögerung und Ansprechverhalten differenziert werden, also in Totzeit- und Übertragungsfunktion getrennt werden. In vielen Fällen handelt es sich um Übertragungsverhalten ohne wirksame Stationärverstärkung.

5.2.1.1 Aktuatorik

Die Aktuatordynamik ergibt sich durch die physische Reaktion des Aktuators auf die gewünschte, meist elektronisch angesteuerte Stellgrößenänderung. Dabei kann in verschiedene Aktuatortypen unterschieden werden, zunächst im hier relevanten Falle des Verbrennungsmotors in Einspritz- und Luftpfadaktuatorik.

Der die Einspritzpfadaktuatorik betreffende Injektor, der Mengen bzw. Dauer und Start der Einspritzung umsetzt, kann als im nächsten Verbrennungszyklus unmittelbar wirksam charakterisiert werden, weshalb hierfür keine Dynamikkompensation und somit Identifikation notwendig ist, sofern von einem wie in diesem Falle gewünschten arbeitsspiel-gemittelten Modell ausgegangen wird. Anders sieht es für das den Raildruck bestimmende Hochdrucksystem aus, das schon allein wegen des Speicherverhaltens des Rails nicht zu vernachlässigen ist und daher mit einer closed-loop Regelung der Hochdruckpumpe innerhalb der Motorregelung bedient wird. Aufgrund des wenig kompressiblen Kraftstoffs und der vergleichsweise kleinen Volumina der Zu- und Ableitungen ist das System relativ einfach zu identifizieren und mittels der schnellen Istwerterfassung des Raildrucksensors durch eine übliche PI-Regelung auch gut kontrollierbar. Der im realen System nicht auftrennbare Regelkreis ist aber nur über Sollwertsprünge des Raildrucks im closed-loop Zustand zu stimulieren, wobei die Dynamik aufgrund des Massendurchsatzes je nach Betriebspunkt unterschiedlich erwartet wird. Da physikalische Eigenschaften des Systems, hauptsächlich geometrische Abmessungen betreffend, meist in der Praxis nicht verfügbar sind, wird trotz der physikalisch bekannten Effekte und Wirkweisen in diesem Falle die Identifikation über ein empirisch dynamisches Modell favorisiert, das als Eingänge Drehzahl, Last und Soll-Raildruck verwenden und als Ausgang den Ist-Raildruck beschreibt.

Für die Luftpfadaktuatorik kann zunächst in elektrisch oder pneumatisch betätigte Steller unterschieden werden. Im elektrischen Fall ist praktisch keine Totzeit vorhanden, das Ansprechverhalten der in diesem Falle häufig positionsgeregelten Aktuatoren muß allerdings individuell betrachtet werden. Während viele AGR-Ventile oder VTG-Steller kaum merkbares Ansprechverhalten aufweisen und daher keine Dynamikkompensation benötigen, ist beispielsweise die Aktuatordynamik der Drosselklappe meistens nicht mehr vernachlässigbar. Das Übertragungsverhalten kann aber vergleichsweise einfach experimentell identifiziert werden. Deutlich schwieriger zu handhaben sind allerdings pneumatische Systeme, die heute noch wegen ihrer höheren Robustheit und potentiell höheren Betätigungskraft verwendet werden, sowie deutlich kostengünstiger sind. Sie weisen geringes Totzeitverhalten auf, haben meist mit Hystereseeffekten behaftetes, ausgeprägtes Ansprechverhalten und besitzen selten eine Positionsrückmeldung, weshalb eine umfangreiche Identifikation notwendig ist. Methoden hierzu wurden beispielsweise von Boja [16] vorgestellt, sollen aber hier nicht näher vertieft werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß für die Identifikation der Aktuatorik mit den Randbedingungen dieser Arbeit (siehe auch Kapitel 6) primär das closed-loop druckgeregelter Rail herausfordernd ist, wofür eine experimentelle Identifikation vorgeschlagen wird.

5.2.1.2 Sensorik

Da die heute in modernen Prüffeldern verwendete Sensorik noch wesentlich vielfältiger als die bereits diskutierte Motoraktuatorik ist, kann hier nur auf entscheidende Systeme eingegangen werden. Vorteilhaft erweist sich zudem das ausgangsgrößen-bestimmende Verbrennungsmodell aufgrund des gewählten Modellierungskonzepts mit stationären Messungen identifizieren zu können (siehe Abschnitt 4.3.4). Die Sensordynamikidentifikation ist daher in diesem Falle primär für die dynamische Verifikation gegenüber dem realen System interessant, in der Anwendung für Applikationsaufgaben aber kaum relevant.

Für die notwendige Stimulation der Sensorik der Motorregelung zur Betriebszustandserfassung selbst kommen primär Druck- und Temperatursensoren zum Einsatz. Während in der Druckerfassung kaum nachweisbare Totzeiten und praktisch kein Ansprechverhalten zu beobachten ist, sind die gemessenen Temperaturverläufe ganz wesentlich vom Ansprechverhalten des Sensors geprägt, das wiederum mit einer Stationärverstärkung von 1 (Formel 5-1), aber massenstromabhängigem Ansprechverhalten angenommen werden kann (Formel 5-2).

Formel 5-1:
$$\lim_{s \rightarrow 0} G(s) = 1$$

Formel 5-2:
$$G(s) = \frac{a}{s+a} \quad a = \frac{1}{T}, \quad T(t) = K\dot{m} + d$$

In Formel 5-2 stellt a also eine variable Zeitkonstante in Abhängigkeit vom Massenstrom \dot{m} dar. Für den zeitdiskreten Fall ergibt sich Formel 5-3.

Formel 5-3:
$$G(z) = \frac{1}{1 - e^{-aT_s} z^{-1}}$$

Für eine beliebige Übertragungsfunktion gemäß Formel 5-4 können die Koeffizienten a_i als Funktionen (Polynomansatz) vom Massenstrom angegeben werden, Formel 5-5. Für ein PT₁-Glied ist damit direkt die Abhängigkeit der Polstelle vom Massenstrom ersichtlich, Formel 5-6. Bei höherer Systemordnung erhält man variable Koeffizienten aus denen sich die Wurzeln (Pole) der Übertragungsfunktion bestimmen lassen.

Formel 5-4:
$$G(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}}$$

Formel 5-5:
$$a_i = d + K_1 \dot{m} + K_2 \dot{m}^2 + \dots + K_p \dot{m}^p$$

Formel 5-6:
$$a_1 = -e^{-aT_s}$$

Man erhält bei angenommener Dynamik zweiter Ordnung ($n=2$) die Differenzgleichung gemäß Formel 5-7. Mit Formel 5-8 erhält man umgeformt Formel 5-9.

Da diese Gleichung linear in den Parametern ist, können die Parameter θ_1 bis θ_6 einfach mittels Least Squares bestimmt werden.

Formel 5-7:
$$y(k) = -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) + (1 + a_1 + a_2) u(k-1)$$

Formel 5-8:
$$a_1 = \theta_1 + \theta_2 \dot{m} + \theta_3 \dot{m}^2; \quad a_2 = \theta_4 + \theta_5 \dot{m} + \theta_6 \dot{m}^2$$

Formel 5-9:
$$\begin{aligned} y(k) - u(k-1) = & -\theta_1 [(y(k-1) - u(k-1)) - \theta_2 \dot{m} [(y(k-1) - u(k-1))] \\ & - \theta_3 \dot{m}^2 [(y(k-1) - u(k-1))] - \theta_4 [(y(k-2) - u(k-1))] \\ & - \theta_5 \dot{m} [(y(k-2) - u(k-1))] - \theta_6 \dot{m}^2 [(y(k-2) - u(k-1))] \end{aligned}$$

Wegen Formel 5-1 gilt die Nebenbedingung:

$$G(z=1) = 1 \Rightarrow \text{Summe (Zählerkoeffizienten)} = \text{Summe (Nennerkoeffizienten)}$$

Anhand einer von Combé entwickelten Methode zur Kompensation der Dynamik der Abgasanalysatoren (vgl. Abschnitt 3.4.1.1) können lineare Übertragungsfunktionen zweiter Ordnung mit einer vom Massenstrom abhängigen Totzeit für die Abgaskomponenten parametrisiert werden. Zur Anregung des Systems mit Sprungsignalen wird eine Anlage zur Gaseindüsung verwendet, die den Vorteil eines robusten Eingangssignals ohne motorische Schwankungen oder Dynamik auf die Sprungantworten der Meßgeräte bietet. Während die Ursache der Totzeit im Wesentlichen auf die Dauer des Gastransportes von der Entstehung im Zylinder zum Analysator zurückzuführen ist, verhält sich das Signalanstiegsverhalten unabhängig vom Abgasmassenstrom in allen Betriebssituationen gleich. Über Parameterschätzungen mit einem Verzögerungsglied 2. Ordnung können gute Abbildungsqualitäten der Sprungantworten des Gesamtsystems erreicht werden.

Eine ebenfalls in diesem Zusammenhang wichtige Meßkette ist die des Indiziersystems (vgl. Abschnitt 3.4.1.2). Ähnlich der dynamischen Charakteristik des Injektors kann aber auch hier davon ausgegangen werden, daß die gemessenen oder berechneten Werte des aktuellen Verbrennungszyklus unmittelbar (in Echtzeit) verfügbar sind, weshalb hierfür keine Dynamikkompensation oder Identifikation notwendig ist.

Zusammengefaßt für die Sensorik kann festgehalten werden, daß die dynamische Kompensation überhaupt nur der Vergleichbarkeit zur Prüfstands Umgebung dient und für die eigentliche Anwendung dieses Motormodells kaum Relevanz besitzt, da hier die möglichst zeitlich unverzögerten Signale an der jeweiligen Meßposition interessant sind. Für die unterschiedlichen Systeme kommen verschiedene Methoden zum Einsatz, wobei die jeweils physikalisch basierten Strukturen mittels experimenteller Daten an das reale System approximiert werden.

5.2.2 Identifikation statisches Verbrennungsmodell

Die Identifikation des motorischen Verbrennungsprozesses unter stationären Bedingungen in lokalen Betriebsbereichen kann heute als Stand der Technik bezeichnet werden, [12] [27] [46]. Eine früher hierzu übliche Kennfeld-Rastervermessung ist bei der großen Zahl an Variationsparametern zeitlich nicht mehr durchführbar, weshalb hauptsächlich Methoden des Design of Experiments (DoE) mit algebraischen Polynommodellen eingesetzt werden. Grundlagen dieser statistischen Versuchsplanung wurden in Abschnitt 3.3.3 eingeführt. Nachdem für diese Anwendung allerdings ein globales, also im gesamten Betriebsbereich gültiges Modell gefordert ist, für welche der Reifegrad noch nicht so hoch ist, und zusätzlich die hier gegebenen Randbedingungen aus der gewählten Modellarchitektur berücksichtigt werden müssen, sind verfügbare Methoden zu untersuchen und entsprechend zu bewerten.

5.2.2.1 Theoretische Versuchsplanung

Zunächst sind die durch die Architektur des Modellierungskonzeptes vorgegebenen Ein- und Ausgangsgrößen näher zu betrachten. Während die Ausgangsgrößen durch die Anforderungen an das Motormodell vorgegeben sind, können die als thermodynamische Kenngrößen titulierten Eingänge als zu diesem Zeitpunkt noch nicht festgelegt gesehen werden. Es steht aber fest, daß zum einen diese Kenngrößen nicht direkt verstellbar sein werden, sondern nur über die Aktuatoren der Motorregelung beeinflusst werden können. Zum anderen kann der zugrunde liegende Prozeß im Detail als nicht mit Sicherheit bekannt bewertet werden, womit eine an die expliziten thermodynamischen Phänomene angelehnte Modellierungsstruktur nicht möglich erscheint. Der zu wählende Approximator muß also in der Lage sein, sich an dieses Black-box-Verhalten ausreichend genau anzunähern. Dazu kommen als bekannte Verfahren die Polynommodelle und künstlich neuronale Netze in Frage, weswegen die Identifikationsstrategie so ausgelegt sein sollte, daß die Leistungsfähigkeit beider Verfahren überprüft werden kann.

Die in Kapitel 6 definierten Versuchs- und Randbedingungen werden den Betriebsbereich des gesamten Motormodells begrenzen, wobei der für diesen Modellteil interessante Variationsraum dadurch vorgegeben werden wird. Dies kann durch einen ausgewählten Drehzahl-Last-Bereich sowie eine relevante Stellbreite der ECU Aktuatoren erfolgen, wobei lokale Fahrbarkeitsgrenzen berücksichtigt werden müssen. Dies wiederum erfordert eine sogenannte Hüllenbestimmung, die ein Überschreiten von Schädigungsgrenzen, wie Spitzendruck, Bauteiltemperaturen, Turboladerdrehzahl oder exzessive Rußbildung verhindern bzw. eine stabile Verbrennung garantieren soll. Eine übliche Methode ist das sternförmige Abfahren des lokalen Versuchsraums in vorgegebenen Schritten oder langsam kontinuierlich bis zum eventuellen Erreichen der Grenzwerte, wodurch dann innerhalb dieser Hülle eine mittels DoE unterstützte Versuchsplanung möglich wäre. Eine weitere Methode, das sogenannte „Online Screening“, erlaubt eine Versuchsplanung nur

aufgrund der gewünschten Variationsgrenzen und überwacht während der jeweiligen Messung die parametrisierten Fahrbarkeitsgrenzen. Im Falle einer Grenzwertüberschreitung kann der letzte Schritt vor der Überschreitung als neuer Meßpunkt verwendet werden, das DoE Design wird automatisch an die neuen Bedingungen adaptiert. Somit ist eine effizientere Identifikation möglich, allerdings bedingt diese Methode eine auf Betriebspunkte ausgerichtete Versuchsplanung, da Fahrbarkeitsgrenzen nicht als Funktion weiterer Parameter, wie beispielsweise Drehzahl in dem verwendeten Automatisierungsprogramm abgelegt werden können. Ein weiterer Vorteil lokaler Versuchspläne ist die mit zunehmenden Dimensionen schwierigere Hüllenabstastung und -berechnung, da die möglichen Parameterkombinationen exponentiell ansteigen und auch eine erfahrungsbasierte Plausibilisierung zunehmend schwieriger wird. Für die eigentliche Identifikation des globalen Modells allerdings scheint eine globale Versuchsplanung aufgrund der besseren Interaktionsabdeckung der Variationsparameter attraktiver. Im Rahmen dieser Arbeit werden deshalb sowohl lokale wie globale Methoden der Versuchsplanung untersucht.

5.2.2.2 **Verfügbare Approximatoren**

Als mögliche Approximatoren eines global statischen Modells für unbekannte Prozesse kommen grundsätzlich mehrere Ansätze in Frage, vergleiche Abschnitt 3.3.2.1. Aufgrund der vorhandenen Erfahrung und Verfügbarkeit entsprechend implementierter Algorithmen ist die Auswahl im Rahmen dieser Arbeit auf drei Ansätze beschränkt, welche im Folgenden näher vorgestellt werden sollen. Die auf Polynomansätzen beruhenden, sogenannten Free Poly Models (FPM) können in der Applikation als etabliert eingestuft werden, für globale Modelle wird eine womöglich nicht ausreichende Flexibilität für die stark nichtlinearen motorischen Effekte erwartet. Zwei Ansätze aus dem Bereich der künstlich neuronalen Netze dagegen bieten diesbezüglich erweiterte Flexibilität, verlangen aber auch tiefergehende Kenntnis und Erfahrung mit dem zur Identifikation notwendigen Trainingsprozeß der Approximatorstruktur.

Die unter dem Namen LOLIMOT (LOcal LInear MOdel Tree) von der TU Darmstadt eingeführte Methode [46] vom Typ Fast Neural Networks (FNN) basiert auf der Idee, eine nichtlineare Funktion aus mehreren stückweise linearen Teilmodellen zu approximieren, deren Gültigkeit im Eingangsraum durch Gewichtungsfunktionen (normierte Gaußsche Glockenfunktionen) bestimmt wird. Der Ausgang eines LOLIMOT-Netzes mit M Teilmodellen und n Eingängen ergibt sich als gewichteter Mittelwert gemäß , wobei w_{0i} bis w_{ni} die Parameter des i -ten linearen Teilmodells, x_i bis x_{ni} die Eingangsgrößen und Φ_i die normierten Gaußschen Glockenfunktionen des i -ten Teilmodells sind. Der Wert der Gewichtungsfunktion Φ_i wird durch die Lage der Zentrumskoordinaten c_j und den Standardabweichungen σ_j aller Teilmodelle bestimmt, vergleiche Formel 5-11.

Formel 5-10

$$y = \sum_{i=1}^M (w_{0i} + w_{1i} \cdot x_1 + \dots + w_{ni} \cdot x_n) \cdot \Phi_i(x, c_i, \sigma_i)$$

Formel 5-11:

$$\Phi_i(x, c_i, \sigma_i) = \frac{z_i}{\sum_{j=1}^M z_j}, z_j = \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{(x_1 - c_{1j})^2}{\sigma_{1j}^2} + \frac{(x_2 - c_{2j})^2}{\sigma_{2j}^2} \right) + \dots + \frac{(x_n - c_{nj})^2}{\sigma_{nj}^2} \right)$$

Da durch die Normierung die Summe der Modellzugehörigkeiten an jedem Punkt des Eingangsraums gleich eins ist, bleibt das Gesamtmodell über gewichtete lineare Teilmodelle interpretierbar. Der LOLIMOT-Algorithmus besteht im wesentlichen aus einer äußeren Schleife, welche die Struktur, d.h. die Bereiche, in denen die linearen Teilmodelle liegen sollen, bestimmt (Strukturoptimierung), und einer inneren Schleife, in welcher die Parameter der linearen Teilmodelle geschätzt werden (Parameteroptimierung), Abbildung 5-2 links.

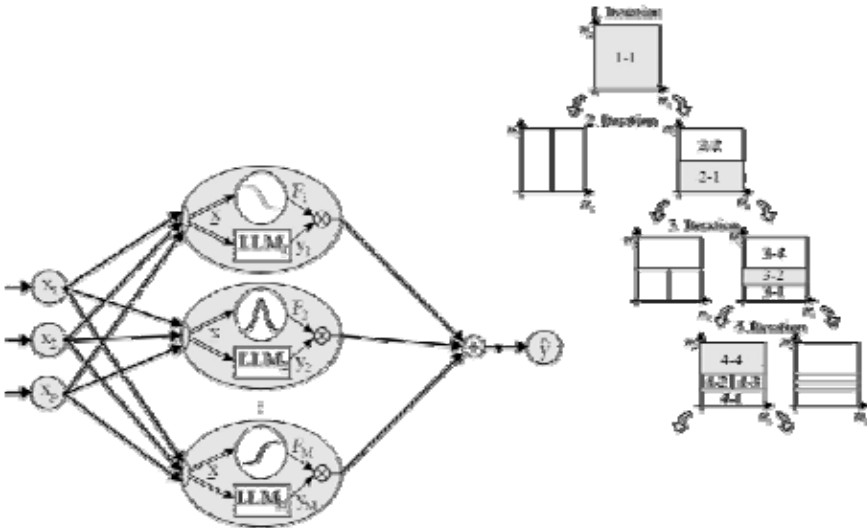


Abbildung 5-2: Struktur und Baumalgorithmus des LOLIMOT-Ansatzes [84]

Ein Baum-Konstruktionsalgorithmus teilt den Eingangsraum in Teilräume (Hyperquader) auf, denen jeweils ein lokales, lineares Modell und eine Gewichtungsfunktion zugeordnet sind. Das Zentrum c der Gewichtungsfunktion wird in die Mitte des Hyperquaders plaziert. Die Standardabweichungen werden in jeder Raumrichtung proportional zur Ausdehnung des Hyperquaders gewählt. Ausgehend von einem ersten Gesamtmodell wird in jeder Iteration das schlechteste Teilmodell in zwei Unterräume geteilt, Abbildung 5-2 rechts. Hierzu wird eine Teilung dieses

Modells in alle Raumrichtungen getestet. Für die sich dabei ergebenden Teilräume werden mittels der Parameteroptimierung lineare Modelle geschätzt und anschließend die Teilung mit der größten Verbesserung ausgewählt. Die Parameter der lokalen, linearen Modelle können separat für jedes Teilmodell durch die Least-Squares Methode geschätzt werden, da der zu minimierende Gleichungsfehler linear in den Parametern ist. [84]

Als Erweiterung bzw. Verbesserung des LOLIMOT Ansatzes kann der von Keuth vorgestellte Ansatz der Intelligenen Neuronalen Netze (INN) verstanden werden [52]. Aufgrund der schon thematisierten Notwendigkeit, die Anzahl der Messpunkte möglichst gering zu halten, ist der INN-Ansatz für eine sehr geringe Anzahl an lokalen Modellen ausgelegt. Dies wird über eine effizientere Platzierung der Teilmodelle erreicht, so daß die wesentliche Verbesserung dieses Algorithmus in der Art und Weise wie das Zentrum neuer lokaler Modelle gewählt wird und wie die Größe und Ausrichtung der lokalen Modelle bestimmt werden, besteht. Hierbei wird vor allem auf die statistische Relevanz der Modelle und die Robustheit der Parameterschätzung Rücksicht genommen. Lokale Modelle werden nur so lange vergrößert, solange ihre Modellstruktur zur Struktur der Zielfunktion paßt, mit Einbeziehung der Statistik wird auch im Besonderen auf das Meßrauschen Rücksicht genommen. Durch Optimierung des Vorhersagefehlers des Modells wird die Generalisierungsfähigkeit der Modelle verbessert und Überanpassung des Modells wird vermieden. Die Regularisierungsparameter sind so gewählt, daß man den Verlauf des Trainings sehr genau steuern kann und damit auch das Verhalten des Endmodells. [53]

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Leistungsfähigkeit der hier vorgestellten Approximatoren verglichen und dementsprechend der vielversprechendste Ansatz zur Modellbildung verwendet.

5.2.3 Identifikation Gasdynamik

Zur Identifikation der Gasdynamik des hier vorgestellten Modellierungskonzeptes ist ein global dynamisches Modell notwendig, das als Eingänge neben dem dem System von außen aufgeprägten Drehzahl nur Aktuatoren der Motorregelung verwenden soll. Die Ausgänge sind die jeweils noch festzulegenden thermodynamischen Kenngrößen zur Übergabe an das global statische Verbrennungsmodell und müssen als hochgradig nichtlinear zu den Eingangsgrößen betrachtet werden. Für die Identifikation der Gasdynamik ist eine passende dynamische Stimulation des Prozesses entscheidend, da sowohl alle relevanten Dynamiken bzw. Signalfrequenzen als auch die nötigen Amplituden zur Bestimmung des nichtlinearen Verhaltens abgedeckt werden müssen. Bei Verwendung mehrerer Eingänge gleichzeitig, muß zusätzlich ein ausreichend großer Eingangsraum unter Berücksichtigung von Fahrbarkeitsgrenzen oder anderer auftretender Grenzwerte sichergestellt werden. Während für statische Modellbildung bereits einige Produkte für verschiedene

Modellierungsalgorithmen und Methoden zur Versuchsplanung zur Verfügung stehen, sind Methoden zur global dynamischen Modellbildung noch im Prototypenstatus [40] [95], was tiefere Untersuchungen in dieser Arbeit bedingt.

5.2.3.1 Lokale Betriebsbereiche

Die Dynamik motorischer Effekte kann in erster Linie durch die für ein Arbeitspiel zur Verfügung stehende Zeit charakterisiert werden, die somit an die von außen aufgeprägte Drehzahl gekoppelt ist. Die Gasdynamik resultiert ebenfalls primär aus der mit der Drehzahl korrelierenden zyklischen Anregung des Luftpfadsystems und dem primär von der Drehzahl abhängigen Massendurchsatz. Bei Abgas-Turbomotoren kann zusätzlich ein starker Einfluß der Motorlast auf die Gasdynamik beobachtet werden, da die die Leistungscharakteristik des Turboladers beeinflussenden Größen, wie Gasdruck und -temperatur, eng an die pro Arbeitsspiel umgesetzte Energie gekoppelt sind.

Um die nichtlinearen Zusammenhänge des Systems besser abbilden zu können, ist es sinnvoll, dieses in die für die physikalischen Haupteffekte repräsentativen Segmente weiter aufzuspalten. Als neuer Ansatz der global dynamischen Modellbildung sollen daher hier durch die Verwendung eingegrenzter Betriebsbereiche in der Modellierung (lokale Bereichsmodelle) die dominierenden Einflüsse von Last und Drehzahl reduziert werden. So kann bei der Modellierung die Aktuatorempfindlichkeit und die Genauigkeit der Darstellung der Dynamik verbessert werden. Die notwendige dynamische Anregung des Systems mit ausreichend verteiltem Amplitudenspektrum ist bei mehreren Eingängen bzw. Variationsgrößen ebenfalls in lokalen Bereichen deutlich einfacher, da in diesen Bereichen eine gleichmäßig orthogonal verteilte Stimulation der Eingangsgrößen möglich ist, also die Variationsgrößen beliebig gegeneinander variiert werden können. Globale Versuchspläne dagegen müssen komplexe Randbedingungen berücksichtigen, wie beispielsweise die von der Drehzahl abhängige Einspritzdruck und -verlaufsgestaltung. Mit der Verwendung dieser Teilbereichsmodellierung können zusätzlich die betriebspunktabhängigen Fahrbarkeitsgrenzen in der Versuchsplanung und Vermessung besser berücksichtigt werden. Die Methode macht allerdings ein neuartiges Verfahren zur Koppelung der lokalen Bereichsmodelle zu einer global wirksamen Struktur notwendig, welches für die sogenannte Partitionierung des globalen Modells Last und Drehzahl verwendet.

5.2.3.2 Stimulationssignale

Zur dynamischen Identifikation nichtlinearer Single-Input-Single-Output (SISO) Systeme werden häufig APRB Signale benutzt, vgl. Abschnitt 3.3.3. Gegenüber anderen Stimulationssignaltypen wie beispielsweise Chirp Signalen besticht dieses Rechteck-Stimulationssignal durch einfach umzusetzende Ansteuerung mittels Automatisierungstechnik und übersichtlicher Versuchsplanung. Die Bandbreite

eines APRB Signals ist dabei durch seine minimale und maximale Haltezeit bestimmt, die wiederum aus der erwarteten Systemdynamik abgeleitet wird.

Auf der linken Seite von Abbildung 5-3 ist die relative Häufigkeit der diskreten Haltezeit eines typischen PRB Signals für einen Eingang dargestellt. In diesem Fall werden alle abgedeckten Frequenzen gleichmäßig verteilt angeregt. Für Systeme mit mehreren Eingängen führt die unbeschränkte Überlagerung einer entsprechenden Anzahl an (A)PRB Signalen zu einer Erhöhung der effektiven Bandbreite in der Anregung des Systems, wie auf der rechten Seite von Abbildung 5-3 exemplarisch für eine unbeschränkte Überlagerung von fünf Eingängen gezeigt ist. Die Anregung eines MISO Systems verlangt also eine durchschnittliche Gesamthaltezeit zwischen aufeinanderfolgenden Eingangssprüngen, wobei nur während dieser Zeitspanne das System einschwingen darf. Eine entsprechend abgestimmte Versuchsplanung auf die statistische Verteilung dieser Haltezeiten ist also unbedingt zu gewährleisten.

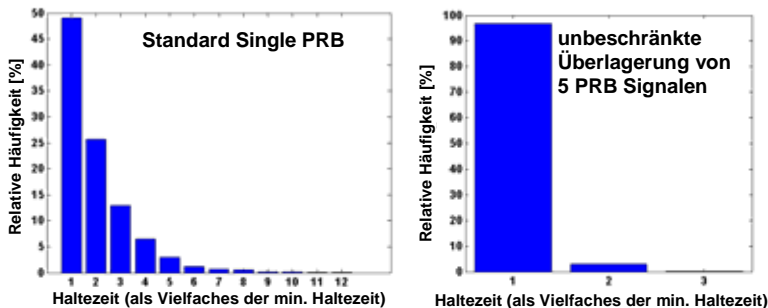


Abbildung 5-3: Relative Häufigkeit der Haltezeiten in PRB Signalen bei Einzel- und Mehrfachanregung

Die hier entwickelte Methode zur Sicherstellung einer richtigen Stimulation einzelner Eingänge bei mehreren Variationsgrößen basiert auf der mathematischen Vorschrift der minimalen und maximalen Haltezeiten unter Berücksichtigung der Interferenz aller Eingangssignale und der relativen Häufigkeit aller möglichen Haltezeiten. Dadurch wird die eigentlich zufällig verteilte Frequenzanregung des Eingangssignals zwar gegenüber einem regulären PRB Signal eingeschränkt, aber es ergibt sich die zusätzliche Freiheit in der beliebigen Wahl der Vielfachen der minimalen Haltezeit. Aufgrund früherer Untersuchungen und theoretischer Überlegungen wurde als minimale Haltezeit 0.1 Sekunde und als maximale Haltezeit 10 Sekunden festgelegt, womit für dieses Modellierungskonzept eine ausreichende Anregung aller relevanten Dynamiken des Systems vorausgesetzt wird, was allerdings noch durch die Verifikation dieses Ansatzes zu beweisen ist.

5.2.3.3 Dynamische Approximatoren

Da der Fokus dieser Arbeit nicht auf den mathematischen Eigenschaften des Approximators liegt, wurde die Auswahl dynamischer Approximatoren auf künstlich neuronale Netze mit externer Dynamik beschränkt, wovon die schon im statischen Teil vorgestellten Typen FNN und INN jeweils um Speicherelemente für vergangene externe Zustände dynamisch erweitert werden. Ein wesentlicher Vorteil dieser Approximatoren liegt in ihrer Fähigkeit, sich an hochkomplexe Probleme effektiv anzupassen und gleichzeitig durch die Verwendung von rückgekoppelten Ein- und Ausgängen die Dynamik zu berücksichtigen. Die Architektur eines dINN ist in Abbildung 5-4, links dargestellt: Bei einem nichtlinearen dynamischem System besteht jedes Teilmodell aus zwei Teilen: der Gültigkeitsfunktion Φ_i und den dazugehörigen Modellparametern, wobei der Eingangsvektor \tilde{x} der Gültigkeitsfunktion vom Eingangsvektor x des lokalen Modells LM_i verschieden sein kann. Bei dynamischen Modellansätzen beinhaltet der Regressorvektor typischerweise nur lokal lineare Strukturen. Gegenüber den dynamischen FNN erlaubt der Algorithmus der dynamischen INN achsenschräge Teilungen und damit eine deutlich effizientere Partitionierung wie beispielhaft in Abbildung 5-4, rechts dargestellt. Weitere Informationen können in [40] oder [49] nachgelesen werden.

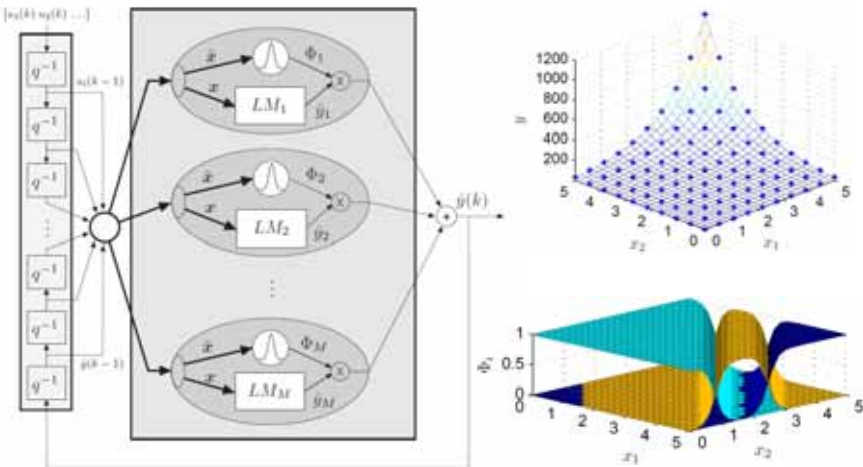


Abbildung 5-4: Struktur eines dynamisch intelligenten neuronalen Netzes, links; achsenschräge Teilung der Zugehörigkeitsfunktion, rechts unten für den gegebenen Funktionszusammenhang, rechts oben [40]

5.3 Prinzip der thermodynamischen Kenngrößen

Der Kern des in dieser Arbeit entwickelten Modellierungsansatzes besteht in der passenden Auswahl thermodynamischer Kenngrößen zur Sicherstellung einer physikalischbasierten Ursache-Wirkungskette unter Berücksichtigung von Randbedingungen empirischer Modellierungsverfahren. Hierfür müssen relevante Effekte untersucht und passende Kennwerte gefunden werden.

Oft sind allerdings prozeßausgangsbestimmende Parameter nicht direkt zugänglich oder sogar unbekannt aufgrund der hoch komplexen und gekoppelten Prozesse während der Verbrennung. Die Stickoxidbildung beispielsweise ist von der lokalen Verbrennungsspitzen temperatur abhängig, die einerseits fast unmöglich zu erfassen und andererseits nicht direkt zu steuern ist. Stellgrößen zur Prozeßsteuerung wie ECU-Aktuatoren verändern aber mehrere Brennverfahrenseigenschaften gleichzeitig, was eine isolierte Betrachtung dieser Ursache-Wirkungskette verhindert. Werden empirische Modelstrukturen zur Approximation dieser Effekte genutzt, sollte die Anzahl der Kenngrößen so gering wie möglich gehalten werden, um Überbestimmung zu verhindern und eine weite Modellgültigkeit zu erlauben. Da zusätzlich Kenngrößen abhängig von Prozeßausgang und verfügbarer Meßtechnik variieren können, ist eine Methodik zur Auswahl geeigneter Kenngrößen notwendig.

5.3.1 Qualifikationsverfahren

Ein gezieltes und strukturiertes Vorgehen für die Selektion der thermodynamischen Kenngrößen ist angesichts der vielen zu beachtenden Aspekte sinnvoll. Dabei kann die Vorgehensweise des hier eingeführten qualifizierenden Auswahlverfahrens zunächst in ausschließende und gewichtende Kriterien unterteilt werden, siehe Tabelle 5-1. Als eines der ausschließenden Kriterien sollen die Kenngrößen auf jeden Motor unabhängig von verwendeten Sensoren, Aktuatoren oder der Regelungsstrategie der ECU anwendbar sein. Außerdem sollen sie auf einem standardmäßig ausgestatteten Prüfstand meßbar oder in Echtzeit aus Meßdaten zu berechnen sein (z.B. Verbrennungsschwerpunkt aus Zylinderdruckverlauf berechnet). Schließlich soll die Meßstelle zur Charakterisierung der Verbrennung so nah wie möglich am Zylinder sein, um Störeinflüsse zu verhindern. Somit ist der Einsatz einer Zylinderdruckindizierung vorteilhaft, da die vorhandene Anzahl der aus der theoretischen Effektanalyse gewonnenen Kenngrößen begrenzt ist.

Für die noch zu definierenden gewichtenden Kriterien muß je ein Bewertungsschema und -maßstab gefunden werden, der einer Bewertungsmatrix zugeführt werden kann, die schließlich eine Auswahl der meist geeignetsten Kenngrößen abhängig von betrachtetem Prozeßausgang und gewünschter Anzahl an

Kenngößen erlaubt. Dazu ist auch eine Gewichtung der Kriterien zueinander zu entwickeln, da angenommen werden kann, daß nicht alle Kriterien die gleiche Relevanz für diese Problemstellung besitzen.

Qualifikationskriterien der thermodyn. Kenngrößen	Ausschließende Kriterien
Thermodynamisch basierte Ursache-Wirkungskette	Unrelevant für Prozeßausgang
Generelle Anwendbarkeit	Abhängigkeit von Motorsensorik, -aktuatorik oder verwendeter ECU
Verfügbarkeit am Prüfstand	Mit Standardmeßtechnik nicht erfaßbar oder nicht in Echtzeit aus Meßdaten zu berechnen
Ausschließliche Charakterisierung der Verbrennung (keine Interferenz mit anderen Effekten)	Entfernte Meßstellenposition

Tabelle 5-1: Ausschließende Qualifikationskriterien thermodynamischer Kenngrößen

5.3.2 Qualifikationskriterien

5.3.2.1 Physikalischbasierte Ursache-Wirkungskette

Das wichtigste Kriterium besteht in der physikalischbasierten Ursache-Wirkungskette, die womöglich nicht exakt bekannt ist oder deren Parameter in diesem Zusammenhang nicht verwendbar sind. Aufgrund der hoch komplexen und gekoppelten Prozesse in Verbrennungsmotoren sind nicht alle Effekte separierbar bzw. passende Kennwerte spezifischer Effekte nicht zu finden, was bei diesem Kriterium die zentrale Schwierigkeit ausmacht. Allerdings können die aus der Literatur bekannten und bereits in Abschnitt 3.3.4 zusammengestellten Ansätze als Anhaltspunkt herangezogen werden. Dabei stellt sich wiederum heraus, daß die größte Herausforderung in der Abbildung der zur Schadstoffbildung führenden Effekte zu sehen ist. Aufgrund der für die meisten Applikationsaufgaben hoch relevanten NO_x - und Rußemissionen wird an dieser Stelle beispielhaft das Vorgehen für diese zwei Prozeßausgangsgrößen diskutiert.

Wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben, sind dabei die Stickoxide in ihrer Entstehung deutlich weiter erforscht als die Rußpartikel. Auch wenn noch keine vollständig analytische Beschreibung aller Vorgänge während der Stickoxidbildung existiert, so kann doch der von Zeldovich vorgestellte vereinfachte Mechanismus als hinreichend für diesen Zweck bewertet werden. Demnach sind die lokale Sauerstoff- und Stickstoffkonzentration, die lokale Gastemperatur und die in diesem Zustand verfügbare Verweilzeit ausreichend, um die Stickoxidbildung zu beschreiben. Allerdings stehen diese Größen in diesem Zusammenhang nicht zur Verfügung, weshalb Ersatzkenngrößen hierfür verwendet werden müssen. In vielen empirischen Ansätzen wird als Ersatzkenngröße für die lokale Sauerstoffkonzentration

die AGR-Rate herangezogen, die für den jeweiligen Betriebspunkt als proportional zur globalen Sauerstoffkonzentration gelten kann. Da die Stickoxidkonzentration in der Ansaugluft ohnehin konstant ist, wird sie bei datengetriebenen Identifikation als Konstante identifiziert und bedarf keiner weiteren Beachtung. Aber auch die AGR-Rate ist besonders transient nicht mit Standardmeßmethoden zu bestimmen und für diesen Ansatz daher als nicht qualifiziert zu betrachten. Alternativ bietet sich das Kraftstoff-Luftverhältnis λ an, was meßtechnisch auch transient unproblematisch erfaßt werden kann. Die unbekannte Verweildauer der Reaktionspartner in den jeweiligen thermodynamischen Randbedingungen kann über die Drehzahl zumindest grob proportional angenähert werden. Schließlich wäre die Gastemperatur zunächst als Funktion der umgesetzten Energie je Arbeitsspiel überführbar. Die umgesetzte Energie ließe sich über eine Kraftstoffmenge und deren Umsetzungsgrad beschreiben, wobei die jeweilige Einspritzmenge in den Zylinder wiederum unter den hier geltenden Randbedingungen schwierig exakt zu erfassen ist. Schließlich bietet sich der indizierte Mitteldruck in Kombination mit dem Verbrennungsschwerpunkt an, die gekoppelt die Information des Energieeintrages und des Wirkungsgrades enthalten. Der in der Literatur häufig als ebenfalls entscheidend bezeichnete Einfluß des Anteils der vorgemischten zur diffusionskontrollierten Verbrennung kann über das Verhältnis des Verbrennungsschwerpunktes zum Start der Verbrennung abgedeckt werden. Somit wären mit Drehzahl, indiziertem Mitteldruck, λ und Schwerpunkt der Verbrennung fünf als hoch relevant eingestufte thermodynamische Kenngrößen gefunden. Es lassen sich allerdings weitere Einflußfaktoren oder alternative Ersatzkenngrößen bilden, wie beispielsweise der aus der Indizierung meßtechnisch gut zu bestimmende Zündverzug anstelle des Verhältnisses von Start und Schwerpunkt der Verbrennung. Auch könnte anstatt des indizierten Mitteldruckes die Brenndauer als charakteristisch für den Energieeintrag verwendet werden. Um nicht von vorneherein die Bedeutung weiterer Kriterien zu stark einzuschränken, wurde daher eine alle nicht ausgeschlossenen Kenngrößen umfassende Wertung nach Relevanz für die hier betrachtete Stickoxidbildung erstellt, die als erstes auch quantifizierendes Kriterium in die Bewertungsmatrix einfließen kann.

Wesentlich unsicherer sind die Mechanismen der Rußbildung bestimmt. In der Literatur können einheitliche Trends kaum gefunden werden, eher werden globale, die Verbrennung beschreibende Kenngrößen zur empirischen Approximation verwendet. Daher wurden in diesem Falle die nach dem Ausschlußverfahren zur Verfügung stehenden Kenngrößen erfahrungsbasiert nach Relevanz für die Rußbildung gewichtet und somit ebenfalls in eine numerisch verwertbare Reihenfolge für die Bewertungsmatrix gebracht. Gegenüber der Stickoxidbildung sind besonders die gegen Ende der Verbrennung auftretenden Zustände wegen der Rußoxidation interessant, weshalb beispielsweise statt des Verbrennungsschwerpunktes das Verbrennungsende hier relevanter erscheint.

Losgelöst von theoretischen oder thermodynamischen Überlegungen kann alternativ ein statistisches Verfahren nach Winsel angewendet werden, welches den diskreten Lipschitz-Quotienten zur numerischen Auswertung der Relevanz von Eingängen bei unbekanntem Prozessen auf Basis von Meßdaten verwendet [104]. Hierbei wird der Einfluß von Änderungen in der betrachteten Eingangsgröße auf den betrachteten Ausgang bewertet und somit eine Rangfolge für verschiedene Kandidaten ermittelt.

5.3.2.2 Exklusiver Informationsträger

Für größtmöglichen Informationsgehalt bei geringster Anzahl an Eingängen muß eine Kenngröße ein exklusiver Informationsträger der gewünschten Information sein, was besonders für empirische Modellbildung entscheidend ist. Eine Abhängigkeit von weiteren Kenngrößen verursacht eine nicht proportionale Gewichtung oder nicht physikalischbasierte Abhängigkeiten innerhalb der Ursache-Wirkungskette, was zu schlechterer Qualität und geringem Gültigkeitsbereich des Modells führt. Das entwickelte Konzept zur Bewertung dieses Kriteriums basiert auf der Tatsache, daß unabhängige Parameter im motorischen Prozeß beliebig gegeneinander variiert werden können, was sich in einer orthogonalen (Meßdaten-) Raumabdeckung widerspiegelt. Beispielsweise können im dieselmotorischen Prozeß Motordrehzahl und Luftverhältnis beinahe frei gegeneinander verstellt werden, weshalb diese Parameter also als relativ unabhängig voneinander deklariert werden können. Berechnet man die tatsächliche Raumabdeckung einer Kombination von Kenngrößen über die konvexe Hülle aus verfügbaren Meßdaten und vergleicht diese mit einer ideal orthogonalen Raumabdeckung, erhält man eine numerisch auswertbare Größe. Kenngrößen, die öfter in Kombinationen mit relativ hoher Raumabdeckung vorkommen, sind in diesem Fall besser geeignet, da sie weniger Informationsüberdeckung enthalten.

5.3.2.3 Signalverfügbarkeit und -qualität

Ebenfalls von hoher Bedeutung bei Verwendung empirischer Strukturen zur dynamischen Modellbildung ist die Signalverfügbarkeit und -qualität. Totzeiten, Transportverzögerung oder jeweiliges Sensoransprechverhalten müssen gering sein, um eine klare Zuordnung zum entsprechenden Verbrennungszyklus zu erlauben. Sprungantworten in ausgesuchten Betriebsbedingungen können zur einfachen Bewertung herangezogen werden, zumal ohnehin bekannt ist, daß träge Sensoren problematisch für hoch dynamische Messungen sind (z.B. in der standardmäßigen Gastemperaturerfassung). Hinsichtlich Qualität interessieren Störpegel (signal to noise ratio), Stabilität und Reproduzierbarkeit, wobei der Störpegel über eine entsprechende Signalanalyse bekanntermaßen leicht zu evaluieren ist. Besonderer Wert muß auf Stabilität und Reproduzierbarkeit gelegt werden, da die verwendeten Modelle weder stochastische noch Drifteffekte berücksichtigen können. Hysteresee-, Konditionier- aber auch numerische Effekte in der Berechnung der Kenngrößen

verringern die Eignung hinsichtlich Stabilität. Zur numerischen Auswertung sollen die aus DoE-Testplänen bekannten Wiederholpunkte verglichen werden, die gleiche Betriebsbedingungen aus in Hinsicht auf ECU-Stellgrößen unterschiedlichen Richtungen anfahren. Für längerfristige Reproduzierbarkeit werden die täglichen Referenzpunkte genutzt. Zusammengeführt ergibt sich über die jeweilige Standardabweichung eine quantifizierende Eignung möglicher Kenngrößen bezüglich Signalverfügbarkeit und -qualität, die in der Bewertungsmatrix verwendet werden kann.

5.3.2.4 Eignung für statische und dynamische Modellierung

Ein weiteres Kriterium der Qualifikationsmatrix ist die Eignung der Kenngrößen für statische oder dynamische Modellbildung. Dies erscheint notwendig, da möglicherweise gewisse Kenngrößen aufgrund ihres stark nichtlinearen Charakters oder ihres geringen Wertebereiches schlechter als andere Kenngrößen zur Modellbildung verwendbar sind. Für diese Modellarchitektur sind thermodynamische Kenngrößen der Ausgang dynamischer Modelle und in der jeweiligen Kombination der Eingangsvektor statischer Modelle. Daher ist die Eignung für dynamische Modellierung direkt aus der erreichbaren dynamischen Modellqualität abzuleiten, während die Eignung für statische Modellierung nur indirekt über den jeweiligen Beitrag der Kenngröße zur erreichbaren statischen Qualität erfaßbar ist. Zur Bewertung des jeweiligen Beitrags wird eine vollfaktorielle Studie aller möglichen Kombinationen durchgeführt und die jeweilige Häufigkeit der betrachteten Kenngrößen in statischen Modellen hoher Qualität analysiert. Hohe Häufigkeit wird dabei als gute Eignung interpretiert.

Die Gewichtung der bewerteten Qualifikationskriterien für die Gesamtmatrix zueinander orientiert sich an dem hier fokussierten thermodynamischen Hintergrund des Gesamtansatzes, weshalb diese der hier verwendeten Reihenfolge der Vorstellung entspricht. Die so gewonnene Auswertung erlaubt eine Auswahl der hoch relevanten Kenngrößen abhängig von gewünschter Anzahl der Eingänge unter Berücksichtigung empirischer Randbedingungen.

Zur Validierung dieser Qualifikationsmethodik kann eine vollfaktorielle Studie des gesamten Motormodells durchgeführt werden, die alle möglichen Kombinationen der nicht bereits vorher ausgeschlossenen thermodynamischen Kenngrößen berücksichtigt. Die rein numerisch beste zu erreichende Modellqualität kann so der aus der Qualifikationsmethodik vorgeschlagenen Kombination gegenübergestellt werden.

Abschließend ist die vollständige Tabelle der Qualifikationskriterien dargestellt, Tabelle 5-2.

Qualifikationskriterien der thermodyn. Kenngrößen	Ausschließende Kriterien	Gewichtende Kriterien
Thermodynamisch basierte Ursache-Wirkungskette	Unrelevant für Prozeßausgang	Relevanz
Generelle Anwendbarkeit	Abhängigkeit von Motorsensorik, -aktuatorik oder verwendeter ECU	-
Verfügbarkeit am Prüfstand	Mit Standardmeßtechnik nicht erfaßbar oder nicht in Echtzeit aus Meßdaten zu berechnen	-
Ausschließliche Charakterisierung der Verbrennung (keine Interferenz mit anderen Effekten)	Entfernte Meßstellenposition	-
Exklusiver Informationsträger	-	Unabhängigkeit von anderen Kenngrößen
Signalverfügbarkeit und -qualität	-	Totzeit und Sensordynamik Stabilität und Wiederholbarkeit
Eignung für empirische Modellierung	-	Erreichbare Abbildungsqualität bei statischer und dynamischer Modellierung

Tabelle 5-2: Ausschließende und qualifizierende Kriterien thermodynamischer Kenngrößen

6 Versuchsumgebung und Randbedingungen

Das in dieser Arbeit entwickelte Modellierungskonzept stellt den Anspruch, als allgemein gültiges Verfahren für Verbrennungskraftmaschinen mit innerer Verbrennung bei unterschiedlichen Brennverfahren zu gelten. Der Nachweis der Allgemeingültigkeit ist im Rahmen dieser Arbeit jedoch aus zeitlichen und organisatorischen Gründen nicht möglich und kann ohnehin nur anhand ausgewählter Versuchsdaten erfolgen. Mit der Auswahl der im Folgenden beschriebenen Versuchsumgebung, des Versuchsträgers und der für diese Arbeit geltenden Randbedingungen wurde eine repräsentative Situation aus der Applikation eines modernen Dieselmotors gewählt, die eine Verallgemeinerung der Erkenntnisse auf typische Applikationsprojekte zulässt. Speziell die realen Versuchsumfänge am Prüfstand müssen schon aus ökonomischen Gründen soweit eingegrenzt sein, daß die hier angestrebte Validierung des Konzepts als Machbarkeitsstudie verstanden werden soll, die aber als Entscheidungsgrundlage für eine Fortführung der Entwicklungsumfänge bezüglich dieser Modellierungsstrategie dienen soll.

6.1 Prüfstandsgebung

Für die Durchführung der Versuche zur Identifikation des motorischen Verhaltens stand ein für die Applikation standardmäßig ausgerüsteter, moderner Prüfstand mit folgenden Modulen zur Sicherstellung einer reproduzierbaren Testumgebung zur Verfügung:

- Belastungseinheit mit Asynchron-Maschine (APA 330 KW @ 10000 rpm)
- Prü fzellen-Konditionierung auf Temperatur
- Motortemperatur-Konditionierung auf Kühlwassertemperatur
- Ansaugluft-Konditionierung auf Temperatur und Luftfeuchte
- Ladeluft-Konditionierung auf Temperatur
- Prüfstand-Steuerungsprogramm (AVL PUMA 1.3)
- Prüflauf-Automatisierungsprogramm (AVL CAMEO 3.2) mit schneller ECU Schnittstelle (iLink ECU Interface)

Zur Erfassung der Prozeßgrößen wurden folgende Meßgeräte verwendet:

- Kontinuierlich messende Kraftstoffwaage (AVL 734) mit Kraftstofftemperatur-Konditionierung (AVL 753)
- Luftmassenstrommessung (Sensyflow)

- Indiziermodul mit wassergekühlten Quarzen auf allen Zylindern (AVL Indiset)
- Turbolader-Drehzahlmesser
- Emissionsanalysatoren für NO_x, THC, CO, CO₂ (AVL CEB)
- Rußkonzentrationsanalysator (AVL Microsootsensor)
- Schwarzrauchmeßgerät (AVL Smoke Meter)
- Abgastrübungsmesser (AVL Opazimeter)
- Breitband-Lambdasonde (Bosch LA4)
- Druck- und Temperatursensoren

Die Positionierung der Meßstellen kann der nachfolgenden Abbildung 6-1 entnommen werden.

Die Abtastrate der Sensoren während der Messungen betrug für alle Versuche 100 Hz, auch wenn einige Meßgeräte diese zeitliche Auflösung nicht unterstützten.

Teile Legende (Abbildung 6-1):

- | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1) Ansaugluft Wärmetauscher | 16) Saugrohr |
| 2) Luftfilter | 28) Turbine |
| 5) Luftmassen Messgerät | 31) Abgasnachbehandlungssystem |
| 6) Gebläse | 35) Gegendruck Einstellklappe |
| 7) Lufttrichter | 52) Bypass |
| 9) Luftfilter | 54) Kraftstofffilter |
| 13) Kompressor | 55) Kraftstoff-Hochdruckpumpe |
| 14) Ladeluftkühler | 70) AGR-Ventil |
| 15) Drosselklappe nach Kompressor | 71) AGR-Kühler |

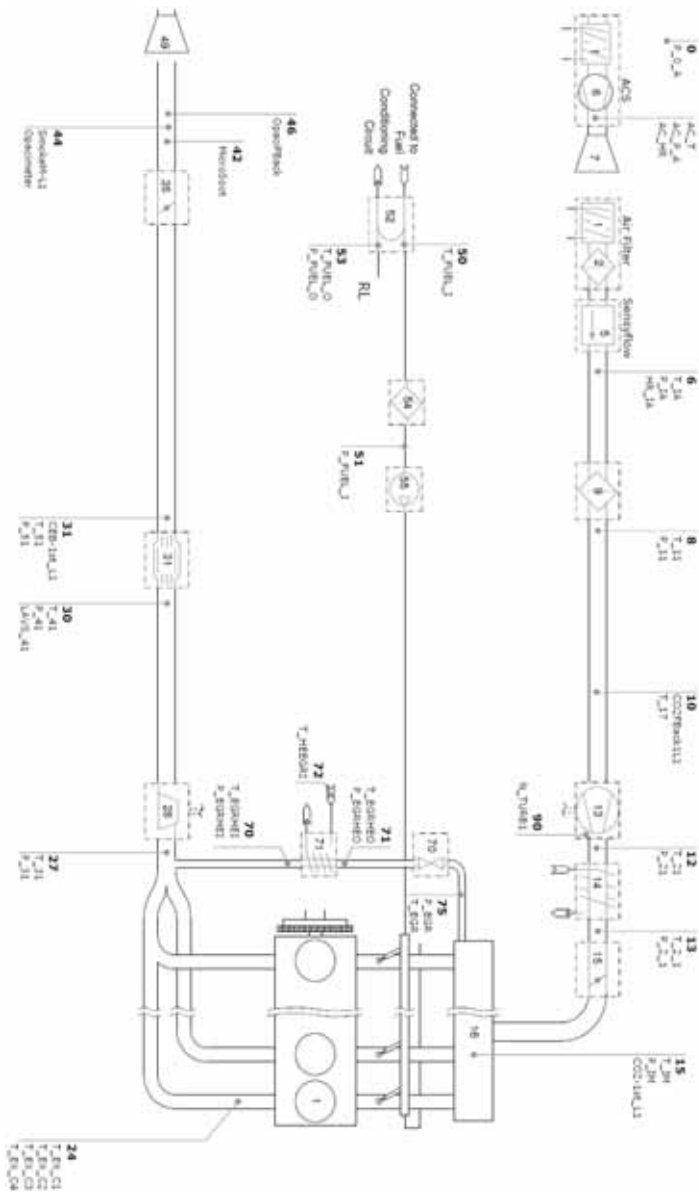


Abbildung 6-1: Verwendete Meßstellen am Motorprüfstand

Legende Messpositionen und -bezeichnungen (Abbildung 6-1):

0)	P_0_A:	Umgebungsdruck
	AC_T:	Temperatur Ansaugluft
	AC_P_A:	Druck Ansaugluft
6)	T_IA	Temperatur vor Luftfilter
	P_IA	Druck vor Luftfilter
	HR_IA	relative Luftfeuchte vor Luftfilter
8)	T_11	Temperatur vor Luftfilter
	P_11	Druck vor Luftfilter
12)	T_21	Temperatur nach Kompressor
	P_21	Druck nach Kompressor (Ladedruck)
13)	T_2_1	Temperatur nach Ladeluftkühler
	P_2_1	Druck nach Ladeluftkühler
15)	T_IM	Saugrohrtemperatur
	P_IM	Saugrohrdruck
	CO2-1st_L1	CO ₂ -Konzentration im Saugrohr
24)	T_EX_C1 ...4	Abgastemperatur im Krümmer für Zylinder 1 bis 4
27)	T_31	Abgastemperatur vor Turbine
	P_31	Abgasdruck vor Turbine
30)	T_41	Abgastemperatur nach Turbine
	P_41	Abgasdruck nach Turbine
	LAVS_41	Lamda im Abgas (Sonde)
31)	T_51	Abgastemperatur nach Abgasnachbehandlungssystem
	P_51	Abgasdruck nach Abgasnachbehandlungssystem
	CEB-1st_L1	Abgasentnahme
42)	MicroSoot	Entnahmestelle Rußkonzentrationsmessung
44)	SmokeM-L1	Entnahmestelle Schwarzrauchmessung
	Opacimeter	Entnahmestelle Opazitätsmessung
50)	T_Fuel_I	Temperatur Kraftstoffzufluss
51)	P_Fuel_I	Druck Kraftstoffzufluss
53)	T_Fuel_Out	Temperatur Kraftstoffrücklauf
	P_Fuel_Out	Druck Kraftstoffrücklauf
70)	T_EGRHEI	Abgastemperatur vor AGR-Kühler
	P_EGRHEI	Abgasdruck vor AGR-Kühler
71)	T_EGRHEO	Abgastemperatur nach AGR-Kühler
	P_EGRHEO	Abgasdruck nach AGR-Kühler
72)	T_HEEGRI	Temperatur AGR-Kühlwasser
75)	T_EGR	Abgastemperatur nach AGR-Ventil
	P_EGR	Abgasdruck nach AGR-Ventil

6.2 Versuchsträger

Als Versuchsträger wurde ein aktueller Dieselmotor mit folgenden Kenndaten eingesetzt:

- 4-Zylinder Reihenmotor mit 2.0l Hubraum
- 130KW Leistung bei 4000 rpm und 350 Nm Drehmoment bei 2000 rpm
- EURO5 Emissionszertifizierungsstufe
- BOSCH EDC17 Motorregelung mit Common-Rail Einspritztechnik
- Keine Abgasnachbehandlung verbaut (Dummy-Catalyst)
- Elektronisch geregeltes AGR-Ventil mit Positionsrückmeldung
- Einfache Abgasturboaufladung mit elektronisch geregeltem VTG
- AGR-Kühler mit Bypassklappe
- Kontinuierlich steuerbare Swirl- und Drosselklappe

Die im Rahmen der Emissionszyklusberechnung relevanten Fahrzeugdaten wurden Herstellerangaben entnommen und sind im folgenden zusammengefasst.

- Fahrzeugmasse: 1810 kg, 6 Gang Handschaltgetriebe
- Straßenlast: R_0 : 172,5 N; R_1 : 0,618 Nh/km; R_2 : 0,03879 N²h²/km²
- Getriebeübersetzungen:
 $i_1=5,14$; $i_2=2,83$; $i_3=1,804$; $i_4=1,257$; $i_5=1$; $i_6=0,831$; $i_{HA}=3,07$
- Dynamischer Reifenradius= 0,335 m

Der Verlauf der Drehzahl und des zugehörigen gemessenen effektiven Moments im NEDC ist in Abbildung 6-2 dargestellt. Der grau hinterlegte Bereich kennzeichnet dabei den für die Applikation des Emissionszyklus relevanten Kennfeldbereich.

6.3 Versuchsraum und Versuchsprogramm

Einleitend wurde die Notwendigkeit der Beschränkung des Versuchsraums aufgrund eingeschränkter Ressourcen dargelegt, der ansonsten für heutige Motoren sehr groß und damit sehr aufwendig zu vermessen wäre. Aus dem Versuchsraum kann dann mittels der bereits diskutierten Strategien zur Systemidentifikation (vgl. Abschnitt 5.2) das Versuchsprogramm abgeleitet werden.

6.3.1 Eingrenzungen des Versuchsraums

Für die Entwicklungsumgebung Prüfstand ist die Eingrenzung des Versuchsraums durch die Wahl der Umweltbedingungen üblich.

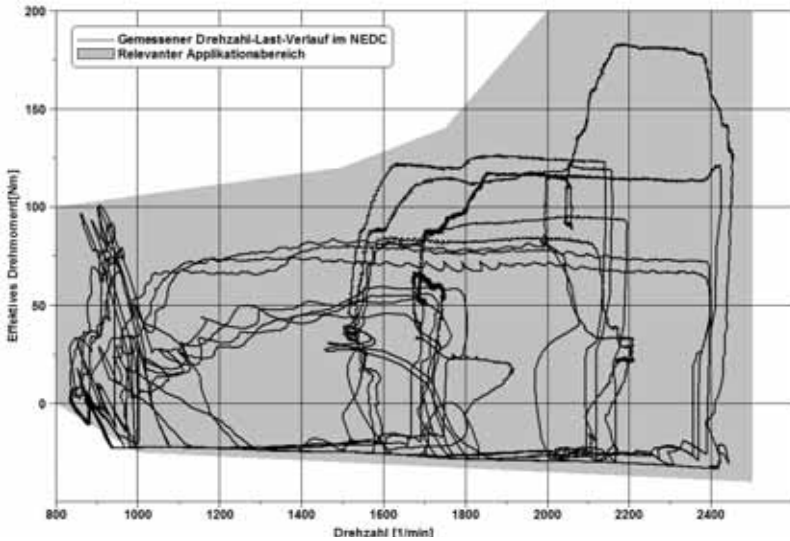


Abbildung 6-2: Drehzahl-Last Verlauf im NEDC Zyklus

Obwohl über die Konditioniereinheiten auch eine geringe Variation in Motortemperatur, Ansaugluftzustand und Luftdruck möglich wäre, werden diese Größen gewöhnlich auf konstante Werte geregelt. So wird der Motor betriebswarm (ca. 90°C Kühlwasser) mit 25°C warmer und 50% relativer Feuchtigkeit konditionierter Ansaugluft bei auf Meeresebene üblichem Luftdruck betrieben. Eine weitere sinnvolle Eingrenzung ergibt sich über die aus den favorisierten Applikationsaufgaben resultierenden typischen Betriebsbereichen, in diesem Falle der Bereich des Emissionszyklus NEDC, da außerhalb die für diese Arbeit entscheidenden Schadstoffkonzentrationen höchstens eine untergeordnete Rolle spielen. Allein durch diese zwei für die Applikation typischen einschränkenden Aspekte am Prüfstand ergeben sich weitere Reduktionen des Variationsraums der Motorregelung, da einige Aktuatoren in diesem sogenannten „Basisbetrieb“ nicht verändert werden. Bei dem hier verwendeten Versuchsträger wird unter diesen Randbedingungen eine einheitliche Betriebsstrategie mit Single-Pilot Einspritzung (Menge und Abstand konstant) bei geöffneter Drosselklappe, konstantem Drall und geschlossener AGR-Bypassklappe verfolgt, was den möglichen Variationsraum und damit Betriebsbereich weiter einschränkt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf die Identifikation alternativer Betriebsarten z.B. zur Partikelfilterregeneration verzichtet, auch weil sich die Methodik und die erwarteten Ergebnisqualitäten nicht wesentlich vom Basisbetrieb unterscheiden sollten. Als Variationsparameter der Motorregelung verbleiben also AGR-Ventilstellung, Turbinenschaufelstellung des VTG, Raildruck und Beginn der Haupteinspritzung über Drehzahl und Last im Bereich des NEDC-Zyklus. In diesem Variationsraum sind alle Zielgrößen aus Abschnitt 4.1.2 sowie

die zur Stimulation der Motorregelung notwendigen Sensorgrößen hinsichtlich stationärem Endwert und dynamischem Verhalten richtig abzubilden. Letztere sind besonders für die in der ECU implementierte Zustandsgrößenregelung entscheidend, die in diesem Falle die Position des AGR-Ventils auf die in der Motorregelung berechnete AGR-Rate regelt.

6.3.2 Versuchsprogramm

Wie in Abschnitt 5.2 diskutiert, kann das Versuchsprogramm in verschiedene Module unterteilt werden, die an der Struktur der entworfenen Modellarchitektur orientiert sind. Dabei ist es zweckmäßig, mit der Aktuator- und Sensordynamik Identifikation zu beginnen, da hieraus weitere Bedingungen für die folgenden Versuche abgeleitet werden können, wie beispielsweise die erwartete dynamische Bandbreite des Systems. Anschließend kann über die aus der stationären Vermessung resultierenden Fahrbarkeitsgrenzen bereits der Variationsraum der dynamischen Stimulation eingrenzt werden, so daß der begrenzte Versuchsumfang möglichst effizient genutzt wird.

6.3.2.1 Aktuator- und Sensordynamik Identifikation

Zur Identifikation der Aktuatordynamik muß gemäß Abschnitt 5.2.1.1 der Raildruck möglichst dynamisch über Drehzahl und Last verändert werden, was ohnehin aufgrund der in der Motorregelung abgelegten Soll-Raildruck Kennfelder in transienten Zuständen der Fall ist. Auch für die Temperatursensoren ist eine Identifikation über eine Drehzahl-Last Variation möglich, sofern dadurch ausreichend hohe Amplituden zustande kommen, was aber für den hier betrachteten Fall vorausgesetzt werden kann. Somit bietet sich eine auf den NEDC-Bereich begrenzte Drehzahl-Last Stimulation mit APRB Sequenz an, wobei die Motorregelung die Aktuatoren aus den Standard-Kennfeldern steuert und als Anregung neben der stimulierten Drehzahl eine entsprechend modulierte Fahrpedalsequenz erhält. Zusätzlich zu den zum Training benötigten Daten ist eine zweite APRB Sequenz zur Verifikation der Modelle erforderlich, die aufgrund des zufälligen Charakters der APRB Methode mit den gleichen Randbedingungen erzeugt werden kann. Abbildung 6-3 zeigt die Drehzahl-Last Abdeckung dieser Sequenz gegenüber dem für die NEDC-Applikation relevanten Bereich sowie die dynamische Stimulationssequenz mittels APRB Methode.

Die zur Identifikation der Abgassensorik notwendigen Daten dagegen müssen mit einer separaten Methode identifiziert werden (vgl. Abschnitt 5.2.1.2), die hier als Funktion des Abgasmassenstroms und der jeweilig anliegenden Konzentration interpretiert wird. Dazu wird der Motor im Schubbetrieb bei verschiedenen Drehzahlen betrieben, um unterschiedliche Massendurchsätze zu realisieren, in die mittels elektromagnetisch schaltbaren Gasventils ein synthetisches Testgas mit bekannten Konzentrationen zugemischt wird. Die sich im gefeuerten Motorbetrieb

unterschiedlich ergebenden Druck- und Temperaturverhältnisse in der Meßstrecke werden bei diesem Ansatz durch Schätzfunktionen beschrieben und überlagert.

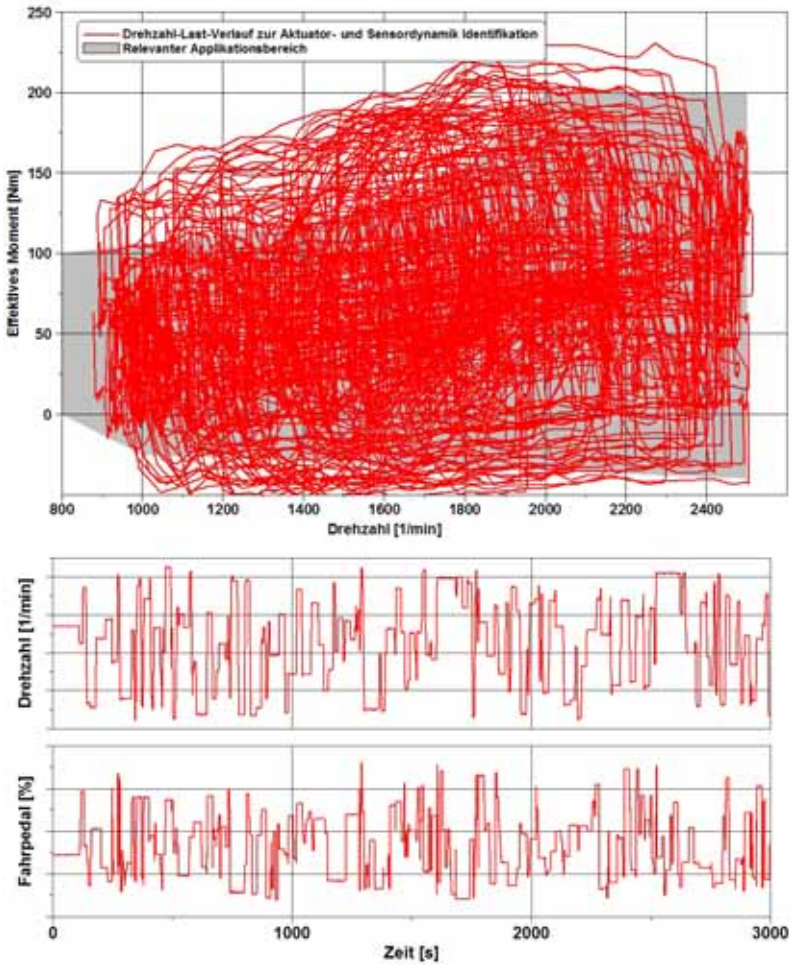


Abbildung 6-3: Drehzahl-Last-Verlauf zur Aktuator- und Sensordynamik Identifikation (oben) und APRBS Sequenz zur Aktuator- und Sensordynamik Identifikation (unten)

6.3.2.2 Stationäre Messungen

Die für die statische Modellierung der Verbrennung benötigten Daten können über stationäre Messungen abgedeckt werden. Die damit verlängerte Testdauer gegenüber schnellen dynamischen Meßmethoden wie in Abschnitt 3.4.2.3 thematisiert, wurde wegen der besseren Ergebnisqualität speziell der Abgasemissionen und erleichtertem Post-Processing in Kauf genommen. Um den in Abschnitt 5.2.2 diskutierten Aspekten der Versuchsplanung für globale und lokale DoE-Testpläne und verschiedene Approximatoren gerecht zu werden, wurden drei eigenständige Versuchspläne für jeweils eine lokale und globale Identifikation sowie eine globale Verifikation erzeugt.

Für die lokale Identifikation wurden aus dem NEDC-Applikationsbereich 21 über Drehzahl und effektives Moment definierte Betriebspunkte gewählt (siehe Abbildung 6-4), in denen jeweils 40 Kombinationen der vier Variationsgrößen AGR-Rate, VTG-Steller-Position, Raildruck und Beginn der Haupteinspritzung über ein DoE Design vorgegeben wurden. Zusätzlich wurden hier bereits die in Abschnitt 5.3.2.3 geforderten Wiederholpunkte zur späteren Bewertung der Signalqualität der thermodynamischen Kenngrößen berücksichtigt. Als Variationsraum wurden basierend auf dem Ausgangsdatenstand des Versuchsträgers relative Verstellbereiche mit folgender Amplitude vorgegeben:

- AGR-Rate: $\pm 15\%$ Punkte
- Raildruck: ± 150 bar
- Beginn Haupteinspritzung: $\pm 5^\circ$ KW
- VTG-Steller-Position: $\pm 15\%$ Punkte

Diese Variationen werden direkt über die Motorregelung appliziert und erlauben daher später eine dementsprechende Optimierung der Motorregelungskennfelder. Aufgrund der zu diesem Zeitpunkt unbekanntem Fahrbarkeitsgrenzen des Versuchsträgers unter diesen Randbedingungen erfolgte die Vermessung mit dem „online screening“ des Automatisierungsprogramms, was gleichzeitig die für die dynamische Stimulation geforderte Hüllenbestimmung ergab. Als Grenzen des fahrbaren Betriebszustandes wurden neben zulässigen Bauteilbelastungen auch solche aus dem Brennverfahren resultierende Ausgangsgrößen wie Lambda, Verbrennungsschwerpunkt, Abgastrübung und Kohlenwasserstoffkonzentration überwacht, um eine nachhaltige Schädigung des Motors oder der Sensorik zu verhindern.

Der Testplan zur globalen Identifikation unterscheidet sich primär durch die dem Variationsraum zugerechneten Größen Drehzahl und effektives Drehmoment, die vom DoE Algorithmus optimal verteilt berechnet werden. Für das globale Design ergab sich mit den wiederum inkludierten Wiederholmessungen eine Meßpunktzahl von 541. Variationsbereich und Fahrbarkeitsgrenzen sind zum lokalen Test

ident. Für die Verifikation des statischen Verbrennungsmodells wurden zusätzliche Punkte vermessen, die nicht im lokalen oder globalen Testplan enthalten sind. Dafür wurde ein weiterer globaler Versuchsplan mit insgesamt 151 Meßpunkten mittels eines DoE Design bei wiederum gleicher Variationsbereichbreite erstellt.

Abbildung 6-4 zeigt die Betriebspunktverteilung hinsichtlich Drehzahl und Last der drei Testpläne im Vergleich zum Applikationsbereich des NEDC.

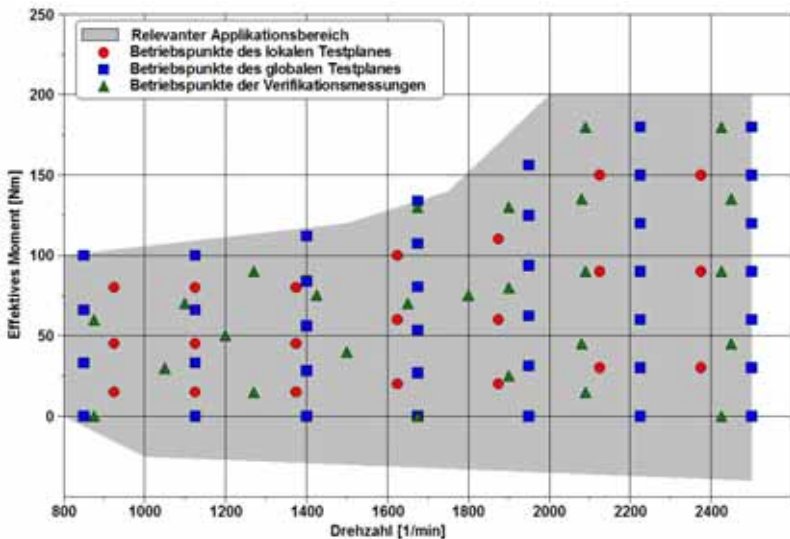


Abbildung 6-4: Betriebspunkte der stationären Vermessungen der DoE Testpläne

6.3.2.3 Dynamische Stimulation

Basierend auf den in Abschnitt 5.2.3 diskutierten Strategien zur Identifikation der Gasdynamik wurden zunächst lokale Betriebsbereiche definiert, deren Zentrum mit den Betriebspunkten der lokalen statischen Identifikation übereinstimmte. Die sich durch die dynamische Stimulation der Drehzahl und Last ergebenden Betriebsbereiche wurden mit geringer Überschneidung zueinander ausgelegt, um bessere Übergänge der Teilmodelle zu gewährleisten, siehe Abbildung 6-5 links. Unterschiedliche Farben symbolisieren hier die Drehzahl-Last-Trajektorien des jeweiligen lokalen Betriebsbereiches. Die Wahl der Zentren und Ausdehnung dieser Bereiche erlaubte eine einfache Übertragung der aus den stationären Messungen gewonnenen Hüllenbestimmung des Fahrbarkeitsbereichs sowie eine gleichmäßig orthogonal verteilte Abdeckung des Amplitudenspektrums des Variationsraums. Diese ist in Abbildung 6-5 rechts beispielhaft für fünf Variationsgrößen gezeigt und demonstriert die Möglichkeit des Ausschlusses lokaler

Betriebsbereiche aus Fahrbarkeitsgründen. Der Verstellbereich der dynamischen Stimulation ergibt sich also direkt aus dem fahrbaren Bereich der statischen Vermessung und der dort gewählten Randbedingungen.

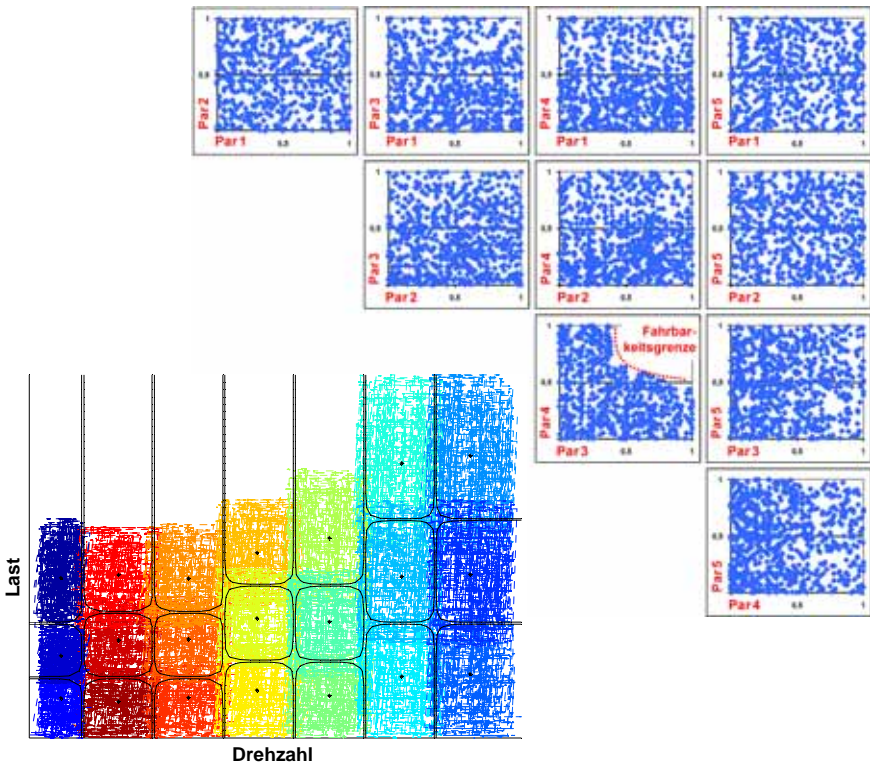


Abbildung 6-5: Lokale Betriebsbereiche der dynamischen Identifikation (links) und innere Variationsraumabdeckung (rechts)

Als Stimulationsmuster werden APRB Sequenzen unterschiedlicher Kombinationen von Variationsgrößen gemäß der angestrebten dynamischen Modellarchitektur verwendet (vgl. Abschnitt 4.3). Für die hier favorisierte Struktur gemäß Abschnitt 4.3.4 werden alle sechs Variationsgrößen gemeinsam in einem lokalen Betriebsbereich unter Berücksichtigung einer effektiven Haltezeit des Gesamtsystems dynamisch stimuliert. Aufgrund von Beschränkungen des Automatisierungssystems konnte die ursprünglich favorisierte minimale Haltezeit von 0.1 Sekunde nicht realisiert werden, sondern mußte auf 0.25 Sekunden erhöht werden. Daraus ergibt sich die gemäß Abbildung 6-6 gewählte Häufigkeitsverteilung der Haltezeiten, wobei als maximale Haltezeit ein Zeitraum von 10 Sekunden gewählt wird, der Fokus aber auf den höheren Frequenzen liegt.

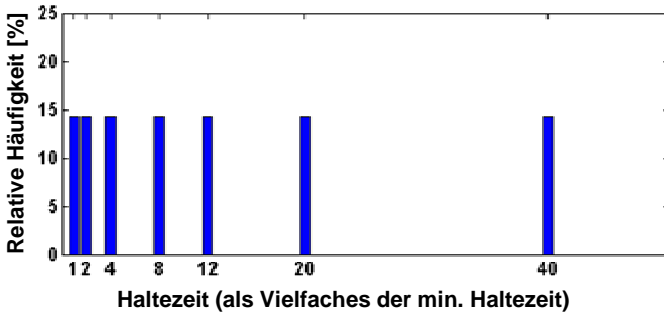


Abbildung 6-6: Gewählte effektive Haltezeitenverteilung der dynamischen Stimulation

Der zeitliche Verlauf einer dynamischen Stimulation mittels APRB Sequenz und der hier gewählten Randbedingungen ist in Abbildung 6-7 beispielhaft für fünf Variationsgrößen gezeigt. Neben der zum Training benötigten Daten wurde jedem dynamischen Testlauf eine Phase zur Generierung zusätzlicher Daten für die dynamische Verifikation im jeweiligen Betriebsbereich angehängt.

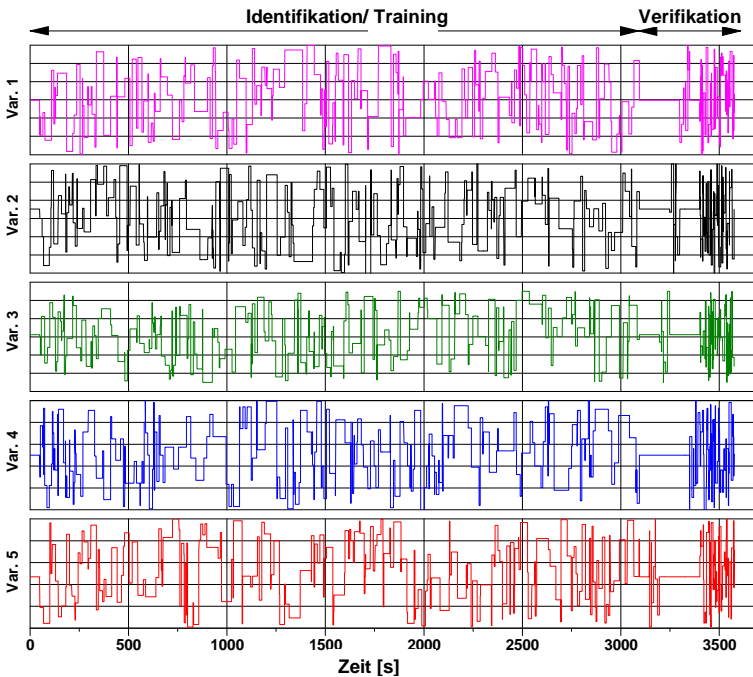


Abbildung 6-7: APRB Sequenz eines Betriebsbereiches mit 5 Variationsgrößen

6.3.2.4 Gesamtvalidierung

Zur Validierung des gesamten Modellansatzes werden dynamische Zyklen für applikationstypische Aufgaben benötigt, die eine Bewertung des Motorregelungsverhaltens in der virtuellen Entwicklungsumgebung und der Abbildungsqualität aller Zielgrößen gegenüber der realen Umgebung erlauben. Als Referenz für die virtuelle Umgebung wurde hier der für den Versuchsträger entscheidende NEDC-Zyklus am dynamischen Motorprüfstand vermessen. Um neben der Dynamik auch die Breite der Modellgültigkeit bewerten zu können, wurden die Zyklen mit verschiedenen synthetischen Bedatungen der Motorregelung vermessen, die im Folgenden aufgelistet sind:

- A) Prüflauf mit geringer AGR Rate
- B) Prüflauf mit erhöhter AGR Rate (gegenüber A um 7.5%-Punkte erhöht)
- C) Gleichzeitige Veränderung mehrerer Parameter gegenüber A
 - Beginn der Haupteinspritzung 3° KW früher
 - Erhöhung des Raildrucks um 100 bar
 - optimiertes VTG-Position Steuerkennfeld
 - 10%-Punkte erhöhte AGR Rate

Es ergeben sich somit drei unterschiedlich applizierte NEDC Läufe, die zur Bewertung der Reproduzierbarkeit mehrfach vermessen werden sollen, um auch die Information der dynamischen Stabilität der realen Entwicklungsumgebung in die Bewertung einbeziehen zu können.

7 Experimentelle Untersuchungen

Gemäß dem in Abschnitt 5.1 eingeführten Modellierungsprozeß folgt auf die Versuchsplanung die Vermessung des Versuchsträgers und das Post Processing. Trotz des Aufwands und der Bedeutung beider Schritte für das Gesamtergebnis sollen sie aber in dieser Arbeit nicht näher thematisiert werden. Dieses Kapitel beginnt daher mit der Diskussion der plausibilisierten Meßergebnisse zur Identifikation des motorischen Verhaltens hinsichtlich Datenraumabdeckung. Im Anschluß werden die thermodynamischen Kenngrößen über die in Abschnitt 5.3 entwickelten Verfahren bestimmt und analysiert. Nach kurzer Vorstellung der Ergebnisse der Sensordynamikidentifikation, werden die Erkenntnisse aus statischer und dynamischer Modellbildung mit den jeweilig gewählten Modellierungskonzepten erörtert. Schließlich wird der Transfer der Modellierungsstruktur und ihrer Parameter auf eine Echtzeitplattform zur Einbindung der realen Motorregelung innerhalb einer HiL-Umgebung untersucht. Damit kann erstmals das Zusammenwirken aller Modellteile im closed-loop Betrieb analysiert werden und eine integrale Bewertung des Modellierungsansatzes hinsichtlich Abbildungsqualität in den zuvor definierten Validationszyklen erfolgen. Dies ist die zentrale Voraussetzung für die in Abschnitt 4.1.1 thematisierte virtuelle Applikation. Abschließend wird die in Abschnitt 4.3.3 vorgestellte, alternative Modellierungsarchitektur zur erweiterten Dynamikseparation gemäß Ansatz „B“ untersucht.

7.1 *Datenraumabdeckung*

Für eine genaue und vor allem stabile Modellbildung ist es zwingend notwendig, eine dem Anwendungsfall entsprechend große Versuchs- bzw. Datenraumabdeckung zu gewährleisten. Diese wurden bereits im Abschnitt 6.3 durch eine sorgfältige Versuchsplanung für die Variationsgrößen sichergestellt. Die für dieses Modellierungskonzept geforderte Separation der Prozeßdynamiken über unterschiedliche Modellierungsstrukturen erfordert allerdings für jeden einzelnen Modellteil eine ausreichende Datenraumabdeckung, die aufgrund der nur indirekten Abhängigkeit von den eigentlichen Variationsgrößen zu überprüfen ist. Zusätzlich ist aus der Applikation von Motoren hinlänglich bekannt, daß dynamische Zustände ein mit stationären Bedingungen nicht zu erreichendes motorisches Verhalten zeigen können, weshalb besonders die ausreichende Abdeckung des statischen Verbrennungsmodells für dynamische Zyklen von Interesse ist.

Nachdem weder die Betrachtung noch Darstellung höher dimensionaler Räume zu diesem Zwecke machbar erscheint, besteht die einfachste Möglichkeit zur Überprüfung der Datenraumabdeckung zunächst in der isolierten Analyse des Wertebereichs jeder Größe. Die hierfür herangezogenen Messungen sind in Abbildung 7-1 für die Modelleingangsgrößen und ausgewählte -ausgangsgrößen zusammengestellt. In der linken Hälfte der Abbildung ist ersichtlich, daß der stationäre Ver-

suchsraum zum Training des Verbrennungsmodells ausreichend groß gegenüber dem zur Validierung verwendeten NEDC Zyklus hinsichtlich der Variationsgrößen ist. Der ursprünglich zum Training der Aktuator- und Sensordynamik entworfene und gegenüber dem NEDC wesentlich höher dynamische Zyklus liegt ebenfalls im Eingangsdatenraum der statischen Modelle. Betrachtet man die Ausgangsgrößen auf der rechten Seite der Abbildung 7-1, so zeigt sich, daß die Wertebereiche der Stickoxid- und Rußmassenströme hinreichend für den NEDC Zyklus abgedeckt sind, auch wenn der Großteil der Messungen (ersichtlich an Mittelwert und Standardabweichung der Meßdaten) im unteren Wertebereich liegt, was allerdings im Hinblick auf die spätere Optimierung eher als Vorteil zu sehen ist. Zu erkennen ist weiterhin, daß die stationären Messungen den Bereich des negativen effektiven Drehmomentes nicht bedienen können, weshalb hier in der Modellierung Ersatzwerte vorgesehen werden müssen, was aber für die meisten interessierenden Ausgangsgrößen ohne Belang ist. Ansonsten sind alle Größen ausreichend mit den stationären Messungen gegenüber dem NEDC Zyklus abgedeckt und selbst der hoch transiente Zyklus liegt noch im Gültigkeitsbereich des statischen Modells.

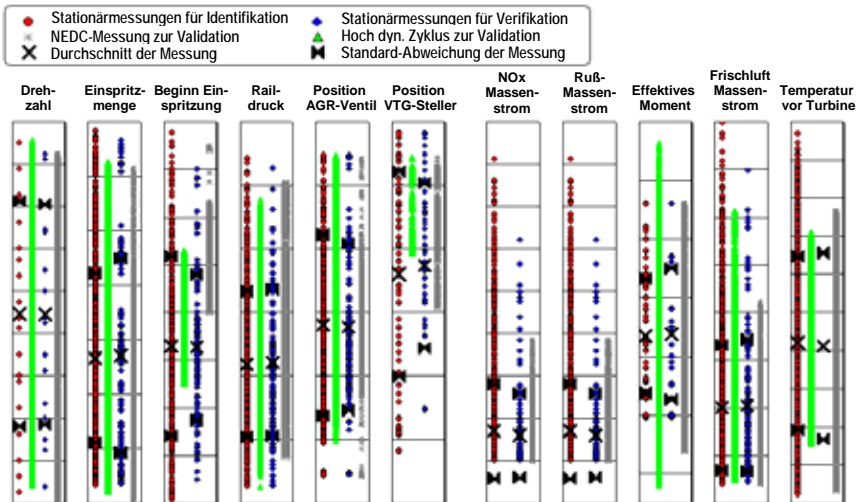


Abbildung 7-1: Eindimensionale Datenraumabdeckung ausgewählter Ein- und Ausgangsgrößen

In Summe ist für diese eindimensionale Betrachtung festzuhalten, daß die einzelnen Inputgrößen in die Modelle ausreichend verteilt angeregt worden sind und somit keine Extrapolation für die hier angestrebten Modelleinsatzbereiche nötig ist.

Zur Stabilität der Modelle ist neben dem gültigen Wertebereich eine ausreichend große Abstützung des Variationsraumes notwendig, die nur mehrdimensional bewertet werden kann. Ein hierzu in Abbildung 7-2 dargestellter zweidimensionaler Vergleich ausgewählter Kenngrößen zur Beschreibung der Verbrennung ermöglicht immerhin eine optische Bewertung der Interaktion jeweils zweier Größen. Auch hier zeigt sich, daß die Datenraumabdeckung der Trainingsdaten ausreichend groß für die dynamischen Zyklen ist, was die vorherige Beobachtung im eindimensionalen Fall bestätigt. Auch eine zur weiteren Überprüfung numerisch durchgeführte mehrdimensionale Hüllenbestimmung erbringt keine neuen Erkenntnisse hinsichtlich eventueller Datenlücken für das Modelltraining.

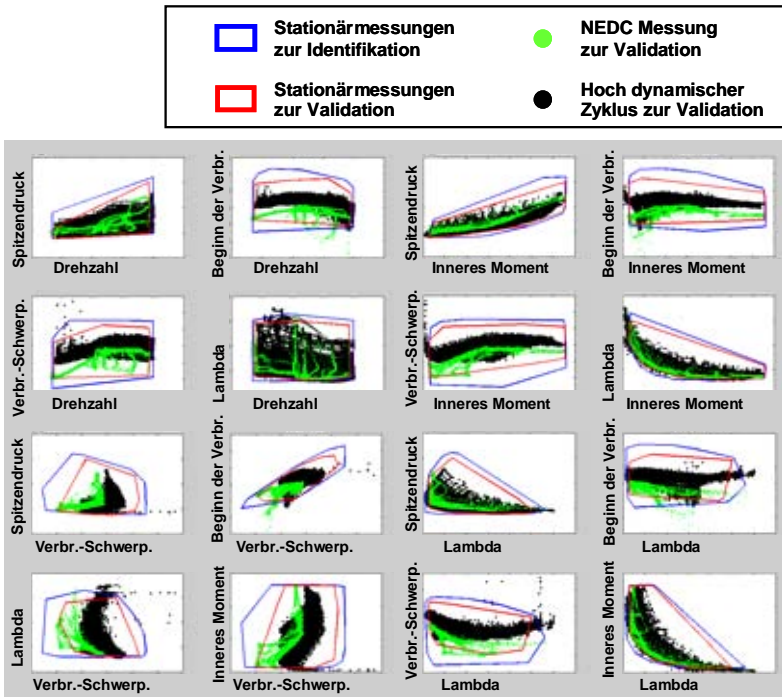


Abbildung 7-2: Zweidimensionale Datenraumabdeckung ausgewählter Verbrennungskenngrößen

Es kann also für den weiteren Verlauf von einer ausreichend großen Datenraumabdeckung für die hier beabsichtigte Anwendung ausgegangen werden, die außer für den Bereich negativer effektiver Momente keine Extrapolation der Modelle erfordert und eine ausreichende Abstützung zur stabilen Modellbildung bietet.

7.2 Thermodynamische Kenngrößen

Der Hintergrund der Verwendung thermodynamischer Kenngrößen als Bindeglied zwischen Gasdynamik- und Verbrennungsmodell sowie die Notwendigkeit einer entsprechenden Qualifikationsmethodik wurde bereits in Abschnitt 5.3 ausführlich dargelegt. Obwohl die in diesem Abschnitt angewendete Qualifikationsmethodik den Anspruch auf Allgemeingültigkeit erhebt, bezieht sich die hier getroffene Auswahl auf den gewählten Versuchsträger innerhalb der vorliegenden Versuchsumgebung und kann für andere Motoren unterschiedlich ausfallen. Dennoch soll hier, neben der für den weiteren Modellierungsprozeß entscheidenden Qualifikation thermodynamischer Kenngrößen, auch der Nachweis für die Methode selbst erbracht werden. Aufgrund des erheblichen Umfangs wird das Qualifikationsverfahren nur beispielhaft für die Ausgangsgröße Stickoxidemission vorgestellt und diskutiert. Abgesehen von der thermodynamischen Ursache-Wirkungskette für die jeweilige Ausgangsgröße (vergleiche Abschnitt 5.3.2.1) ergeben sich für die weiteren Qualifikationskriterien keine grundlegenden Unterschiede oder Erkenntnisse bei anderen Prozeßausgangsgrößen.

7.2.1 Qualifikationsverfahren

Das bereits in Abschnitt 5.3.1 eingeführte Qualifikationsverfahren unterscheidet in ausschließende und qualifizierende Kriterien, die im Folgenden angewendet werden sollen. Zum besseren Überblick der Vorgehensweise sei auf Tabelle 5-2 in Abschnitt 5.3.2 verwiesen.

7.2.1.1 Ausschlußverfahren

Für eine von der Motorregelung unabhängige Entwicklungsumgebung, wie beispielsweise die MiL-Umgebung, aber auch um von möglicherweise unbekanntem Signalverarbeitungsroutinen der ECU unabhängig zu sein, sollen die thermodynamischen Kenngrößen keine Größen aus Sensoren, Aktuatoren oder mittels Algorithmen gebildeten Signalen der Motorregelung verwenden. Andererseits müssen sie auf einem wie hier verwendeten standardmäßig ausgestatteten Prüfstand meßbar oder in Echtzeit aus Meßdaten zu berechnen sein. Schließlich soll die die Verbrennung charakterisierende Größe möglichst schnell und ungestört thermodynamische Effekte erfassen, was entfernte Meßstellen ausschließt. Eine in diesem Falle vorhandene Zylinderdruckindizierung erweist sich daher als sehr vorteilhaft für diesen Zweck und ist unbedingt zu empfehlen.

Unter Berücksichtigung der vorliegenden Kriterien können folgende Größen als potentielle Kandidaten für das weitere Qualifikationsverfahren identifiziert werden:

- # 1 Drehzahl N
- # 2 Indizierter Mitteldruck $IMEP$
- # 3 Brenndauer (Abstand A_{SOC} zu A_{I90}) $Comb. dur.$
- # 4 Maximaler Zylinderdruck P_{Max}
- # 5 Maximaler Druckgradient PG_{Max}
- # 6 Kompressionsdruck im Zylinder vor Beginn der Einspritzung P_{40}
- # 7 Position Start der Verbrennung A_{SOC}
- # 8 Zündverzögerung der Haupteinspritzung $T_{Delay, MI}$
- # 9 Position Verbrennungsschwerpunkt (50% Energieumsatz) A_{I50}
- # 10 Position Verbrennungsende (90% Energieumsatz) A_{I90}
- # 11 Kraftstoff-Luftverhältnis $Lambda$
- # 12 Turbinen Drehzahl des Turbolades N_{Turbo}
- # 13 Gasdruck im Auslaßkrümmer P_3

Weitere, theoretisch vielversprechende Größen wie Einlaßtemperatur, AGR-Rate oder den Zustand im Zylinder beschreibende Größen, wurden für dieses Modellierungskonzept aus den genannten Gründen nicht zugelassen.

7.2.1.2 Qualifikationskriterien

Das wichtigste Kriterium besteht in der physikalischbasierten Ursache-Wirkungskette, die mittels theoretischer Überlegungen aus bekannten thermodynamischen Zusammenhängen ermittelt wird. Wie schon diskutiert, sind wegen der hoch komplexen und gekoppelten Prozesse in Verbrennungsmotoren teilweise Ersatzkennwerte zu finden, um hiermit nicht am Ausschlußverfahren zu scheitern. Wie sich in diesem Fall herausstellte, ist eine absolute bzw. restriktive Auswahl nicht zielführend, sondern eine individuelle Wertung nach Relevanz für den betrachteten Prozeßausgang als quantifizierendes Kriterium der finalen Bewertungsmatrix sinnvoll. Beispielhaft für den hier betrachteten Prozeßausgang Stickoxidemission sind die schon in Abschnitt 5.3.2.1 gewonnen Erkenntnisse in Abbildung 7-3 dargestellt. Drehzahl, indizierter Mitteldruck, Lambda und die Position des Verbrennungsschwerpunktes sind danach die für diesen Prozeßausgang relevantesten Kenngrößen, während Gasdruck im Auslaßkrümmer, Turbinen Drehzahl und Position des Verbrennungsendes kaum entscheidend sind.

Als Randbedingung empirischer Modellierungsverfahren muß eine Kenngröße ein möglichst exklusiver Informationsträger der gewünschten Information sein. Eine Anhängigkeit von weiteren Kenngrößen führt zu schlechterer Qualität und geringem Gültigkeitsbereich des Modells. Berechnet man die effektive Raumabdeckung einer Kombination von Kenngrößen über die konvexe Hülle verfügbarer Meßdaten

und vergleicht diese mit einer ideal orthogonalen Raumabdeckung, erhält man eine numerisch auswertbare Größe, die hier zur Bewertung dieses Kriteriums herangezogen wird. Kenngrößen, die öfter in Kombinationen mit relativ hoher Raumabdeckung vorkommen, sind in diesem Fall besser geeignet. Das Ergebnis dieser Methode ist in Abbildung 7-4 dargestellt, wo für eine verschiedene Anzahl an Eingängen ihre jeweilige relative Häufigkeit in Kombinationen mit bester Raumabdeckung gezeigt ist.

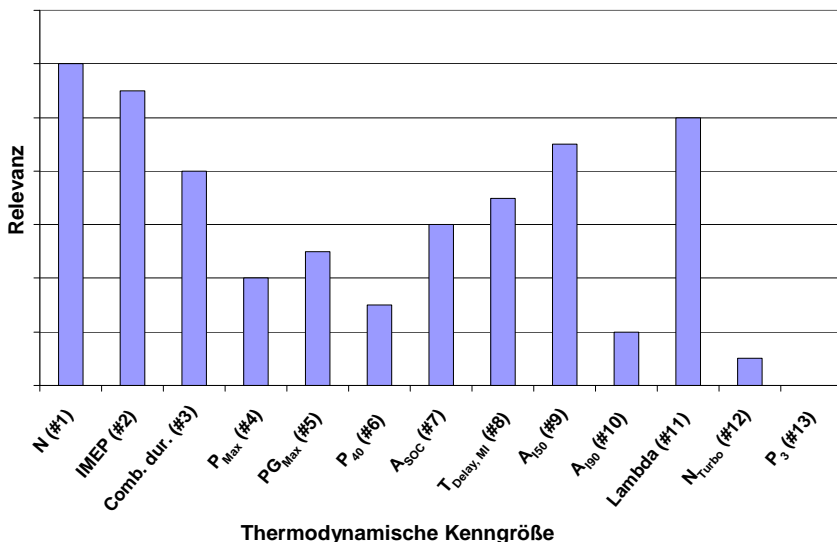


Abbildung 7-3: Qualifizierung im Kriterium „Physikalischbasierte Ursache-Wirkungskette“

In diesem Falle scheint die Anzahl der Eingänge nicht signifikant für die Eignung der Kenngröße zu sein (wenn man die relative Häufigkeit um die zwangsläufige Zunahme mit einer höheren Anzahl an Kenngrößen kompensiert), was die zugrundeliegenden Annahmen des Kriteriums bestätigt. Eine Differenzierung der Kenngrößen durch dieses Kriterium ist ersichtlich und auch wahrscheinlich, da gleiche motorische Phänomene oder Effekte durch unterschiedliche Kenngrößenkombinationen beschrieben werden können (vgl. Abschnitt 5.3.2.1), aber womöglich nicht optimaler bzw. exklusiver Träger der jeweiligen Information sind. Aus Abbildung 7-4 ist ersichtlich, daß beim vorliegenden Versuchsträger die Kenngrößen Drehzahl, Lambda und Brenndauer die größte effektive Raumabdeckung erzielen, was theoretisch gut nachvollzogen werden kann. Über die vorhandenen Stellmöglichkeiten der Motorsteuerung ist bei konstanter Drehzahl und Last (resultierend aus der Brenndauer) eine hohe Bandbreite im Kraftstoff-Luftverhältnis beispielsweise über Veränderung der AGR-Rate möglich. Maximaler Zylinderdruck

während der Verbrennung und Kompressionsdruck im Zylinder vor Beginn der Einspritzung dagegen weisen eine geringe Raumabdeckung und damit eine Abhängigkeit voneinander aus. Auch dies läßt sich theoretisch gut nachvollziehen.

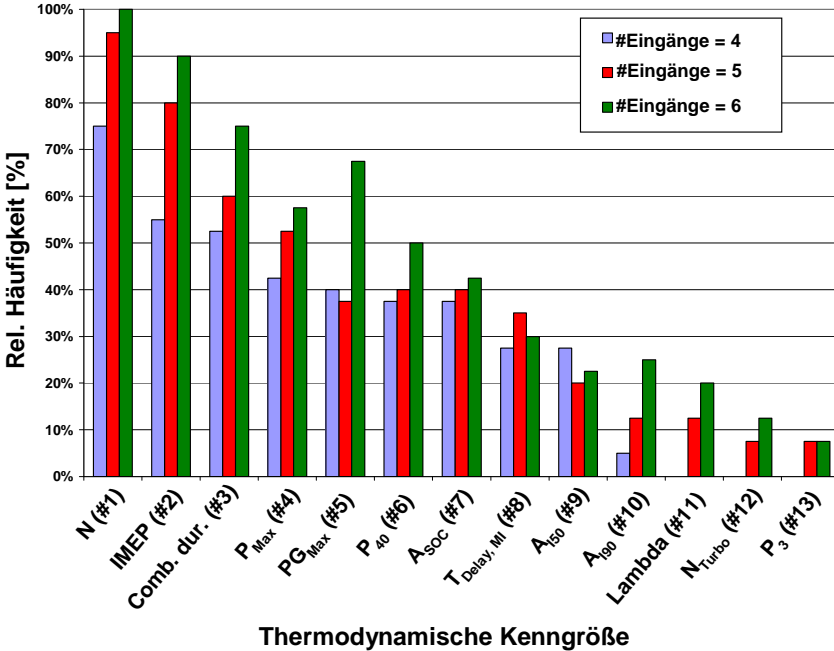


Abbildung 7-4: Qualifizierung im Kriterium „exklusiver Informationsträger“

Bei Verwendung empirischer Strukturen zur dynamischen Modellbildung ist außerdem die Signalverfügbarkeit und -qualität von hoher Bedeutung. Totzeiten, Transportverzögerung oder Sensoransprechverhalten müssen gering sein, um eine klare Zuordnung zum entsprechenden Verbrennungszyklus zu erlauben und eventuelle Signalspitzen überhaupt zu detektieren. Zur Verfügbarkeitsbewertung können Sprungantworten in diesen Kriterien ausgewertet werden, für die Signalqualität zählen ein geringer Störpegel, hohe Stabilität und gute Reproduzierbarkeit. Entsprechende Bewertungskriterien und -methoden hierfür wurden bereits in Abschnitt 5.3.2.3 eingeführt. Eine integrale Bewertung dieser Aspekte für die verfügbaren thermodynamischen Kenngrößen ist in Abbildung 7-5 grafisch gegeben, woraus eine durchaus unterschiedliche Eignung der möglichen Kenngrößen ersichtlich wird. Während aufgrund der Vorauswahl durch das Ausschlußverfahren die Signalverfügbarkeit relativ gut und einheitlich ist, zeigen einige Größen in der Signalqualität durchaus große Schwächen, was individuell auf Meßverfahren, Berechnung oder Wertebereich zurückzuführen ist. Beispielsweise ist der maxima-

le Zylinderdruckgradient zwar aufgrund der arbeitsspielsynchronen Abtastung des Indiziersystems sehr gut verfügbar, die Qualität des Signals wird aber als schlecht bewertet. Dies liegt daran, daß dieser Größe unvermeidbare höherfrequente Störsignale überlagert sind, die sich bei dem vergleichsweise geringen Wertebereich besonders in der notwendigen Ableitung des Zylinderdruckverlaufs deutlich bemerkbar machen. Zudem ist bekannt, daß gerade der maximale Zylinderdruckgradient sehr sensibel auf kleinste Störungen im Brennverfahren reagiert und somit tendenziell instabiler ist. Das Kraftstoff-Luftverhältnis λ dagegen ist stabil zu bestimmen, wird aber hier von der Signalverfügbarkeit als am schlechtesten bewertet. Dies ist auf die vom Zylinder entfernte Meßstelle und das vom λ -Sensor bedingte Ansprechverhalten zurückzuführen.

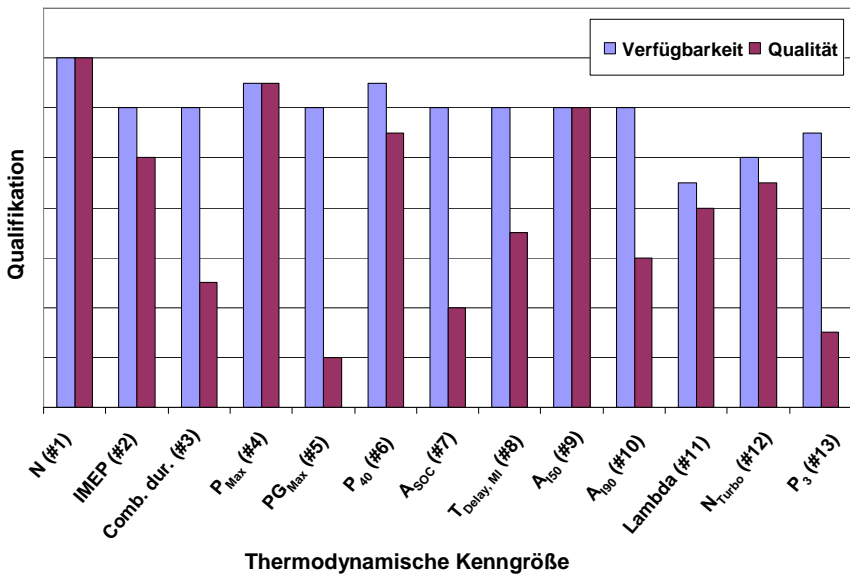


Abbildung 7-5: Qualifizierung im Kriterium „Signalverfügbarkeit und -qualität“

Ein weiteres Kriterium der finalen Qualifikationsmatrix ist die Eignung der Kenngrößen für statische bzw. dynamische Modellbildung. In dieser Modellarchitektur sind thermodynamische Kenngrößen die Ausgänge der jeweiligen dynamischen Modelle und als Kombination der Eingangsvektor der statischen Modelle. Daher ist die Eignung für dynamische Modellierung direkt aus der erreichbaren dynamischen Modellqualität abzuleiten, während die Eignung für statische Modellierung nur indirekt über den jeweiligen Beitrag der Kenngröße zur erreichbaren statischen Qualität erfaßbar ist. Zur Analyse des jeweiligen Beitrags wurde eine vollfaktorische Studie aller möglichen Kombinationen der thermodynamischen Kenngrößen durchgeführt und die jeweilige Häufigkeit der betrachteten Kenngrößen in

statischen Modellen hoher Qualität errechnet. Hohe Häufigkeit wird dabei als gute Eignung interpretiert. Die Bewertung der Kenngrößen in diesem Kriterium zeigt Abbildung 7-6 beispielhaft für die betrachtete Ausgangsgröße der Stickoxidemission. Es zeigt sich eine gerade in der dynamischen Modellqualität offensichtliche, deutliche Differenzierung, die größtenteils mit der Bewertung der statischen Qualität übereinstimmt. Während im Falle des maximalen Zylinderdruckgradienten eine Analogie zum vorherigen Kriterium naheliegen würde, kann dies generell nicht bestätigt werden. Speziell mit den Ergebnissen der Kenngröße Lambda oder auch dem Gasdruck im Auslaßkrümmer ist ein eindeutiger Zusammenhang zwischen diesen Kriterien widerlegt und somit ein Rückschluß von der Signalqualität auf die Modellierungsqualität generell nicht möglich. Dabei ist die hier gute Qualifizierung der Kenngröße Lambda besonders auffällig. Zudem bemerkenswert ist die grundsätzlich schlechtere Modellqualität in dynamischen und statischen Modellen bei aus Meßwerten zusammengesetzten Kenngrößen, wie Brenndauer oder Zündverzug. Hier ist offensichtlich die Fehleraddition der einzelnen Einflußgrößen maßgeblich.

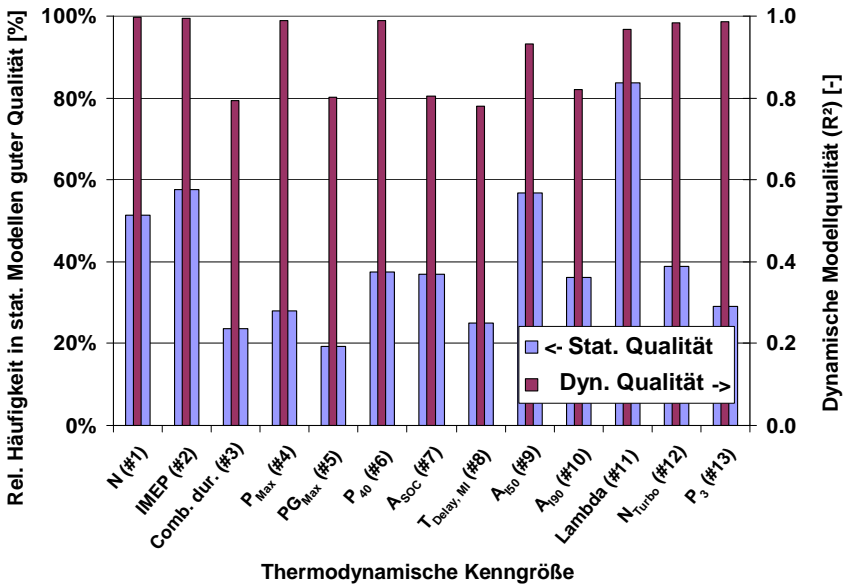


Abbildung 7-6: Qualifizierung im Kriterium „Eignung für statische und dynamische Modellierung“

7.2.1.3 Gesamtqualifikation

Schließlich können alle bewerteten Kategorien in einer gewichtenden Matrix kombiniert werden, deren Ergebnis in Abbildung 7-7 für den gewählten Ausgang Stickoxidemission dargestellt ist. Diese Auswertung erlaubt eine Auswahl der hoch relevanten Kenngrößen abhängig von der gewünschten Anzahl der Eingänge.

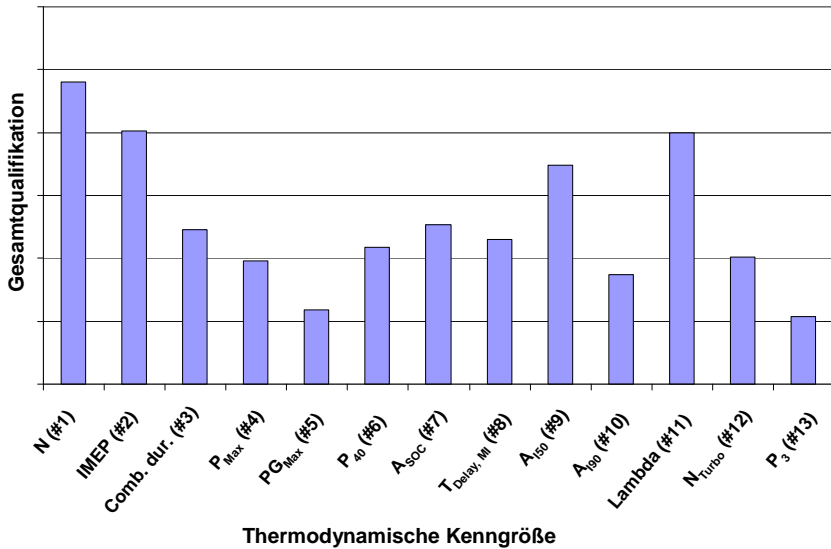


Abbildung 7-7: Gesamtqualifikation thermodynamischer Kenngrößen für Prozeßausgang NO_x

In diesem Fall haben vier Kenngrößen (#1, #2, #9, #11) eine hoch gewichtete Qualifikation für den betrachteten Prozeßausgang, während die verbleibenden möglichen Kenngrößen signifikant geringere Eignung aufweisen, was eine Verwendung von mindestens vier thermodynamischen Kenngrößen impliziert. Verglichen mit der ursprünglichen Bewertung im Kriterium „Physikalischbasierte Ursache-Wirkungskette“ sind somit die schon dort als hoch relevant eingestufteten Kenngrößen Drehzahl, indizierter Mitteldruck, Lambda und Position des Verbrennungsschwerpunktes auch unter Berücksichtigung empirischer Modellierungsbedingungen als hoch qualifiziert zu betrachten. Gerade für die verbleibenden, nicht thermodynamisch so relevanten Kenngrößen, scheinen allerdings diese empirischen Modellierungsbedingungen entscheidend für die finale Qualifikation zu sein. So ist der maximale Zylinderdruckgradient nach dieser Gesamtbewertung als quasi ungeeignet zu betrachten. Andererseits werden Kenngrößen, die thermodynamisch für diesen Prozeßausgang nicht relevant waren, auch bei guter Bewertung in den

empirischen Kriterien schließlich als nicht geeignet bewertet, wie in diesem Falle der Gasdruck im Auslaßkrümmer.

Damit ist einerseits der im Modellierungskonzept verfolgte Anspruch nach Zwischengrößen beruhend auf nachvollziehbaren und thermodynamischen Grundlagen gewahrt und andererseits eine empirisch optimale Selektion bei zunehmend unsicherer theoretisch begründeter Qualifikation gegeben.

7.2.2 Validierung der Qualifikationsmethodik

Trotz dieser schlüssigen Analyse wurde zur zusätzlichen Validierung der Qualifikationsmethodik eine vollfaktorielle Studie des gesamten Motormodells durchgeführt, die alle möglichen Kombinationen aus vier bis sieben thermodynamischen Kenngrößen berücksichtigt. Die erreichte Modellqualität jeder Kombination hinsichtlich R^2 ist in Abbildung 7-8, geordnet nach Anzahl an Eingängen für den betrachteten Prozeßausgang mit blauen Kreisen, dargestellt. Die Breite der möglichen Abbildungsqualitäten ist dabei sehr hoch.

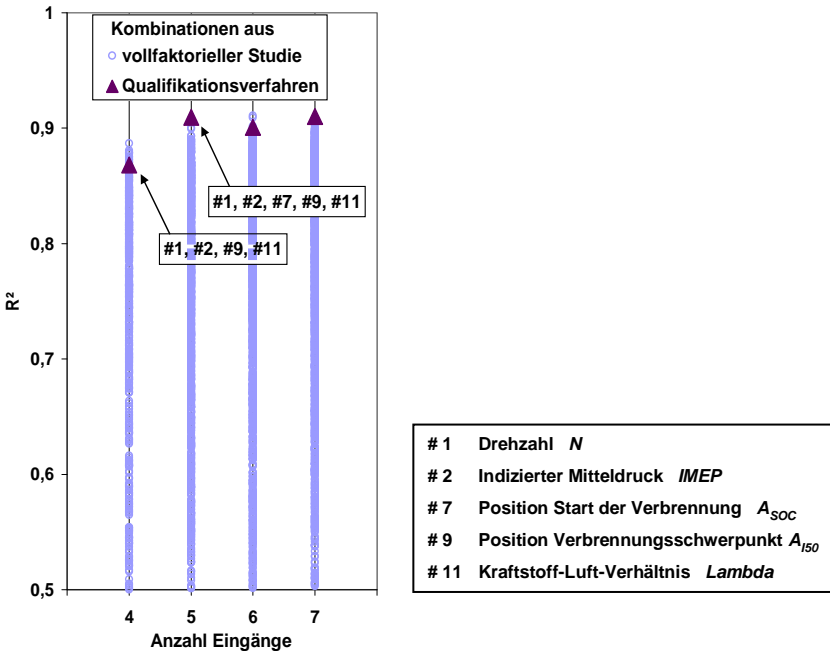


Abbildung 7-8: Modellqualität (R^2) der vollfaktoriellen Studie gegenüber bestgeeigneter Kombination gemäß Qualifikationsmethodik in Abbildung 7-7

Vergleicht man die gemäß der Qualifikationsmethodik empfohlenen Kombinationen nach Abbildung 7-7 (violette Dreiecke), zeigt sich deren relativ hohe Modellgüte gemessen in R^2 , die nahe der maximal möglichen numerischen Qualität ist. Dieses Ergebnis korreliert mit einer Vielzahl ähnlicher Untersuchungen für andere Prozeßausgänge, was die Effizienz der angewandten Methodik bestätigt, zumal weitere Modellierungsaspekte wie Modellgültigkeit oder Signalqualität berücksichtigt werden, die vor allem die Robustheit des Modells sicherstellen, aber keinen Einfluß auf die numerische Abbildungsgenauigkeit haben. Ab einer Verwendung von fünf Kenngrößen kann auch die numerisch beste Qualität nicht mehr gesteigert werden, was mit der Erkenntnis aus dem Qualifikationsverfahren gut übereinstimmt.

Es kann also festgehalten werden, daß die hier entwickelte Qualifikationsmethodik ein zielführendes Verfahren zur Auswahl thermodynamischer Kenngrößen im Zusammenhang mit dem gewählten Modellierungskonzept darstellt, das neben theoretischen Überlegungen auch praktische Aspekte wie erreichbare Modellqualität, Reproduzierbarkeit und generellen Meßaufwand beinhaltet.

7.3 *Sensordynamik*

Die Ergebnisse der gemäß Versuchsplanung je nach Systemklasse unterschiedlich identifizierten Sensordynamik sind im Folgenden beispielhaft für einen Temperatursensor und für die Abgasanalysatoren gezeigt.

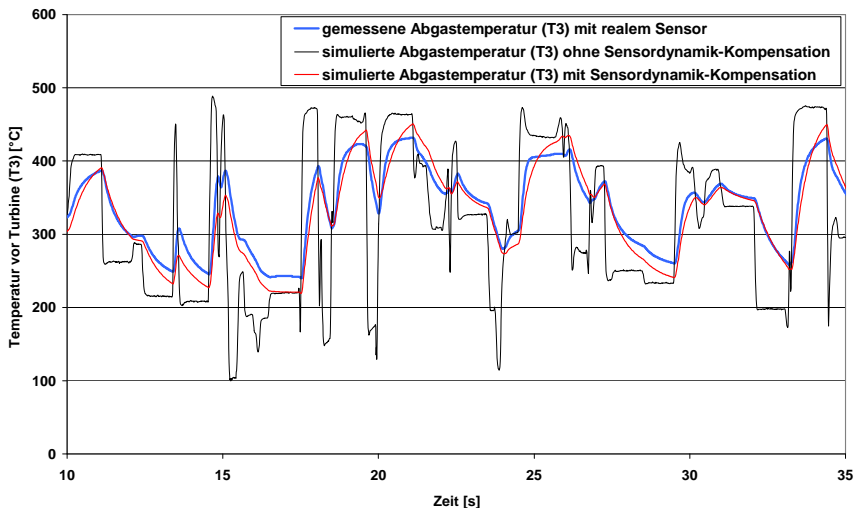


Abbildung 7-9: Sensordynamik Kompensation für Abgastemperatur T_3

Die Auswirkung der im Falle der Abgastemperatur T_3 durchgeführten Sensordynamikidentifikation aus transienten Meßdaten auf das unbehandelte Signal aus der Verbrennungssimulation (schwarze Linie) ist in Abbildung 7-9 dargestellt. Man erkennt zunächst die starke Verzerrung der Daten aufgrund des trägen Temperatursensors (blaue Linie). Durch die Dynamikkompensation (rote Linie) kann aber der real gemessene Verlauf gut aus den unkompensierten Daten der Verbrennungssimulation wiedergegeben werden, was die getroffenen Annahmen der Versuchsplanung bestätigt.

Die zur Identifikation der Sensordynamik der Abgasanalytoren eigens vermessene Datenreihe mittels Prüfgaseindüsung liefert eine vom Abgasmassenstrom abhängige Totzeit und ein von der jeweiligen Konzentration der Abgaskomponente abhängiges verzögertes Ansprechverhalten. Wie in Abbildung 7-10 gezeigt, liefert die Methode für das höchst unterschiedliche Verhalten der Analytoren eine gute Approximation, die für diesen Anwendungszweck in ihrer Genauigkeit ausreichend ist. Auch hier scheinen die Hypothesen in Modellierungsstruktur und Dynamikverhalten bestätigt.

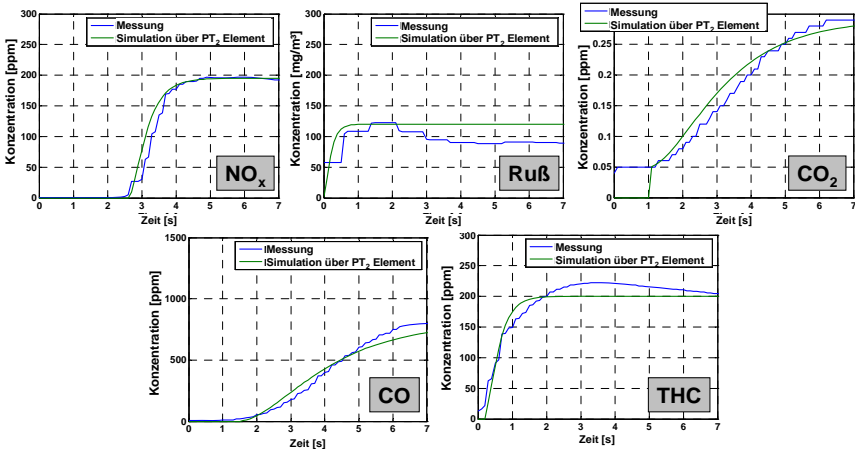


Abbildung 7-10: Nachbildung des Abgasanalysator-Ansprechverhaltens

7.4 Statische Modellbildung

Gemäß dem in dieser Arbeit verfolgten Modellansatz ist der Zusammenhang zwischen thermodynamischen Kenngrößen und den Ausgangsgrößen des Verbrennungsprozesses statisch modellierbar. Die hierfür stationär vermessenen Datenpunkte wurden zur Evaluierung mehrerer Optionen sowohl in der Auswahl des Approximators als auch im Aufbau der globalen Modellstruktur entsprechend gewählt (siehe Abschnitt 5.2.2). Neben der bestmöglichen Abbildungsqualität muß

dabei die Robustheit der Modelle auch in Randbereichen beachtet werden, um die Stabilität des Gesamtansatzes sicherzustellen. Da im Prinzip die statische Modellbildung als Stand der Technik bezeichnet werden kann, liegt der Fokus dieses Abschnittes auf der Auswahl und Kombination bekannter Techniken zur optimalen Integration in die Gesamtmodellarchitektur.

Im Folgenden werden daher zunächst auf Basis der vermessenen Datenpunkte die Möglichkeiten globaler Modellbildung analysiert, bevor die Leistungsfähigkeit verschiedener Approximatoren für diese Anwendung bewertet wird. Anschließend wird die Anzahl verwendeter Modelleingänge, in diesem Fall die thermodynamischen Kenngrößen, auf die Ergebnisqualität der Ausgänge diskutiert.

7.4.1 Strukturelle Möglichkeiten globaler Modellbildung

Während stationär lokale Zusammenhänge motorischen Verhaltens mit einfachen Polynomansätzen zweiter oder maximal dritter Ordnung ausreichend gut modelliert werden können, ist eine betriebspunktübergreifende Modellierung häufig durch die Dominanz von Drehzahl und Last auf lokale Variationen beispielsweise von Aktuatoren der Motorregelung nicht ausreichend sensibel. Andererseits werden bei lokaler Modellbildung globale Zusammenhänge nicht erfaßt, was bei der dann notwendigen Interpolation zwischen lokalen Modellen häufig zu großen Fehlern führt. Aufgrund der geringen Erfahrung mit der hier vorliegenden Ein- und Ausgangsgrößenkombination wurden die zwei möglichen Modellbildungsstrategien mit den vorliegenden Meßdaten im Folgenden nochmals untersucht.

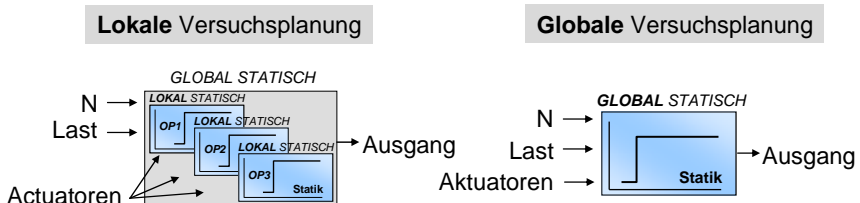


Abbildung 7-11: Auswirkungen von lokaler und globaler Versuchsplanung auf die Modellbildung

Mittels der verfügbaren unterschiedlichen Meßreihen lokaler wie globaler Versuchsplanung konnte ein aus lokalen Variationen über den FNN-Algorithmus partitioniertes Modell einem aus globalen Daten trainierten FNN-Modell gegenüber gestellt werden, vergleiche Abbildung 7-11. Der in den Randbedingungen beider Ansätze ähnliche Vergleich zeigt im erreichten Korrelationskoeffizienten R^2 der Verifikationsdaten auch in diesem Fall die bekannte, klassische Problematik auf, Abbildung 7-12. Während die Modellqualität in den Trainingspunkten (OP 1 bis OP 3) des aus lokalen Variationen partitionierten Modells (blaue Balken) leicht besser gegenüber dem globalen Modellansatz (rote Balken) ist, zeigt jener außerhalb dieser Trainingspunkte (OP 4 bis OP 6) eine teilweise deutlich bessere Modellqualität.

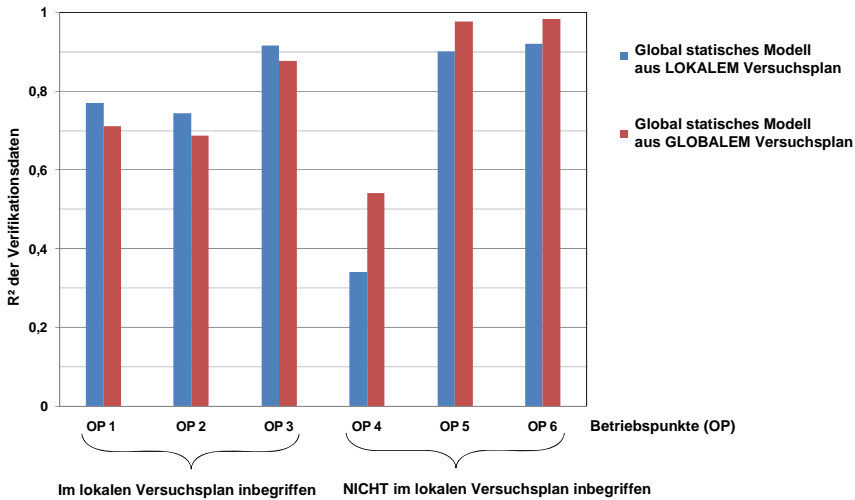


Abbildung 7-12: Vergleich Qualität globaler Modelle mittels lokaler und globaler Versuchsplanung

Damit erscheint eine Modellierung basierend auf globaler Versuchsplanung für die hier verfolgte Gesamtmodellarchitektur auch bei gegenüber konventionellen Ansätzen veränderter Ein- und Ausgangsgrößenkombinationen vorteilhafter, da von einer überproportionalen Relevanz spezieller lokaler Betriebspunkte generell nicht ausgegangen werden kann. Zusätzlich ist die Anzahl der notwendigen Messungen einer globalen gegenüber einer lokalen Versuchsplanung mit notwendigerweise relativ vielen Betriebspunkten deutlich geringer (vgl. Abschnitt 6.3.2.2), was zusätzlich für die globale Versuchsplanung spricht.

7.4.2 Vergleich statischer Approximatoren

Zur Bestimmung eines funktionalen Zusammenhanges zwischen den hier vorliegenden thermodynamischen Kenngrößen als Eingängen und den motorischen Prozeßausgangsgrößen kommen gemäß Abschnitt 5.2.2.2 verschiedene Approximatoren in Frage, die individuelle Vorteile bieten. Im Rahmen dieser Anwendung wird besonders auf erreichbare Abbildungsqualität bei guter Stabilität auch in Randbereichen des Gültigkeitsfensters Wert gelegt. Um dies für die möglichen Approximatoren FPM, FNN und INN zu evaluieren, werden jeweils globale Modelle mit fünf thermodynamischen Kenngrößen als Eingängen trainiert, die die als höchst nichtlinear eingestuften Schadstoffemissionen NO_x , Ruß und THC als Ausgang abbilden sollen. Während für den Polynommodellansatz mittels FPM ein kubischer Ansatz gewählt wurde, sind für die neuronalen Netze FNN und INN maximal 10 lineare Teilmodelle zugelassen, um in der Anzahl der freien Modellko-

effizienten in etwa gleiche Bedingungen zu schaffen, was sich wiederum auf die Stabilität der Modelle auswirken kann.

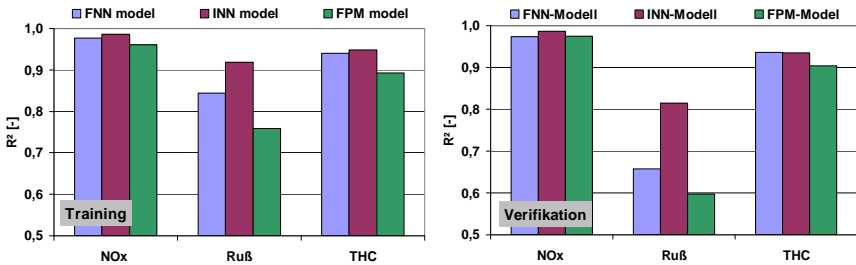


Abbildung 7-13: Erreichbare Modellqualität mit unterschiedlichen Approximatoren

Die Auswertung der erreichten Modellqualität in Abbildung 7-13 zeigt sowohl im Training wie auch mit Verifikationsdaten eine eindeutige Überlegenheit der INN speziell bei der Rußemission, was wegen der besseren Approximationsfähigkeit nichtlinearer Zusammenhänge durch mehrere Teilmodelle gegenüber den FPM zu erwarten war. Der Vorteil der effizienteren Platzierung der Teilmodelle im INN Algorithmus gegenüber dem FNN Algorithmus wird ebenfalls im Ruß deutlich, während sich für die übrigen abgebildeten Ausgangsgrößen keine signifikante Verbesserung ergibt.

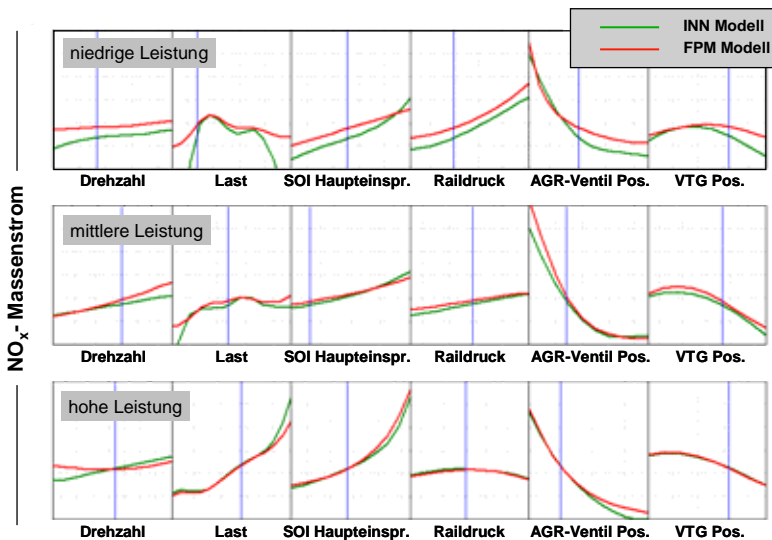


Abbildung 7-14: Intersection Plot der Stickoxidemission bei unterschiedlichen Approximatoren

Zur Bewertung der Stabilität der Modelle in den Randbereichen wurden Intersection Plots über Sternvariationen der Modelleingänge berechnet, die 20% außerhalb des Modellgültigkeitsbereichs lagen. Somit wurde eine Extrapolation der jeweiligen Modelle erzwungen, um die Verläufe in den Randbereichen bewerten zu können. In Abbildung 7-14 ist beispielhaft ein Intersection Plot für die Stickoxidemission in drei verschiedenen Betriebspunkten (niedrige, mittlere und hohe Leistung) für den FPM- und INN- Ansatz dargestellt. Trotz Unterschiede im absoluten Wert sind die Trends sehr ähnlich und in den Randbereichen für beide Modellansätze unauffällig. Zusammen mit den ähnlichen Ergebnissen der Intersection Plots für Ruß- und THC Emission, kann geschlossen werden, daß diese Betrachtung keinen Ausschlag für die Wahl des Approximators liefert.

Zusammenfassend ist also eine Präferenz für die intelligenten neuronalen Netze INN festzustellen, die eine signifikant bessere Abbildungsqualität bei gleichem Verhalten in Randbereichen erreichen. Dies war bereits aus den mathematischen Eigenschaften dieses Approximators zu erwarten und bestätigt daher die hier untersuchten Zusammenhänge.

7.4.3 Einfluß der Anzahl thermodynamischer Kenngrößen

Es wurde in Abschnitt 5.3 gezeigt, daß nur mittels theoretischer Überlegungen keine zwingende Kombination thermodynamischer Kenngrößen für einen Prozeßausgang gefunden werden kann. Die hier entwickelte Qualifikationsmethodik erlaubt aber eine aus verschiedenen Aspekten zusammengesetzte Bewertung verfügbarer Kenngrößen nach Eignung für dieses Modellierungskonzept. Offen bleibt die letztlich zu verwendende Anzahl, die einerseits möglichst hoch zur Abdeckung aller thermodynamischen Effekte und andererseits möglichst gering zur Vermeidung empirischer Überbestimmung sein sollte. Das beispielhaft an den Stickoxidemissionen demonstrierte Qualifikationsverfahren in Abschnitt 7.2.1 implizierte eine Anzahl von wenigstens vier Kenngrößen aufgrund der signifikant höheren Qualifikationswerte, kann aber alleine keine endgültige Entscheidung in dieser Thematik herbeiführen, da schließlich alle untersuchten Kenngrößen eine gewisse Qualifikation aufweisen.

Um die empirischen Auswirkungen näher zu untersuchen, wurde daher eine vollfaktorielle Untersuchung aller möglichen Eingangskombinationen von vier bis acht thermodynamischen Kenngrößen für den statischen Modellteil in den Ausgängen NO_x , Ruß und THC durchgeführt. Die jeweils mit Verifikationsdaten erreichte Modellqualität unter Verwendung des INN-Algorithmus, gemessen in R^2 , ist in Abbildung 7-15 über der Anzahl der Eingänge dargestellt, wobei jede mögliche Kombination durch ein einzelnes Symbol in das Diagramm eingeht. Es ist zunächst erkennbar, daß für alle betrachteten Ausgänge die jeweils schlechtesten Modelle mit steigender Anzahl an Eingängen deutlich an Qualität gewinnen. Das

bedeutet selbst bei ungünstig ausgewählten Eingangskombinationen eine womöglich akzeptable Modellqualität bei entsprechender Anzahl an Eingängen. Auf der anderen Seite läßt sich die beste zu erreichende Modellqualität ab fünf Eingängen nicht mehr steigern, was im Umkehrschluß bedeutet, daß mit einer höheren Anzahl an Eingängen eine nicht optimal gewählte Eingangskombination kompensiert wird. Dies ist aber beispielsweise wegen der verringerten Eingangsraumausdehnung nicht vorteilhaft, da damit eine weite Modellgültigkeit verhindert wird. Eine optimale Anzahl an thermodynamischen Kenngrößen wäre daher zu diesem Zeitpunkt mit fünf zu beziffern, wobei allerdings noch keinerlei Einflüsse resultierend aus der dynamischen Modellbildung berücksichtigt sind.

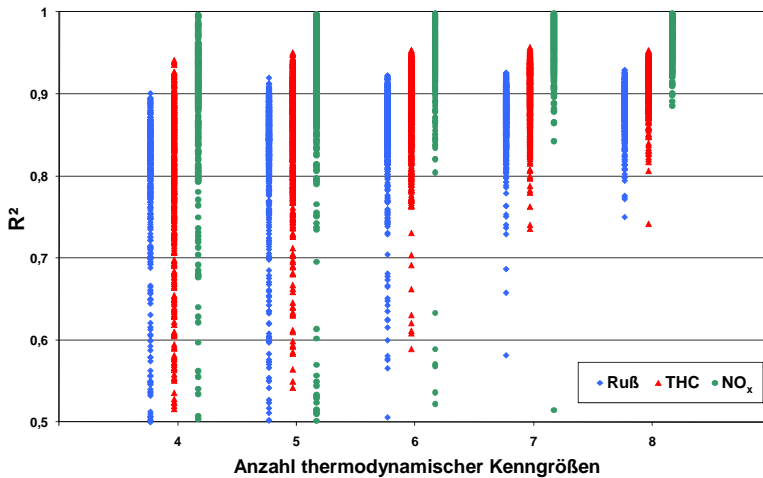


Abbildung 7-15: Erreichbare statische Modellqualität über Anzahl thermodynamischer Kenngrößen

In diesem Zusammenhang wäre die aus Abbildung 7-15 nicht zu erkennende Zusammensetzung der genauesten Modelle hinsichtlich ihrer Verwendung von thermodynamischen Kenngrößen interessant. So stellt sich die Frage, ob hier die für den Gesamtansatz unterstellte Relevanz bestimmter thermodynamischer Kenngrößen nachweisbar ist oder ob rein empirisch eine jeweils beliebige Kombination zum besten Ergebnis führt. Um dies zu evaluieren, wurde die relative Häufigkeit der verwendeten Kenngrößen in den jeweils 40 besten Modellen (hinsichtlich R^2) der vollfaktoriellen Studie untersucht und nach Anzahl der jeweils verwendeten Eingänge in Abbildung 7-16 beispielhaft für den Prozeßausgang Stickoxidemission aufgetragen. Es zeigt sich deutlich die Dominanz der zwei Kenngrößen #2 und #11 (Lambda und indizierter Mitteldruck), die unabhängig von der verwendeten Anzahl an Eingängen ist und auch thermodynamisch als hoch relevant bewertet wurden. Die bei diesen Kenngrößen ab fünf verwendeten Eingängen

auftretende relative Häufigkeit von 100% bedeutet, daß ohne diese zwei Kenngrößen keine sehr gute Modellqualität erreichbar ist, diese Kenngrößen also für die Modellierung dieses Prozeßausgangs absolut entscheidend sind. Auch für weitere häufig vorkommende Kenngrößen, wie #4, #6 oder #9 läßt sich generell feststellen, daß die Relation zu anderen Kenngrößen unabhängig von der Anzahl der Eingänge erhalten bleibt, wobei beachtet werden muß, daß bei einer höheren Anzahl an Eingängen die relative Häufigkeit zwangsläufig zunehmen muß. Diese Tatsache würde auch erklären, warum ab fünf Eingängen keine signifikant höhere Modellqualität mehr erreichbar ist. Offensichtlich können hiermit bereits die wesentlichen Zusammenhänge zwischen Eingängen und Ausgang abgedeckt werden, so daß zusätzliche Informationen aus weiteren Kenngrößen keine Verbesserungen mehr bringen.

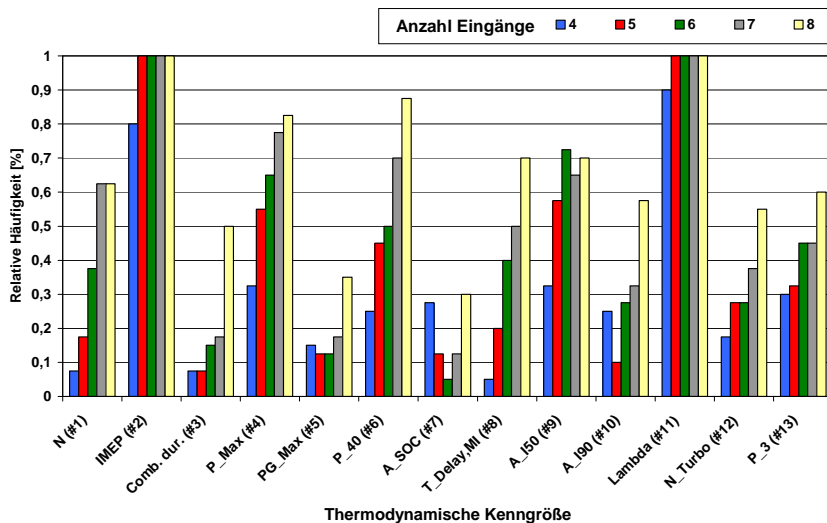


Abbildung 7-16: Relevanz thermodynamischer Kenngrößen für statisch gute Modellqualität im Prozeßausgang NO_x

Somit kann davon ausgegangen werden, daß tatsächlich bestimmte thermodynamische Kenngrößen unabhängig von der Gesamtanzahl im Eingangsvektor des statischen Modells eine höhere Relevanz besitzen und daher die in der Qualifikationsmethodik verwendete Bewertung in diesem Kriterium unabhängig von der verwendeten Anzahl ist. Dies wird auch durch die ähnlichen Ergebnisse der gleichen Untersuchung für die Prozeßausgänge Ruß und THC bestätigt. Zu beachten ist allerdings, daß die hier gefundenen fünf Kenngrößen mit der höchsten relativen Häufigkeit (#2, #4, #6, #9, #11) nicht allesamt die gleichen aus der finalen Qualifikationsmatrix (#1, #2, #7, #9, #11) sind, was durch den singulären Fokus auf die erreichbare statische Modellqualität erklärbar ist.

7.5 *Dynamische Modellbildung*

Zum Erreichen einer guten Modellqualität, der gegenüber den statischen weit weniger standardisierten und ausgereiften dynamischen Modellstrukturen, wurden bereits in Abschnitt 5.2.3 wichtige Randbedingungen in der Versuchsplanung festgelegt: Die Abbildung der Gasdynamik soll über einen Verbund lokal dynamischer Modelle realisiert werden, deren Größe und Platzierung eine Anregung aller relevanten Dynamiken bei ausreichend verteiltem Amplitudenspektrum erlaubt. Als Stimulationssignal wurde eine APRB Sequenz mit gleichverteilten Haltezeiten über alle Eingänge festgelegt, die neben der von außen aufgeprägten Drehzahl nur ECU-Aktuatoren enthalten darf. Die Ausgänge des globalen Gasdynamikmodells sind die thermodynamischen Kenngrößen, die dann als Eingang für das statische Verbrennungsmodell genutzt werden.

Im folgenden Abschnitt wird nachgewiesen, daß die vorgeschlagene Partitionierung des global dynamischen Modells, das gewählte dynamische Anregungsspektrum und der Aufbau der Modellstruktur inklusive dynamischem Approximator in der Lage sind, die vorliegende Dynamik des motorischen Prozesses reduziert auf die thermodynamischen Kenngrößen richtig nachzubilden. Dazu werden zunächst Fehlermaße für dynamische Modelle diskutiert, da derzeit aus der Literatur noch keine allgemeingültigen Kennwerte zur Qualitätsbewertung bekannt sind. Anschließend werden Parametrierung, Verhalten und Qualität der lokalen Modelle analysiert, bevor Ergebnisse der globalen Zusammenführung und Verschleifung untersucht werden.

7.5.1 Bewertung dynamischer Modellqualität

Die Bewertung der dynamischen Modellqualität stellt sich gegenüber der statischen schon deshalb deutlich schwieriger dar, weil im nicht eingeschwungenen Zustand zwischen Auswirkung von transienten Effekten und stationärer Verstärkung auf den momentanen Prozeßausgang nicht unterschieden werden kann. Eine Abweichung kann daher sowohl aus einem falsch approximierten statischen Verhalten, wie auch aus einem falsch geschätzten dynamischen Verlauf kommen. Hinzu kommt, daß bei dynamischen Messungen Rauschen das Nutzsignal verzerrt, was gegenüber stationären Zuständen deutlich schlechter zu kompensieren ist. Allgemein akzeptierte Fehlermaße für derartige dynamische Modelle sind daher in der Literatur nicht zu finden, weshalb häufig versucht wird, statische Kriterien auch auf dynamische Modelle anzuwenden, die dann allerdings keine Unterscheidung in der Ursache des Fehlers enthalten. Die Vor- und Nachteile ausgesuchter Kriterien sollen im Folgenden kurz vor dem Hintergrund dieser Anwendung diskutiert werden.

Die Abweichung bzw. der Fehler einer Simulation ist allgemein definiert als

$e = y - \hat{y}$, wobei y den Meßwert und \hat{y} den simulierten Wert bezeichnet.

Eine einfache Möglichkeit, einen Kennwert für den Fehlervektor zu erhalten, ist die Standardabweichung oder Varianz. Für diese Anwendung ist sie allerdings ungeeignet, weil eine konstante Abweichung in eine Richtung, was auch als „Offset“ bezeichnet wird, von der Standardabweichung nicht erfaßt werden kann.

Ein weiteres häufig verwendetes Fehlermaß ist die relative oder absolute Betrachtung des durchschnittlichen, quadrierten Fehlers. Während die aufkumulierte Betrachtung des quadratischen Fehlers MSE zwar sehr abstrakt ist und keine direkten Vergleiche zu anderen Signalen zuläßt, kann sie doch gut zum Vergleich der Modellqualität eines Ausgangs mit beispielsweise veränderten Approximator-einstellungen verwendet werden. Der relative Bezug auf den jeweiligen Meßwert (NRMSE) dagegen erlaubt eine gewisse Relation zu anderen Ausgängen, birgt aber die Gefahr der extremen Verzerrung in Bereichen nahe des Nullpunktes, was diese Größe für viele motorische Größen in transienten Zyklen ausschließt.

Formel 7-1:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (y - \hat{y})^2}{N}, \quad NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{y - \hat{y}}{y} \right)^2}{N}}$$

Wohl am häufigsten wird daher das Bestimmtheitsmaß R^2 verwendet, was durch den Bezug des aufkumulierten quadratischen Fehlers auf die Varianz einen Vergleich unterschiedlicher Signale zueinander zuläßt. Der Vorteil der Skalierung auf 1 bringt allerdings den Nachteil, keine greifbare Vorstellung vom tatsächlich auftretenden Fehler einer Simulation zu erhalten.

Formel 7-2:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y - \bar{y})^2}$$

Es wird daher an dieser Stelle die zusätzliche Bewertungskenngröße \bar{e}_{rel} als mittlerer relativer Fehler eingeführt, die eine leichtere Bewertung der tatsächlich auftretenden Fehler bei der jeweiligen Anwendung erlauben soll. Dabei wird der auftretende Fehler im Betrag über die Simulation gemittelt und auf den Wertebereich der Simulation bezogen. Somit ist beispielsweise für standardisierte Zyklen ein einfacher Vergleich unterschiedlicher Größen im Betriebsbereich des untersuchten Zyklus möglich.

Formel 7-3:

$$\bar{e}_{rel} = \frac{\sum_{i=1}^N |y - \hat{y}|}{N \cdot (y_{MAX} - y_{MIN})}$$

Alternativ zu diesen auf den Simulationsfehler bezogenen Größen können auch weitere Verfahren, wie Frequenzanalysen zur Bewertung der Dynamikabbildung verwendet werden. Hier ergibt sich allerdings die Schwierigkeit, numerisch aus-

wertbare, skalare Größen aus den Analysen zu bilden, die automatisiert z.B. während des Approximatortrainings verarbeitbar sind.

7.5.2 Lokal dynamische Modelle

Analog der in Abschnitt 7.4.2 mit statischen Datensätzen durchgeführten Approximatorbewertung wurde zunächst ein Vergleich der verfügbaren dynamischen Modellstrukturen anhand ausgewählten transients Daten durchgeführt. Gegenüber jenen Ergebnissen zeigte der Vergleich zwischen dynamischen FNN und dynamischen INN aber keine so deutlichen Unterschiede, weshalb hier eher aus Gründen der Einheitlichkeit ebenfalls für den INN-Algorithmus entschieden wurde.

Aufgrund der großen Datenmenge und der vielen lokalen Bereichsmodelle muß im Folgenden eine standardisierte, automatisierbare Vorgehensweise zur Bestimmung der nach Ausgang unterschiedlichen Totzeit und Anzahl der vom Approximator verwendeten Teilmodelle entwickelt werden. Aus Komplexitätsgründen wurde eine über die Partitionierungskanäle Drehzahl und Last unterschiedliche Totzeit bzw. Anzahl an Teilmodellen verworfen. Stattdessen konnten drei Betriebsbereiche mit niedriger, mittlerer und hoher Leistung als repräsentativ für die folgenden Untersuchungen identifiziert werden.

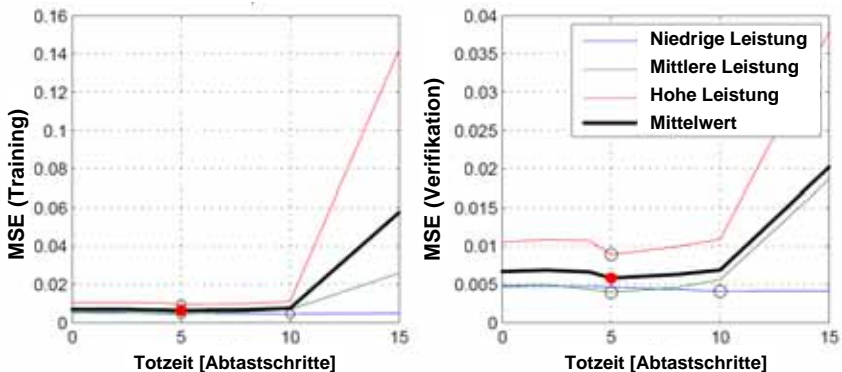


Abbildung 7-17: MSE-Verlauf über Totzeitvariation eines lokal dynamischen Modells

Da die Totzeit unabhängig von der Anzahl der Teilmodelle ist, wurde zunächst diese für alle Betriebsbereiche einheitlich über die Auswertung des MSE der simulierten lokalen Trainings- und Verifikationsdaten bestimmt. Da mehrere Betriebsbereiche betrachtet wurden, wurde das gemittelte Ergebnis herangezogen bzw. bei nicht eindeutigen Ergebnissen die niedrigere Totzeit gewählt, da die verbleibende Totzeit über die Systemordnung kompensiert werden kann, während eine Überkompensation nicht mehr korrigierbar ist. Am Beispiel der thermodynamischen

Kenngroße Lambda in Abbildung 7-17 kann dieses Phänomen nachvollzogen werden, wo oberhalb der um 10 Zeitschritte verschobenen Prozeßantworten die Modellqualität plötzlich steil abfällt (MSE nimmt zu).

Zur Bestimmung der optimalen Anzahl an Teilmodellen wurde mit der so ermittelten Totzeit untersucht, ob über die Erhöhung ihrer Anzahl eine signifikante Verbesserung im MSE mit Trainings- bzw. Verifikationsdaten möglich ist, siehe Abbildung 7-18. Es wurde also die Anzahl der Teilmodelle solange sukzessiv erhöht, bis keine signifikante Verbesserung mehr auftrat, was basierend auf dem F-Test mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% ausgewertet wurde. In diesem Fall konnten in den Trainingsdaten bis zur maximal zugelassenen Teilmodellanzahl von 10 noch signifikante Verbesserungen erreicht werden (roter Punkt markiert das Optimum), während tendenziell mit Verifikationsdaten eine niedrigere Anzahl an Teilmodellen die beste Approximation ergab. Aufgrund des bekannten Overfitting-Problems bei einer zu hohen Teilmodellanzahl wurde daher dem Ergebnis der Verifikationsdaten der Vorzug gegeben, sofern sich hier bei höheren Teilmodellen eine wesentliche Verschlechterung ergab, was aber im gezeigten Beispiel nicht der Fall ist.

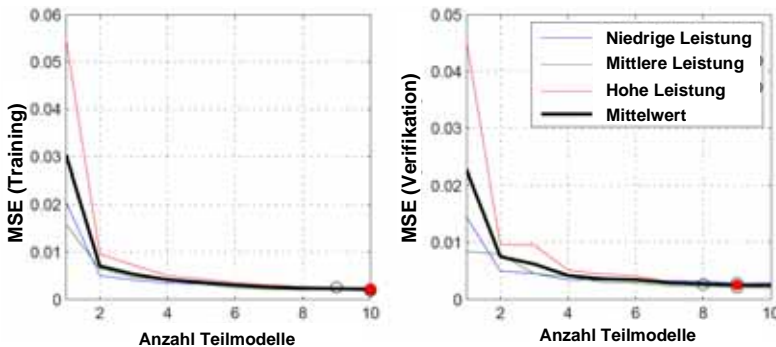
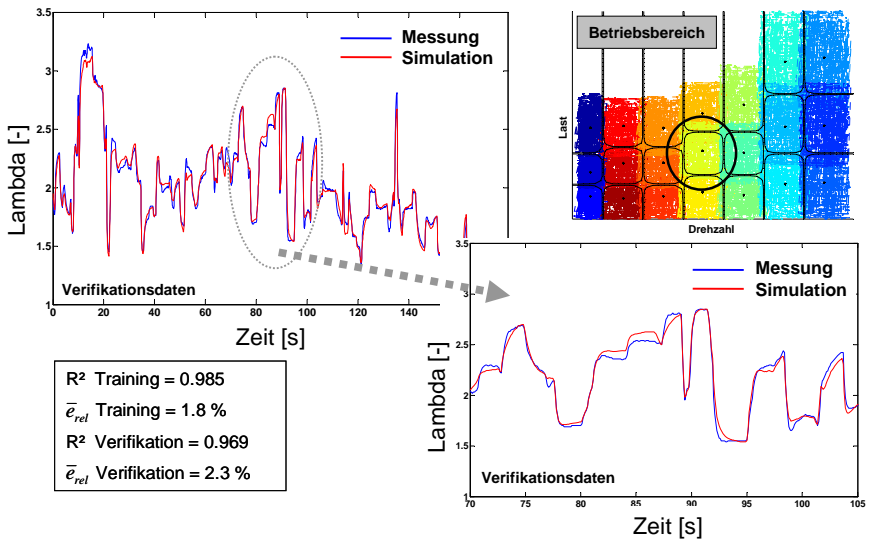


Abbildung 7-18: MSE-Verlauf über Anzahl der Teilmodelle eines lokal dynamischen Modells

Ein mit diesen optimierten Einstellungen trainiertes lokal dynamisches Bereichsmodell für die thermodynamische Kenngröße Lambda ist in Abbildung 7-19 für einen mittleren Betriebsbereich dargestellt. Dabei wurden als zusätzliche Randbedingungen für den Approximator eine dynamische Ordnung von drei und eine Abtastfrequenz von 10 Hz angenommen, was für motorische Prozesse üblich ist und sich auch hier als Optimum herausstellte. Man erkennt die grundsätzlich sehr gute Modellqualität, die auch durch die numerischen Kriterien bestätigt wird. Rein optisch ist das richtig abgebildete Dynamikverhalten ersichtlich, was die zuvor getroffenen Annahmen hinsichtlich Modellierungsstruktur und Versuchsplanung bestätigt. Auch die lokalen Modelle in anderen Betriebsbereichen oder für weitere thermodynamische Kenngrößen zeigten durchweg eine sehr zufriedenstel-

lende Qualität mit den verwendeten optimierten Einstellungen gemäß der vorge-
stellten Vorgehensweise.

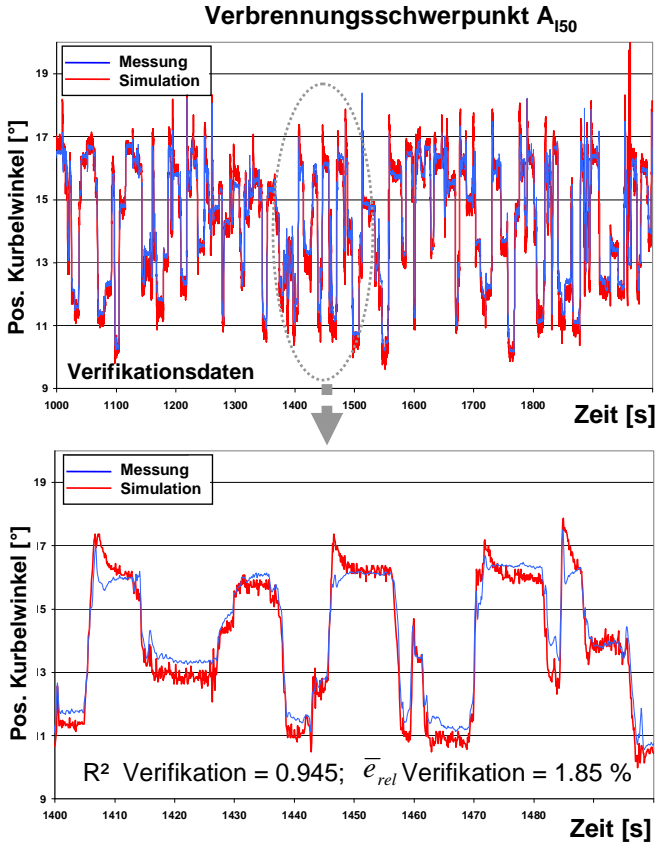


**Abbildung 7-19: Beispiel lokal dynamische Bereichmodellierung
der thermodynamischen Kenngröße Lambda**

7.5.3 Global dynamischer Modellverbund

Zur Erstellung eines globalen Modellverbunds aus den lokalen Bereichsmodellen gemäß der bereits im Voraus fixierten Partitionierung über Drehzahl und Last ist die Verwendung eines zusätzlichen Algorithmus zur Verschleifung notwendig, da die jeweiligen Übergänge stetig und glatt verlaufen müssen. Eine den lokalen Bereichsmodellen überlagerte, normalisierte Zugehörigkeitsfunktion gemäß Abbildung 7-21 wird zu diesem Zweck gewählt und parametrisiert. Da die lokalen Bereichsmodelle bereits als Eingang die Drehzahl und Lastinformation enthalten, darf dabei keine weitere Verstärkung über diese Kanäle erfolgen, was bei großen und damit den Bereich eines lokalen Bereichsmodells deutlich überschreitenden Anregungen in Drehzahl oder Last zu temporären Abweichungen im Ausgang führen könnte.

Zur Überprüfung dieser Fragestellung wurde der in Abschnitt 6.3.2.1 definierte, hochdynamische Verifikationszyklus aufgrund seiner großen Drehzahl- und Lastamplituden gewählt. Für diesen Zyklus ist in Abbildung 7-20 eine Simulation der thermodynamische Kenngröße Position Verbrennungsschwerpunkt A_{150} im globalen Modellverbund dargestellt.



**Abbildung 7-20: Global dynamische Simulation der Position
des Verbrennungsschwerpunktes A_{150} im hoch dynamischen Zyklus**

Trotz der hoch dynamischen Anregung mit hohen Amplituden in diesem Zyklus kann die Modellqualität als sehr gut bewertet werden, so daß die Verschleifung der lokalen Bereichsmodelle offensichtlich gut funktioniert. Weitere Untersuchungen mit anderen Kenngrößen zeigen ähnliche Modellqualitäten, Abbildung 7-22, was diese Schlußfolgerung bestätigt. Dennoch fällt auf, daß qualitative Unterschiede in den verschiedenen Modellen existieren, die teilweise durch Fehleraddition bei zusammengesetzter Berechnung der Ausgangsgröße aus mehreren Meßwerten (z.B. Brenndauer, #3) oder aus numerischen Effekten bei der rechnerischen Bestimmung (z.B. unsichere Bestimmung des Brennendes aus dem Zylinderdruckverlauf, #10) resultieren.

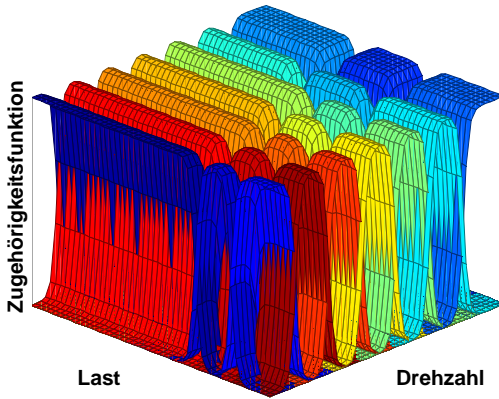


Abbildung 7-21: Globale Zugehörigkeitsfunktion für lokale Bereichsmo-
delle über Drehzahl und Last

Insgesamt wird das hier entwickelte Verfahren zur global dynamischen Modellbil-
dung mittels über Drehzahl und Last partitionierte, lokal dynamische Bereichsmo-
delle als zielführend und die Qualität der Modelle als gut bewertet.

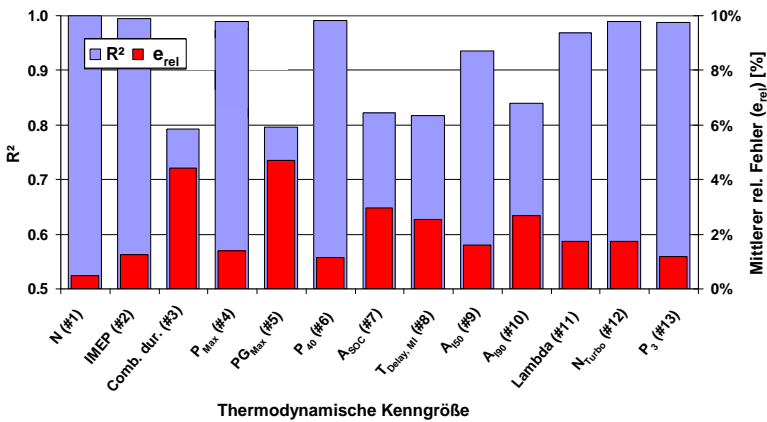


Abbildung 7-22: global dynamische Modellqualitäten der thermodynamischen Kenngrößen

7.6 Global dynamisches Gesamtmodell am HiL-Prüfstand

Die Zusammenführung und -wirkung aller Modellteile in ein echtzeitfähiges Gesamtmodell für den HiL-Prüfstand gemäß der vorgeschlagenen Architektur aus Abschnitt 4.3.4 wird im Folgenden beschrieben und diskutiert. Obwohl die einzelnen Teile des Gesamtmodells bereits in den vorherigen Abschnitten analysiert und deren Qualität für gut befunden wurde, sind hier eine Reihe von weiteren Aspekten relevant, die mit den bisherigen Einzeluntersuchungen nicht bewertet werden konnten. So ist durch den Einsatz der realen Motorregelung am HiL-Prüfstand zusätzlich die korrekte Bedienung der Motorsensorik aus dem Motormodell entscheidend, die wiederum die Motoraktuatorik als Eingang des Motormodells verändert. Um überhaupt einen derartigen closed-loop Betrieb echtzeitfähig realisieren zu können, müssen Signalverarbeitung, -simulation und -übertragung entsprechend aufeinander abgestimmt werden. Das richtige Zusammenspiel der HiL-Umgebung, der Motorregelung und des Motormodells wird im ersten Teil dieses Abschnitts über entsprechende Tests analysiert und bewertet.

Um die Leistungsfähigkeit und das Verhalten der Modelle in der virtuellen Entwicklungsumgebung besonders hinsichtlich der interessierenden Prozeßausgänge analysieren zu können, ist zunächst eine Qualitätsbewertung der realen Motorprüfstandsumgebung auf Reproduzierbarkeit und Meßgenauigkeit dieser Größen erforderlich. Hierdurch wird die in diesem datengetriebenen Modellierungskonzept maximal erreichbare Genauigkeit bestimmt. Die letztlich entscheidende Validierung des in dieser Arbeit entwickelten Modellansatzes erfolgt dann anhand des Vergleiches der in Abschnitt 0 definierten transienten NEDC-Zyklen unterschiedlicher ECU-Bedatung in den zwei Entwicklungsumgebungen. Weiterführende Betrachtungen hinsichtlich unterschiedlicher Kombinationen bzw. Anzahl von verwendeten thermodynamischen Kenngrößen und anderer Validationszyklen sollen die gewonnenen Erkenntnisse abstützen.

7.6.1 Implementierung des Motormodells am HiL-Prüfstand

Die Implementierung eines Motormodells in die HiL-Entwicklungsumgebung stellt erweiterte Anforderungen an die Modellierungsstruktur. Neben der echtzeitfähigen Berechnung der jeweiligen Blöcke können nur die in dieser Umgebung zur Verfügung stehenden Signale genutzt werden, was bereits im Modellierungskonzept dieses Ansatzes berücksichtigt und konsequent verfolgt wurde (vgl. Abschnitt 4.1.2). Zudem von großer Bedeutung ist die Behandlung der zwangsläufig unterschiedlichen Abtastraten des implementierten Motormodells und der restlichen HiL-Simulation. Aufgrund der in diesem Modellierungskonzept vorliegenden diskreten Abtastung des Motormodells, die wiederum von der abzubildenden Dyna-

mik des Luftpfades abhängt, muß eine entsprechende Übergabe der Signale zwischen diesen Modellstrukturen sichergestellt werden, die immer noch einen echtzeitfähigen Gesamtsignalfluß erlaubt.

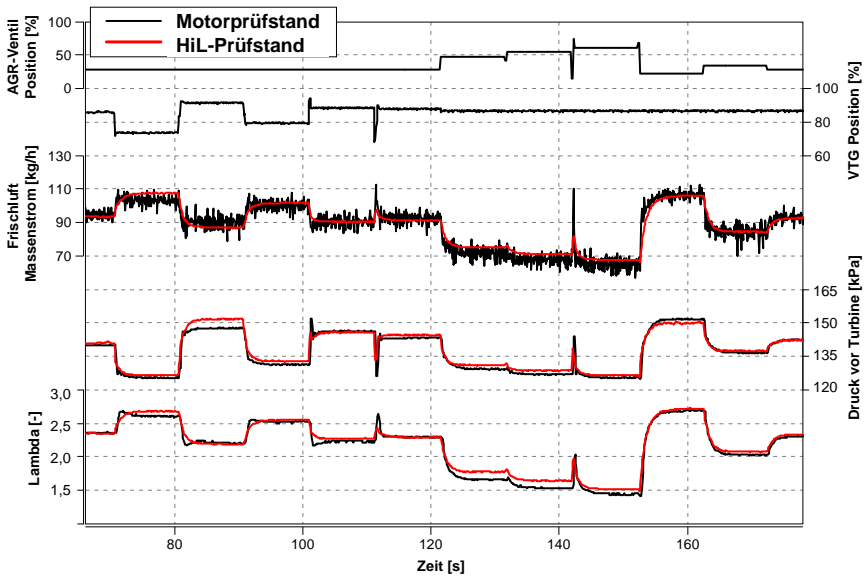


Abbildung 7-23: Vergleich der Systemantworten bei Anregung des Luftpfades

Zur Überprüfung der Funktionsweise der HiL-Umgebung im open-loop Betrieb (Motorsteuerung erhält Meßwerte des Motorprüfstands als Eingänge), wurde zunächst die korrekte Stimulation der Motorsensorik anhand ausgewählter Größen des Luftpfades analysiert. Abbildung 7-23 zeigt dazu beispielhaft einen Vergleich zwischen HiL-Simulation und Motorprüfstandsmessung in einem Betriebsbereich mittlerer Leistung bei Anregung (Stimulation) der Drehzahl, des AGR- und des VTG-Stellers. Es wird deutlich, daß nicht nur die zeitrichtige Übergabe der Signale erfolgt, sondern auch die modellierten Systemantworten in ihrem Zeitverhalten korrekt ausgegeben werden. Mit weiteren Ergebnissen anderer Betriebsbereiche ist somit sichergestellt, daß die Modellierungsstruktur richtig in die HiL Umgebung eingebettet und funktionstüchtig ist, was eine zwingende Voraussetzung für den eigentlich gewünschten closed-loop Betrieb der Motorregelung darstellt.

Im closed-loop Betrieb werden die Eingänge in die Motorregelung von den Ausgängen des Motormodells bedient, was wiederum die Motoraktuatorik beeinflusst, die die Eingänge ins Motormodell bildet. Der Betrieb ist daher mit einem realen Motorprüfstand hinsichtlich der Einbettung der Motorregelung vergleichbar.

Die korrekte Funktionsweise der in der Motorregelung hinterlegten modellbasierten Regelung der AGR-Rate ist für diese Applikation besonders wichtig und wird daher im Folgenden untersucht. Die Motorregelung benötigt zur Berechnung dieser Funktionalität eine Vielzahl von Sensorwerten, wie Frischluftmasse, P_3 , P_2 und diverse Temperaturen, weshalb eine korrekte Funktionsweise dieser AGR-Ratenregelung auf eine gute Qualität und Implementierung des gesamten Motormodells schließen lässt. Abbildung 7-24 zeigt die Auswertung einiger Sollwertsprünge der gewünschten AGR-Rate und das Verhalten des Systems inklusive Regler auf diese Anregung. Es ist erkennbar, daß die gewünschte Rate gut eingeregelt werden kann und somit nicht nur die Systemdynamik, sondern auch das Zusammenspiel der unterschiedlichen Ausgangsgrößen bzw. Sensoren gut mit der Realität korrelieren. Mit der richtigen und fehlerfreien Funktionsweise der Motorregelung in der HiL-Umgebung ist eine weitere essentielle Voraussetzung zur Validierung des Gesamtsystems erfüllt.

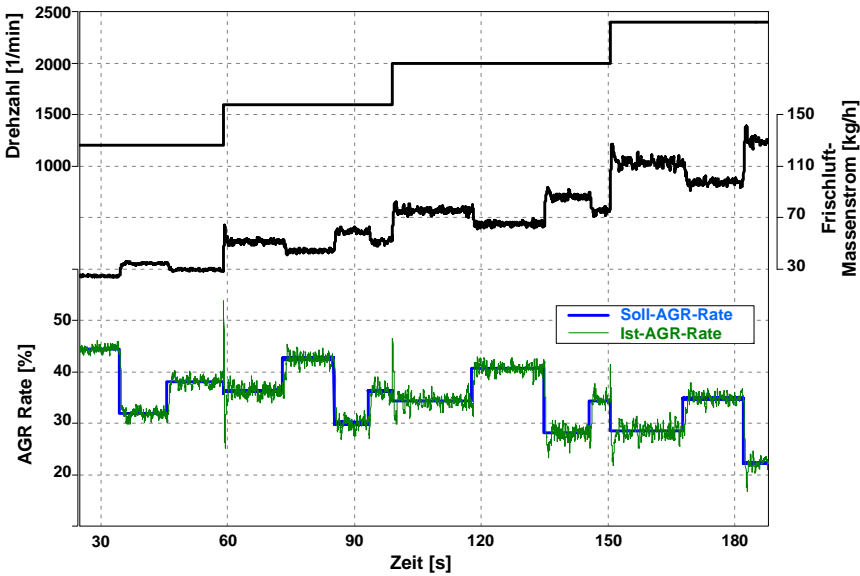


Abbildung 7-24: Sollwertsprünge der AGR-Rate in verschiedenen Betriebspunkten am HiL-Prüfstand

7.6.2 Reproduzierbarkeit und Meßgenauigkeit des Motorprüfstandes

Ein sehr wesentlicher und doch häufig vernachlässigter Aspekt bei datengetriebenen Modellierungsverfahren ist die Reproduzierbarkeit und Meßgenauigkeit der zur Datengewinnung verwendeten Umgebung. Im Falle des Motorprüfstandes hängen diese von vielen Faktoren ab, wie Zustandskonditionierung, Qualität der Regel- und Meßsysteme oder Bauteilqualität des Motors, weshalb bei der Auswahl von Prüfumgebung und Versuchsträger hohen Wert auf entsprechende Kriterien gelegt wurde (vgl. Abschnitt 6.1 und Abschnitt 0). Dennoch kann bei experimentellen Versuchsreihen niemals eine numerisch exakte Reproduzierbarkeit erreicht werden, schon weil kein Meßsystem eine hundertprozentige Meßgenauigkeit aufweist. Wird nun ein Modell aus experimentell gewonnenen Daten erzeugt, kann die Modellqualität nicht besser als die Qualität der zur Modellparametrierung verwendeten Daten sein. Der hier vorgenommene Vergleich zwischen modellierten Prozeßausgängen und Verifikationsmessungen vom Motorprüfstand enthält also zum einen die Ungenauigkeit der Motorprüfstandsumgebung in den Daten zum Training des Modells, die begrenzte Approximationsfähigkeit der Modellierungsstruktur und dann nochmals die Unsicherheiten in der zum Vergleich herangezogenen Verifikationsmessung. Die Kenntnis dieser Unsicherheiten ist zur Bewertung der Modellqualität von entscheidender Bedeutung. Es ist allerdings zu bedenken, daß auch ohne modellbasierte Vorgehensweise die in diesem Sinne ungenauen Daten Eingang in die Applikation finden, da in jedem Falle die experimentell gewonnenen Erkenntnisse zur Bedatung oder Verifikation der Motorregelung verwendet werden. Als diesbezüglichen Vorteil des modellbasierten Ansatzes ergibt sich die zwangsläufige Mittelung stochastischer Fehler (bei ausreichender Datenmenge) gegenüber einmaliger punktueller Vermessung.

Die zunächst stationäre Betrachtung der Stabilität und Reproduzierbarkeit der Motorprüfstandsumgebung erlaubt eine einfache Mittelwertbildung über die Zeit zur Kompensation von stochastischen Effekten auf Konditionierung, Regelung und Messung. Dabei ist zwischen kurzfristiger und langfristiger Reproduzierbarkeit von Referenzzuständen zu unterscheiden. Unter kurzfristiger Reproduzierbarkeit wird hier das Anfahren gleicher Betriebszustände aus unterschiedlichen Richtungen im Sinne der Aktuatorik der Motorregelung innerhalb einer Versuchsreihe verstanden, womit die Stabilität des Brennverfahrens sowie die Güte der Konditionier- und Meßsysteme bewertet werden kann. Als Datenbasis kamen hierfür die in den Versuchsplänen der stationären DoE-Messreihen verwendeten Wiederholpunkte zum Einsatz. Die langfristige Reproduzierbarkeit zur Analyse von Drifteffekten in Motor oder Meßsystemen durch Alterung, Verschmutzung etc. wurde anhand der täglichen Referenzpunkte in unterschiedlichen Betriebszuständen analysiert. Nachdem die langfristige von der kurzfristigen Reproduzierbarkeit überlagert wird, muß sich hier zwangsläufig eine schlechtere Qualität ergeben.

In Abbildung 7-25 ist das Ergebnis der stationären Betrachtung der Stabilität und Reproduzierbarkeit der Motorprüfstands Umgebung für ausgewählte Größen mittels der relativen durchschnittlichen Streuung um den Mittelwert der hierfür herangezogenen Messungen dargestellt. Die in dieser Abbildung blau eingefärbte Streuung der kurzfristigen Reproduzierbarkeit zeigt abgesehen von den THC- und Rußkonzentrationen einen Wert meist deutlich unter 5%, was eine jedenfalls ausreichende Stabilität und Reproduzierbarkeit dieser Größen bedeutet. Die zwar höhere Streuung der langfristigen Betrachtung (rote Einfärbung) bleibt ebenfalls für diese Größen meist unter 5%, was aber bedeutet, daß zum einen nicht alle Randbedingungen exakt konditioniert werden konnten (z.B. Luftdruck) und zum anderen tatsächlich Alterungs- oder Drifteffekte über die Laufzeit auftraten. Die Größenordnung ist aber im erwarteten Bereich für die vorliegende Laufzeit und kann deshalb akzeptiert werden. Problematisch sind die gemessenen THC- und speziell Rußkonzentrationen zu bewerten, deren durchschnittliche Streuungen bereits bei der kurzfristigen Reproduzierbarkeit in einem Bereich liegen, der eigentlich keine seriöse Datenbasis zur Modellbildung darstellt. Aufgrund der Stabilität der anderen Meßgrößen kann von einem stabilen Brennverfahren in einem gut eingeregeltten Betriebszustand ausgegangen werden, was bedeutet, daß die hier eingesetzten Meßgeräte das primäre Problem darstellen, was aus weiteren Projekten bestätigt werden kann und unter anderem in der komplexen Meßmethode begründet ist (vgl. Abschnitt 3.4.1.1).

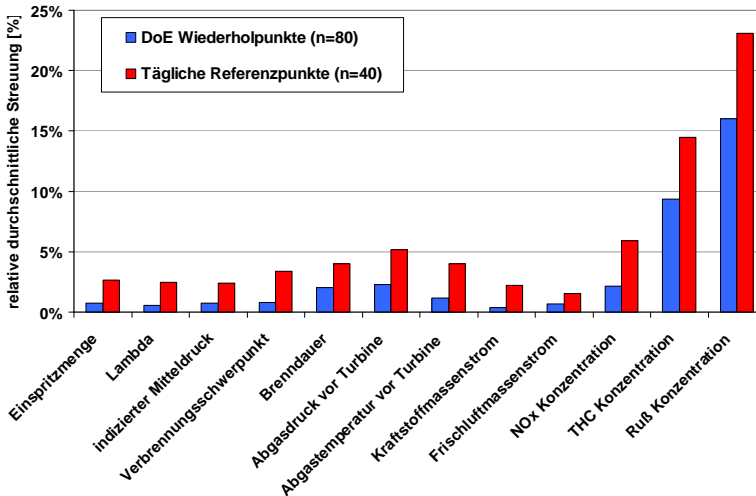


Abbildung 7-25: Stationäre Reproduzierbarkeit ausgewählter Größen am Motorprüfstand

Die folgende Betrachtung dynamischer Reproduzierbarkeit basiert auf der unmittelbar wiederholten Messung von sechs für die Validierung des Modellkonzeptes herangezogenen NEDC-Zyklen mit Bedatung B (vgl. Abschnitt 0). Das ausgewertete Streuband der ausgewählten Größen in Abbildung 7-26 bezieht sich dabei auf transiente Datenspurten, die gegenüber den stationär betrachteten Daten zusätzliche Effekte wie Meßrauschen, Reglerverhalten und dynamische Effekte auf das Brennverfahren beinhalten. Es ist wiederum erkennbar, daß die meisten Größen deutlich unter 5% Streubreite bezogen auf den gemittelten aktuellen Meßwert aufweisen. Die in der linken Hälfte des Diagramms aufgetragenen Aktuatorgrößen resultieren dabei aus der Stimulation der Motorregelung, die wiederum aus der Stimulation des Fahrpedals basierend auf der gewünschten Drehzahl-Last Vorgabe des NEDC resultiert. Es zeigt sich hier bereits eine nicht exakte Wiederholbarkeit des Referenzzzyklus, was primär aus der Reglerqualität der Prüfstands- und Motorregelung resultiert. Die gegenüber den anderen Aktuatoren erhöhte Streuung der AGR-Ventilposition ist durch die AGR-Ratenregelung der ECU zu erklären, während die weiteren Aktuatoren jeweils gesteuert werden. Die im rechten Teil des Diagramms dargestellten thermodynamischen Kenngrößen bzw. Prozeßausgangsgrößen zeigen die bereits bekannten Auffälligkeiten, wie die Fehlerakkumulation bei zusammengesetzten Größen (Brenndauer) oder die Schwierigkeiten der Emissionsanalysatoren von THC und Ruß, die allerdings mit diesen transienten Daten weniger deutlich ausfallen.

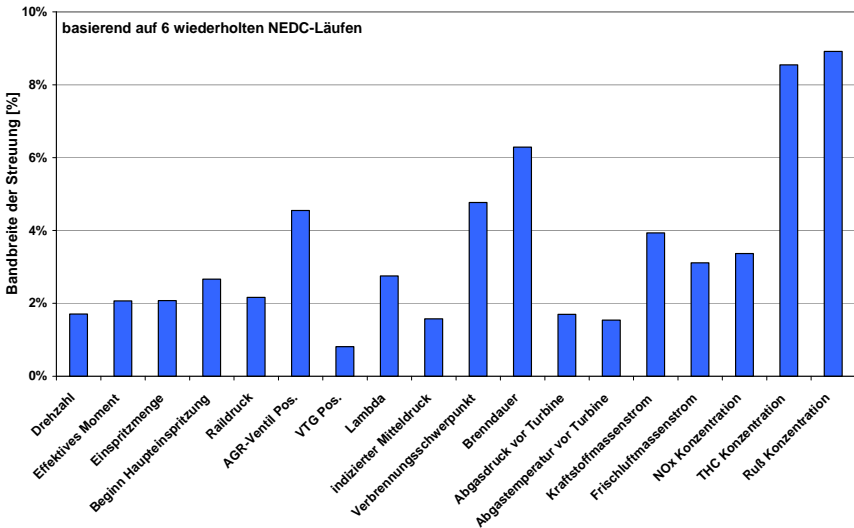


Abbildung 7-26: Dynamische Reproduzierbarkeit ausgewählter Größen am Motorprüfstand

Zusammenfassend ist festzuhalten, daß durch verschiedenste Effekte bereits merkliche Streuungen in den zum Training und zur Validierung verwendeten experimentell gewonnenen Daten enthalten sind. Diese Ungenauigkeit muß bei der Interpretation der simulierten Daten berücksichtigt werden.

7.6.3 Validierung des Modellansatzes anhand transienter Zyklen

Die in diesem Abschnitt diskutierte Validierung des entwickelten Motormodells anhand experimentell gewonnener Vergleichsdaten des Motorprüfstandes stellt einen entscheidenden Schritt dar. Erstmals wird das Zusammenspiel der Modellarchitektur, bestehend aus mehreren Submodellen unterschiedlicher Struktur, der Motorregelung und der Entwicklungsumgebung unter echtzeitfähigen Bedingungen anhand der gemessenen dynamischen Prozeßantworten analysiert, was für die letztendlich beabsichtigte Verwendung von ausschlaggebender Bedeutung ist. Der Vergleich zwischen real gemessenen Zyklen am Motorprüfstand und simulierten Antworten des HiL-Prüfstandes soll schließlich zeigen, ob diese virtuelle Entwicklungsumgebung mit all ihren Randbedingungen und Annahmen für Aufgaben der Applikation in Frage kommt.

Auch wenn im vorherigen Abschnitt nachgewiesen wurde, daß die Motorprüfstands-umgebung keinesfalls sehr genau oder hoch reproduzierbar für derartige transiente Versuche ist, so wird doch von den beabsichtigten Anwendern der virtuellen Entwicklungsumgebung, in diesem Falle die Applikateure, der Motorprüfstand stets als Referenz für tatsächliches Systemverhalten herangezogen. Der folgende Vergleich basiert daher auf einem real gemessenen Zyklus und nicht auf über mehrere Zyklen gemittelten Daten sowohl für Motor- wie HiL-Prüfstand. Als Testkandidat wurde der in Abschnitt 0 vorgestellte 4-Zylinder-EURO5-Dieselmotor mit VTG ausgesucht, wobei die letzten 600 Sekunden eines NEDC-Zyklus zur jeweiligen Verifikation bei konstant warmen Betriebsbedingungen herangezogen wurden.

7.6.3.1 Vergleich Simulation und Messung von NEDC-Zyklen bei unterschiedlicher Bedatung der Motorregelung

Gemäß der in Abschnitt 0 zur Gesamtvalidierung definierten Versuche, wurden NEDC Zyklen unterschiedlicher Bedatung A, B, C der Motorregelung auf HiL- und Motorprüfstand dynamisch vermessen. Für die HiL-Simulation wird zunächst eine Modellstruktur unter Verwendung von fünf thermodynamischen Kenngrößen (beispielsweise für NO_x #1, #2, #7, #9, #11) gemäß der Rangfolge aus der Qualifikationsmethodik verwendet. Aufgrund des ungleichen Prozeßwirkungsgrades bei gleichbleibender effektiver Leistungsanforderung ergeben sich bei den Zyklen verschiedene Fahrpedalpositionen. Dies führt zu unterschiedlichen Betriebszustän-

den und dadurch zu unterschiedlichen ECU-Reaktionen, was eine weite Modellgültigkeit voraussetzt, die hiermit ebenfalls validiert werden konnte.

In Abbildung 7-27 werden die transienten Datenspuren ausgewählter Größen wie inneres Drehmoment, Frischluftmasse, NO_x - und Rußkonzentration und Abgastemperatur vor Turbine jeweils von HiL- und Motorprüfstand für die verschiedenen ECU-Bedatungen A und B verglichen. Hiermit ist zunächst eine optische Beurteilung der Simulationsergebnisse möglich. Es soll dabei nochmals betont werden, daß es sich für die HiL-Simulation um Verifikationsdaten handelt, also Daten, die nicht zur Modellparametrierung verwendet wurden.

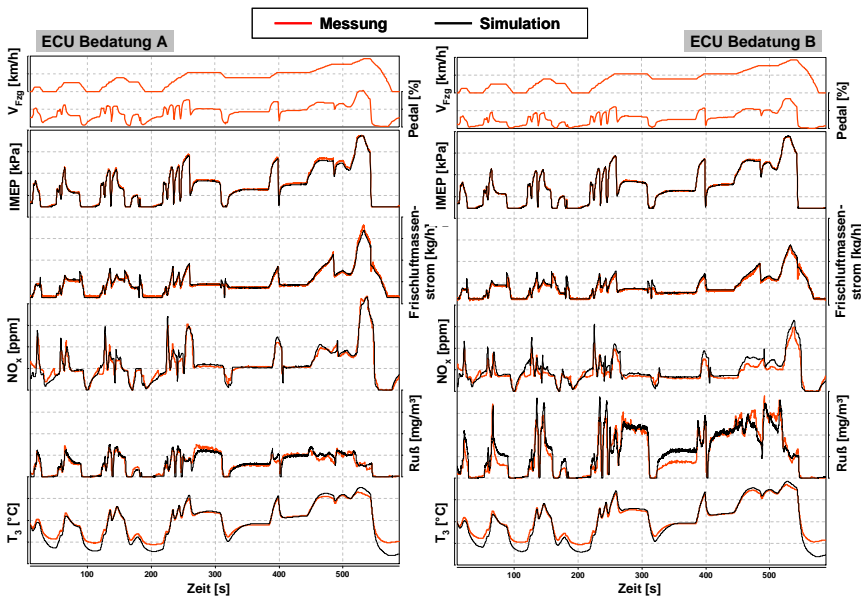


Abbildung 7-27: Validierungsergebnisse von NEDC Zyklen unterschiedlicher ECU-Bedatung

Es ist zu erkennen, daß alle Prozeßausgangsgrößen mit einer ausreichenden Qualität bezüglich stationärer Korrelation und dynamischen Verhaltens simuliert werden können. Im Verlauf des inneren Drehmomentes sowie des Frischluftmassenstromes ist optisch kaum eine Abweichung zwischen Messung und Simulation festzustellen. Wie erwartet zeigen die Abgasemissionen, hier NO_x und Ruß, die schlechteste Modellqualität. Dies resultiert zum einen aus den hohen dynamischen Störpegeln und zum anderen aus der komplexen Sensordynamik. Allerdings sind auch stationäre Abweichungen beispielsweise mit ECU-Bedatung B in der Rußemission bei Sekunde 350 erkennbar, die sich aus der zuvor thematisierten Fehlerkette aus ungenauen Daten, begrenzter Approximationsfähigkeit des Modells

und wiederum ungenauer Vermessung dieses Validationszyklus ergeben. Bei genauerer Analyse erscheint der an dieser Stelle erfaßte Meßwert zumindest nicht ganz plausibel, da die gegenüber ECU-Bedatung A deutlich verringert gemessenen NO_x -Emissionen eine deutliche Erhöhung des Rußes bei diesem AGR-Ratenunterschied von 7.5%-Punkten bedingen sollten. Am Verlauf der Abgastemperatur ist die hohe Trägheit des Sensors erkennbar, der hier aber gut durch die Sensordynamikkompensation abgefangen wird. Lediglich in Schub- und Leerlaufphasen sind stationäre Abweichungen zu erkennen, die primär aus Schwierigkeiten der Motor- und Prüfstandskonditionierung in diesen Zuständen resultieren.

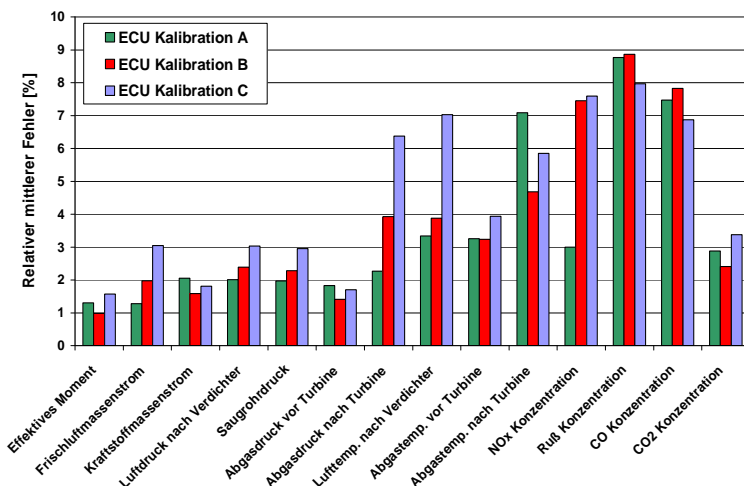


Abbildung 7-28: Mittlerer relativer Fehler der Simulation für ausgewählte Ausgangsgrößen im NEDC Zyklus

In Abbildung 7-28 ist die Qualität weiterer Ausgangsgrößen und zusätzlich des NEDC-Zyklus mit Bedatung C im numerischen Vergleich des relativen mittleren Fehlers dargestellt.

Die Simulationsgenauigkeit aller Ausgänge für die unterschiedlichen Bedatungen A, B, C bleibt hier unter einem mittleren Fehler von 10%, wobei die physikalischen Größen noch deutlich genauer abgebildet werden können und teilweise im Bereich der Meßgenauigkeit liegen. Es fällt jedoch auf, daß in einigen Größen, wie z.B. den Stickoxiden, große Unterschiede zwischen den verschiedenen Bedatungen A, B, und C auftreten. Dies hat mehrere Gründe. Zunächst ändert sich die Größenordnung der Prozeßausgänge mit den stark unterschiedlichen ECU-Bdatungen. Während bei geringer AGR-Rate (Bedatung A) noch hohe Stickoxidemissionen auftreten, verringern sich diese zunächst bei Bedatung B und dann nochmals mit Bedatung C umgekehrt proportional zur Erhöhung der AGR-Rate. Der relative

Fehler muß bei gleichem absolutem Fehler somit steigen. Hinzu kommt, daß mit höheren AGR-Raten das Brennverfahren tendenziell instabiler wird, was sowohl für Prüfstandsmessungen wie auch für die hierauf basierenden Modelle eine höhere Streuung in den Messungen und somit eine geringere Genauigkeit bedeutet. Verglichen mit der erreichbaren Genauigkeit (vgl. Abschnitt 7.6.2) sind die Ergebnisse aber als sehr zufriedenstellend einzustufen, besonders was die Rußemission betrifft.

Neben transienten Verläufen sind gerade für die Emissionsabstimmung über den Zyklus kumulierte Ergebnisse von Relevanz, die in Abbildung 7-29 aufgetragen sind. Hier ist ein Vergleich der kumulierten Emissionen von NO_x, Ruß und CO₂ zwischen Prüfstandsmessung und HiL-Simulation für die unterschiedlichen Bedatungen gezeigt, wobei die Emissionen der Bedatung A als Referenz zu 100% gesetzt wurden. Es ist auch hier die grundsätzlich gute Korrelation zwischen Messung und Simulation zu sehen, wobei wiederum eine gewisse Unschärfe im Ruß vorhanden ist. Gleichzeitig werden noch einmal die Auswirkungen der deutlich unterschiedlichen ECU-Bedatungen sichtbar, die, auf die Größenordnung der kumulierten Emissionen bezogen, in etwa eine gesetzliche Emissionsstufe ausmachen. Dies zeigt eindrücklich die weite Modellgültigkeit sowohl in den Eingängen wie auch in den Prozeßausgangsgrößen.

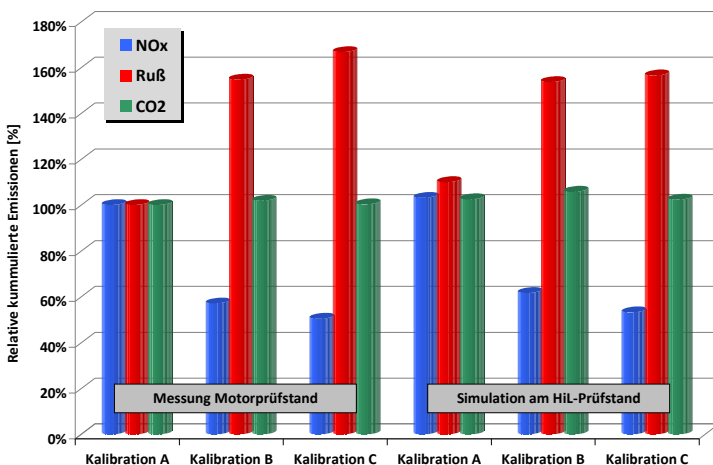


Abbildung 7-29: Relative kumulierte Emissionen im NEDC

Zusammenfassend kann somit festgestellt werden, daß selbst bei großen Unterschieden in der Bedatung der Motorregelung der motorische Prozeß mit diesem Modellkonzept in transienten Zyklen ausreichend gut wiedergegeben werden kann.

7.6.3.2 Einfluß unterschiedlicher Kombinationen thermodynamischer Kenngrößen

Die entscheidende Rolle der thermodynamischen Kenngrößen für diese Modellar- chitektur wurde bereits mehrfach dargelegt. Die bisherigen Validationsergebnisse basierten auf der in Abschnitt 5.3 definierten und in Abschnitt 7.2.1 exemplarisch demonstrierten Qualifikationsmethodik, die eine Reihung der möglichen Kenngrößen nach Eignung für den jeweiligen Prozeßausgang liefert. An dieser Stelle soll nun der Einfluß unterschiedlicher Kombinationen thermodynamischer Kenngrößen auf das Motormodell anhand der transienten Validationszyklen bei Bedatung B analysiert werden. Dabei wurde ausgehend von der Rangfolge gemäß Qualifikation- matrix zunächst die Anzahl der verwendeten Kenngrößen von vier bis sechs variiert und anschließend mittels einer vollfaktoriellen Studie die empirisch best- mögliche Modellqualität bezogen auf das hier verwendete Kriterium des relativen mittleren Fehlers ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7-30 für die ausge- wählten Größen effektives Drehmoment, Frischluftmasse, NO_x und Rußkonzentration sowie Abgastemperatur vor Turbine zusammengefaßt.

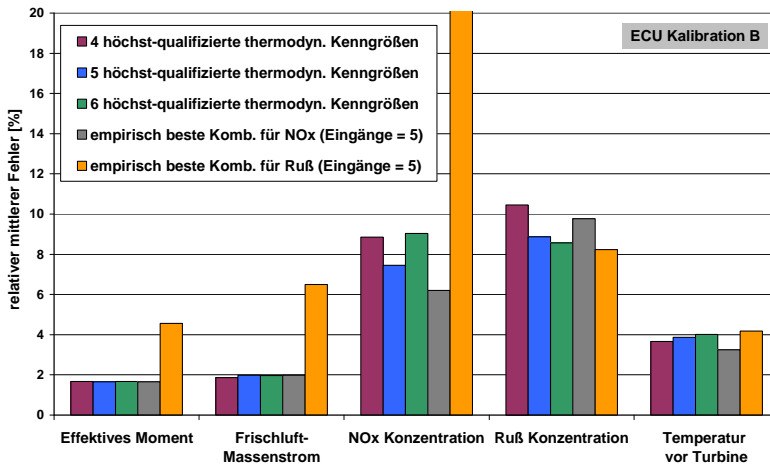


Abbildung 7-30: Simulationengenauigkeit nach Anzahl und Kriterium der thermodynamischen Kenngrößen

Zunächst fällt auf, daß die unterschiedliche Anzahl an Kenngrößen bei Verwen- dung des Qualifikationsverfahrens auf die physikalischen Ausgänge, wie effektives Drehmoment, Frischluftmasse und Abgastemperatur vor Turbine keinen signifi- kanten Einfluß hat. Bei den NO_x-Konzentrationen dagegen ist mit fünf Kenngrößen der geringste relative mittlere Fehler erreichbar, was recht gut mit der aus der Qualifikationsmethodik gefolgerten minimalen Anzahl von vier Kenngrößen korre- liert. Bei der Rußkonzentration ergibt sich die numerisch beste Performance mit

sechs Kenngrößen, wobei das Ergebnis gegenüber fünf verwendeten Kenngrößen nicht signifikant besser ist. Aufgrund besserer Raumabdeckung würde in diesem Falle ebenfalls auf fünf Kenngrößen entschieden werden.

Da die Qualifikationsmethodik eine Reihe von generellen Aspekten bezüglich der Modellierung berücksichtigt, muß mit dieser Auswahl nicht unbedingt die empirisch best mögliche Qualität dargestellt werden, die unter Umständen rein von numerischen Effekten abhängen kann. Um das Potential in der Simulationsgenauigkeit bei Vernachlässigung weiterer Aspekte zu analysieren, wurden mittels einer vollfaktoriellen Studie für NO_x und Ruß alle möglichen Kombinationen thermodynamischer Kenngrößen von vier bis sieben Eingängen überprüft, wobei die bestmögliche Modellqualität hinsichtlich des hier verwendeten Fehlerkriteriums in Abbildung 7-30 dargestellt ist. Es zeigt sich, daß bei den Stickoxiden eine Verbesserung von etwa einem Prozentpunkt möglich ist, die mit fünf Kenngrößen erreicht wird, wovon gegenüber der Qualifikationsmethodik eine Kenngröße verschieden ist. In den Rußemissionen ist dagegen nur noch wenig Verbesserung möglich, die numerisch beste Qualität wird ebenfalls mit fünf Kenngrößen erreicht.

Die geringen numerischen Verbesserungen in diesem Fehlerkriterium zeigen absolut betrachtet nochmals, daß mittels Qualifikationsmethodik effizient eine optimale Auswahl an Kenngrößen gefunden werden kann, die auf die Simulationsgenauigkeit bezogen sehr gute Ergebnisse liefert. Zusätzlich sind dort weitere Aspekte berücksichtigt, die aus dieser Auswertung nicht hervorgehen, aber im Gesamtkontext große Bedeutung haben.

Zur Verdeutlichung des Einflusses nicht optimal ausgewählter Kenngrößen wurde für alle in Abbildung 7-30 dargestellten Ausgangsgrößen eine Simulation mit den jeweils für NO_x bzw. Ruß nur empirisch optimal ermittelten Kenngrößenkombinationen (bezogen auf die Simulationsgenauigkeit) durchgeführt. Während die für NO_x numerisch optimale Kenngrößenauswahl (graue Balken) kaum Einfluß auf die Abbildungsqualität der physikalischen Größen hat, ergeben sich mit der für Ruß numerisch optimalen Auswahl (orange Balken) bis auf die Abgastemperatur deutlich schlechtere Simulationsgenauigkeiten. Dies beweist zunächst die Notwendigkeit der prozeßausgangsindividuellen Qualifikation für eine gute Abbildungsqualität. Es zeigt aber auch, daß die für die Stickoxidbildung relevanten thermodynamischen Effekte offensichtlich denen der physikalischen Prozeßausgänge deutlich näher kommen, als die für die Rußbildung.

7.6.3.3 Validierung bei höherer Dynamik

Auch wenn für die Emissionsabstimmung in Europa der NEDC Zyklus ausschlaggebend ist, so sind doch für andere Länder (z.B. USA) schon für dieses Teilgebiet der Applikation die transienten Anforderungen deutlich höher und vor allem in ihren Amplituden stärker ausgeprägt. Hinzu kommt, daß für Reglerabstimmung oder Fahrbarkeitsuntersuchungen ebenfalls deutlich dynamischere Vorgänge

entscheidend sind. Um auch für diese Fälle die Anwendbarkeit des Modellierungskonzeptes zu prüfen, wurde wiederum der in Abschnitt 6.3.2.1 definierte hochdynamische Verifikationszyklus wegen seiner großen Drehzahl- und Lastamplituden herangezogen. Der bildliche Vergleich zwischen Simulation und Messung ausgewählter Größen in Abbildung 7-32 zeigt zunächst im oberen Teil des Bildes die deutlich gesteigerte Dynamik und das höhere Amplitudenspektrum in den Anregungen gegenüber dem NEDC. Für die physikalischen Größen inneres Drehmoment und Frischluftmassenstrom, sowie die thermodynamischen Kenngrößen Lambda und Verbrennungsschwerpunkt, zeigt sich im unteren Teil der Abbildung die sehr gute Simulationsqualität auch bei hoher Dynamik. Anhand des trägen Verlaufs der Abgastemperatur vor Turbine wird deutlich, daß der Sensor dieser Turbine dynamischen Anregung nicht mehr folgen kann, weshalb eine fundierte Bewertung des richtigen Prozeßausgangsverlaufs hier schwer fällt. Die mittels Dynamikkompensation erreichte Simulationsqualität bewegt sich jedoch auf gutem Niveau und ist mit der des NEDC vergleichbar. Aufgrund der für diese hohe Dynamik nicht ausgelegten Abgasentnahme und -analyse des Motorprüfstands konnten keine Schadstoffkonzentrationen zum Vergleich gemessen werden.

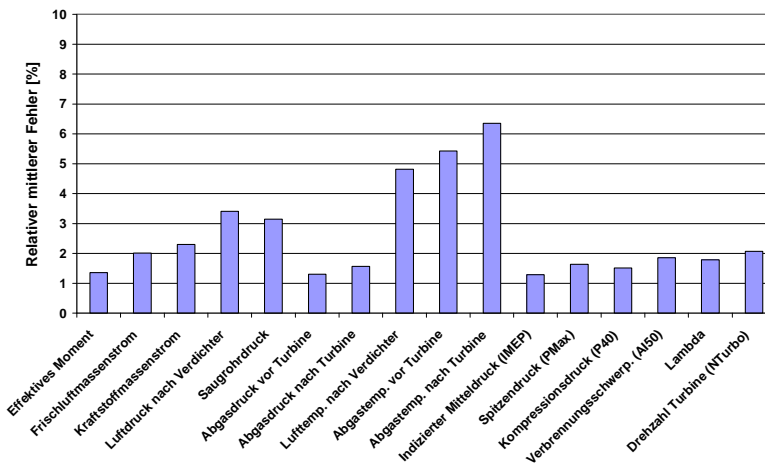


Abbildung 7-31: Mittlerer relativer Fehler der Simulation für ausgewählte Ausgangsgrößen im hoch dynamischen Zyklus

Aus Abbildung 7-31 ist aber anhand weiterer Prozeßausgänge und thermodynamischer Kenngrößen die durchwegs gute Simulationsgenauigkeit erkennbar, die bis auf die Temperaturverläufe am Rande der Meßgenauigkeit liegt. Daraus kann zunächst geschlossen werden, daß Applikationsaufgaben wie Regler- oder Fahrbarkeitsabstimmung ausreichend genau in der HiL-Umgebung durchgeführt wer-

den können. Des Weiteren ist aufgrund des in diesem Modellierungskonzept rein statischen Zusammenhangs der Emissionen gegenüber den thermodynamischen Kenngrößen davon auszugehen, daß auch diese gut simulierbar sind, da die Abbildungsqualität der thermodynamischen Kenngrößen ausreichend gut ist.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß auch eine gegenüber dem NEDC-Zyklus deutlich höhere Dynamik mit dem Modellierungskonzept ohne Verluste der Simulationsgenauigkeit dargestellt werden kann.

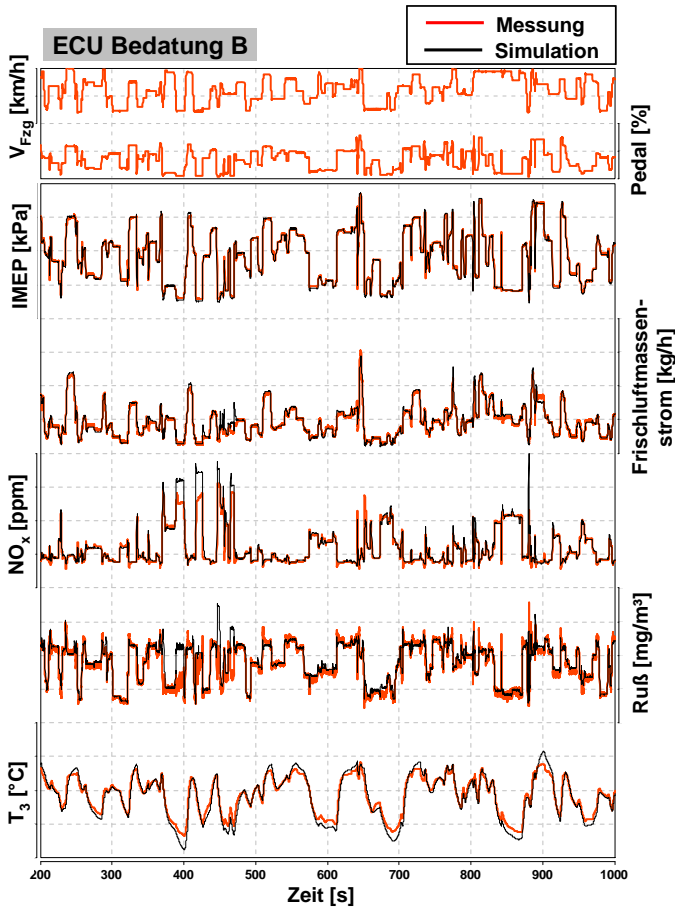


Abbildung 7-32: Validierungsergebnis eines hoch dynamischen Zyklus

7.7 Weitere Modellierungsoptionen

Die bisherige Validierung des Modellierungskonzeptes beruhte auf einer der Anzahl an Eingängen bzw. Variationsgrößen angepaßten Architektur, die in Abschnitt 4.3 im Detail erläutert wurde. Es wurde dort bereits diskutiert, daß mit steigender Anzahl an Variationsgrößen die Attraktivität steigt, über weitere Differenzierung von Prozeßsegmenten die Komplexität der jeweiligen Modellteile zu reduzieren. Dabei sind vor allem die dynamischen Modellteile von Interesse, da sich in diesem Falle über die externe Rückführung von vergangenen Prozeßschritten die Anzahl der Dimensionen proportional zur Anzahl der Variationsgrößen und der angenommenen Modellordnung stark erhöht.

Die bereits in Abschnitt 4.3.3 als Ansatz „B“ eingeführte Struktur zielt daher auf eine weitere Separation der Prozeßdynamiken ab, um eine Dimensionsreduktion der dynamischen Modellteile zu erreichen. Dazu wird auf einen stationären Zustand des Motors referenziert, der um die jeweils durch Einspritz- bzw. Luftpfadaktuatorik verursachte Gasdynamik in separaten Modellen kompensiert wird, siehe Abbildung 7-33. Dies erlaubt eine deutliche Dimensionsreduktion der jeweiligen Modelleingangsvektoren und im Falle stationärer Zustände eine ausschließliche Verwendung der statischen Modellteile, was die stationäre Genauigkeit verbessern sollte.

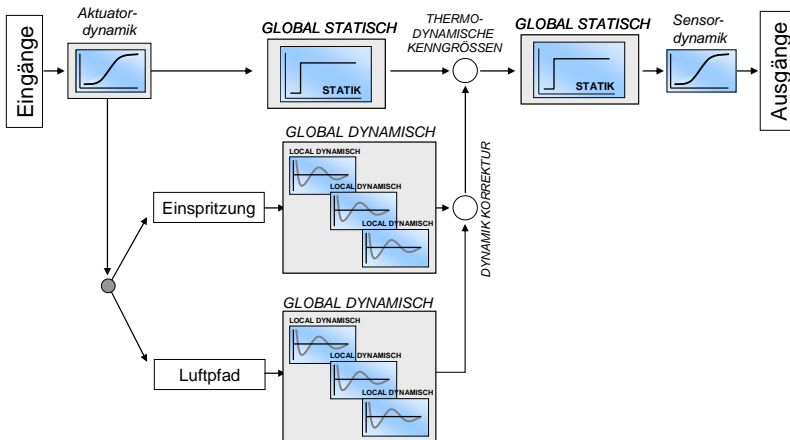


Abbildung 7-33: Modellarchitektur zur erweiterten Dynamikseparation gemäß Ansatz „B“

7.7.1 Technische Realisierung

Zu überprüfen ist zunächst die Annahme, ob eine derartige Dynamikseparation überhaupt technisch umzusetzen ist und sich die durch transiente Anregung von Einspritz- und Luftpfadaktuatorik ergebenden dynamischen Änderungen in den thermodynamischen Kenngrößen im Gesamtmodell wieder mit den stationären Zuständen überlagern lassen. Dazu wird eine modifizierte Versuchsplanung notwendig, da das Training der dynamischen Modellteile eine separate Anregung der jeweiligen Einspritz- und Luftpfadaktuatorik als Eingänge voraussetzt. In diesem Falle werden als vorhandene Variationsgrößen Drehzahl, AGR-Ventil- und VTG-Position dem Luftpfad zugeordnet, während Einspritzmenge und -zeitpunkt sowie der Raildruck als Eingänge in das Einspritzmodell verwendet werden. Damit ist zunächst eine 50-prozentige Dimensionsreduktion der beiden dynamischen Modellteile erreicht, was hinsichtlich einer zukünftigen Erweiterung an Variationsgrößen großes Potential verspricht. Als zusätzlicher Vorteil erweist sich die entkoppelte dynamische Versuchsplanung dieser Größen, die somit eine bessere Eingangsraumabdeckung zulässt. Zusätzliche Versuche für das Training des global statischen ersten Modellteils müssen nicht durchgeführt werden, da hier auf die bereits vorliegenden Messungen zurückgegriffen werden kann und sich stationär lediglich ein Zwischenschritt in der Modellierung der Prozeßausgangsgrößen über die thermodynamischen Kenngrößen ergibt, dessen Vorteile bereits nachgewiesen wurden.

Gegenüber den bisherig eingesetzten dynamischen Modelltypen mit externer Dynamik sind aufgrund der sofortigen Wirksamkeit der statischen Modellteile bei Änderungen in den Eingangsgrößen sogenannte sprungfähige dynamische Systeme notwendig, die in Kombination die Abbildung des bekannten, zeitlich verzögerten Anstiegsverhaltens der Prozeßausgänge ermöglichen. Um lediglich die aus den transienten Phasen resultierenden Anteile der beiden global dynamischen Modellteile auf die thermodynamischen Kenngrößen zu berücksichtigen, muß zusätzlich differenziertes Verhalten dieser Modelle über deren Struktur erzwungen werden. Dazu bieten sich verschiedene Möglichkeiten an. Mittels Integration des transienten Anteils (also des gewünschten Ausgangs des dynamischen Modells) kann ein System mit globalem P-Verhalten identifiziert werden, das anschließend wieder differenziert wird. Es erweist sich allerdings hierbei als nachteilig, daß im Verlauf des Modeltrainings der aus Abweichungen resultierende Fehler aufsummiert wird, was zu einer schlechteren Approximation führt. Alternativ können die Eingänge für die dynamischen Modelle differenziert werden, während der dynamische Ausgang unverändert bleibt. Hierbei zeigt sich allerdings, daß daraus ein aufgrund der zum Training verwendeten APRB Sequenz schlecht verteilter Eingangsraum entsteht, der ungünstige Voraussetzungen für eine weite Modellgültigkeit bietet. Als dritte Möglichkeit bietet sich eine durch die eigentliche mathematische Modellstruktur erzwungene Parameterschätzung mit differenzierendem Verhalten an, die in diesem Falle aufgrund der besten Trainingsperformance ausgewählt wurde. Das

benötigte global statische Modell zur Abbildung der stationären Verhältnisse kann mit den bereits vorliegenden stationären Daten auf bekannte Weise trainiert werden. Somit ist eine Möglichkeit zur (modellierungs-) technischen Umsetzung gefunden.

7.7.2 Experimentelle Validierung

Nachdem sich dieser Modellierungsansatz „B“ gegenüber dem zuvor vorgestellten Ansatz „A“ nur in der Struktur zur Simulation der thermodynamischen Kenngrößen unterscheidet, kann die Validierung bzw. die Gegenüberstellung am leichtesten auf Basis der erreichbaren Abbildungsqualität der thermodynamischen Kenngrößen geschehen. Dazu wird zunächst exemplarisch anhand der Kenngröße Lambda das Zusammenwirken der unterschiedlichen Modellteile in Abbildung 7-34 beschrieben und analysiert.

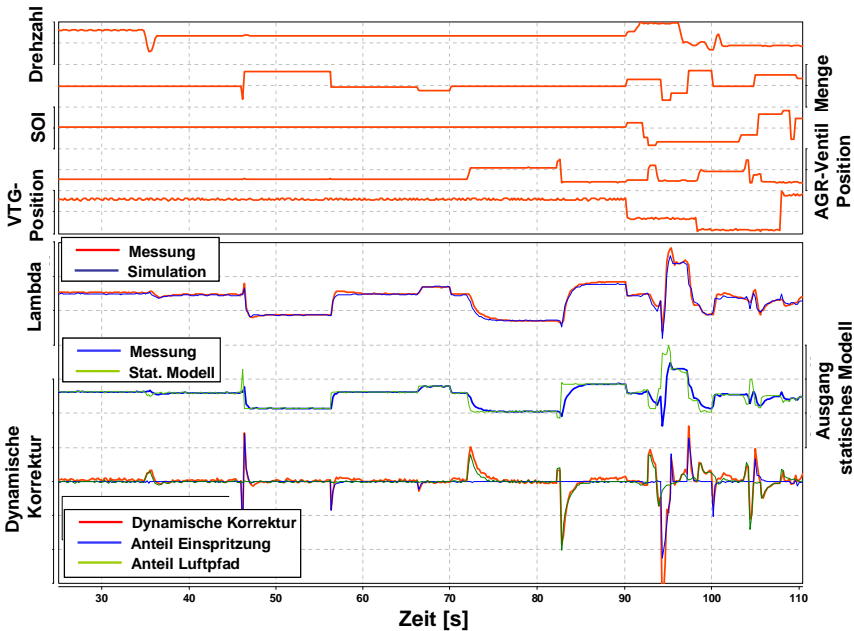


Abbildung 7-34: Zusammenwirken der Modellteile des Ansatz „B“ am Beispiel der Lambda-Simulation

Im oberen Diagramm ist der Verlauf der Variationsgrößen als Anregung dargestellt, wobei zum besseren Verständnis anfangs die Variationskanäle einzeln angeregt wurden, um den unterschiedlichen Beitrag der Modellteile zu identifizieren. Die oberste Kurve des unteren Diagramms zeigt den eigentlichen Vergleich von Simulation und am Prüfstand gemessenen Verifikationsdaten hinsichtlich der thermo-

dynamischen Kenngröße Lambda. Eine gute Abbildungsqualität über den gesamten Verlauf ist hier augenscheinlich. Die beiden unteren Kurven zeigen nun, wie sich der finale Lambda Wert in der Simulation bei dieser Modellarchitektur zusammensetzt. Zunächst liefert der statische Modellteil unmittelbar den stationären Endwert einer aufgeprägten Eingangswertänderung, was im Verlauf der mittleren Kurven, z.B. bei Sekunde 83, gut beobachtet werden kann. Die untersten Kurven demonstrieren das Zusammenspiel der zwei dynamischen Modellteile zur Kompensation des statischen Modells in transienten Phasen.

Anhand der unterschiedlichen Anregung der Variationsgrößen bzw. Modelleingänge kann gut die nach Einspritzung und Luftpfad unterschiedliche dynamische Kompensation beobachtet werden. Beispielsweise reagiert in Sekunde 46 nur das dynamische Modell der Einspritzgrößen (blaue Linie), da sich in den Eingängen nur die Einspritzmenge ändert. Das dynamische Modell des Luftpfades (grüne Linie) schlägt nicht aus. Genau umgekehrt dagegen verhalten sich die Modellteile in Sekunde 72 als Reaktion auf einen Sprung in der AGR-Ventilposition. Der hiermit mögliche Vergleich der dynamischen Auswirkung von Luftpfad- bzw. Einspritzaktuatorikänderungen offenbart die durchaus unterschiedlichen Zeitkonstanten der beiden Modellteile, was die Separation der Prozeßdynamiken in dieser Art und Weise rechtfertigt. Der Verlauf ab Sekunde 90 zeigt, daß sowohl die zeitliche Überlagerung wie die Überlagerung der Amplituden dieser Modellteile funktionieren. Die Abbildungsqualität im Lambdaverlauf läßt auch bei gleichzeitiger Änderung aller Eingänge keine Unterschiede erkennen.

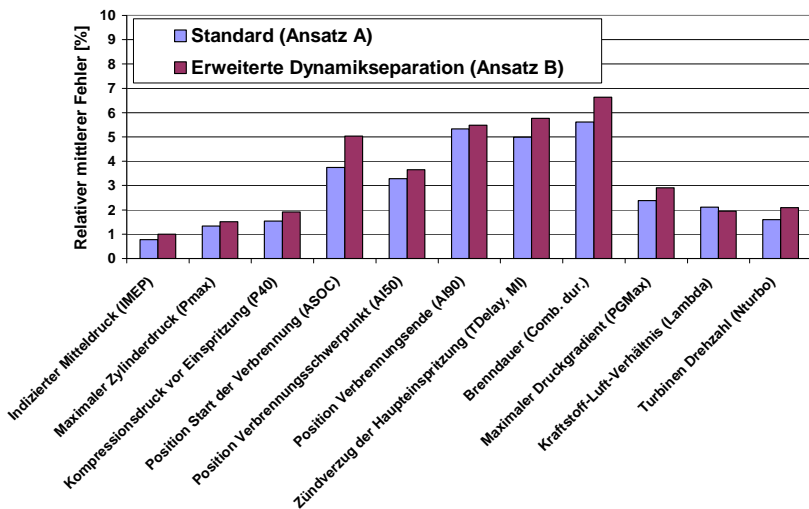


Abbildung 7-35: Vergleich Simulationsgenauigkeit zwischen Ansatz „A“ (Standard) und „B“ (Advanced Dynamic)

Ein Vergleich weiterer thermodynamischer Kenngrößen hinsichtlich des Fehlerkriteriums der relativen mittleren Abweichung ist in Abbildung 7-35 bezogen auf die Verwendung der Standardarchitektur gemäß Ansatz „A“ dargestellt. Zum fairen Vergleich wurde diesmal der Referenz-NEDC-Zyklus mit Bedatung B herangezogen, so daß bei gleicher Abbildungsqualität der thermodynamischen Kenngrößen auch von gleicher Abbildungsqualität der Prozeßausgangsgrößen ausgegangen werden kann.

Bis auf wenige Ausnahmen ist die Simulationsgenauigkeit nicht signifikant verschieden, aber tendenziell mit Ansatz „B“ (rote Balken) schlechter. Dies kann darauf zurückgeführt werden, daß die höhere Anzahl an verwendeten Modellierungsschritten eine Fehlerakkumulation selbst bei gleicher individueller Modellqualität hervorruft. Deshalb wäre bei dieser geringen Anzahl an Variationsgrößen der architektonische Ansatz „A“ auf jeden Fall zu bevorzugen, während bei höherer Eingangsdimensionalität eine Umkehr des Trends zugunsten Ansatz „B“ zu erwarten ist.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß die vorgeschlagene Architektur technisch realisierbar ist sowie mit experimentellen Versuchen validiert werden konnte und somit eine weitere Auftrennung der motorischen Prozeßdynamiken möglich ist. Der Vorteil dieser erweiterten Dynamikseparation konnte aber mit der vorliegenden Anzahl an Variationsgrößen nicht nachgewiesen werden, sondern wird erst bei höheren Eingangsdimensionen der jeweiligen dynamischen Modelle erwartet. Die Konzentration auf Ansatz „A“ ist daher unter den vorliegenden Randbedingungen für diese Arbeit gerechtfertigt.

8 Anwendungsbeispiele am HiL-Prüfstand

Die wichtigste übergeordnete Anwendung der hier vorgestellten Streckenbeschreibung ist die Simulation des motorischen Prozesses in einer virtuellen Entwicklungsumgebung. Dazu wurden in Abschnitt 4.1 Anforderungen aus der Applikation definiert, um typische Umfänge statt auf einem Motorprüfstand anhand eines Motormodells mit den schon genannten Vorteilen abzarbeiten. Als virtuelle Entwicklungsumgebung kommen grundsätzlich mehrere Möglichkeiten in Frage (vgl. Abschnitt 3.3.5). Für die Applikation von Motorregelungen scheint der HiL-Prüfstand am attraktivsten, da die Einbindung der realen Motorregelung die Verwendung und Bedatung der letztlich verfügbaren Funktionalitäten sowie der gleichen Applikationswerkzeuge wie am Motorprüfstand oder im Fahrzeug erlaubt. Der Nachteil der am HiL-Prüfstand auf Echtzeit begrenzten Simulationsgeschwindigkeit macht allerdings die MiL-Umgebung gerade für Optimierungsaufgaben ebenfalls sehr attraktiv. Mit dem hier untersuchten Modellierungskonzept konnte dort eine ca. 100-fach schnellere Zyklussimulation (gegenüber Echtzeit) durchgeführt werden, was die Möglichkeiten einer entsprechenden Optimierung stark erweitert.

Die Voraussetzungen eines für den closed-loop HiL-Betrieb geeigneten Motormodells, wie vollständige und zeitrichtige Stimulation der realen Motorsensorik, wurden bereits im vorherigen Kapitel überprüft. Ebenfalls wurde die für Applikationsaufgaben ausreichende Simulationsgenauigkeit der Ausgangsgrößen bei weiter Modellgültigkeit experimentell bestätigt. Ein weiterer Qualitätsvergleich beider Umgebungen in den im Folgenden vorgestellten Anwendungsbeispielen erscheint daher nicht notwendig. Vielmehr soll dieses Kapitel die erweiterten Versuchsmöglichkeiten der aufgrund der gegenüber dem heutigen Motorprüfstand deutlich kostengünstigeren und höher automatisierbaren HiL-Umgebung demonstrieren und die damit erreichten Applikationsqualitäten vergleichen. Zudem soll der Vorteil einer unmittelbaren dynamischen Bewertung der jeweiligen Applikation gezeigt werden.

Als Anwendungsbeispiel wurde hier die in typischen Applikationsprojekten recht versuchsintensive Emissionsabstimmung ausgewählt, die außerdem besonders gut das notwendige Zusammenspiel aus Stationär-Kennfeldabstimmung und transienter Zyklusoptimierung verdeutlicht (vgl. Abschnitt 3.5). Dazu wurden drei integrale Zielwerte für Stickoxide, Ruß und Verbrauch im NEDC-Zyklus definiert, die zunächst mit konventioneller Vorgehensweise in der virtuellen Entwicklungsumgebung erreicht werden sollen. Diese beginnt mit der Abstimmung des AGR-Reglers, dessen Auswirkung hier direkt auf die Zielgrößen bewertet werden kann. Die anschließende Reduktion des dynamischen Fahrzyklus auf 14 stationäre Punkte, die die Betriebspunkte mit größter Verweildauer im Zyklus repräsentieren sollen, erlaubt die etablierte Kennfeldoptimierung anhand weniger stationärer Betriebszustände über entsprechende kommerzielle Software (hier AVL CAMEO). Die Auswirkungen der Vernachlässigung transientser Zustände sowie die Reduktion auf weni-

ge Betriebspunkte sollen anhand einer Gegenüberstellung von Hochrechnung und dynamischer Messung diskutiert werden. Im Anschluß wird zusätzlich eine neue, bisher im Umfang in realen Entwicklungsumgebungen nicht durchführbare Vorgehensweise zur Optimierung vorgestellt, die eine verbesserte Ergebnisqualität liefern soll.

8.1 AGR-Reglerabstimmung

Die zur Basisabstimmung gehörenden Applikationsumfänge beinhalten meist die generelle Abstimmung der Luft- und Kraftstoffunktionalitäten sowie eine Auslegung von Vollast, Teillast und Leerlauf nach projektspezifischen Kriterien, während die Abstimmung einer modellbasierten AGR-Ratenregelung erst im Anschluß an die benötigten Grundkennfelder erfolgen kann. Dabei wird anfangs der größte Wert auf eine möglichst stabile Stationärpunkteinregelung gelegt, um die zunächst stationären Abstimmungsarbeiten zu erleichtern.

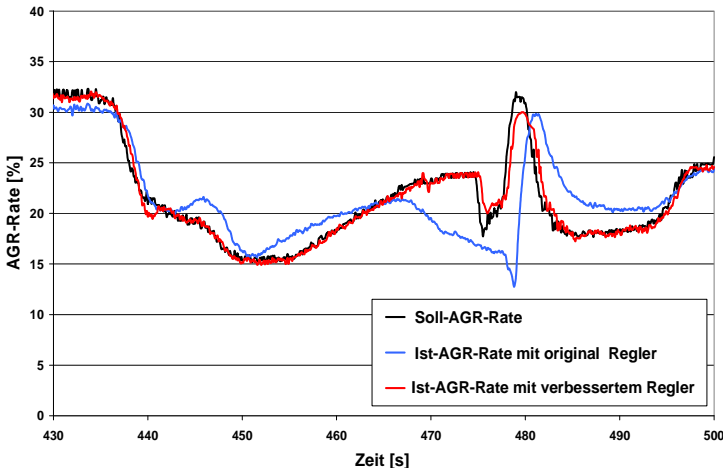


Abbildung 8-1: Verlauf der AGR-Rate mit unterschiedlichen Reglerabstimmungen

Zur transienten Zyklusoptimierung ist es daher notwendig, eine Anpassung des AGR-Ratenreglers für dynamische Betriebspunkt- und Sollwertänderungen vorzunehmen. Dazu können verschiedene Abstimmungsmethoden verwendet werden, auf die an dieser Stelle aber nicht näher eingegangen wird. Wichtig dagegen erscheint zum einen die grundsätzliche Möglichkeit der Abstimmung eines Luftpfadreglers in der virtuellen Entwicklungsumgebung und die Kenntnis der Auswirkungen einer veränderten Reglerparametrierung auf die eigentlichen Zielgrößen, die mit rein stationären (Emissions-) Optimierungen vernachlässigt würden. Nachdem bereits in Abschnitt 7.6.1 die korrekte Identifikation der Regelungsstrecke und die echtzeitfähige Implementierung des Motormodells nachgewiesen wurde, kann von

einer richtigen dynamischen Abbildung adaptierter Reglerparameter der Motorregelung ausgegangen werden. Abbildung 8-1 zeigt die Einregelung der AGR-Rate mit alter und neuer Reglerabstimmung in einem Ausschnitt des NEDC-Zyklus.

Die Veränderungen in den kumulierten Zyklusergebnissen des NEDC durch diese Reglerabstimmung sind in Abbildung 8-2 bezogen auf die zu 100% gesetzten Zielwerte in NO_x, Ruß und Kraftstoffverbrauch dargestellt. Dabei wurden als Basis die mit Bedatung „B“ der Motorregelung im NEDC-Zyklus erreichten Werte zugrunde gelegt (vgl. Abschnitt 7.6.3.1), die offensichtlich bereits recht nah an die Zielwerte herankommen. Die mit der Reglerabstimmung erreichten kumulierten Zyklusergebnisse zeigen eine kraftstoffverbrauchsneutrale, fünfprozentige Verbesserung in den NO_x Emissionen, während der Ruß um etwa 7% ansteigt.

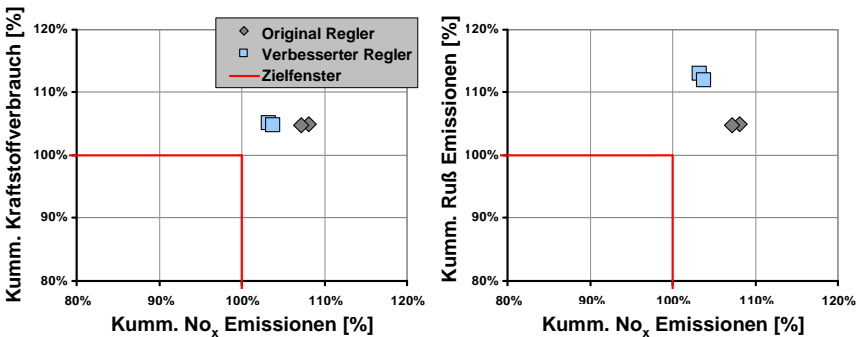


Abbildung 8-2: Vergleich der kumulierten Zyklusergebnisse vor und nach der AGR-Regleroptimierung

Dies ist typisch für die Anpassung eines Luftpfadreglers, der ohne Veränderung der Basiskennfelder nur den NO_x-Ruß Trade-Off verändern kann, was hier offensichtlich ist. Die Änderung zugunsten der NO_x-Emissionen läßt auf eine ehemals zu schwache Regelung schließen, da die gewünschte AGR-Rate offensichtlich häufig nicht erreicht wurde und als Folge des temporären Luftüberschusses eine erhöhte Stickoxidbildung resultierte. Diese Erkenntnis deckt sich mit Abbildung 8-1 und der erwarteten Auswirkung der vorgenommenen Erhöhung des P- und I-Anteils des AGR-Ratenreglers.

Die Vorteile einer Reglerabstimmung in der virtuellen Entwicklungsumgebung sind damit bereits offensichtlich. Während am (stationären) Motorprüfstand entweder gar nicht oder nur unzureichend die dynamische Reglerabstimmung während der Emissionsoptimierung berücksichtigt wird, sind hier sofort die Auswirkungen der Veränderungen auf die Zielgrößen ersichtlich. Eine Anpassung des Reglers nicht nur auf die Regelgröße sondern auch auf den Zielgrößenverlauf ist damit wesentlich leichter und erlaubt eine deutlich zielgerichteteren Optimierung der Stationärkennfelder im weiteren Verlauf. Die Größenordnung der durch diese Reglerab-

stimmung in den Zielgrößen erreichten Änderungen zeigt auch die zwangsläufige Unsicherheit in auf stationären Meßdaten basierten Hochrechnungen, die meist zusätzlich noch auf wenige Betriebspunkte konzentriert sind.

8.2 Konventionelle Emissionsoptimierung

Das Ziel einer Emissionsoptimierung ist die Erfüllung kumulierter Zielwerte im jeweiligen Emissionszyklus unter verschiedenen Randbedingungen. Aufgrund der Struktur heutiger Motorregelungen und der Verfügbarkeit von Optimierungsalgorithmen können aber nur Stationär-Kennfelder abgestimmt werden. Deshalb wird bei der konventionellen Vorgehensweise einer Optimierung häufig eine möglichst geringe Anzahl an stationären Betriebspunkten verwendet, die das Lastkollektiv des jeweiligen Zyklus repräsentieren soll. Dies stellt einen Kompromiß aus möglichem Versuchsumfang, ausreichender Kennfeldabdeckung und erwarteter Sensitivität der Variationsparameter dar. In den jeweiligen Betriebspunkten werden mittels DoE-Versuchsplänen lokale Modelle der ECU-Variationsgrößen erstellt, mit denen sich über entsprechende Software, wie beispielsweise AVL CAMEO, zyklusoptimale Bedatungen finden lassen. Aufgrund der Beschränkung auf eine vergleichsweise geringe Anzahl an stationären Betriebspunkten müssen allerdings die hieraus resultierenden Kennfelder häufig stark interpoliert und zusätzlich geglättet werden, um eine dynamisch fahrbare Applikation zu gewährleisten.

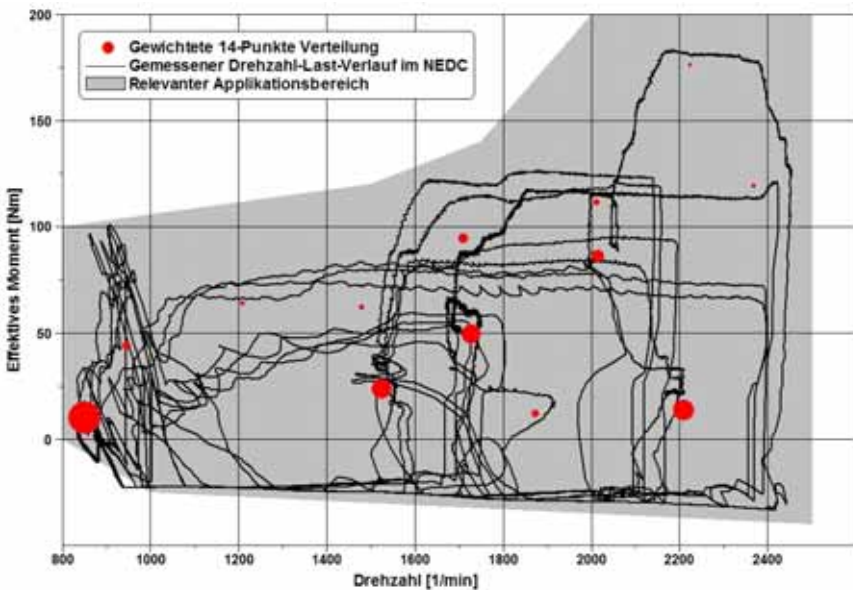


Abbildung 8-3: Gewichtete 14-Punkte Verteilung gegenüber NEDC-Spurdaten

Die hinzukommende Vernachlässigung dynamischer Effekte in der Zyklushochrechnung führt oft zu ungenauen Prädiktionen und daher zu mehrfachem iterativem Vorgehen in der Kennfelderstellung. Diese Problematik kann anhand des nachfolgend gezeigten Beispiels gut nachvollzogen werden, bei der diese etablierte Vorgehensweise in der virtuellen Entwicklungsumgebung angewandt wurde. Abbildung 8-3 zeigt zunächst die Verteilung der 14 stationären Punkte gegenüber den transienten Spurdaten des NEDC. Es ist erkennbar, daß zwar Bereiche hoher Verweildauern gut erfaßt werden, große Kennfeldbereiche aber durch Interpolation abgedeckt werden müssen.

Eine betriebspunktindividuelle Modellerstellung selbst für nur vier Variationsgrößen (Einspritzzeitpunkt sowie -druck, AGR-Rate und Ladedruck) bedingt mittels DoE bei nur 14 Drehzahl-Lastpunkten einen Versuchsumfang von wenigstens 600 Messungen, was am Motorprüfstand eine Nettobetriebszeit von ca. 50 Stunden bedeutet. Diese resultiert primär aus Verstelldauer, Beruhigungszeit und Meßdauer, aber auch aus zwischenzeitlichen Wartungsanforderungen verschiedenster Meßgeräte (z.B. Rekalibration). Eine identische Vorgehensweise unter Verwendung des vorgeschlagenen Modellierungskonzeptes in der virtuellen Entwicklungsumgebung verkürzt diesen Aufwand auf knapp unter 3½ Stunden. Dabei profitiert der Anwender von den separierten Prozeßdynamiken der Modellarchitektur, da in diesem Falle die verzögernde Sensordynamik entfallen kann. Weiterhin können die Betriebszustände am HiL-Prüfstand deutlich schneller konditioniert und eingeregelt werden, Wartungsanforderungen entfallen und die Bruttomeßdauer rückt deutlich näher an die Nettomeßdauer heran. Allein der zeitliche Vorteil durch die virtuelle HiL-Umgebung ist also bereits enorm.

Betrachtet man die in Abbildung 8-4 aufgetragenen kumulierten Zyklusergebnisse, so fällt zunächst die Abweichung der aus den 14 stationären Punkten hochgerechneten Werte (oranger Punkt) gegenüber den dynamisch vermessenen Läufen auf (hellblaue Quadrate). Dabei wurde für diese Optimierung das zuvor erreichte Zyklusergebnis mit angepasster AGR-Regelung als Basis angenommen. Der Fehler von fast 15% in NO_x und 7% in Verbrauch suggeriert bereits die Zielerfüllung in diesen Größen, während einzig der Ruß noch zu optimieren wäre. Grund der hohen Abweichung in der Hochrechnung sind die nicht berücksichtigten transienten Effekte und die Reduktion auf einzelne für die Verweildauer repräsentative Betriebspunkte.

Die stationäre Hochrechnung der vom Optimieralgorithmus gefundenen ECU-Bedatung für diese Randbedingungen (grüne Dreiecke) zeigt daher eine Verschiebung der NO_x -Emissionen zugunsten des Rußes und weiteres Potential im Verbrauch. Die dynamische Vermessung dieses Bedatungsvorschlages (violette Rauten) allerdings ist wiederum weit entfernt von der stationären Prognose. Zwar werden die Trends richtig wiedergegeben, NO_x steigt, Ruß und Verbrauch sinken, aber aufgrund der schon falschen Ausgangsposition wird letztlich kein Zielkriterium erfüllt. Hinzu kommt die notwendige Interpolation der nur in den wenigen Betriebspunkten optimalen Bedatung auf den relevanten Kennfeldbereich. Da in

der realen Entwicklungsumgebung davon ausgegangen werden muß, daß keine dynamischen Zyklusergebnisse zu diesem Zeitpunkt vorliegen, wären eine spätere erneute Optimierung und entsprechende Veränderungen im Datensatz notwendig.

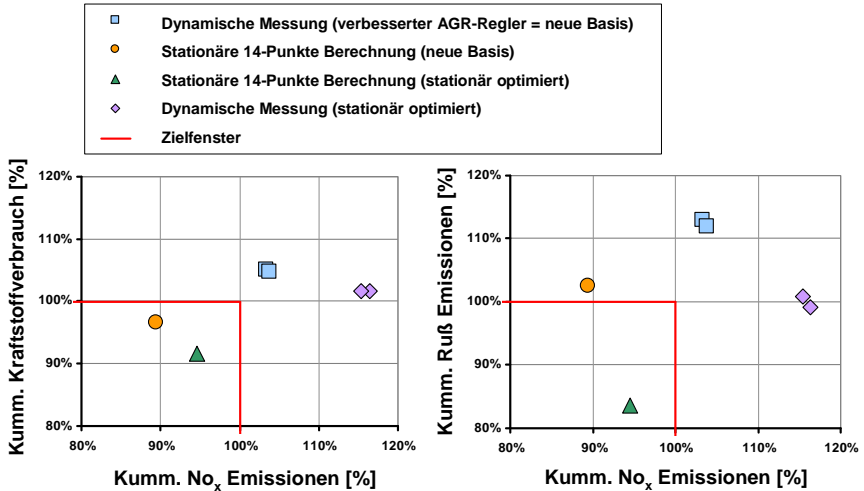


Abbildung 8-4: Vergleich der kumulierten Zyklusergebnisse vor und nach der 14-Punkte-Optimierung

Dies zeigt, selbst wenn hier die Hochrechnung der stationären Punkte vergleichsweise schlecht ausfällt, daß eine Reduktion auf diese geringe Anzahl an stationären Punkten keine solide Basis für eine Kennfeldoptimierung darstellt und die dynamischen Effekte nicht zu vernachlässigen sind. Wenn auch eine dynamische Optimierung derzeit mathematisch nicht möglich ist, so kann doch allein die Kenntnis der dynamischen Zyklusergebnisse hier sofort etwaige Unschärfen aufzeigen und eine frühzeitige Reaktion ermöglichen. Somit bietet die virtuelle Entwicklungsumgebung entscheidende Vorteile selbst im konventionellen Applikationsprozeß.

8.3 *Verbesserte Emissionsoptimierung*

Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt wurde, entstehen mit der etablierten Vorgehensweise bei der Emissionsabstimmung unter anderem aufgrund der vergleichsweise geringen Anzahl an stationären Betriebspunkten relativ große Unschärfen in der Hochrechnung auf das Zyklusergebnis. Eine höhere Anzahl an repräsentativen Betriebspunkten ist allerdings durch die verfügbare Prüfstandszeit in realen Umgebungen nahezu ausgeschlossen, ebenso wie mögliche iterative dynamische Optimierstrategien. Innerhalb der virtuellen Entwicklungsumgebung bieten sich durch die deutlich effizientere Datengewinnung erweiterte Möglichkeiten. In Ermangelung eines dynamischen Optimierungsalgorithmus kann jedoch der Vorteil einer vorliegenden funktionalen Beschreibung des dynamischen Motorverhaltens zunächst nicht voll genutzt werden. Dies würde das mit Abstand höchste Potential bieten. Es bleibt der Vorteil der kostengünstigeren, schnelleren und höher automatisierbaren Datengewinnung, die grundsätzlich zwei neue Optionen ermöglicht.

In einer MiL-Umgebung wäre ein modellbasiertes Vorgehen basierend auf dynamischen Zyklusvermessungen durch die deutlich gesteigerte Simulationsgeschwindigkeit vorstellbar. Realistischerweise könnte bei diesem Konzept ca. alle 30 Sekunden ein NEDC-Zyklus mit veränderten Variationsparametern durchlaufen werden, so daß ein integraler DoE-Ansatz mit bis zu 1000 Meßreihen noch in einem Tag zu vermessen wäre. Problematisch ist allerdings neben der notwendigen Nachbildung der erforderlichen Motorregelungsfunktionalitäten, eine auf Kennfeldstützstellen und jeweiligen Wert adaptierte Versuchsplanung. Diese Möglichkeit wird daher in dieser Arbeit nicht näher untersucht.

Alternativ ist bei konventioneller, auf stationären Daten basierender Kennfeldoptimierung eine deutliche Erhöhung der Anzahl der Betriebspunkte vorstellbar, um zum einen die Kennfeldabdeckung zu verbessern und zum anderen die notwendige Interpolation und Glättung der optimierten Daten zu verringern. Im Folgenden wurde eine Vermessung aller relevanten Kennfeldstützstellen über einen lokalen DoE-Ansatz mit den vier Variationsgrößen Einspritzzeitpunkt sowie -druck, AGR-Rate und Ladedruck durchgeführt. Für die über 2000 Meßpunkte war eine Bruttomeßzeit von nur 15 Stunden in der virtuellen Entwicklungsumgebung erforderlich. Die gewichtete Verteilung der 43 Kennfeldstützstellen in Drehzahl und Last gegenüber den transienten Spurdaten des NEDC zeigt Abbildung 8-5.

Aufgrund der äquidistanten Verteilung in Drehzahl und Einspritzmenge als Führungsgrößen der Motorregelung war eine Berücksichtigung der maximal erlaubten Gradienten im Kennfeld in den Randbedingungen des Optimierungsalgorithmus möglich, so daß keine weitere Veränderung der optimierten Bedatung durch Interpolation oder Glättung nötig war. Allerdings mußte anhand des sich teilweise verschiebenden thermodynamischen Wirkungsgrades eine Anpassung der jeweiligen Gewichtung der Betriebspunkte für die Hochrechnung erfolgen.

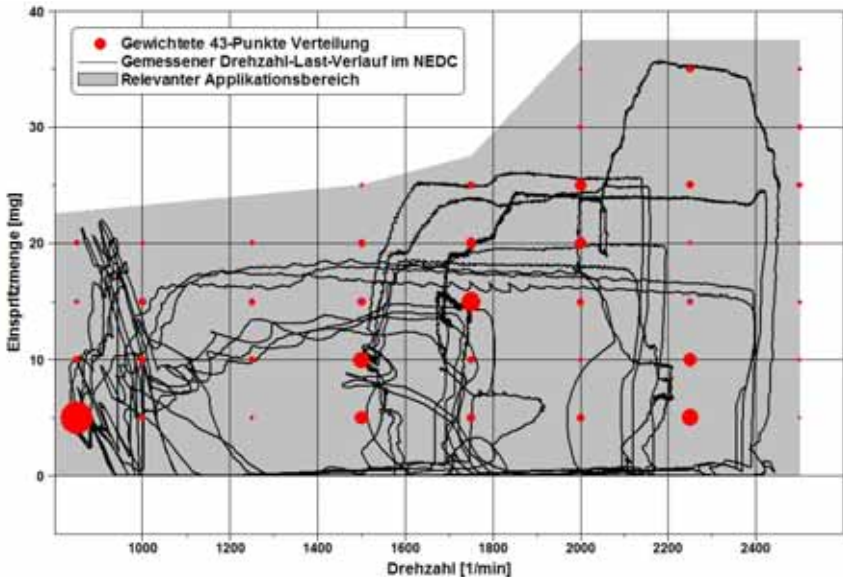


Abbildung 8-5: 43-Punkte Verteilung gegenüber NEDC-Spurdaten

Die erreichten Ergebnisse dieser neuen Vorgehensweise zeigt, wobei wiederum als Basis das zuvor erreichte Zyklusergebnis mit angepasster AGR-Regelung angenommen wurde. Zunächst ist eine deutlich verbesserte Übereinstimmung zwischen Hochrechnung aus den stationären Punkten (oranger Punkt) und dynamischer Zyklusvermessung (hellblaue Quadrate) ersichtlich. Während der Kraftstoffverbrauch exakt getroffen wird, liegen die Abweichungen in den Stickoxid- und Rußemissionen deutlich unter fünf Prozent und damit in einem sehr guten Bereich. Zur Erfüllung der Zielkriterien müssen basierend auf der stationären Hochrechnung alle Zielgrößen, aber besonders die Rußemission verringert werden. Die vom Optimierungsalgorithmus gefundene ECU-Bedatung zeigt dann auch die deutlichste Verbesserung im Rußverhalten bei gleichzeitiger Verringerung der NO_x -Emissionen sowie geringfügiger Kraftstoffverbrauchsverbesserung (grünes Dreieck). Dynamisch vermessen (violette Rauten) zeigt sich erneut eine nur geringe Abweichung bezogen auf die stationäre Hochrechnung, so daß die Zielgrößen im gewünschten Zielfenster verbleiben und damit die Optimierung erfolgreich war. Die größte Abweichung tritt mit fünf Prozent im Ruß auf, die Stickoxidemissionen sind vier Prozent und der Kraftstoffverbrauch ist ca. ein Prozent different.

Damit ist der Vorteil dieser Methodik gegenüber der konventionellen Vorgehensweise mit weniger Betriebspunkten evident. Zwar verbleiben zwangsläufig Abweichungen zwischen stationärer Hochrechnung und dynamischer Vermessung schon aufgrund der transienten Reglereinflüsse, die Größenordnung der Abweichungen

konnte aber deutlich gesenkt werden, auch weil eine anschließende Interpolation und Glättung der Bedatung nicht notwendig war. Dies stellt unabhängig von der besseren Prognosequalität auch eine robustere und effizientere Applikation sicher.

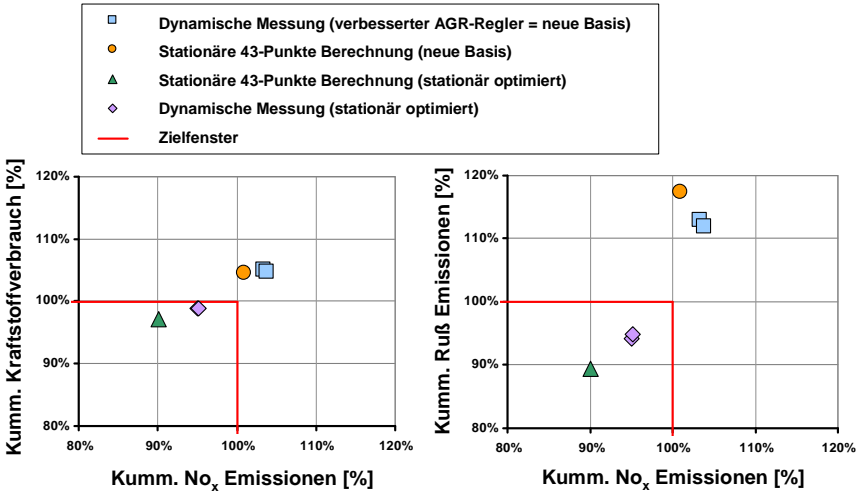


Abbildung 8-6: Vergleich der kumulierten Zyklusergebnisse vor und nach der 43-Punkte-Optimierung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die exemplarisch ausgewählte Applikationsaufgabe in dieser virtuellen Entwicklungsumgebung bei Verwendung des hier untersuchten Modellierungskonzeptes problemlos durchgeführt werden konnte. Klare Vorteile ergeben sich in der effizienteren Vermessung von Betriebszuständen aufgrund entfallender Sensordynamik, schnellerer Konditionierung und höherer Gesamtsystemrobustheit. Dies kann zu einer verbesserten Vorgehensweise in der Applikation genutzt werden. Die Verfügbarkeit dynamischer Informationen kann zwar noch nicht in einem Optimieralgorithmus genutzt werden, die unmittelbare Kenntnis der transienten Zyklusergebnisse ist aber von großem Vorteil, um beispielsweise die aus stationären Zuständen optimierten Motorregelungskennfelder entsprechend nachzutrimmen. Ebenfalls wird somit der Einfluß einer womöglich nicht zyklusoptimalen Reglerabstimmung in einem frühen Stadium der Entwicklung bereits auf die Zielgrößen bewertbar.

9 Schlußfolgerung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit sollte das Konzept für eine global dynamische Streckenbeschreibung eines Verbrennungsmotors entwickelt werden, die in der Applikation einsetzbar ist. Während die technische Umsetzung sowie eine gute Modellqualität für typische Einsatzbereiche bereits experimentell nachgewiesen wurde, ist der explizite Abgleich der anfangs formulierten Anforderungen aus der Applikation an ein solches Motormodell noch offen. Die bereits eingeführten Bewertungskriterien sollen daher im Folgenden angewandt und die Erkenntnisse diskutiert werden.

Des Weiteren wurde anhand eines Anwendungsbeispiels die grundsätzliche und aufgabenspezifische Einsatzfähigkeit des Motormodells in einer virtuellen Entwicklungsumgebung für applikative Umfänge demonstriert. Bereits aus der Anwendung heraus konnten mögliche Vorteile sowie evolutionäre Vorgehensweisen aufgezeigt werden. Die verallgemeinerte Bedeutung und Auswirkung der Integration einer solchen virtuellen Entwicklungsumgebung in den heutigen Applikationsprozeß ist aber noch zu bewerten.

Schließlich lag der Fokus der Arbeit auf dem konzeptionellen Nachweis der vorgeschlagenen Modellarchitektur und der daraus resultierenden Methoden. Eine Erweiterung des Gültigkeitsbereichs hinsichtlich geänderter Umweltbedingungen oder weiteren Variationsgrößen konnten in diesem Rahmen nicht untersucht werden. Für eine produktive Nutzung in kommerziellen Projekten sind außerdem noch große Anstrengungen in verschiedenen Bereichen besonders hinsichtlich standardisierter oder gar automatisierter Modellierungsprozesse notwendig, was abschließend im Abschnitt Ausblick näher ausgeführt werden soll.

9.1 *Abgleich der Anforderungen aus der Applikation*

Die aus der expliziten Formulierung der Anforderungen der Applikation abgeleitete Klassifizierung und der Vergleich mit existierenden Motormodellen offenbarte die Notwendigkeit eines neuen Modellierungskonzeptes mit spezifischen Eigenschaften. Diese sind zunächst technischer Natur, um die typischen Applikationsaufgaben überhaupt angehen zu können.

Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, ist die Berücksichtigung zeitvarianter Abhängigkeiten ein essentielles Kriterium, da transiente Effekte des motorischen Verhaltens für die zielgerichtete Abstimmung immer mehr an Bedeutung gewinnen. Allerdings ist eine beliebig hohe Auflösung weder für die Applikation erforderlich noch für die Implementierung auf echtzeitfähige Systeme möglich. Die notwendige Diskretisierung in Zeitschritte bedingt die Wahl einer bestimmten Frequenzbandbreite in der Versuchsplanung, die wiederum mit der Systemdynamik entscheidend für die

Rechen- bzw. Abstrakte des dynamischen Modells ist. Die geforderte dynamisch korrekte Abbildung der Prozeßausgangsgrößen sowie der von der ECU verwendeten Regelungsstrecken konnten mit den diesbezüglichen Annahmen in Stimulationsfrequenz und dynamischer Modellordnung durch experimentelle Untersuchungen dargestellt werden. Es zeigte sich, daß einerseits in der Motorregelung implementierte Algorithmen ausreichend schnell zur unverzerrten Ausgabe an (geregelten) Stellgrößenänderungen bedient wurden und andererseits die Rechengeschwindigkeit der Simulation vielfach über der erforderlichen Echtzeitgrenze lag. Exemplarische Applikationsaufgaben wie Reglerabstimmung oder dynamische Emissionsoptimierung konnten problemlos anhand des Motormodells abgearbeitet werden. Als besonderer Vorteil erwies sich die getrennte Identifikation von Prozeß- und Sensordynamik durch den Entfall entsprechender Beruhigungszeiten in der Simulation. Das Kriterium der zeitlichen Auflösung wird also entsprechend der Anforderungen erfüllt.

Eine durchgängige Abdeckung des relevanten Betriebsbereiches ist ebenfalls für die meisten Anwendungen entscheidend. Hier konnte wegen der begrenzten Versuchsbedingungen und -umfänge nur die Durchgängigkeit der Drehzahl-/ Last-Ebene bei sonst konstanten „Standard“-Bedingungen eines Motorprüfstandes nachgewiesen werden. Das bedeutet, daß zwar beliebige Lastzustände durchfahren werden können, aber die Berücksichtigung veränderlicher Umweltbedingungen nicht untersucht wurde. Zwar sind somit die heute am Motorprüfstand abzuleistenden Umfänge abgedeckt, im Sinne einer durchgängigen Entwicklungsumgebung besteht aber noch Bedarf an der Ausweitung dieses Kriteriums. Nichtsdestotrotz ist mit der Verfügbarkeit einer durchgängigen, auch dynamisch gültigen Drehzahl-/Last-Abhängigkeit des Motormodells ein wesentlicher Schritt zur modellbasierten Applikation geleistet.

Als weiteres Kriterium wurden im Abbildungsumfang die durch das Modell beschreibbaren Prozeßausgänge definiert, wobei die Anforderungen in dieser Hinsicht sowohl von den beabsichtigten Einsatzfeldern als auch von der Entwicklungsumgebung abhängen. Im Falle einer HiL-Umgebung sind neben den eigentlichen Zielgrößen sämtliche Sensoren der Motorregelung zu stimulieren. Generell wurde der Anspruch gestellt, alle am Prüfstand meßbaren Größen auch in der Simulation verfügbar zu haben, um gleichwertige Bedingungen zwischen den Entwicklungsumgebungen zu schaffen. Nachdem die vollständige HiL-Implementierung nachgewiesen und typische Zielgrößen bereits in ihrer Genauigkeit zwischen Motor- und HiL-Prüfstand verglichen wurden, kann bei diesem Modellierungskonzept von der Erfüllung dieses Kriteriums ausgegangen werden, auch wenn es im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig nachgewiesen wurde.

Sowohl für den Einsatzzweck als auch für die Modellarchitektur ist der Detaillierungsgrad des Motormodells ausschlaggebend. Es wurde dargelegt, daß für unterschiedliche Entwicklungsstufen im Motorentwicklungsprozeß unterschiedliche Anforderungen an den Detaillierungsgrad bestehen, dieser aber möglichst

konsistent in der gesamten Modellarchitektur gehalten werden sollte. Für die Applikation sind primär Auswirkungen auf die Prozeßausgangsgrößen bei Aktuator- und Zustandsänderungen gemittelt über ein Arbeitsspiel unter Berücksichtigung der Gas- und Arbeitsspieldynamik interessant. Die diesbezügliche Modellgültigkeit konnte durch transiente Validationszyklen unterschiedlicher Bedatung und Dynamikanregung nachgewiesen werden. Dabei werden Änderungen der Bedatung der Motorregelung in Sollwerten und Reglerparametern berücksichtigt. Das nur nach dynamischen Ursachen und thermodynamischen Effekten separierte Modellierungsverfahren kann als durchgängig und konsistent im Detaillierungsgrad angesehen werden und bietet eine vergleichsweise flache Modellierungshierarchie. Mit der null-dimensionalen, arbeitsspielgemittelten Modellierungsmethode sind die notwendigen Variationsmöglichkeiten in ausreichend hoher Rechengeschwindigkeit für alle Ausgänge darstellbar.

Das Kriterium einer ausreichenden Abbildungsqualität wurde bereits umfangreich beleuchtet. Wie bei allen experimentellen Versuchen setzt sich die Genauigkeit der gewonnenen Daten aus vielen Faktoren zusammen, die vielfach unabhängig vom verwendeten Modellierungsverfahren sind. Es konnte gezeigt werden, daß die als Referenz betrachtete Motorprüfstandsumgebung besonders dynamisch bereits Ungenauigkeiten bedingt, die zwangsläufig auch Eingang in die datengetriebenen Modelle finden. Eine separate Bewertung der Modellgenauigkeit ist daher unmöglich. Es konnte aber durch verschiedene Untersuchungen bestätigt werden, daß die Simulationsgenauigkeit dieses Modellierungskonzeptes für physikalische Ausgangsgrößen im Bereich dieser Meßgenauigkeit liegt ($< 5\%$ relativer dynamischer Fehler) und im Bereich der Emissionen nur leicht darüber ($< 10\%$ relativer dynamischer Fehler). Damit ist eine für Applikationsprojekte ausreichende Abbildungsqualität sichergestellt.

Neben rein technischen Anforderungen sind psychosoziale Aspekte für Akzeptanz und somit letztendlich Erfolg der Methode entscheidend. Die realisierte Einbindung des entwickelten Motormodells in eine von der Bedienung und Performance dem Motorprüfstand ähnliche HiL-Entwicklungsumgebung stellt dazu einen entscheidenden Schritt dar, auch weil zum Betrieb des Motormodells keine zusätzliche Kenntnis in Modellierungsverfahren oder entsprechender Software benötigt wird. Die Einbindung und Rückkopplung der realen Motorregelung und die damit verbundenen gleichen Freiheitsgrade in der Applikation wie am Motorprüfstand tragen auch zu einem leichteren Transfer gewonnener Bedatungen auf unterschiedlichen Entwicklungsumgebungen bei. Die automatisierte, datengetriebene Identifikation des Motormodells wird ebenfalls von den meisten Applikateuren als umkomplizierter gegenüber einer physikalisch basierten, meist komplexeren und schwierig zu beschaffenden Parametrierung empfunden. Die Handhabbarkeit des Modellansatzes für die Applikation kann daher als gut bewertet werden.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Anforderungen der Applikation an ein Motormodell mit diesem Modellierungskonzept sehr gut erfüllt werden, auch

wenn noch der Wunsch nach erweiternden Funktionalitäten besteht. Gegenüber bestehenden Ansätzen wurde somit ein deutlicher Fortschritt erreicht.

9.2 *Bedeutung und Auswirkungen der Integration in den Applikationsprozeß*

Die Gründe für eine modellbasierte Applikation in einer virtuellen Entwicklungsumgebung sind vielfältig. Neben einer robusteren und effizienteren Vorgehensweise scheinen die weiter steigenden Anforderungen an zukünftige Applikationen in ihrer Komplexität mit bisherigen Methoden kaum noch beherrschbar. Eine durchgängige, den gesamten Applikationsprozeß begleitende Entwicklungsumgebung, die alle Aufgabenfelder abdecken kann und eine multikriterielle Betrachtung oder gar Optimierung erlaubt, ist daher die Vision vieler (Methoden-) Entwickler. Schon heute werden wegen begrenzter Verfügbarkeit an Prototypen zunehmend Anstrengungen unternommen, Fahrzeugumfänge auf das Prüffeld (road to rig) und diese wiederum in die Simulation (rig to lab) zu verlagern. Damit würden sich auch immer mehr transiente und in den Umweltbedingungen veränderliche Versuchsumfänge von der Straße bis in die Simulation verschieben. Voraussetzung ist die Verfügbarkeit einer geeigneten Streckenbeschreibung, die diese Variabilitäten auf die motorischen Ausgangsgrößen sicher abbildet und dabei für die Applikation handhabbar bleibt. Bisherige Ansätze erfüllen diese Anforderungen nur teilweise bzw. fokussieren nicht auf die Applikation, weshalb derzeit die Verwendung virtueller Entwicklungsumgebungen hier noch sehr begrenzt ist.

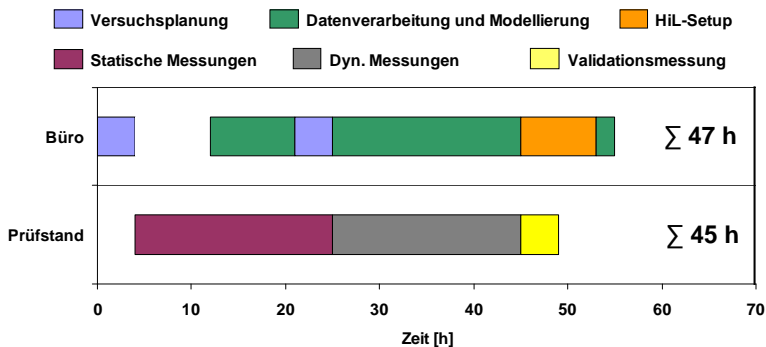


Abbildung 9-1: Zeitliche Aufwände zur Modellerstellung

Hinzu kommt ein weiterer essentieller Aspekt jedes kommerziellen Applikationsprozesses, der neben der schon diskutierten Erfüllung der modellierungstechnischen Anforderungen eine positive Rentabilitätsanalyse fordert. Selbst bei evidenten qualitativen Vorteilen entscheiden letztlich die Kosten für oder gegen die Beauftragung eines Applikationsprojektes durch den Kunden, weshalb eine in

Einsatzmöglichkeiten und -umfang individuelle Abwägung nötig ist. Für den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Betriebsbereich eines Motors können die in Abbildung 9-1 geschätzten zeitlichen Umfänge zur Erstellung einer solchen Streckenbeschreibung zugrundegelegt werden. Dabei kann zwischen Aufwänden am kostenintensiven aber automatisierbaren Motorprüfstand und der zur Modellbildung notwendigen Arbeitskraft unterschieden werden. Es zeigt sich, daß die initiale Modellerstellung zwar zeitlich überschaubar aber ressourcentechnisch nicht unerheblich ist und eine entsprechende Planung voraussetzt.

Die schon dargestellten Vorteile einer virtuellen Entwicklungsumgebung sind also nur über entsprechende Laufzeit rentabel, was exemplarisch für die hier verwendeten Entwicklungsumgebungen in Abbildung 9-2 dargestellt ist. In diesem Falle wäre der gleichwertige Einsatz der virtuellen Umgebung gegenüber einem Motorprüfstand ab ihrer Nutzung von ca. 65 Stunden gerechtfertigt und würde im weiteren Verlauf sogar deutlich Kosten einsparen. Die Verlagerung der Umfänge einer konventionellen Emissionsoptimierung in die virtuelle Entwicklungsumgebung, wie im hier angeführten Anwendungsbeispiel aus Kapitel 8 beschrieben, würde demnach bereits einen Einsatz rechtfertigen und die aufgezeigten zusätzlichen Vorteile bringen.

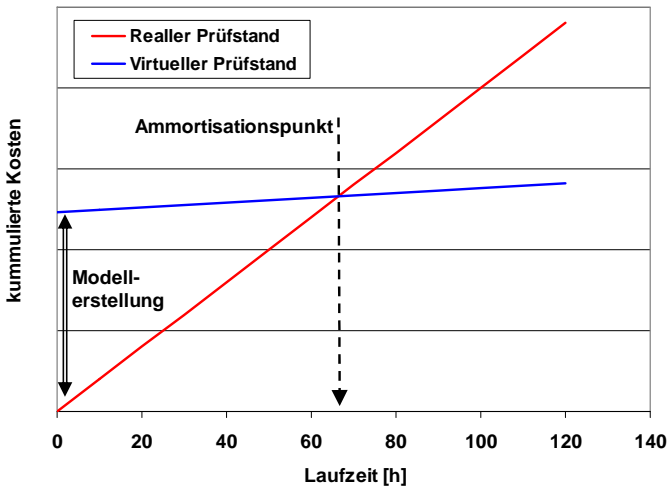


Abbildung 9-2: Rentabilitätsanalyse des Einsatzes eines virtuellen Prüfstandes

Aus diesem Blickwinkel scheinen mögliche, teilweise schon angesprochene Modellerweiterungen nicht mehr so attraktiv, da die Aufwände in der Modellerstellung deutlich zunehmen und die Umfänge in der Applikation hierfür vergleichsweise gering sind. Die letztendliche Rentabilitätsschwelle ist aber sehr stark projektab-

hängig, da sich beispielsweise bei Applikationen mehrerer Varianten die Einsatzmöglichkeiten bei gleichen Kosten multiplizieren.

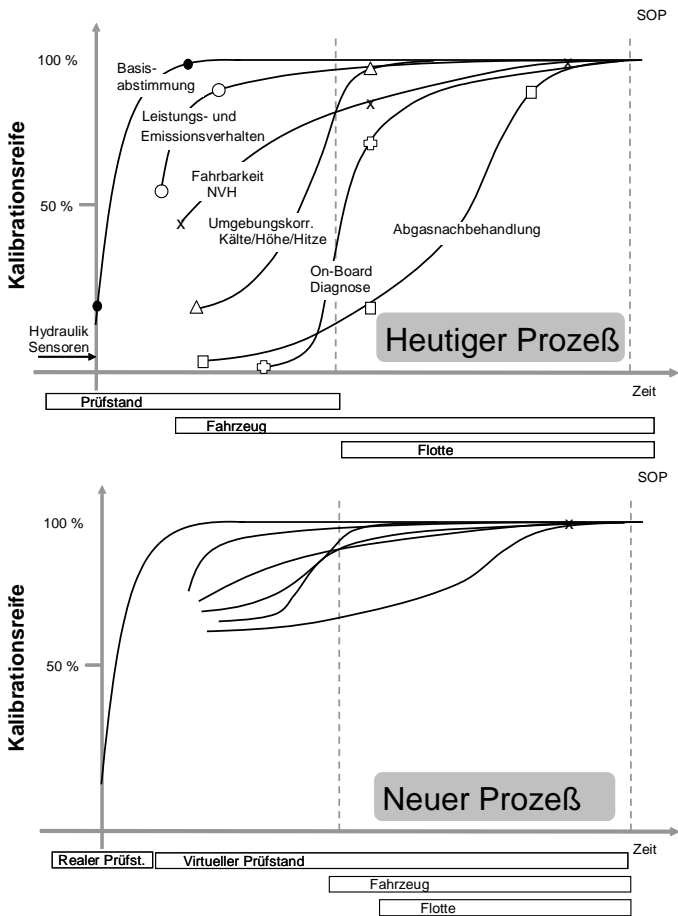


Abbildung 9-3: Verlauf der Applikationsreifegrade mit bisheriger (oben) und neuer Vorgehensweise (unten)

Um allerdings das wahre Potential derartiger Motormodelle sichtbar zu machen und nutzen zu können, ist eine vollständige Integration der virtuellen Entwicklungsumgebung in den heutigen Applikationsprozeß notwendig, was eine umfassende Umstrukturierung bedeuten würde. Neben den schon genannten Vorteilen bieten sich neue Möglichkeiten zur Vermeidung sequentieller und iterativer Entwicklungsschritte mittels durchgängigerer Systemkenntnis. Auswirkungen von

Veränderungen einzelner Funktionalitäten der Motorregelung unter verschiedenen Randbedingungen (z.B. Umweltbedingungen) können in der Simulation jederzeit für unterschiedliche Zielkriterien oder Szenarien (z.B. worst-case Analyse) zur Verfügung gestellt und bewertet werden. Klassische Zielkonflikte unterschiedlicher Applikationsphasen wie Fahrbarkeit und Emissionierung können so deutlich früher und schneller aufgelöst bzw. entschärft werden. Die Simulation transienter Zyklen schon weit vor der Applikation im Fahrzeug erleichtert beispielsweise auch die bisher mit hohem Adaptionaufwand verbundenen Übergänge zwischen verschiedenen Entwicklungsumgebungen. Dabei zeigen die Erkenntnisse dieser Arbeit, daß eine vollständige virtuelle Applikation auf absehbare Zeit nicht zu verwirklichen sein wird, da entsprechende Modellierungsaufwände nicht durch ihren Nutzen gerechtfertigt sind. Vielmehr muß das Ziel ein möglichst hoher Grad in der Vorbedatung der unterschiedlichen Teilbereiche der Applikation sein, siehe Abbildung 9-3, die dann in der Zielumgebung feinjustiert bzw. abgesichert werden. Die Entwicklung geeigneter integrierter Werkzeuge und Methoden hin zu einem voll integrierten und durchgängigen Prozeß wird derzeit vorangetrieben.

Es läßt sich also festhalten, daß die Bedeutung und Auswirkung einer in den Applikationsprozeß integrierten virtuellen Entwicklungsumgebung weit über die dem Motorprüfstand gleichwertige Verwendung hinausgeht und daher angestrebt werden sollte.

9.3 Ausblick

Schon in der heutigen Motorenentwicklung wird die erfahrungsbasierte Applikation zunehmend durch eine mittels DoE-Methoden unterstützte, modellbasierte Vorgehensweise ersetzt. Während hier noch lokal stationäre Modelle vorherrschend sind, hat die Entwicklungsmethodik längst die Vorteile einer global dynamischen Modellierung aufgezeigt und versucht sich seitdem an zielführenden Ansätzen. Mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Modellierungskonzept konnte der Nachweis eines solchen Ansatzes für einen Dieselmotor unter spezifischen Randbedingungen gezeigt werden. Aufgrund äußerer Umstände konnte leider keine Übertragbarkeit auf andere Motorenkonzepte (z.B. Otto-Motoren) untersucht werden, ebenso wie noch eine höhere Anzahl an Variationsgrößen zu überprüfen oder eine Erweiterung des Ansatzes auf geänderte Umweltbedingungen (z.B. Warmlauf) wünschenswert wäre. Die Verknüpfung mit weiteren Modellen, beispielsweise zur Simulation der Vorgänge in Abgasnachbehandlungssystemen, erscheint ebenfalls sehr attraktiv.

Darüber hinaus ist es noch ein weiter Weg von diesem Prototyp zu einem robusten Produkt. So besteht der Bedarf an einer durchgängigen Toolkette zur Unterstützung des Modellierungsprozesses auch für Anwender mit geringer diesbezüglicher Qualifikation. Auch in anderen Anwendungsfeldern wie Entwicklung verbesserter Diagnoseverfahren müssen weitere Erfahrungen gesammelt und der Nutzen derartig weitreichender modellbasierter Applikation den Entwicklern nahegebracht werden. Die größten Vorteile könnten über eine vollständige Integration einer virtuellen Entwicklungsumgebung in den Applikationsprozeß erreicht werden. Hierzu bedarf es allerdings noch großer Anstrengungen in der Entwicklung geeigneter integrierter Werkzeuge und Methoden bis hin zu einem multikriteriellen, dynamischen Optimierverfahren.

In diesem Sinne soll die vorliegende Arbeit als erster Schritt für weitere Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet verstanden werden.

10 Literaturverzeichnis

- [1] Alt, O.; Schrott, M.; Wieching, M.; Fischer, M.; Hahn, J.: Effiziente - Einbildung neuer Optimierungs- und Automatisierungsmethoden in der Powertrain-Entwicklung des Hyundai Motor Europe Technical Center. Symposium für Entwicklungsmethodik, Wiesbaden, 2007
- [2] Altenstrasser, H.; Vitale, G.; Winsel, T.; Keuth, N.; Pflügl, H.: Multi-layer global DoE for Automated Optimization of Shift Quality for Automatic Transmissions. DoE Conference Berlin, 2009
- [3] Apscher, M.; Conrad, M; Kurz, A.; Sammer, G.: Steigerung der Effizienz im Prüfbetrieb - Lösung zur Optimalen Prüffeld-Logistik. Automotive Engineering Partners 5/2004
- [4] Atkinson, C.; Long, T.; Hanzevack, E.: Virtual sensing: a neural network-based intelligent performance and emissions prediction system for on-board diagnostics and engine control. SAE 980516, 1998
- [5] AVL List GmbH (Hrsg): Indizieren am Verbrennungsmotor. Anwenderhandbuch, Graz, 2002
- [6] AVL-List GmbH (Hrsg): AVL Boost – Engine Cycle, Aftertreatment and Duct Acoustic Simulation. www.avl.com
- [7] Barba, C.: Erarbeitung von Verbrennungskennwerten aus Indizierdaten zur verbesserten Prognose und rechnerischen Simulation des Verbrennungsablaufes bei Pkw-DE-Dieselmotoren mit Common-Rail-Einspritzung. Dissertation. ETH Zürich, 2001
- [8] Bartsch, P.; Binder, M.; Boehm, H.; Herzog, P.; Weißbäck, M.: Sparsam, Sauber, Begeisternd - Der Diesell! Tagung Motor und Umwelt, Graz, 2006
- [9] Baumann, W.; Klug, K.; Köhler, B.; Röpke, K.: Modelling of Transient Diesel Engine Emissions. DoE Conference, Berlin, 2009
- [10] Baumann, W.; Schaum, S.; Röpke, K.; Knaak, M.: Excitation Signals for Nonlinear Dynamic Modeling of Combustion Engines. IFAC World Conference, Seoul, 2008
- [11] Benz, C.: Homogene Dieselmotorische Verbrennung zur Darstellung niedrigster Emissionen. 3.Fahrzeugtechnisches Kolloquium, Fachhochschule Coburg, 2005

- [12] Bittermann, A.; Kranawetter, E.; Krenn, J.; Ladein, B.; Ebner, T.; Altenstrasser, H.; Koegeler, H.; Gschweitl, Kurt: Emisissionsauslegung des dieselmotorischen Fahrzeugantriebs mittels DoE und Simulationsrechnung. MTZ 06/2004, Nr. 65, 2004
- [13] Bittlinger, G.: Analyse der Dieselmischbildung und -verbrennung - Schlussfolgerungen für die Diesel-Einspritztechnik. 1. CTI-Fachkonferenz: Einspritzsysteme für Dieselmotoren, Stuttgart, 2006
- [14] Bockhorn, H.: Soot Formation in Combustion – Mechanisms and Models. Springer Verlag, Berlin, 1994
- [15] Bohn, D.: Ähnlichkeitsprobleme im Maschinenbau. Vorlesungsumdruck Institut für Dampf und Gasturbinen, RWTH-Aachen, 2001
- [16] Boja, D.; Becker, M.: Nonlinear dynamic modeling for ECU parameter optimization. Symposium für Entwicklungsmethodik, Wiesbaden, 2009
- [17] Breitbach, H.; Schommers, J.; Binz, R.; Lindemann, B.; Lingens, A.; Reichel, S.: The Mercedes-Benz Bluetec Concept – Combustion Process and exhaust gas aftertreatment in the Mercedes-Benz Bluetec Concept. MTZ 06/2007, Nr. 68, 2007
- [18] Bruene, H.-J.; Honeder, J.; Raschl, P.; Schinnerl, M.; Tangemann, R.: Emission Technologies from BMW for Future Emission Legislation Worldwide. MTZ 03/2009, Nr. 70, 2009
- [19] Buergler, L.; Cartus, T.; Herzog, P.; Neunteufl, K.; Weißbaeck, M.: Brennverfahren, Abgasnachbehandlung, Regelung - Kernelemente der motorischen HSDI Diesel Emissionsentwicklung. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 2004
- [20] Buergler, L.; Glensvig, M.; Neunteufl, K.; Weissbaeck, M.: Fahrzeugapplikation mit alternativer Dieselerbrennung. MTZ 11/2005, Nr. 66, 2005
- [21] Combé, T.: Beitrag zur Drehmomentsimulation von Verbrennungsmotoren in Echtzeit. Dissertation. Universität Darmstadt, 2006
- [22] Däubler, L.; Gratzke, R.; Predelli, O.; Rempel, A.: Flexibles Motormanagement für innovative Brennverfahren. MTZ 09/2005, Jahrgang 66, 2005
- [23] Daudel, H.; Hohenberg, G.: Verfahren zur Bestimmung des Stickoxidgehalts in sauerstoffhaltigen Abgasen von Brennkraftmaschinen. Patentschrift, DE 10043383 C2, 2002
- [24] Desantes, J.; Arrègle, J.; Molina, S.; Lejeune, M.: Influence of EGR-Rate, Oxygen Concentration and Equivalent Fuel/Air Ratio on the combustion behaviour and Pollutant emissions of the Heavy-Duty Diesel engine. SAE 2000-01-1813, 2000

- [25] Desantes, J.; Benajes, J.; Molina, S.; Hernandez, L.: Multi- objective optimization of heavy- duty diesel engines under stationary conditions. Proc. of the Institution of Mech. Eng. Part D; 219, 2005
- [26] Desantes, J.; Lopez, J.; Garcia, J.; Hernandez, L.: Application of Neural Networks for Prediction and Optimization of Exhaust Emissions of a heavy-duty Diesel engine. SAE 2002-01-1144, 2002
- [27] Diener, R.; Huber, T.; Imhof, V.; Kloppenburg, E.; Kruse, T.; Lang, T.; Schulmeister, U.; Ulmer, H.: Challenges during the broad implementation of model based methods in the development and calibration of ECUs. DoE Conference Berlin, 2009
- [28] Dohle, U.; Duernholz, M.: Optimierung von Einspritzung, Verbrennung und Abgasnachbehandlung bei Dieselmotoren. Tagung Motor und Umwelt, Graz, 2006
- [29] Dohle, U.; Duernholz, M.; Stein, J.-O.: Einflüsse künftiger Hochdruck-Dieseinspritzsysteme auf Akustik und Emissionsverhalten moderner Verbrennungsverfahren. 25. Internationales Wiener Motorensymposium, 2004
- [30] Durstberger, F.; Kranawetter, E.; Neumayer, R.; Merz, B.: Standardisierte MiL- und HiL-Simulation in der Steuergeräteentwicklung für BMW Dieselmotoren. Simulation und Test in der Funktions- und Softwareentwicklung für die Automobilelektronik, Expert-Verlag, Berlin, 2008
- [31] Eichlseder, H.: Verbrennungskraftmaschinen. Vorlesungsumdruck Institut VKM-THD, TU Graz, 2005
- [32] Ellinger, R.; Schöggel, P.; Zehetner, J.: Entwicklung eines Hybridantriebsstrangs unter Verwendung von universellen Simulationmethoden und Prüfwerkzeugen. Symposium für Entwicklungsmethodik, Wiesbaden, 2009
- [33] Enderle, C., Schnabel, M.: Das Konzept der homogenen Verbrennung. Technischer Kongreß des VDA 2005, Ingolstadt
- [34] Fachwissen KFZ-Technik. Technik Profi – Das Extraheft für KFZ-Technik von Auto-Motor-Sport, Heft 21/2009
- [35] Friedrich, I.; Pucher, H.; Offer, T.: Verknüpfung von physikalischen Modellen mit DoE-Modellen zur echtzeitfähigen Motorprozeß-Simulation. DoE Conference Berlin, 2003
- [36] Gärtner, U.: Kenngrößen und Modellierung der dieselmotorischen Verbrennung im Hinblick auf zukünftige Regelstrategien. Autoreg, Wiesloch, 2004

- [37] Gärtner, U.; Hohenberg, G.; Daudel, H.; Oelschlegel, H.: Development and Application of a Semi-Empirical NO_x Model to Various HD Diesel Engines. Conference on Thermo - and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines, Valencia, 2002
- [38] Graf, F.; Hofmann, P.; Koeck, K.; List, R.: Höhere Prüfstandeffizienz durch moderne Kraftstoffverbrauchs-Meßtechnik. MTZ 7-8/2004, Nr. 65, 2004
- [39] Hafner, M.: Modellbasierte stationäre und dynamische Optimierung von Verbrennungsmotoren am Motorenprüfstand unter Verwendung neuronaler Netze. Dissertation. TU Darmstadt, 2002
- [40] Hametner, C.: Nonlinear Dynamic System Identification Using Local Model Architectures. Dissertation. TU Wien, 2007
- [41] Haykin, S.: Neural Networks: A comprehensive foundation. Macmillan, New York, 1994, ISBN 0-13-273350-1.
- [42] He, Y.; Rutland, C.: Modeling of a turbocharged DI diesel engine using artificial neural networks. SAE 2002-01-2772, 2002
- [43] Heider, G.; Woschni, G.; Zeilinger, K.: 2-Zonen Rechenmodell zur Vor-ausberechnung der NO-Emission von Dieselmotoren. MTZ 59, Nr. 11, 1998
- [44] Herzog, P.; Gill, D.W.; Schneider, R.: Anforderungen der Dieselmotorenentwicklung an die Elektronik. Tagung Motor und Umwelt, Graz, 1992
- [45] Hohenberg, G.: Experimentelle Erfassung der Wandwärme von Kolbenmotoren. Habilitationsschrift. TU Graz, 1980
- [46] Isermann, R.: Modellgestützte Steuerung, Regelung und Diagnose von Verbrennungsmotoren, Springer Verlag 2003
- [47] Jacobsen, E.; Liang, C.; Srinivasan, S.: NO_x emission-control system using a virtual sensor. European patent application, EP 1367248 A1, 2003
- [48] Jakubek S., Keuth N., Optimierte Neuro-Fuzzy Modelle für Auslegung und Simulation im Automotive Bereich. Automatisierungstechnik (AT), 9/2005
- [49] Jakubek, S.; Hametner, C.: Identification of Neurofuzzy Models Using GTLS Parameter Estimation. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics- Part B: Cybernetics, Vol. 39, No. 5, October 2009
- [50] Jenny, H.; Sailer, W.; Walter, T.: Ein neues Mess- und Auswertesystem für die Indizierung im Fahrzeug. MTZ 5/2009, Nr. 70, 2009

-
- [51] Kennedy, I.: Models of Soot Formation and Oxidation. Progress in Energy and Combustion Science, 23, p. 95-132, 1997
- [52] Keuth, N.: An Improved Neuro-Fuzzy Training Algorithm for Automotive Applications. Dissertation, TU Wien, 2004
- [53] Keuth, N.; Pflügl, H.; Jakubek, S.: Intelligent Neuronal Networks (INN) – A New Modelling Approach for the Global Model Based Optimization of Combustion Engines and Powertrain. DoE Conference Berlin, 2007
- [54] Kirchen, P.; Boulouchos, K.: Phänomenologisches Mittelwertmodell für Ruß in transientem Motorbetrieb, MTZ 07-08/2008, Nr. 69, 2008
- [55] Knauel, P.; Breitbach, H.: Die Rolle der Aufladung in verbrauchs-optimierten Dieselmotorkonzepten. 13. Aufladetechnische Konferenz, Dresden, 2008.
- [56] Kögeler, H.: CAMEO the Powertrain Calibration Environment. Internal Symposium Calibration Tools and Technologies, Graz, 2007
- [57] Köhler, J.; Hemberger, H.; Baier, T.; Bargende, M.: Bestimmung der Schwärzungszahl mittels neuronaler Netze. 6. Tagung Der Arbeitsprozeß des Verbrennungsmotors, Graz, 1997
- [58] Kozek, Martin: Identifikation – Experimentelle Modellbildung. Vorlesungsumdruck, Institut für Maschinen- und Prozessautomatisierung, TU Wien, 2004
- [59] Krimmel, H.; Maschmann, O.; Seidt, S.; Vogt, D.: Chancen und Grenzen von HiL-Tests. ATZ elektronik 04/2006
- [60] Lamping, M.; Kolbeck, A.; Koerfer, T.; Adolph, D.; Busch, H.; Pischinger, S.: Modernes Dieselmotorenverfahren - Günstige Motorrohmissionen bei verbessertem Verbrauchsverhalten. MTZ 01/2008, Vieweg Verlag
- [61] Lebert, K.; Pfister, F.; Schantl, R.; Beer, W.; Steiner, C.: Produktiver Einsatz von Hardware-in-the-Loop Systemen im Applikationsprozeß. Symposium für Entwicklungsmethodik, Wiesbaden, 2005
- [62] Merker, G.; Schwarz, C.; Stiesch, G.; Otto, F.: Verbrennungsmotoren: Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung. Stuttgart Teubner-Verlag, 2006
- [63] Mollenhauer, K.: Handbuch Dieselmotoren. Springer-Verlag, Berlin, 2002.
- [64] Nebel, M.; Combé, T.; Vogels, M.; Bachler, J.: Global Dynamic Modeling: A new approach for calibration needs. Symposium für Entwicklungsmethodik, Wiesbaden, 2009

- [65] Nebel, M.; Vogels, M.; Combé, T.; Winsel, T.; Pfluegl, H.; Hametner, C.: Global Dynamic Models for XiL-based Calibration. SAE 2010-01-0329, 2010
- [66] Nelles, O.: Nonlinear System Identification with Local Linear Neuro-Fuzzy Models. Dissertation, TU Darmstadt, 1999
- [67] Opalinski, A.: Analyse der Zusammenhänge zwischen globalen thermodynamischen Größen und Ruß-, NOx Emissionen bei einem Dieselmotor. Dissertation. Politechika Poznanska, 2003
- [68] Papadopoulos, S.: Reduktion der Stickoxidemissionen des direkt einspritzenden Dieselmotors durch Dieselölwasseremulsion bzw. Wassereinspritzung. Dissertation, ETH Zürich, 1987
- [69] Pichler, K.; Ebner, H.: Fuel consumption measurement – Effect of system architecture on accuracy and costs. MTZ 04/1995, Nr. 57, 1995
- [70] Pischinger, R.; Kell, M.; Sams, T.: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine. Springer Verlag, 2009
- [71] Pischinger, S.: Verbrennungsmotoren. Vorlesungsumdruck Institut VKM, RWTH-Aachen, 2000
- [72] Ramschak E.; Schoeogl P.; Vehicle Driveability assessment using neural networks for development, calibration and quality tests. SAE 2000-01-0702, 2000
- [73] Renninger, P.; Aleksandrov, M.: Moderne Entwicklungsmethoden in der DaimlerChrysler Nfz-Motorenentwicklung: Überblick und Ausblick. Symposium für Entwicklungsmethodik, Wiesbaden, 2005
- [74] Robert Bosch GmbH (Hrsg): Autoelektrik Autoelektronik. Wiesbaden Vieweg & Sohn Verlag, 2007, ISBN 978-3-528-23872-8
- [75] Robert Bosch GmbH (Hrsg): Automotive Handbook Warrendale: SAE, 2004. ISBN 0-7680-1513-8
- [76] Robert Bosch GmbH (Hrsg): Dieselmotor-Management. Wiesbaden Vieweg & Sohn Verlag, 2004, ISBN 3-528-23873-9
- [77] Röpke, K.; Knaak, M.; Nessler, A.; Schaum, S.: Rapid Measurement - Grundbedatung eines Verbrennungsmotors innerhalb eines Tages? MTZ 4/2007, Nr. 68, 2007
- [78] Röpke, K.; Nessler, A.; Haukap, C.; Baumann, W.; Köhler, B.; Schaum, S.: Model-based Methods for Engine Calibration – Quo Vadis. Symposium für Entwicklungsmethodik, Wiesbaden, 2009

-
- [79] Sampson, D.; Sheridan, L.: Recent Developments in Techniques for Model-Based Calibration. DoE Conference 2007, Berlin
- [80] Sams, T., Hausberger, S.: Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei KFZ. Vorlesungsumdruck, Institut VKM-THD, TU Graz, 2006
- [81] Schindler, W.; Bergmann, A.; Linke, M.; Mosbacher, F.; Giovanella, K.: Herausforderung Partikelmessung für EURO 5-6 und alternative Partikelmeßtechnik. MTZ 6/2008, Nr. 69, 2008
- [82] Schloßer, A.; Kinoo, B.; Werner, S.; Salber, W.; Ademes, N.: Beschleunigte Antriebsstrangentwicklung mittels modellbasierter Applikation. MTZ 02/2007 Nr. 68, 2007
- [83] Schnabel, M.; Breitach, H.; Enderle, C.: Der Verbrennungsvorgang des Dieselmotors im Wandel der Emissionsanforderungen. 10. Tagung Der Arbeitsprozeß des Verbrennungsmotors, Graz, 2005
- [84] Schüler, M.; Hafner, M.; Isermann, R.: Einsatz schneller neuronaler Netze zur modellbasierten Optimierung von Verbrennungsmotoren. MTZ 10/2000, Nr. 61, 2000
- [85] Schulmeister, U.; Bossler, M.; Huber, T.; Johannaber, M.; Kurse, T.; Ulmer, H.: Ausweitung neuer modellbasierter Methoden im Applikations- und Entwicklungsprozeß. Symposium für Entwicklungsmethodik, Wiesbaden, 2007
- [86] Schüßler, M.; Allmer, I.; Hollauf, B.; Kordon, M.; Kozlik, C.; Seewald, G.; Hülser, H.: Modellbasierte Emissionsoptimierung auf Triebstrang-Ebene. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 2008
- [87] Schwarzbauer, G.: Applikationsmethodik für elektronische Steuerungen von Verbrennungsmotoren. Vorlesungsumdruck Institut VKM-THD, TU Graz, 2009
- [88] Seebode, J.: Dieselmotorische Einspritzratenformung unter dem Einfluß von Druckmodulation und Nadelsitzdrosselung. Dissertation. Hannover, 2004
- [89] Siebenbrunner, P.; Fischperer, R.; Bachler, J.; Vitale, G.; Dr. Hülser, H.: OBD of De-NOx-Systems - Requirements for Software Development and Calibration for 2010 and beyond. SAE 2008-01-1322, 2008
- [90] Stiesch, G; Eiglmeier, C.; Merker, G.; Wirbeleit, F.: Möglichkeiten und Anwendung der phänomenologischen Modellbildung im Dieselmotor. MTZ 04/1999, Vieweg Verlag

- [91] Stoss, P.; Rupalla, A.: Technische und legislative Randbedingungen fuer die Implementierung von Software zum Testen der OBD und EOBD Funktionen - Erfahrung aus der Praxis. OBD2-Tagung , Braunschweig, April 2007
- [92] Technik VW 1.6 TDI Motor: So funktioniert der neue VW Einstiegsmotor; Auto-Motor-Sport, Heft 19/2009
- [93] Titze, T.; Jeckel, D.: Niederdruck-Abgasrückführung, die bessere Kombination von Aufladung und Abgasrückführung. CTI Motor Aufladung-Fachkonferenz, München, 2006
- [94] Vibe, I.: Brennverlauf und Kreisprozeß von Verbrennungsmotoren. Verlag Technik, Berlin, 1970
- [95] Vogels, M.; Martini, E.; Gschweitl, K.; Mathis, P.; Altenstrasser, H.; Büchel, M.: Dynamic Powertrain Calibration: Using Transient DoE and Modelling Techniques. DoE Conference Berlin, 2005
- [96] Wachter, W.: Die Umweltrelevanz des Dieselmotors. Vorlesungsumdruck, Institut VKM-THD, TU Graz, 2009
- [97] Waschatz, U.; Heinrich A.: Verfahren zur Bestimmung von Kennfelddaten eines Verbrennungsmotors sowie Verfahren zur Steuerung eines Verbrennungsmotors. Europäische Patentanmeldung EP1273782 A2, 2003
- [98] Waschatz, U.; Roeper, F.; Ihme, H.: Kennfeldbedatung und Bauteiloptimierung durch Statistische Versuchsplanung in der Motorenentwicklung. Tagung Motor und Umwelt, Graz, 2003
- [99] Weber, M.; Schreiber, A.; Isermann, R.: Modellgestützter Entwurf von Versuchsplänen zur dynamischen Vermessung von Verbrennungsmotoren. Symposium für Entwicklungsmethodik, Wiesbaden, 2005
- [100] Wenzel, S.; Willmann, M.; Tschöke, H.: Modellierung der Ruß- und NO_x-Emissionen des Dieselmotors, Internationales Forum Abgas- und Partikelemissionen, Ludwigsburg, 2008
- [101] Wiesbaden Vieweg & Sohn Verlag, 2004, Robert Bosch (Hrsg): Dieselmotor-Management. ISBN 3-528-23873-9
- [102] Wilmann, M; Opalinski, A., Wislocki, K.: Interaction between Injection Timing, EGR-Rate and Rate of Heat Release in the TDI Engine. Journal of KONES, 2002
- [103] Wimmer, A.: Thermodynamik des Verbrennungsmotors. Vorlesungsumdruck Institut VKM-THD, TU Graz, 2004

- [104] Winsel, T.: Stabile neuronale Prozeßmodelle. Dissertation. Universität Kassel, 2001
- [105] Woschni, G.: Beitrag zum Problem des Wärmeübergangs im Verbrennungsmotor. MTZ 26, Nr. 11, 1965
- [106] Woschni, G.; Anisitis, F.: Eine Methode zur Vorausberechnung der Änderung des Brennverlaufes mittelschnelllaufender Dieselmotoren bei geänderten Betriebsbedingungen. MTZ 34, Nr. 4, 1973
- [107] Zeldovich, J.: The oxidation of Nitrogen in Combustion and Explosions. Acta Physicochimica, USSR 21, Nr. 4, 1946
- [108] Zillmer, M.: Stickoxid und Rußbildung bei dieselmotorischer Verbrennung. Dissertation. TU Braunschweig, 1998

