

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (LVK)

Echtzeitfähige Stickoxidmodellierung zur Integration im Steuergerät eines Nutzfahrzeug-Dieselmotors

Björn Christian Lump

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lohmann

Die Dissertation wurde am 13.09.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 28.11.2011 angenommen.

Essentially, all models are wrong, but some are useful.
George E. P. Box

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Motorenvorentwicklung bei der MAN Truck & Bus AG in Nürnberg in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister, Ordinarius des Lehrstuhls für Verbrennungskraftmaschinen, danke ich für die Betreuung dieser Dissertation. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lohmann möchte ich mich an dieser Stelle herzlich für die Übernahme des Koreferats bedanken.

Mein herzlicher Dank gilt meinen Betreuern bei der MAN Truck & Bus AG in Nürnberg, Herrn Dr.-Ing. Joachim Weiß, Herrn Dr. rer. nat. Dieter Rothe und Herrn Dipl.-Ing. Reinhard Lämmermann, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind. Ohne die zahllosen wertvollen Anregungen, Diskussionen und Ermutigungen wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen! Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Held, Leiter der Motorenvorentwicklung, Herrn Dipl.-Ing. Roland v. Hoerner, ehemaliger Leiter der Motorenvorentwicklung und Herrn Dr. rer. nat. Eberhard Jacob gebührt mein besonderer Dank, da sie diese Arbeit überhaupt erst ermöglicht haben.

Bei meinen Kollegen aus der Motorenforschung und -entwicklung möchte ich mich für die großartige Zusammenarbeit, die endlosen Diskussionen (ob fachlich oder nicht) und die wertvolle Unterstützung bedanken. Weiterer Dank gilt den Diplomanden Herrn Dipl.-Ing. Josef Heinz, Herrn Dipl.-Ing. Georg Lichtenauer, Herrn Anton Wieluch und Herrn Dipl.-Ing. Holger Burkhardt für die wertvolle Mitarbeit in den Projekten.

Stellvertretend für alle Kollegen vom Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Christian Pastötter, Herrn Dipl.-Ing. Sebastian Pflaum und Herrn Dr.-Ing. Maximilian Prager für die sehr gute Zusammenarbeit und die vielen nützlichen Hinweise bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie und vor allem meinen Eltern, denen ich zu einem wesentlichen Teil meine Ausbildung verdanke, welche die Grundlage für diese Arbeit ist und die mich in allen Phasen dieser Arbeit stets unterstützt haben! Last but not least bedanke ich mich bei meiner Freundin Sabine für die Unterstützung und die Geduld in einer nicht immer ganz leichten Zeit.

Für meine Eltern

Veröffentlichungen

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Arbeit waren Teile des Inhaltes auf Fachtagungen veröffentlicht:

Lumpp, B., Harnish, S., Malischewski, T. Weiß, J.:

Echtzeitfähiges Einspritzmodell auf Basis neuronaler Netze

6. Tagung Diesel- und Benzindirekteinspritzung, Berlin, 2008

Lumpp, B., Weiß, J., Wachtmeister, G.:

Echtzeitfähige Stickoxidmodellierung

10. Tagung Motorische Verbrennung, München, 2011

Kurzfassung

Für die Regelungen von effizienten Abgasnachbehandlungssystemen oder für OBD-Anforderungen ist die Kenntnis der momentanen NO_x -Emission von entscheidender Bedeutung. Üblicherweise werden NO_x -Sensoren zur Erfassung dieser Information eingesetzt. In dieser Arbeit wird ein echtzeitfähiges NO_x -Modell als Ersatz für den NO_x -Sensor oder für dessen Überwachung erarbeitet. Dabei wird die NO_x -Emission während des Motorbetriebs basierend auf Daten, welche dem Steuergerät derzeit zur Verfügung stehen wie z.B. Einspritzzeiten, Drehzahl, Ladedruck und Lambda berechnet. Weitere im realen Motorbetrieb nur schwer erfassbare Größen wie Luftmasse und AGR-Rate werden dem Modell über eine vorgeschaltete, physikalisch basierte Simulationsrechnung zur Verfügung gestellt. Als Versuchsmotor dient ein MAN Sechszylinder-Reihenmotor mit Common Rail Einspritzsystem, zweistufiger Aufladung, Ladeluftkühlung und gekühlter AGR. Zunächst wurde ein detailliertes eindimensionales Modell des Motors erstellt. Besonderer Wert wurde dabei auf die Modellierung des Luft- und Abgaspfades sowie des Einspritzsystems gelegt. Ausgehend von diesem detaillierten Motormodell wurde ein echtzeitfähiges Modell des Motors entwickelt, mit dem die für die Stickoxidvorhersage benötigten aber im herkömmlichen Motorbetrieb unbekannt Größen wie beispielsweise Zylindermasse, AGR-Rate oder Abgasgegendruck vor Turbine in Echtzeit ermittelt werden können. Die eigentliche NO_x -Berechnung erfolgt über einen Polynomansatz. Diese Vorgehensweise birgt den Vorteil, dass sowohl die Serienstreuung als auch Alterungseffekte von Bauteilen wie z.B. Turbolader oder AGR-Kühler berücksichtigt werden können. Durch den dualen Aufbau des Modells mit physikalisch basiertem Motormodell und empirischer Emissionsmodellierung ist eine große Bandbreite an möglichen Anwendungsgebieten gegeben. So können bereits in der Konzeptphase schnell rechnende Emissionsmodelle zur Entwicklung von Abgasnachbehandlungskomponenten bereitgestellt werden. Bei bereits ausgeführten Motoren können verbesserte empirische Modelle erzeugt werden, die dann als virtuelle NO_x -Sensoren oder bei der Längsdynamikmodellierung von Fahrzeugen eingesetzt werden können.

Abstract

Information on the present NO_x emissions is vitally important for the control systems of efficient exhaust-gas cleaning systems or for OBD requirements. This information is normally obtained with NO_x sensors. This paper describes an NO_x model with real-time capability to replace or monitor the NO_x sensor. Here the NO_x emission is calculated on the basis of data currently available to the control unit, e.g. injection times, engine speed, boost pressure and A/F ratio, while the engine is in operation. Other variables such as air mass and EGR rate, which are difficult to record during real engine operation, are made available to the model by means of an advance simulation calculation based on physical laws. The test engine used is an MAN six-cylinder in-line engine with common-rail injection, two-stage supercharging, intercooling and cooled EGR. First of all a detailed one-dimensional model of the engine was drawn up. Here, particular emphasis was placed on the modelling of the air and exhaust-gas paths and of the injection system. From this detailed 1D model an engine model with real-time capability was derived. With this model, the missing variables needed for predicting the NO_x level can be determined in real time, e.g. cylinder mass, EGR rate or exhaust-gas back pressure in front of the turbine. The NO_x emission is actually calculated by means of a polynomial approach. This procedure has the advantage that both the scatter due to series production and the wear and tear effects of certain components, such as the turbocharger or EGR cooler, can be taken into account. As the model has a dual structure with an engine model based on physical laws and empirical emission modelling there is a wide range of possible applications for it. In the concept phase, for example, quick-calculating emission models can be provided for developing components for exhaust-gas cleaning systems. For engines already built, improved empirical models can be generated which can then be used as virtual NO_x sensors or be integrated into virtual vehicle models.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Emissionen	3
2.1.1	Abgaszusammensetzung	3
2.1.2	Abgasnachbehandlung	4
2.1.3	Emissionsgesetzgebung	5
2.2	Steuerung und Regelung moderner Dieselmotoren	7
2.3	Modellierung und Simulation in der Motorentechnik	8
3	Ziel der Arbeit	11
4	Grundlagen	13
4.1	Dieselmotorische Verbrennung	13
4.2	Stickoxide	16
4.2.1	Bildungsmechanismen	16
4.2.2	Einflussgrößen auf die Stickoxidbildung	18
4.2.3	Modellierung der Stickoxidbildung	19
4.3	Modellansätze	20
4.3.1	Empirische Modellierung	21
4.3.2	Nulldimensionale Ein- und Mehrzonenmodelle	22
4.3.3	Phänomenologische (quasidimensionale) Modelle	24
4.3.4	Dreidimensionale CFD-Modelle	25
4.3.5	Zusammenfassung	25
4.4	Methoden zur Erstellung empirischer Modelle	26
4.4.1	Polynommodelle	26
4.4.2	Neuronale Netze	28
4.4.3	Kennfeldbasierte Modelle	34
4.4.4	Weitere Verfahren	34
4.5	Beurteilung der Modellgüte	35
4.6	Statistische Versuchsplanung	36
4.7	Testzyklen	39
5	Versuche	41
5.1	Versuchsträger und Prüfstands Aufbau	41
5.2	Eingesetzte Sensorik	43

5.2.1	NO _x -Messung	43
5.2.2	Sauerstoffmessung und Lambdabestimmung	45
5.2.3	Luftmassenmessung	45
5.2.4	Bestimmung der AGR-Rate	46
6	Das Stickoxidmodell	47
6.1	Modellauswahl	47
6.2	Modellbildung	51
6.2.1	Vorüberlegung	51
6.2.2	Untersuchung der möglichen Eingangsgrößen	52
6.2.3	Datengenerierung am Versuchsmotor	69
6.2.4	Modellierung	69
6.2.5	Das NO _x -Modell	72
6.3	Modellierung zusätzlicher Eingangsgrößen	79
6.3.1	Modellierung der Einspritzung	79
6.3.2	Detailliertes Motormodell	90
6.3.3	Mittelwertmodell	95
6.3.4	Ergebnisse	103
6.4	Integration der modellbasierten Eingangsgrößen	105
6.5	Implementierung des Modells im Steuergerät	109
6.6	Fazit	111
7	Zusammenfassung und Ausblick	113
7.1	Zusammenfassung	113
7.2	Ausblick	115
8	Literaturverzeichnis	117
9	Anhang	125
9.1	Versuchsträger	125
9.2	Messtechnik	126
9.2.1	Erfassung der Abgasemissionen am Prüfstand	126
9.2.2	Bestimmung der NO-Konzentration im Abgas	126
9.2.3	Lambdasonde	127
9.2.4	NO _x -Sensor	129
9.3	Echtzeitsystem	129
9.3.1	ETAS Labcar und Realtime PC	129
9.3.2	Rapid Prototyping Modul ETAS ES910	131
9.4	OBD	131

Abkürzungen

a.....	relative kumulierte Abweichung
AGR	Abgasrückführung
Asp	Arbeitsspiel
B	Bohrung [mm]
b_e	spezifischer Kraftstoffverbrauch [g/kWh]
B_{li}	Beginn einer Teileinspritzung
BIM2.....	Beginn der 2. Haupteinspritzung
BIMI.....	Beginn der (1.) Haupteinspritzung
BIP1	Beginn der Voreinspritzung
BP	Betriebspunkt
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLD	Chemolumineszenzdetektor
CRT	Continuous Regeneration Trap
D_{li}	Dauer einer Teileinspritzung
DINJ_DT_M2	Dauer der 2. Haupteinspritzung
DINJ_DT_MI	Dauer der (1.) Haupteinspritzung
DINJ_DT_P1.....	Dauer der Voreinspritzung
DoE.....	Design of Experiments (statistische Versuchsplanung)
DVA	Druckverlaufsanalyse
e	relativer Fehler
ELR.....	European load response test
ESC.....	European stationary cycle
ESP.....	Einspritzschwerpunkt
ETC	European transient cycle
EURO	Emissionsgrenzwert der europäischen Union
f_{dyn}	empirischer Faktor für dynamische Korrektur
FTIR-Spektrometer.....	Fourier Transform Infrarotspektrometer
GB.....	Gigabyte
H.....	Hub [mm]
h	Stunde
$H_{0/1}$	Hypothese
H_f	absolute Feuchte der Ansaugluft
HiL	Hardware in the loop

ABKÜRZUNGEN

k	.....	Geschwindigkeitskonstante
k_f	.....	Faktor zur Feuchtekorrektur
KNN	.....	künstliche neuronale Netze
KQ-Schätzer	.....	Kleinster Quadrate Schätzer
kW	.....	Kilowatt
l	.....	Liter
m	.....	Masse
M	.....	Drehmoment
min	.....	Minute
m_{O_2}	.....	Sauerstoffmasse im Zylinder
m_{zyl}	.....	Ladungsmasse
n	.....	Anzahl Messwerte
n	.....	Anzahl Punkte
n	.....	Drehzahl [min^{-1}]
OBD	.....	OnBoard-Diagnose
OT	.....	oberer Totpunkt
p	.....	Anzahl Regressoren
p	.....	Druck
p_{LL}	.....	Ladedruck
PM	.....	particulate matter (Partikelemission)
ppm	.....	parts per million
p_{Rail}	.....	Raildruck
Q	.....	Einspritzmenge [mg/Hub]
Q_e	.....	Einspritzmenge [mg/Hub]
R	.....	allgemeine Gaskonstante
R^2	.....	Bestimmtheitsmaß
R^2_{korr}	.....	korrigiertes Bestimmtheitsmaß
RTPC	.....	Realtime-PC
s	.....	Sekunde
SB	.....	Spritzbeginn
SCR	.....	Selective Catalytic Reduction
SNS	.....	Smart NO _x Sensor (Continental)
SP	.....	Schwerpunkt
SQE	.....	Sum of Squared Errors, erklärte Streuung
SQR	.....	Sum of Squared Residual, Reststreuung
SQT	.....	Sum of Squared Total, Gesamtstreuung
t	.....	Tonne

T	Temperatur
T_{SL}	Temperatur der Ansaugluft
V_H	Hubvolumen des Motors
V_h	Hubvolumen eines Zylinders
WHDC	World-wide harmonized heavy-duty certification
WHSC	World-harmonized stationary cycle
WHTC	World-harmonized transient cycle
β	Regressionskoeffizient
ε	Fehler
λ_a	Luftaufwand
ρ	Dichte

1 Einleitung

Der Dieselmotor ist heutzutage als Antrieb für Fahrzeuge aller Art nicht mehr wegzudenken. Über 100 Jahre nach Erteilung des Patents an Rudolf Diesel ist er nach wie vor die Verbrennungskraftmaschine mit dem höchsten Wirkungsgrad [1]. Die in den letzten Jahren weltweit immer weiter verschärften Abgasgrenzwerte sowie die steigenden Kosten für Rohöl treiben die Entwicklung in einem noch nie dagewesenen Maße voran. Um die hohen Ansprüche der Kunden wie niedriger Kraftstoffverbrauch, geringe Schadstoffemission und Laufruhe befriedigen zu können, werden immer komplexere Motorgenerationen entwickelt. Diese enorm gestiegenen Anforderungen an moderne Dieselmotoren erfordern eine Vielzahl an Freiheitsgraden wie z.B. verschiedene Einspritzparameter, Brennraumgeometrie und Abgasnachbehandlungssysteme, die bei der Auslegung des Aggregats berücksichtigt werden müssen. Durch die große Anzahl an Freiheitsgraden ist der Applikationsaufwand stark angestiegen. Gleichzeitig muss die Produktentwicklungszeit reduziert werden, um auch in Zukunft marktfähig bleiben zu können. Einen Ausweg bietet hier die Simulationsrechnung. Mit ihr ist es möglich, eine Vielzahl von Parametervariationen mit relativ geringem finanziellem und zeitlichem Aufwand durchzuführen. Außerdem trägt die Simulation innermotorischer Vorgänge zu einem verbesserten Verständnis der ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse bei.

Eine ähnliche Situation ergibt sich bei der Motorsteuerung. Die immer komplexer werdenden Systeme aus Verbrennungsmotor und Abgasnachbehandlungssystem erfordern immer aufwendigere Steuerungs- und Regelungsstrategien, um die Systeme optimal nutzen zu können. Seit die ersten elektronischen Steuergeräte Ende der 1970er Jahre auf den Markt kamen, hat sich deren Komplexität drastisch erhöht. Gehörten anfänglich nur die Steuerung für Zündung bzw. Einspritzung zu den Aufgabengebieten, sind sie heute zu höchst komplexen Systemen geworden, die den gesamten Motorbetrieb, angefangen von der Kraftstoffeinspritzung über die Steuerung von Abgasrückführung oder Abgasnachbehandlungssystem bis zur Sensorüberwachung und Fehlerdetektion steuern, regeln und überwachen [2]. Hierfür werden bis heute vor allem Kennfelder eingesetzt. Die Bedatung dieser Kennfelder wird allerdings aufgrund der angesprochenen Komplexität immer problematischer. Auch hier kann die Simulation unterstützen. So wird seit einiger Zeit die modellbasierte Applikation eingesetzt. Damit ist es teilweise möglich, die umfangreichen Aufgaben bei der Applikation zu automatisieren oder zumindest dem Applikationsingenieur Methoden zur Verfügung zu stellen,

die den Bedatungsprozess vereinfachen und beschleunigen [3]. Eine andere Möglichkeit bietet die modellbasierte Steuerung, d.h. Simulationsmodelle werden direkt im Steuergerät eingesetzt. Damit ist es beispielsweise möglich, den Luftpfad eines Verbrennungsmotors mathematisch abzubilden und, basierend auf Simulationsergebnissen, in das Motormanagement einzugreifen [4]. Je nach Modell kann der Applikationsaufwand damit deutlich reduziert werden.

Mit der Anwendung der Simulationsrechnung kann die Applikation also deutlich vereinfacht werden. Um den maximalen Nutzen der Simulation erreichen zu können, ist es sinnvoll, angefangen bei der Entwicklung über die modellbasierte Applikation bis hin zur Entwicklung modellbasierter Motorsteuerungen, ein einheitliches Softwaretool zu verwenden. Damit können fehleranfällige Schnittstellen vermieden werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass alle an der Entwicklung beteiligten Ingenieure zu jeder Zeit über einen einheitlichen Modellstand verfügen.

In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, wie die Stickoxidemission eines modernen, hochaufgeladenen Dieselmotors mit externer Abgasrückführung mit Hilfe eines empirischen Modells berechnet werden kann. Dazu sollen außer den in der Serienapplikation vorhandenen keine zusätzlichen Sensoren verwendet werden. Die für die Stickoxidbildung relevanten Größen, die messtechnisch nicht erfasst werden, wie Luftmassenstrom oder AGR¹-Rate müssen mit Hilfe eines Simulationsmodells parallel zum Motorbetrieb berechnet werden. Dazu wird ein Mittelwertmodell des Motors verwendet, das die gesamte Gasdynamik, über Verdichter und Ladeluftkühler auf der Frischluftseite bis hin zu den Abgasturbinen und der Abgasrückführung, abbildet. Das Mittelwertmodell wird aus einem detaillierten Motormodell, das bereits in der Motorenentwicklung eingesetzt wird, abgeleitet. Die Bedatung und Kalibration des Mittelwertmodells erfolgt ebenfalls mit Hilfe des detaillierten Motormodells.

¹ AGR: Abgasrückführung

2 Stand der Technik

Zu Beginn wird ein kurzer Überblick über den aktuellen Stand der Technik gegeben. Zunächst wird die besondere Emissionsproblematik der dieselmotorischen Verbrennung verdeutlicht. Danach wird der Entwicklungsstand der Motorsteuerung umrissen. Abschließend werden die Anwendungsgebiete der Simulation in der Motorentechnik vorgestellt.

2.1 Emissionen

2.1.1 Abgaszusammensetzung

Unter idealen Bedingungen würden bei der vollständigen Verbrennung von Dieseldieselkraftstoff die Verbrennungsprodukte Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) entstehen. Aufgrund des kurzen, intermittierenden Brennvorganges und des zeitlich stark eingeschränkten Gemischbildungsprozesses direkt einspritzender Brennverfahren kommt es unter realen Bedingungen jedoch zu teilverbrannten und unverbrannten Resten. Dazu zählen Kohlenmonoxid (CO), unverbrannte oder teiloxidierte Kohlenwasserstoffverbindungen, die unter dem Begriff HC-Emissionen zusammengefasst werden und partikelförmige Emissionen (PM). Zusätzlich werden Stickoxide (NO_x) gebildet. Der Anteil der durch die Emissionsgesetzgebung limitierten Schadstoffe am Abgas von Dieselmotoren beträgt etwa 0,04 % (s. Bild 2.1, Stand Euro V). Der Hauptanteil besteht aus den Komponenten Stickstoff, Kohlendioxid, Wasserdampf und Sauerstoff [5]. Hiervon spielt die CO_2 -Emission eine herausragende Rolle, da der Zusammenhang zwischen der vom Menschen verursachten CO_2 -Emission und der Klimaveränderung nach dem heutigen wissenschaftlichen Stand als erwiesen gilt [6].

Betrachtet man die in Bild 2.1 als limitierte Abgasbestandteile klassifizierten Emissionskomponenten, ist die wesentliche Herausforderung bei der Entwicklung neuer Motoren der sogenannte Ruß- NO_x -Trade-Off. Damit wird der Zusammenhang zwischen der Partikelemission und der NO_x -Emission beschrieben. Innermotorische Maßnahmen, die eine Senkung der NO_x -Emissionen bewirken, haben im Allgemeinen einen Anstieg der Partikelemissionen zur Folge und umgekehrt [7]. Um diesen Zielkonflikt zu umgehen, kommen seit einigen Jahren verstärkt Abgasnachbehandlungssysteme zum Einsatz.

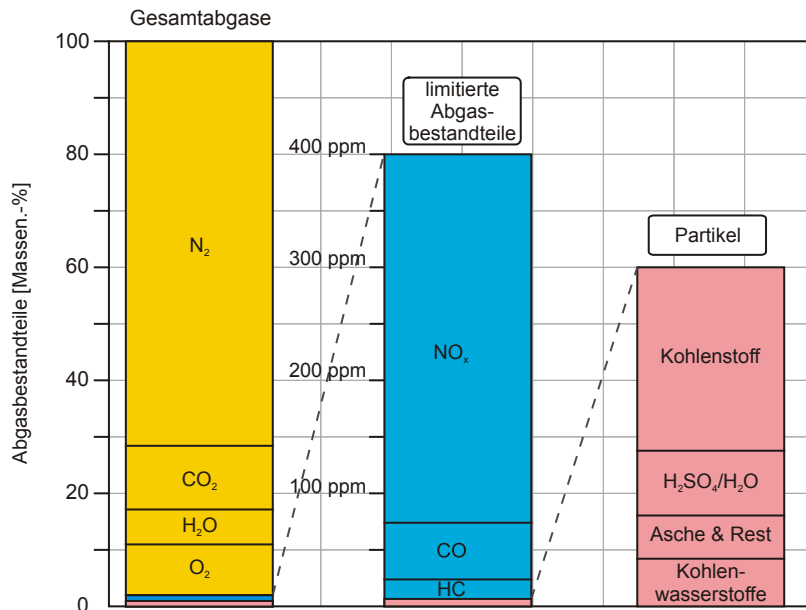


Bild 2.1: Mittlere Abgaszusammensetzung eines Nfz-Dieselmotors (Euro V)

2.1.2 Abgasnachbehandlung

In der heutigen Zeit gehören Abgasnachbehandlungssysteme bereits zum festen Bestandteil moderner Nutzfahrzeugmotoren. Um die stetig strenger werdenden Emissionsregularien auch wirtschaftlich sinnvoll einhalten zu können, werden vor allem zwei Wege verfolgt:

- Stickoxidarme Verbrennung und anschließende Reinigung des Abgases von Partikeln (Innermotorische Maßnahmen zur NO_x-Reduktion)
- Partikelarme Verbrennung und anschließende Eliminierung eines Großteils der gebildeten Stickoxide (SCR²-Verfahren).

Beim SCR-Verfahren wird eine harnstoffhaltige Lösung (z.B. AdBlue®) in den Abgasstrom eidosiert, mit dessen Hilfe die im Abgas vorhandenen Stickoxide in einem Katalysator zu molekularem Stickstoff und Wasserdampf umgewandelt werden. Bei einer innermotorischen Reduzierung von Stickoxiden kommt dem Brennverfahren eine größere Bedeutung zu. Hier hat sich die gezielte Abgasrückführung durchgesetzt. Rückgeführtes Abgas wirkt dabei als Inertgas, wodurch die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Verbrennung herabgesetzt wird. Durch die daraus resultierende niedrigere Brennraumtemperatur wird die Stickoxidbildung reduziert. Derzeit werden Abgasrückführaten bis zu 35% eingesetzt. Damit lassen sich die aktuellen Grenzwerte erfüllen, ohne dass die Verbrennungsqualität zu sehr leidet [8].

² SCR: Selective Catalytic Reduction

Um die zukünftigen Grenzwerte, die mit der Einführung von EURO VI gültig werden, ökologisch und ökonomisch sinnvoll einhalten zu können, müssen aller Voraussicht nach Kombinationen aus beiden Systemen, d.h. SCR und Partikelfilter eingesetzt werden.

2.1.3 Emissionsgesetzgebung

Anfang der neunziger Jahre wurde die erste europäische Abgasnorm (EURO I) für schwere Nutzfahrzeuge eingeführt. Seither wurden die Grenzwerte stetig verschärft (vgl. Bild 2.2).

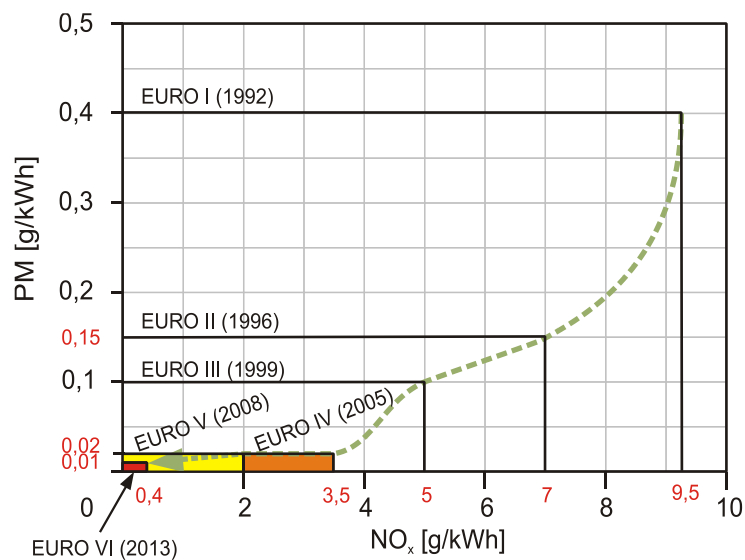


Bild 2.2: Abgasgrenzwerte EURO I bis EURO VI

Zusätzlich zu der starken Limitierung von Stickoxid- und Partikelemission werden mit Einführung von EURO VI voraussichtlich noch weitere Änderungen in Kraft treten. Hierzu zählen:

- Limitierung der Ammoniakemission (NH₃)
- Limitierung des NO₂-Anteils an der NO_x-Emission
- Limitierung der Partikelanzahl
- Einführung neuer Testzyklen

Diese zusätzlichen Limitierungen wurden u.a. notwendig, da aufgrund der Verschärfung der Grenzwerte für die Abgasnormen EURO IV und V verstärkt Abgasnachbehandlungssysteme eingesetzt wurden. Bei der Verwendung von SCR-Systemen kann es durch Überdosierung des Harnstoffes zu Ammoniakslupf und damit zu einer Erhöhung der Ammoniakemissionen kommen. Bei der Verwendung von Partikelfiltern wird

zur Filterregeneration meist der CRT-Effekt³ ausgenutzt. Dabei wird in den Filter eingelagerter Ruß (Kohlenstoff) mit Stickstoffdioxid oxidiert (s. Gleichung (2.1)).



Zur Erzeugung des Stickstoffdioxids wird das im Abgas enthaltene NO mit Hilfe eines Oxidationskatalysators zu NO₂ oxidiert. Hierdurch kann der NO₂-Anteil im Abgas stark ansteigen.

Um der Diskussion über die kanzerogene Wirkung lungengängiger Partikel (Feinstaub) Rechnung zu tragen, wird zusätzlich zur Partikelmasse auch die Partikelanzahl limitiert. Dieser Grenzwert ist derzeit nur mit Partikelfiltern einzuhalten.

Die Einhaltung der kommenden Abgasemissionsstufe EURO VI wird durch die gleichzeitige Einführung neuer Testzyklen zur Motorabnahme nochmals erschwert. Der neue, weltweit einheitliche Testzyklus WHDC⁴ für schwere Nutzfahrzeuge setzt sich aus zwei aufeinander folgenden dynamischen Testzyklen (WHTC⁵), wobei der erste Zyklus mit kaltem Motor gestartet wird, sowie einem Stationärzyklus (WHSC⁶) zusammen. Beide Zyklen (WHSC/WHTC) sind gegenüber den bisherigen Abnahmezyklen (ESC⁷ und ETC⁸) sehr schwachlastig, was zu geringeren Abgastemperaturen führt, wodurch die Effizienz von Abgasnachbehandlungssystemen vermindert wird [9].

Darüber hinaus gelten seit 2005 neue Vorschriften bezüglich OnBoard-Diagnose (OBD)⁹ und Dauerhaltbarkeit. Hier muss gewährleistet werden, dass die maximal zulässigen Emissionen über die Lebensdauer des Motors eingehalten werden. Eine Verschlechterung der Abgaswerte muss dabei zuverlässig während des Motorbetriebs detektiert werden.

Die sehr strengen Abgasvorschriften in Europa, den USA und Japan zwingen die Motorenhersteller zu immer aufwendigeren Systemen. Bereits heute machen die Abgasreinigungssysteme ca. 25 bis 40 % des gesamten Wertes des Systems Verbrennungsmotor aus. Um die zukünftigen Abgasvorschriften weltweit einhalten zu können, müssen neue Methoden zur Steuerung und Regelung von Motoren und Abgasnachbehandlungssystemen sowie deren Überwachung (OBD) entwickelt werden.

³ CRT: Continuous Regeneration Trap

⁴ WHDC: world-wide harmonized heavy-duty certification

⁵ WHTC: world-harmonized transient cycle

⁶ WHSC: world-harmonized stationary cycle

⁷ ESC: european stationary cycle

⁸ ETC: european transient cycle

⁹ OBD: OnBoard-Diagnose – eine kurze Beschreibung zum Thema OBD findet sich im Anhang

2.2 Steuerung und Regelung moderner Dieselmotoren

Seit der Erfindung des Dieselmotors im Jahre 1892 blieb das Grundprinzip unverändert. Neben der Einspritz- und Aufladetechnik hat sich vor allem die Steuerungs- und Regelungstechnik revolutioniert. Dank der stetigen Weiterentwicklung auf diesem Gebiet ist der Dieselmotor noch heute die Wärmekraftmaschine mit dem besten Wirkungsgrad. Die weitere Steigerung der Effizienz war über Jahrzehnte die Hauptaufgabe in der Motorenentwicklung. Mit dem aufkommenden Umweltbewusstsein und der damit einhergehenden Einführung gesetzlicher Emissionsgrenzwerte verschob sich der Entwicklungsschwerpunkt. Durch stetig steigende Anforderungen an moderne Dieselmotoren kam der Motorsteuerung eine immer größere Bedeutung zu. Getrieben von den immer schärferen Abgasgrenzwerten und vom stetigen Anstieg der Kraftstoffkosten wuchs der Einfluss und damit die Komplexität der Motorsteuerung drastisch. Auf der anderen Seite ergaben sich durch die rasante Entwicklung der Elektronik und Rechnertechnik immer neue Möglichkeiten.

Bis Mitte der 80er Jahre waren mechanische Systeme zur Motorsteuerung Stand der Technik. Erst 1986, also fast 100 Jahre nach der Erfindung des Dieselmotors, wurden die ersten elektronisch geregelten Dieseleinspritzpumpen verbaut [10]. Weitere Entwicklungen haben die Zukunftsfähigkeit des Verbrennungsmotors eindrucksvoll unterstrichen. So konnte z.B. durch die Anwendung der elektronischen Motorsteuerung die Dieseldirekteinspritzung auch bei kleineren Motoren und später die Common Rail Technologie serienreif realisiert werden [11].

Die Einhaltung geforderter Abgasemissionen bei wechselnden Lastverhältnissen kann nur mit hochdynamischen Systemen erreicht werden. Rückkopplungen des Abgaszweigs zum Frischluftzweig, wie sie bei modernen Motoren durch Verwendung von Turboladern und Abgasrückführung entstehen, erhöhen die Komplexität von Motor und Motorsteuerung zusätzlich.

Heutige Motorsteuerungen sind bereits derart komplex, dass eine manuelle Applikation nicht mehr oder nur in sehr begrenztem Umfang durchführbar ist. Stattdessen wird häufig die automatisierte, modellgestützte Applikation eingesetzt [12]. Hierzu sind wiederum mehr oder weniger komplexe Modelle notwendig. Darüber hinaus können auch einzelne Funktionen über modellbasierte Regler erfasst werden. Hierzu werden Regelstrecken direkt aus den physikalischen Abläufen im Motorsystem abgeleitet und mit Hilfe mathematischer Modelle in Software umgesetzt. Damit ist auch eine gleichzeitige Regelung voneinander abhängiger Größen effizient möglich [11]. Des Weiteren erfordern die kleinen Grenzwertfenster eine drastische Reduktion der Serienstreuung

einzelner Bauteile wie beispielsweise Injektoren oder Turbolader. Im Pkw-Bereich ist es bereits seit Einführung der Common-Rail-Technologie üblich, in Serie gefertigte Injektoren vor dem Einbau zu klassifizieren. Dadurch wird zum einen die Laufruhe erheblich verbessert, zum anderen der Regelungsaufwand verringert [13]. Nutzfahrzeugmotoren sind aufgrund der deutlich größeren Einspritzmengen robuster gegen Schwankungen der Durchflusswerte. Ein Klassifizieren der Injektoren ist hier noch nicht erforderlich. Hier werden zur Verbesserung der Laufruhe Regler eingesetzt, die die Durchflussschwankungen der einzelnen Injektoren untereinander erkennen und ausgleichen [14].

Ein weiterer Meilenstein in der Motorsteuerung ist die mittlerweile in einigen Pkw-Motoren eingesetzte zylinderdruckbasierte Motorsteuerung [15]. Darüber hinaus sind Tendenzen zu erkennen, wonach zukünftige Motoren nicht mehr rein auf Sekundärgrößen wie Ladedruck oder Verbrennungsluftverhältnis geregelt werden, sondern auf primäre Größen wie Stickoxid- oder Rußemission. Hierzu werden verstärkt Sensoren und Modelle entwickelt. So könnte beispielsweise die Stickoxidemission direkt als Zielgröße für die Regelung der Abgasrückführung verwendet werden [16], [17].

2.3 Modellierung und Simulation in der Motorentechnik

Die Anwendung der Modellierung in der Motorentechnik kann in drei Bereiche eingeteilt werden. So wird die Simulation bereits seit Jahrzehnten in der Motorenentwicklung eingesetzt und hält mit der Motorprozessrechnung ein mittlerweile unverzichtbares Forschungs- und Entwicklungswerkzeug bereit [18]. Teilaspekte der Entwicklung können bereits in der Konzeptphase mit Hilfe detaillierter Simulationsrechnungen untersucht werden, bevor Prototypen gefertigt sind. Des Weiteren bietet die Simulation erhebliche Vorteile in der Entwicklungsphase. Hier kann sie beispielsweise helfen, teure Prüfstandszeit einzusparen. Darüber hinaus können computergestützte Verfahren dazu beitragen ein tieferes Verständnis über verschiedene Phänomene zu erlangen [19]. Je nach Aufgabenstellung kommen hierfür unterschiedliche Modelltypen zum Einsatz.

Das zweite, wesentlich neuere Anwendungsgebiet ist die Steuergeräteapplikation. Hier werden Modelle u.a. in HiL¹⁰-Prüfständen eingesetzt, um die Bedienung von Steuer-

¹⁰ HiL Hardware in the loop, bezeichnet ein Verfahren, bei dem ein System (z. B. ein reales elektronisches Steuergerät oder reale mechatronische Komponente) über seine Ein- und Ausgänge an ein angepasstes Gegenstück, das im Allgemeinen HiL-Simulator genannt wird und als Nachbildung der realen Umgebung des Systems dient, angeschlossen wird [104]

geräten zu unterstützen. Für Anwendungen dieser Art werden überwiegend stark vereinfachte Modelle einzelner Komponenten oder des gesamten Motors verwendet.

Die dritte Anwendung für Simulationsmodelle in der Motorentechnik ist die Implementierung in die Motorsteuerung. Durch die begrenzte Rechenleistung aktueller Motorsteuergeräte können hier nur Modelle mit vergleichsweise geringer Komplexität verwendet werden. Die überwiegende Anzahl an Modellen in aktuellen Steuergeräten besteht aus kennfeldbasierten Teilmodellen, deren Bedatung sehr aufwendig und teuer ist. Verschärft wird diese Problematik durch eine stetig steigende Anzahl von Motor- und Fahrzeugvarianten [3].

3 Ziel der Arbeit

Im vorhergehenden Kapitel wurde der aktuelle Stand der Technik in Zusammenhang mit den zukünftigen Anforderungen an Motoren- und Fahrzeughersteller diskutiert. Dabei wurde deutlich, dass zukünftige Anforderungen an Effizienz und Emissionsverhalten zu einer deutlichen Zunahme der Komplexität moderner Verbrennungsmotoren führen.

Für die Regelungen von effizienten Abgasnachbehandlungssystemen, bzw. für OBD-Anforderungen, ist die Kenntnis der Stickoxidemission von entscheidender Bedeutung. Problematisch für die Regelung von SCR-Systemen ist nicht allein die mäßige Genauigkeit von NO_x -Sensoren, sondern vor allem die Trägheit der Stickoxidmessung.

Als Ersatz für den NO_x -Sensor oder dessen Überwachung/Plausibilisierung soll ein echtzeitfähiges Stickoxidmodell erstellt werden. Dabei soll auf zusätzliche Sensorik verzichtet werden. Fehlende Eingangsgrößen werden modellbasiert erzeugt. Damit soll es möglich sein, zusätzliche Parameter für die Motorregelung zu erhalten, die bisher nicht oder nur mit erheblichem Aufwand mittels oft teurer Sensoren bereitgestellt werden konnten.

Um die Modellergebnisse im realen Betrieb verwenden zu können, müssen einige Anforderungen erfüllt werden. Zum einen muss das Modell in der Lage sein, die Stickoxidemission in allen zulässigen Betriebszuständen des Motors abzubilden. Zum anderen muss das Modell robust sein. So darf der Modellausgang z.B. nicht von veräuschten Eingangssignalen beeinträchtigt werden. Andererseits muss das Modell aber in der Lage sein, schnell auf veränderte Betriebsbedingungen zu reagieren.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Weg aufzuzeigen, wie eine echtzeitfähige aber dennoch robuste Stickoxidvorhersage im realen Motorbetrieb erfolgen kann. Dieses Modell soll, allein basierend auf Daten, welche dem Steuergerät derzeit zur Verfügung stehen, in der Lage sein, die Stickoxidemission während des Motorbetriebs in Echtzeit zu berechnen.

4 Grundlagen

Dieses Kapitel enthält die zum Verständnis der Arbeit notwendigen Grundlagen. Nach einer kurzen Einführung in die dieselmotorische Verbrennung wird die Stickoxidbildung diskutiert. Anschließend werden die verschiedenen Ansätze der Modellierung mit ihren Stärken und Schwächen vorgestellt, bevor auf die Methoden zur Erstellung empirischer Modelle sowie Methoden zur Beurteilung der Modellgüte eingegangen wird. Im Anschluss daran werden die sowohl in der praktischen Arbeit am Prüfstand als auch in der Simulation eingesetzten Methoden der statistischen Versuchsplanung erläutert. Abschließend werden die in dieser Arbeit verwendeten Testzyklen vorgestellt.

4.1 Dieselmotorische Verbrennung

Um die dieselmotorische Verbrennung und damit die Emissionsentstehung genauer betrachten und verstehen zu können, ist es sinnvoll, die ablaufenden Prozesse in mehrere Teilprozesse wie Einspritzung, Kraftstoffverdampfung, Vermischung von Luft und Kraftstoff, Zündung und Verbrennung zu untergliedern.

Über das Einspritzsystem wird unter Hochdruck stehender Kraftstoff in die verdichtete Atmosphäre im Brennraum eingespritzt. Durch die hohe Geschwindigkeit des Kraftstoffstrahls, die Turbulenz im Brennraum und im Kraftstoffstrahl sowie die hohe Dichte im Brennraum, beginnt der Strahl sich aufzufächern und sich mit der ihn umgebenden Luft zu vermischen. Der Zerfall des Einspritzstrahls kann dabei in einen Primär- und einen Sekundärzerfall untergliedert werden. Unter Primärzerfall wird der Zerfall des noch zusammenhängenden Kraftstoffstrahls in einzelne Ligamente und Tropfen verstanden. Hierbei spielen Kavitationserscheinungen im Spritzloch eine wichtige Rolle [20]. Der Sekundärzerfall umfasst den Impulsaustausch von Einzeltröpfchen mit der umgebenden Luft sowie die Tropfenkollision und -neubildung [21]. Mit Beginn des Strahlaufbruchs beginnt die Vermischung von Luft und Kraftstoff, d.h. der Kraftstoffstrahl zieht heiße Luft aus seiner Umgebung mit sich. Dadurch werden die Kraftstofftröpfchen weiter erwärmt und beginnen zu verdampfen. In der dabei entstehenden Diffusionszone entsteht schließlich ein zündfähiges Kraftstoff-Luft-Gemisch. [22]

Der Zündverzug, also die Zeit von Einspritzbeginn bis zum Beginn der Verbrennung, hat entscheidenden Einfluss auf die Verbrennung. Er lässt sich wiederum in zwei Bereiche, den physikalischen und den chemischen Zündverzug aufteilen. Die oben beschriebenen Vorgänge, wie Strahlausbreitung, Verdampfung und Vermischung bis hin zur

Bildung eines zündfähigen Gemischs, werden als physikalischer Zündverzug bezeichnet [23]. Mit Beginn der Verdampfung beginnen erste chemische Vorreaktionen. Die Zündung erfolgt nach Ablauf der chemischen Zündverzugszeit. Da zu diesem Zeitpunkt die Verdampfung und die Vermischung noch nicht vollständig abgeschlossen sind, können der chemische und der physikalische Anteil am Zündverzug nicht eindeutig voneinander getrennt werden [24].

Die Verbrennung kann in drei Phasen unterteilt werden. Direkt nach der Zündung schließt sich die Phase der vorgemischten Verbrennung an. Dabei wird zunächst der während der Zündverzugszeit aufbereitete Kraftstoff entzündet und verbrennt mit hoher Umsatzrate. Der Anteil der vorgemischten Verbrennung kann durch Veränderung des Einspritzzeitpunktes und der zurückgeführten Abgasmenge beeinflusst werden und ist abhängig von der während des Zündverzugs eingespritzten Kraftstoffmasse sowie den Verdampfungs- und Mischungsraten. In diesem ersten Abschnitt wird die Verbrennung reaktionskinetisch gesteuert [1].

Die zweite Phase der Verbrennung wird als Diffusionsverbrennung bezeichnet. Hierbei wird die Umsatzrate nicht mehr reaktionskinetisch sondern durch die Aufbereitung eines zündfähigen Gemischs begrenzt. Das Ende der Hauptverbrennung ist durch das Erreichen der maximalen Temperatur im Brennraum gekennzeichnet [25].

Die Nachverbrennung ist durch eine vergleichsweise niedrige Umsatzrate charakterisiert. Ursachen für die Abnahme der Reaktionsgeschwindigkeit sind z.B. der abnehmende Druck und die abnehmende Temperatur im Brennraum und die geringere Konzentration der Reaktionspartner. Damit werden die chemischen Reaktionen im Vergleich zu den ablaufenden Mischungsvorgängen langsam und damit geschwindigkeitsbestimmend. Die Verbrennung wird also wieder zunehmend reaktionskinetisch kontrolliert [26]. In dieser Phase werden auch Zwischenprodukte wie Kohlenmonoxid oder Ruß, die während der Hauptverbrennung aufgrund lokalen Sauerstoffmangels entstanden sind, weiter oxidiert. So werden z.B. mehr als 95 % des gebildeten Rußes im Brennraum wieder abgebaut [27].

Betrachtet man die oben gezeigten Teilprozesse der dieselmotorischen Verbrennung, so kann man drei Haupteinflussgrößen auf die Verbrennung identifizieren, mit denen sich die Verbrennung hinsichtlich eines hohen Wirkungsgrads und geringer Schadstoffemission beeinflussen lässt [28]. Diese sind:

- Einspritzverlauf
- Zündverzug
- Mischungsvorgang

Nach [29] besteht die Möglichkeit, die Verbrennung durch Aufteilung der Einspritzmenge in mehrere Teilmengen oder durch gezielte Formung des Einspritzverlaufs positiv zu beeinflussen. Wichtige Merkmale einer fortschrittlichen Einspritzung sind nach [30] ein schnelles Düsenöffnen, eine niedrige Einspritzrate während des Zündverzugs, ein starker Anstieg der Einspritzrate nach Beginn der Verbrennung, eine hohe maximale Einspritzrate sowie ein schnelles Schließen der Düsennadel. Untersuchungen der MAN und Daimler haben allerdings gezeigt, dass durch die flexible Einspritzratenformung nur in sehr begrenztem Umfang Vorteile für Nutzfahrzeugmotoren zu erwarten sind, insbesondere bei Motoren mit externer Abgasrückführung [31],[32]. Dies kann damit erklärt werden, dass die maximale Umsetzrate durch den hohen Restgasanteil reduziert wird, was zu einem geringeren Druck- und Temperaturanstieg führt. Eine Beeinflussung der Brenngeschwindigkeit durch die Einspritzverlaufsformung verliert damit an Bedeutung.

Über die Länge der Zündverzugszeit kann die Aufteilung der Verbrennung in Premixed- und Diffusionsverbrennung beeinflusst werden. Die maximale Umsetzrate, der so genannte Premixed-Peak, wird mit kürzerem Zündverzug geringer, da weniger zündfähiges Gemisch aufbereitet wird. Damit kann der maximale Zylinderdruck und dadurch die Geräusch- und NO_x -Emission positiv beeinflusst werden. Allerdings gewinnt hierdurch die zweite, Mischungskontrollierte Verbrennungsphase zunehmend an Bedeutung. Entscheidenden Einfluss auf die Zündverzugszeit haben die Parameter Abgasrückführrate, Ladedruck sowie Ladungstemperatur und -bewegung [33]. Das globale Luftverhältnis hat dagegen nur geringen Einfluss auf die Zündverzugszeit, da aufgrund der stark heterogenen Gemischverteilung immer Gebiete mit günstigen Zündbedingungen vorliegen [34]. Durch den Mischungsvorgang kann der gesamte Verbrennungsablauf und damit das Emissionsverhalten des Motors beeinflusst werden.

Wie bereits in Kapitel 2 erwähnt, sind bei der dieselmotorischen Verbrennung vor allem die Stickoxid- und die Rußemission von entscheidender Bedeutung. In dieser Arbeit soll allerdings nur auf die Stickoxidemission eingegangen werden. Diese wird im nachfolgenden Abschnitt detailliert beschrieben.

4.2 Stickoxide

Unter dem Begriff Stickoxide oder NO_x versteht man ein Gemisch aus Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2). Bei der motorischen Verbrennung wird überwiegend (etwa zu 90 %) NO gebildet [35]. NO ist ein farb-, geruch- und geschmackloses Gas, das an der Atmosphäre mit Sauerstoff oder Ozon zu NO_2 umgewandelt wird. NO_2 selbst ist ein giftiges, rotbraunes, stechend riechendes Gas.

Im Gegensatz zu Ottomotoren ist die Eliminierung der Stickoxidemissionen im Abgas beim Dieselmotor deutlich schwieriger, da bei der dieselmotorischen Verbrennung entstandene Stickoxide aufgrund der global mageren Verbrennung nicht wie beim Ottomotor an einem 3-Wege-Katalysator reduziert werden können. Einer innermotorischen Minimierung der Stickoxidemission steht der Zielkonflikt zwischen NO_x - und Partikelemission entgegen.

4.2.1 Bildungsmechanismen

Für die Stickoxidbildung sind drei Hauptprozesse verantwortlich [5]:

1. Bildung von NO aus Luftstickstoff bei hohen Temperaturen (>2000 K), sogenanntes „thermisches“ NO.
2. Bildung von NO aus Luftstickstoff bei niedrigen Temperaturen (1000 K), sogenanntes „promptes“ NO. Erstmals wurde dies von C. P. Fenimore untersucht und wird deshalb auch Fenimore-NO genannt [36]. „Promptes“ NO ist mit der Bildung des Radikals CH verbunden, das mit Luftstickstoff Blausäure (HCN) bildet, welche zu NO weiterreagiert.
3. Konversion aus dem im Brennstoff gebundenen Stickstoff über die Bildung von Ammoniak (NH_3) und Blausäure (HCN). Dieser Mechanismus kann aufgrund der heute verwendeten sauberen Betriebsstoffe vernachlässigt werden.

In [32] werden noch weitere Reaktionen beschrieben, an denen Stickoxide beteiligt sind. So kann Stickoxid beispielsweise auch über den Lachgasmechanismus gebildet werden. Außerdem finden sich in [37] Ausführungen über eine stickoxidreduzierende Reaktion, den Reburn-Mechanismus, wobei Stickstoffmonoxid in fetten Bereichen mit Kohlenwasserstoffen zu Blausäure und im Weiteren über Lachgas zu molekularem Stickstoff reduziert wird.

Im Folgenden werden die wichtigsten Stickoxidbildungsmechanismen kurz erläutert:

Thermisches NO

Thermisches NO macht den Hauptteil an der Stickoxidbildung aus. Es entsteht bei hohen Temperaturen im Bereich des Verbrannten aus molekularem Stickstoff N_2 der

Verbrennungsluft unter Einwirkung von O – und OH-Radikalen. Dieser Bildungsweg kann durch den erweiterten Zeldovich-Mechanismus, benannt nach Y. A. Zeldovich [38] mit Hilfe der drei Elementarreaktionen beschrieben werden:



Die erste Reaktion ist dabei wegen der hohen Aktivierungsenergie die geschwindigkeitsbestimmende, d.h. sie läuft nur bei hohen Temperaturen ausreichend schnell ab. Die hohe Aktivierungsenergie ist notwendig, um die sehr stabile Dreifachbindung des N₂-Moleküls aufzubrechen. Bei den sehr kurzen Verweilzeiten während der motorischen Verbrennung von 10⁻⁴ bis 10⁻² Sekunden kann sich kein chemisches Gleichgewicht einstellen [39]. Zur Verringerung der Stickoxidemission können die Sauerstoffkonzentration und die lokale Verbrennungstemperatur durch Zumischen eines inerten Gases z.B. in Form von rückgeführtem Abgas gesenkt werden [5].

Promptes NO

Der Bildungspfad des prompten NO ist ziemlich komplex und immer noch nicht vollständig geklärt. Der Prozess läuft in der Flammenfront ab, in der bei fettem Gemisch HC-Radikale entstehen. Diese reagieren mit N₂ zu Blausäure (HCN) und atomarem Stickstoff und über weitere Reaktionen zu Stickstoffmonoxid. Promptes NO wird bereits bei relativ niedrigen Temperaturen (< 1000 K) gebildet. Die Reaktion läuft sehr schnell ab. Die Aktivierungsenergie des Mechanismus liegt bei lediglich 57 kJ/mol und damit deutlich unter der des Zeldovich-Mechanismus. Da die Reaktion lokal und zeitlich stark begrenzt ist, beträgt der Beitrag zur Gesamtstickoxidemission weniger als 10 % [32].

Die Bildung von promptem NO hängt stark von der lokalen Gemischaufbereitung ab und gewinnt erst durch Maßnahmen zur Brennraumtemperaturabsenkung, wie beispielsweise AGR, zunehmend an Bedeutung. In Bild 4.1 sind die NO_x-Bildungsraten von Fenimore und Zeldovich-Mechanismus gegenübergestellt.

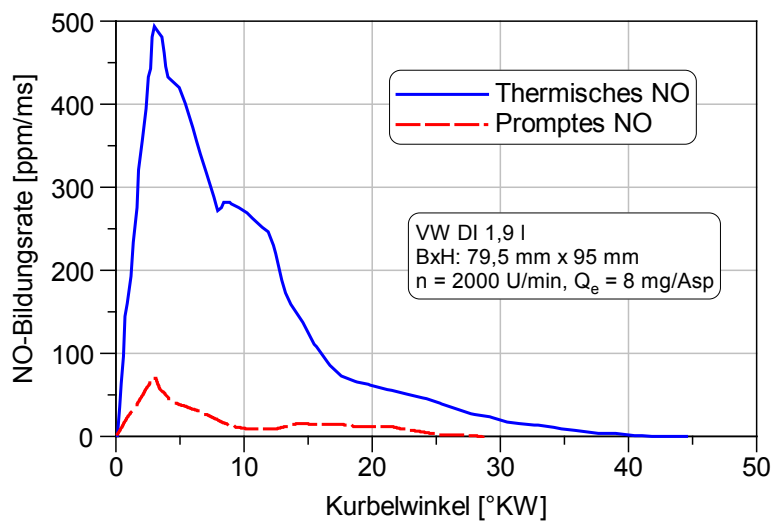


Bild 4.1: NO-Bildungsraten über Zeldovich- und Fenimoremechanismus (Simulation) [32], [40]

Brennstoff NO

Stickstoff wird der Verbrennung nicht nur mit der Luft, sondern auch mit dem Brennstoff zugeführt. Der der Verbrennung auf diesem Wege zugeführte Stickstoff ist ebenfalls an der NO_x-Entstehung beteiligt.

Da die Stickstoffanteile bei mineralischen Dieselmotorkraftstoffen allerdings sehr gering sind (weniger als 0,01 %) ist auch der Beitrag des Stickoxids dieses Bildungspfades an der Gesamtstickoxidemission mit ca. 1 % eher gering und kann damit im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt werden. Mit dem in Zukunft erwarteten steigenden Anteil biogener Kraftstoffe muss diesem Mechanismus evtl. wieder Beachtung geschenkt werden.

4.2.2 Einflussgrößen auf die Stickoxidbildung

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die Mechanismen identifiziert, die zur Stickoxidemission eines modernen Dieselmotors beitragen. Der mit Abstand größte Teil der Stickoxidemission wird über den Zeldovich-Mechanismus gebildet. Damit können drei Haupteinflussgrößen für die Stickoxidbildung bei der motorischen Verbrennung ausgemacht werden. Diese sind:

- die Brennraumtemperatur
- der Sauerstoffpartialdruck im Brennraum
- die Verweildauer der Reaktanden in der Reaktionszone

Den größten Einfluss auf die NO-Bildung hat die Brennraumtemperatur. Diese geht exponentiell in die NO-Bildungsrate des Zeldovich-Mechanismus ein. Der Sauerstoff-

partialdruck beeinflusst die Reaktionsgeschwindigkeit und die Verweildauer bestimmt die Zeit, die zur NO-Bildung zur Verfügung steht.

4.2.3 Modellierung der Stickoxidbildung

Bereits in den 1970er Jahren wurden Modelle zur Berechnung der Stickoxidemissionen des Dieselmotors angewendet. Von den verschiedenen Bildungsmechanismen wird dabei meist nur der Zeldovich-Mechanismus berücksichtigt.

Nach [41] wird die dieselmotorische Verbrennung und die Schadstoffbildung hauptsächlich durch die Komponenten Wasserstoff, Sauerstoff und Kohlenstoff beeinflusst. Als Ausgangsprodukte für die Berechnung der NO-Emissionen dienen die Verbrennungsprodukte der vollständigen, stöchiometrischen Verbrennung des Kraftstoffes, Luftsauerstoff und der in der Luft enthaltene molekulare Stickstoff. Unter Zuhilfenahme von fünf Gleichungen ((4.4) - (4.8)) wird das Gleichgewicht der acht Komponenten CO, CO₂, H, H₂, O, O₂, H₂O und OH beschrieben.



Die zur Berechnung notwendigen Geschwindigkeitskonstanten werden hierbei aus thermodynamischen Tabellen entnommen. Die Reaktionen (4.4) - (4.8) laufen im Gegensatz zu den Reaktionen der Stickoxidbildung (4.1) - (4.3) sehr schnell ab. Daher kann davon ausgegangen werden, dass das partielle Gleichgewicht der Komponenten zu jedem Zeitpunkt vorliegt.

Eine quantitative Beschreibung der einzelnen Hin- und Rückreaktionen des Zeldovich-Mechanismus ist über die zugehörigen Geschwindigkeitskonstanten $k_{\pm 1}$, $k_{\pm 2}$ und $k_{\pm 3}$ möglich. Hierzu können z.B. die von Heywood [42] empfohlenen Konstanten verwendet werden:

$$k_1 = 7,60 \cdot 10^{13} e^{-38000/T_b}, \quad k_{-1} = 1,6 \cdot 10^{13} \quad (4.9)$$

$$k_2 = 6,40 \cdot 10^9 \cdot T_b e^{-3150/T_b}, \quad k_{-2} = 1,5 \cdot 10^9 \cdot T_b e^{-19500/T_b} \quad (4.10)$$

$$k_3 = 4,10 \cdot 10^{13}, \quad k_{-3} = 2,0 \cdot 10^{14} e^{-23600/T_b} \quad (4.11)$$

mit

k_i Geschwindigkeitskonstante der Hinreaktion in $\frac{\text{cm}^3}{\text{mol}\cdot\text{s}}$
 k_j Geschwindigkeitskonstante der Rückreaktion in $\frac{\text{cm}^3}{\text{mol}\cdot\text{s}}$
 T_b Temperatur der verbrannten Zone in K

Da die Reaktionsgeschwindigkeit von O, OH und H viel größer ist als die von NO und unter der Annahme, dass elementarer Stickstoff (N) so schnell wie er produziert auch wieder verbraucht wird, sich die Konzentration des atomaren Stickstoffs also nicht ändert,

$$\frac{d[N]}{dt} \approx 0 \quad (4.12)$$

können die drei Zeldovich-Reaktionsgleichungen zu einer einzigen reduziert werden:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1[N_2][O] \frac{1 - [NO]^2 / \left(\frac{k_1 k_2}{k_{-1} k_{-2}} [N_2][O_2] \right)}{1 + \frac{k_{-1}[NO]}{k_2[O_2]} + k_3[OH]} \quad (4.13)$$

Die Reaktionsgeschwindigkeit in diesem Modell reagiert sehr sensibel auf Temperaturunterschiede. Oberhalb von ca. 2000 K ist bei steigender Temperatur ein sofortiger Anstieg der NO-Produktion zu erkennen. Darunter wird die Reaktion äußerst langsam. Damit ist die Bildung des thermischen Stickoxids über den erweiterten Zeldovich-Mechanismus vollständig beschrieben.

Bei guter Kenntnis der Eingangsgrößen können mit Hilfe der Modellierung der Stickoxidbildung heutzutage sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Da die NO_x-Bildung in erster Linie von der Temperatur in der Reaktionszone abhängt, ist es notwendig, diese Temperatur zu kennen, bzw. sie mathematisch beschreiben zu können. Durch die stark inhomogene Temperaturverteilung im Brennraum moderner Dieselmotoren sind dazu aufwendige Mehrzonenmodelle notwendig. Diese Mehrzonenmodelle sind auch in der heutigen Zeit relativ rechenzeitintensiv, sodass eine Verwendung solcher Modelle in Echtzeitsystemen derzeit nicht möglich ist. Allerdings können die im Zeldovich-Mechanismus beschriebenen Reaktionen zum Verständnis der NO-Bildung bei der motorischen Verbrennung beitragen.

4.3 Modellansätze

Um die weiter oben beschriebene stetig steigende Komplexität des Systems Verbrennungsmotor in der Motorenentwicklung beherrschbar zu machen, ist die Motor- bzw. Prozesssimulation zu einem unverzichtbaren Entwicklungswerkzeug geworden. Die Simulation in der Motorenentwicklung umfasst dabei mittlerweile das

gesamte Spektrum, von der klassischen Kreisprozessrechnung über numerische Strömungssimulation von Ansaug-, Abgas-, Kühl-, Schmier- oder Kraftstoffsystem bis hin zum thermischen Verhalten einzelner Komponenten oder des gesamten Aggregats.

So vielfältig die Anwendungsfälle der Simulationsrechnung sind, so vielseitig sind auch die Möglichkeiten der Modellbildung. Modelle zur Beschreibung der motorischen Verbrennung können nach [43] wie folgt unterteilt werden:

- Empirische Modelle
- Nulldimensionale Ein- und Mehrzonenmodelle
- Phänomenologische (quasidimensionale) Modelle
- 3D-CFD-Modelle

Im Folgenden sollen einige Möglichkeiten zur Modellierung der motorischen Verbrennung bzw. der Schadstoffemission kurz dargestellt und ihre Stärken und Schwächen aufgezeigt werden, bevor eine Auswahl der für diese Arbeit am besten geeigneten Simulationsmethode getroffen wird.

4.3.1 Empirische Modellierung

Empirische Modelle sind zumeist rein messdatenbasiert, d.h. sie setzen keinerlei physikalisches Systemwissen voraus. Die Modellierung hat allgemein formuliert das Ziel, den Verlauf einer unbekanntem Funktion $\Phi: X \rightarrow Y$ über d unabhängigen Parametern durch ein möglichst genaues Modell $g: X \rightarrow Y$ abzubilden. Die Grundlage dieses Modells bildet ein Messdatensatz $[x_i, y_i]_{i=1}^n$ mit $x_i \in R^d$ [3].

Ein Vorteil der empirischen Modellierung ist der Verzicht auf eine detaillierte Beschreibung der relativ komplexen physikalischen und chemischen Zusammenhänge, wodurch auch Vorgänge, die nicht bis ins Detail verstanden sind, erfolgreich modelliert werden können. Ein weiterer Vorteil liegt in der äußerst geringen Rechenzeit solcher Ansätze. Nachteilig dagegen wirkt sich die Tatsache aus, dass für eine hinreichend genaue Modellierung eine ausreichend große Datenbasis zur Verfügung stehen muss. Außerdem sind empirische Modelle prinzipbedingt nicht auf andere, ähnliche Probleme übertragbar.

Um eine ausreichend große Datenbasis für die empirische Modellierung zu erhalten, sind aufwendige Versuchsreihen notwendig. Um den Versuchsaufwand in einem möglichst geringen Rahmen zu halten, werden seit einiger Zeit Methoden der statistischen Versuchsplanung (engl.: Design of Experiments, kurz DoE) eingesetzt. Damit wird nicht nur ein möglichst geringer Versuchsaufwand, sondern auch eine

möglichst aussagekräftige Versuchszusammenstellung gewährleistet. Ausführliche Erläuterungen zu diesem Thema finden sich in Kapitel 4.6.

Ein weiterer Nachteil der empirischen Modellierung ist der oftmals sehr eingeschränkte Gültigkeitsbereich. So kann es beispielsweise notwendig werden, den Versuchsraum in mehrere Teilbereiche zu untergliedern, um dann für jeden Teilbereich ein eigenes Modell zu erstellen, was den Aufwand sowohl für die Modellierung als auch für die Messdatenerfassung erheblich vergrößert.

Als Beispiele für empirische Modelle können die Arbeiten von Wenzel [44] und Gärtner [43] herangezogen werden. In ersterer wird beschrieben wie die Stickoxidemission in Abhängigkeit von Druckanstiegsgeschwindigkeit, Sauerstoffgehalt im Abgas u.a. berechnet werden kann. Gärtner stellt dagegen in seiner Arbeit einen Zusammenhang zwischen Verbrennungsschwerpunkt, Luft- bzw. Sauerstoffmasse im Zylinder u.a. her und ist damit in der Lage, die Stickoxidemission in gewissen Grenzen unabhängig vom untersuchten Motor vorherzusagen.

Bei beiden Modellen muss zur Bestimmung der Stickoxidemission der Brenn- bzw. der Heizverlauf bekannt sein. Dank großer Fortschritte in Sensortechnik und Elektronik ist eine zylinderdruckbasierte Motorregelung im Pkw bereits möglich [45]. Im Nutzfahrzeug dagegen ist diese Messtechnik nur mit großem Aufwand realisierbar. Zum einen sind die Anforderungen an die Dauerhaltbarkeit erheblich größer als beim Pkw. Zum anderen werden beim Pkw meist modifizierte Glühkerzen zur Druckmessung verwendet, sodass keine aufwendige Neukonstruktion des Zylinderkopfes mit Indizierbohrung notwendig ist. Bei heutigen Nutzfahrzeugzylinderköpfen ist in der Regel keine Möglichkeit vorgesehen, einen Drucksensor zu verbauen. Damit steht den oben angeführten Modellen der Zylinderdruckverlauf als zentrale Eingangsgröße hier nicht zur Verfügung.

4.3.2 Nulldimensionale Ein- und Mehrzonenmodelle

Nulldimensionale Modelle besitzen eine deutlich höhere Komplexität als empirische Modelle. Basierend auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten, wie Erhaltungssätzen, den thermodynamischen Hauptsätzen oder der thermischen Zustandsgleichung, geben sie die Realität in engen Grenzen gut wieder. In der modernen Motorenentwicklung werden Modelle dieses Typs oft für die Auswertung von aufgenommenen Zylinderdruckverläufen (Druckverlaufsanalysen kurz: DVA) verwendet. Nulldimensionale Modelle werden in einzelnen Teilbereichen oft durch empirische Modelle ergänzt, um die Ergebnishüte zu verbessern. Beispielsweise werden bei der herkömmlichen Druck-

verlaufsanalyse die Wandwärmeverluste mittels empirischer Ansätze (z.B. nach Woschni [46] oder Bargende [47]) bestimmt.

Für einfache Berechnungen werden einzonige Modelle verwendet. Hierbei wird von einer homogenen Durchmischung ausgegangen, d.h. die Zustandsgrößen wie Druck, Temperatur und Dichte, aber auch die Gemischzusammensetzung, sind an allen Orten im Brennraum gleich. Diese starke Vereinfachung bringt vor allem den Nachteil, dass für die Berechnung der Schadstoffemissionen von Dieselmotoren, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, vor allem die lokalen Zustände bzw. Zustandsänderungen nicht berücksichtigt werden.

Abhilfe schafft hier die Erweiterung des nulldimensionalen Modells, um eine oder mehrere Zonen. Mit Hilfe dieser Zonen können die lokal unterschiedlichen Zusammensetzungen berücksichtigt werden. Da jede einzelne Zone durch einen eigenen Satz Gleichungen beschrieben werden muss und durch die oft komplexe Verknüpfung der einzelnen Zonen untereinander, steigt der Rechenaufwand für Mehrzonenmodelle schnell an [43].

Ein Beispiel hierfür ist das Stickoxidmodell nach Kraßnig [48], das 1976 als erstes Modell seiner Art ausschließlich für die Modellierung der NO-Bildung bei der dieselmotorischen Verbrennung konzipiert wurde. Ein bekanntes und weit verbreitetes nulldimensionales Zweizonenmodell ist das Modell nach Heider [49]. Kernstück des Ansatzes von Heider ist ein empirisches Modell für die Temperaturdifferenz zwischen beiden Zonen, das auf der Überhöhung des Zylinderdruckes gegenüber dem Schleppdruck sowie einer motorspezifischen Konstanten – dem sogenannten „A-Wert“ – basiert. Der „A-Wert“ beschreibt die Temperaturdifferenz zwischen der verbrannten und der unverbrannten Zone bei Brennbeginn. Dieser muss einmalig in einem Motorbetriebspunkt aus der gemessenen Stickoxid-Emission iteriert werden und wird dann nicht mehr verändert. Heider gibt für die von ihm untersuchte Motorenpalette A-Werte zwischen 1530 und 1740 K an. In der verbrannten Zone wird ein festes örtliches Luftverhältnis vorgegeben, das – je nach Motorbauart – zwischen 1 und 1,03 liegt. Im Übrigen verwendet er die bekannten und bewährten Beziehungen des Einzonenmodells mit der Wärmeübergangsgleichung nach Woschni [46]. Das Modell erlaubt ferner eine Vorausberechnung der Stickoxid-Emissionen durch Vorgabe eines Brennverlaufs [43].

Stiesch, Eiglmeir, Merker und Wirbeleit erachten den klassischen Zweizonenansatz für die dieselmotorische NO-Bildung aufgrund der extremen Temperaturabhängigkeiten als zu grob, um gesicherte Aussagen zu erhalten [50]. Abhilfe könnte hier eine

Verfeinerung hinsichtlich der Temperaturverteilung im Brennraum schaffen. Dies könnte durch eine feinere Unterteilung des Brennraums bewerkstelligt werden, was zu einem Mehrzonen-Modell führt [51].

Um dieses Problem zu umgehen, führt Kožuch in seiner Arbeit [52] eine dritte Pseudozone, die Flammenzone ein. Sie ist im thermodynamischen Sinn keine Zone, da sie weder eine Masse noch ein Volumen besitzt. Zusätzlich führt er die Funktionen f und g ein, die zum einen den Fettanteil der Flammenzone ($\lambda < 1$), zum anderen die Zumischung aus der unverbrannten in die verbrannte Zone steuert.

Um brauchbare Ergebnisse liefern zu können, müssen nulldimensionale Modelle durch geeignete Messungen validiert und kalibriert werden. Durch den physikalischen Hintergrund, den relativ einfachen Aufbau und der trotz hoher Rechengeschwindigkeit guten Modellgüte sind Modelle dieses Typs heute in der Motorenentwicklung weit verbreitet. Problematisch für die Verwendung in dieser Arbeit wirken sich die benötigten Eingangsgrößen aus. Die beschriebenen Modelle liefern bei kurbelwinkelaufgelöster Vorgabe der Wärmefreisetzung thermodynamisch plausible Verläufe der Gastemperaturen bzw. der NO-Entstehung im Zylinder. Hierzu müssen allerdings die Modellparameter, so zum Beispiel das lokale Luftverhältnis, auf das jeweilige Brennverfahren kennfeldabhängig eingestellt werden. Von einer Konstanz dieser Einstellparameter kann – wenn überhaupt – nur in einem relativ engen motorischen Betriebsbereich ausgegangen werden. Eine Vorausrechnung der NO_x-Emission für ein bestimmtes Brennverfahren setzt weiterhin voraus, dass ein geeigneter Brennverlauf zur Verfügung steht. Darüber hinaus sind für eine sinnvolle Vorausberechnung unbedingt Informationen erforderlich, nach welchen Gesetzmäßigkeiten relevante Modellparameter, wie beispielsweise das lokale Verbrennungsluftverhältnis in der Reaktionszone, einzustellen sind [43].

4.3.3 Phänomenologische (quasidimensionale) Modelle

Phänomenologische Modelle können als Fortführung von nulldimensionalen Mehrzonenmodellen verstanden werden. Sie besitzen eine nochmals deutlich höhere Komplexität und beinhalten diverse Untermodelle zur Beschreibung einzelner Vorgänge, wie beispielsweise der Einspritzung mit Strahlausbreitung, Strahlaufbruch und Verdampfung, bis hin zu Zündung und Verbrennung.

Damit kann der Brennverlauf als zentrale Größe des Modells berechnet werden. Weitere wichtige Größen, wie beispielsweise der Zylinderdruckverlauf, können daraus vom Modell abgeleitet werden und müssen nicht mehr als gemessene Eingangsgrößen vorliegen. Um Schadstoffemissionen berechnen zu können, muss der Brennraum auch

hier in mindestens zwei Zonen aufgeteilt werden. Bei sehr aufwendigen Modellen kann der Brennraum aber auch in hundert und mehr Teilzonen unterteilt werden. Um die Entstehung der Stickoxidemission berechnen zu können, werden bis zu fünfzig Reaktionsgleichungen verwendet. Diese enorme Komplexität führt zu einem sehr hohen Rechenaufwand.

Trotz der relativ detailgetreuen Abbildung der physikalischen Zusammenhänge bei der phänomenologischen Modellierung ist eine Abstimmung eines solchen Modells mit Hilfe von Versuchsergebnissen zwingend erforderlich. Um die Vielzahl an Parametern mit vertretbarem Aufwand anpassen zu können, werden zum Teil automatische Abstimmungstools verwendet [53].

4.3.4 Dreidimensionale CFD-Modelle

Die sogenannten 3D-CFD¹¹-Modelle sind die aufwendigste Art der Modellierung. Sie berechnen beispielsweise die Vorgänge im Brennraum sowohl zeitlich als auch örtlich hoch aufgelöst. Ähnlich wie phänomenologische Modelle bestehen 3D-CFD-Modelle aus einer Vielzahl von Untermodellen zur Beschreibung einzelner Vorgänge. Um die gewünschte Ortsauflösung zu erhalten, wird das zu simulierende Element (z.B. der Brennraum) in 10^5 bis 10^6 und mehr Zellen unterteilt. Für jede dieser Zellen werden die Navier-Stokes-Gleichungen sowie, je nach Bedarf, die chemischen Reaktionsgleichungen u.a. berechnet. Durch die enorme Komplexität und den damit verbundenen hohen Rechenaufwand werden solche Modelle heutzutage meist nur zur Erforschung einzelner Phänomene und zur Auslegung bzw. Optimierung einzelner Komponenten genutzt. Auch hier sind versuchstechnisch unterstützte Abstimmungsarbeiten notwendig, die zum Teil sehr aufwendig sein können („gläserner Motor“).

4.3.5 Zusammenfassung

Die Komplexität und damit der Rechenaufwand der einzelnen Modelltypen steigt, angefangen von empirischen Modellen bis hin zu den CFD-Modellen drastisch an (s. Bild 4.2). Ziel dieser Arbeit ist es, ein Modell zu finden, mit dem es möglich ist, das gesamte Motorverhalten in Echtzeit abzubilden. Damit ist die Rechengeschwindigkeit als erster und wichtigster Parameter gesetzt. Aufgrund der hohen Rechenzeiten scheiden sowohl 3D-CFD-Modelle als auch phänomenologische Modelle für die Echtzeitsimulation aus. Nulldimensionale Modelle stellen hohe Anforderungen an Eingangsgrößen und Kalibrierung und erweisen sich damit für die vorliegende Arbeit als nicht zielführend. Im Weiteren sollen daher nur empirische Ansätze untersucht werden.

¹¹ CFD: Computational Fluid Dynamics

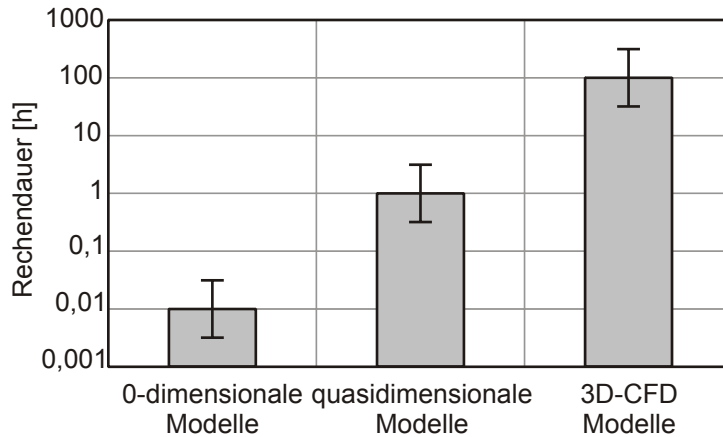


Bild 4.2: Rechenzeitbedarf für verschiedene Modellkategorien [54]

4.4 Methoden zur Erstellung empirischer Modelle

Im vorangegangenen Kapitel wurden die einzelnen Modelltypen kurz beschrieben. Nach Abwägung der Stärken und Schwächen besitzen die empirischen oder teil-empirischen Modelle das größte Potenzial für eine echtzeitfähige Modellierung. In der Praxis werden hier vor allem neuronale Netze, Polynommodelle oder kennfeldbasierte Modelle verwendet. Im nachfolgenden Abschnitt werden die unterschiedlichen empirischen Modellansätze vorgestellt.

4.4.1 Polynommodelle

Polynommodelle ermöglichen die Abbildung linearer und nichtlinearer Ein- und Mehrgrößensysteme. In Formel (4.14) ist die Struktur von statischen Polynommodellen dargestellt. Modelle dieses Typs werden allgemein als Response-Surface-Modelle bezeichnet [55], [56].

$$y = a_0 + a_1x_1 + \dots + a_ix_i + a_{12}x_1x_2 + \dots + a_{11}x_1^2 + \dots + a_{mm}x_m^2 + \dots \quad (4.14)$$

a_i stehen hier für die Parameter, x_i für die Eingänge bzw. Einflussgrößen und y für den Modellausgang des Polynommodells.

Diese Struktur ist linear in den Parametern und stellt ein lineares Regressionsproblem dar. Für Probleme dieses Typs lassen sich die Parameter sehr einfach über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmen. Die Parameterbestimmung wird in [57] detailliert beschrieben und soll hier in gekürzter Form dargestellt werden.

Grundlage für die lineare Regression bildet die Annahme, dass eine Zielvariable Y durch eine oder mehrere erklärende Variablen X , die sogenannten Regressoren, mit einer bestimmten Genauigkeit dargestellt werden kann.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_p x_{ip} + \epsilon_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (4.15)$$

Dabei sind Y_i die beobachteten Zufallsvariablen, x_{ij} die deterministischen Werte der Variablen X_j und ϵ_i die unbeobachteten Zufallsvariablen.

Die Regressionskoeffizienten β_j können aus den Messdaten

$$y_i, x_{i1}, \dots, x_{ip}, \quad i = 1, \dots, n \quad (4.16)$$

geschätzt werden. Hierzu kann beispielsweise die Methode der kleinsten Fehlerquadrate eingesetzt werden. Zusammengefasst lässt sich die multiple lineare Regression einfach in Matrixschreibweise ausdrücken:

$$Y = X\beta + \epsilon \quad (4.17)$$

wobei

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

den Vektor der Zielgrößen,

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

die Matrix der Messgrößen

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_p \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

den Vektor der Regressionskoeffizienten und

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

den Vektor der Fehlervariablen darstellt.

Das Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate wird damit zu

$$(Y - X\beta)'(Y - X\beta) \rightarrow \min_{\beta} \quad (4.22)$$

Nullsetzen der ersten Ableitung nach β liefert das $(p+1)$ -dimensionale System der Normalgleichungen

$$X'(Y - X\hat{\beta}) = 0 \leftrightarrow X'X\hat{\beta} = X'Y \quad (4.23)$$

Ist die $(p + 1) \times (p + 1)$ Matrix $X'X$ invertierbar, so ergibt sich

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'Y \quad (4.24)$$

als KQ¹²-Schätzer für β .

Damit stellt die Methode der kleinsten Fehlerquadrate einen effizienten Algorithmus für die Lösung des linearen Regressionsproblems zur Verfügung.

Die Anzahl der mindestens benötigten Messungen wird dabei durch die Zahl der Parameter vorgegeben. Wurde eine geeignete Modellstruktur gewählt, verbessert sich die Schätzung, je mehr Messwerte zur Verfügung stehen. Betrachtet man eine unendliche Anzahl von Messungen ($n \rightarrow \infty$), so konvergiert der geschätzte Parametervektor $\hat{\beta}$ zu den tatsächlichen Parametern β .

4.4.2 Neuronale Netze

Neuronale Netze sind ein von der Natur inspirierter Mechanismus, der es Computern ermöglicht, ähnlich wie ein Gehirn zu lernen - der Computer kann so, wenn er die Lösung für ein Problem kennt, korrekte Lösungen für ähnliche Probleme finden [58], [59].

4.4.2.1 Bestandteile neuronaler Netze

Neuronen

Neuronen – auch Units genannt – bilden die Grundeinheit aller neuronaler Netze. Diese Units dienen dazu, Informationen aus der Umwelt oder von anderen Neuronen aufzunehmen und an andere Units oder die Umwelt in modifizierter Form weiterzuleiten. Hierbei kann zwischen drei unterschiedlichen Arten unterschieden werden [60].

¹² KQ-Schätzer: Kleinsten Quadrate Schätzer, Minimierung des Fehlers nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate

- **Input-Units:** Units, die von der Außenwelt Signale (Reize, Muster) empfangen können.
- **Hidden-Units:** Units, die sich zwischen Input- und Output-Units befinden und eine interne Repräsentation der Außenwelt beinhalten.
- **Output-Units:** Units, die Signale an die Außenwelt weitergeben.

Durch Kombination dieser Units können neuronale Netze beliebiger Struktur und Komplexität erstellt werden (s. Bild 4.3).

Die in diesem Schema übereinander angeordneten Units (z.B. die beiden rechts befindlichen Output-Units in Bild 4.3) werden als Schicht bzw. Layer zusammengefasst.

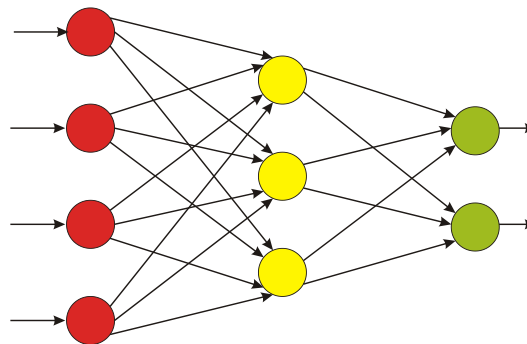


Bild 4.3: Schematische Darstellung eines neuronalen Netzes [61]

Verbindungen

Der zweite wichtige Bestandteil neuronaler Netze sind die Verbindungen zwischen den Neuronen. Über die Verbindungen werden Daten zwischen Neuronen übertragen, wobei das Verbindungsgewicht verstärkend oder hemmend wirkt. In einem neuronalen Netz können theoretisch alle Neuronen miteinander verbunden werden. Häufiger werden jedoch spezielle Netztopologien verwendet, bei denen die Anzahl und die Richtung der Verbindungen eingeschränkt wird.

Dabei gilt nach [62]:

- Ein positives Gewicht bringt zum Ausdruck, dass ein Neuron auf ein anderes Neuron einen erregenden Einfluss ausübt.
- Ein negatives Gewicht bedeutet, dass der Einfluss inhibitorisch, also hemmender Natur ist.
- Ein Gewicht von Null besagt, dass ein Neuron auf ein anderes Neuron derzeit keinen Einfluss ausübt.

4.4.2.2 Netztopologien

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die drei Bestandteile neuronaler Netze beschrieben. Aus diesen einfachen Elementen lassen sich neuronale Netze unterschiedlichster Komplexität zusammenstellen, die sich wiederum nach verschiedenen Gesichtspunkten klassifizieren lassen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich FeedForward-Netze verwendet, deren Aufbau hier kurz beschrieben werden soll:

Beim FeedForward-Netz sind die Neuronen in unterschiedliche Schichten eingeteilt. Hierbei kommen eine Eingabeschicht, eine oder mehrere versteckte Bearbeitungsschichten, so genannte hidden layer und eine Ausgabeschicht zum Einsatz (vgl. Bild 4.3). Verbindungen zwischen Neuronen dürfen bei dieser Netzart nur von einem Neuron zu Neuronen der nächsten Schicht, also in Richtung der Ausgabeschicht bestehen. Sind in einem FeedForward-Netz alle Neuronen einer Schicht mit allen Neuronen der nächsten Schicht verbunden, spricht man von vollverknüpften Schichten.

4.4.2.3 Training neuronaler Netze

Das interessante Merkmal neuronaler Netze besteht in ihrer Fähigkeit, sich mit Problemen durch Training vertraut zu machen und, nach ausreichendem Training, auch bis dato unbekannte Probleme derselben Klasse lösen zu können. [58]

Um ein neuronales Netz trainieren zu können, wurde bisher eine Vielzahl von Trainingsmethoden entwickelt, auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden soll. Der interessierte Leser sei auf bereits genannte Quellen [58] - [62] verwiesen. Wichtig für das Verständnis der vorliegenden Arbeit ist lediglich die praktische Vorgehensweise des Trainings in der Anwendung der neuronalen Netze. Beim Training eines neuronalen Netzes unterscheidet man typischerweise zwischen einer Trainings- und einer Testphase.

In der Trainingsphase lernt das neuronale Netz anhand des vorgegebenen Lernmaterials. Dementsprechend werden in der Regel die Gewichte zwischen den einzelnen Neuronen modifiziert. Lernregeln geben dabei die Art und Weise an, wie das neuronale Netz diese Veränderungen vornimmt.

In der Testphase hingegen werden keine Gewichte verändert. Statt dessen wird hier auf Grundlage der bereits modifizierten Gewichte aus der Trainingsphase untersucht, ob und in welcher Qualität das Netz etwas gelernt hat. Dazu präsentiert man den Inputneuronen Reize und prüft, welchen Output das neuronale Netz berechnet. Zwei verschiedene Arten von Reizen können unterschieden werden:

- Ausgangsreize: Durch erneute Präsentation der zu lernenden Ausgangsreize wird geprüft, ob das neuronale Netz das Trainingsmaterial erfasst hat.
- Neue Reize: Durch Präsentation neuer Reize kann man feststellen, ob das Netz über die zu lernenden Reize hinaus in der Lage ist, Aufgaben zu lösen. Anders formuliert: Findet eine Generalisierung auf neue Reize statt?

Durch die Aufteilung des Lernens der KNN¹³ in die beiden Phasen Training und Test ist auch eine einfache Möglichkeit gegeben, den Trainingszustand des Netzwerks zu beschreiben.

Mit Hilfe von Korrelationsdiagrammen lässt sich der Trainingszustand sehr schnell visualisieren. Hierbei werden die Eingangsgrößen, also die Trainings- und Testdaten, über den zugehörigen, vom neuronalen Netz berechneten Ausgangsdaten aufgetragen (Bild 4.4).

Gibt das neuronale Netz die Trainingsdaten zufriedenstellend wieder, kann das Training abgeschlossen werden. Nun werden die Testdaten ebenfalls aufgetragen. Geben auch diese die Ausgangsdaten wieder, kann davon ausgegangen werden, dass das neuronale Netz auch zur Generalisierung fähig ist. Werden die Testdaten dagegen unzureichend wiedergegeben, kann von einem Overfitting ausgegangen werden, d.h. das neuronale Netz gibt zwar die Trainingsdaten korrekt wieder, ist aber nicht in der Lage das Problem zu generalisieren. Dieser Zustand ist vergleichbar mit „auswendig lernen“ im Gegensatz zum „Verstehen“.

¹³ KNN: künstliche neuronale Netze

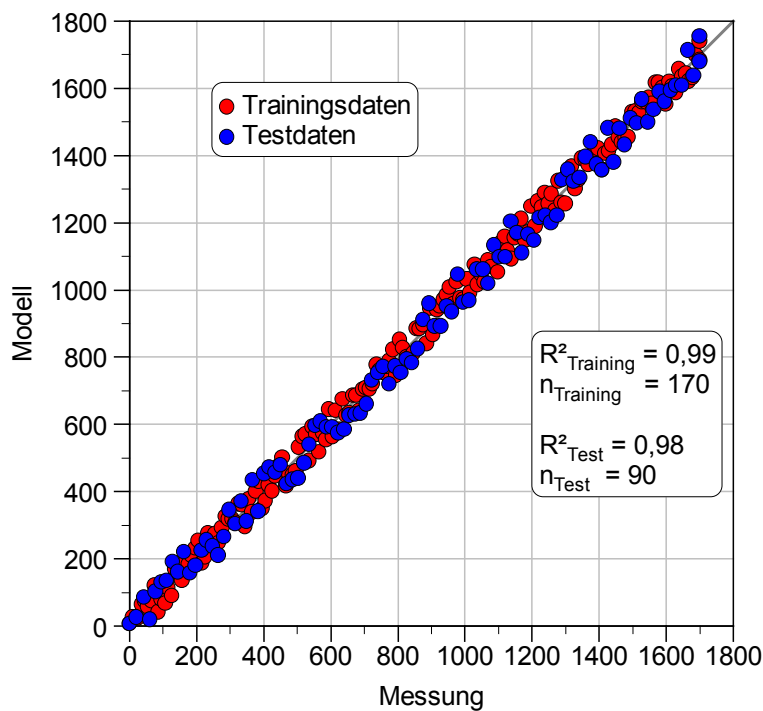


Bild 4.4: Korrelationsdiagramm – schematisch

4.4.2.4 Probleme beim Training neuronaler Netze

Das erste Problem ist die Abhängigkeit der Netzqualität von der Startbedingung des Trainings (s. Bild 4.5). Hier ist zu sehen, dass das Ergebnis des Trainings stark vom Startpunkt auf der Fehlerkurve abhängt. Ist die Kombination der Startgewichte schlecht gewählt, kann es vorkommen, dass nicht das globale Minimum gefunden wird und somit das neuronale Netz schlecht trainiert wird. Dies wäre der Fall, wenn der Startpunkt in Bild 4.5 rechts vom lokalen Minimum läge. Wird die Gewichtsänderung beim Hinabschreiten zu klein gewählt, kann es passieren, dass die Optimierung im lokalen Minimum endet. Weiterhin kann es vorkommen, dass das globale Minimum übersprungen wird und der Fehler auf der gegenüberliegenden Flanke landet. Dies bedeutet, dass die Optimierung wieder in die entgegengesetzte Richtung läuft, da nun die Steigung negativ ist. Nun kann es vorkommen, dass in diesem Fall wieder der Ausgangspunkt auf der anderen Talseite getroffen wird und es daraufhin zu einer oszillierenden Bewegung im Tal kommt. Bei flach verlaufenden Fehlerkurven und damit geringen Steigungen wird das Gewicht nur in kleinen Schritten verändert. Somit kann es passieren, dass ausgedehnte Plateaus nicht überwunden werden können, bevor die maximale Anzahl an Iterationen erreicht ist.

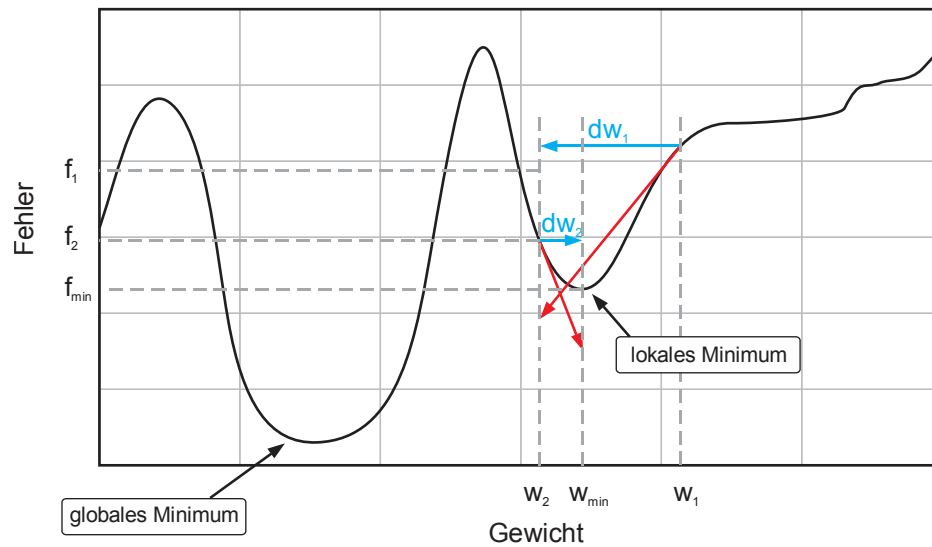


Bild 4.5: Gradientenabstiegsverfahren – lokales Minimum

Im Gegensatz zu den Plateaus stehen sehr schmale Täler in der Fehlerkurve. Hier besteht die Möglichkeit, dass das globale Minimum einfach übersprungen wird und die Optimierung in einem lokalen Minimum endet [63].

Ein weiterer Nachteil von neuronalen Netzen ist die große Anzahl an benötigten Trainingsdaten. Diese hängt stark von der Anzahl der Parameter ab, auf die das neuronale Netz trainiert werden soll. Das beschriebene Verhalten ist in Bild 4.6 verdeutlicht.

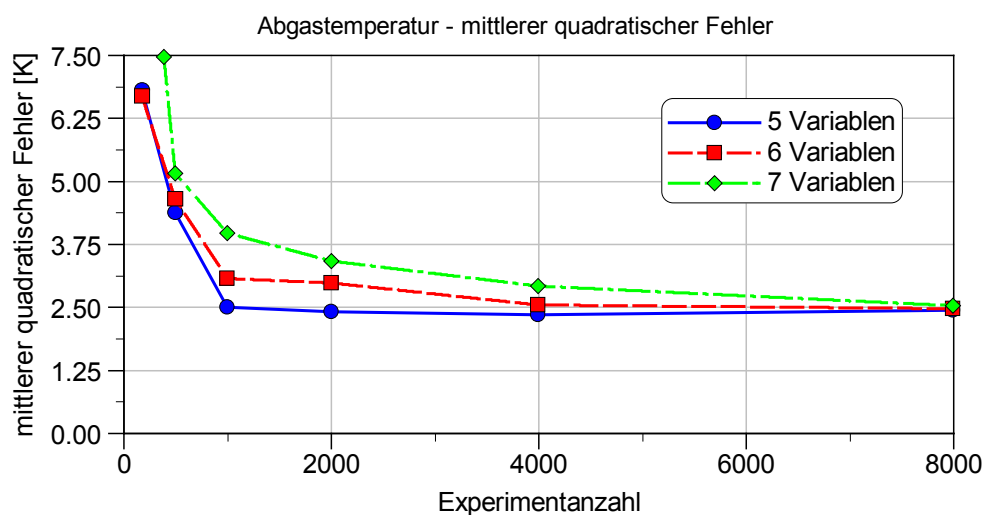


Bild 4.6: Abhängigkeit des Trainingsfehlers von der Anzahl der Variablen und Trainingsdaten am Beispiel der Abgastemperatur [64]

Im gezeigten Diagramm ist der mittlere quadratische Fehler über der Anzahl der Trainingsdaten aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass ein Minimum von 1000 Trainingsdaten nötig ist, um selbst bei nur fünf Parametern eine akzeptable Genauigkeit zu erhalten. Um bei der Verwendung von sieben Parametern, von denen das Netzwerk abhängen soll, einen vergleichbaren Fehler zu erhalten sind in etwa 4000 - 5000 Datenpaare nötig [63].

4.4.3 Kennfeldbasierte Modelle

Auch Kennfelder bieten die Möglichkeit nichtlineare Zusammenhänge auf einfache Weise zu modellieren. Nachteilig ist allerdings die geringe Zahl der Eingänge (normalerweise zwei) und der drastische Anstieg der Komplexität mit zunehmender Zahl dieser Eingänge. Sollen mehr als zwei Abhängigkeiten berücksichtigt werden, müssen mehrere Kennfelder kombiniert werden. Dazu sind verschiedene Kombinationen denkbar. Bild 4.7 zeigt die unterschiedlichen Möglichkeiten der Darstellung eines Systems mit drei Eingängen durch Kennfelder.

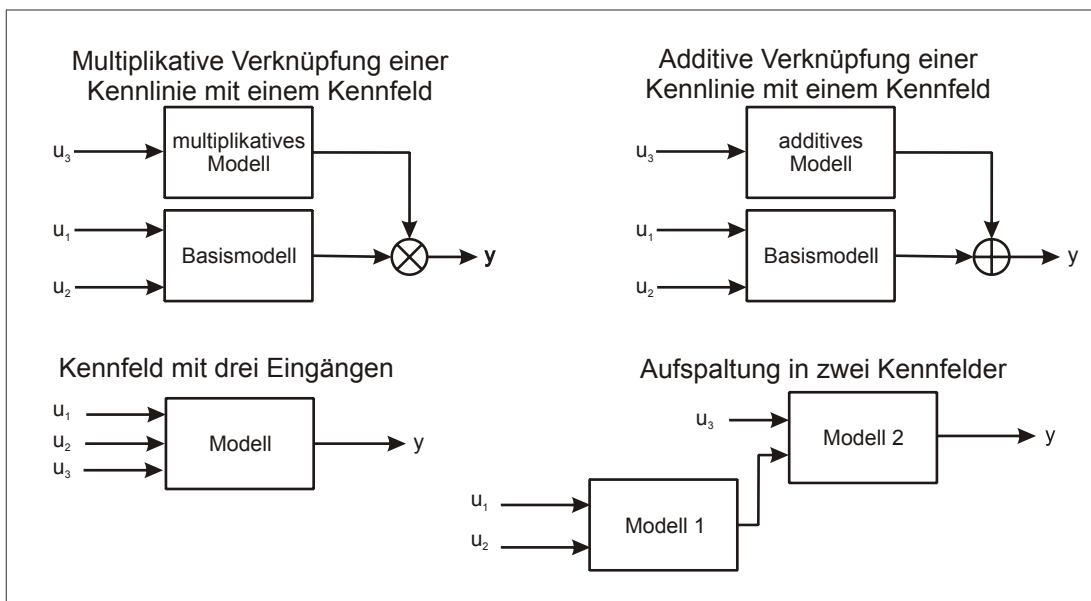


Bild 4.7: Darstellung eines Kennfeldsystems mit drei Eingängen [65]

4.4.4 Weitere Verfahren

Neben den hier beschriebenen Verfahren zur Modellerstellung können nach [65] eine Vielzahl weiterer Verfahren gefunden werden. So verwendet Alberer beispielsweise die genetische Programmierung für die Erstellung eines virtuellen Sensors für die Partikelemission [66]. Andere Arbeiten verwenden Fuzzy-Modelle (s. [67]). Um einen Überblick über die Möglichkeiten der nichtlinearen Modellierung zu erhalten, sei dem interessierten Leser [68] empfohlen.

4.5 Beurteilung der Modellgüte

Um die Modellqualität objektiv beurteilen und damit die einzelnen Modelle vergleichen zu können, werden statistische Kennwerte zur Beschreibung der Modellgüte eingeführt.

Allen voran ist hier das Bestimmtheitsmaß R^2 zu nennen. Es gibt das Verhältnis der durch das Modell erklärten Varianz zur tatsächlichen Varianz des Systems an und dient als Maßzahl zur Beurteilung der Güte eines Regressionsansatzes [57].

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} = \frac{SQE}{SQT} = 1 - \frac{SQR}{SQT} \quad (4.25)$$

mit

\hat{Y}_i	<i>Modellwerte</i>
Y_i	<i>Messwerte</i>
\bar{Y}_i	<i>Mittelwert der Messwerte</i>
SQE	<i>Sum of Squared Errors, erklärte Streuung</i>
SQT	<i>Sum of Squared Total, Gesamtstreuung</i>
SQR	<i>Sum of Squared Residual, Reststreuung</i>

Problematisch bei der Verwendung des Bestimmtheitsmaßes als Kenngröße für die Modellgüte ist allerdings, dass das Bestimmtheitsmaß mit zunehmender Anzahl an Regressoren¹⁴ größer wird. Wählt man also für ein beliebiges Modell nur genügend viele Parameter aus, so wird das Bestimmtheitsmaß immer zu 1. Um dies zu verhindern, wird in dieser Arbeit zusätzlich das korrigierte Bestimmtheitsmaß R^2_{korr} verwendet. Dabei wird das Bestimmtheitsmaß mit der Anzahl der Regressoren und der Anzahl der zur Verfügung stehenden Messwerte korrigiert (s. Gleichung (4.26)).

$$R^2_{\text{korr.}} = 1 + (R^2 - 1) \cdot \frac{n - 1}{n - p - 1} \quad (4.26)$$

mit

$R^2_{\text{korr.}}$	<i>korrigiertes Bestimmtheitsmaß</i>
R^2	<i>Bestimmtheitsmaß</i>
n	<i>Anzahl Messwerte</i>
p	<i>Anzahl Regressoren</i>

Enthält der Regressor keine zusätzliche Information wird das korrigierte Bestimmtheitsmaß durch die Aufnahme des Regressors ins Modell verkleinert. Die Aufnahme

¹⁴ Regressoren = Modellvariablen bzw. Parameter des Polynoms

zusätzlicher Regressoren wird sozusagen mit einem kleiner werdenden korrigierten Bestimmtheitsmaß bestraft.

Eine sehr einfache Größe zur Beurteilung der Modellgüte stellt der relative Fehler ε_{rel} dar.

$$\varepsilon_{rel} = \frac{\hat{x} - x}{x} \quad (4.27)$$

Vorteil des relativen Fehlers als Maß für die Modellgüte ist die Unabhängigkeit von Einheiten und Größenordnungen der untersuchten Werte. Außerdem ermöglicht er dem Betrachter eine schnelle Beurteilung des Systems. Um den Fehler über eine Messperiode (z.B. über einen Abnahmezyklus) beurteilen zu können, kann der mittlere relative Fehler herangezogen werden.

$$e_{rel} = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{rel,i} \right| \quad (4.28)$$

Bei der Bewertung der Modellergebnisse mit den oben beschriebenen Kennzahlen kommt es durch kurze zeitliche Verschiebungen vor allem bei Signalverläufen mit großen Gradienten zu Diskrepanzen zwischen der subjektiven Wahrnehmung des Betrachters und der durch die Kennzahlen ausgedrückten objektiven Bewertung. Um dieses Problem zu umgehen, wird zusätzlich die kumulierte NO_x -Emission aufgetragen und die relative kumulierte Abweichung a bestimmt.

$$a = \left| \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{x} - x)}{\sum_{i=1}^n x} \right| \quad (4.29)$$

Diese erwies sich als gut geeignet, um den subjektiven Eindruck eines Betrachters mit einem objektiven Kennwert zu beschreiben.

4.6 Statistische Versuchsplanung

Wie oben bereits erwähnt, kommt der Vermessung des zu modellierenden Systems bei der Verwendung empirischer Modelle eine große Bedeutung zu. Zum einen steigt der Messaufwand mit der Anzahl an Eingangsparametern drastisch an, zum anderen ist die Modellgüte wesentlich von den zur Modellbildung bereitgestellten Parametern abhängig.

Um auch komplexe Modelle mit vertretbarem Versuchsaufwand erzeugen zu können, werden deshalb seit einiger Zeit in der Motorenentwicklung Methoden der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments, kurz: DoE) eingesetzt.

Allerdings sind die Methoden der statistischen Versuchsplanung nicht nur im Bereich der Motorvermessung hilfreich. Auch im Rahmen von umfangreichen Parametervariationen bei der Motorsimulation können DoE-Methoden angewendet werden, um die Anzahl der zu simulierenden Betriebspunkte, wie bei Prüfstandsuntersuchungen, möglichst gering zu halten und gleichzeitig die maximale Information daraus zu gewinnen. Im Folgenden sollen die wesentlichen Grundzüge der statistischen Versuchsplanung erläutert werden.

Versuchspläne

Versuchspläne können in unterschiedliche Kategorien unterteilt werden. Eine erste, einfache Unterteilung bezieht sich auf die Art und Weise, wie die Versuchspunkte im Versuchsraum verteilt werden. Hierbei lassen sich herkömmliche Versuchspläne und optimale Versuchspläne unterscheiden.

Herkömmliche Versuchspläne

Herkömmliche Versuchspläne sind meist sehr einfach aufgebaut. Beispiele hierfür sind:

- vollfaktorielle Versuchspläne
- teilfaktorielle Versuchspläne

Nachteilig ist nicht allein der große Mess- bzw. Rechenaufwand, der beispielsweise mit vollfaktoriellen Versuchsplänen einhergeht. Auch die Tatsache, dass herkömmliche Versuchspläne symmetrische Randbedingungen erfordern, schränkt die Verwendung dieser Kategorie für die Versuchsplanung am Verbrennungsmotor stark ein (s. Bild 4.8).

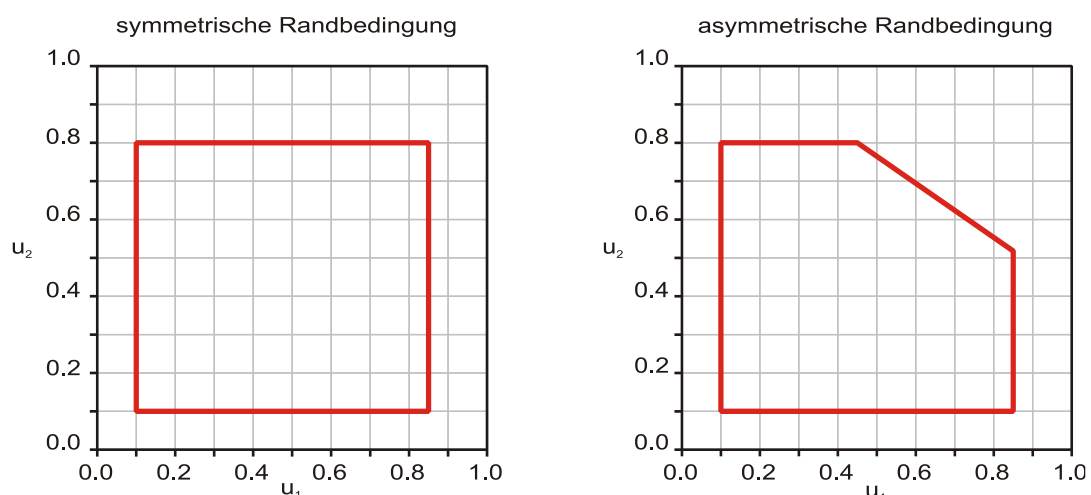


Bild 4.8: Symmetrische und asymmetrische Ränder [65]

So ist zum Beispiel bei der Erstellung eines statischen Polynommodells darauf zu achten, dass herkömmliche Pläne nur gewisse polynomiale Ordnungen und Strukturen

zulassen. Ein vollfaktorieller Versuchsplan mit zwei Variationsstufen (kurz: 2^p Plan¹⁵), gilt demnach nur für lineare Modelle mit zweifachen Wechselwirkungen. Mit nur zwei Variationsstufen lassen sich aber keine Nichtlinearitäten detektieren, des Weiteren steigt der Variationsaufwand für viele Einflussgrößen exponentiell an [69].

Die hier erläuterten Einschränkungen herkömmlicher Versuchspläne zeigen, dass deren Verwendung in der hier vorliegenden Arbeit nicht zielführend ist.

Optimale Versuchspläne

Ein optimaler Versuchsplan zeichnet sich dadurch aus, dass der durch Messungen bzw. Simulationsrechnungen gewonnene Informationsgehalt mit möglichst geringem Aufwand maximal wird. Außerdem bieten optimale Versuchspläne bessere Randbedingungen für die Erstellung robuster Modelle.

In der Literatur werden verschiedene Ansätze beschrieben, wie optimale Versuchspläne erzeugt werden können. Einige Beispiele für Optimalitätskriterien sind das D-, A-, oder G-Kriterium [70]. Das wohl bekannteste und am weitesten verbreitete Optimalitätskriterium, das auch in dieser Arbeit Verwendung findet, ist das D-Kriterium und wird deshalb im Folgenden kurz näher erläutert.

Sollen die Parameter in einem dreidimensionalen Versuchsraum in mehreren Schritten variiert werden, sind zunächst mehrere Parameterkombinationen denkbar. Die Matrix, die alle diese potentiellen Messpunktekombinationen beinhaltet, wird Matrix der Kandidatenpunkte genannt. Die daraus gewählten Messpunkte ergeben die Experiment-Matrix. Je nach polynomialer Struktur bzw. gewählter Modellordnung ergibt sich damit eine Modellmatrix. Um den Parametervektor über eine Least-Squares-Schätzung zu berechnen, benötigt man die Informationsmatrix (Hessematrix H) oder genauer gesagt ihre Inverse, welche als Kovarianzmatrix bezeichnet wird.

$$H^{-1} = (\phi^T \phi)^{-1} \quad (4.30)$$

Damit ist die Invertierbarkeit von H entscheidend für die erzielbare Modellqualität. Diese ist direkt von den gewählten Messpunkten abhängig. Die Invertierbarkeit einer Matrix lässt sich über die Determinante bestimmen. Ist die Determinante größer Null, so ist die Invertierbarkeit gegeben. Das D-optimale Kriterium versucht demnach die Determinante von H zu maximieren, um so die Invertierbarkeit der Informationsmatrix zu gewährleisten bzw. zu verbessern. Je größer die Determinante einer Matrix, desto orthogonaler wird ihre Inverse. Die Orthogonalität wiederum erhöht die Signifikanz der

¹⁵ 2^p Plan: Zwei Variationsstufen bei jeweils p Parametern

gewonnen Modellparameter, da sie ein Maß für deren gegenseitige Unabhängigkeit ist. [65]

4.7 Testzyklen

Im Jahr 2000 wurden europaweit einheitliche Testzyklen (ESC, ETC und ELR¹⁶) für schwere Nutzfahrzeugmotoren eingeführt. Für die Zertifizierung nach EURO VI tritt aller Voraussicht nach die WHDC in Kraft. Diese setzt sich aus einem stationären Anteil, dem WHSC und einem dynamischen Anteil, dem WHTC, zusammen und soll typische Fahrbedingungen in der EU, den USA, Japan und Australien wiedergeben [71]. Bei dem zur Verfügung stehenden Versuchsmotor handelt es sich um einen Motor in EURO V-Auslegung. Damit sind für den Motor noch die alten Abnahmezyklen ESC und ETC vorgeschrieben. Aufgrund ihrer guten Aussagekraft und um die große bereits vorhandene Datenbasis weiter nutzen zu können, werden diese Zyklen auch im Rahmen dieser Arbeit verwendet. Daher sollen sie im Folgenden kurz vorgestellt werden.

European Stationary Cycle (ESC)

Beim ESC, der auch als 13-Stufentest bezeichnet wird, werden die zu untersuchenden dreizehn Betriebspunkte über den Kennfeldbereich des Motors verteilt (s. Bild 4.9)

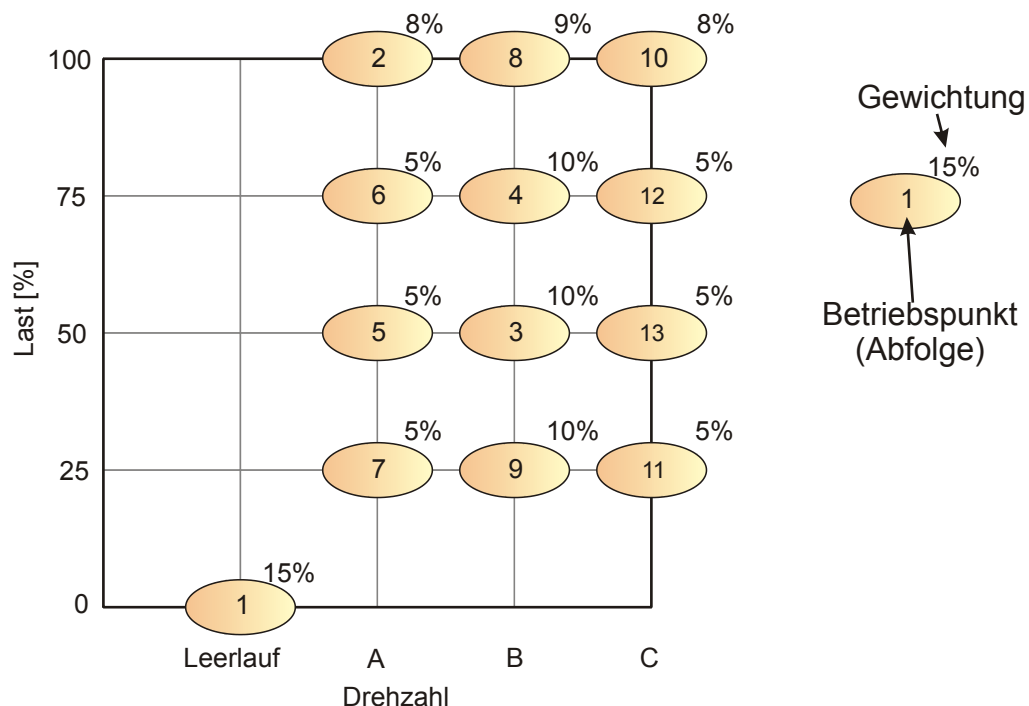


Bild 4.9: 13-Stufentest im Motorkennfeld [72]

¹⁶ ELR: european load response test

Die dreizehn Betriebspunkte setzen sich aus drei Drehzahlen (A, B, C) mit den dazugehörigen Lasten (25, 50, 75 und 100 %) sowie einem Leerlaufpunkt zusammen. Die Stufendauer beträgt mit Ausnahme des Leerlaufpunktes (240 s) jeweils 120 s. Damit ergibt sich eine Gesamtdauer von 1680 s. Zur Bestimmung der Zyklusemission werden in den einzelnen Punkten gemessenen Emissionen gewichtet und addiert. Die Wichtungsfaktoren betragen dabei zwischen 5 und 15 % [5].

European Transient Cycle (ETC)

Der ETC (europäischer transienter Testzyklus) soll das dynamische Verhalten des Motors wiedergeben. Dabei werden die Fahrbedingungen eines Motors während einer dreigeteilten Fahrt (Stadt, Überland, Autobahn) simuliert. Jede der drei Testphasen hat dabei eine Länge von 600 s (s. Bild 4.10).

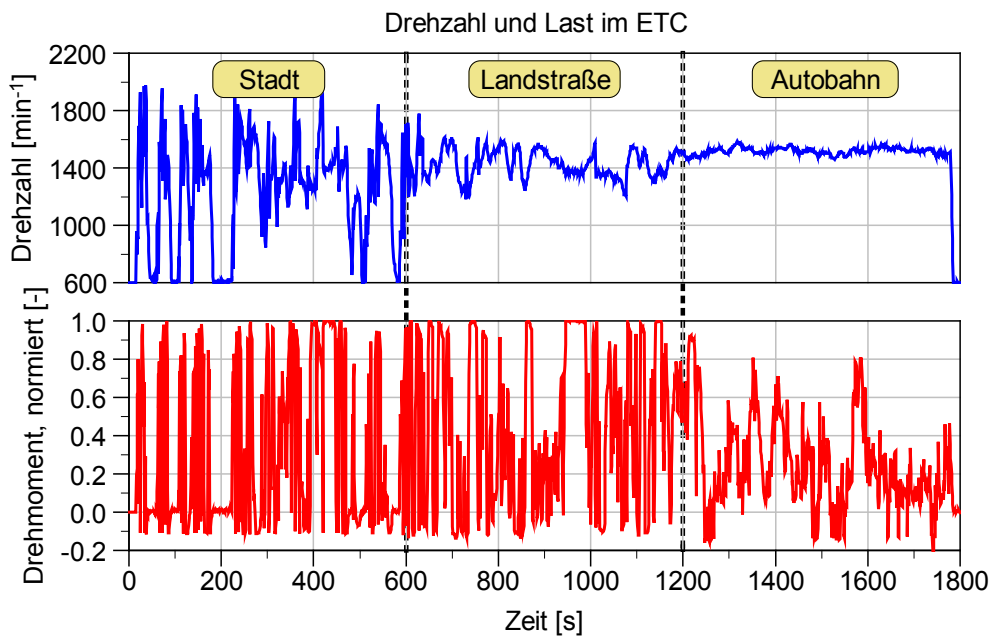


Bild 4.10: Drehzahl und Last im ETC

5 Versuche

5.1 Versuchsträger und Prüfstands Aufbau

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurden an einem MAN Sechszylinder-Reihenmotor der Baureihe D2676LOH24 (Hubvolumen: 12,4 l, Leistung: 353 kW bei 1900 min⁻¹) durchgeführt.

Dieser Motor erreicht mit zweistufiger Aufladung mit Ladeluft- und Zwischenkühlung, Common Rail Hochdruckeinspritzung, λ -geregelter gekühlter Hochdruck-AGR und einem Oxidationskatalysator die EURO V-Emissionsgrenzwerte. Somit kann er als Basismotor für das EURO VI-Zeitalter angesehen werden [73]. Die technischen Daten sind in Tabelle 9.1 im Anhang zusammengestellt.

Das Aggregat wurde an einem Motorenprüfstand der MAN Nutzfahrzeuge AG in Nürnberg betrieben. Bild 5.1 zeigt den Prüfstands Aufbau sowie die eingesetzte Messtechnik. Als Belastungseinheit wurde eine Wasserwirbelbremse vom Typ Schenck D900 eingesetzt. Die Prüfstandssteuerung sowie die standardmäßige Erfassung der Messdaten erfolgt über ein d2t – Morphée Automatisierungssystem.

Zur Bestimmung der gasförmigen Emissionen wurde eine Abgasmessanlage vom Typ Horiba Mexa 7110D EGR verwendet. Nichtlimitierte Abgaskomponenten können bei Bedarf mit einem Ansyco FTIR-Spektrometer¹⁷ bestimmt werden. Die Rußemissionen wurden standardmäßig mit einem Rauchmessgerät (AVL 415S Smokemeter) überwacht.

¹⁷ FTIR-Spektrometer: Fourier-Transform Infrarot Spektrometer

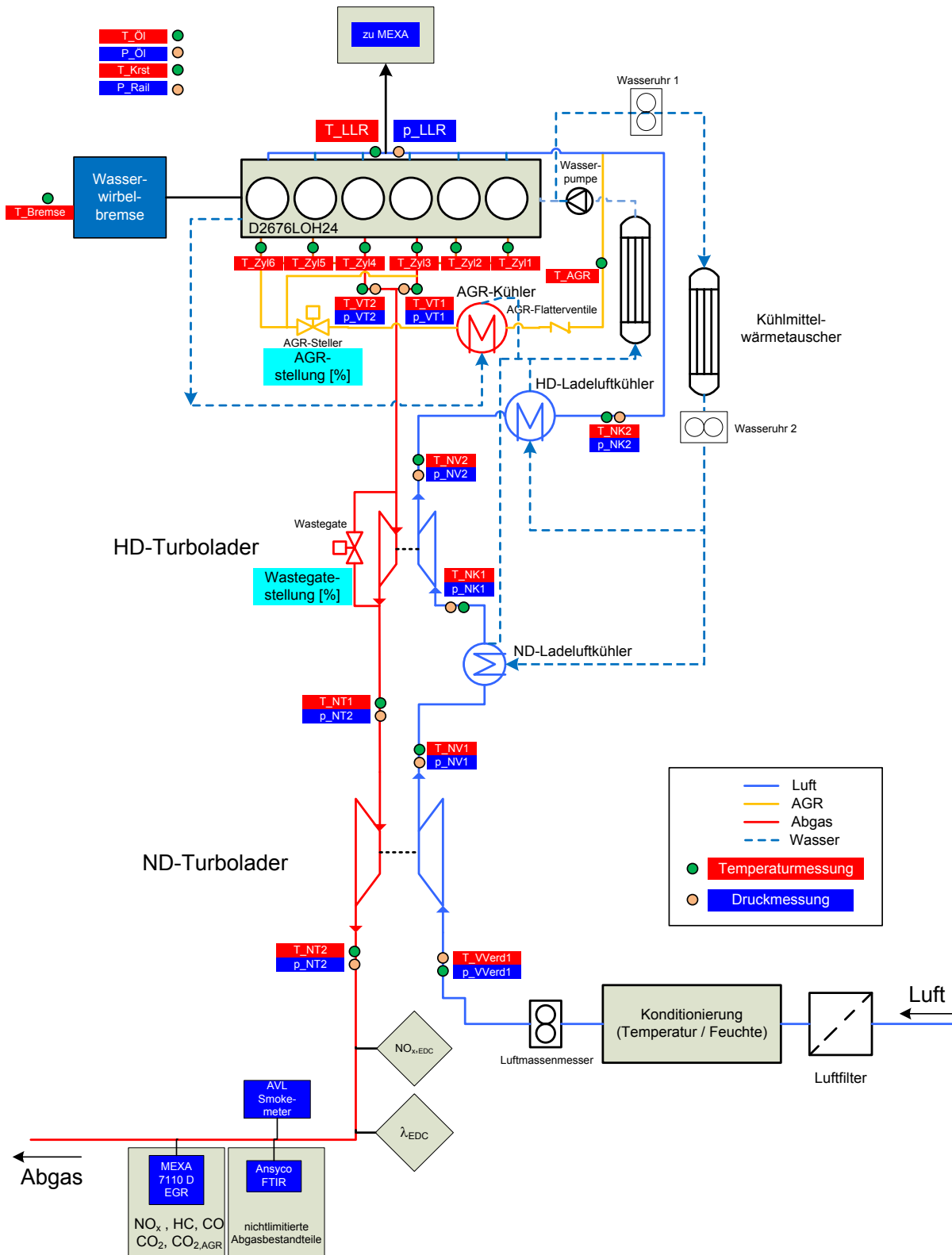


Bild 5.1: Prüfstands Aufbau

5.2 Eingesetzte Sensorik

Im Folgenden soll die für diese Arbeit wichtige Sensorik erläutert werden. Dabei wird neben der Stickoxidmesstechnik auch kurz auf die Luftmassenmessung und die Lambdabestimmung im Abgas eingegangen.

5.2.1 NO_x-Messung

NO_x-Analysator in der Abgasmessanlage

Der NO_x-Analysator der Abgasmessanlage bestimmt die Stickoxidemission nach dem CLD¹⁸-Prinzip. Bei einem Messbereich von 0 – 10000 ppm besitzt der CLD-Analysator laut Hersteller eine Linearität von $\pm 1\%$ [74]. Durch tägliche Kalibrierung wird eine hohe Reproduzierbarkeit erreicht. Wegen dieser sehr hohen Genauigkeit wurde das Stickoxidsignal der Abgasmessanlage als Referenzsignal herangezogen.

Bei der Bestimmung des transienten Verhaltens ergeben sich prinzipbedingt Effekte, die bei der späteren Verwendung der Messwerte zur Modellidentifikation und vor allem zur Modellvalidation berücksichtigt werden müssen. Zum einen befindet sich die Abgasentnahmestelle für die Analyse in der Abgasmessanlage im Abgasstrang nach der Niederdruckturbine. Zum anderen muss das entnommene Abgas über eine Messgasleitung zum Analysator transportiert werden. Der damit verbundene relativ große Abstand vom Ort der Stickoxidentstehung im Brennraum zum Ort der Stickoxidmessung wirkt zum einen als Totzeitglied, vor allem aber als Tiefpassfilter. Außerdem muss noch die T₉₀-Zeit¹⁹, also sozusagen die Trägheit des Analysators selbst, beachtet werden, d.h. die Messwerte werden erstens verzögert und zweitens geglättet angezeigt.

NO_x-Sensor

Wie in Kapitel 2.1 kurz erwähnt, wurde mit der Einführung der OBD auch die Überwachung der Stickoxidemission während des realen Motorbetriebs vorgeschrieben. Hierzu wurden NO_x-Sensoren entwickelt, die heute vor allem bei SCR-Motoren eingesetzt werden. Gemäß Herstellerangaben beträgt die Messgenauigkeit des verwendeten Sensors in einem NO_x-Konzentrationsbereich von 0 – 500 ppm $\pm 10\%$ [75]. Bild 5.2 zeigt ein Kennfeld der relativen Abweichung von NO_x-Sensor und NO_x-Messung der Abgasmessanlage. Es ist zu erkennen, dass der Fehler über das gesamte Kennfeld stark variiert.

¹⁸ CLD: Chemolumineszenzdetektor – Eine Beschreibung des Messprinzips findet sich im Anhang

¹⁹ T₉₀-Zeit: Die Zeit, nach der eine Sprungantwort einer nicht schwingenden Regelstrecke 90% der Maximalamplitude erreicht hat [103]

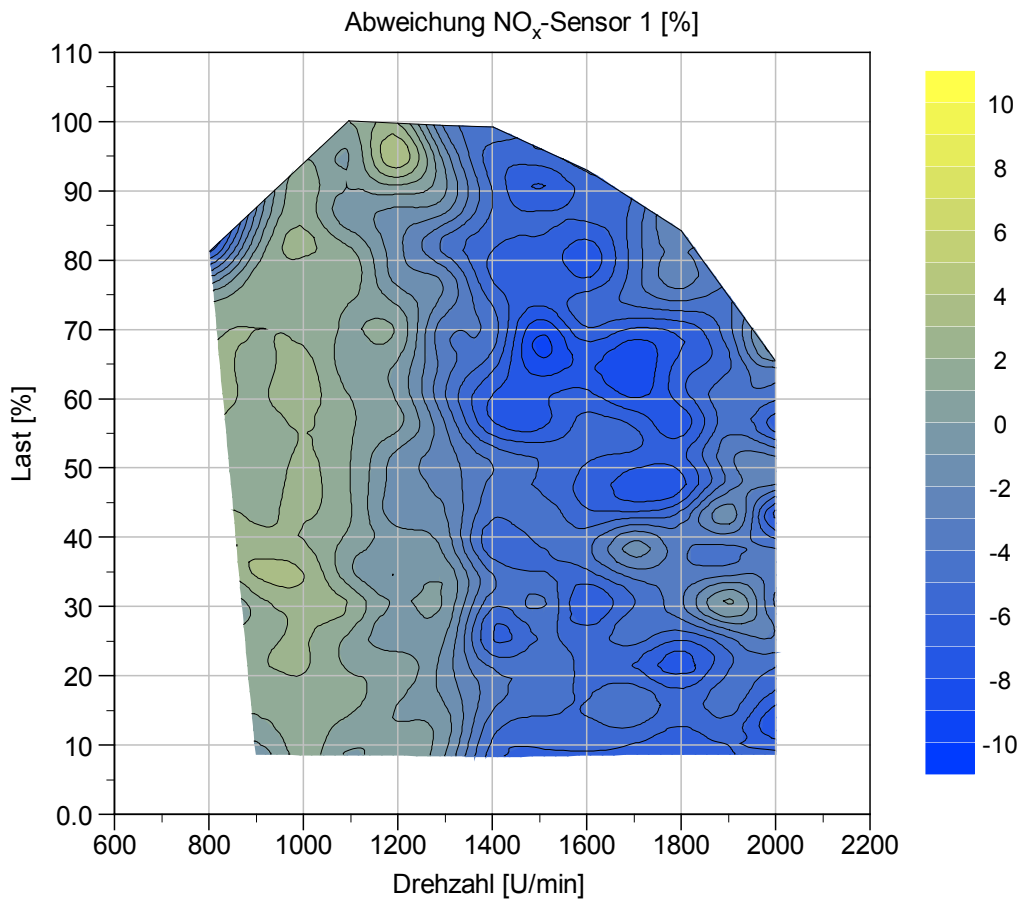


Bild 5.2: Abweichung NO_x-Sensor 1 vs. NO_x-Analysator der Abgasmessanlage

In Bild 5.3 ist ein Vergleich mehrerer NO_x-Sensoren abgebildet. Bei Sensor 1 handelt es sich um einen gealterten Sensor mit ca. 500 Betriebsstunden. Sensor 2, Sensor 3 und Sensor 4 sind fabrikneu.

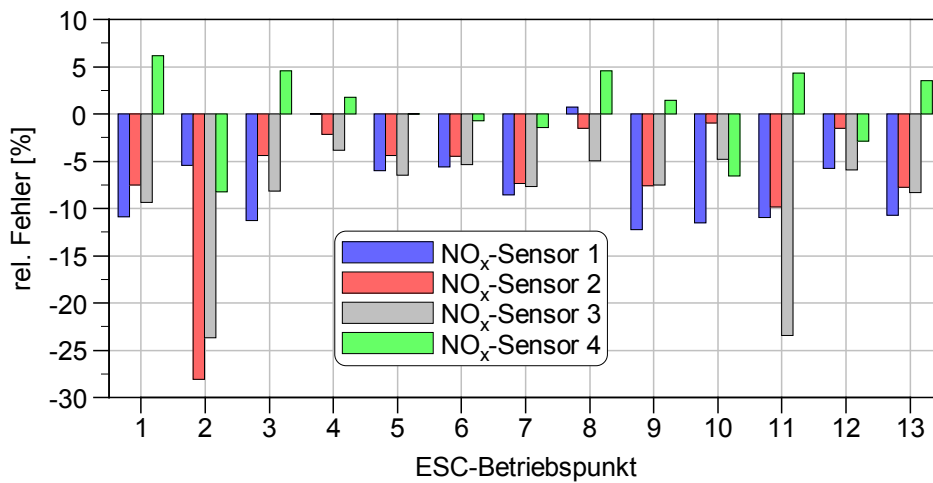


Bild 5.3: Mehrere NO_x-Sensoren vs. NO_x-Analysator der Abgasmessanlage im ESC

Die Sensoren zeigen eine deutliche Streuung untereinander. Sehr gut zu erkennen ist auch die alterungsbedingte Veränderung des Sensorwertes gegenüber den neuen Sensoren. Auffallend ist die sehr hohe Abweichung der neuen Sensoren in Betriebspunkt 2 (1200 min^{-1} , Volllast) von ca. 25 %.

Ähnlich wie Lambdasonden nutzen NO_x -Sensoren das Prinzip der Sauerstoffpartialdruckmessung (eine detaillierte Beschreibung findet sich im Anhang). Die Messstelle des NO_x -Sensors befindet sich ebenfalls im Abgasstrang, d.h. auch hier wirken die Abgasleitung und die Turbinen als Totzeitglied bzw. Tiefpassfilter, wenngleich der Einfluss der Messgasleitung hier entfällt (s. Tabelle 5.1).

	Totzeit [s]	T_{90} -Zeit [s]
NO_x-Analyzer MEXA	3,5	1,9
NO_x-Sensor	0,3	2,2

Tabelle 5.1: Totzeit und T_{90} -Zeit bei der NO_x -Messung

Im Rahmen einer Diplomarbeit [65] wurden bei MAN Versuche durchgeführt, den NO_x -Sensor näher an den Ort der Stickoxidbildung zu versetzen. Aufgrund der sehr hohen Abgasgedrücke beim hier verwendeten zweistufig aufgeladenen Motor und der großen Amplituden der Druckschwingungen wurde von einer Installation des NO_x -Sensors vor Turbine Abstand genommen. Untersucht wurde das Verhalten des Sensors bei einer Installation zwischen den Turbinen, wo sowohl der absolute Druck als auch die Druckamplituden deutlich geringer sind. Dadurch konnte eine Reduktion der Totzeit erreicht werden. Durch die im Vergleich zum Einbauort nach Turbine immer noch sehr hohen Drücke und Druckschwankungen wurde die Genauigkeit des Sensors trotz aufwendiger Druckkompensation negativ beeinflusst, weshalb in dieser Arbeit von dieser Einbaulage abgesehen wurde.

5.2.2 Sauerstoffmessung und Lambdabestimmung

Der Versuchsmotor besitzt bereits serienmäßig eine Lambdasonde LSU 4.9 der Firma Bosch. Damit wird der Sauerstoffgehalt im Abgas bestimmt und mittels Kennlinie in einen Lambdawert umgerechnet. Weitere Angaben zum Messprinzip finden sich im Anhang. Laut Herstellerangabe beträgt der relative Fehler $\pm 3 \%$ bei einem λ -Wert von 1,7 [76]. Eine Sensordrift soll verhindert werden, indem das λ -Signal während der Schubphasen auf Umgebungsluft kalibriert wird.

5.2.3 Luftmassenmessung

Zur Bestimmung des Luftmassenstroms, im Folgenden auch als Luftmasse bezeichnet, wird in dieser Arbeit ein Sensyflow Luftmassenmesser verwendet. Dieser arbeitet nach

dem Prinzip der Heißfilm-Anemometrie. Das Messprinzip beruht darauf, dass einem beheizten Körper durch das ihn umströmende Gas Wärme entzogen wird. Die strömungsabhängige Abkühlung wird als Messeffekt genutzt [77]. Der Massendurchflussmesser besitzt mit einer Messabweichung von $< \pm 1 \%$ eine sehr hohe Genauigkeit. Die Reproduzierbarkeit wird mit $\pm 0,25 \%$ angegeben [78].

5.2.4 Bestimmung der AGR-Rate

Neben der Luftmasse ist die AGR-Rate eine entscheidende Größe für die Stickoxidbildung. Am Prüfstand wird die AGR-Rate über die CO_2 -Methode bestimmt, d.h. die CO_2 -Konzentration wird im Ladeluftrohr und im Abgas gemessen. Aus den Konzentrationsverhältnissen kann über den Zusammenhang in Gleichung (5.1) auf die AGR-Rate geschlossen werden.

$$x_{AGR} = \frac{CO_{2,Ladeluft} - CO_{2,Umgebung}}{CO_{2,Abgas} - CO_{2,Umgebung}} \quad (5.1)$$

6 Das Stickoxidmodell

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Anforderungen an das Stickoxidmodell und die benötigten Grundlagen diskutiert. In diesem Kapitel wird das Vorgehen bei der Modellbildung erläutert und das erstellte Modell vorgestellt.

6.1 Modellauswahl

Zunächst soll anhand einer groben Betrachtung eine Vorauswahl des Modellansatzes getroffen werden. In Kapitel 4.3 wurden verschiedene Modellansätze vorgestellt.

Modelle aus der Kategorie 3D-CFD-Modelle und quasidimensionale Modelle scheiden für die Verwendung in dieser Arbeit von vorn herein aus, da sie deutlich zu rechenzeitintensiv sind. Wie in Kapitel 4.3 bereits erwähnt, können in dieser Arbeit aus demselben Grund auch keine Stickoxidmodelle mit detaillierter Reaktionskinetik verwendet werden. Nulldimensionale Ansätze bieten eine sehr hohe Rechengeschwindigkeit und bei geeigneter Wahl der Eingangsparameter einen hohen Grad der Modellgüte. Aufgrund der benötigten Eingangsgrößen, wie beispielsweise Brenn- oder Heizverlauf, ist die Verwendung nulldimensionaler Modelle im Rahmen dieser Arbeit allerdings ebenfalls nicht zielführend. Damit bleiben für die Stickoxidmodellierung noch die empirischen Ansätze, die im Folgenden näher betrachtet werden sollen.

Wie in Kapitel 4.4 bereits erläutert, kann die Klasse der empirischen Modelle nochmals in die Untergruppen

- Neuronale Netze
- Kennfeldbasierte Modelle
- Polynommodelle

untergliedert werden.

Neuronale Netze

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst die Abbildung der Stickoxidemission mittels neuronaler Netze untersucht. Zum Training der neuronalen Netze wurde ein kommerzielles Softwaretool verwendet. Um die notwendige große Datenbasis für das Training zu erhalten, wurde die Stickoxidemission mit Hilfe eines detaillierten Motormodells berechnet. Anschließend wurden auf Basis dieser Ergebnisse neuronale Netze zur Bestimmung der NO_x -Emission erstellt, wobei unterschiedliche Modelltypen getestet wurden. Die besten Ergebnisse konnten mit einem dreischichtigen Feed Forward Netz

mit 16 Neuronen erzielt werden. Damit war es möglich, den Modellausgang des Basismodells tendenziell nachzubilden, ein konstanter Offset zwischen dem Ergebnis des Basismodells und dem des neuronalen Netzes konnte allerdings nicht vermieden werden (s. NN-Modell 1 in Bild 6.1). Weiterhin schien das Ergebnis der neuronalen Netze stark von der Anfangsbedingung des Trainings abhängig zu sein. Um dieses Verhalten näher zu untersuchen, wurden für einen einzigen Eingangsdatensatz mehrere neuronale Netze mit identischen Trainingsparametern erzeugt. Die Trainingsergebnisse sind in Bild 6.1 (NN-Modell 1 bis NN-Modell 3) abgebildet.

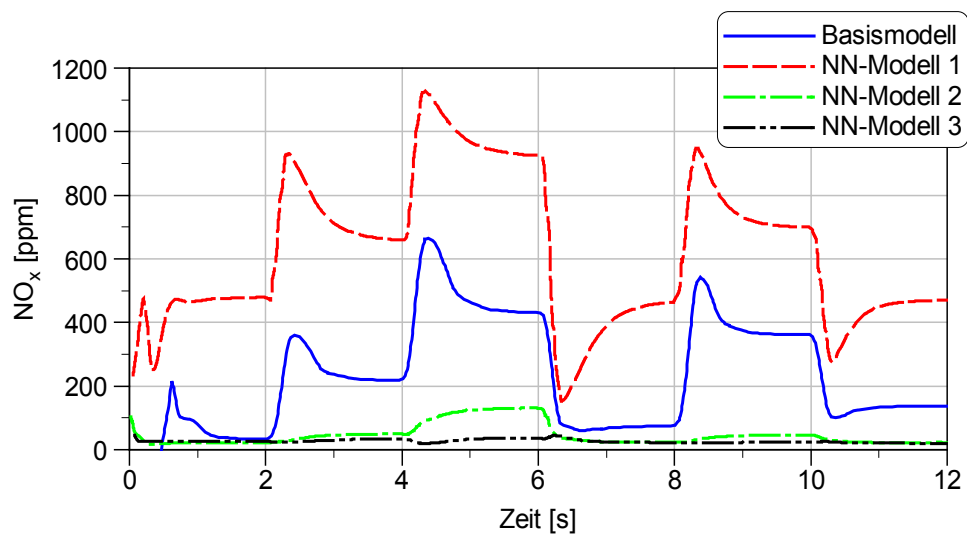


Bild 6.1: Ergebnisse der neuronalen Netze für die Berechnung der NO_x -Emission

Die Tatsache, dass bei absolut gleichen Trainingseinstellungen derart unterschiedliche Ergebnisse hervorgehen, belegt, dass wie schon in Abschnitt 4.4.2 angesprochen, der Startpunkt des Lernverfahrens einen entscheidenden Einfluss auf das Trainingsergebnis besitzt. Dies ist der einzige Parameter, der nicht eingestellt werden kann und vom Trainingsalgorithmus zufällig zu Beginn des Trainings neu gewählt wird. Da die neuronalen Netze nicht annähernd ein ähnliches Verhalten aufweisen, muss die Fehlerkurve einen sehr zerklüfteten Verlauf besitzen (vgl. Bild 4.5). Bei unterschiedlichen Startpositionen kommt der Trainingsalgorithmus demnach in unterschiedlichen Minima der Kurve zu liegen, wobei diese schließlich für die Güte der Ergebnisberechnung der neuronalen Netze verantwortlich sind [63].

Aufgrund der hier beschriebenen Schwierigkeiten und der damit verbundenen Unsicherheit bezüglich der Modellergebnisse wurde die Verwendung neuronaler Netze zur Stickoxidmodellierung im Rahmen dieser Arbeit verworfen.

Kennfeldbasierte Modelle

Kennfeldbasierte Modelle kommen heute schon in modernen Motorsteuerungen zum Einsatz. Wie oben bereits beschrieben, besitzt die kennfeldbasierte Modellierung zwei gravierende Nachteile. Zum einen ist die Zahl der Eingangsparameter beschränkt. Sollen mehrere Eingangsgrößen berücksichtigt werden, müssen diese mit Hilfe von Korrekturkennfeldern in das Modell eingebunden werden. Bei Modellen mit mehreren Eingangsgrößen führt diese Tatsache auf das zweite Problem, den extrem hohen Parametrierungsaufwand. Aus diesem Grund werden kennfeldbasierte Modelle in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Polynommodell

Nach Studium der Arbeit von Gärtner [43] lag es nahe, zunächst das von ihm vorgeschlagene Polynom zu untersuchen. Als Datenbasis wurde hierfür ein stationär vermessenes Motorkennfeld mit 137 Punkten herangezogen, um eine möglichst große Datenbasis zu haben und keine dynamischen Effekte beachten zu müssen.

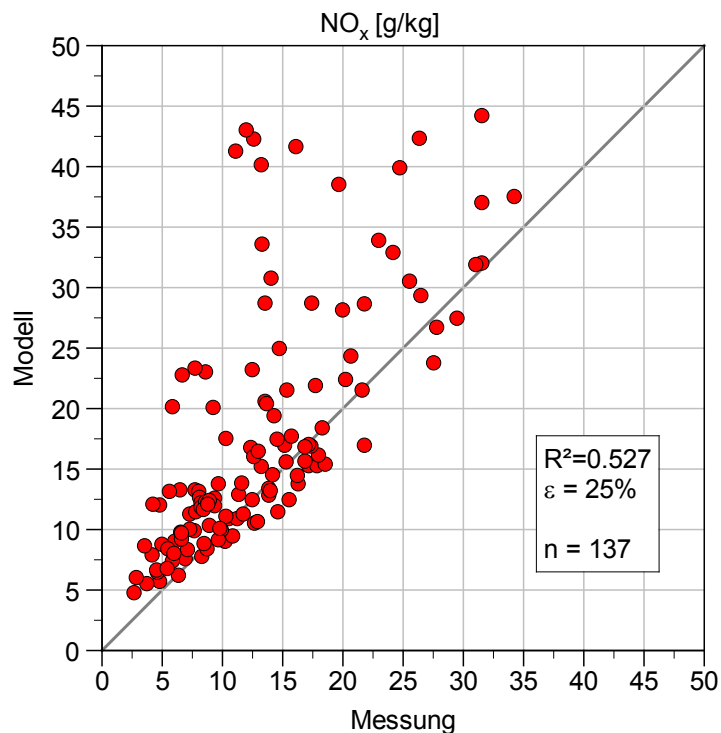


Bild 6.2: Modellierung der Stickoxidemission nach Gärtner (Parameter und Koeffizienten nach Gärtner)

Um eine Vergleichbarkeit der Stickoxidemission unterschiedlicher Motoren und Motorengrößen zu erhalten, bezieht Gärtner die NO_x-Emission auf die eingespritzte Kraftstoffmasse und verwendet die Einheit g NO_x / kg Kraftstoff. Diese Einheit wurde

für die hier dargestellten Tests beibehalten. Betrachtet man das Korrelationsdiagramm in Bild 6.2, so ist nur ein sehr schwacher Zusammenhang zu erkennen. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt lediglich $R^2 = 0,527$. Der mittlere relative Fehler kann mit ca. 25 % angegeben werden.

Ein Grund für die starken Abweichungen von Modell und Messung bei Verwendung des Ansatzes nach Gärtner kann die in den letzten Jahren stark veränderte Motortechnik sein. Gärtner hat in seiner Arbeit überwiegend Motoren mit mechanischen Einspritzsystemen (PLD-Systeme, Reihenpumpe) und im Vergleich zu heutigen Motoren schwacher Aufladung und niedrigen AGR-Raten untersucht. Der hier untersuchte Motor besitzt im Gegensatz dazu eine zweistufige Aufladung mit Ladedrücken bis 3,5 bar, ein Common Rail Einspritzsystem mit bis zu 1800 bar Einspritzdruck, wobei die Einspritzung in bis zu drei Teileinspritzungen unterteilt wird und eine gekühlte externe AGR mit Abgasrückführaten bis zu 35 %.

Im Weiteren wurden die Koeffizienten auf Basis eigener Prüfstandsuntersuchungen neu berechnet. Dadurch konnte eine Verbesserung erzielt werden (s. Bild 6.3).

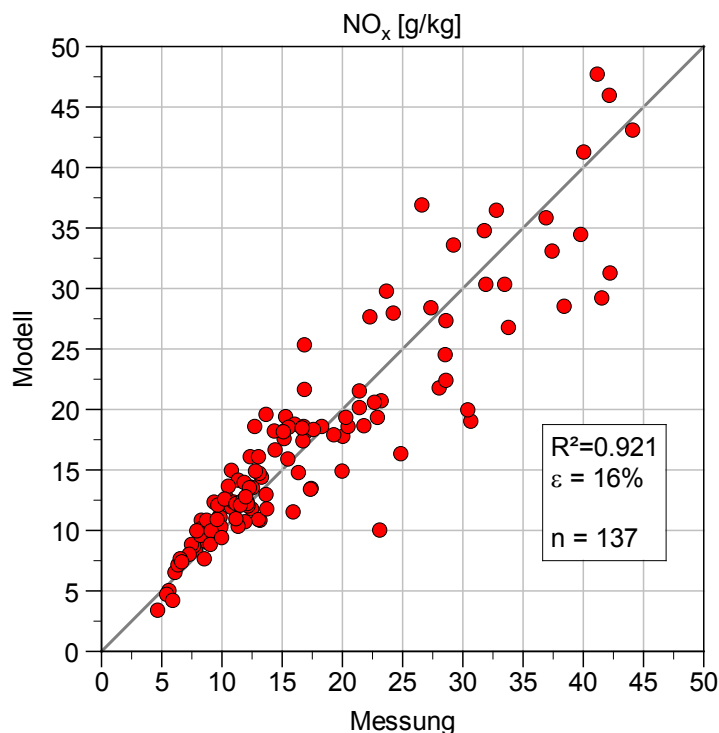


Bild 6.3: Modellierung der Stickoxidemission nach Gärtner mit neuen Koeffizienten

Mit dem angepassten Parametersatz konnte das Bestimmtheitsmaß auf $R^2 = 0,92$ gesteigert werden. Der mittlere relative Fehler wurde auf ca. 16 % reduziert. Durch

weitere Modifikationen, wie beispielsweise eine Normierung der Eingangsgrößen, sind weitere Verbesserungen der Modellgüte zu erwarten.

Allerdings ist auch der modifizierte Ansatz – wie in Kapitel 4.3 bereits erwähnt – für die Verwendung in der vorliegenden Arbeit ungeeignet, da er die Kenntnis des Verbrennungsschwerpunkts erfordert, der im realen Motorbetrieb nicht zur Verfügung steht. Um dieses Problem zu umgehen, beschreibt Gärtner in seiner Arbeit eine Möglichkeit, den Verbrennungsschwerpunkt aus Einspritzdaten näherungsweise zu bestimmen. Dieser Ansatz kann hier allerdings nicht verwendet werden, da sich Gärtner bei der Schwerpunktbestimmung lediglich auf Spritzbeginn und –dauer bezieht. Da die Einspritzung mit dem in dieser Arbeit verwendeten Einspritzsystem in bis zu fünf Teileinspritzungen aufgeteilt werden kann (in aktuellen Serienmotoren werden derzeit bis zu drei Teileinspritzungen verwendet), kann dieser Ansatz hier nicht verwendet werden. Damit ist das Schwerpunkt-Stickoxidmodell kein zielführender Ansatz, um die in dieser Arbeit geforderten Randbedingungen zu erfüllen.

Im Folgenden soll daher ein neuer Ansatz zur Berechnung der Stickoxidemission erarbeitet werden, der die in dieser Arbeit gestellten Anforderungen erfüllt.

6.2 Modellbildung

6.2.1 Vorüberlegung

Wie in Abschnitt 4.2 bereits erläutert, erfolgt die Stickoxidbildung über mehrere Bildungsmechanismen, wobei das über den Zeldovich-Mechanismus gebildete NO_x den mit Abstand größten Anteil an der motorischen Stickoxidemission ausmacht. Die anderen Mechanismen (Fenimore, Bildung aus Brennstoff-NO etc.) sollen im Weiteren vernachlässigt werden.

Betrachtet man die Reaktionsschritte des Zeldovich-Mechanismus, so lassen sich daraus erste Anhaltspunkte ableiten, welche Faktoren bei der Modellbildung berücksichtigt werden müssen.

Dies sind:

- Druck und Temperatur im Brennraum
- Sauerstoffpartialdruck im Brennraum
- Verweildauer der Ladung im Brennraum

Allerdings sind diese Parameter weder bei Untersuchungen am Motorenprüfstand noch im realen Motorbetrieb im Fahrzeug bekannt. Somit müssen zunächst Ersatzgrößen für die Reaktionsparameter gefunden werden.

Der Druck bzw. die Temperatur im Brennraum sind neben der Motorgeometrie (Verdichtungsverhältnis) in erster Linie abhängig vom Zustand und der Menge der Zylinderladung (Luft + AGR). Die Temperatur und der Druck im Ladeluftrohr sind sowohl am Prüfstand als auch im Fahrzeug bekannte Größen. Schwieriger ist die Bestimmung der Ladungsmasse. Beim Basismotor steht kein Luftmassenmesser zur Verfügung und die exakte Bestimmung der AGR-Rate gestaltet sich bereits am Prüfstand als schwierig. Hinzu kommt, dass die Verteilung des rückgeführten Abgases auf die einzelnen Zylinder nicht als homogen angesehen werden kann [79]. Der Sauerstoffgehalt des Arbeitsgases ist ebenfalls von der AGR-Rate abhängig. Die für die Reaktion zur Verfügung stehende Zeit, d.h. die Verweildauer der Ladung im Brennraum bei dem für die NO_x -Bildung relevanten Zustand, ist in erster Linie abhängig von der Drehzahl.

6.2.2 Untersuchung der möglichen Eingangsgrößen

Wie aus den Vorüberlegungen hervorgeht, ist für die Stickoxidentstehung lediglich der Zustand im Zylinder interessant. Aus diesem Grund wurde versucht, die identifizierten Größen wie Zylindermasse oder Sauerstoffmasse im Zylinder, analog zum Ansatz von Gärtner, soweit möglich direkt als Modelleingangsgrößen vorzugeben und diese nicht mit Hilfe weiterer „Ersatzgrößen“ wie Druck im Ladeluftrohr, AGR-Rate, angesaugte Luftmasse oder Lambda im Abgas zu umschreiben.

Damit können folgende potentielle Modelleingangsgrößen abgeleitet werden, die im Weiteren genauer untersucht werden sollen. Es sind dies:

- Drehzahl
- Eingespritzte Kraftstoffmenge
- Kraftstoffeinspritzung
- Raildruck
- Masse im Zylinder bei „Einlass schließt“
- Sauerstoffmasse im Zylinder bei „Einlass schließt“

Eine weitere Größe, die die Stickoxidbildung entscheidend beeinflussen kann, ist die Temperatur im Zylinder bei „Einlass schließt“. Diese ist allerdings messtechnisch nur sehr schwer zu erfassen. Stellvertretend wird hierfür die Temperatur im Ladeluftrohr herangezogen. Neben der Temperatur im Ladeluftrohr ist die Ladungstemperatur noch von einer Reihe anderer Größen, wie beispielsweise dem Wärmeübergang in den Einlasskanälen oder vom Wandwärmeübergang im Zylinder während der Kompressionsphase, abhängig. Um diesen Einfluss beurteilen zu können, wird stellvertretend für die Zylinderwand- bzw. Einlasskanaltemperatur der Einfluss der Kühlwasser-

temperatur untersucht. Außerdem ist aus der Literatur bekannt, dass die Feuchte der Ansaugluft einen signifikanten Einfluss auf die Stickoxidemission hat. Die Luftfeuchte konnte im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht variiert werden und wird daher gesondert betrachtet.

Somit ergeben sich zwei weitere potentielle Modelleingangsgrößen, die im Rahmen der Prüfstandsversuche untersucht werden:

- Temperatur im Ladeluftrohr
- Kühlwassertemperatur

Um den Einfluss der potentiellen Modelleingangsgrößen genauer beurteilen zu können, wurden diese zunächst am Versuchsmotor variiert. Für die Untersuchung der Parameter wurden vier Betriebspunkte bestimmt (siehe Tabelle 6.1).

Betriebspunkt:	Drehzahl [min^{-1}]	Last [%]
1	1200	100 %
2	1500	50 %
3	1500	75 %
4	1800	50 %

Tabelle 6.1: Betriebspunkte für Parametervariation

6.2.2.1 Einspritzung

Spritzbeginn

Die große Zahl an Freiheitsgraden bei modernen Common-Rail-Einspritzsystemen, wie beispielsweise die freie Wahl des Einspritzbeginns oder die Wahl von Vor- und/oder Nacheinspritzungen, machen eine einfache Beschreibung des Einspritzverlaufs über einen einzigen Parameter wie z.B. Spritzbeginn schwierig (Bild 6.4).

Um die Einflüsse von Beginn und Dauer der (Teil-)Einspritzungen zusammenfassen zu können, wird der Schwerpunkt der Einspritzung (ESP) als neue Größe eingeführt.

Der Einspritzschwerpunkt wird wie folgt definiert:

$$ESP = \frac{\sum(SP_i \cdot Q_i)}{\sum Q_i} \quad (6.1)$$

mit

SP_i Schwerpunkt der Teileinspritzung mit $i=P1,MI,M2$

Q_i Einspritzmenge der Teileinspritzung mit $i=P1,MI,M2$

Die Schwerpunkte der Teileinspritzungen errechnen sich zu

$$SP_i = BI_i + \frac{DI_i}{2} \tag{6.2}$$

mit

BI_i Beginn der Teileinspritzung mit $i=P1,MI,M2$

DI_i Einspritzdauer der Teileinspritzung mit $i=P1,MI,M2$

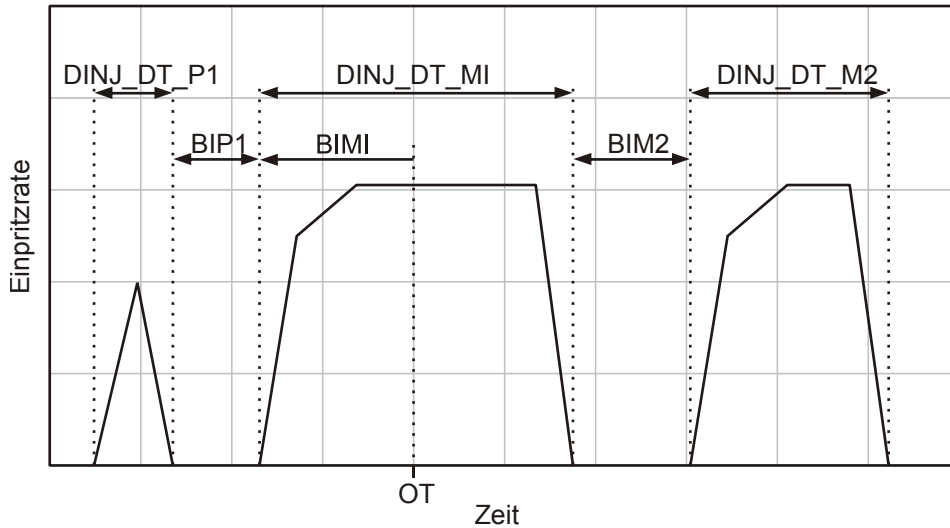


Bild 6.4: Einspritzparameter

Durch die Gewichtung der Schwerpunkte der Teileinspritzungen mit den jeweiligen Einspritzmengen fällt der Einfluss des Spritzbeginns der Haupteinspritzung mit Abstand am größten aus. Der Einfluss der Voreinspritzung wird aufgrund der geringen Voreinspritzmenge kaum beachtet.

Um die Einflüsse der einzelnen Einspritzparameter beurteilen zu können wurden die Parameter getrennt variiert. Als erstes wurde der Einfluss des Spritzbeginns der Haupteinspritzung auf die Stickoxidbildung untersucht. Da die Vor- und Nacheinspritzung beim verwendeten Einspritzsystem relativ zur Haupteinspritzung angegeben werden, ergibt sich bei der Variation des Beginns der Haupteinspritzung eine Verschiebung der gesamten Einspritzung (s. Bild 6.5) und damit des Einspritzschwerpunkts.

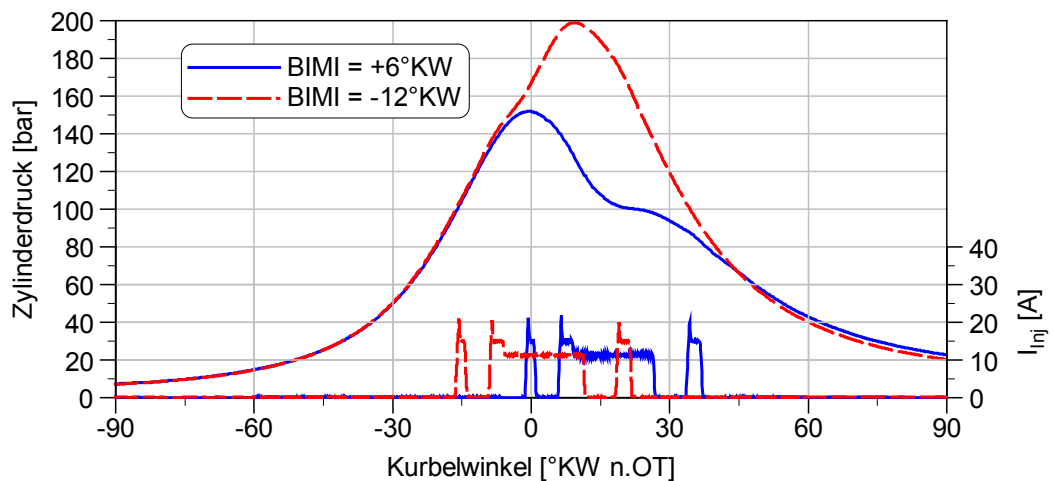


Bild 6.5: Druckverlauf und Injektorbestromung - Spritzbeginnvariation

In Bild 6.6 ist die Stickoxidemission in Abhängigkeit des Einspritzbeginns der Haupteinspritzung dargestellt. Die Abhängigkeit der NO_x -Emission vom Spritzbeginn lässt sich mit einem Polynom 2. Ordnung gut wiedergeben.

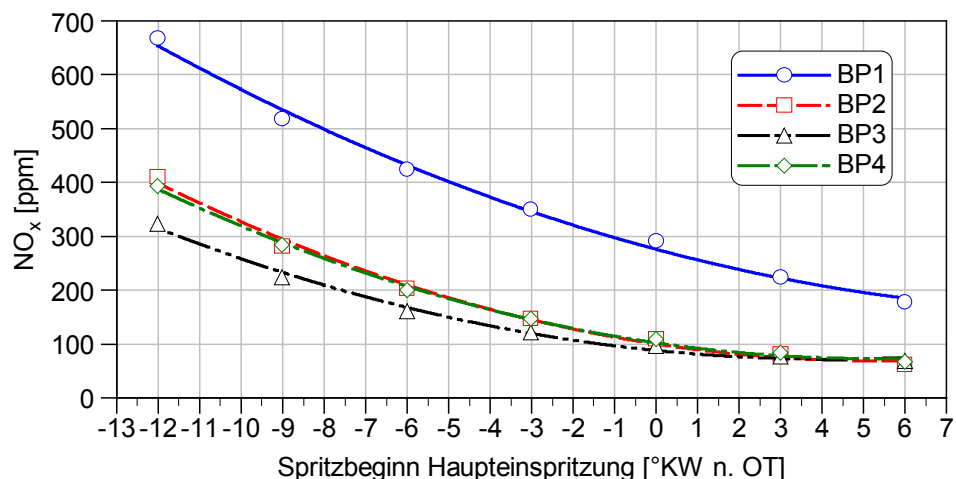


Bild 6.6: Spritzbeginnvariation

Der Beginn der Haupteinspritzung hat, wie erwartet, einen sehr großen Einfluss auf die Stickoxidemission. Wird der Spritzbeginn nach spät verschoben, fällt die Stickoxidemission deutlich ab, was durch die Verschiebung des Verbrennungsschwerpunktes nach spät und die damit einhergehende Verringerung des Zylinderspitzen drucks bzw. der Spitzentemperatur zu erklären ist (Bild 6.5).

Voreinspritzung

Um den Einfluss der geteilten Einspritzung beurteilen zu können, wurden ESC-Prüfläufe mit und ohne Vor- bzw. Nacheinspritzung durchgeführt. In Bild 6.7 ist die NO_x-Emission in den ESC-Punkten mit und ohne Voreinspritzung bzw. deren relative Änderung dargestellt. Der Leerlaufpunkt (ESC-Betriebspunkt 1) wird nicht betrachtet, da dieser aufgrund des extrem niedrigen Abgasmassenstroms sehr hohe Messfehler aufweist.

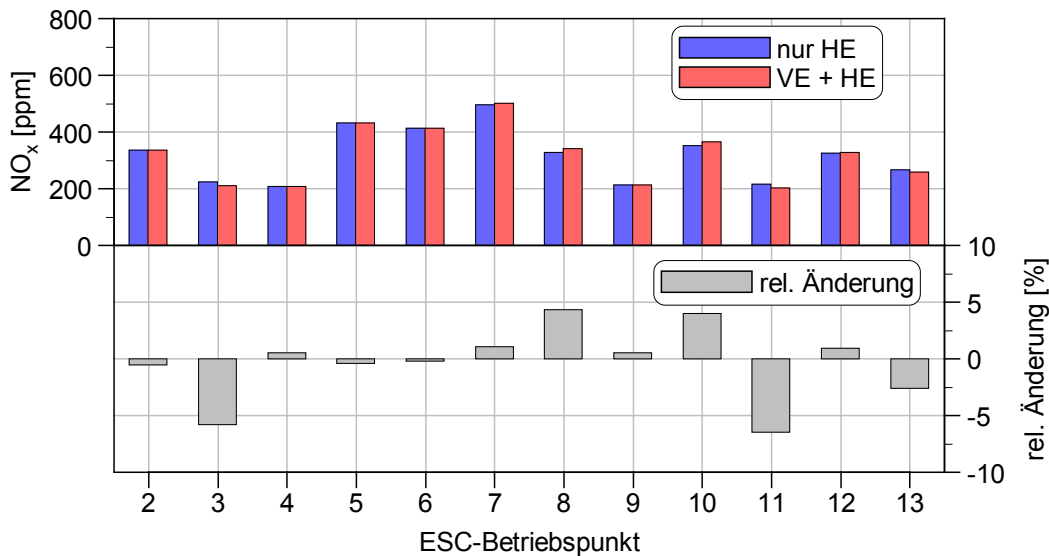


Bild 6.7: NO_x-Emission im ESC mit und ohne Voreinspritzung

Im Gegensatz zu Brennverfahren ohne AGR (vgl. [80]) ist deutlich zu erkennen, dass die Voreinspritzung hier keinen signifikanten Einfluss auf die Stickoxidemission hat. Dies kann, wie der Einfluss der Einspritzverlaufsformung (s. Seite 15), auf die hier gefahrenen hohen AGR-Raten zurückgeführt werden.

Bild 6.8 zeigt dazu einen indizierten Druckverlauf im ESC-Betriebspunkt 2 ($n = 1200 \text{ min}^{-1}$, $\alpha = 100 \%$). Im unteren Teil des Bildes sind die Verläufe der Injektorbestromung aufgetragen. Die Druckverläufe unterscheiden sich lediglich durch den früheren Beginn der Verbrennung bei applizierter Voreinspritzung und damit durch einen etwas höheren Spitzendruck. Durch die etwas kürzere Haupteinspritzung sinkt der Zylinderdruck bei applizierter Voreinspritzung bereits 20°KW nach OT wieder auf den Wert ohne Voreinspritzung. Damit kann der Einfluss der Voreinspritzung auf die Stickoxidbildung vernachlässigt werden.

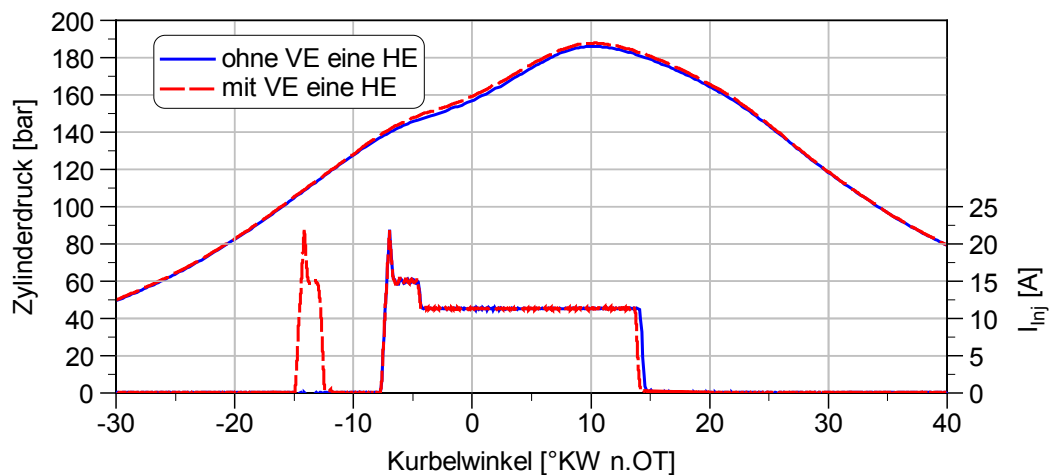


Bild 6.8: Druckverlauf und Injektorbestromung - ohne geteilte Haupteinspritzung mit und ohne Voreinspritzung

Geteilte Haupteinspritzung

In Bild 6.9 ist die Stickoxidemission bzw. deren Änderung durch die Applikation einer geteilten Haupteinspritzungen dargestellt. Auch hier wurden wieder die 12 ESC-Punkte (ohne Leerlauf) untersucht.

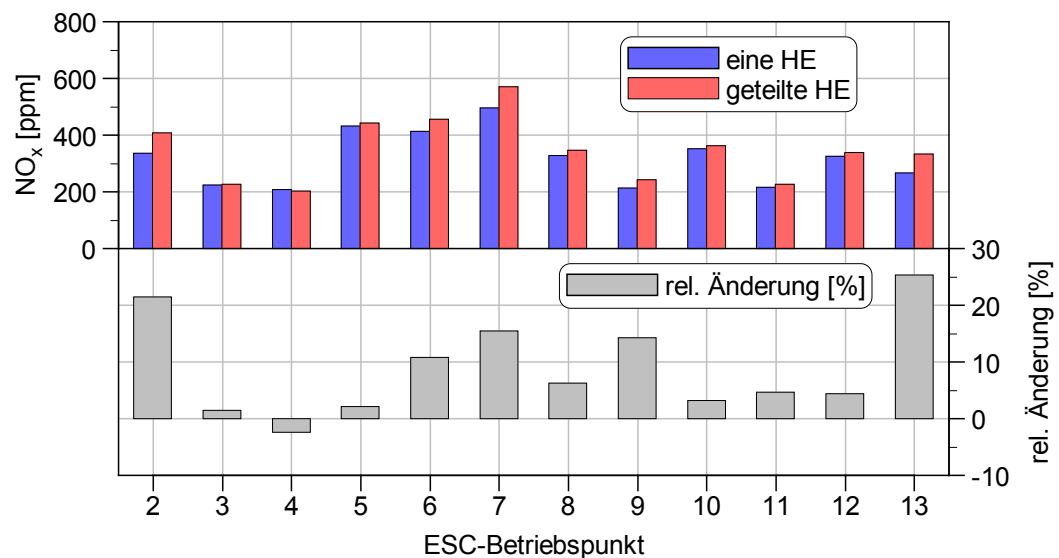


Bild 6.9: NO_x -Emission im ESC mit und ohne geteilte Haupteinspritzung

Eine zweite Haupteinspritzung wirkt sich in einigen Betriebspunkten stark stickoxidsteigernd aus. Eine mögliche Erklärung ist, dass der für die Stickoxidbildung notwendige hohe Temperaturbereich länger erhalten bleibt und sich dadurch mehr Stickoxid bildet. Außerdem wird die Hauptverbrennung durch die Applikation einer geteilten Haupteinspritzung ebenfalls unterteilt. Der zweite Teil der Verbrennung beginnt bei

deutlich höheren Temperaturen als der erste Teil, was die Stickoxidbildung ebenfalls verstärkt. Darüber hinaus wird die Durchmischung im Brennraum durch die Unterbrechung der Einspritzung verbessert, was wiederum höhere Verbrennungsluftverhältnisse in den Reaktionszonen und damit eine bessere Verbrennung mit höheren Temperaturen und verstärkter NO_x -Bildung mit sich bringt.

Zusätzlich sind in Bild 6.10 indizierte Zylinderdruckverläufe mit und ohne geteilte Haupteinspritzung dargestellt. Im unteren Teil des Bildes sind wieder die Verläufe der Injektorbestromung aufgetragen. Betrachtet wird auch hier wieder exemplarisch der ESC-Betriebspunkt 2 ($n = 1200 \text{ min}^{-1}$, $\alpha = 100 \%$). Gut zu erkennen ist die etwas stärker ansteigende Verdichtungskurve, was auf eine höhere Zylinderfüllung hindeutet.

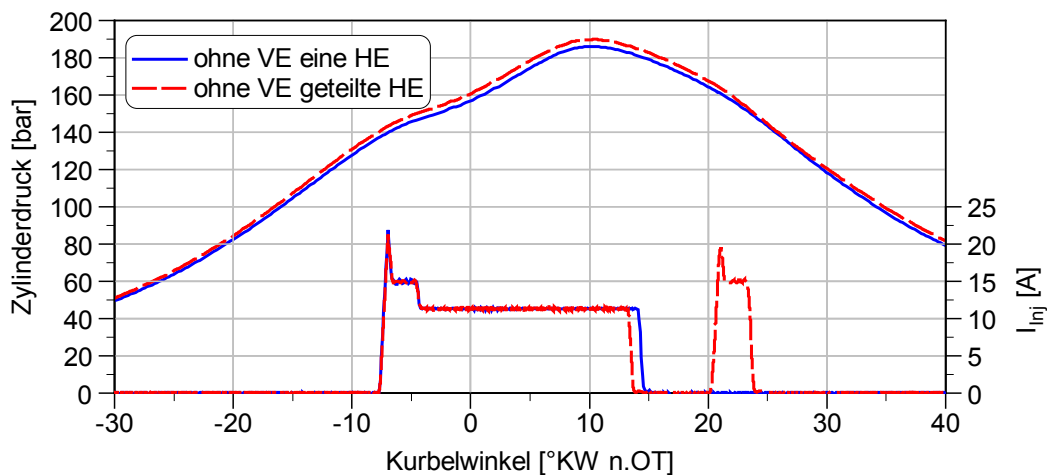


Bild 6.10: Druckverlauf und Injektorbestromung - ohne VE, mit und ohne geteilte Haupteinspritzung

Diese kann durch die nach hinten verlängerte Verbrennung erklärt werden, was zu einer Erhöhung der Abgasenthalpie und damit über eine höhere Turboladerleistung zu mehr Ladedruck führt. Um den Einfluss einer geteilten Haupteinspritzung auf die Stickoxidemission unabhängig von diesem Phänomen untersuchen zu können, wären weitere Untersuchungen wünschenswert. Hierfür würde sich besonders ein fremd aufgeladenes Einzylinderaggregat eignen, da hier die Einflüsse von Abgasgegendruck und Ladedruck unabhängig voneinander untersucht werden könnten. Die Änderung der NO_x -Emission durch eine Teilung der Haupteinspritzung kann bis zu 20 % betragen und muss damit bei der Modellierung berücksichtigt werden.

Durch die Applikation einer geteilten Haupteinspritzung ergeben sich zwei weitere Freiheitsgrade, der Abstand und die Massenaufteilung zwischen erster und zweiter Haupteinspritzung, die im Folgenden noch untersucht werden sollen. Hierzu wurde

zunächst der Abstand zwischen den beiden Teileinspritzungen zwischen $1000\ \mu\text{s}$ und $2000\ \mu\text{s}$ variiert. Wie in Bild 6.11 zu sehen, hat der Abstand zwischen erster und zweiter Haupteinspritzung keinen signifikanten Einfluss auf die Stickoxidemission.

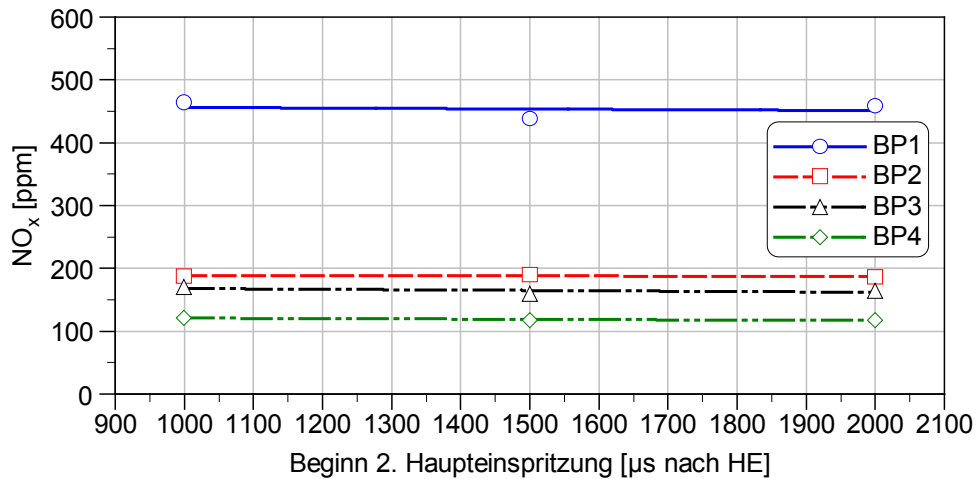


Bild 6.11: Variation des Beginns der 2. Haupteinspritzung

Um den Einfluss der Massenaufteilung zwischen den beiden Teileinspritzungen beurteilen zu können, wurde eine weitere Versuchsreihe durchgeführt.

Bild 6.12 zeigt die Ergebnisse der Variation der Dauer der zweiten Haupteinspritzung. Die Änderung der Einspritzdauer konnte nur in dem Bereich durchgeführt werden, in dem auch die normal applizierten Werte der Dauer der zweiten Haupteinspritzung liegen. Außerhalb dieser Bereiche sind die Injektorkennfelder nicht ausgelegt, was zu einer Verfälschung der eingespritzten Kraftstoffmenge führt. Um den Variationsbereich zu erweitern, wäre zusätzlicher Applikationsaufwand erforderlich.

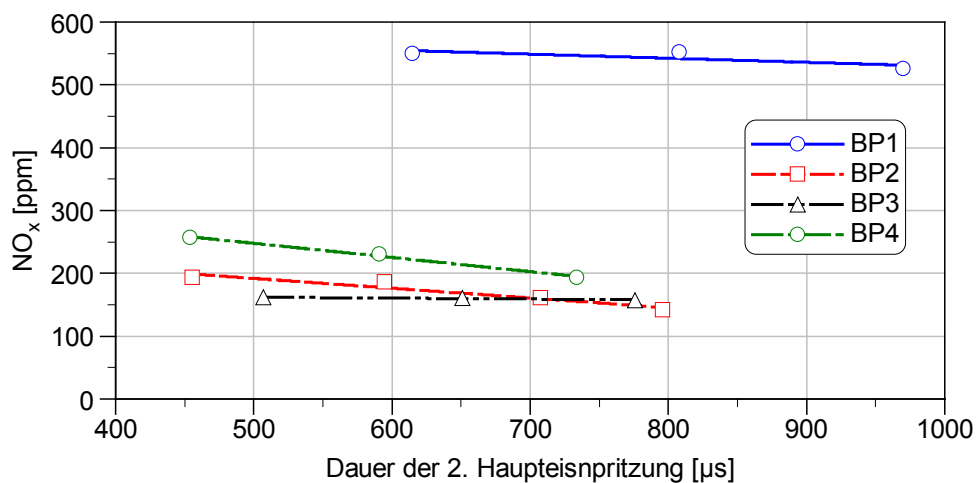


Bild 6.12: Variation der Dauer der 2. Haupteinspritzung

Im untersuchten Bereich zeigen sich Abhängigkeiten von der Motorlast. Bei den eher schwachlastigen Betriebspunkten BP2 und BP4 ist ein Einfluss der Dauer der zweiten Haupteinspritzung auf die NO_x -Emission zu erkennen. In beiden Betriebspunkten nimmt die Stickoxidemission bei einer Verlängerung der zweiten Haupteinspritzung um bis zu 25 % ab. Bei den höherlastigen Betriebspunkten (BP1 und BP3) ist dagegen kein bzw. nur ein sehr geringer Einfluss der Einspritzdauer der zweiten Haupteinspritzung auf die NO_x -Emission auszumachen.

Damit kann festgehalten werden, dass die Applikation einer geteilten Haupteinspritzung einen signifikanten Einfluss auf die Stickoxidbildung hat. Hierbei hat die Kraftstoffaufteilung auf die beiden Haupteinspritzungen einen deutlich größeren Einfluss auf die Emissionen als der Abstand der Einspritzungen zueinander. Die Applikation einer Voreinspritzung und der Abstand zwischen erster und zweiter Haupteinspritzung sind dagegen für die Stickoxidbildung nicht relevant. Durch die Umverteilung der Kraftstoffmasse von der ersten zur zweiten Haupteinspritzung verschiebt sich auch der Einspritzschwerpunkt (s. Gleichung (6.1)) nach spät. Damit findet dieses Phänomen bereits Beachtung und braucht nicht separat modelliert zu werden.

6.2.2.2 Raildruck

Als nächster potentieller Parameter wurde der Raildruck untersucht. In Bild 6.13 ist zu erkennen, dass eine Erhöhung des Raildruckes zu einer Erhöhung der Stickoxidemission führt. Der Zusammenhang ist dabei näherungsweise linear.

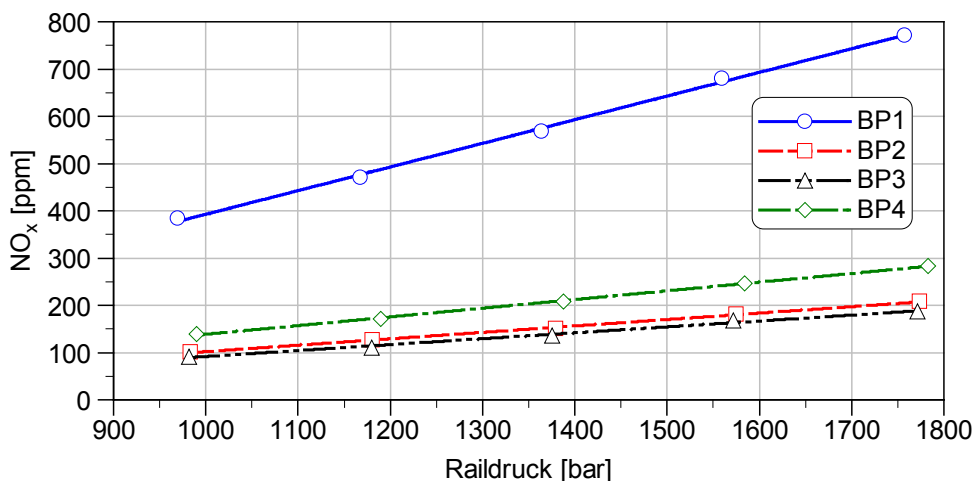


Bild 6.13: Raildruckvariation

Dieser Effekt kann dadurch erklärt werden, dass die Gemischaufbereitung im Zylinder durch eine Erhöhung des Einspritzdrucks deutlich schneller abläuft. Der bei höherem Druck eingespritzte Kraftstoff wird zum einen feiner zerstäubt, zum anderen hat der

Einspritzstrahl eine höhere Geschwindigkeit und damit einen höheren Impuls, wodurch die Vermischung mit der Luft im Brennraum verbessert wird.

Als weiterer Aspekt ist bei der Raildruckvariation zu beachten, dass sich durch eine Erhöhung des Einspritzdrucks bei gleicher Einspritzdüse die Einspritzdauer verkürzt (s. Bild 6.14). Damit verschiebt sich der Einspritzschwerpunkt nach früh, was die Stickoxidbildung ebenfalls ansteigen lässt.

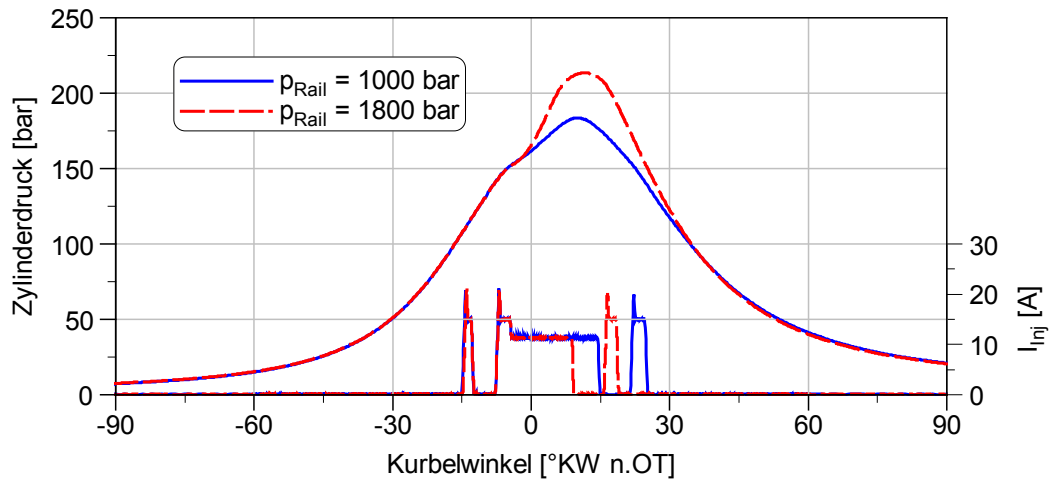


Bild 6.14: Druckverlauf und Injektorbestromung - Raildruckvariation

6.2.2.3 Ladungsmasse

Als nächstes soll der Einfluss der Ladungsmasse bei Einlass schließt untersucht werden. Um eine Beeinflussung der Untersuchung durch die AGR-Rate zu vermeiden, wurden diese Messungen zunächst ohne AGR durchgeführt.

Der Luftaufwand λ_a beschreibt den Zusammenhang zwischen theoretischer Luftmasse und tatsächlicher Luftmasse im Zylinder.

$$\lambda_a = \frac{m_{Luft}}{m_{Luft,theo.}} = \frac{m_{Luft}}{\rho \cdot V_H} \tag{6.3}$$

- m_{Luft} Luftmasse pro Arbeitsspiel
- $m_{Luft,theo.}$ theoretische Luftmasse pro Arbeitsspiel
- ρ Dichte der angesaugten Luft
- V_H Hubvolumen

Betrachtet man die Luft als ideales Gas, so gilt weiter

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T} \tag{6.4}$$

R allgemeine Gaskonstante

p Druck

T Temperatur

und damit

$$\lambda_a = \frac{m_{Luft}}{p} \cdot \frac{R \cdot T}{V_H} \tag{6.5}$$

bzw.

$$p = \frac{R \cdot T}{V_H \cdot \lambda_a} \cdot m_{Luft} \tag{6.6}$$

Damit ist der Zusammenhang zwischen Luftmasse und Ladedruck hergestellt. Bild 6.15 zeigt den Zusammenhang zwischen Ladungsmasse und Ladedruck bei abgeschalteter AGR. Da der verwendete Forschungsmotor nicht über einen variablen Ventiltrieb verfügt, ist der Luftaufwand näherungsweise konstant. Damit ist die Zylindermasse in allen Betriebspunkten, wie erwartet, näherungsweise linear vom Ladedruck abhängig. Im Weiteren wird deshalb als unabhängige Variable der Ladedruck anstatt der Ladungsmasse verwendet.

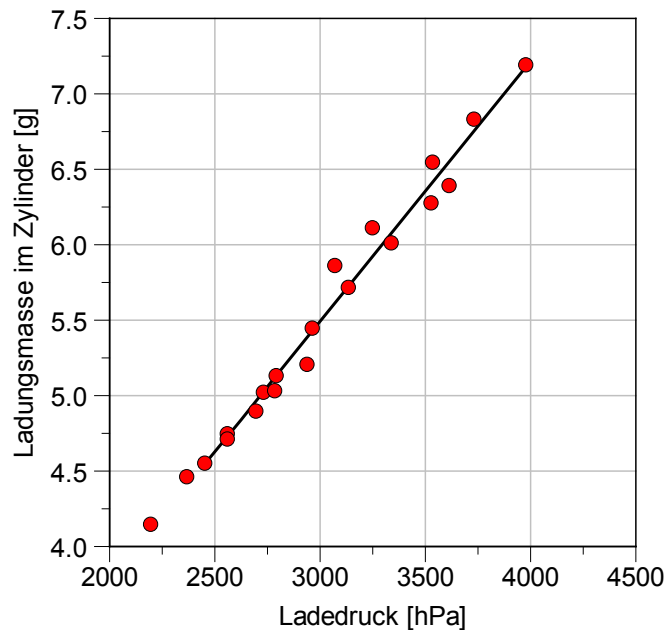


Bild 6.15: Zusammenhang von Zylindermasse und Ladedruck - ohne AGR

Bisher wurde die Stickoxidemission stets als Konzentration in ppm gemessen. Damit ändert sich bei der Variation der Ladungsmasse bzw. des Ladedrucks auch der Abgasmassenstrom und damit die Bezugsgröße für die Konzentrationsangabe. Um dennoch eine Aussage über den Einfluss auf die NO_x -Emission treffen zu können, muss hier die absolute Stickoxidemission betrachtet werden.

Betrachtet man die absolut gebildete Stickoxidmenge in Bild 6.16, so fällt auf, dass die Zylinderfüllung einen eher geringen Einfluss auf die Stickoxidbildung hat. Dies wurde so nicht erwartet. Durch die Erhöhung des Ladedrucks wird der Sauerstoffpartialdruck im Brennraum erhöht. Da in den oben gezeigten Versuchen keine externe AGR appliziert war, ist der Anstieg des Sauerstoffpartialdrucks proportional zur Ladedrucksteigerung. Eine mögliche Erklärung ist, dass sich zum einen durch die größere Zylinderladung ein höherer Zylinderspitzenruck sowie ein höherer Sauerstoffpartialdruck im Brennraum ergibt, was die NO_x -Bildung fördert. Zum anderen bewirkt die größere Masse im Brennraum aber auch einen Kühlungseffekt, was der Stickoxidbildung entgegenwirkt.

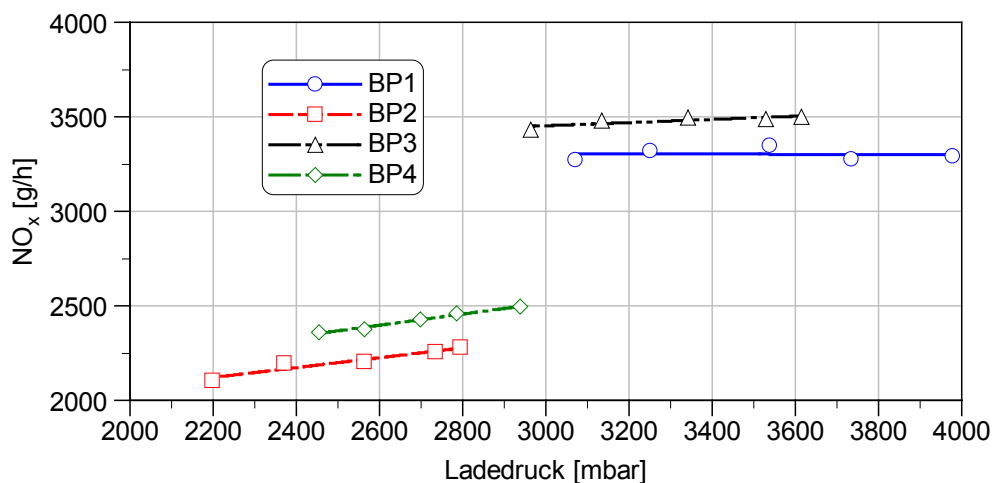


Bild 6.16: Ladedruckvariation ohne AGR

Da der in dieser Arbeit verwendete Motor für den Betrieb mit Abgasrückführung ausgelegt ist, soll an dieser Stelle noch die Wirkung der Ladungsmasse bei vorhandener, externer AGR untersucht werden. Hierbei wurde die AGR-Rate so weit wie möglich konstant gehalten. Die Ergebnisse sind in Bild 6.17 dargestellt. Auf Betriebspunkt 1 muss an dieser Stelle leider verzichtet werden, da die AGR-Rate bei variiertem Ladedruck nicht konstant gehalten werden konnte.

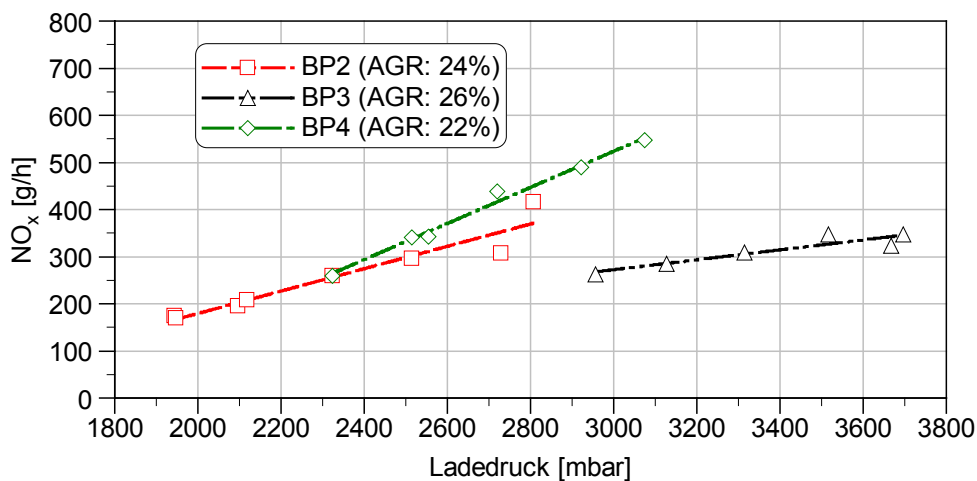


Bild 6.17: Ladedruckvariation bei konstanter AGR-Rate

Die Betriebspunkte 2 bis 4 zeigen durchweg das erwartete Verhalten. Bei einer Ladedrucksteigerung erhöht sich die Stickoxidemission ebenfalls. Das im Vergleich zur Ladedruckvariation ohne Abgasrückführung deutlich geänderte Verhalten lässt sich durch den verstärkten Einfluss des Sauerstoffpartialdrucks im Brennraum erklären. Die Stickoxidemission steigt dabei proportional zur Erhöhung des Ladedrucks an.

Bei den Versuchen wird bei einer Steigerung des Ladedrucks der Sauerstoffpartialdruck proportional zur Ladungsmasse erhöht, d.h. im Brennraum ist stets ausreichend Sauerstoff für eine schnelle Verbrennung mit hohen Temperaturen vorhanden, was die Stickoxidemission begünstigt. Bei vorhandener AGR übersteigt die Wirkung des gesteigerten Sauerstoffpartialdrucks im Zylinder die kühlende Wirkung der größeren Ladungsmasse deutlich, wodurch die Stickoxidbildung ansteigt. Die Ladungsmasse ist demnach eine wichtige Eingangsgröße für die NO_x -Modellierung.

6.2.2.4 Sauerstoffmasse im Zylinder

In einer weiteren Versuchsreihe soll der Einfluss der Sauerstoffmasse im Zylinder auf die NO_x -Bildung untersucht werden. Da diese Größe am Prüfstand nicht oder nur mit immensem Aufwand zu erfassen ist, wurde stattdessen die AGR-Rate als unabhängige Größe zur Variation herangezogen. Um eine Verfälschung der Ergebnisse zu vermeiden, wurde der Ladedruck dabei konstant gehalten. In Bild 6.18 sind die Verläufe der Stickoxidemission dieser Versuche dargestellt.

Auch hier zeigt sich das erwartete Ergebnis. Mit steigender AGR-Rate ergeben sich fallende Stickoxidemissionen. Da bei diesen Versuchen, wie bereits erwähnt, der Ladedruck und damit die Zylinderfüllung näherungsweise konstant gehalten wurden, kann die Stickoxidabnahme eindeutig auf die Verringerung des Sauerstoffpartialdrucks bzw.

der Sauerstoffmasse im Brennraum zurückgeführt werden. Der Zusammenhang zwischen AGR-Rate und NO_x -Emission kann näherungsweise als quadratisch angenommen werden.

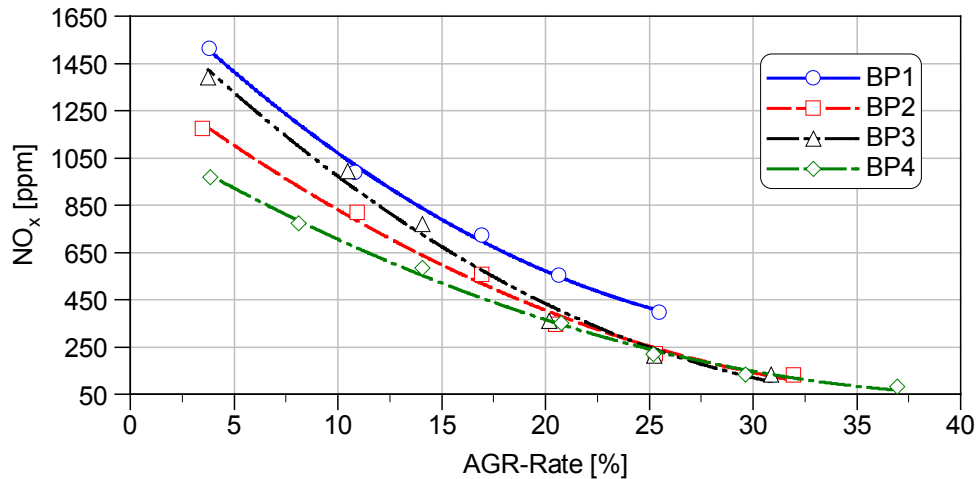


Bild 6.18: AGR-Variation bei konstantem Ladedruck

6.2.2.5 Umgebungsbedingungen

Um Erkenntnisse über den Einfluss der Zylindertemperatur auf die NO_x -Emission gewinnen zu können, wurden im Weiteren noch die Kühlwasser- und die Ladelufttemperatur des Versuchsmotors variiert.

Kühlwassertemperatur

In Bild 6.19 ist die Variation der Kühlwassertemperatur dargestellt.

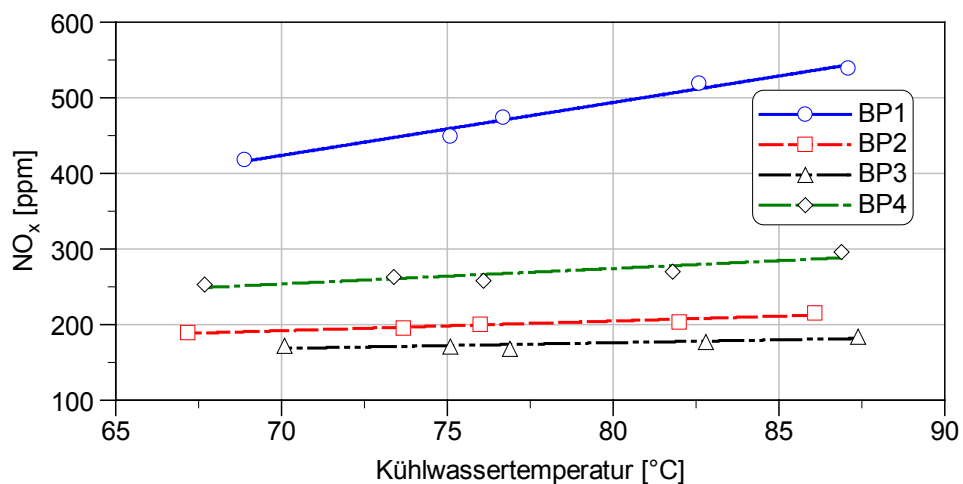


Bild 6.19: Kühlwassertemperaturvariation

Hier fällt auf, dass die Kühlwassertemperatur in Betriebspunkt 1 einen deutlich größeren Einfluss auf die Stickoxidemission hat als bei den anderen drei Betriebspunkten. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass es sich bei BP1 um einen Volllastpunkt mit niedriger Drehzahl handelt. Zum einen ergeben sich bei Volllast deutlich höhere Temperaturen im Brennraum, die über das Kühlwasser abtransportiert werden müssen, zum anderen besitzt die Brennraumwandtemperatur bei niedrigen Drehzahlen aufgrund der längeren Verweilzeit des Arbeitsgases im Brennraum einen größeren Einfluss auf die Ladungstemperatur. In den übrigen Betriebspunkten ist lediglich ein leichter Einfluss der Kühlwassertemperatur auf die NO_x -Emission zu erkennen. Um das Modell möglichst einfach zu halten, wird dieser Einfluss nicht modelliert. Allerdings wird die Kühlwassertemperatur überwacht. Beim Überschreiten festgelegter Grenzwerte sollte eine Korrektur der errechneten Stickoxidemission erfolgen.

Ladelufttemperatur

In einer weiteren Variation wurde der Einfluss der Ladelufttemperatur auf die Stickoxidbildung untersucht. Bild 6.20 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchung.

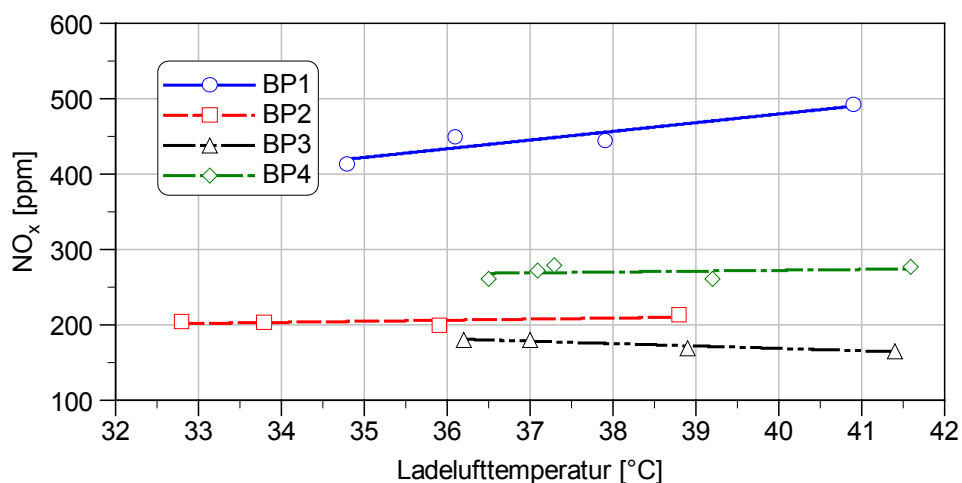


Bild 6.20: Ladelufttemperaturvariation

Der Versuchsmotor ist serienmäßig mit zwei wassergekühlten Ladeluftkühlern ausgestattet (siehe dazu das Motorenschema Abschnitt 5.1). Das Kühlwasser für die beiden Ladeluftkühler wird dazu vom Hauptkühlmittelkreislauf abgezweigt und mittels eines zweiten Wärmetauschers auf die benötigte, tiefe Temperatur von etwa 35 °C heruntergekühlt. Mit diesem Aufbau ist es möglich, die für die Ladeluftkühler benötigten, sehr niedrigen Kühlmitteltemperaturen, unabhängig vom Einbauort des Motors, zu realisieren. Die nominelle Ladelufttemperatur des Versuchsmotors liegt über den gesamten Betriebsbereich bei ca. 35 ° – 40 °C. Bedingt durch den Prüfstandsaufbau

war eine Drosselung des Kühlwasserstroms durch die Ladeluftkühler leider nicht möglich. Andererseits konnte die Kühlwassertemperatur am Eintritt der Ladeluftkühler nicht unter 30 °C abgesenkt werden. Deshalb konnte bei der Ladelufttemperaturvariation lediglich eine leichte Absenkung der Ladelufttemperatur durchgeführt werden.

Wie in Bild 6.20 zu erkennen, haben die hier untersuchten geringen Temperaturunterschiede keinen signifikanten Einfluss auf die Stickoxidemission. Infolgedessen wird die Ladelufttemperatur analog zur Kühlwassertemperatur behandelt. Sie wird bei der Modellierung nicht berücksichtigt, muss aber während des Motorbetriebes überwacht werden.

Luftfeuchte

Die Luftfeuchte hat, wie oben bereits erwähnt, einen signifikanten Einfluss auf die Stickoxidbildung (siehe dazu beispielsweise [81]). Sie konnte jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden, da am Prüfstand keine Variation der Feuchte der Ansaugluft möglich war. In den gesetzlich vorgeschriebenen Prüf- und Abnahmevorschriften [82] für Verbrennungsmotoren ist die Luftfeuchtigkeit der Ansaugluft als Einflussgröße auf die NO_x -Emission aufgeführt und muss mit einer Korrekturformel auf Normbedingungen umgerechnet werden. Hierzu wird ein linearer Zusammenhang zwischen Feuchte der angesaugten Luft und der Änderung der NO_x -Emission zugrunde gelegt (s. Bild 6.21).

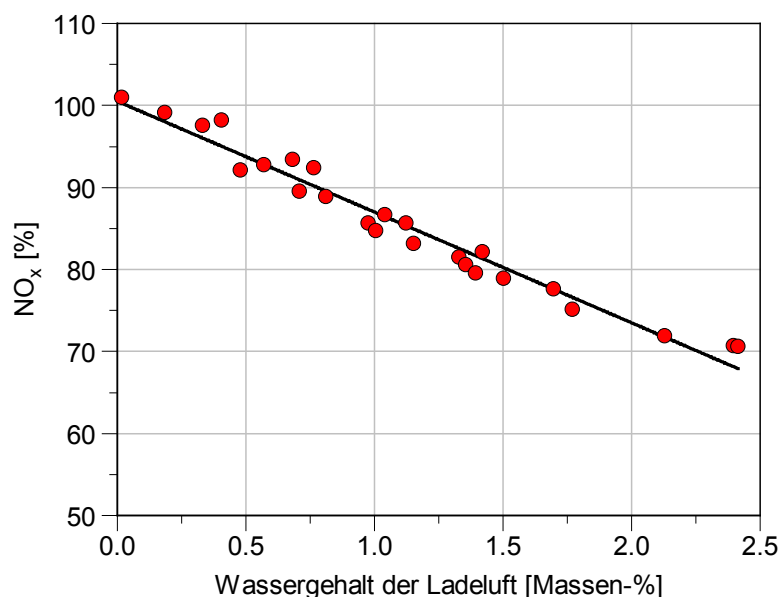


Bild 6.21: Einfluss der Feuchtigkeit der Ladeluft auf die Stickoxid-Emission [43]

Nach [43] führt eine Steigerung der Luftfeuchte zu einer Reduktion der NO_x-Emission. Dieser Effekt kann dadurch erklärt werden, dass sich die Wärmekapazität der Ladung durch einen steigenden Wassergehalt der Ladeluft erhöht. Dies führt während der Verbrennung zu einer niedrigeren Ladungstemperatur und damit zu einer verringerten Stickoxidbildung.

Gemäß [82] wird die Berechnung des Korrekturfaktors zur Feuchtekorrektur der Stickoxidemission wie folgt festgelegt:

$$K_f = 1 - 0,0182 \cdot (H_f - 10,71) + 0,0045 \cdot (T_{SL} - 298) \quad (6.7)$$

mit

K_f..... Korrekturfaktor
H_f..... absolute Feuchte der angesaugten Luft in g/kg
T_{SL}..... Temperatur der Angesaugten Luft in K

Damit lässt sich die gemessene Stickoxidemission auf Normbedingungen umrechnen:

$$NO_{x,korr} = \frac{NO_{x,Messung}}{K_f} \quad (6.8)$$

Bei den Prüfstandsuntersuchungen wird diese Korrektur standardmäßig durchgeführt und braucht damit in der Modellbildung nicht mehr beachtet zu werden. Um später die tatsächliche Stickoxidemission zu erhalten, muss die vom Modell errechnete Stickoxidemission mit dem in Gleichung (6.7) bestimmten Korrekturfaktor gemäß

$$NO_x = NO_{x,Modell} \cdot K_f \quad (6.9)$$

korrigiert werden.

6.2.2.6 Fazit

Mit den im obigen Abschnitt durchgeführten Untersuchungen konnten die Einflussgrößen auf die NO_x-Emission genauer beleuchtet werden. Der Einfluss einiger Größen, wie beispielsweise derjenige der AGR-Rate, konnte, wie erwartet, nachgewiesen werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Parameter des ersten Blocks am Anfang des Kapitels 6.2.2 alle einen signifikanten Einfluss auf die Stickoxidemission haben und damit auch im Modell berücksichtigt werden müssen. Vernachlässigbar sind in erster Näherung hingegen die Umgebungsbedingungen wie Kühlwasser- und Ladelufttemperatur, die sich im untersuchten engen Variationsbereich kaum auf die Stickoxidemission auswirken. Allerdings müssen diese Größen während des Motorbetriebs überwacht werden. Befinden sich die Parameter nicht mehr im untersuchten Bereich, muss gegebenenfalls eine Korrektur, zumindest aber eine Warnmeldung erfolgen.

6.2.3 Datengenerierung am Versuchsmotor

Um eine ausreichend große Datenbasis für die Modellbildung zu erhalten, wurde der Versuchsmotor einem umfangreichen Vermessungsprogramm unterzogen, bei dem DoE-Methoden eingesetzt wurden. Zur Generierung der Versuchspläne wurde das in GT-SUITE enthaltene DoE-Tool verwendet. Hierbei stehen mehrere teilfaktorielle Methoden zur Auswahl. Da, wie in Kapitel 4.6 erläutert, vor allem optimale Versuchspläne zur Erzeugung von Polynommodellen geeignet sind, wurde das D-optimale Kriterium gewählt. Um den Versuchsraum möglichst gleichmäßig mit Experimenten zu füllen, wurde zusätzlich ein Latin Hypercube Verfahren zur Verteilung der Messpunkte verwendet. Bei diesem Verfahren werden die Messungen im gesamten Versuchsraum zufällig verteilt. Auf diese Weise werden mehrere Pläne erzeugt und anschließend der geeignetste ausgewählt [83].

6.2.4 Modellierung

Modellstruktur

Aufgrund der in Kapitel 4.4.1 diskutierten Eigenschaften polynomialer Strukturen im Hinblick auf die Modellierung der Stickoxidbildung und die aufgezeigten guten Ergebnisse früherer Arbeiten, wird in dieser Arbeit ebenfalls ein polynombasiertes Stickoxidmodell erstellt. Zur Modellierung komplexer Zusammenhänge steht nach [84] eine umfangreiche Theorie zur Verfügung. Außerdem können Identifikations- und Validationsalgorithmen mit relativ geringem Aufwand selbst implementiert werden.

Mit Hilfe der oben beschriebenen Untersuchungen der Eingangsgrößen kann eine erste Abschätzung erfolgen, welcher Grad des Polynoms für eine Wiedergabe des Verhaltens der Zielgröße notwendig ist. Die Untersuchungen haben lineare und quadratische Zusammenhänge zwischen Variationsgröße und Stickoxidemission gezeigt. Um die Ordnung des Polynoms möglichst gering zu halten, wurde daher ein quadratischer Ansatz gewählt (s. Gleichung (6.10)).

$$y = \beta_0 + \beta_{01}x_1 + \dots + \beta_{0n}x_n + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{12}x_1x_2 + \dots + \beta_{1n}x_1x_n + \beta_{22}x_2^2 + \beta_{23}x_2x_3 + \dots + \beta_{2n}x_2x_n + \dots + \beta_{nn}x_n^2 \quad (6.10)$$

mit

y Modellausgang

β_{ij} Koeffizienten

x_i Modelleingänge

Die Stickoxidkonzentration bewegt sich beim untersuchten Motor im Bereich von ca. 100 g/h bis über 3000 g/h. Dabei ist die Varianz für niedrige und hohe Stickoxidniveaus

unterschiedlich, was in der Statistik als Heteroskedastizität bezeichnet wird. Dies kann sich negativ auf die Identifikation auswirken. Um eine näherungsweise Homoskedastizität zu erreichen, wird die Zielgröße, also die NO_x-Emission, vor der Modellidentifikation logarithmisch transformiert.

Modellidentifikation und –validation

Zur Modellidentifikation werden zunächst die aus den Voruntersuchungen hervorgegangenen möglichen Parameter zu einer Designmatrix zusammengefasst. Anschließend wird mit Hilfe der in Kapitel 4.4 dargestellten Methoden ein Regressionsmodell erstellt und die Modellgüte wie oben beschrieben bewertet.

Ein wichtiges Kriterium für die Bestimmung der Modellgüte ist die Übertragbarkeit auf andere Sätze von Eingangsgrößen. Um dies zu überprüfen, wird das identifizierte Modell anhand mindestens eines weiteren Datensatzes, der möglichst den gesamten Modellraum abdecken sollte, validiert. Kann das Modell auch diesen Datensatz bzw. die Datensätze mit ausreichender Genauigkeit abbilden, ist die geforderte Fähigkeit zur Generalisierung vorhanden (vgl. neuronale Netze in Abschnitt 4.4.2).

Überbestimmtheit

Wie bereits oben erwähnt, kann das Bestimmtheitsmaß immer erhöht werden, wenn eine ausreichend große Zahl an Regressoren in das Modell aufgenommen wird. Ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 1$ bedeutet eine vollständige Übereinstimmung von Modellausgang und gemessener Größe. Es treten also keine Abweichungen zwischen Modell und Messwert mehr auf.

Ist das Modell überbestimmt, liefert eine Übertragung des Modells auf andere Probleme (hier: andere Eingangsgrößen) keine zufriedenstellenden Ergebnisse mehr. Bei neuronalen Netzen wird dieses Verhalten oft als „Übertrainiertheit“ oder „auswendig lernen“ bezeichnet, was den Sachverhalt auch hier sehr treffend beschreibt. Ein überbestimmtes Modell erkennt die Struktur des zu modellierenden Problems nicht mehr, es ist lediglich in der Lage, zu jeder ihm bekannten Kombination der Eingangsgrößen einen Modellausgang zu liefern.

Um die Fähigkeit des Modells zur Generalisierung zu erhalten, dürfen also nur signifikante Eingangsgrößen im Modell enthalten sein. Um dies zu gewährleisten, kommen statistische Methoden zur Variablenselektion zum Einsatz, die im Folgenden kurz beschrieben werden sollen.

Variablenselektion

Um zu überprüfen, ob ein Regressor einen signifikanten Einfluss auf den Modellausgang besitzt, stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung.

Die einfachsten Methoden sind die sogenannten „forward selection“ (FS) bzw. die „backward elimination“ (BE) Methode, bei denen von einem Grundmodell ausgegangen wird. Bei der FS-Methode wird mit einem leeren Modell, also mit einem Polynom der Form

$$y = a_0 \quad (6.11)$$

begonnen. Danach werden sukzessive weitere Parameter hinzugefügt und eine Modellbewertung durchgeführt. Verbessert ein aufgenommener Parameter das Modell, wird er im Modell behalten, hat er keine Auswirkung oder verschlechtert sich ein Gütekriterium, wird er wieder aus dem Modell entfernt. Bei der BE-Methode wird in umgekehrter Reihenfolge vorgegangen. Begonnen wird mit einem vollständigen Polynom n-ter Ordnung. Anschließend werden nach und nach Parameter entfernt und die Modellgüte bestimmt. Verschlechtert sich das Modell durch das Entfernen eines Parameters, wird er wieder hinzugefügt. Tritt keine Veränderung der Modellgüte auf bzw. verbessert sich ein Kriterium, bleibt der Parameter vom Modell ausgeschlossen [85]. Außerdem ist eine Kombination beider Methoden möglich, d.h. es werden, ausgehend von einem leeren Modell, solange Parameter mit der FS-Methode hinzugefügt, bis alle möglichen Parameterkombinationen getestet wurden. Anschliessend wird versucht, das Modell mit Hilfe der BE-Methode wieder zu vereinfachen. Nachteil dieser Art der Variablenselektion ist der große Aufwand, der mit steigender Zahl an Regressoren stark zunimmt.

Ein statistisch fundiertes Verfahren zur Überprüfung des Einflusses eines Parameters auf den Modellausgang stellt der sogenannte t-Test dar. Die prinzipielle Vorgehensweise nach [86] soll im Folgenden kurz erläutert werden.

Zunächst wird für jeden Koeffizienten β_j eine Hypothese H_i aufgestellt.

$$H_0: \beta_j = \beta_0, \quad H_1: \beta_j \neq \beta_0 \quad (6.12)$$

Wenn H_0 zutrifft, hat der Regressor X_j keinen signifikanten Erklärungswert für Y und kann aus dem Regressionsansatz entfernt werden. Trifft H_1 zu, muss X_j im Ansatz enthalten bleiben.

Die Hypothese kann wie folgt getestet werden:

$$|T_j| > t_{1-\alpha/2}(n-p-1) \quad (6.13)$$

mit

$$T_j = \frac{\hat{\beta}_j - \beta_{0j}}{\hat{\sigma}_j} , \quad j = 0, \dots, p \quad (6.14)$$

wobei

- $\hat{\beta}_j$ Regressor
- β_{0j} Erwartungswert von $\hat{\beta}_j$
- $\hat{\sigma}_j$ Standardabweichung

Der kritische t-Wert $t_{1-\alpha/2}(n - p - 1)$ kann aus Tabellen wie beispielsweise [87] oder [88] entnommen bzw. mittels Onlinerechner [89] ermittelt werden.

Zu beachten ist, dass mit statistischen Verfahren keine Abhängigkeiten zwischen Modellein- und ausgängen ermittelt werden können. Solche Abhängigkeiten müssen immer experimentell bestimmt bzw. mit logischen Überlegungen erklärt werden [57].

6.2.5 Das NO_x-Modell

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Einflussgrößen auf die Stickoxidbildung ausführlich diskutiert sowie die Vorgehensweise bei der Modellidentifikation erläutert. Im Folgenden soll das Stickoxidmodell vorgestellt und bewertet werden.

Betriebszustände

Der Motorbetrieb kann in die drei Betriebszustände

- Leerlauf
- Schubbetrieb und
- Normalbetrieb

unterteilt werden. Bei der Datengenerierung am Prüfstand wurde nur der Normalbetrieb untersucht. Dies führt im Leerlauf und im Schubbetrieb zur Extrapolation und damit zu falsch berechneten Emissionen. Um dies zu vermeiden, müssen diese Betriebszustände erkannt und ggf. entsprechende Maßnahmen ergriffen werden.

Im Schubbetrieb wird kein Kraftstoff eingespritzt. Damit findet keine Verbrennung und somit auch keine NO_x-Bildung statt. Da das Steuergerät bereits von Haus aus über eine Schuberkennung verfügt, kann direkt auf diesen Wert zugegriffen werden. Wird Schubbetrieb erkannt, muss das Modell eine NO_x-Emission von Null ausgeben. Im zweiten besonderen Betriebspunkt, dem Leerlauf, werden dagegen Stickoxide produziert. Da es sich hierbei aber um einen genau definierten Betriebszustand mit näherungsweise konstanter Stickoxidemission handelt, kann auch im Leerlauf direkt die in diesem

Betriebszustand messtechnisch erfasste Stickoxidemission ausgegeben werden. Im Weiteren wird daher auf die Betrachtung dieser beiden Betriebszustände verzichtet.

Modellidentifikation

In Tabelle 6.2 sind die verwendeten Eingangsgrößen aufgeführt.

x	const	n	Q _e	ESP	m _{Zyl.}	m _{O2}	p _{Rail}	p _{LL}
const.	x	x	x	x	x	x	x	x
n	-	0	x	0	x	x	x	x
Q _e	-	-	x	0	x	0	0	0
ESP	-	-	-	0	0	0	0	0
m _{Zyl.}	-	-	-	-	0	x	x	0
m _{O2}	-	-	-	-	-	0	0	0
p _{Rail}	-	-	-	-	-	-	x	0
p _{LL}	-	-	-	-	-	-	-	0

Tabelle 6.2: Kombination der Parameter nach Variablenselektion

Mit den hier angegebenen Koeffizienten kann ein Polynom zur Beschreibung der Stickoxidemission des untersuchten Motors aufgestellt werden. Die Koeffizienten werden analog zu der in Kapitel 4.4.1 gezeigten Methode der multiplen linearen Regression ermittelt.

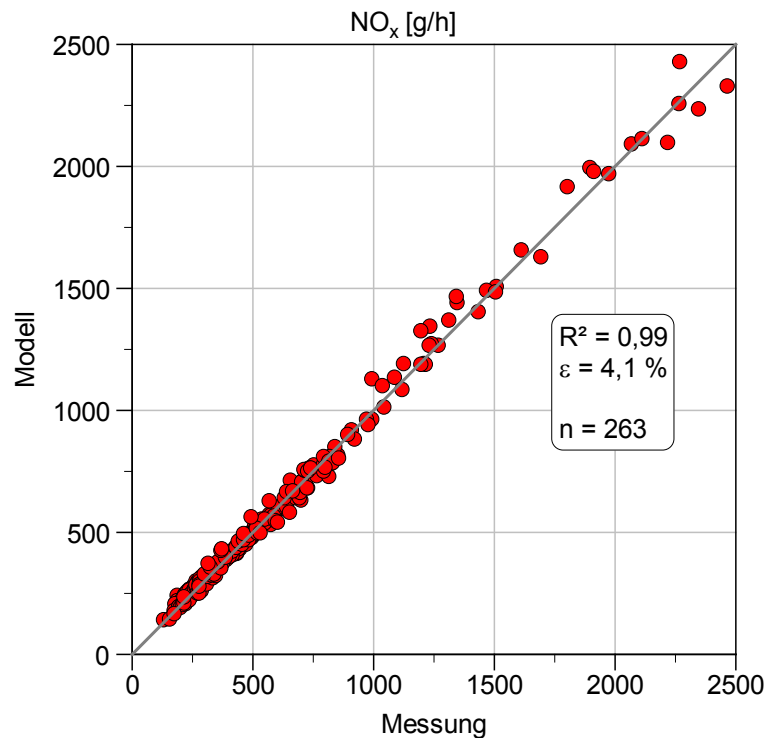


Bild 6.22: Korrelationsdiagramm der Identifikation des neuen NO_x-Modells

Bild 6.22 zeigt das Korrelationsdiagramm der Modellidentifikation. Hier ist die sehr gute Übereinstimmung von Messung und Modell deutlich zu erkennen. Zur Modellidentifikation wurden 263 stationäre Messpunkte verwendet. Das Bestimmtheitsmaß beträgt $R^2 = 0,99$, was wie oben bereits beschrieben, einer sehr guten Korrelation entspricht. Der mittlere relative Fehler liegt mit 4,1 % im Bereich der Messgenauigkeit des NO_x -Sensors.

Modellvalidation

Allerdings kann, wie oben beschrieben, damit noch keine Aussage über die Fähigkeit des Modells zur Generalisierung getroffen werden. Um eine Überbestimmtheit des Modells auszuschließen, wird das Modell an 135 weiteren Betriebspunkten getestet. Das zugehörige Korrelationsdiagramm ist in Bild 6.23 dargestellt. Wie erwartet liegt das Bestimmtheitsmaß mit $R^2 = 0,98$ leicht niedriger als das des Identifikationsdatensatzes. Der mittlere relative Fehler liegt mit knapp 6 % auch hier noch innerhalb der Messgenauigkeit des NO_x -Sensors.

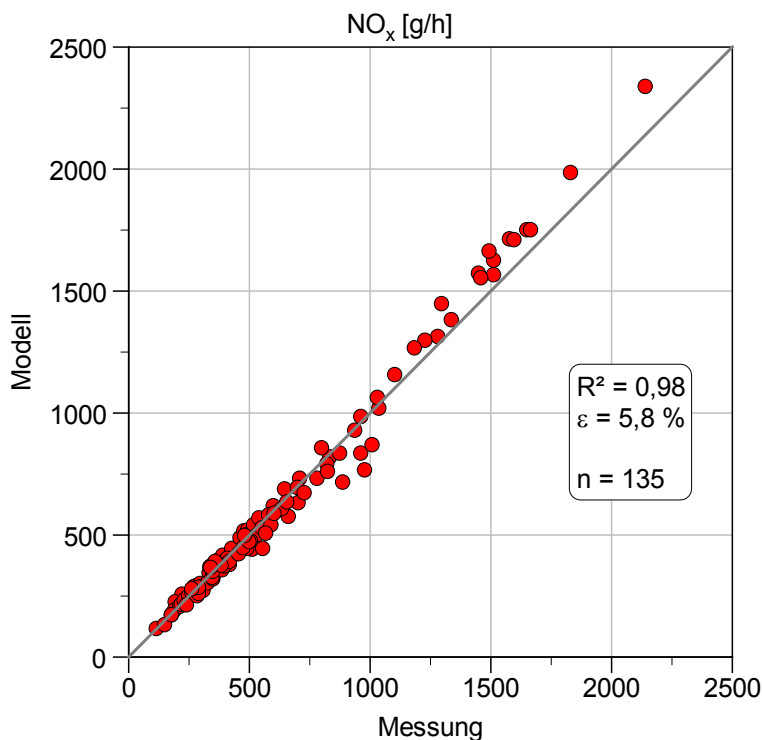


Bild 6.23: Korrelationsdiagramm der Validation des neuen NO_x -Modells

Ergebnisse

Bild 6.24 zeigt einen Vergleich von Messung und Modell anhand der Stationärpunkte eines ESC-Zyklus. Die Dauer pro Betriebspunkt beträgt dabei, wie in der Prüfvorschrift

vorgeschrieben, 120 s. Auf die Modellierung der Leerlaufphase wurde verzichtet. Daher sind nur zwölf Stufen abgebildet.

Im oberen Diagramm sind die Messwerte den Modellergebnissen gegenüber gestellt. Im mittleren Diagramm ist der relative Fehler in % aufgetragen. In beiden Darstellungen ist die gute Übereinstimmung von Messung und Modell zu erkennen. Der relative Fehler liegt in allen Stufenpunkten unter 15 %. Der mittlere relative Fehler über den Zyklus liegt bei $e_{\text{rel}} = 4,3\%$. Das Bestimmtheitsmaß zeigt mit $R^2 = 0,95$ eine gute Übereinstimmung von Messung und Modell.

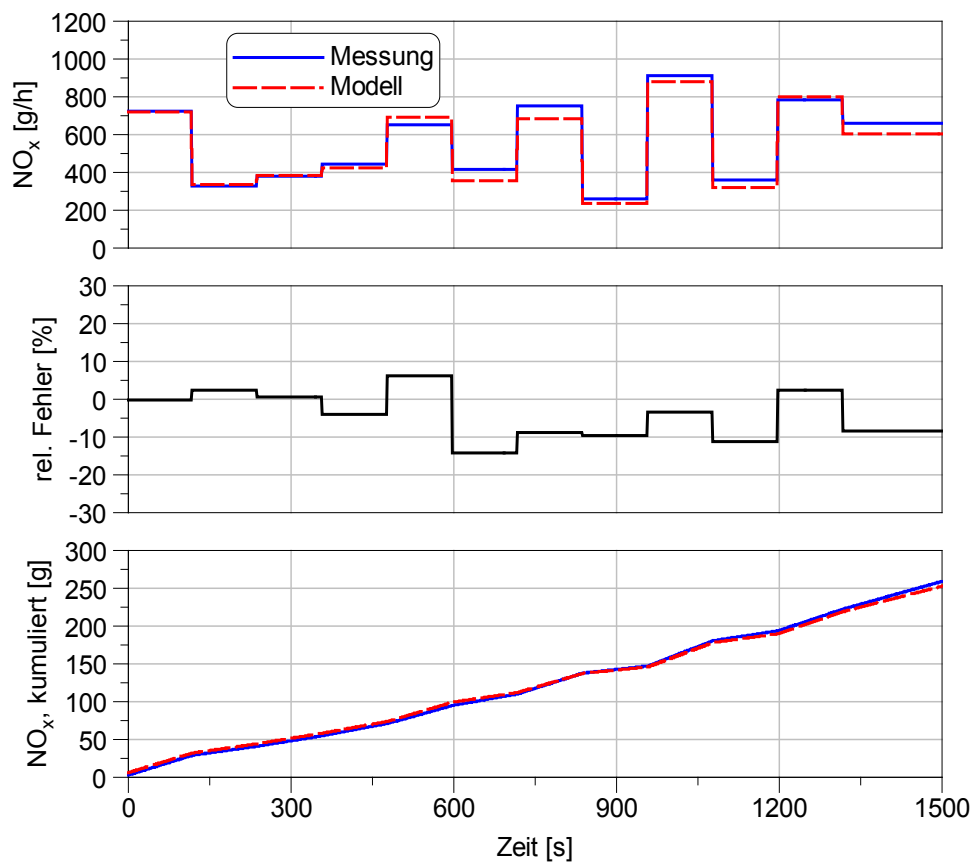


Bild 6.24: Vergleich der NO_x-Emission von Messung und Modell im ESC, stationär

Mit einer Darstellung allein des relativen Fehlers käme es vor allem im transienten Betrieb zeitweise zu sehr hohen und stark oszillierenden Fehlerwerten, die sich in keiner Weise mit dem optischen Eindruck decken würden. Um dies zu vermeiden, wird im unteren Diagramm die kumulierte NO_x-Emission aufgetragen. Diese ist zur Beurteilung der Modellgüte besser geeignet, da sich Fehler, die durch einen leichten zeitlichen Versatz auftreten, hier nicht bemerkbar machen. Die relative kumulierte Abweichung beträgt in diesem Experiment $a = 2,8\%$.

Damit ist gezeigt, dass das Modell prinzipiell in der Lage ist, die Stickoxidemission bei Vorgabe der benötigten Eingangsgrößen berechnen zu können. Im Weiteren soll das dynamische Verhalten des Modells untersucht werden. Dazu wurden sowohl die benötigten Eingangsgrößen als auch die NO_x -Emission des Versuchsmotors während eines ESC-Zyklus mit Hilfe eines Datenrekorders im Sekundentakt aufgezeichnet. Anschließend wurden die Messdaten dem Modell zur Verfügung gestellt und die NO_x -Emission in einer transienten Rechnung berechnet. Das Ergebnis ist in Bild 6.25 zu sehen. Hierbei ist zu beachten, dass die Stickoxidmessung mittels einer Abgasmessanlage (vgl. Kapitel 5) erfolgt. Die relativ lange Messleitung sowie die beiden Turbolader wirken, wie oben bereits erwähnt, als Totzeit und Tiefpassfilter. Um die Daten dennoch vergleichen zu können, wurde der Modellausgang geringfügig geglättet und über der Zeit verschoben. Analog zu Bild 6.24 ist auch hier im oberen Diagramm die Stickoxidemission aus Messung und Modell aufgetragen.

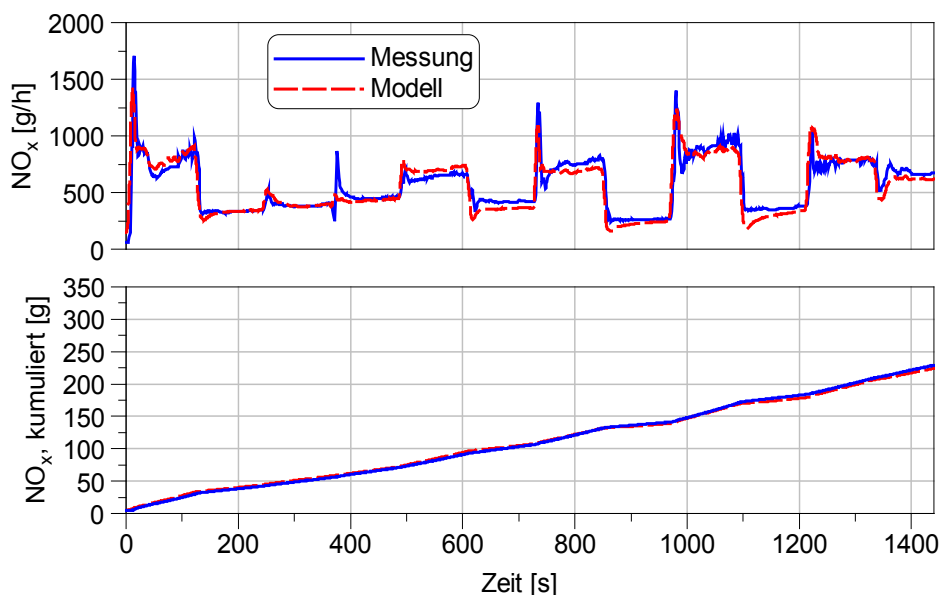


Bild 6.25: Vergleich der NO_x -Emission von Messung und Modell im ESC

Auch hier ist wieder eine sehr gute Übereinstimmung von Messung und Modell zu erkennen. Der mittlere relative Fehler beträgt wie im stationären Fall $e_{\text{rel}} = 4,3\%$. Das Bestimmtheitsmaß zeigt mit $R^2 = 0,94$ eine sehr gute Übereinstimmung von Messung und Modell. Im unteren Diagramm ist wieder die kumulierte Stickoxidemission aufgetragen, die die hohe Modellgüte bestätigt. Der relative kumulierte Fehler beträgt $a = 3,4\%$.

Vor allem nach großen Lastsprüngen wie z.B. bei etwa 850 s und 1100 s treten aber länger andauernde Abweichungen auf, die erst im Laufe des Betriebspunktes mit einer

asymptotischen Annäherung an die Beharrungswerte nachlassen. Diese Abweichungen sind u.a. auf die verzögerte Erfassung der AGR-Rate zurückzuführen. Diese reagiert nur träge auf Änderungen des Betriebspunktes. Da die AGR-Rate in die Berechnung der Zylinderladung und der Sauerstoffmasse im Zylinder eingeht, wirkt sich die langsame Anpassung der AGR-Rate verzögernd auf den Modellausgang aus. Gut zu erkennen sind die durch Lastsprünge bedingten Peaks in der NO_x -Emission. Diese sind beim realen Motor auf die Rücknahme der AGR-Rate zur Vermeidung von Rußstößen im dynamischen Motorbetrieb zurückzuführen und werden auch vom Modell sehr gut wiedergegeben.

Im Weiteren wird die Fähigkeit des Modells überprüft, die Stickoxidemission auch bei stark transientem Motorbetrieb richtig beschreiben zu können.

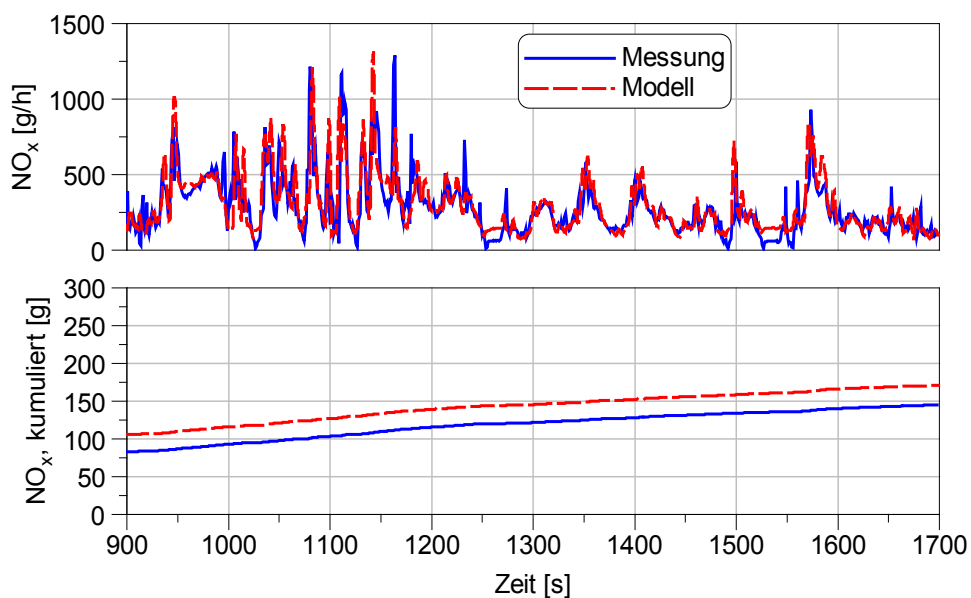


Bild 6.26: Vergleich der NO_x -Emission von Messung und Modell im ETC

In Bild 6.26 sind die Ergebnisse von Messung und Modell im transienten Motorbetrieb dargestellt. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wird nur ein Ausschnitt über 800 Sekunden gezeigt. Hierbei beträgt der mittlere relative Fehler $e_{\text{rel}} = 29,4$. Die relative kumulierte Abweichung beträgt $a = 15,3$ %. Damit liegen die Fehler im transienten Betrieb deutlich über denen im stationären Betrieb. Das Bestimmtheitsmaß zeigt mit $R^2 = 0,62$ ebenfalls eine schlechtere Übereinstimmung von Modell und Messung als im stationären Betrieb.

Betrachtet man den Verlauf des kumulierten Fehlers, so wird deutlich, dass das Modell die reale Stickoxidemission überschätzt. Dies kann durch dynamische Effekte erklärt werden. Das Stickoxidmodell wurde, wie oben beschrieben, auf Basis von stationären

Messpunkten erstellt. Das bedeutet, dass sich der Versuchsmotor bei der Aufzeichnung der Messwerte stets im thermischen Gleichgewicht befunden hat. Dieses wird im transienten Betrieb nie erreicht. Wird die berechnete Stickoxidemission im transienten Betrieb mit Hilfe eines konstanten empirischen Faktors (f_{dyn}) zum Ausgleich der thermischen Effekte korrigiert, ergibt sich eine deutlich bessere Übereinstimmung von Modell und Realität. Sowohl der mittlere relative Fehler ($e_{rel} = 3,5\%$) als auch die relative kumulierte Abweichung ($a = 5,6\%$) können drastisch gesenkt werden und liegen damit im Bereich der stationären Zyklen.

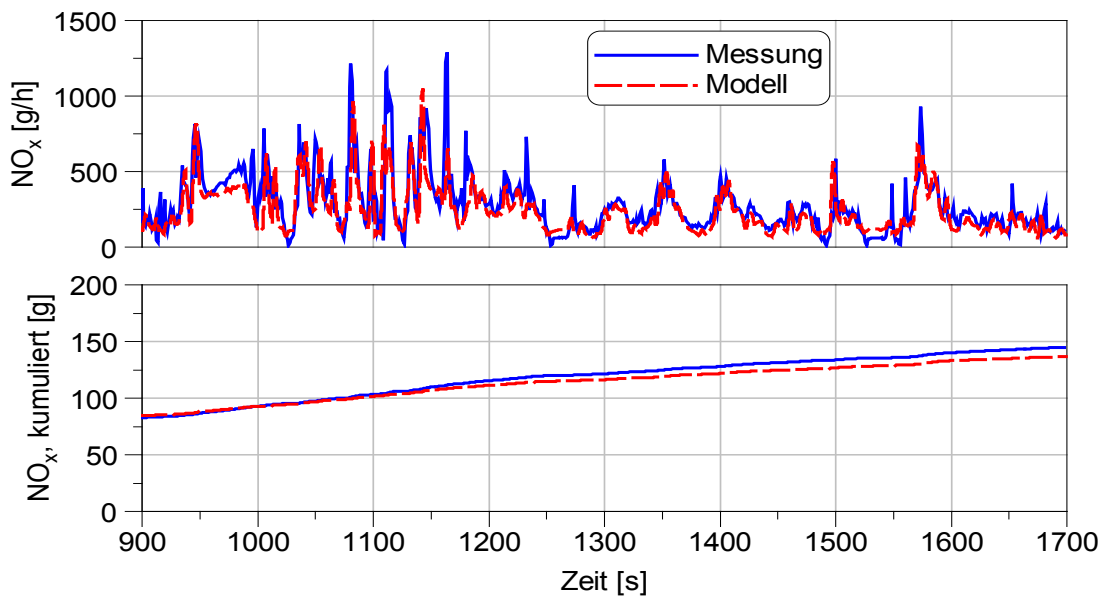


Bild 6.27: Vergleich der NO_x-Emission von Messung und Modell im ETC, korrigiert

Damit ist eine wichtige Forderung an das Modell erfüllt. Das Modell ist in der Lage, die Stickoxidemission bei vollständig bekannten Eingangsgrößen im gesamten Betriebsbereich im stationären und transienten Motorbetrieb vorherzusagen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Modell die reale Stickoxidemission gut wiedergibt. Im Stationärzyklus liegt der relative Fehler größtenteils unter 10%. Durch die bei der NO_x-Messung prinzipbedingt auftretende Verzögerung und Glättung ist eine genaue Angabe des Modellfehlers im transienten Betrieb schwierig. In weiten Teilen des Versuchsprogramms konnte aber ein Fehler von kleiner 10% erreicht werden. Damit sind die Anforderungen an die Genauigkeit des Modells erfüllt.

Eine weitere Forderung an das Modell ist seine Verwendung im Steuergerät eines Nutzfahrzeugmotors. Dazu sollen keine zusätzlichen Sensoren verwendet werden. Die Ladungsmasse und die Sauerstoffmasse im Zylinder und damit die AGR-Rate sind, wie bereits gezeigt, für die Stickoxidbildung von großer Bedeutung. Im Folgenden wird eine

Möglichkeit aufgezeigt, wie die fehlenden Größen mit Hilfe eines Mittelwertmodells des Motors ohne zusätzliche Sensorik als Eingangsgrößen in das Stickoxidmodell zur Verfügung gestellt werden können.

6.3 Modellierung zusätzlicher Eingangsgrößen

Zur Modellierung des Motors wurden zwei unterschiedliche Modelltypen verwendet. Um den Versuchsaufwand einzuschränken und ein besseres Verständnis für die Vorgänge im Motor zu erhalten, wurde der Versuchsmotor zunächst vollständig in einem detaillierten 1D Modell abgebildet. In einem zweiten Schritt wurde aus dem detaillierten Motormodell ein schnell rechnendes Mittelwertmodell abgeleitet. Zur Modellierung des Systems Dieselmotor wurde das Programmpaket GT-SUITE von Gamma Technologies verwendet. Dabei handelt es sich um ein weit verbreitetes, kommerzielles Simulationstool, das von Motoren- und Fahrzeugherstellern sowie von Zulieferern weltweit eingesetzt wird. Das Programm basiert auf einer ein-dimensionalen Modellvorstellung, wobei Strömungseigenschaften und der Wärmetransport zwischen Gas und Bauteilen berücksichtigt werden [90]. Die Verbrennung im detaillierten Modell wird mit Hilfe eines quasidimensionalen Modellansatzes simuliert (s. Kapitel 4.3.3). Für die Güte eines quasidimensionalen Verbrennungsmodells sind realistische Eingangsgrößen wichtig. Aus diesem Grund wird im Folgenden gezeigt, wie dem Verbrennungsmodell die Eingangsgröße Einspritzverlauf mit Hilfe eines Untermodells auf einfache Weise, ohne verlängerte Rechenzeiten, zur Verfügung gestellt werden kann.

6.3.1 Modellierung der Einspritzung

Für die Berechnung von Verbrennungsmodellen ist die Kenntnis des genauen Einspritzverlaufs bzw. die Qualität des verwendeten Einspritzmodells entscheidend für die Güte der Ergebnisse. Bisher wurden vor allem stark vereinfachte Verläufe wie Dreiecks- oder Trapezverläufe verwendet. Die Abhängigkeit der Flankensteigung von Parametern, wie beispielsweise dem Raildruck oder der Einspritzdauer, wurden geschätzt oder mit Hilfe einfacher empirischer Zusammenhänge dargestellt. Dies stellt vor allem dann ein Problem dar, wenn eine große Anzahl an Betriebspunkten automatisiert simuliert werden soll, da hierfür für jeden Betriebspunkt ein realistischer Einspritzverlauf erzeugt werden muss.

Um der Prozesssimulation realistische Einspritzverläufe zur Verfügung stellen zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Modell des Einspritzsystems entwickelt. Hierbei standen die Kriterien Rechenzeit und Ergebnisgüte im Vordergrund. Außerdem

sollte das Modell mit möglichst geringem Aufwand an neue Injektor-Düsen-Kombinationen anzupassen sein. Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Erstellung des Injektormodells beschrieben.

6.3.1.1 Eingangsgrößen

Der für die Prozessrechnung benötigte Einspritzverlauf kann durch die Parameter

- Einspritzbeginn
- Einspritzdauer
- Steigung der ansteigenden Flanke (Düsenöffnungsgeschwindigkeit)
- Steigung der abfallenden Flanke (Düsenschließgeschwindigkeit)
- Tatsächlicher maximaler Einspritzdruck

beschrieben werden (s. Bild 6.28). Diese Größen sind im Motorbetrieb nicht unmittelbar zugänglich.

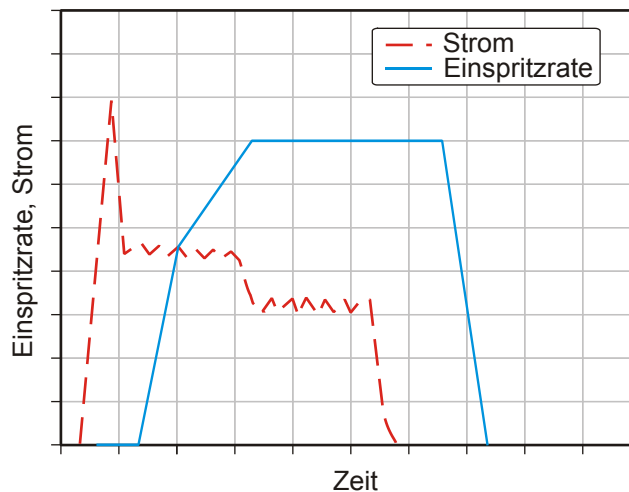


Bild 6.28: Injektorbestromung und Einspritzrate

Demgegenüber sind die folgenden Größen relativ leicht zu ermitteln:

- Bestromungsbeginn
- Bestromungsdauer
- Raildruck
- Geometrie des Einspritzsystems

Die Bestromungssignale und der Raildruck sind hierbei direkt vom Steuergerät bekannt. Die Geometrie des Einspritzsystems ist bekannt oder kann mit relativ geringem Aufwand vermessen werden.

6.3.1.2 Modellaufbau

Der Injektor wurde zur Modellierung in zwei Gruppen (Injektor und Düse) unterteilt (Bild 6.29). Die erste Gruppe (Injektor) umfasst den Injektorkörper mit Magnetventil, Mechanik und Hydraulik. Hierzu zählen auch die Mechanik und die Hydraulik der Düsen-Düsennadel-Kombination sowie das Sackloch. Die Spritzlochgeometrie wurde in einem separaten Block (Düse) realisiert.

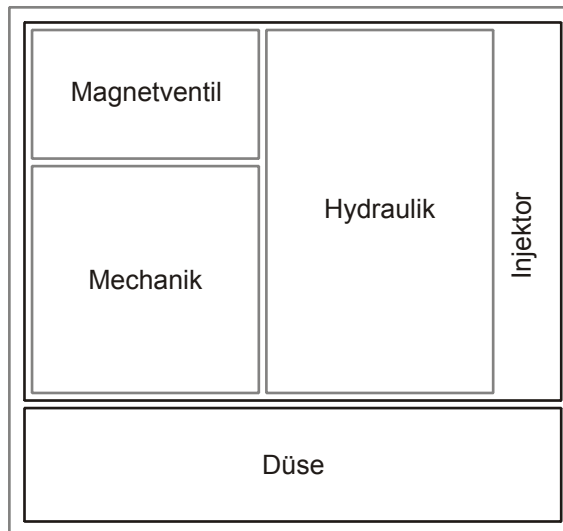


Bild 6.29: Schematischer Aufbau des Injektormodells

6.3.1.3 Kalibrierung des Modells

Um eine Datenbasis für die Kalibrierung des Injektormodells zu schaffen, wurde zunächst eine umfangreiche Messreihe am Einspritzprüfstand durchgeführt. Hierbei kamen sowohl Einspritzmengenindikator- (EMI) als auch Einspritzverlaufsindikatormessungen (EVI) zum Einsatz. Außerdem wurden der Nadel- und Magnetventilhub gemessen.

Im Modell wird der Bestromungsverlauf vorgegeben. Um ein realistisches Verhalten zu erreichen, wurde zuerst der Nadelhubverlauf angepasst. Damit konnte bereits eine sehr gute Übereinstimmung des berechneten mit dem gemessenen Einspritzverlauf erreicht werden. Im zweiten Schritt wurden kleine Anpassungen (Steifigkeiten, Dämpfungen) zur Kalibrierung des Einspritzverlaufs vorgenommen. Gemessene Verläufe des Magnetventilhubes lagen erst später vor. Eine Überprüfung der berechneten Verläufe ergab aber eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Wie in Bild 6.30 zu sehen, konnte das Verhalten des Injektors sehr gut nachgebildet werden.

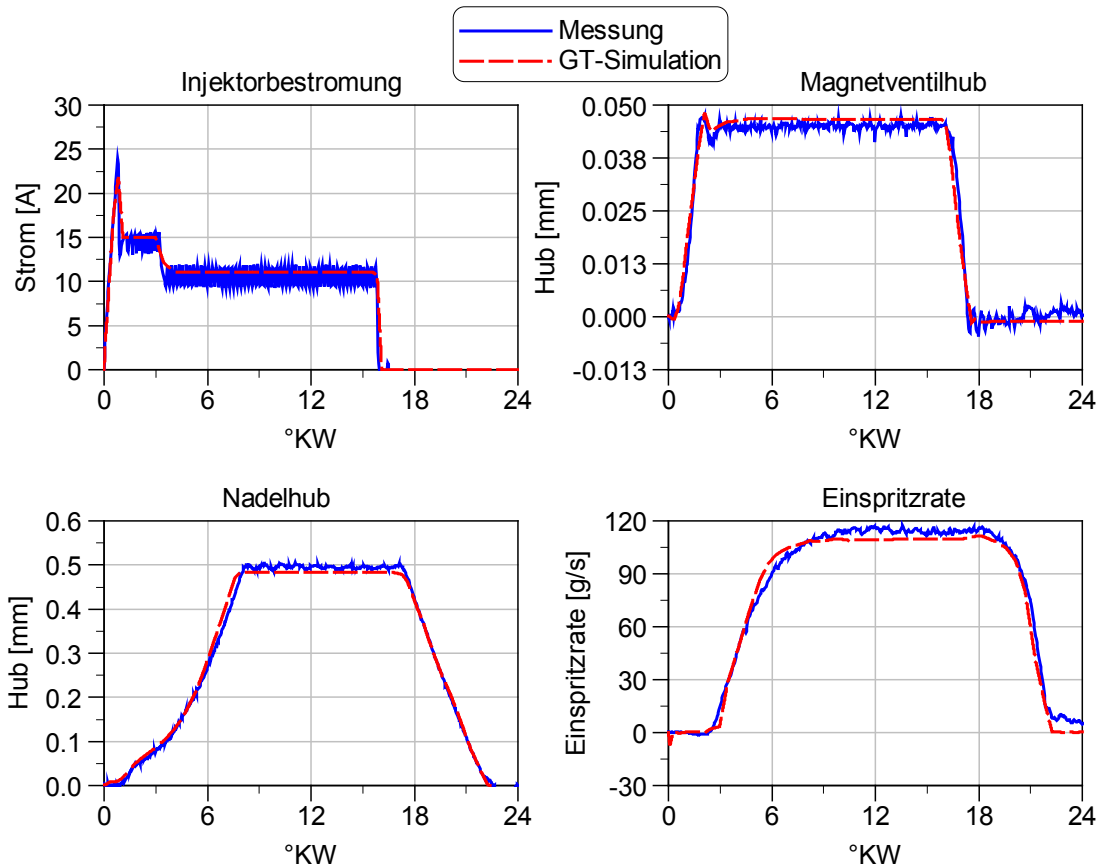


Bild 6.30: Abstimmung des Injektormodells

6.3.1.4 Einspritzdüse

Zur Realisierung unterschiedlicher Einspritzstrategien werden häufig lediglich die Einspritzdüsen ausgetauscht. Das restliche Einspritzsystem bleibt erhalten. Da sich Änderungen an der Düse nicht nur auf das Sprayverhalten und die eingespritzte Kraftstoffmasse, sondern auch auf das Verhalten des Injektors (Öffnungs- und Schließverhalten) auswirken, kommt diesem Bauteil entscheidende Bedeutung zu. Ferner können Düsenparameter wie z.B. Verrundungsradien nur schwer messtechnisch erfasst werden. Aus diesen Gründen wurde die Einspritzdüse separat modelliert. Damit ist ein einfaches Austauschen der Düse - entsprechend dem realen Vorgang - nun auch im Modell möglich. Die Kalibrierung der Düse erfolgt in der Realität an einem Durchflussprüfstand. Dieser wurde in GT-SUITE entsprechend nachgebildet (Bild 6.31).

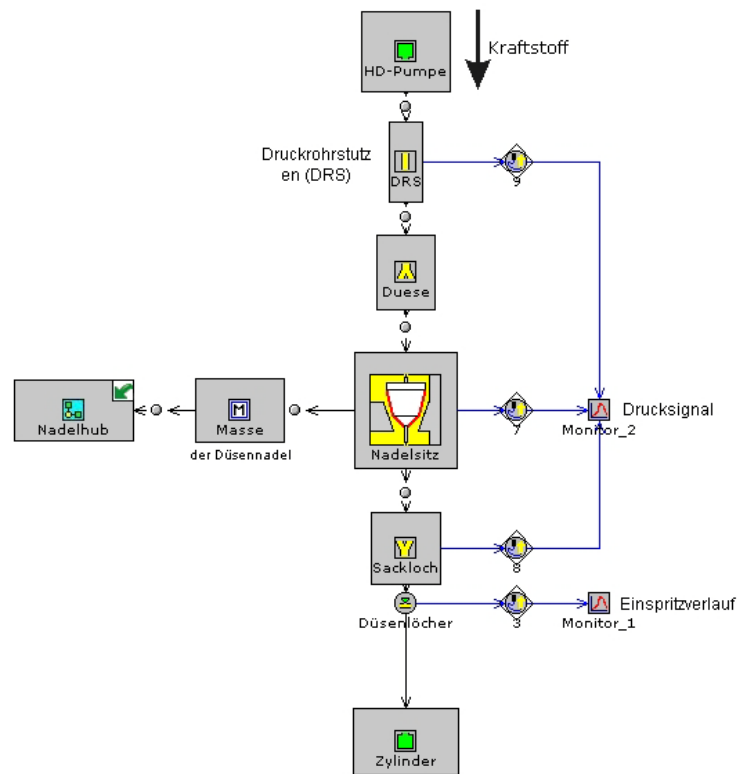


Bild 6.31: Durchflussprüfstand im Modell

Ein Problem bei der Kalibrierung der Einspritzdüse ist die meist mangelnde Kenntnis der Düseninnengeometrie (v.a. HE^{20} -Verrundungsradien). Um die damit verbundenen Probleme zu minimieren, wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem das Düsenverhalten auf relativ einfache Weise dargestellt werden kann.

Der hydraulische Durchfluss (Q_{hyd}) der realen Düse ist aufgrund von Messungen bekannt. Es wird ein GT-Modell des Durchflussprüfstandes erstellt. Hierbei wird die Modelldüse mit allen bekannten Parametern (Lochanzahl, Lochlänge, Lochdurchmesser, Kegelwinkel etc.) bedatet. Die unbekannt Parameter (hier nur der Verrundungsradius) werden mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens angepasst, so dass die Düse im Modell das gleiche hydraulische Verhalten zeigt wie die reale Düse am Durchflussprüfstand.

Da der hydraulische Durchfluss nicht linear mit dem Einspritzdruck steigt, ist es hier sinnvoll, wenigstens für eine Düse eines Düsentyps eine erweiterte Messreihe des hydraulischen Durchflusses bei verschiedenen Druckdifferenzen durchzuführen, um

²⁰ HE-Verrundung: Hydro-Erosives Verrunden der Einlaufkanten des Spritzlochs

damit die Modellergebnisse über den gesamten Betriebsbereich zu validieren und ggf. zu optimieren (siehe Bild 6.32).

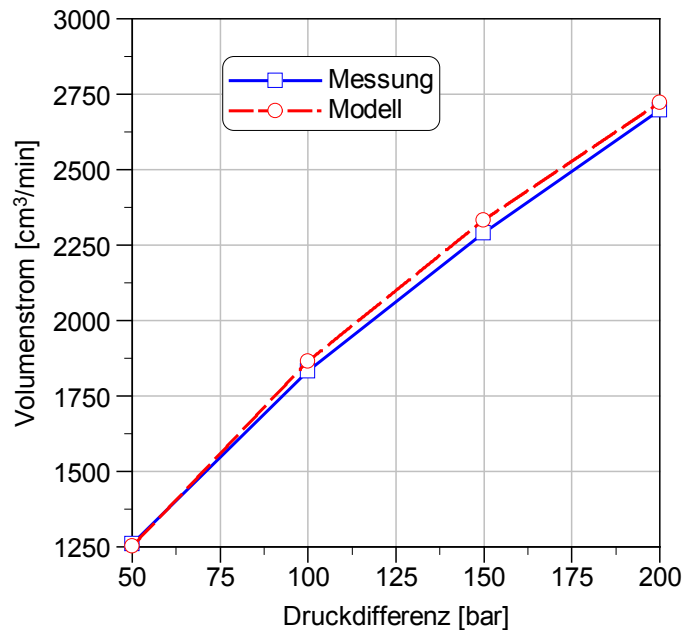


Bild 6.32: Abhängigkeit des hydraulischen Durchflusses vom Druck (Messung/Rechnung)

Sind alle Parameter der Düse ermittelt, so kann die Düse in das Injektormodell übernommen werden. Eine weitere Kalibrierung des gesamten Injektormodells ist nicht mehr notwendig.

6.3.1.5 Überprüfung des Einspritzmodells

Zur Validierung des Einspritzmodells wurden weitere Messungen am Einspritzpumpenprüfstand vorgenommen. Hierbei wurden auch unterschiedliche Düsen verwendet, um die im vorangegangenen Abschnitt gezeigte Vorgehensweise der Düsenkalibrierung zu verifizieren.

Die folgenden Bilder zeigen einen Vergleich von Messung und Rechnung. Die anfängliche Kalibrierung des Injektormodells erfolgte mit einer 8-Lochdüse mit einem nominellen hydraulischen Durchfluss von $Q_{\text{hyd}} = 1000 \text{ cm}^3/30 \text{ s}$. Bild 6.33 und Bild 6.34 zeigen jeweils die eingespritzte Kraftstoffmenge über der Einspritzdauer. In Bild 6.33 wurde zusätzlich noch der Raildruck variiert.

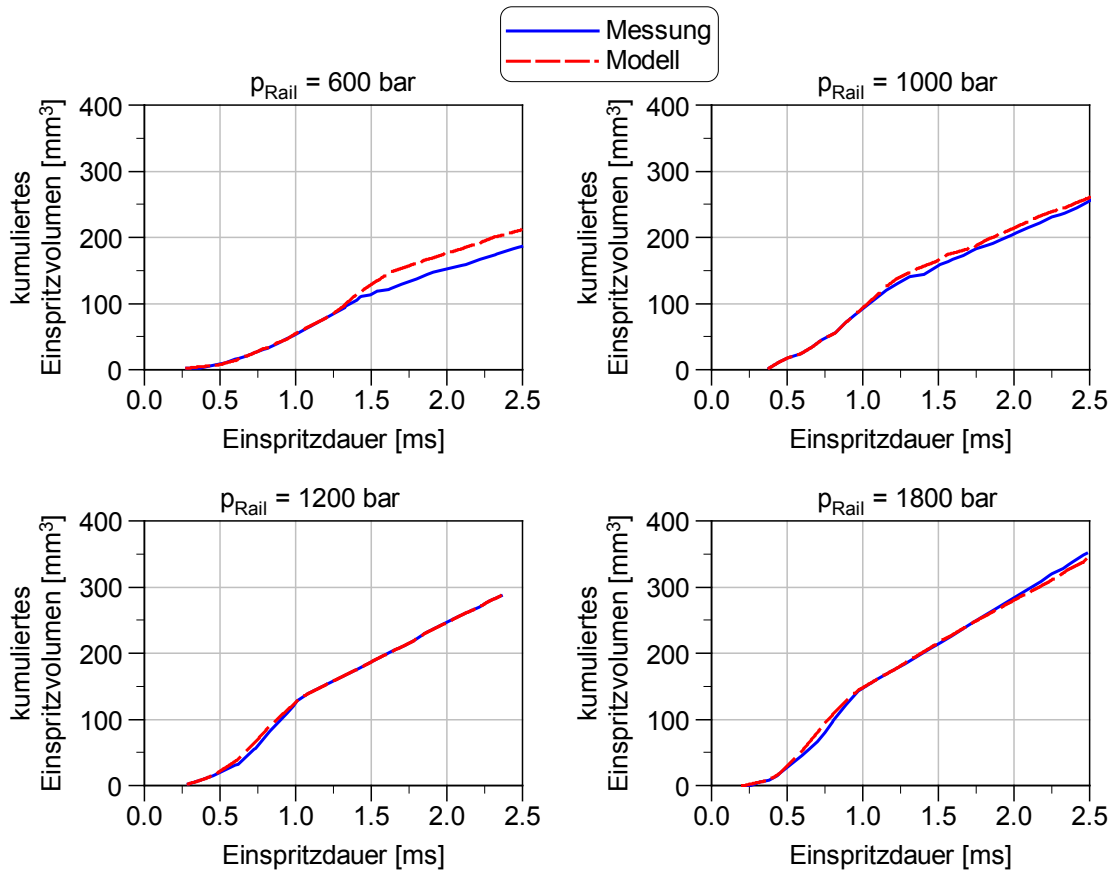


Bild 6.33: *Einspritzvolumen Vergleich Messung Rechnung*
9-Loch-Düse, $Q_{hyd} = 900 \text{ cm}^3/30 \text{ s}$

Bis auf den eher selten applizierten Raildruck von 600 bar stimmen die simulierten Verläufe sehr gut mit den gemessenen überein.

Bild 6.34 zeigt eine Injektor-Düsenkombination aus dem D 2676RT (RT = RaceTruck) mit einer 7-Lochdüse und einem hydraulischen Durchfluss von $2100 \text{ cm}^3/30 \text{ s}$. Auch in diesem extremen Einsatzfall ist eine sehr gute Übereinstimmung von Messung und Simulation zu erkennen.

Damit ist der erste Teil der Anforderungen an das Injektormodell erfüllt. Eine Anpassung an neue Düsengeometrien ist mit relativ geringem Aufwand durchführbar und die Ergebnisse sind suffizient. Im zweiten Schritt soll nun gezeigt werden, wie mit Hilfe des Injektormodells ein schnelles Einspritzmodell auf Basis neuronaler Netze aufgebaut werden kann, um auch die hohen Anforderungen an die Rechengeschwindigkeit des Modells erfüllen zu können.

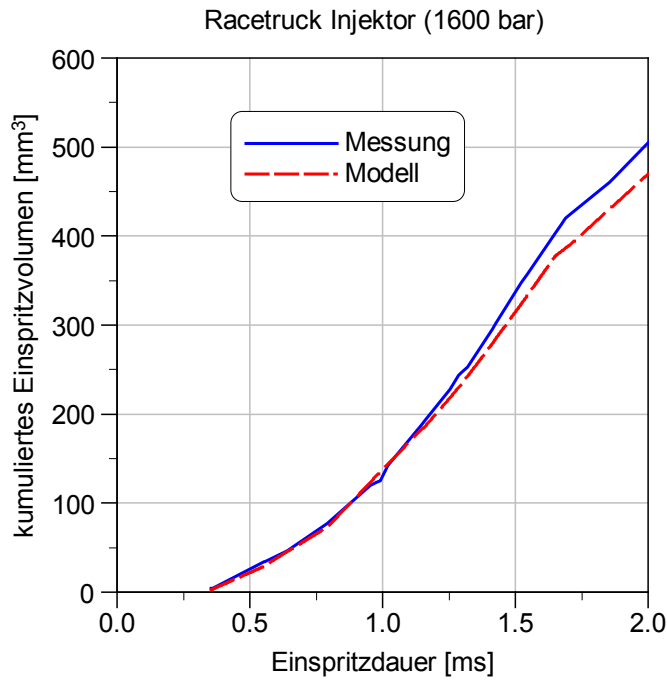


Bild 6.34: Einspritzvolumen Vergleich Messung Rechnung
7-Loch-Düse, $Q_{hyd} = 2100 \text{ cm}^3/30 \text{ s}$

6.3.1.6 Das echtzeitfähige Injektormodell

Ermittlung der charakteristischen Punkte des Einspritzverlaufs

Da mit Hilfe neuronaler Netze keine vollständigen Verläufe, sondern lediglich einzelne Punkte bzw. Parameter dargestellt werden können, muss der mit dem GT-Injektormodell berechnete Einspritzverlauf zunächst vereinfacht dargestellt werden.

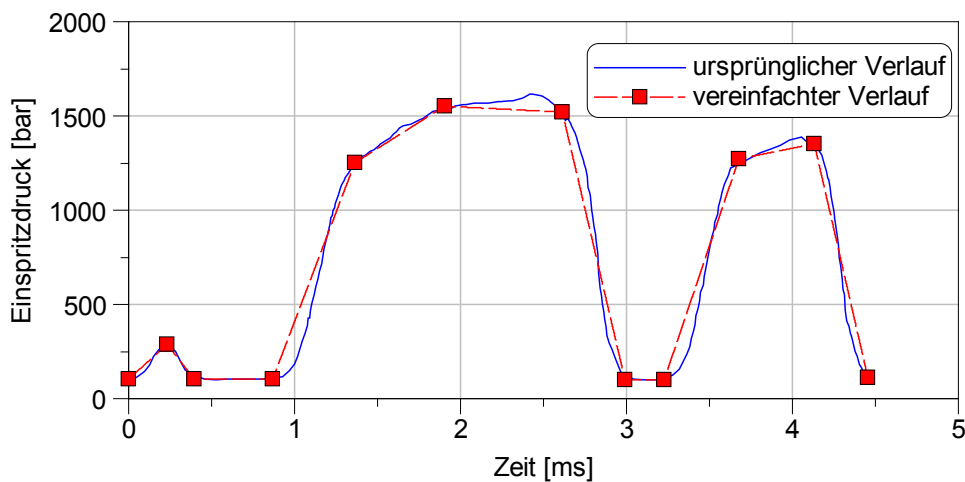


Bild 6.35: Vereinfachter Einspritzdruckverlauf (Polygonzug)

Um die große Anzahl an Einspritzverläufen, die zum späteren Training der neuronalen Netze erforderlich sind, zu vereinfachen und dennoch die Charakteristik der einzelnen Einspritzverläufe ausreichend genau wiedergeben zu können, wurde ein Ansatz entwickelt, mit dem die detailliert berechneten Einspritzverläufe mit Hilfe weniger Punkte dargestellt werden können (s. Bild 6.35).

Um die Charakteristiken der Haupteinspritzung (Steigungen der ansteigenden und abfallenden Flanke, Plateaulänge und -höhe) ausreichend genau beschreiben zu können, wurden für die Haupteinspritzung fünf Punkte gewählt. Da die Vor- und Nacheinspritzung im Vergleich zur Haupteinspritzung kurz sind und auf das Emissionsverhalten des Motors lediglich einen geringen Einfluss haben, wurde die Voreinspritzung mit drei und die Nacheinspritzung mit vier Punkten beschrieben. Damit konnte der Berechnungsaufwand drastisch reduziert werden.

Training der neuronalen Netze für die charakteristischen Punkte

Sind die charakteristischen Punkte ermittelt, können damit die neuronalen Netze trainiert werden. Hierbei ist zu beachten, dass für jeden Parameter ein eigenes neuronales Netz erforderlich ist.

Trainiert werden die neuronalen Netze mit dem in GT-SUITE enthaltenen Trainingstool. Hierbei besteht die Möglichkeit, automatisch verschiedene Netzarchitekturen zu testen und die geeignetsten auszuwählen. Im hier vorgestellten Beispiel wurden die besten Ergebnisse mit einem dreischichtigen Feed Forward Netz mit 16 bzw. 21 Neuronen erzielt.

Validierung der neuronalen Netze

Nachdem die neuronalen Netze trainiert sind, muss eine Validierung erfolgen. Dazu können zum einen Korrelationsdiagramme betrachtet werden, zum anderen kann ein einfaches Modell des Injektors aufgebaut werden. Der Vorteil bei letzterer Methode ist, dass nicht nur die Ergebnisgüte, sondern auch die Implementierungsfähigkeit in spätere Modelle und die Rechenzeit beurteilt werden können.

Bild 6.36 zeigt die Regressionsgerade mit Testergebnissen zum maximalen Einspritzdruck der Haupteinspritzung. Die Testergebnisse waren nicht Bestandteil des Trainings und belegen damit die Gültigkeit des vorliegenden neuronalen Netzes im abgebildeten Bereich.

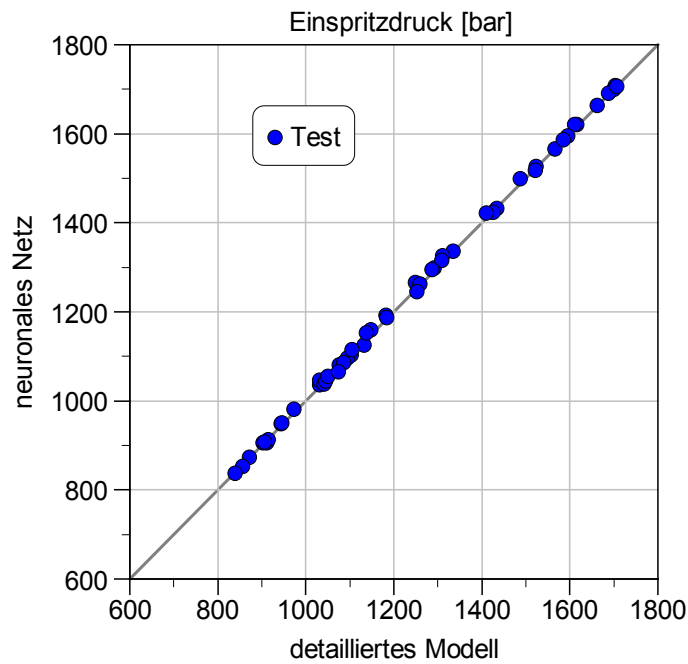


Bild 6.36: Korrelationsdiagramm detailliertes Modell vs. neuronales Netz

Stellt man den gesamten NN-Einspritzverlauf einem gemessenen oder mittels GT-SUITE berechneten Einspritzverlauf gegenüber, wird die Güte der neuronalen Netze aller Einzelpunkte ersichtlich.

In Bild 6.37 ist der Einspritzdruckverlauf einer einzelnen Einspritzung dargestellt.

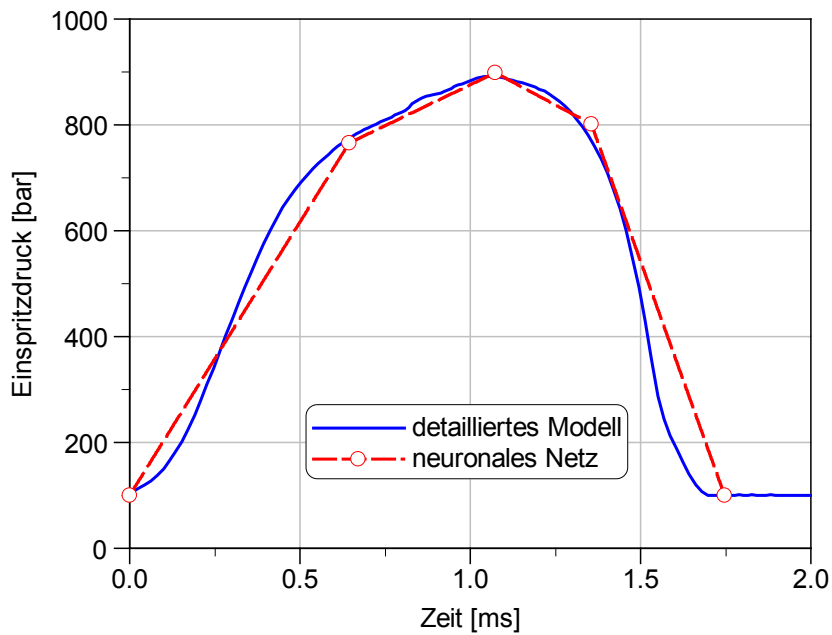


Bild 6.37: Vergleich von detailliertem und vereinfachtem Einspritzverlauf

Hier wird deutlich, dass die fünf Punkte des NN-Einspritzverlaufs zwar alle auf dem GT-SUITE-Einspritzverlauf liegen, es aber durch die starke Vereinfachung insbesondere im Bereich der ansteigenden Flanke zu größeren Abweichungen kommt. Abhilfe könnte in diesem Fall ein sechster Punkt schaffen. Im nächsten Kapitel werden die Auswirkungen der Fehler des vereinfachten Verlaufes auf die Motorprozessrechnung betrachtet.

6.3.1.7 Vergleich von Prozessrechnungen

Im Folgenden werden Ergebnisse von Prozessrechnungen mit detailliertem und über neuronale Netze ermitteltem Einspritzverlauf verglichen. Die vier Diagramme in Bild 6.38 zeigen einen Vergleich der Motorprozesssimulation in einem Betriebspunkt.

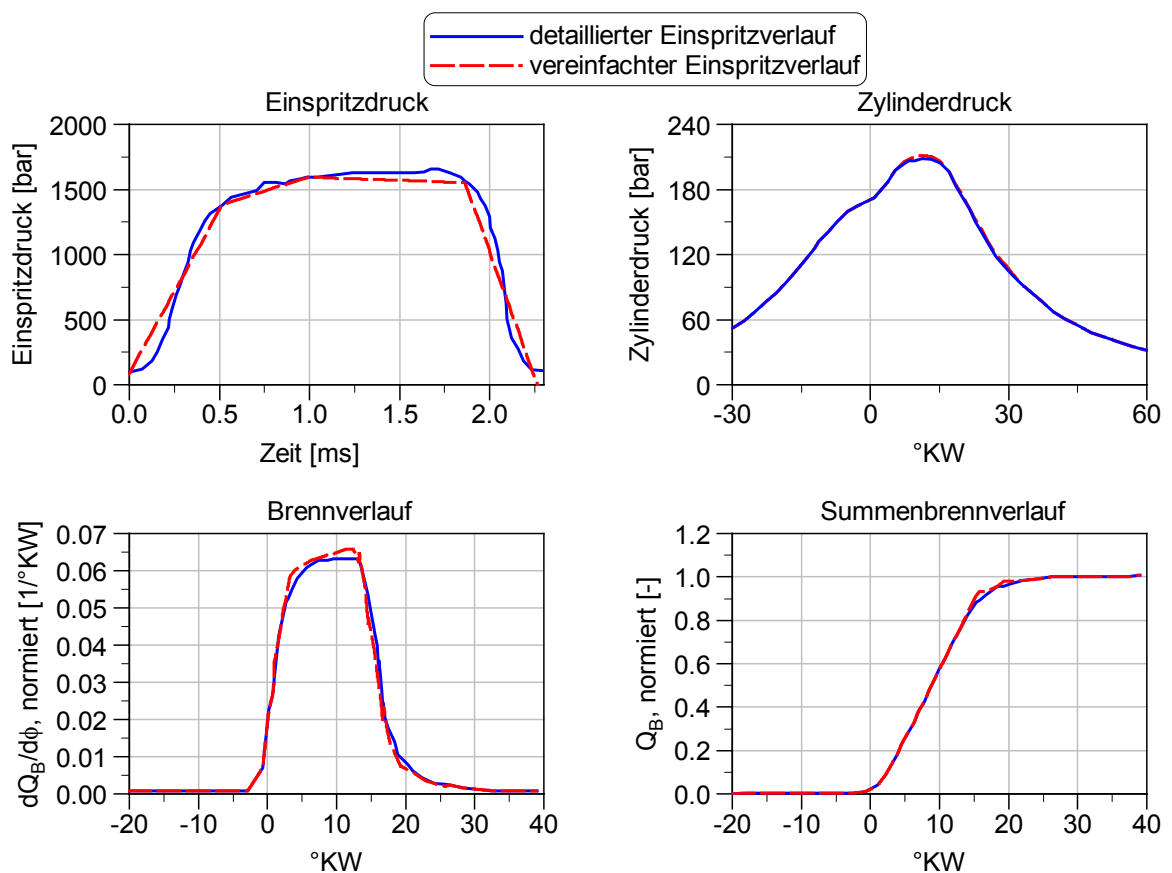


Bild 6.38: Vergleich der Ergebnisse einer Prozessrechnung

Im ersten Diagramm sind die beiden Einspritzverläufe dargestellt. Auch hier ist wieder die gute Übereinstimmung der Einzelpunkte mit dem ursprünglichen Verlauf, aber auch die deutliche Abweichung im vorderen Bereich der Einspritzung zu erkennen. Die berechneten Druckverläufe unterscheiden sich kaum (zweites Diagramm). Lediglich der Spitzendruck der detaillierten Rechnung liegt um ca. 3% höher, was auf den steileren Anstieg der Einspritzrate zurückzuführen ist. Dies wird auch im dritten

Diagramm bei der Betrachtung der Brennverläufe deutlich. Insgesamt ist aber festzuhalten, dass die mit vereinfachtem Einspritzverlauf berechneten Ergebnisse die Realität sehr gut wiedergeben.

Mit der hier vorgestellten Vorgehensweise ist es möglich, der Prozessrechnung sehr realitätsnahe Einspritzverläufe als Eingangsgröße zur Verfügung zu stellen. Durch die sehr schnelle Berechnung der Verläufe wirkt sich die Verwendung dieses Injektor-modells nicht oder nur in sehr geringem Ausmaß auf die Rechenzeit der Prozessrechnung aus.

6.3.2 Detailliertes Motormodell

Wie oben bereits erwähnt, wurden im Rahmen dieser Arbeit zwei unterschiedliche Modelltypen verwendet. Im Folgenden wird das detaillierte Modell vorgestellt. Mit diesem Modell ist es möglich, weitere Randbedingungen für die Stickoxidberechnung zu erhalten. Die Rechengüte ist dabei sehr hoch. Die Rechendauer beträgt allerdings pro Betriebspunkt mehrere Minuten.

6.3.2.1 Aufbau des Motormodells

Das detaillierte Motormodell beinhaltet alle für die Verbrennungsrechnung relevanten Komponenten des realen Motors wie Einspritzsystem, Aufladegruppe oder Abgasrückführung. Die Gasdynamik im Ansaug- und Abgassystem wird dabei ebenso detailliert modelliert wie die Turbolader mit Wastegate und die gekühlte Abgasrückführung. Bild 6.39 zeigt den schematischen Aufbau des Motors am Prüfstand. Deutlich zu erkennen sind der Block mit den sechs Zylindern, die zweistufige Turboaufladung mit Zwischenkühlung sowie die gekühlte Abgasrückführung. Alle diese Komponenten wurden zunächst in das detaillierte GT-SUITE Modell übertragen (s. Bild 6.40).

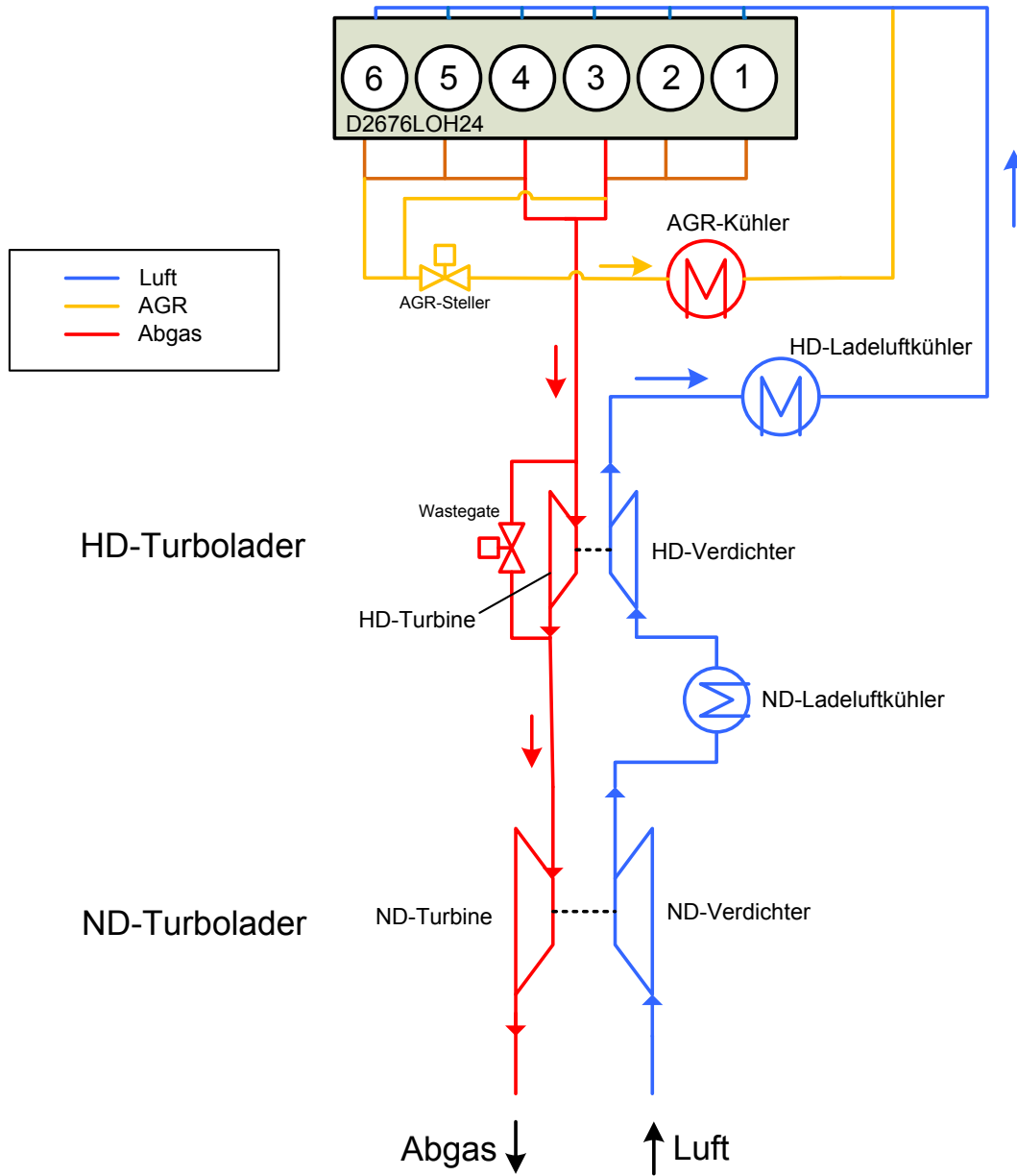


Bild 6.39: Aufbau des Motors am Prüfstand

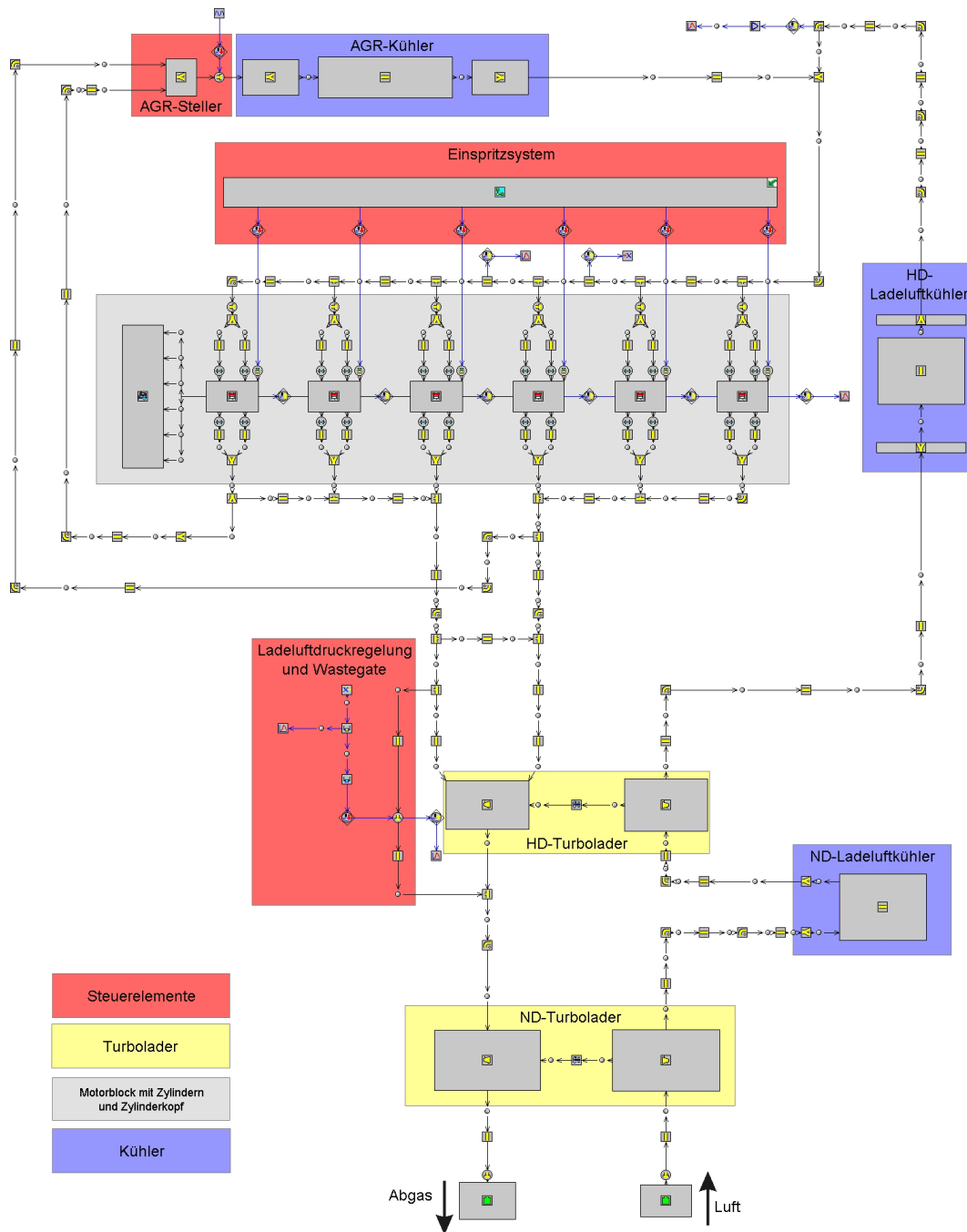


Bild 6.40: Detailliertes Motormodell in GT-SUITE

Das Einspritzsystem wird mittels der oben beschriebenen Methode modelliert. Damit sind die Randbedingungen für die Verbrennungsrechnung festgelegt.

Die eigentliche Verbrennung wird mit einem phänomenologischen Ansatz nach Hiroyasu [91] berechnet. Dabei werden die innermotorischen Vorgänge wie Strahl- ausbreitung, Strahlaufbruch, Luftmitführung, Tropfenverdampfung, Vermischung von Kraftstoffdampf mit Luft, Zündung und Verbrennung berücksichtigt [92].

6.3.2.2 Kalibrierung des Modells

Zur Kalibrierung des Modells werden Messdaten vom Motorenprüfstand herangezogen. Um die Aussagekraft des Modells zu erhöhen, wurde die Abstimmung im gesamten Kennfeldbereich vorgenommen. Um auch die Vorgänge im Zylinder, wie beispielsweise Verdichtung, Zündung und Verbrennung, kalibrieren zu können, wurde neben der standardmäßigen Erfassung von Drücken und Temperaturen auch eine Zylinderdruckindizierung durchgeführt.

6.3.2.3 Überprüfung der Modellgüte

Nach dem das Motormodell aufgestellt und kalibriert wurde, musste die Modellgüte überprüft werden. Um möglichst den gesamten Betriebsbereich abdecken zu können, wurden auch hier mehrere Betriebspunkte aus dem Kennfeld nachgerechnet. Hierzu wurden zwölf der dreizehn Betriebspunkte²¹ des ESC (s. Kapitel 4.7) gewählt, da für diese Punkte zum einen eine große Messdatenbasis vorlag und sie zum anderen durch ihre Verteilung über das Motorenkennfeld als repräsentativ für das gesamte Kennfeld angesehen werden können.

Die folgenden Abbildungen zeigen einen Vergleich von ESC-Punkten von Prüfstandsmessungen (blau, durchgezogene Linie) und Modellergebnissen (rot, gestrichelt). In Bild 6.41 sind die Drücke in Ladeluft- und Abgassystem dargestellt. Im ersten Diagramm (oben links) ist der Ladedruck nach Ladeluftkühler zu sehen, darunter der Druck vor Hochdruckverdichter. Sowohl der Druck zwischen den Verdichtern als auch der Druck nach Hochdruckverdichter bzw. nach Ladeluftkühler werden vom Modell sehr gut wiedergegeben. Anhand dieser beiden Bilder ist die hohe Modellgüte bei der Modellierung des Luftsystems zu erkennen.

Die Diagramme auf der rechten Seite zeigen die Drücke auf der Abgasseite vor Hochdruckturbine und zwischen den beiden Turbinen. Auch hier ist die Abweichung von Messung und Rechnung über das gesamte Kennfeld sehr gering, was die hohe Modellgüte des Abgasstranges unterstreicht.

²¹ BP1 (Leerlauf) wurde nicht zur Abstimmung des Modells verwendet

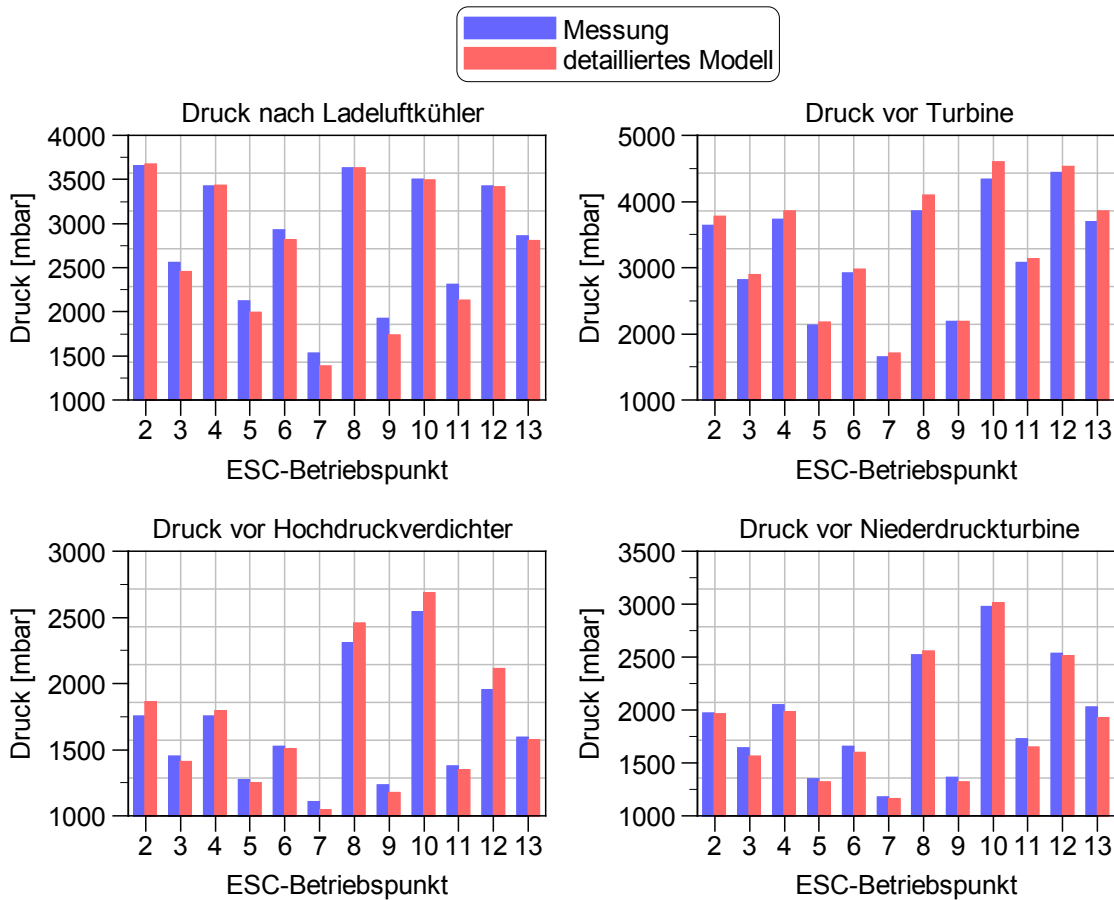


Bild 6.41: Vergleich: Messung – detailliertes Motormodell im ESC (Drücke; nach LLK, vor HD-Turbine, vor HD-Verdichter, vor ND-Turbine)

Im linken oberen Diagramm in Bild 6.42 ist das für den Ladungswechsel entscheidende Spülgefälle dargestellt, also die Differenzen der an den Zylindern anliegenden Ein- und Auslassdrücke. Auch hier ist die sehr gute Übereinstimmung von Messung und Modell gut zu erkennen. Neben dem Druckverhältnis über die Turbine ist auch die Temperatur des Gases am Turbineneintritt von entscheidender Bedeutung für den Turbinenwirkungsgrad und damit für die abgegebene Leistung der Turbine.

Links unten ist die Abgastemperatur vor Hochdruckturbine zu sehen. Auch hier sind nur wenige kleinere Abweichungen von Modell und Realität zu verzeichnen. Unterstrichen wird die in den bisher diskutierten Punkten sehr hohe Modellgüte mit Blick auf den Luftmassenstrom des Motors (rechts oben). Durch die sehr gute Modellqualität von Luft- und Abgaspfad wird der Luftmassenstrom vom Modell sehr gut wiedergegeben. Als letztes Bild ist noch das Drehmoment angegeben. Dieses kann als Maß für die Güte des gesamten Motormodells angesehen werden.

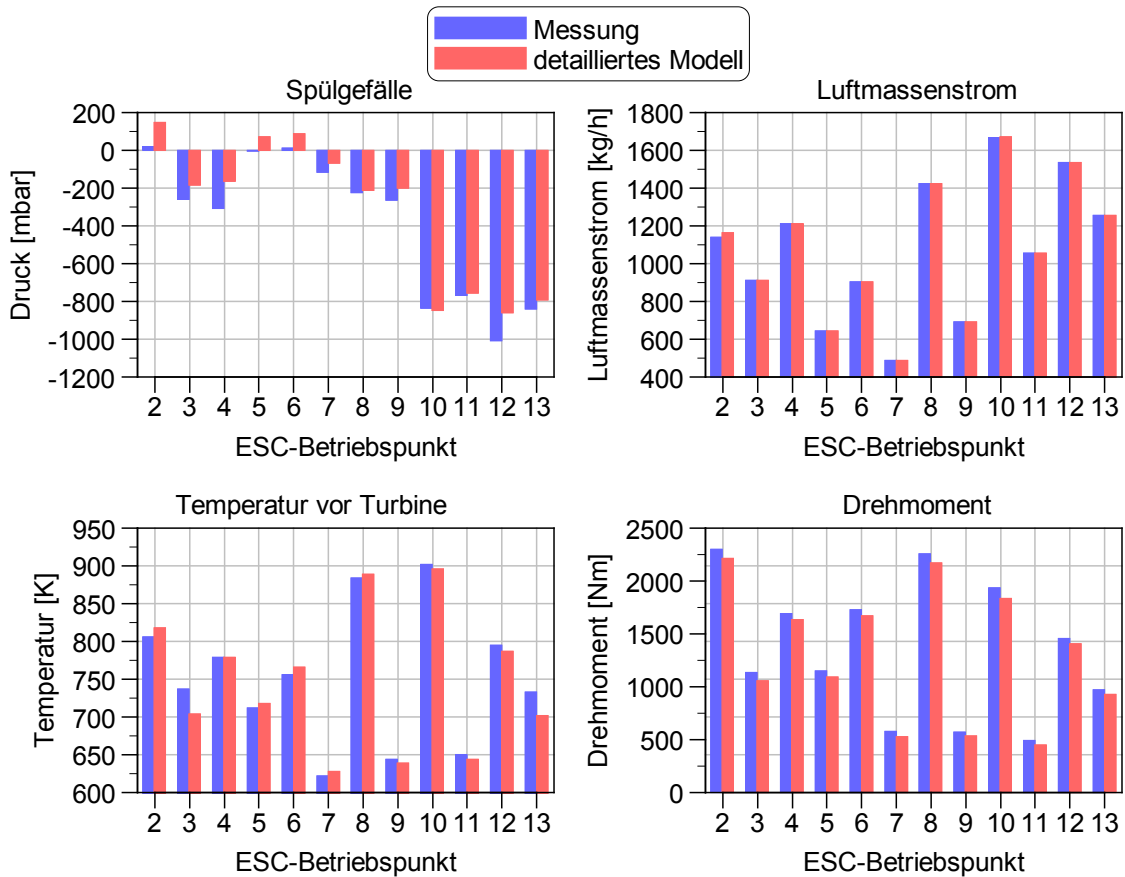


Bild 6.42: Vergleich: Messung – detailliertes Motormodell im ESC (Spülgefälle, Luftmasse, Temperatur vor Turbine, Drehmoment)

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die thermodynamischen Zustände sowohl im Ansaug- als auch im Abgastrakt sehr gut wiedergegeben werden. Dies gilt auch für das Drehmoment. Die sehr gute Übereinstimmung von Messung und Rechnung über den gesamten Kennfeldbereich bestätigt die Zuverlässigkeit des detaillierten Rechenmodells.

Nachteilig wirkt sich lediglich seine relativ hohe Rechendauer aus. Zur Berechnung eines Betriebspunktes werden, abhängig von den Anfangs- und Randbedingungen, auf einem leistungsfähigen PC bis zu zehn Minuten benötigt. Damit ist das detaillierte Modell um Größenordnungen zu langsam, um echtzeitfähige Berechnungen durchzuführen.

6.3.3 Mittelwertmodell

Um die Rechengeschwindigkeit des Motormodells zu steigern, wird auf die Technik der Mittelwertmodelle zurückgegriffen. Diese Methode zur schnellen Modellierung von Verbrennungsmotoren wurde von Weiß [93] beschrieben. Das Prinzip des Mittelwert-

modells ist die Vorausberechnung verschiedener wichtiger Parameter des Zylinderkreisprozesses im gesamten interessierenden Betriebsbereich. Die Ergebnisse werden z.B. in Kennfeldern oder neuronalen Netzen gespeichert. Während der Anwendung des Mittelwertmodells können die zuvor berechneten Parameter aus dem Speicher abgerufen werden, wodurch eine aufwendige Prozessrechnung entfällt.

Als Ausgangspunkt für die Erstellung eines Mittelwertmodells dient das im vorangegangenen Kapitel gezeigte detaillierte Motormodell. Die Vorgehensweise zur Erstellung des Mittelwertmodells ist schematisch in Bild 6.43 dargestellt. Ausgehend vom detaillierten Modell sind zwei Pfade zu erkennen. Der rechte Pfad beschreibt die Vereinfachung der Geometrie des Modells, der linke Pfad die Generierung der neuronalen Netze (s. Kapitel 4.4.2).

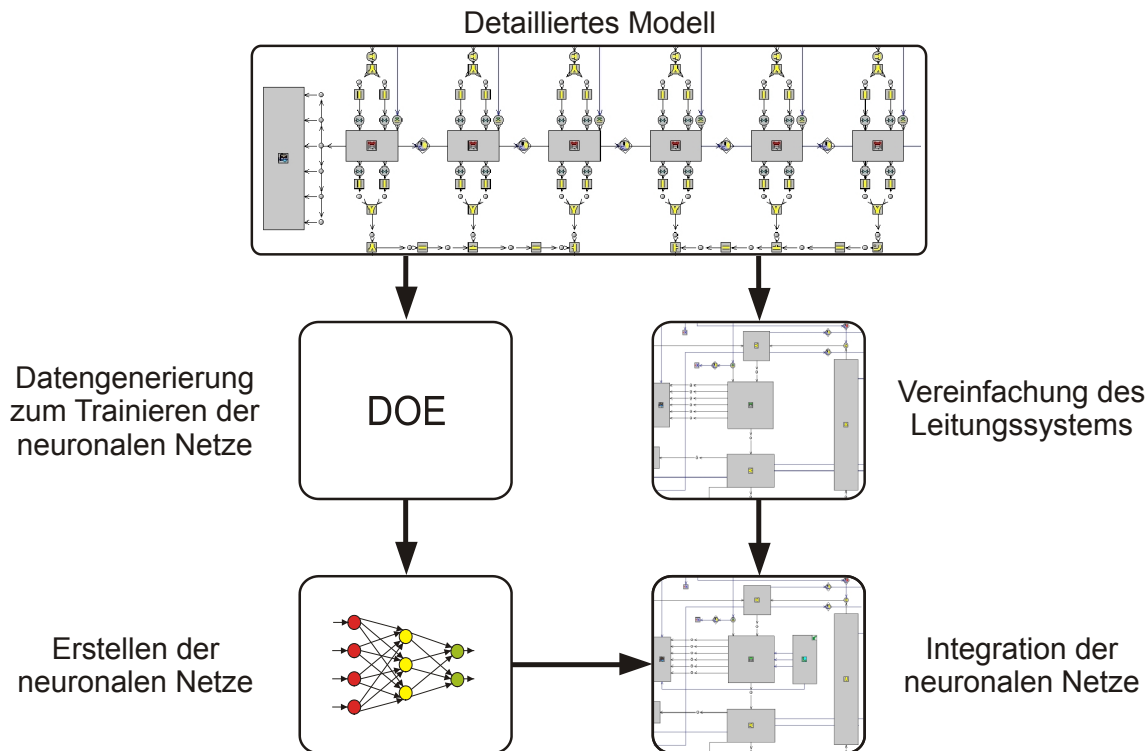


Bild 6.43: Vorgehensweise beim Erstellen des Echtzeitmodells [63]

Vereinfachung der Geometrie

Zur Vereinfachung der Geometrie werden zunächst die luft- und abgasseitigen Rohrleitungssysteme zusammengefasst. Dabei werden die rechenzeitintensiven Rohrleitungen mit Drosselstellen und Bögen durch einfache Volumina ersetzt. Die Randbedingungen dieser Volumina, wie Durchmesser der Zu- und Abflüsse oder Wärmeleitfähigkeiten werden anschließend kalibriert, so dass die Bauteile im Mittelwertmodell die gleichen Eigenschaften aufweisen wie die entsprechenden Baugruppen im

detaillierten Modell. Einen Überblick über die Vereinfachungen zeigen die beiden folgenden Bilder. Hieraus lässt sich erkennen, dass sich das detaillierte Rohrleitungssystem im wesentlichen auf sechs Volumina reduziert hat.

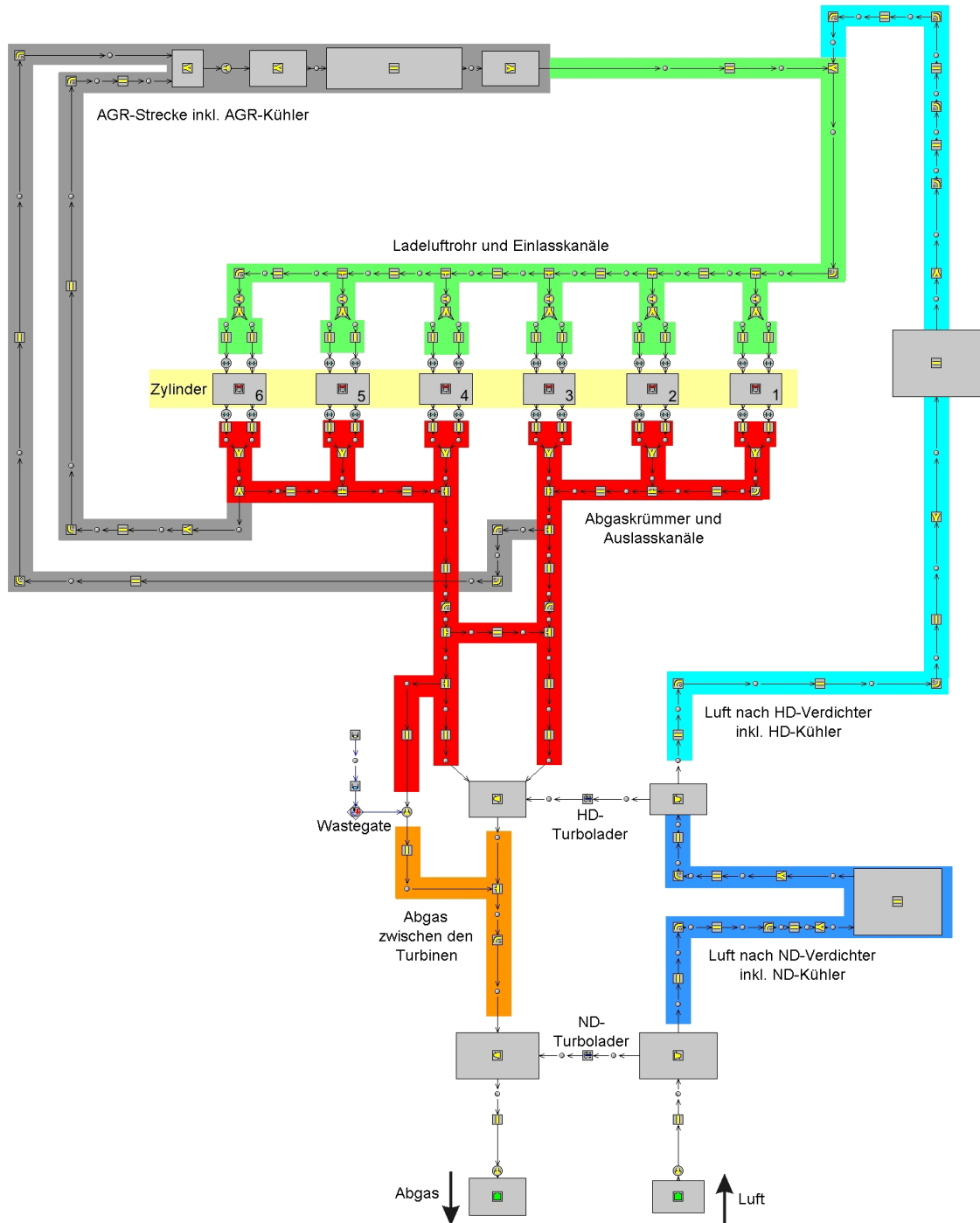


Bild 6.44: Baugruppen im detaillierten Modell

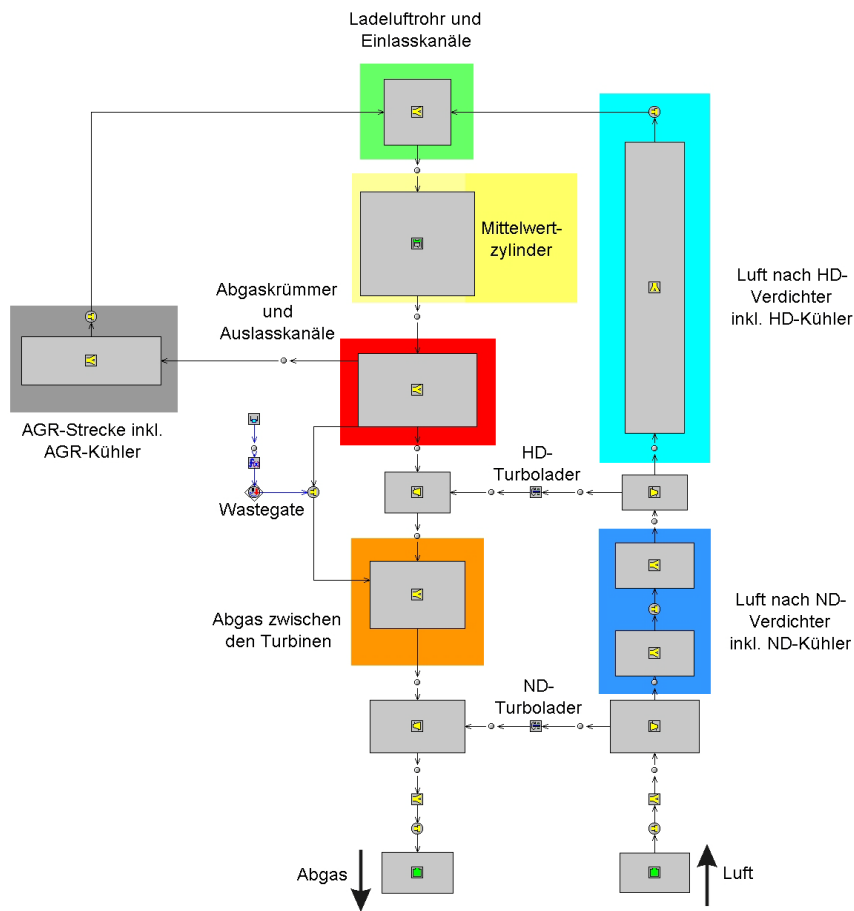


Bild 6.45: Zusammengefasste Baugruppen im Mittelwertmodell

Außerdem werden die sechs Zylinder im detaillierten Modell durch einen Mittelwertzylinder ersetzt. Dieser führt keine Berechnungen im eigentlichen Sinn durch. Für das motorische Verhalten wichtige Größen werden mit Hilfe neuronaler Netze zur Verfügung gestellt. Hierzu zählen der Luftaufwand, die Abgastemperatur, der effektive Mitteldruck sowie der Reibmitteldruck.

Auch die detaillierte Simulation von Kühlern (z.B. AGR- oder Ladeluftkühler) wäre für ein echtzeitfähiges Modell zu rechenzeitintensiv. Deshalb wird den Massenströmen die jeweilige Kühleraustrittstemperatur an den entsprechenden Stellen aufgeprägt. Auch diese Parameter werden mit neuronalen Netzen bereitgestellt.

Training der neuronalen Netze

Parallel zur Reduzierung der Komplexität der Geometrie werden die für die oben beschriebenen Vereinfachungen benötigten neuronalen Netze trainiert. Hierzu muss eine ausreichend große Datenbasis vorliegen. Diese wird in diesem Fall mit Hilfe des detaillierten Motormodells erstellt (linker Pfad in Bild 6.43).

Um aussagekräftige neuronale Netze zu erhalten, müssen alle für das Training notwendigen Eingangsgrößen in einem weiten Bereich variiert werden. Tabelle 6.3 zeigt die ausgewählten Parameter und ihre Grenzen:

Variable	Einheit	Minimum	Maximum
Drehzahl	min ⁻¹	500	2500
Spritzbeginn	°KW	-12	2
Einspritzdauer	μs	600	2500
AGR-Rate	%	0	40
Ladedruck	mbar	1000	4000
Ladelufttemperatur	K	290	350
Abgasgegendruck ²²	mbar	1000	5000

Tabelle 6.3: EingangsvARIABLEN für neuronale Netze mit Variationsgrenzen

Das detaillierte Modell wird nun so angepasst, dass es sich über die in Tabelle 6.3 angegebenen Größen variieren lässt. So muss zur Durchführung einer Simulationsrechnung für jede dieser Variablen ein Wert vorgegeben werden. Alle anderen Größen im Modell bleiben konstant bzw. werden vom Modell automatisch berechnet. Um eine ausreichend große Datenbasis zu erhalten, werden in dieser Arbeit 4500 Betriebszustände zum Trainieren der neuronalen Netze verwendet. Diese werden mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung generiert, wobei analog zum Vorgehen bei der Injektormodellierung ein Latin Hypercube-Verfahren verwendet wird.

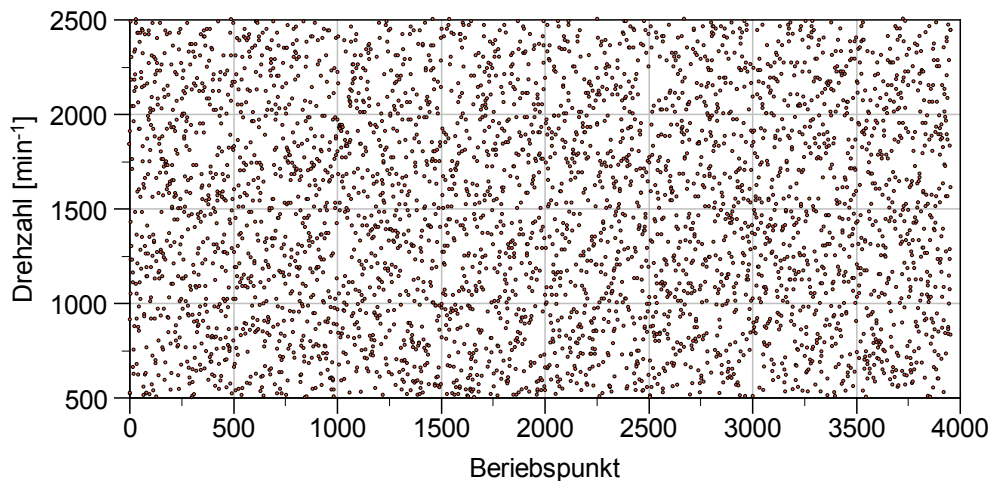


Bild 6.46: Optimale Verteilung von Datenpunkten im Versuchsraum

²² Abgasgegendruck vor Turbine

In Bild 6.46 ist diese Gleichverteilung am Beispiel der Drehzahl dargestellt. Anhand dieser Abbildung ist gut zu erkennen, dass der gesamte Wertebereich von [500,2500] über alle 4500 Betriebszustände gleichmäßig verteilt ist.

Die Erfahrung zeigte, dass die Genauigkeit der neuronalen Netze zunimmt, je gleichmäßiger die Daten über den Bereich verteilt sind [64]. Mit den so ermittelten Betriebspunkten kann schließlich eine Datenbasis für das Training der neuronalen Netze erzeugt werden. Zur Reduzierung der Rechendauer (4500 Betriebspunkte, 2-10 Minuten pro Betriebspunkt) wurde die Möglichkeit des verteilten Rechnens eingesetzt, d.h. die Betriebspunkte wurden gleichmäßig auf bis zu 25 Prozessoren verteilt.

Nachdem alle Betriebspunkte berechnet wurden, muss zunächst die Ergebnisgüte der einzelnen Punkte überprüft werden. Durch die vereinfachte Wahl der Variationsgrenzen der einzelnen Parameter kann es zu ungünstigen Parameterkombinationen kommen, die die Aussagekraft der neuronalen Netze später negativ beeinflussen. Um dies zu vermeiden, müssen solche unrealistischen Betriebspunkte mittels geeigneter Kriterien ausgefiltert werden. Hierzu kann beispielsweise der bei der Verbrennung umgesetzte Kraftstoffanteil verwendet werden. Sind diese unrealistischen Betriebspunkte ausgefiltert, kann mit dem eigentlichen Training der neuronalen Netze begonnen werden.

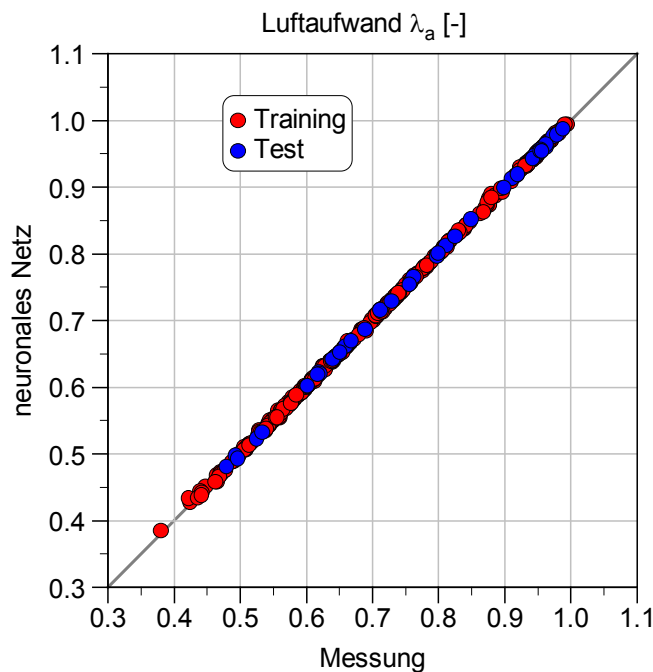


Bild 6.47: Korrelationsdiagramm Luftaufwand

Eine erste Abschätzung über die erzielte Modellgüte kann mit Hilfe eines Korrelationsdiagramms erfolgen. Bild 6.47 zeigt ein solches Korrelationsdiagramm am Beispiel des Luftaufwands. Gut zu erkennen sind zum einen die Winkelhalbierende, die den optimalen Bereich darstellt sowie die eingezeichneten Punkte für Trainings- (blau) und Testergebnisse (rot). In diesem Fall deutet das Korrelationsdiagramm auf ein sehr gutes neuronales Netz hin, da sowohl die Trainings- als auch die Testdatenpunkte sehr nahe an der Winkelhalbierenden liegen [63]. Liefern die neuronalen Netze zufriedenstellende Ergebnisse, können sie in das Mittelwertmodell implementiert werden. Anschließend muss das neu erstellte Mittelwertmodell noch überprüft werden. Dazu wurden, wie schon für die Überprüfung des detaillierten Motormodells, die zwölf ESC-Punkte herangezogen.

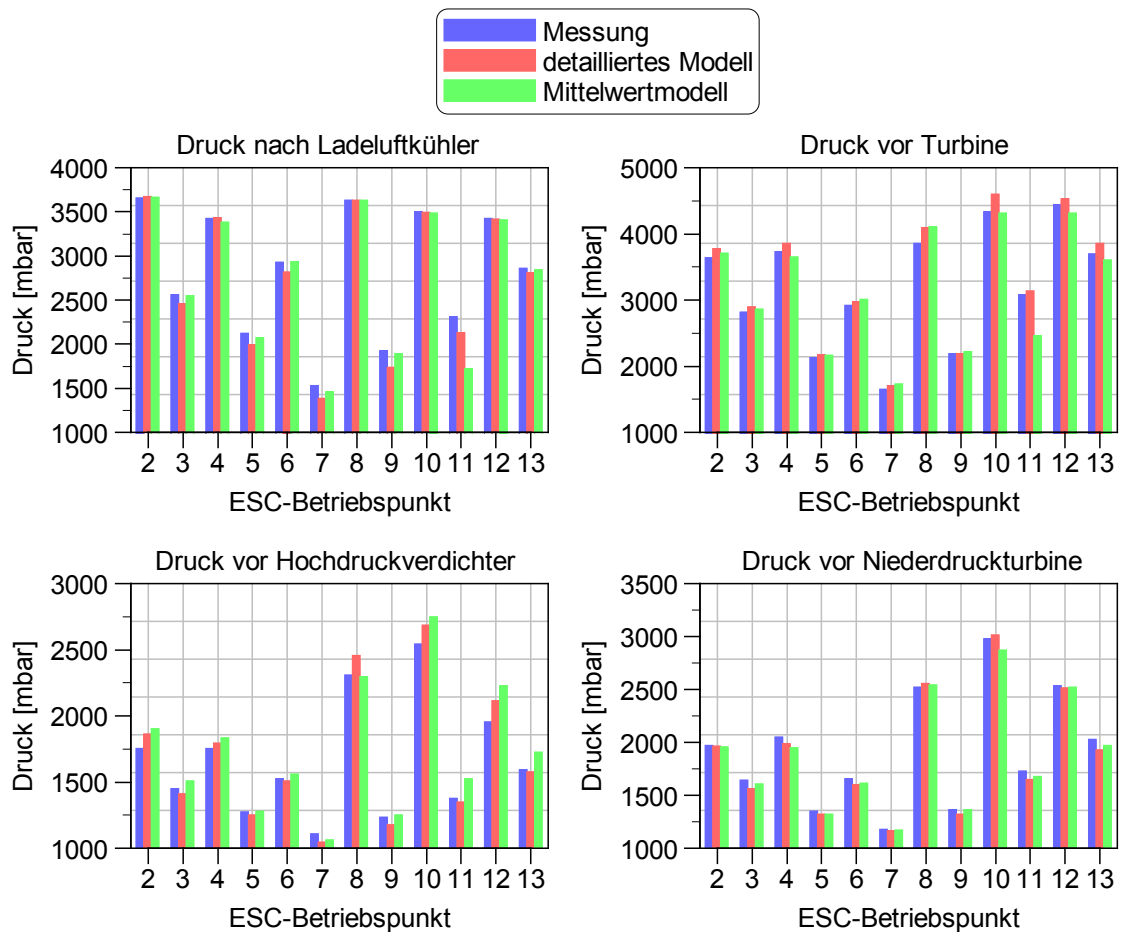


Bild 6.48: Vergleich: Messung – detailliertes Modell – Mittelwertmodell im ESC (Drücke; nach LLK, vor HD-Turbine, vor HD-Verdichter, vor ND-Turbine)

In Bild 6.48 sind wieder die vier Drücke im Luft- und Abgassystem dargestellt. Im ersten Diagramm (oben links) ist die auch im Mittelwertmodell sehr gute Übereinstimmung des Ladedrucks von Messung und Rechnung zu erkennen. Darunter ist der Druck vor

Hochdruckverdichter dargestellt. Auf der rechten Seite sind wieder die Abgasgegendrücke vor Turbine (oben) und zwischen den Turbinen (unten) abgebildet. Die Abweichungen zwischen Messungen und Modellergebnissen sind nur unwesentlich größer als beim detaillierten Modell in Bild 6.41.

Bild 6.49 zeigt analog zu Bild 6.42 das Spülgefälle, den Luftmassenstrom, die Temperatur vor Turbine und das Drehmoment. Wie auch bei den Drücken in Bild 6.48 zeigen auch die hier dargestellten Größen sehr gute Übereinstimmungen von Messung und Mittelwertmodell.

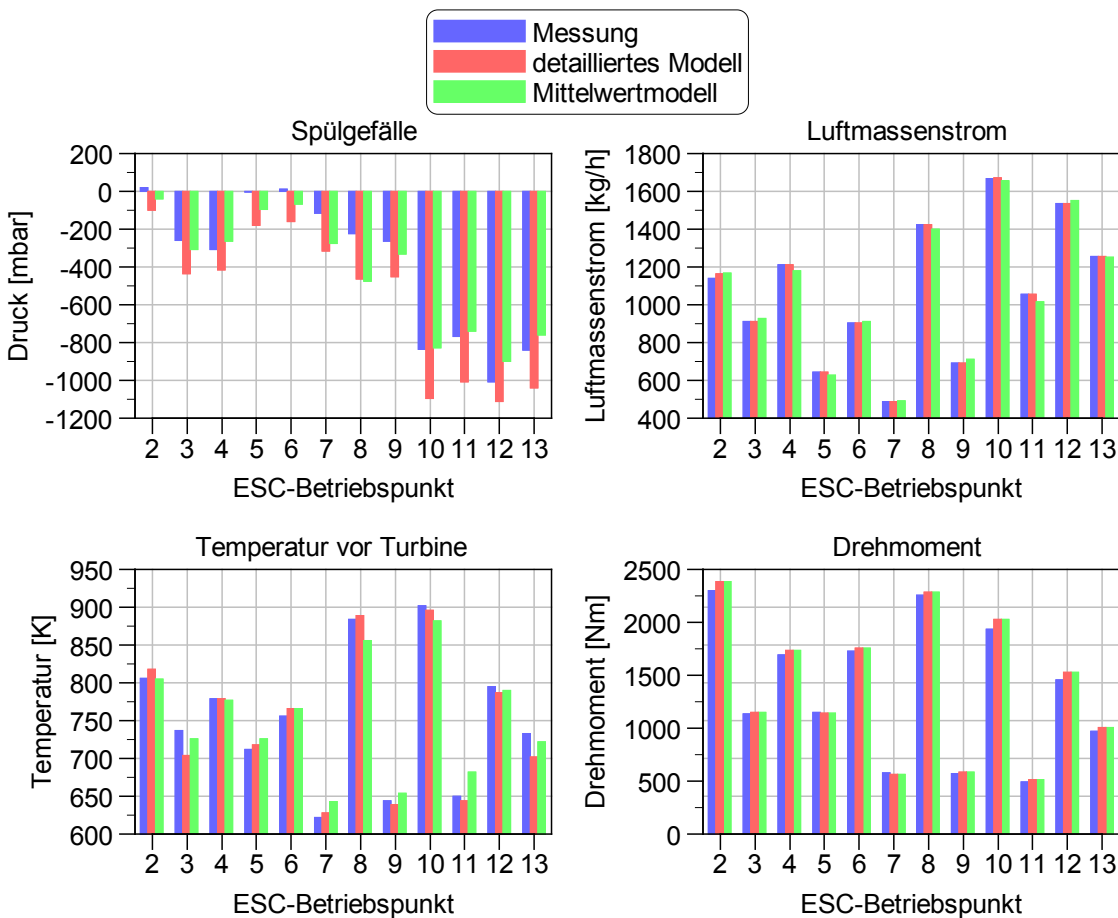


Bild 6.49: Vergleich: Messung – detailliertes Modell – Mittelwertmodell im ESC (Spülgefälle, Luftmasse, Temperatur vor Turbine, Drehmoment)

Im Gegensatz zu den in Bild 6.48 gezeigten Drücken, die im Mittelwertmodell vor allem von den Strömungseigenschaften der zusammengefassten Rohrleitungen und den Turboladern abhängen, sind die Größen in Bild 6.49 überwiegend von der Qualität der neuronalen Netzen abhängig. So wird die Temperatur vor Turbine direkt über ein neuronales Netz berechnet. Da sowohl der indizierte Mitteldruck als auch der Reibmitteldruck über neuronale Netze berechnet werden, hängt auch das Drehmoment

direkt von zwei neuronalen Netzen ab. Der Luftmassenstrom ist zum einen von den vereinfachten strömungstechnischen Eigenschaften in Luft- und Abgastrakt, zum anderen vom neuronalen Netz zur Bestimmung des Luftaufwandes λ_a abhängig.

Trotz der vorgenommenen Vereinfachungen des Modells ist auch hier wieder die sehr gute Übereinstimmung von Messung und Mittelwertmodell bemerkenswert.

Durch die vorgenommenen Vereinfachungen konnte die Rechenzeit deutlich reduziert werden. Die transiente Berechnung des 28 Minuten dauernden ESC-Zyklus kann mit dem Mittelwertmodell in weniger als 8 Minuten erfolgen. Damit ist mehr als die dreifache Echtzeit erreicht. Durch weitere softwaretechnische Maßnahmen kann die Rechengeschwindigkeit später weiter gesteigert werden.

6.3.4 Ergebnisse

Das Mittelwertmodell soll es ermöglichen, parallel zum Motorbetrieb wichtige motorische Größen, wie beispielsweise den Luftmassenstrom, den Ladedruck oder die AGR-Rate in Echtzeit zu berechnen. Um die Modellgüte beurteilen zu können, wurde das Modell mit Eingangsgrößen aus transienten und stationären Prüfstandsversuchen getestet.

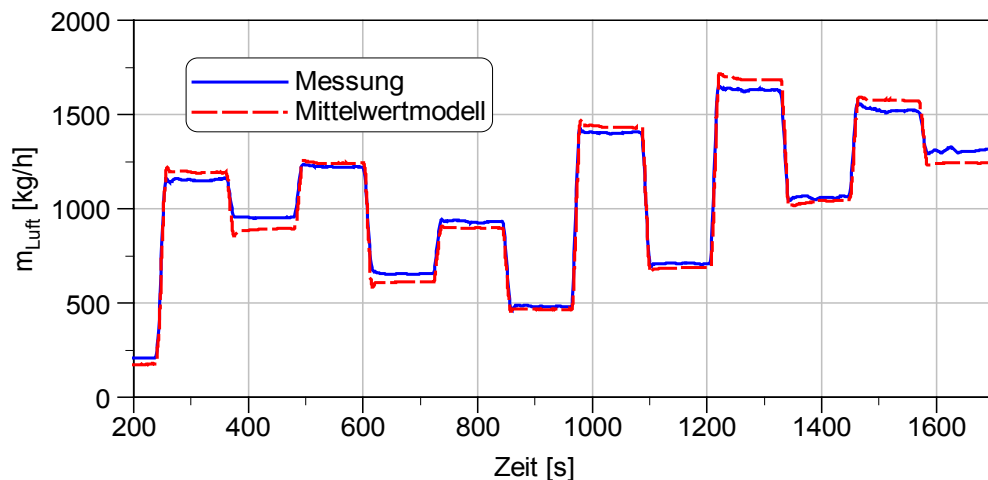


Bild 6.50: Luftmasse aus Modell und Messung im ESC

In Bild 6.50 sind die Ergebnisse der Luftmasse von Messung und Modell in einem ESC dargestellt. Das Modell gibt die Realität über den gesamten Zyklus ausgezeichnet wieder. Abgesehen von einigen Ausreißern liegt der relative Fehler meist unterhalb von 5 %. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt 0,99.

Ein im Fahrzeug verbauter Luftmassenmesser bietet derzeit einen Messfehler von 2 % im Neuzustand. Bei gealterten Luftmassenmessern steigt der Fehler auf ca. 3 – 5 % an.

Verglichen mit den Abweichungen eines im Fahrzeug verbauten Luftmassenmessers liefert das Modell eine gute Genauigkeit.

In Bild 6.51 ist ein Vergleich des Luftmassenstroms von Messung und Mittelwertmodell beim europäischen transienten Testzyklus (ETC) abgebildet. Es ist zu erkennen, dass das Modell in der Lage ist, auch das transiente Verhalten sehr gut abzubilden. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt dabei 0,96.

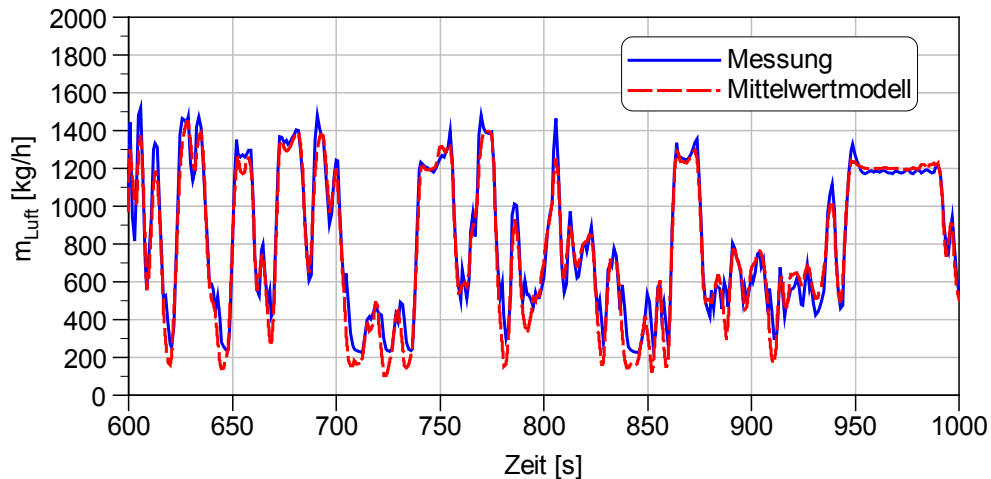


Bild 6.51: Luftmasse aus Modell und Messung im ETC

Damit ist eine Möglichkeit gegeben, wie die fehlende Größe Luftmassenstrom basierend auf einem physikalischen Modell des Motors ermittelt und dem Stickoxidmodell zur Verfügung gestellt werden kann.

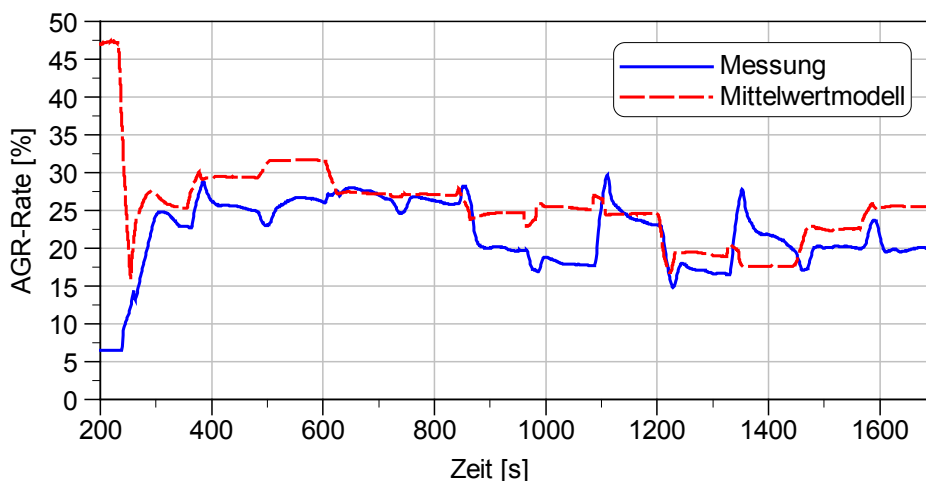


Bild 6.52: AGR-Rate aus Modell und Messung im ESC

Im Fall der in Bild 6.52 dargestellten AGR-Rate fallen deutlich größere Abweichungen auf. Bei weiteren Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die AGR-Bestimmung mittels CO_2 -Messung im Ladeluftrohr aufgrund der Luftführung am Versuchsmotor stark von der Position der Messsonde abhängig ist. Dies gilt vor allem im transienten Betrieb.

6.4 Integration der modellbasierten Eingangsgrößen

Das im vorangegangenen Abschnitt gezeigte Mittelwertmodell des Versuchsmotors wurde mit Hilfe der Simulationssoftware GT-SUITE entwickelt. Zur Kopplung der beiden Modelle wird das Motormodell in das Simulink- NO_x -Modell eingebettet (s. Bild 6.53).

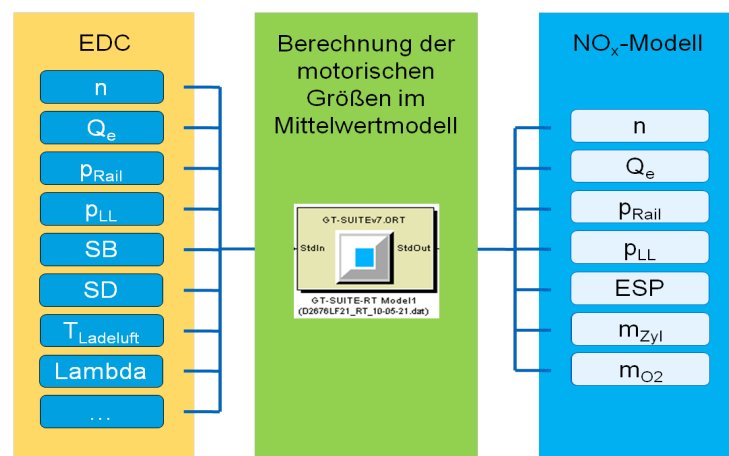


Bild 6.53: Eingebettetes GT-Modul in Simulink

Das Simulinkmodell übernimmt dabei die Aufgaben der I/O-Verwaltung und der Modellsteuerung und versorgt das GT-SUITE-Modell mit den benötigten Eingangsgrößen. Das GT-SUITE Mittelwertmodell berechnet das motorische Verhalten und gibt die fehlenden Ausgangsgrößen, wie z.B. Ladungsmasse oder Sauerstoffanteil im Brennraum, zurück. Diese Daten können nun zusammen mit weiteren Messgrößen weiterverarbeitet werden.

Bild 6.54 zeigt einen Vergleich der Stickoxidemission von Modell und Messung. Wie in Kapitel 6.2.5 sind auch hier im oberen Diagramm die Stickoxidemissionen aus Messung und Modell aufgetragen. Das untere Diagramm zeigt die kumulierte Stickoxidemission.

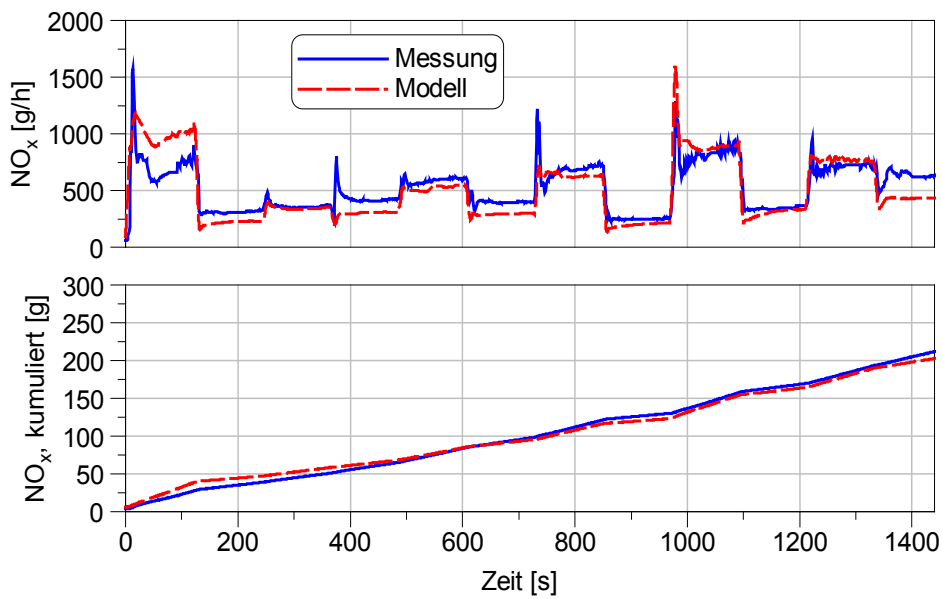


Bild 6.54: NO_x -Emission im ESC mit modellbasierten Eingangsgrößen

Es ist gut zu erkennen, dass der Fehler in einigen Betriebspunkten deutlich zugenommen hat. Die relative kumulierte Abweichung liegt bei $a = 6,7\%$, der mittlere relative Fehler berechnet sich zu $e_{rel} = 9,4\%$. Auch das Bestimmtheitsmaß deutet mit $R^2 = 0,77$ auf eine schlechtere Übereinstimmung von Modell und Messung als beim rein mesdatenbasierten NO_x -Modell hin. Der prinzipielle Verlauf mit NO_x -Peaks bei Lastsprüngen wird aber nach wie vor sehr gut wiedergegeben.

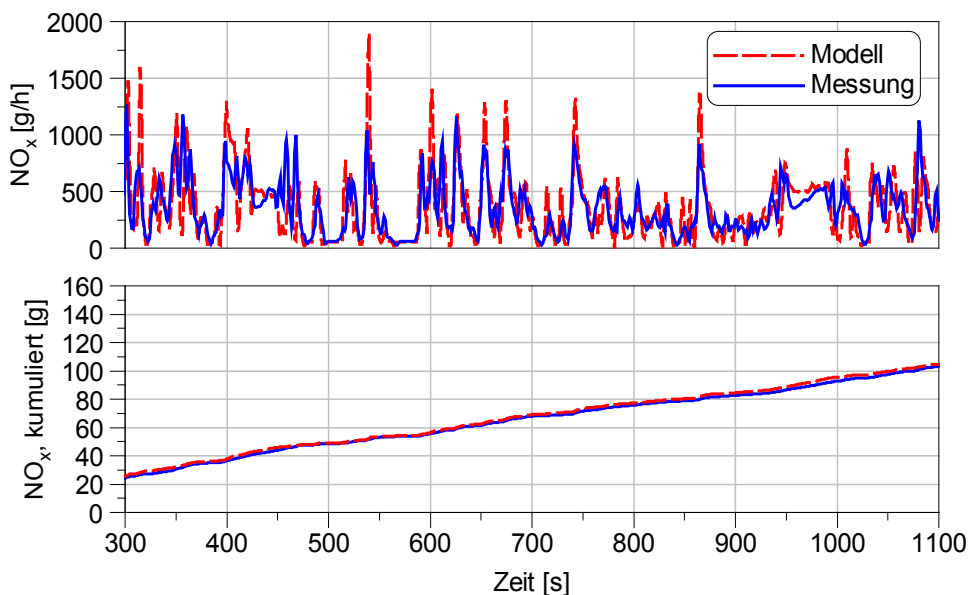


Bild 6.55: NO_x -Emission im ETC mit modellbasierten Eingangsgrößen

In Bild 6.55 sind die gemessene und die vom Modell berechnete Emission im transienten Zyklus (ETC) aufgetragen. Die beschriebenen transienten Effekte wurden mit Hilfe des oben eingeführten Korrekturfaktors f_{dyn} kompensiert.

Betrachtet man die Verläufe im oberen Diagramm, kann von einer guten Übereinstimmung ausgegangen werden. Die kumulierte Stickoxidemission im unteren Diagramm untermauert dies. Der mittlere relative Fehler kann mit $e_{\text{rel}} = 8,7\%$ angegeben werden, die kumulierte Abweichung beträgt $a = 3,7\%$.

Im Gegensatz zum betrachteten Stationärzyklus (vgl. Bild 6.25 und 6.54) fällt auf, dass der kumulierte Fehler abnimmt, wenn die modellbasierten Eingangsgrößen verwendet werden (vgl. Bilder 6.27 und 6.55). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Modelleingänge wie AGR-Rate und Luftmasse von der Messtechnik am Prüfstand unter transienten Bedingungen verzögert erfasst werden, wohingegen das Mittelwertmodell schneller auf Betriebspunktänderungen reagiert.

Trotz der in Kapitel 6.3 gezeigten sehr guten Übereinstimmung der Luftmasse aus Modell und Messung wirkt sich die Kopplung vor allem im Stationärbetrieb, in dem transiente Effekte vernachlässigt werden können, negativ auf die Ergebnisse des NO_x -Modells aus. Daher soll im Folgenden der Einfluss der modellbasierten Eingangsgrößen auf das Stickoxidmodell untersucht werden.

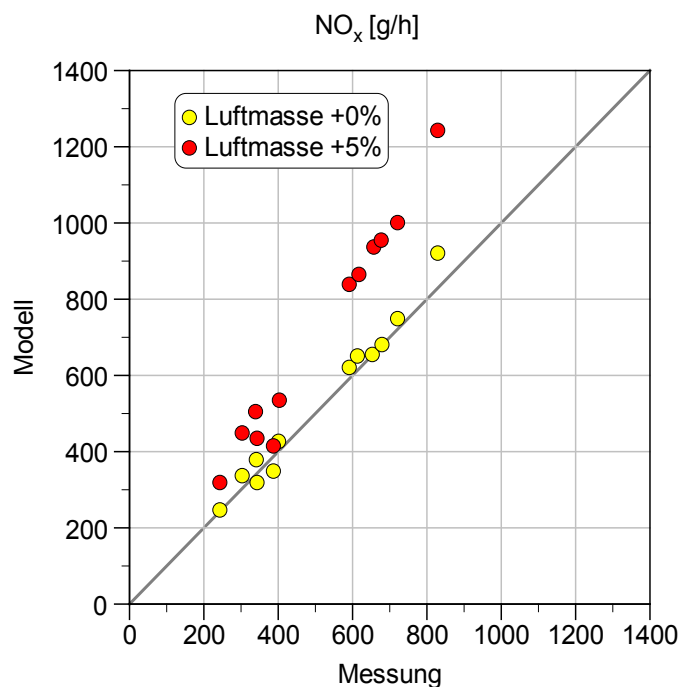


Bild 6.56: Einfluss der Luftmasse auf das Modell

Hierzu wurde die Stickoxidemission eines ESC-Zyklus mit dem Stickoxidmodell und gemessener Luftmasse nachgerechnet. In einer zweiten Rechnung wurde ein Offset von 5 % auf das Luftmassensignal gegeben und damit erneut die Stickoxidemission berechnet. Die Ergebnisse beider Rechnungen sind in einem Korrelationsdiagramm (Bild 6.56) dargestellt.

Hier ist der Einfluss des verfälschten Luftmassensignals sehr gut ersichtlich. Während der mittlere relative Fehler bei unverfälschter Luftmasse bei ca. 6 % liegt, bewirkt der Offset von 5 % auf das Luftmassensignal eine deutliche Verschlechterung des Ergebnisses des NO_x-Modells. Der mittlere relative Fehler beträgt dabei ca. 25 %.

Der Einfluss des Fehlers der AGR-Rate wurde ebenfalls mit Hilfe eines ESC ermittelt. In Bild 6.57 ist das zugehörige Korrelationsdiagramm abgebildet. Zu erkennen ist der eher geringe Einfluss eines Fehlers der AGR-Rate. Durch einen Fehler in der AGR-Rate von 5 % treten bei den NO_x-Emissionen nur geringe Abweichungen bis zu 3 % auf (siehe Bild 6.57).

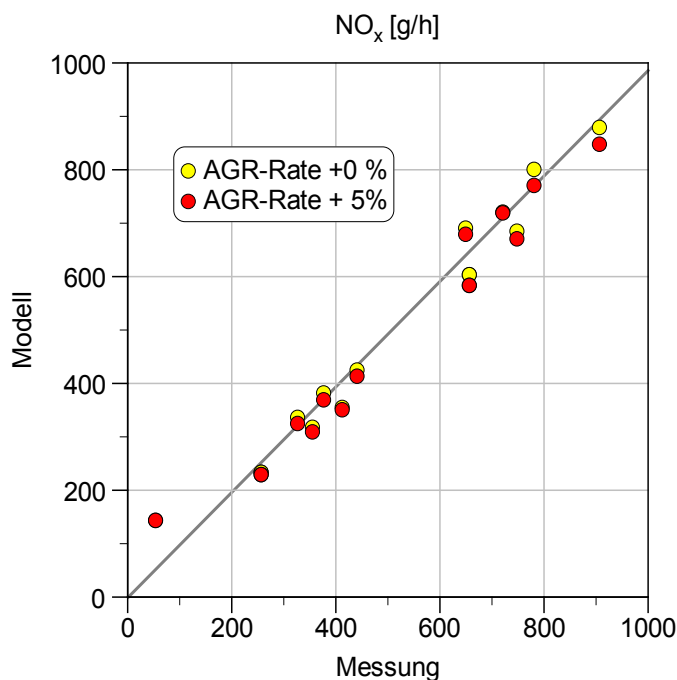


Bild 6.57: Einfluss der AGR-Rate auf das Modell

Damit ist die Abhängigkeit des Modellausgangs von der AGR-Rate deutlich geringer als erwartet. Erklären lässt sich das Verhalten durch Unsicherheiten bei der messtechnischen Bestimmung der AGR-Rate. Weiterführende Prüfstandsuntersuchungen und 3D-CFD-Simulationen haben gezeigt, dass es durch ungünstige Strömungseffekte zu einer Ungleichverteilung der AGR im Ladeluftrohr kommen kann [79]. Dadurch

erhalten die einzelnen Zylinder zum einen unterschiedliche Restgasanteile, zum anderen wird die Genauigkeit der messtechnisch erfassten AGR-Rate negativ beeinflusst. Diese Messunsicherheiten führen bei der Generierung des Polynoms über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate zu einer unscharfen Abbildung dieses Einflusses, was schließlich zu einer verringerten Bestimmtheit des Modells im Hinblick auf diese Eingangsgröße führt.

6.5 Implementierung des Modells im Steuergerät

In einem weiteren Schritt wurde das gekoppelte Modell mit Hilfe eines Rapid Prototyping Moduls (s. Anhang) im Steuergerät des Forschungsmotors implementiert. Damit ist es möglich, Messgrößen aus dem Steuergerät direkt in das Modell einzubinden. Gleichzeitig verfügt der Forschungsmotor über einen NO_x -Sensor (s. Kapitel 5.2.1), dessen Messsignal ebenfalls im Steuergerät zur Verfügung steht.

Mit diesem Messaufbau wurde das Modell abschließend am Motorenprüfstand parallel zum Motorbetrieb verifiziert. Dazu wurden verschiedene Testzyklen sowie einige dynamische Kurztests mit zufälligen Drehzahl/Einspritzmengen-Kombinationen absolviert.

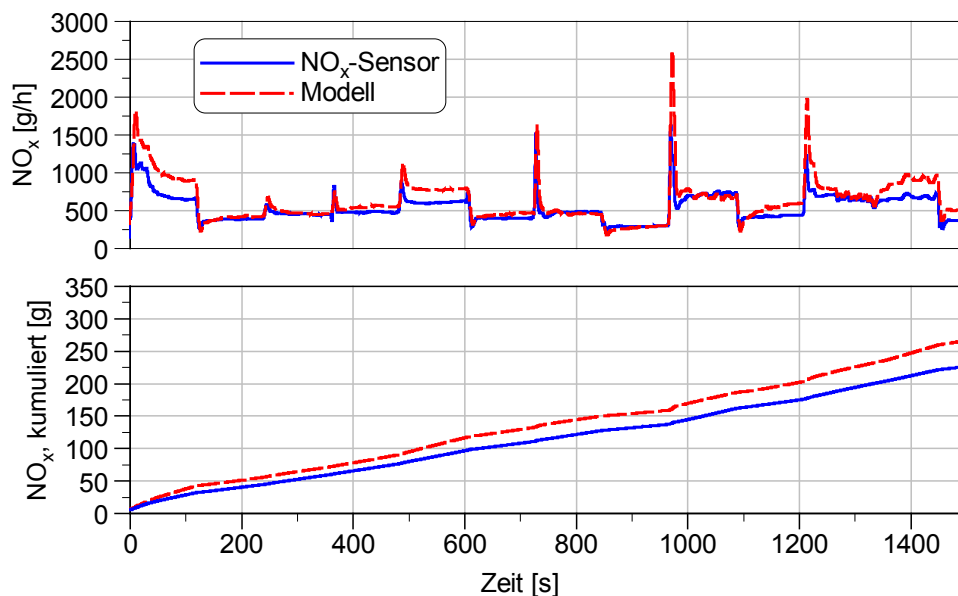


Bild 6.58: Vergleich der NO_x -Emission von NO_x -Sensor und Modell im ESC, Onlinemessung am Prüfstand

In Bild 6.58 sind die vom Modell errechneten Stickoxidemissionen denen des NO_x -Sensors gegenübergestellt. Beide Kurven zeigen über einen großen Bereich eine sehr

gute Übereinstimmung. Die Emissionsspitzen beim Betriebspunktwechsel werden sowohl vom Modell als auch vom NO_x-Sensor wiedergegeben. Der mittlere relative Fehler beträgt $e_{rel} = 16,2 \%$, die relative kumulierte Abweichung $a = 15,4 \%$.

Abschließend soll noch ein dynamischer Kurztest betrachtet werden. Dazu wurden während 160 Sekunden Drehzahl und Last zufällig variiert. Bild 6.59 zeigt die Verläufe von Drehzahl und normierter Einspritzmenge während dieses Kurztests.

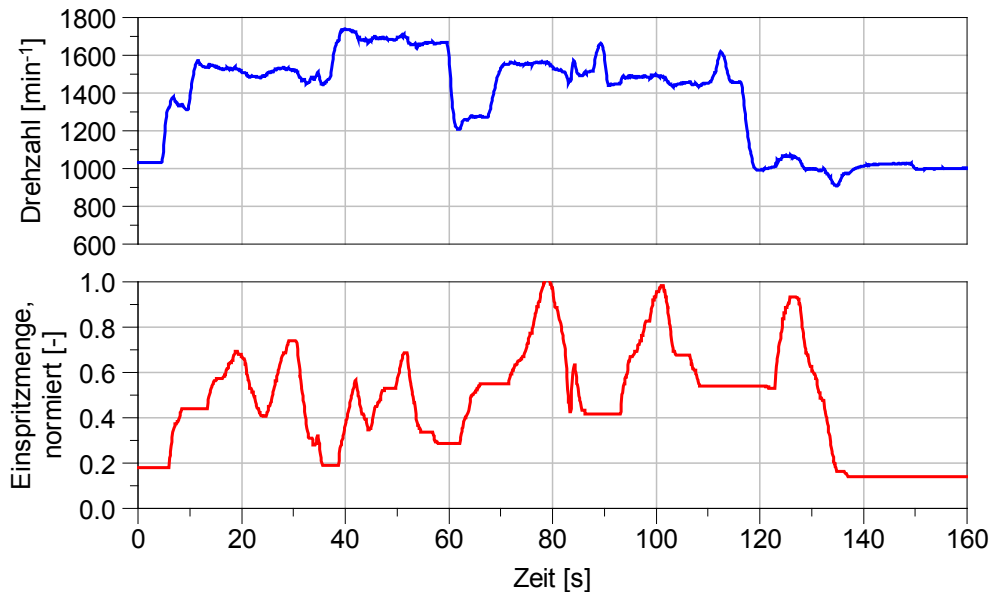


Bild 6.59: Drehzahl und Einspritzmenge (Kurztest I)

In Bild 6.60 ist der Vergleich der Stickoxidemission von NO_x-Sensor und Modell dargestellt. Auch hier ist wieder, wie bereits in den vorangegangenen dynamischen Tests, das trägere Verhalten der NO_x-Messung gegenüber dem NO_x-Modell zu erkennen.

Der prinzipielle Verlauf von Sensormessung und Modell zeigt aber eine sehr gute Übereinstimmung. Der mittlere relative Fehler beträgt $e_{rel} = 7,7 \%$, die relative kumulierte Abweichung $a = 9,5 \%$. Damit liegen die berechneten Werte im Bereich der Sensorgenauigkeit.

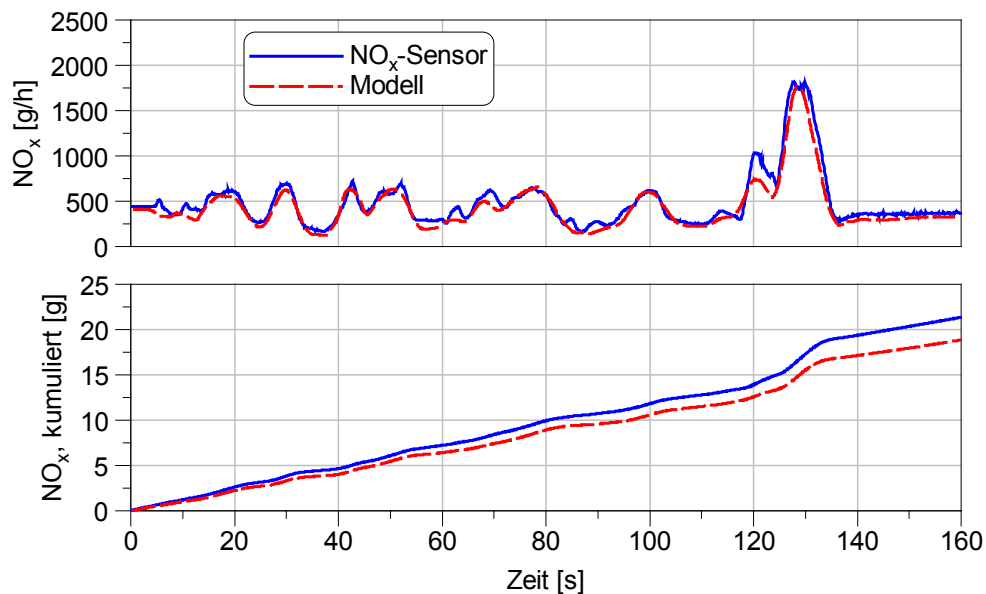


Bild 6.60: Vergleich der NO_x-Emission von NO_x-Sensor und Modell (Kurztest I), Onlinemessung am Prüfstand

6.6 Fazit

Wie in Abschnitt 6.4 gezeigt, besitzt die Luftmasse einen sehr großen Einfluss auf das Ergebnis des Stickoxidmodells. Damit wäre die Bereitstellung eines genaueren Luftmassensignals ein erster Ansatz zur Verbesserung des Modells. Das oben gezeigte Motormodell ist in der Lage, die Luftmasse mit einem Fehler von ca. 5 % zu berechnen. Bei einem im Fahrzeug verbauten Luftmassenmesser muss über die Lebensdauer ebenfalls mit einem Messfehler von 3 – 5 % gerechnet werden. Damit ist auch mit einem Luftmassenmesser keine wesentliche Genauigkeitssteigerung des NO_x-Modells über die Lebensdauer des Aggregats zu erwarten.

Die zweite Größe, die dem NO_x-Modell mit Hilfe des Mittelwertmodells zur Verfügung gestellt wird, ist die AGR-Rate. Wie oben bereits erwähnt, hat sich während dieser Arbeit gezeigt, dass sich die messtechnische Erfassung der AGR-Rate weitaus schwieriger gestaltet als angenommen. Wie in Kapitel 6.4 diskutiert, kann es durch Strömungseffekte zu einer Ungleichverteilung der AGR auf die einzelnen Zylinder kommen, wodurch die Stickoxidemissionen der einzelnen Zylinder zum Teil stark variieren. Das weitaus größere Problem für ein phänomenologisches Modell ist aber die Unsicherheit bei der messtechnischen Bestimmung der AGR-Rate. Durch eine Verbesserung der AGR-Gleichverteilung und damit auch der messtechnischen AGR-Bestimmung könnten weitere Modellverbesserungen erzielt werden.

Eine weitere Möglichkeit, die Modellgüte zu verbessern, wäre die Aufteilung des Modells in mehrere lokale Untermodelle (s. Bild 6.61). Ein Nachteil davon wäre allerdings der sich damit deutlich erhöhende Versuchs- und Modellierungsaufwand.

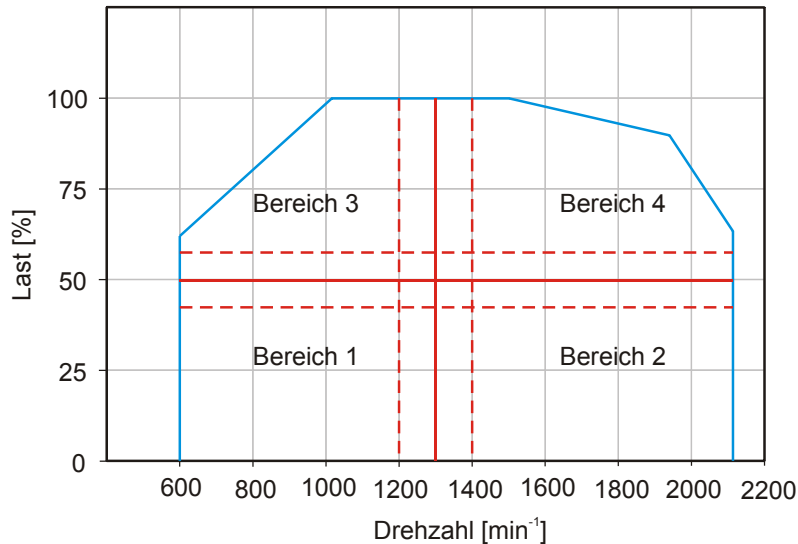


Bild 6.61: Unterteilung des Motorkennfeldes [65]

Weiteres Potenzial zur Modellverbesserung steckt in den Prüfstandsmessungen bzw. der statistischen Versuchsplanung. Die Parametrierung von Kennfeldern und Funktionen im Steuergerät ist sehr aufwendig und beschränkt sich daher auf den regulären Betriebsbereich. Durch die große Variationsbreite im Zusammenhang mit der statistischen Versuchsplanung können jedoch Betriebsbereiche auftreten, an denen Kennfelder und Funktionen im Steuergerät (z.B. Injektorkennfelder oder Ladedruckregler) nur unzureichend bedatet sind. Damit lassen sich diese Betriebspunkte nicht exakt einstellen und der erzeugte Datensatz verliert an Aussagekraft gegenüber dem optimalen Versuchsplan. Verbesserungen auf diesem Gebiet würden allerdings zu einem gesteigerten Applikationsaufwand und damit zu einer Ausweitung der Prüfstandsversuche führen. Grundsätzlich kann aber festgehalten werden, dass es möglich ist, die Stickoxidbildung eines modernen Dieselmotors mit Hilfe eines Polynomansatzes mit guter Genauigkeit empirisch zu beschreiben. Wichtig für eine hohe Modellgüte sind neben der geeigneten Auswahl der Eingangsparameter vor allem die hohe Güte der Modelleingänge. Dazu können neben Messwerten auch modellbasierte Größen verwendet werden. Ein wesentlicher Vorteil der modellbasierten Stickoxidbestimmung gegenüber NO_x-Sensoren ist die schnellere Reaktionszeit des Modells. Diese kann insbesondere bei der (Vor-)Steuerung von SCR-Systemen von Vorteil sein, da nicht erst auf die im Abgas vorhandene Stickoxidmenge reagiert werden kann.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Die Simulation der dieselmotorischen Verbrennung und Schadstoffbildung ist aus der Motorenentwicklung und –forschung nicht mehr wegzudenken. Im Laufe der Zeit wurde eine Vielzahl an Modelltypen entwickelt, die je nach Anwendungsfall eingesetzt werden können. Auf der anderen Seite wächst die Komplexität von Verbrennungsmotoren, getrieben von Kundenwünschen und neuen, strengeren Emissionsregularien immer schneller an. Um trotz der gewachsenen Komplexität immer kürzere Produktentwicklungszeiten erreichen zu können, ist die Simulation auch im Bereich der Applikation zu einem wichtigen Hilfsmittel geworden. Hierbei sind zwei Pfade zu unterscheiden. Zum einen wird die Simulation eingesetzt, um Steuergerätefunktionen vorab zu bedaten und dadurch teure Prüfstandszeiten einzusparen. Außerdem kann durch die Simulation das Verständnis für komplexe Zusammenhänge gesteigert werden. Zum anderen werden neben den klassischen, kennfeldbasierten Modellen immer häufiger modellbasierte Steuerungsstrategien eingesetzt, wodurch der Applikationsaufwand gesenkt werden kann. Hierzu können empirische Modelle unterschiedlichster Art verwendet werden. In dieser Arbeit wurden dazu insbesondere neuronale Netze und Polynomansätze vorgestellt. Dabei steht den Vorteilen der extrem kurzen Rechenzeit und eines minimalen Modellierungsaufwandes der Nachteil gegenüber, dass diese Modelltypen nur über einen sehr eingeschränkten Gültigkeitsbereich verfügen. Extrapolationen außerhalb des messtechnisch validierten Bereiches sind kaum möglich.

In dieser Arbeit wurde gezeigt, wie die Stickoxidemission eines modernen, hochaufgeladenen Dieselmotors mit Hilfe eines empirischen Modellansatzes auf Basis eines Polynoms berechnet werden kann. Dazu wurden, außer den in der Serienapplikation vorhandenen, keine zusätzlichen Sensoren verwendet. Um ein möglichst aussagekräftiges Modell zu erhalten, wurden zunächst die aus den Stickoxidbildungsmechanismen hervorgehenden Einflussparameter am Prüfstand untersucht. Anschließend erfolgte die Auswahl der relevanten Parameter. Diese wurden mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung am Versuchsmotor variiert. Aus den erhaltenen Versuchsdaten wurde schließlich das empirische Stickoxidmodell auf Basis der multiplen linearen Regression erstellt. Mit diesem Ansatz konnte eine sehr gute Übereinstimmung von Modell und Messung sowohl im stationären als auch im transienten Motorbetrieb erreicht werden.

Fehlende Eingangsgrößen, wie die Luftmasse oder die AGR-Rate, wurden über ein Mittelwertmodell des Motors berechnet und dem Stickoxidmodell als Eingangsgröße bereitgestellt. Das Mittelwertmodell selbst wurde von einem detaillierten 1D-Modell des Motors abgeleitet. Zur Verringerung der Rechenzeit wurden dazu Rohrleitungen vereinfacht und zusammengefasst. Einige wichtige Größen müssen dem Mittelwertmodell bereitgestellt werden, wie z.B. Abgastemperatur vor Turbine oder der effektive Mitteldruck. Diese geschieht mit Hilfe von neuronalen Netzen, die wiederum mit Ergebnissen des detaillierten Motormodells trainiert wurden.

Mit diesem Modellaufbau ist es möglich, die Stickoxidemission parallel zum Motorbetrieb in Echtzeit zu berechnen. Der Modellausgang, also die Stickoxidemission, kann dann beispielsweise zur Steuerung eines SCR-Abgasnachbehandlungssystems verwendet werden. Hierfür bietet die im Vergleich zum NO_x -Sensor schnelle Reaktionszeit des Modells Vorteile, da durch die frühzeitige Kenntnis der NO_x -Menge eine Vorsteuerung erfolgen kann. Von Nachteil ist die etwas geringere Genauigkeit des Modells im Vergleich zum NO_x -Sensor im Stationärbetrieb. Diese hängt neben der Güte der Eingangsgrößen vor allem von den zur Erstellung des Polynoms verwendeten Versuchspunkten ab. Bei der Verwendung des NO_x -Modells zur Steuerung eines SCR-Systems ist zu erwarten, dass die etwas geringere Genauigkeit durch das bessere Ansprechverhalten überkompensiert wird.

Durch die starke Abhängigkeit der Modellgüte von der Qualität der Modelleingänge wirkt sich auch eine Verbesserung der Eingangsgrößen positiv auf das Modellergebnis aus. Hierbei sind vor allem die Luftmasse und die AGR-Rate zu nennen, da diese mit Hilfe des Motormodells berechnet werden. Das bedeutet, dass durch eine weitere Verbesserung der Qualität des Mittelwertmodells eine Modellverbesserung möglich wäre.

Weiteres Verbesserungspotenzial liegt in der Durchführung der Motorversuche am Prüfstand. Durch unzureichend bedatete Kennfelder oder Reglerparameter im Steuergerät des Versuchsmotors konnten die mit Hilfe der DoE erstellten optimalen Versuchspläne nicht vollständig experimentell vermessen werden. Damit wird die Aussagekraft der Versuchspläne reduziert, was die Modellgüte negativ beeinflussen kann. Darüber hinaus führen Unsicherheiten bei der Erfassung der AGR-Rate zu einer Dämpfung des Einflusses dieser Eingangsgröße im Polynommodell. Um diese Unschärfe eliminieren zu können, wurden bereits erste Versuche mit verbesserter AGR-Messung durchgeführt.

7.2 Ausblick

Mit dem in dieser Arbeit gezeigten Modell ist die Bestimmung der Stickoxid-Rohemission an einem Nutzfahrzeug-Dieselmotor mit Abgasrückführung möglich. Damit steht die Stickoxidrohmission als Eingangsgröße für die Steuerung eines SCR-Systems zur Verfügung. Ein NO_x -Sensor für die messtechnische Bestimmung der Stickoxidrohmission könnte somit entfallen. Weitere Untersuchungen werden zeigen, ob und in welcher Form das Modell im Steuergerät eines Nutzfahrzeugmotors implementiert werden kann. Kritisch ist an dieser Stelle die relativ hohe Komplexität und die damit verbundene benötigte Rechenleistung des Modells zu beurteilen. Für die Berechnung dieses Modells ist die Rechenleistung aktueller Steuergeräte nicht ausreichend. Betrachtet man die aktuelle Entwicklung auf dem Gebiet der Elektronik, werden zukünftige Steuergerätegenerationen in der Lage sein, auch derart komplexe Modelle problemlos berechnen zu können.

Neben der ursprünglich angedachten Verwendung des Modells im Steuergerät eines Nutzfahrzeug-Dieselmotors zur modellbasierten Steuerung eines Abgasnachbehandlungssystems kommen noch weitere Anwendungsmöglichkeiten in Betracht. So kann das Stickoxidmodell beispielsweise in vorhandene Simulationsprogramme integriert werden. Damit wird eine effiziente Möglichkeit geschaffen, ohne nennenswerten Rechenaufwand plausible Eingangsdaten für die Simulation von Abgasnachbehandlungssystemen zu erhalten. Des Weiteren ist eine Implementierung des Modells in ein HiL-System denkbar. Durch die Modellstruktur, insbesondere durch die Modellierung des gesamten Systems „Verbrennungsmotor“ mit Turboladern, Kühlern und AGR-Strecke scheint eine Verwendung des Modells in HiL-Prüfständen ohne größeren zusätzlichen Aufwand realisierbar.

8 Literaturverzeichnis

- [1] **Mollenhauer, K. (Hrsg.)** *Handbuch Dieselmotoren, 2. Auflage* Heidelberg, Berlin : Springer Verlag, 2002
- [2] **Robert Bosch GmbH** *Kraftfahrtechnisches Handbuch, 25. Auflage* Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlag GmbH, 2003
- [3] **Klöpfer, F.** *Entwicklung und Einsatz modellgestützter Online-Methoden zur Parametrierung von Verbrennungsmotoren am Prüfstand* München : Dissertation, Technische Universität München, 2009
- [4] **Herrmann, O. E.** *Emissionsregelung bei Nutzfahrzeugmotoren über den Luft- und Abgaspfad* Düsseldorf : Dissertation, RWTH Aachen, 2005
- [5] **Rothe, D.** *Physikalische und chemische Charakterisierung der Rußpartikelemission von Nutzfahrzeugdieselmotoren und Methoden zur Emissionsminderung* München : Dissertation, TU München, Lehrstuhl für Hydrochemie, Hydrogeologie und Umweltanalytik, 2005
- [6] **Solomon, G. et.al.** *Climate Change 2007, The physical science basis (Intergovernmental Panel on Climate Change)* Cambridge : Cambridge University Press, 2007
- [7] **Basshuysen, R. van, Schäfer, F.** Motorlexikon.de - NOx-Partikel-Trade off [Online] [Zitat vom: 07. 12 2010] <http://www.motorlexikon.de/?l=4796>
- [8] **Wachtmeister, G., et.al.** *NEMO - Niedrigstemissions LKW-Dieselmotor* München : Bayerische Forschungsförderung, Abschlussbericht, 2009
- [9] **Emmerling, G., Döring, A., Walde, F.** *Motoren und Abgasnachbehandlungskonzepte für schwere Nutzfahrzeuge in der Zukunft* Ludwigsburg : 5. Internationales Forum Abgas- und Partikelemission, 2008
- [10] **Robert Bosch GmbH (Hrsg.)** *Dieselmotor-Management: Systeme und Komponenten* s.l. : 3. Auflage, Vieweg-Verlag, 2003
- [11] **Markus, E., Randoll, H., Knauer, M.** *Aktuelle Entwicklung bei Motorsteuerungen* s.l. : ATZ elektronik, 2006
- [12] **Hafner, M.** *Modellbasierte stationäre und dynamische Optimierung von Verbrennungsmotoren am Motorenprüfstand unter Verwendung neuronaler Netze* Darmstadt : Dissertation, TU Darmstadt, 2002
- [13] **Robert Bosch GmbH** *Diesel-Speichereinspritzsystem Common Rail* Plochingen : Robert Bosch GmbH, Stuttgart, 2004
- [14] **Wloka, J., Wachtmeister, G.** *Einspritztechnik für Verbrennungskraftmaschinen* München : Vorlesungsmanuskript, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen Technische Universität München, 2011

- [15] **Hadler, J., et.al.** *Der neue 2.0l TDI-Motor von Volkswagen zur Erfüllung niedrigster Abgasgrenzwerte* Wien : 29. Internationales Wiener Motorensymposiums, 2008
- [16] **Alfieri, E., Amstutz, A., Guzzella, L., Schilling, A.** *Emissionsgeregelte Dieselmotoren* s.l. : MTZ, 11-2007
- [17] **Nitzke, H.-G., Bargende, M., Reuss, H.-C.** *Verbrennungsregelung* Frankfurt : Forschungsantrag, Forschungskuratorium Maschinenbau e.V., 2007
- [18] **Stiesch, G., Merker, G.P.** *Simulation der dieselmotorischen Verbrennung - Möglichkeiten und Grenzen* Dresden : 5. Dresdner Motorenkolloquium, 2003
- [19] **Weiß, J.** *Ein iteratives Verfahren zur rechnergestützten Auslegung von Aufladesystemen* Bochum : Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 1994
- [20] **Bauer, W.** *Empirisches Modell zur Bestimmung des Strahlkegelwinkels bei Diesel-Einspritzdüsen* München : Dissertation, Technische Universität München, 2007
- [21] **Baumgarten, C., Merker, G.-P.** *Modellierung des Primärzerfalls bei der Hochdruck-Dieseleinspritzung* s.l. : Motortechnische Zeitschrift, 2004
- [22] **Pischinger, F., Schulte, H., Jansen, J.** *Grundlagen und Entwicklungslinien der dieselmotorischen Brennverfahren* s.l. : VDI Bericht 714, "Die Zukunft des Dieselmotors", 1988
- [23] **Sitkei, D.** *Kraftstoffaufbereitung und Verbrennung bei Dieselmotoren* Berlin : Springer Verlag, 1964
- [24] **Wachtmeister, G.** *Skriptum zur Vorlesung Verbrennungsmotoren* München : LVK TU München, 2005
- [25] **Bach, E.** *Verbrennungsmotoren – Gemischbildung, Zündung und Verbrennung im Dieselmotor* Dresden : Lehrbrief, Hochschule für Wissenschaft und Technik, 2003
- [26] **Straus, T.** *Simulation der Verbrennung und NOx-Bildung in einem direkteinspritzenden Dieselmotor mit externer Abgasrückführung* Aachen : Dissertation, RWTH Aachen, 1999
- [27] **Wölfle, M.** *Untersuchung der Schadstoffbildung im Zylinder eines direkteinspritzenden Pkw-Dieselmotors* Aachen : Dissertation, RWTH Aachen, 1994
- [28] **Pischinger, S.** *Verbrennungsmotoren, Band II* Aachen : Vorlesungsumdruck, RWTH Aachen, 2004
- [29] **Chmela, F., Jager, P., Orthaber, G.** *Emissionsverbesserung von direkteinspritzenden Dieselmotoren durch Formung des Einspritzverlaufs* s.l. : FVV-Vorhaben Nr. 663, Abschlussbericht, 1999
- [30] **Dohle, U., Dürnholz, M., Kampmann, S., Hammer, J., Hinrichsen, C., Wintrich, T., Kropp, M.** *Die 4. -Generation Common Rail Dieseleinspritzung – Neue Ansätze zur Erfüllung höchster Kundenerwartung und gesetzlicher Anforderungen* Berlin : 4. Tagung Diesel- und Benzindirekteinspritzung, 2004

-
- [31] **Lämmermann, R., Held, W.** *Nutzfahrzeugmotoren und Abgasnachbehandlung* Ludwigsburg : 4. Internationales Forum Abgas- und Partikelemission, 2006
- [32] **Gärtner, U.** *Die Rolle des Einspritzsystems in zukünftigen Motorkonzepten für HeavyDuty Anwendungen* Dresden : VDI-Tagung, 2004
- [33] **Hiroyasu, H.** *Diesel Engine Combustion and its Modeling* s.l. : COMODIA 85, Seite 53 ff, 1985
- [34] **Groenendijk, A.** *Gemischbildung und Verbrennung bei homogener und Teilhomogener Dieselverbrennung* Braunschweig : Dissertation, TU Braunschweig, 2003
- [35] **Vanhaelst, R.** *Optische und thermodynamische Methoden zur Untersuchung der teilhomogenen Dieselverbrennung* Magdeburg : Dissertation, Universität Magdeburg, 2003
- [36] **Fenimore, C.P.** *Studies of fuel-nitrogen in rich flame gases* s.l. : Proc. Comb. Inst., 1979
- [37] **Schmitt, F.** *Numerische Simulation der Bildung und der Reduktion von Stickoxiden in unterschiedlichen Anwendungsfällen* s.l. : VDI Fortschrittsbericht, Reihe 12, Nr. 359, 1998
- [38] **Zeldovich, A.** *The oxidation of Nitrogen in Combustion and Explosions* s.l. : Acta Physicochim. USSR, 1946
- [39] **Merker, G.P., Schwarz, C.** *Technische Verbrennung – Simulation verbrennungsmotorischer Prozesse* Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden : Teubner Verlag, 2001
- [40] **Bollig, M.** *Berechnung laminarer Kohlenwasserstoffflammen im Hinblick auf die Stickoxidbildung in Verbrennungsmotoren* Aachen : Dissertation, RWTH Aachen, 1998
- [41] **Warnatz, J., Maas, U., Dibble, R.W.** *Verbrennung – Physikalisch-Chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung* Berlin : 3., aktualisierte und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, 2001
- [42] **Heywood, J.B.** *Internal Combustion Engine Fundamentals* s.l. : McGraw-Hill Higher Education, 1988
- [43] **Gärtner, U.** *Die Simulation der Stickoxid-Bildung in Nutzfahrzeug-Dieselmotoren* Darmstadt : TU Darmstadt, Dissertation, 2001
- [44] **Wenzel, S.** *Modellierung der Ruß- und NOx-Emission des Dieselmotors* Magdeburg : Dissertation, Universität Magdeburg, 2006
- [45] **Jeschke, J.** *Konzeption und Erprobung eines zylinderdruckbasierten Motormanagements für Pkw-Dieselmotoren* Magdeburg : Dissertation, Universität Magdeburg, 2002

- [46] **Woschni, G.** *Die Berechnung der Wandwärmeverluste und der thermischen Belastung der Bauteile von Dieselmotoren s.l.* : Motortechnische Zeitung MTZ 31, 1970
- [47] **Bargende, M.** *Ein Gleichungsansatz zur Berechnung der instationären Wandwärmeverluste im Hochdruckteil von Ottomotoren* Darmstadt : Dissertation, TH Darmstadt, 1991
- [48] **Kraßnig, G.** *Die Berechnung der Stickoxidbildung im Dieselmotor* Graz : TU Graz, Habilitationsschrift, 1976
- [49] **Heider, G.** *Rechenmodell zur Vorausberechnung der NO-Emission von Dieselmotoren* München : TU München, Dissertation, 1996
- [50] **Stiesch, G., Eiglmeier, C., Merker, G.P., Wirbeleit, F.** *Möglichkeiten und Anwendung der phänomenologischen Modellbildung im s.l.* : Motortechnische Zeitschrift, MTZ 60, 1999
- [51] **Pischinger, R., Kraßnig, G., Taucar, G., Sams, T.** *Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine* Wien, New York : Springer Verlag, 1989
- [52] **Kozuch, P.** *Ein phänomenologisches Modell zur kombinierten Stickoxid- und Rußberechnung bei direkteinspritzenden Dieselmotoren* Stuttgart : Dissertation, Universität Stuttgart, 2004
- [53] **Pirker, G., Chmela, F.** *Adaptives Verbrennungsmodell - Eentwicklung einer Methode zur automatischen Bestimmung der Werte der relevanten Parameter eines Verbrennungsmodells* Frankfurt : Abschlussbericht, FVV Vorhaben Nr. 900/956, 2008
- [54] **Boulouchos, K.** *Methoden der dieselmotorischen Verbrennungssimulation; physikalische Grundlagen, Leistungsgrenzen, Zukunftspotential* Esslingen : Dieselmotorentchnik, Technische Akademie Esslingen, Expert Verlag, 2000
- [55] **Edwards, S.P., Grove, D.M., Wynn, H.P.** *Statistics for Engine Optimisation* London and Bury St. Edmonds : Professional Engineering Publishing Limited, 2000
- [56] **Urano, Y., Nakano, Y., Takada, H.** *Optimisation Technique for Transient Emission Reduction of Heavy Duty Engines s.l.* : SAE 2005-01-1099, 2005
- [57] **Fahrmeier, L., Künstler, R., Pigeot, I., Tutz, G.** *Statistik - Der Weg zur Datenanalyse, 6. Auflage* Berlin, Heidelberg, New York : Springer Verlag, 2007
- [58] **Kreisel, D.** Ein kleiner Überblick über Neuronale Netze [Online] [Zitat vom: 09. 08 2008] www.dkreisel.com
- [59] **wikipedia** Künstliches neuronales Netz [Online] wikipedia [Zitat vom: 07. 10 2009] http://de.wikipedia.org/wiki/K%C3%BCnstliches_neuronales_Netz
- [60] **Gamma Technologies** *GT-Suite Onlinehilfe, Train Neural Net* Westmont, IL : Gamma Technologies, 2009
- [61] **Rey, G.D., Beck, F.** Neuronale Netze, Eine Einführung [Online] [Zitat vom: 20. 09 2008] www.neuronalesnetz.de

-
- [62] **Rey, G.D., Wendler, K.F.** *Neuronale Netze Eine Einführung in die Grundlagen, Anwendungen und Datenauswertung* Bern : Huber Verlag, 2008
- [63] **Heinz, J.** *Aufbau und Test einer Real-Time-Umgebung zur Entwicklung von Steuergerätesoftware* Nürnberg/Erlangen : Diplomarbeit, MAN / LTT Uni Erlangen, 2009
- [64] **Gamma Technologies** *GT-Power Tutorials* Westmont, IL : Gamma Technologies, 2006
- [65] **Winkler-Ebner, B.** *Design eines virtuellen Sensors für die NO_x-Rohemission eines HD-Dieselmotors mit externer AGR und Ladedruckregelung* Steyr / Linz : Diplomarbeit, MAN / Johannes Kepler Universität, 2009
- [66] **Alberer, D.** *Entwurf eines virtuelle Sensors der Partikel- und Stickoxidbildung eines DE Dieselmotors* Linz : Diplomarbeit, Johannes Kepler Universität, 2005
- [67] **Jakubek, S., Keuth, N.** *Optimierte Neuro-Fuzzy-Modelle für Auslegungsprozesse und Simulation in der Automobilindustrie* s.l. : Oldenburg Verlag, 2005
- [68] **Suykensm, J., J. Vandewalle** *Nonlinear Modelling* s.l. : Kluwer Academic Publishing, 1998
- [69] **Adam, M.** *Statistische Versuchsplanung und Auswertung (DoE Design of Experiments)* Düsseldorf : Fachhochschule Düsseldorf, 2004
- [70] **Noesis Solutions** *OPTIMUS Theoretical Background* LEUVEN, Belgium : Noesis Solutions, 2008
- [71] **DieselNet** *DieselNet - Emission Test Cycles - World Harmonized Stationary Cycle (WHSC)* [Online] [Zitat vom: 11. 12 2010]
<http://www.dieselnet.com/standards/cycles/whsc.php>
- [72] **DieselNet** *DieselNet - Emission Test Cycles - European Stationary Cycle (ESC)* [Online] [Zitat vom: 11. 12 2010]
<http://www.dieselnet.com/standards/cycles/esc.html>
- [73] **Held, W., Raab, G., Gotre, W., Möller, H., Schröppel, W.** *Innovative MAN Euro V Motorisierung ohne Abgasnachbehandlung* Wien : 30. Internationales Wiener Motorensymposium, 2009
- [74] **HORIBA Ltd.** *NO/NO_x Analyzer CLA-755A - Instruction Manual* Kyoto : HORIBA, Ltd., 2005
- [75] **Continetal Automotive GmbH** *SNS MAN EUVI - Technische Dokumentation* Regensburg : Continental Automotive GmbH, 2009
- [76] **Robert Bosch GmbH** *Planare Breitband Lambdasonde - Technische Kundenunterlage* Stuttgart : Robert Bosch GmbH, 2003
- [77] **ABB Automation Products GmbH** *Thermische Masse-Durchflussmesser Sensyflow - Intelligente Lösungen für hochgenaue Gasmengen-Messung* Alzenau : ABB Automation Products GmbH, 2008

- [78] **ABB Automation Products GmbH** *Thermischer Masse-Durchflussmesser Sensyflow FMT700-P - Betriebsanleitung* Alzenau : ABB Automation Products GmbH, 2010
- [79] **Singer, E.** *Simulation eines Nutzfahrzeugmotors mit Coburg / Nürnberg* : Diplomarbeit, FH Coburg, 2010
- [80] **Gärtner, U., Oberacker, H., König, G.** *Der Einsatz moderner Verbrennungsfilmtechnik bei der Verbrennungsabstimmung schwerer Nfz-Dieselmotoren* Essen : Haus der Technik, Motorische Verbrennung - aktuelle Probleme und moderne Lösungsansätze, 1999
- [81] **Wirbeleit, F., Lehner, W., Raab, A.** *Stratified Diesel/Water Injection with EGR - An efficient In-Cylinder NOx and PM reduction technology* Tulsa, Oklahoma : SAE Fuels & Lubrication Meeting, 1997
- [82] **Europäisches Parlament** Richtlinie 2005/55/EG des europäischen Parlaments und des Europäischen Rates vom 28. September 2005
- [83] **Malischewski, T.** *Erarbeitung einer Optimierungsstrategie am Beispiel des vollvariablen Ventiltriebs für einen Dieselmotor* Nürnberg : Diplomarbeit Universität Rostock, 2006
- [84] **Filbert, D., Röpke, K.** *Polynom oder neuronales Netz? Methoden zur nichtlinearen Kennfeldmodellierung* Berlin : Tagung Design of Experiments (DOE) in der Motorenentwicklung, 2001
- [85] **Stier, W.** *Empirische Forschungsmethoden* Berlin : Springer Verlag, 1999
- [86] **Fahrmeier, L., Kneib, T., Lang, S.** *Regression: Modelle, Methoden und Anwendungen* Berlin, Heidelberg, New York : Springer Verlag, 2009
- [87] **Wikibooks - Die freie Bibliothek** Mathematik: Statistik: Tabelle der t-Verteilung [Online] [Zitat vom: 18. 11 2010]
http://de.wikibooks.org/wiki/Mathematik:_Statistik:_Tabelle_der_t-Verteilung
- [88] **Faes, G.** faes.de - Tabelle t-Verteilung [Online] [Zitat vom: 08. 10 2010]
<http://www.faes.de/Basis/Basis-Statistik/Basis-Statistik-Tabelle-Studen/basis-statistik-tabelle-studen.html>
- [89] **Andreß, H.-J.** Students T-Verteilung [Online] University of Newcastle, Australia [Zitat vom: 18. 11 2010] <http://psydok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2004/268/html/surfstat/t.htm>
- [90] **Gamma Technologies** *GT-Power - Users's manual, GT-Suite V6.2* Westmont, IL : Gamma Technologies, 2006
- [91] **Yoshizaki, T., Nishida, K., Hiroyasu, H.** *Approach to low NOx and smoke emission engines by using phenomenological simulation* Detroit, MI, USA : SAE Paper 930612, 1993
- [92] **Morel, T., Wahiduzzaman, S.** *Modelling of diesel combustion and emissions* Prag : 26. Fisita Congress, 1996

-
- [93] **Weiß, J.** *Ein Programmsystem zur Bestimmung energetisch optimaler Drehzahlen im System aus Verbrennungsmotor mit Ladeverdichter und Abgasturbine*
Bochum : Ruhr-Universität Bochum, Sonderforschungsbereich 117
Leistungsverzweigung in der Antriebstechnik, 1986
- [94] **Greiner, R.** *Abgase von Verbrennungsmotoren* Stuttgart : Skript zur Vorlesung,
IVK Universität Stuttgart, 2001
- [95] **Jacob, E.** *Erfassung und Vermeidung von Schadstoffen bei der Stickoxidverminderung in Abgasen* s.l. : BMFT, Forschungs- und
Entwicklungsprogramm Umweltschutz, Abschlussbericht, 1988
- [96] **Klingenberg, H.** *Automobile Exhaust Emission Testing Measurement of Regulated an Unregulated Exhaust Gas Components, Exhaust Emission Tests* Berlin : Springer
Verlag, 1996
- [97] **Schrüfer, E.:** *Elektrische Messtechnik* München Wien : Carl Hanser Verlag, 2004
- [98] **Docquier, N., Candel, S.** *Combustion control and sensors: a review.* s.l. : Progress
in Energy and Combustion Science 28, 2008
- [99] **ETAS GmbH** ES910.3 Prototyping- und Schnittstellenmodul [Online] ETAS GmbH,
26. 10 2010 [Zitat vom: 23. 11 2010] <http://www.etas.com/de/news-14617.php>
- [100] **wikipedia** On-Board-Diagnose [Online] Wikipedia [Zitat vom: 08. 10 2010]
<http://de.wikipedia.org/wiki/On-Board-Diagnose>
- [101] **Müller, G.** Fahrzeugdiagnose mit OBD-2 [Online] [Zitat vom: 02. 08 2010]
<http://www.obd-2.de/>
- [102] **Röthlein, B., Gail, K.** *Serieneinführung der OBD und Emissionsüberwachungsmessungen im schweren Nutzfahrzeug* 2009
- [103] **Lunze, J.** *Regelungstechnik 1* Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2001
- [104] **Reif, K.** *Der Einsatz der Hardware-in-the-Loop-Technologie in Automobilelektronik: Eine Einführung für Ingenieure* Wiesbaden :
Vieweg+Teubner, 2009
- [105] **Rohs, H., Becker, M., Greis, A., Wieske, P.** *Reduktionspotential für Ruß und CO*
Frankfurt : FVV Forschungsvorhaben Nr. 791, Abschlussbericht, 2004

9 Anhang

9.1 Versuchsträger

Motortyp	MAN D2676LOH 24
Nennleistung (kW/PS)	353 kW/480 PS
Nenndrehzahl (1/min)	1900 min ⁻¹
max. Drehmoment	2300 Nm
Abregeldrehzahl	2250 min ⁻¹
max. effektiver Mitteldruck	23 bar
max. Zylinderdruck	200 bar
Hubraum (pro Zylinder)	2.06 l
Zylinderzahl	6
Hub	166 mm
Bohrung	126 mm
Pleuellänge	251 mm
Desachsierung	0.6 mm
Verdichtungsverhältnis (geometrisch)	18
Verdichtungsverhältnis (thermodynamisch)	17
Ventile pro Zylinder	4
Ventildurchmesser EV/AV	40/38
Steuerzeiten (ES/AÖ/EÖ/AS)	44/45/24/20
Einspritzsystem	CommonRail Bosch
Injektor	Bosch CRIN3
Injektorlage	mittig, senkrecht
Einspritzdüse	DLLA
Spritzlochanzahl	9
Spritzlochdurchmesser	173 µm
Spritzlochkonizität (K-Faktor)	1,5
Hydraulischer Durchfluss	900 cm ³ /30 s
Düsenüberstand	3,3 mm
Kolbenmuldenart	Omega-Mulde
Muldendurchmesser	74 mm
Muldentiefe	22 mm
Muldenvolumen	107 cm ³

Tabelle 9.1: Versuchsmotor, technische Daten

9.2 Messtechnik

9.2.1 Erfassung der Abgasemissionen am Prüfstand

Zur Bestimmung der limitierten gasförmigen Emissionen wurde eine Abgasmessanlage der Firma HORIBA eingesetzt. Damit wurden die folgenden Komponenten gemessen:

- unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC)
- Kohlenmonoxid (CO)
- Stickoxide (NO_x)
- Kohlenstoffdioxid (CO₂)

Zur Bestimmung der AGR-Rate wurde zusätzlich die CO₂-Konzentration im Ladeluftrohr gemessen. Nichtlimitierte Abgaskomponenten können bei Bedarf mit einem Fourier-Transform-Infrarotspektrometer (FTIR) gemessen werden.

Wegen der in dieser Arbeit wichtigen Rolle der Stickoxidkonzentration im Abgas soll das verwendete Messverfahren kurz erläutert werden.

9.2.2 Bestimmung der NO-Konzentration im Abgas

Chemolumineszenzdetektor CLD

Die Analyse von Stickoxiden erfolgte mit Hilfe eines Chemolumineszenzdetektors (CLD). Bei diesem Messprinzip wird die chemische Reaktion von Stickstoffmonoxid mit Ozon ausgenutzt (9.1), bei der NO₂^{*} im angeregten Elektronenzustand entsteht. Fällt das angeregte Stickstoffdioxidmolekül wieder in seinen Grundzustand zurück, so erfolgt dies unter Aussendung von Strahlung mit charakteristischer Wellenlänge (9.2).



Die ausgesendete Strahlung passiert einen für diese Wellenlänge ausgelegten optischen Filter (Monochromator) und trifft anschließend auf einen Photomultiplier, der ein der NO-Konzentration proportionales Signal liefert [94].

Im Dieselabgas tritt jedoch neben NO auch NO₂ auf. Deshalb ist es notwendig, das NO₂ zuerst zu NO zu reduzieren. Dies geschieht an einem beheizten Edelstahlkonverter (> 650°C). Bei hohen Stickstoffdioxidkonzentrationen kann das NO₂ jedoch nicht vollständig umgesetzt werden. Deshalb ist in diesem Fall mit einer Mindererfassung durch den CLD zu rechnen [95].

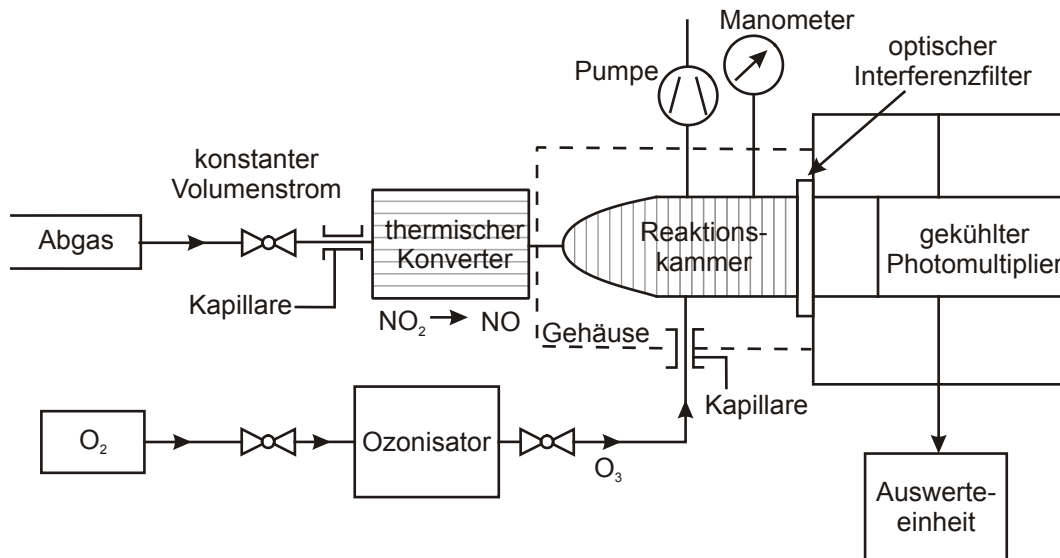


Bild 9.1: Aufbau eines Chemilumineszenzdetektors zur Messung von NO/NO_x im Dieselabgas [96],[5].

9.2.3 Lambdasonde

Die Lambdasonde basiert auf dem Prinzip der Sauerstoffionenleitung bei halbleitenden Keramiken, wie z.B. Zirkondioxid (ZrO₂), bei Temperaturen über 350°C. Zur Erzeugung dieses Verhaltens wird das Zirkondioxid mit Yttriumoxid (Y₂O₃) dotiert, wodurch eine Defektstruktur entsteht. Es treten damit Sauerstofflücken in der Struktur auf, wodurch Sauerstoffionen (O²⁻) in die feste Struktur eindringen können. Die Sauerstoffionenleitung dieses Materials kann genutzt werden, um den Sauerstoffpartialdruck zu messen. Versieht man ein derartiges Material mit zwei porösen Elektroden, welche verschiedenen Sauerstoffpartialdrücken ausgesetzt werden, so entsteht bei geschlossenem Stromkreis ein Stromfluss oder bei offenem Stromkreis eine Spannung, die vom Verhältnis der Sauerstoffpartialdrücke an den beiden Elektroden abhängt.

Man unterscheidet zwischen zwei Typen von zirkondioxid-basierten λ-Sensoren. Zum einen gibt es die potentiometrischen Nernst-Zellen und zum anderen die amperometrischen Zellen zur Sauerstoffmessung. Die potentiometrische Nernst-Zelle misst die Spannung, die durch die Sauerstoffionendiffusion entsteht und beruht auf der Nernst'schen-Gleichung (Gleichung (9.3))

$$U = U_{offset}(\Delta T) + \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{p_{O_2,ref}}{p_{O_2}}\right) \quad (9.3)$$

mit

- U Spannung über den beiden Elektroden
- U_{offset} Offset-Spannung
- T Elektrodentemperatur
- R universelle Gaskonstante
- n Zahl der beteiligten Elektronen
- p_{O_2} Sauerstoffpartialdruck
- $p_{O_2,ref}$ Referenzsauerstoffpartialdruck
- F Faraday-Konstante.

Bei der amperometrischen Zelle zur Sauerstoffmessung wird eine Spannung über die Elektroden angelegt, wodurch Sauerstoff elektrochemisch durch das Elektrolyt gepumpt wird. Deshalb werden solche Anordnungen auch als Sauerstoffpumpe bezeichnet. Der auftretende Sauerstofffluss ist dabei proportional zum entstehenden Strom I . Durch Anlegen einer Spannung wird Sauerstoff von einer inneren Sensorkammer nach außen, bspw. in den Abgasstrom, gepumpt. Gleichzeitig wird eine Sauerstoffdiffusion von außen (Abgasstrom) nach innen in die Sensorkammer zugelassen. Diese Diffusion erreicht an einem gewissen Punkt ihre Sättigung und damit geht auch der Stromfluss in die Sättigung. Dieser Sättigungsstrom ist das Maß für die gemessene Sauerstoffkonzentration. Der Vorgang kann über ein lineares Diffusionsgesetz beschrieben werden. Bei erreichter Sättigung der Diffusion gilt:

$$\frac{dN_{O_2}}{dt} = \frac{I}{nF} = \sigma_{O_2}(p_{O_2} - p_{O_2,v}) \rightarrow I_{lim} \approx nF\sigma_{O_2}p_{O_2} \quad (9.4)$$

mit

- I_{lim} Sättigungsstrom
- $p_{O_2,v}$ Sauerstoffpartialdruck in der Sensorkammer
- p_{O_2} Sauerstoffpartialdruck im Abgasstrom
- σ_{O_2} Lochleitfähigkeit

Die Betriebstemperatur bei Kfz-Lambdasonden liegt bei ca. 780°C, weshalb Lambdasonden erst aufgeheizt werden müssen. Eine niedrigere Temperatur verlangsamt die Diffusion der Sauerstoffionen und somit das Sensorverhalten. Lambdasonden werden deshalb mit Heizelementen ausgestattet, um die Zirkonoxidschicht auf einer konstant hohen Temperatur zu halten.

Bevor die Beheizung beginnen kann, muss sichergestellt werden, dass sich auf der Sonde keine Feuchtigkeit befindet. Eine Beheizung einer feuchten Lambdasonden-

keramik kann zur Beschädigung der Lambdasonde führen. Aus diesem Grund wird in Fahrzeugen die Lambdasondenheizung erst freigegeben nachdem die Sonde mehrere Minuten heißem Abgas ausgesetzt war, um so die Feuchtefreiheit der Sondenkeramik zu gewährleisten. [97], [98], [65]

9.2.4 NO_x-Sensor

NO_x-Sensoren für den Fahrzeugeinsatz, wie der Smart NO_x Sensor (SNS) von Continental, bestehen, wie Lambdasonden, aus ZrO₂ oder Materialien mit ähnlichen Eigenschaften. Zirkonium-basierte NO_x-Sensoren beinhalten mehrere elektrochemische Zellen, wie sie zuvor bei dem Funktionsprinzip der Lambdasonden vorgestellt wurden. Die normale Konfiguration beinhaltet zwei Kammern: In der ersten wird eine Pumpspannung angelegt um den Sauerstoff aus dem Abgas zu entfernen. Das annähernd sauerstofffreie Abgas tritt dann in eine zweite Kammer ein, wo die eigentliche Messung der NO_x-Konzentration stattfindet. Dort wird zunächst NO₂ in NO umgewandelt, danach werden die NO-Moleküle, über eine durch Katalysatoren beschleunigte Reaktion, in N₂ und O₂ konvertiert. Anschließend wird die Sauerstoffkonzentration, wie bei Lambdasonden, über amperometrische oder potentiometrische Zellen erfasst und als Maß für die Stickoxidkonzentration im Abgas herangezogen. Da die Entfernung des Sauerstoffes aus dem Abgas in der ersten Kammer nicht immer vollständig ist und der Anteil des so entstehenden Restsauerstoffes von der Sauerstoffkonzentration im Abgas abhängt, ist diese Messprinzip leicht abhängig von der O₂-Konzentration im Abgas. Analog zu den Lambdasonden benötigen auch zirkonium-basierte NO_x-Sensoren eine gewisse Vorlaufzeit bis die Feuchtefreiheit der Sensorkeramik und damit die Betriebsbereitschaft hergestellt werden kann. [98], [65]

9.3 Echtzeitsystem

9.3.1 ETAS Labcar und Realtime PC

Als Echtzeit-PC wird in dieser Arbeit ein Realtime-PC (RTPC) von ETAS verwendet. Dabei handelt es sich um einen Industrie-PC mit Dual-Core-Prozessor, 2,66 GHz Prozessortaktfrequenz und 1 GB Arbeitsspeicher. Die Steuerung des RTPC erfolgt über einen zweiten Rechner, den sogenannten Bedien-PC. Mit Hilfe der Software Labcar-IP²³ von ETAS wird der benötigte Simulationscode erzeugt, d.h. es können unterschiedliche Module wie z.B. Simulink-Code oder C-Module verlinkt werden. Anschließend wird der eigentliche Simulationscode erzeugt und auf den Realtime-PC geladen.

²³ Labcar IP: Labcar Integration Platform, Software zur Steuerung und Verwaltung des RTPC

Labcar-IP besitzt außerdem eine Bedienoberfläche für den Echtzeit-PC, die individuell eingerichtet werden kann. Damit ist es möglich, das Modell während der Echtzeit-simulation zu beeinflussen bzw. auf Simulationsgrößen zuzugreifen. Bild 9.2 zeigt zwei Fenster der in dieser Arbeit verwendeten Bedienoberfläche. Im vorderen Bild sind zum einen die Rundinstrumente zur Wiedergabe von Eingangs- und Ausgangsgrößen der Simulation, zum anderen Schalter und Eingabefelder, mit denen der Simulation Werte aufgeprägt werden können, zu erkennen. Im hintern Fenster sind zwei Oszilloskope dargestellt. Das obere Oszilloskop zeigt die vom Modell errechnete Luftmasse, das untere die Stickoxidemission von NO_x-Sensor und Modell.

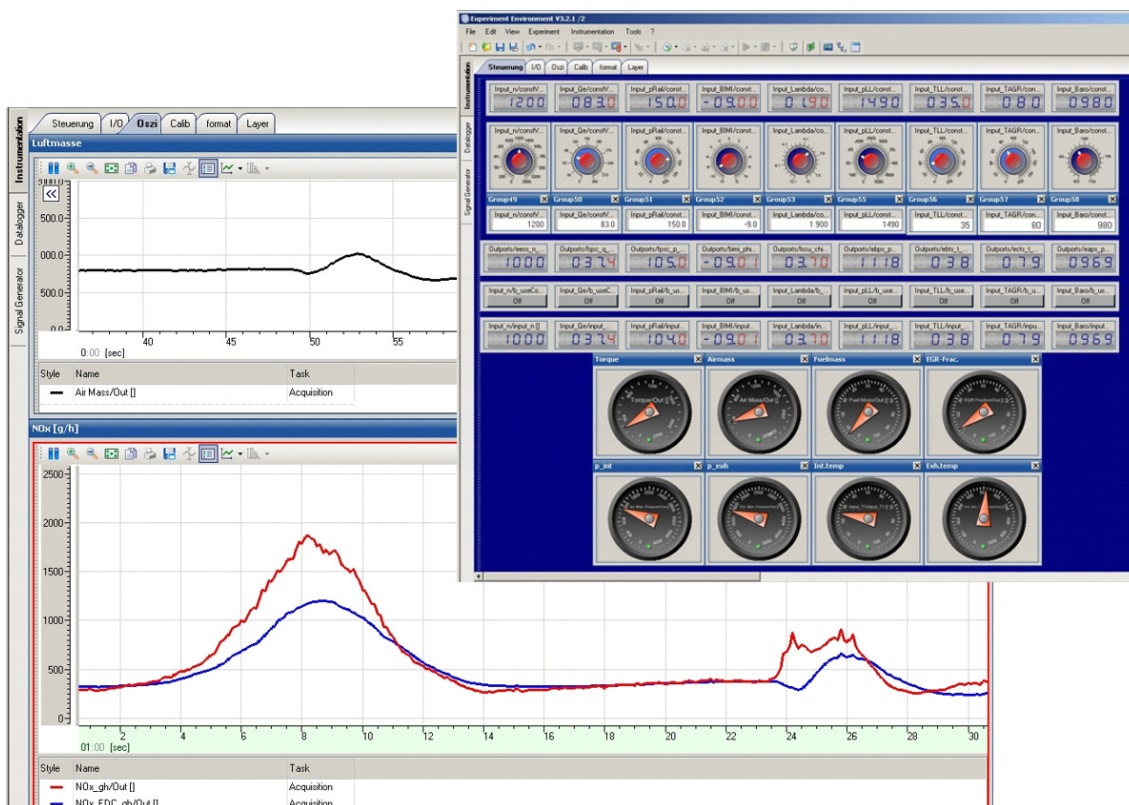


Bild 9.2: ETAS Labcar-IP, Bedienoberfläche für den ETAS RTPC

Um einen schnellen und ungestörten Datenaustausch zu gewährleisten, sind die beiden Rechner über eine separates Netzwerk (Ethernet, 100 Mbit) miteinander verbunden. Bild 9.3 zeigt schematisch den Aufbau des ETAS Echtzeitsystems.

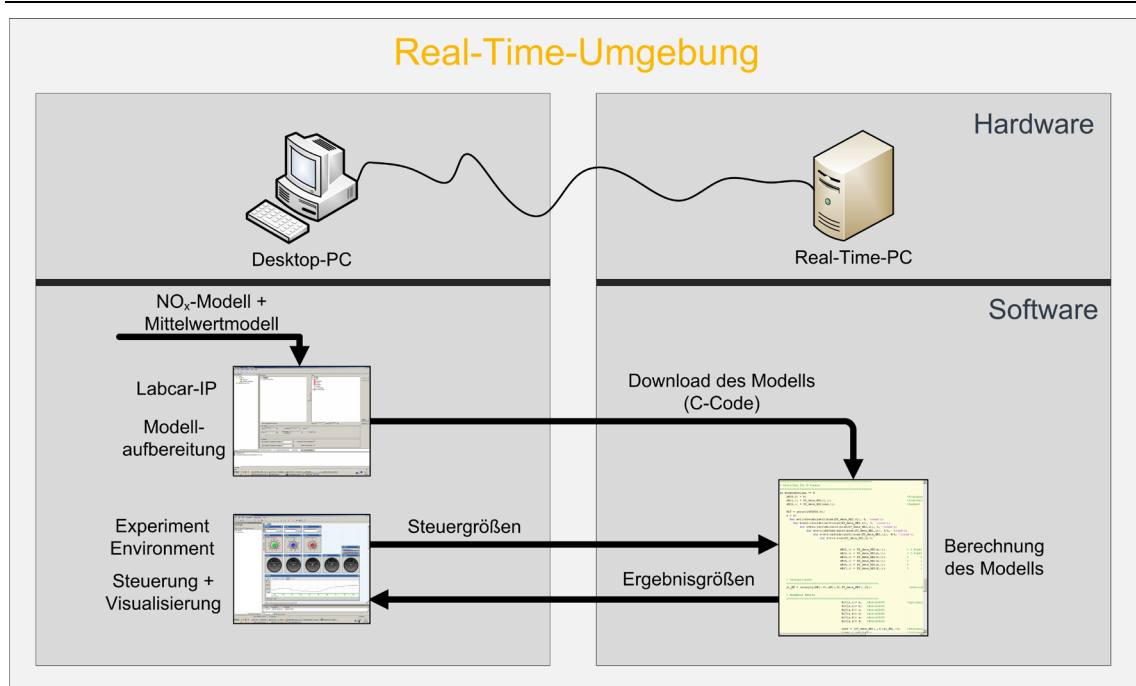


Bild 9.3: Aufbau der Real-Time-Umgebung [63]

9.3.2 Rapid Prototyping Modul ETAS ES910

Mit dem ES910-Modul können prototypische Implementierungen der Softwarekomponenten neuer Steuerungs-, Regelungs- und Diagnosefunktionen unter realen Umgebungsbedingungen validiert werden. Dabei können die einzelnen Komponenten mit ASCET, [...] oder MATLAB®/Simulink® generiert oder manuell in C codiert werden. Mit Hilfe der ETK-Schnittstelle lassen sich Teilanwendungen, die auf dem ES910-Modul berechnet werden, mit einem Entwicklungssteuergerät synchronisieren (Bypass-Experiment) [99].

9.4 OBD

On-Board-Diagnose (OBD) ist ein Fahrzeugdiagnosesystem. Während des Fahrbetriebes werden alle abgasbeeinflussenden Systeme überwacht [...]. Auftretende Fehler werden dem Fahrer über eine Kontrollleuchte angezeigt und im jeweiligen Steuergerät dauerhaft gespeichert. Fehlermeldungen können dann später durch eine Fachwerkstatt über genormte Schnittstellen abgefragt werden [100]. Das Prinzip der On-Board-Diagnose wurde 1988 vom *California Air Resources Board* („Behörde für die Reinhaltung der Luft“) in den USA eingeführt, um der steigenden Luftverschmutzung durch den Fahrzeugverkehr in den Ballungsräumen Los Angeles und San Francisco zu entgegen. Weitere US-Staaten übernahmen diese Regelungen im Jahr 1994. 1996 trat im Rahmen der Einführung neuer Abgasregularien (Tier1) in allen amerikanischen

Bundesstaaten OBD-2 in Kraft [101]. In der europäischen Union wurden die OBD-Vorschriften ab 2001 für Pkw mit Benzinmotor eingeführt und 2004 auf Pkw und leichte Nutzfahrzeuge mit Dieselmotor erweitert [102]. Mit der Abgasnorm EURO IV wurden die OBD-Vorschriften im Jahr 2006 auch für schwere Nutzfahrzeuge eingeführt. Seit Oktober 2009 gelten die Vorschriften der OBD auch für Gasmotoren [82]. Aufgaben der OBD sind:

- kontinuierliche Überwachung aller abgasrelevanten Komponenten in allen Fahrzeugen
- jederzeitiges Erfassen und Melden von wesentlichen Emissionserhöhungen während der gesamten Betriebszeit eines Fahrzeugs
- Gewährleistung dauerhaft niedriger Abgasemissionen
- Schutz von Komponenten z.B. des Katalysators bei Fehlzündungen
- Speichern der Daten bei aufgetretenen Fehlern
- Bereitstellung einer Schnittstelle zum Auslesen der gespeicherten Daten und laufender Betriebsdaten

Für die Fehlerüberwachung werden redundante Komponenten benötigt. Meist wird dies durch einen Abgleich verschiedener Sensoren in bestimmten Motorbetriebspunkten realisiert. So kann z.B. durch einen Vergleich der Messwerte von Atmosphärendruck- und Ladedrucksensor im Leerlauf eine Plausibilisierung dieser Sensoren erfolgen [1]. Bei Fehlern emissionsrelevanter Komponenten, die zu einer Überschreitung der OBD-Grenzwerte führen [...], muss der Fahrer über eine Fehlfunktionswarnlampe MIL (Malfunction Indicator Lamp) informiert werden. Gleichzeitig muss ein Fehlerspeichereintrag erfolgen, welcher das fehlerhafte Bauteil so genau wie möglich identifiziert [102]. In den Vorschriften zu den Stickoxidüberwachungsmessungen ist ein Sensor zur Überwachung der NO_x-Emission im Abgasstrang vorgeschrieben. Bei einer Überschreitung der Emissionsgrenzwerte muss dies dem Fahrer, wie oben beschrieben, angezeigt werden und ein Fehlerspeichereintrag erfolgen. Außerdem muss nach 50 Stunden eine Drehmomentreduktion auf 60 % (bzw. 75 % bei Fahrzeugen unter 16 t) des Motornenn Drehmoments erfolgen. Für die Überwachung der Stickoxidemission bei Motoren mit externer Abgasrückführung erlaubt der Gesetzgeber eine alternative Methode zu der Messung mittels NO_x-Sensor im Abgas, wenn diese Bestimmung der Emission die gleiche Genauigkeit bietet [102].