



SZÉCHENYI
ISTVÁN
UNIVERSITÄT

FAKULTÄT FÜR TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN

AUDI HUNGARIA LEHRSTUHLGRUPPE FÜR KRAFTFAHRZEUGE

LEHRSTUHL FÜR VERBRENNUNGSMOTOREN

DIPLOMARBEIT

*Entwicklung eines virtuellen Motorprüfstandes
an der Széchenyi István Universität*

Autor (Kandidat):

B.Sc Szabó, Zsolt

Sektion:

DIREKTSTUDIUM

Studiengang:

FAHRZEUGINGENIEUR M.SC

Fachrichtung:

VERBRENNUNGSMOTOREN

Bewertungsblatt

Titel der Diplomarbeit:

Entwicklung eines virtuellen Motoprüfstandes an der
Széchenyi István Universität

Name des Diplomanden:

B.Sc Szabó, Zsolt

Sektion:

Direktstudium

Studiengang, Fachrichtung:

Fahrzeugingenieur, Verbrennungsmotoren

Stufe:

M.Sc

Typ:

öffentlich

Die Diplomarbeit kann eingereicht werden / kann nicht eingereicht werden

Datum

Unterschrift Betreuer extern

Die Diplomarbeit kann eingereicht werden / kann nicht eingereicht werden

Datum

Unterschrift Betreuer intern

Die Diplomarbeit ist für Beurteilung freigegeben / nicht freigegeben

Datum

Unterschrift Lehrstuhlleiter

Beurteiler

- Titel, Name:
- Arbeitsstelle:
- Funktion:

Vorschlag für die Benotung (Beurteiler):

Datum

Note

Unterschrift
(Beurteiler oder Lehrstuhlleiter)

Vorschlag für die benotung (Betreuer intern):

Datum

Note

Unterschrift
(Betreuer intern)

Entscheidung der Prüfungskommission:

Datum

Note

Unterschrift
Vorsitzende(r)

ARBEITSBLATT

Name: B.Sc Szabó, Zsolt

Sektion: Direktstudium

Titel: Entwicklung eines virtuellen Motorprüfstandes
an der Széchenyi István Universität

Aufgaben:

- Besorgung von AVL BOOST, CAMEO und Matlab-Simulink Softwares
- Erlernung der zu verwendenden Softwares
- Installation der Softwares und ihr Koppelung
- Entwicklung, Testen und Verifizierung von Matlab-Simulink Modellen
- Laborübungen auf dem virtuellen Prüfstand

Abgabetermin:

19.05.2014

Betreuer (intern):

Dr. Hanula, Barna

Betreuer (extern):

**Arbeitsstelle und Funktion des
externen Betreuers:**

Győr, den

.....

Lehrstuhlleiter

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit [Entwicklung eines virtuellen Motorprüfstandes an der Széchenyi István Universität] selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel/Quellen benutzt habe.

Die Stellen der Diplomarbeit, die anderen Quellen im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind den gültigen Zitierregeln entsprechend durch Angaben der Herkunft kenntlich gemacht. Dies gilt auch für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie für Quellen aus dem Internet.

Meine Ergebnisse habe ich selbständig ermittelt. Sie basieren auf Berechnungen, Forschungen und wirklichen Messungen. Sie sind nach meinem besten Wissen glaubwürdig.

Győr, den 11.05.2014

Unterschrift

[Zsolt Szabó, Maschinenbauingenieur, B.Sc]

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Diplomarbeit ist im Rahmen meiner Diplomandentätigkeit an der Széchenyi István Universität Győr entstanden. Sie ist eine Weiterführung meiner Projektarbeit und meiner zwei erfolgreichen TDK Wettbewerbe (Wissenschaftliche Konferenz für Studenten in Ungarn).

Großer Dank gebührt Herrn Dr. Barna Hanula, der mich betreut hat und Herrn Dr. Kay Schintzel für die Themenstellung und die Unterstützung seitens der Universität.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Eike Martini, Herrn Dr. Hans-Michael Koegeler, Herrn Richard Premm, Herrn Prabhu Santiago, Herrn Gábor Hrauda, Herrn Dr. Peter Bartsch, Herrn Robert Strasser, Frau Tiziana Fortuna und den Mitarbeitern der CAMEO, BOOST und FOX Teams von AVL List GmbH Graz für die Softwares und die berufliche Unterstützung.

Schließlich danke ich alle Personen, die mich während der Studienzeit unterstütz und motiviert haben.

Kivonat

A hallgató neve: **Szabó Zsolt**
A diplomamunka címe: Egy virtuális motorfékpad fejlesztése a győri Széchenyi István Egyetemen
Külső konzulens:
Belső konzulens: Dr. Hanula Barna - Egyetemi docens
Rektori tanácsadó

A mérnökképzés gyakorlati oldalának erősítése érdekében az egyetemi tanórákat tartalmilag és módszertanilag is folyamatosan fejleszteni kell. Néhány alapvető laborgyakorlat azonban a magas hallgatói létszám és / vagy a magas költségek miatt nagyobb hallgatói csoportok számára nem kivitelezhető.

A belsőégésű motorokon végzett fékpadi gyakorlatok is ebbe a kategóriába sorolhatók. A virtuális fékpad létrehozásának ötlete innen származik. A projekt célja egy olyan szoftvermegoldás kifejlesztése, aminek segítségével egy belsőégésű motor és egy fékpad viselkedése számítógépes környezetben valósághűen szimulálható.

Egy további követelmény volt, hogy a felhasználói felület úgy legyen kialakítva, mint a hagyományos fékpadi szoftvermegoldások. Az első feladat ezért egy piackutatás volt annak érdekében, hogy minél több megvásárolható szoftverelemet lehessen a rendszerbe integrálni. Az eredmény az lett, hogy az AVL szoftverek a legmegfelelőbbek a feladatra, mivel az iparban széles körben elterjedtek (piacvezetők) és rugalmasan illeszthetők pl. Matlab-Simulink-hez.

Ennek eredményeképpen két eltérő rendszert fejlesztettem ki. Az első az AVL CAMEO-ra épül, lehetővé téve a hallgatók számára, hogy az eredeti AVL szoftverfelületen dolgozzanak. Ebben a változatban az általam Matlab-Simulink-ben készített, valós mérési adatokra támaszkodó motormodellek találhatók. A speciális elemek segítségével a statikus adatsorok ellenére a tranziens viselkedés is valósághűen szemléltethető.

A másik rendszer egy fizikai motormodell, ami az AVL BOOST és a Matlab-Simulink kapcsolatán alapszik. Ez a megoldás azzal az előnnyel bír, hogy minden – akár konstrukciós – paraméter megváltoztatható és minden kimeneti érték (teljesítmény, fogyasztás, emissziók, stb.) viselkedése valós időben reálisan ábrázolható.

Mindkét rendszer nagy sikerrel került bele a BSc-s és MSc-s hallgatók tantervébe. A 2014-es év őszi szemeszterétől a virtuális fékpad az oktatás szerves részét fogja képezni a győri Széchenyi István Egyetemen.

Abstract

Kandidat:	B.Sc Szabó, Zsolt
Titel der Diplomarbeit	Entwicklung eines virtuellen Motorenprüfstandes an der Széchenyi István Universität
Betreuer (extern):	
Betreuer (intern):	Dr. Hanula, Barna - Universitätsdozent Mitglied des Rates der SZE

Um die Praxisorientierung der Ingenieuresausbildungen zu stärken, muss der universitäre Unterricht inhaltlich und methodisch kontinuierlich weiterentwickelt werden. Einige grundlegende Laborübungen sind aber auf Grund der Anzahl der Studenten und / oder der Kosten für größere Studentengruppen nicht realisierbar.

Die Prüfstanduntersuchungen von Verbrennungsmotoren gehören in diese Kategorie. So ist die Idee eines virtuellen Prüfstandes entwickelt worden. Das Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer kompletten Softwarelösung, die in der Lage ist das Verhalten des Verbrennungsmotors und des Prüfstandes mit Hilfe eines Computers Realitätsnah zu simulieren.

Ein weiterer Teil des Lastenheftes bestand darin, die Bedienoberfläche so zu gestalten wie die gängigen Prüfstandsoftware-Lösungen. So war die erste Aufgabe der Arbeit eine Marktanalyse durchzuführen um möglichst viele käufliche Softwareelemente in das System zu integrieren. Das Ergebnis der Analyse ergab dass die AVL Softwaretools auf Grund ihrer Verbreitung (Marktführer) und der flexiblen Schnittstellen z.B. zu Matlab-Simulink am besten geeignet sind.

Als Ergebnis habe ich zwei verschiedene Systeme entwickelt. Das eine System basiert auf AVL CAMEO und ermöglicht den Studenten das Arbeiten auf der originalen AVL-Oberfläche. In dieser Variante arbeiten von mir mit Matlab-Simulink erstellte Motormodelle, die auf tatsächlich gemessene Kennwerte von realen Messungen zurückgreifen. Mit Hilfe von speziellen Elementen des Modells kann auch das transiente Verhalten, trotz des statischen Datensatzes reell dargestellt werden.

In das andere System wurde ein physikalisches Motormodell basierend auf AVL BOOST mit Matlab-Simulink eingebunden. Diese Lösung bietet den Vorteil alle, auch konstruktive Motorparameter ändern zu können und das Verhalten aller Ausgangsgrößen (Leistung, Verbrauch, Emissionen usw.) wird in Echtzeit realistisch wiedergegeben.

Beide Systeme wurden mit großem Erfolg als Pilot mit BSc und MSc-Studenten eingesetzt. Ab dem Herbstsemester 2014 wird der virtuelle Prüfstand fester Bestandteil des regulären Unterrichts an der Széchenyi István Universität.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	4
1. Einleitung	5
1.1. Motivation.....	5
1.2. Hintergrund des Projekts.....	5
1.3. Aufgaben.....	6
2. Die angewandten Softwares und Simulationsverfahren	7
2.1. Matlab-Simulink.....	7
2.2. AVL CAMEO	8
2.2.1. CAMEO Online	9
2.2.2. CAMEO Offline	10
2.3. AVL BOOST	12
2.4. Differenzen zwischen den Simulationsverfahren.....	14
3. Motorprüfstandmodelle.....	15
3.1. Verbindung zwischen Matlab und CAMEO	15
3.2. Modellbildung in Matlab-Simulink.....	16
3.2.1. Modelle der AVL Mitarbeiter	16
3.2.2. Aufbau und Hauptelemente der Simulink-Modelle.....	18
3.2.3. Das erste eigene Matlab-Modell	19
3.2.3.1. Subsystem namens Verspätung	20
3.2.3.2. Subsystem namens Vibration.....	21
3.2.3.3. Verbrauchsänderung.....	22
3.2.3.4. Lambda Änderung.....	24
3.2.3.5. NO _x Änderung	24
3.2.3.6. HC Änderung	26
3.2.3.7. CO Änderung	27
3.2.4. Das zweite eigene Matlab-Modell	28
3.2.4.1. Schalterelement	29
3.2.4.2. Das erste Messverfahren	30
3.2.4.3. Verbrauchsänderung beim Messverfahren 1	30

3.2.4.4.	NO _x Änderung beim Messverfahren 1	31
3.2.4.5.	HC Änderung beim Messverfahren 1	32
3.2.4.6.	CO Änderung beim Messverfahren 1	32
3.2.4.7.	Das zweite Messverfahren	33
3.2.4.8.	Verbrauchsänderung beim Messverfahren 2	34
3.2.4.9.	Drehmoment Änderung beim Messverfahren 2	34
3.2.4.10.	NO _x Änderung beim Messverfahren 2	35
3.2.4.11.	HC Änderung beim Messverfahren 2	35
3.2.4.12.	CO Änderung beim Messverfahren 2	36
3.2.4.13.	Verbrauch-Drehmoment Kurve des Motors	36
3.2.5.	Das dritte eigene Matlab-Modell	37
3.2.5.1.	Verbrauchsänderung	37
3.2.5.2.	Änderung der Opazität	38
3.2.5.3.	NO _x Änderung	38
3.2.5.4.	HC Änderung	39
3.2.5.5.	CO Änderung	39
3.3.	Aufbau der CAMEO-Messungen	40
3.3.1.	Die erste eigene CAMEO-Messung	40
3.3.2.	Die zweite eigene CAMEO-Messung	42
3.3.3.	Die dritte eigene CAMEO-Messung	44
4.	Motormodelle	45
4.1.	Vorteile von physikalischen Motormodellen	45
4.2.	BOOST Modelle	45
4.2.1.	Steuerung der Modelle	45
4.2.2.	Aufbau und Hauptelemente der BOOST Modelle	47
4.2.3.	Einzylinder 2-Takt Benziner	49
4.2.4.	Einzylinder 4-Takt Benziner	50
4.2.5.	Einzylinder 4-Takt Motorrad Benziner	51
4.2.6.	3-Zylinder 2-Takt Diesel	52
4.2.7.	4-Zylinder 4-Takt industrieller Diesel	53
4.2.8.	4-zylinder 4-Takt Diesel	54
4.2.9.	4-zylinder 4-Takt Benziner	56

4.2.10.	6-Zylinder 4-Takt Diesel	57
4.2.11.	6-Zylinder 4-Takt Truck Diesel	58
4.2.12.	6-Zylinder 2-Takt Diesel	59
4.2.13.	6-Zylinder 4-Takt Benziner	60
4.3.	Matlab-Simulink Modelle	62
4.3.1.	Darstellung der Ventilhub Kurven	64
4.3.2.	Einfluss von Luftverhältnis	66
4.3.3.	Klopfen des Motors.....	67
4.3.4.	Ablauf der Simulation.....	68
4.3.5.	Validation der Modelle	69
5.	Der virtuelle Motorprüfstand	72
6.	Zusammenfassung.....	73
7.	Ausblick, Möglichkeiten für Weiterentwicklung	74
	Abbildungsverzeichnis.....	75
	Tabellenverzeichnis.....	78
	Literaturverzeichnis	79

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

AGR	- Abgasrückführung
bar	- Bar
BST	- BOOST-Datei für Matlab
°C	- Grad Celsius
CO	- Kohlenmonoxid
deg	- Degree (Winkel)
ECU	- Electric Control Unit (Elektrisches Steuergerät)
g	- Gramm
h	- Stunde
HC	- Kohlenwasserstoff
HCU	- Hydraulic Control Unit (Hydraulik Steuergerät)
HIL	- Hardware-In-The-Loop
kg	- Kilogramm
kWh	- Kilowattstunde
λ	- Lambda
MAT	- Datei für Matlab
MDL	- Modell-Datei für Matlab-Simulink
MFB50	- Mitte des Verbrennungsablaufs
MIL	- Modell-In-The-Loop
min	- Minute
mm	- Millimeter
n	- Drehzahl
NEFZ	- Neue Europäischer Fahrzyklus
Nm	- Newtonmeter
NO _x	- Stickoxide
NRL	- Non-Real-Time (Nicht-Echtzeit) Datei für CAMEO
NRTSIM	- Non-Real-Time Simulation (Nicht-Echtzeit Simulation)
PID	- Proportional–integral–derivative
ppm	- Part per Million
s	- Sekunde
SIL	- Software-In-The-Loop
TCU	- Transmission Control Unit (Transmission Steuergerät)
Vol.-%	- Volumenprozent

1. Einleitung

Die Ausführung des – in dieser Diplomarbeit vorliegenden – virtuellen Prüfstandprojekts wurde durch fortschrittliche Technologien der Motorsimulation gewährleistet. Das Interesse an solchen Entwicklungen erhöht sich immer wieder, deshalb kommen die computergestützten Methoden zunehmend in den Blick. Die Ersetzung der teuren, verantwortungsvollen und nur an einem außerordentlich hochpreisigen Prüfstand durchführbaren Messungen mit einer virtuellen Umgebung hat ein gewaltiges Potenzial für das Hochschulwesen. Die hier präsentierte Arbeit ist ein Meilenstein dieser Entwicklungstrends.

1.1. Motivation

Die Messungen auf einem Motorprüfstand sind überaus hilfreich und wertvoll für Studenten, die sich mit Verbrennungsmotoren beschäftigen, weil sie die Erkennung der komplexen motorischen Prozesse nachweislich unterstützen können. Messungen auf einem echten Prüfstand benötigen aber sehr viel Zeit und die Stundensätze der Prüfstandmessungen sind kostspielig. Universitäten und Hochschulen haben meistens nur wenig Geld für solche Messungen, deshalb wird die Wettbewerbsfähigkeit der Studenten – gegenüber den steigenden Anforderungen – immer weniger. Das zunehmende Interesse für die Fachrichtung und die Erhöhung der Studentenzahl macht die Einführung von neuen, früher nicht verwendeten Methoden möglich. Darüber hinaus ist die Benutzung von solchen Softwares - die industriell sehr oft angewendet sind – erforderlich, weil Studenten damit individuelle Messungen umsetzen können.

1.2. Hintergrund des Projekts

Meiner Betreuer, Herr Dr. Barna Hanula doziert eine der Fachvorlesungen am Lehrstuhl für Verbrennungsmotoren für Maschinenbau- und Fahrzeugingenieur BSc-Studenten. In der Vorlesung geht es um Thermodynamik und Strömungswissenschaften der Verbrennungsmotoren.

Die Anzahl der Studenten steigt ständig seit der Etablierung der Fachrichtung, im Jahre 2014 hatte die Vorlesung 120 Studenten. Früher gab es auch keine Möglichkeit, selbstständige Prüfstandmessungen zu erreichen, aber mit einer so großen Anzahl von Studenten ist schon die Besichtigung des Prüfstandes eine unmögliche Aufgabe. Die berufliche Entwicklung der Studenten wird aus diesem Grunde erheblich behindert, weil zum Verständnis der motorischen Prozesse praktische Erfahrungen benötigt werden.

Diese Erfahrungen konnten sie sich früher nur nach dem Arbeitsantritt erwerben, deshalb ist der Bedarf für eine virtuelle Umgebung erschienen. Damit kann eine größere Anzahl von Studenten - ohne die Gefährdung des echten Prüfstandes - mit industriellen Softwares individuelle Messungen durchführen.

Der virtuelle Motorprüfstand ist das Ergebnis eines mehr als einjährigen Projektes, das mit einer sorgfältigen Marktuntersuchung begonnen hat. Das Ziel war bei dieser Phase der Arbeit die Ermittlung der besten Softwares. Nach der erfolgreichen Auswahl der Softwares war die Kontaktaufnahme an der Reihe: zum Schluss war der Gewinn der Interesse, der Softwares und der beruflichen Unterstützung von AVL nötig.

Im letzten Jahr hat das virtuelle Prüfstand-Projekt bei TDK Wettbewerben (Wissenschaftliche Konferenz für Studenten in Ungarn) zweimal den ersten Platz gewonnen. Der virtuelle Motorprüfstand unterstützt die Ausbildung der Studenten in der Zukunft. Meine Diplomarbeit fasst also dieses erfolgreiche Projekt zusammen.

1.3. Aufgaben

Das erste Ziel war AVL CAMEO, BOOST und ihre Zusammenarbeit mit Matlab-Simulink Modellen kennenzulernen, mit der Anwendung dieser Kenntnisse, den Studenten eine niveauvolle, moderne, einzigartige Übung beizubringen. Die Softwares werden industriell aktiv verwendet. Deswegen sind sie für Studenten perfekt, damit echte praktische Kenntnisse während der akademischen Jahre erworben werden können. Nach ihrem Studium werden sie diese Kenntnisse erfolgreich benutzen.

Folgende Aufgaben sind vorhanden: die Beschaffung, Erlernung und Installation der drei Softwares, dann Hervorbringung einer Computersimulation, Aufbau von Motor- und Motorprüfstand-Modelle und Herstellung und Validierung einer virtuellen Umgebung. Mit der Hilfe von den Modellen und der virtuellen Umgebung können die Studenten in einem Computerraum ebensolche Messungen durchführen, wie auf einem echten Motorprüfstand. Mit diesen Messungen können die Betriebsbereiche des Motors, seine Reaktionen an die Veränderung der Kenngröße, und sein Verhalten auf dem Prüfstand einfach verstanden werden. Anhand des herausgegebenen Lehrmaterials müssen die Studenten Auswertungen und Diagramme verfertigen. Die Modelle müssen sich so verhalten, wie ein echter Motor. Die Diagramme von Messdaten müssen mit den Diagrammen der Lehrbücher identisch sein.

2. Die angewandten Softwares und Simulationsverfahren

Unter diesem Kapitel werden die drei angewandten Softwares und die unterschiedlichen Simulationsverfahren, die zur Verfügung stehen, dargestellt. Die Beschreibung der Softwares ist erforderlich für die nächsten Kapitel, wo die Anwendung der Softwares und die eigene Arbeit dargestellt werden. Während der Arbeit wurden Matlab-Simulink, AVL BOOST und AVL CAMEO benutzt. Obwohl sie für unterschiedliche Zwecke entwickelt wurden, können mit einigen Änderungen verbunden werden. Nach der Softwarebeschreibung kommt eine Zusammenfassung über die gegebenen und verwendeten Simulationsverfahren.

2.1. Matlab-Simulink

Matlab-Simulink wurde wegen ihrer zahllosen Vorteile ausgewählt. Studenten kennen die Grundfunktionen der Software, weil sie früher damit an anderen Kursen gearbeitet haben. Die Software ist ideal für die Ausbildung der Fahrzeugingenieur-Studenten, weil sie bei der modellbasierten Entwicklung der Automobilindustrie intensiv benutzt wird. Eine Menge fortschrittliche Entwicklung wird durch Matlab erstellt. Matlab ist eine höhere Programmiersprache und ein interaktives Environment für numerische Berechnungen, Visualisierung, und Programmierung. Mit der Hilfe von Matlab können Datenanalysen, Erzeugung von Algorithmen, Modellbildung und Applikation durchgeführt werden. Die Programmiersprache, das Programmentwicklungssystem und die eingebaute Math-Funktionen ermöglichen die multilaterale Annäherung und Erreichung von Lösungen schneller, als die anderen Programmiersprachen (C / C++ oder Java). Matlab hat eine breite Palette an Applikationen einschließlich der Signalverarbeitung, der Kommunikation, der Bild- und Videoverarbeitung, der Kontrollsysteme, der Tests und der Messungen, der Computerfinanzierung und der Computerbiologie. Die Matlab Programmiersprache und Berechnungssysteme werden von mehr als eine Millionen Ingenieuren und Wissenschaftlern in der Industrie und an Universitäten verwendet.

Simulink ist ein Blockdiagramm Environment für Multidomain Simulationen und modellbasierte Design. Die Software wird in Matlab integriert. Simulink unterstützt die Simulation, die automatische Codegenerierung, und die kontinuierlichen Test und Verifikation von Embedded Systemen. Die Software hat einen grafischen Editor, gestaltbaren Blockverzeichnisse, und einen Solver für Modellierung und Simulation der dynamischen Systeme. Simulink ermöglicht die Integration von Matlab Algorithmen in die Modelle, und den Export von Simulationsergebnissen in Matlab für weitere Analyse.

Die Modelle für CAMEO und BOOST – die zwei Softwares des virtuellen Motorprüfstandes – wurden mit Matlab-Simulink erzeugt. Mit einem Matlab Solver von AVL wurden kennfeldbasierte Modelle konvertiert, dann für weitere Verwendung ins CAMEO importiert. Die BOOST Modelle werden auch mit dieser Software gesteuert.

2.2. AVL CAMEO

Im Rahmen der Marktforschung wurde die Entscheidung getroffen, dass CAMEO ausgewählt werden soll. Eine Software war erforderlich, die auf den Prüfständen von den meisten Motorherstellern verwendet wird und mit Matlab-Simulink kompatibel ist. CAMEO besitzt diese Eigenschaften, da sie über eine einfach erlernbare Oberfläche und eine Menge Funktionen verfügt, die für Studenten nach ihrem Studium nützlich ist. Die Struktur, die Hauptschritte, die zwei Version der Software werden im Nachfolgenden erläutert.

Die Software wurde von AVL List GmbH entwickelt. Die Software ist ein Ergebnis der Zusammenarbeit von größten Fahrzeugherstellern. Sie beinhaltet die besten Eigenschaften für automatisierte Tests, die mit der Verwendung von Design of Experiment Methoden erstellt wurden. CAMEO verteilt die Antriebsstrangkalibration in überschaubaren Schritten. Alle haben einen gelenkten Arbeitsablauf (Workflow) mit visueller Darstellung von Informationen. Die Software wurde von Fahrzeugingenieuren, speziell für die Automobilindustrie entwickelt, deshalb ist sie für den virtuellen Prüfstand und für Studenten des Lehrstuhls ideal. Es wurde mit der Anforderung von Motorentwicklung und Motorkalibration abgestimmt.

CAMEO hat eine Menge Vorteile, sie ist eine Softwareplattform, die den ganzen Arbeitsablauf der Steuergerät-Kalibration abdecken kann. Mit der Software können alle Kalibration-Prozeduren durchgeführt werden. CAMEO hat eine standardisierte Programmierschnittstelle, und auch eine Optionale für kundenspezifische Lösungen. Die Software unterstützt den Applikationsingenieur bei der Modellierung und Optimierung. Applikationsingenieure brauchen keine ausführlichen Kenntnisse aus Mathematik für die Modellbildung. Die Qualität von Modellen und Optimierungsergebnissen hängen von der Qualität der Messdaten ab. Die Software bietet intelligenten Methoden für die Qualitätsverbesserung der Modelle und der Optimierungsergebnisse an. Diese Methoden beeinflussen den ganzen Kalibration-Prozess, sie sind zeitsparend und können die Ergebnisse verbessern.

CAMEO wurde für Benzin- und Dieselmotoren in allen Größen gestaltet. Die typischen ausführbaren Kalibration-Aufgaben sind folgende:

Benzinmotor-Kalibration:

- Grundkalibration für stabilen Motorbetrieb
- Grundkennfelder (Zündwinkel, Einspritzmenge, Einspritzzeit, Variabler Ventiltrieb), Entdeckung und Regelung des Klopfens
- Ermittlung der Ladung
- Abbildung des Drehmoments
- Modellierung der Abgastemperatur
- Kalibration der Kraftstoff-Film auf dem Zylinderwand
- Kalibration des Reglers (Druckregler des Ansaugkrümmers, Lambda-Regler)
- Abgasoptimierung (kalt, warm, heiß, während der Fahrzyklen)

Dieselmotor-Kalibration:

- Erster Motorbetrieb, Grundkalibration der Eingangssignalen und Ausgangssignalen von dem Steuergerät
- Drehmoment Struktur
- Kalibration des Einspritzsystems
- Kalibration der Motor-Basisfunktionen
- Kalibration der Volllastkurve
- Kalibration der Rußbegrenzung
- Kalibration und Optimierung der Emission (NO_x / Partikel) für neue europäische Fahrzyklus-Applikationen (NEFZ)
- Kalibration des Reglers (Ladedruck, Druck des Ansaugkrümmers)

CAMEO hat eine Online und eine Offline Version. Die Online Version wurde für Ausführung von intelligenten Motorkalibration-Prozeduren (iProcedures) auf Prüfstände entworfen. Die Offline Version wurde für Auswertung von Kalibration-Aufgaben (Erstellung der Motormodelle, Optimierung hinsichtlich der Emissionsgesetze, und Berechnung der Motorkennfelder von Steuergeräten) entwickelt.

2.2.1. CAMEO Online

Während meiner Arbeit wurde nur die Online Version von CAMEO verwendet. Die Software unterstützt die Arbeitsabläufe Test-Planung und Test-Auswertung, und besteht aus zwei Hauptprodukten. Das erste Produkt ist der CAMEO DoE Test Generator, das die Aufstellung des Testverfahrens von Kalibration (iProcedures) beiträgt. Das zweite Produkt ist der CAMEO Online Prüfstand, das die iProcedures in Verbindung mit einem automatischen System ausführt. Dieses System ist mit einem dazu passendem Messgerät verbunden. Das Messgerät ist in Assoziation mit einem Applikationssystem, das mit dem Steuergerät (ECU – Motorsteuergerät / TCU – Transmission Steuergerät / HCU – Hydraulik Steuergerät) verbunden wird. CAMEO Online kann mit einer breiten Palette an Prüfstand-Interfaces angeschlossen werden. Abbildung 1 zeigt eine typische Prüfstandkonfiguration für CAMEO Online.

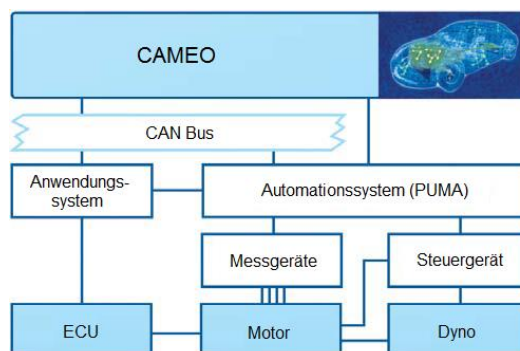


Abbildung 1: CAMEO Online [2.]

Die Online Version von CAMEO kann mit der Offline Version vervollständigt werden. Die Software leitet den Applikationsingenieur über den Arbeitsablauf der Kalibration, unter Einsatz von einem Arbeitsablauf-orientierten und Wizard-gelenkten Benutzer-Interface. Die zwei Hauptschritte von CAMEO Online sind:

- **Test Vorbereitung**
Die Phase des Testdesigns, wo alle nötige Ziele, Einstellungen und Grenzen definiert werden. Sie werden mit der Hilfe von Kenntnissen der Experten eingestellt.
- **Test Ausführung**
Der zweite Schritt des Arbeitsablaufs ist die Ausführung der iProcedures. Während der vollautomatischen Ausführung von iProcedures unterstützt CAMEO den Ingenieur mit aller wichtigen Information über den Zustand der Kalibration. Die Software realisiert einige vollautomatische Aktionen während dieser Zeit.

Die Arbeitsschritte von CAMEO Online werden auf Abbildung 2 dargestellt. Nach der Einstellung der Messparameter läuft der Prüflauf ab. Mit den Ergebnissen kann die Datenauswertung mit CAMEO Offline begonnen werden. Studenten können die Arbeitsschritte der modernen Messverfahren während der Laborübung erfassen.

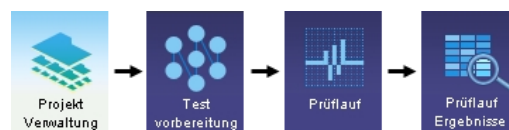


Abbildung 2: CAMEO Online

2.2.2. CAMEO Offline

CAMEO Offline wurde bei dem virtuellen Prüfstand nicht verwendet, sie ist für die Offline-Kalibration entwickelt. Sie unterstützt alle Arbeitsabläufe der Kalibration, wie Analyse der Ausgangsdaten, Modellierung, Optimierung und Kennfeldberechnung. Die Software besteht aus zwei Hauptprodukten: das Erste ist der CAMEO globaler Modellgenerator für Analysierung der Rohdaten, Modellbildung und Optimierung, das Zweite der XCU Kennfeldgenerator. Es rechnet die anfertigten ECU/TCU/HCU Kennfelder, die aus der Optimierung der Ergebnisse stammen. Die Arbeitsschritte von CAMEO Online + Offline werden auf Abbildung 3 gezeigt. Die Datenauswertung beginnt mit der Beseitigung der groben Fehler an der Rohdatenoberfläche. Der nächste Schritt ist die Modellbildung, dann die Optimierung und am Ende mit der Hilfe der Kennfeldrechner werden die neuen Kennfelder fertiggestellt.



Abbildung 3: CAMEO Online und Offline

Die Hauptschritte von CAMEO Offline sind:

- **Analyse der Rohdaten**
Rohdaten sind die originalen Messdaten, die während der Testausführungsphase gemessen wurden. CAMEO Offline hat Zugriff zu allen Rohdaten des Prüfstandes. Eine Alternative des Datenzugriffs kann der Import aus einem File oder einer ASAM-ODS kompatibel Datenbank.
- **Modellbildung**
In der Modellbildungsphase werden mathematische Modelle gerechnet. Die generierten Modelle können lokale Modelle sein, die einen Betriebszustand beschreiben. Sie können auch globale Modelle sein, die die Antwort eines Motors (z.B. Verbrauch) für den ganzen Betriebsbereich beschreiben. Verschiedene Modellierungsalgorithmen sind verfügbar, wie die polynomischen Modelle und der Neural Network Algorithmus. CAMEO informiert den Ingenieur über die Qualität der Modelle.
- **Optimierung**
CAMEO Offline hat einige Möglichkeiten für die Optimierung der Antwortmodelle bezüglich auf festgelegten Kalibrierungszielfunktionen, wie z.B.: automatische Suchalgorithmen oder manuelle Optimierung des Benutzers.
- **Berechnung der Kennfelder**
Eine der letzten Schritte der Kalibration ist die Berechnung der optimalen Modelleinstellungen. Nach der Festlegung der optimalen ECU/TCU/HCU Einstellungen werden die neuen Kurven und Kennfelder berechnet. Die Kalibration wird von einer breiten Palette von Funktionen und Merkmalen unterstützt.

Eine typische Verwendung von CAMEO ist auf Abbildung 4 zu sehen. CAMEO kommuniziert mit dem Steuergerät und dem Prüfstand durch AVL PUMA. Mithilfe des virtuellen Prüfstands können solche Systeme durch virtuelle Modelle ersetzt werden.

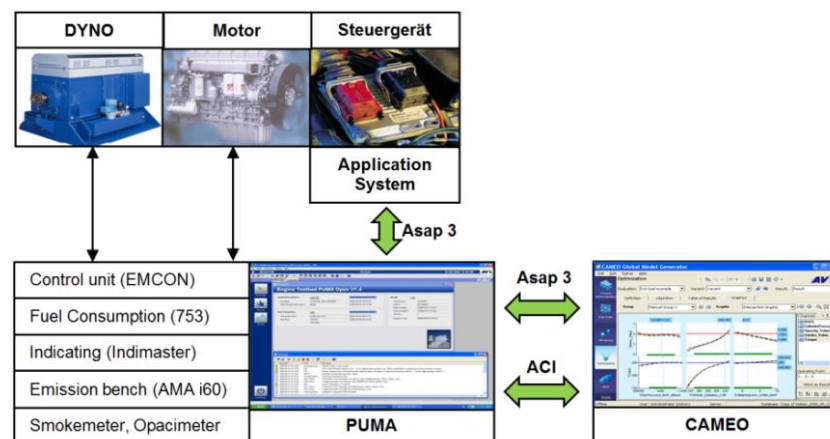


Abbildung 4: Betrieb von CAMEO während einer Prüfstandmessung [2.]

2.3. AVL BOOST

Die zweite ausgewählte Software im Rahmen der Marktuntersuchung war AVL BOOST. Sie ist ein Matlab kompatibles Simulationsprogramm für Modellierung des ganzen Motors. Der Programmcode kann den ganzen Motorzyklus einschließlich der Verbrennung simulieren. BOOST wurde von AVL, in der Abteilung der angewandten Thermodynamik-ICS, entwickelt. Die Motoranalysen, die mit der Hilfe von thermodynamischen Messungen und Berechnungen durchgeführt werden, haben eine spezielle Relevanz. Mit diesen Analysen kann das Verhalten der Modelle und des Motors erfasst und weitere Aufgaben ausgeführt werden.

BOOST hat ein grafisches, Windows-basiertes Interface – es ist für Studenten nicht unbekannt –, eine interaktive Vorbearbeitung (pre-processing), ein Modelleditor für gelenkten Input der erforderlichen Daten, eine interaktive Nachbearbeitung (post-processing) für schnelle Ergebnisse und Vergleichen mit Prüfstanddaten. Die Software hat eine effiziente, simulationbasierte Methode für eindimensionalen Strom, erweiterte Modelle für andere Motorkomponenten, und ein Display für Druckwellen. Das grafische Interface hilft in der Aneignung der Grundkenntnisse von Motorzyklus-Simulationstechnik, diese Eigenschaft kann für Studenten sehr hilfreich sein.

BOOST ist eine leistungsfähige Software für stationären und transienten Motorleistungsanalysen. Es kann für eine Menge Aufgaben verwendet werden, z.B. Vergleichung von unterschiedlichen Motorkonzepten, Optimierung von Komponentengeometrie (Ansaugsystem, Abgassystem, Ventilgröße bezüglich der Ausgangsleistung, des Drehmoments und des Kraftstoffverbrauchs), Optimierung von Ventilsteuerzeiten und Nockenprofilen, Aufbau von Überladungssystemen, Auswertung von transienter Motorleistung bezüglich den ganzen Antriebstrangs und Fahrzeugdynamik (Beschleunigung, Belastungsaufnahme, Abbremsung, Rückfall der Belastung). Diese Möglichkeiten können für virtuelle Prüfstandmessungen optimal sein. Für die Analyse der Berechnungsergebnisse sind unterschiedliche Verfahren erreichbar. Die Software hat eine Message-Analyse, eine Transient-Analyse für die Darstellung der Berechnungsergebnisse in jeden Zyklus gegen Zykluszahl oder Zeit, eine Spuranalyse für die Darstellung der Ergebnisse gegen Kurbelwinkel. BOOST hat eine Serienanalyse für einzelne Ergebnisse der neun Varianten gegen die Hauptvariante, und eine akustische Analyse für die Berechnung des Schalldruckpegels. Diese Daten können mit den Echtzeit-Messdaten verglichen werden, um einen Validationsprozess abzulaufen.

Die Hauptfunktionen von BOOST – die bei der Softwareauswahl relevant war –, sind folgende:

- Systemgrenzen
- Zwischenräume und Kurbelgehäusen
- Luftfilter und Luftkühler

- Rohre und Verbindungen
Die Zusammensetzung des Gases wird in allen Stellen, mit Lösung des Erhaltungssatzes von allen Massenanteilen, bestimmt. Unverbrannter Kraftstoff, Verbrennungsprodukte und frische Luft werden auch berücksichtigt, Mit diesen Anforderungen kann eine korrekte Abgasrückführung (AGR) gewährleistet werden.
- Lochrohre
Perforationen in Rohrwände werden mit einem Rohr in einem anderen Rohr modelliert.
- Restriktion des Stroms
Unterschiedliche Restriktionen einschließlich des Rückschlagventils und des Drehventils
- Turboaufladung
 - Einzel- und Mehrfacheintrag Turbinen
 - Turbinen mit veränderlichen Geometrie
 - Turbokompressor mit Zahnradantrieb
 - Arbeitsturbinen
 - Kompressoren mit positiven Verschiebung (Rootsgebläse)
 - Turbolader mit elektrischen Unterstützung
 - Interner und externer Ladedruckregler (Waste gate)
- Verbrennungsmodelle
 - Vibe-Funktion
 - 2-Zonen Vibe (NO_x)
 - Experimentell Burn-Rate (Zeitspanne bis zum Verbrauch des Kapitals) Input
 - MCC für Dieselmotoren (Modell mit gemischter Steuerung der Verbrennung, NO_x)
 - Fraktale Verbrennungsmodell von Benzinmotoren ($\text{NO}_x, \text{HC}, \text{CO}$)
 - Konstanter Druck
 - Konstantes Volume
- Kontrollfunktionen
 - Steuergerät (ECU), BOOST interne Steuereinheit
 - PID Controller
 - Matlab / Simulink (API Interface, DLL und s-Funktionen)
- Verbindung mit AVL FIRE
Wenn das eindimensionale Verfahren nicht ausreichend ist.
- Benutzerdefinierte Elemente

2.4. Differenzen zwischen den Simulationsverfahren

Eine moderne Entwicklungsprozedur hat unterschiedliche Phasen, die von Studenten auch erkannt werden müssen. Eine der Aufgaben der Laborübung ist die Vorlegung der Basiselemente dieser Methode.

Abbildung 5 zeigt das V-Modell, das die einzelnen Stufen der heutigen Entwicklungsprozesse erklärt. Alle unterschiedlichen Modellierungskonzepte, wie MIL (Modell-In-The-Loop), SIL (Software-In-The-Loop) und HIL (Hardware-In-The-Loop) Modelle, sind im V-Modell aufzuweisen.

Die Modelle, die bei der Laborübung verwendet werden, gehen von der modellbasierten Entwicklung (Model based Design) aus. Dieser Entwicklungsprozess wurde schon von vielen Industrien benutzt, weil es die Zeit und die Kosten deutlich reduzieren kann. Teure Geräte (z.B. Steuergeräte) müssen nicht hergestellt werden, nur dann, wenn sie schon die genauen Funktionen und Softwares haben. Tests können noch vor der Herstellung durchgeführt werden.

Die Matlab-Kompatibilität der zwei Softwares – CAMEO und BOOST – wurde für die modellbasierte Entwicklung erzeugt. Die Arbeit von Ingenieuren, die mit diesen Softwares arbeiten, wird erleichtert. Mit CAMEO können einfache Steuergerätfunktionen oder Motoren, mit der Hilfe von Kurven und Kennfelddaten aufgebaut werden. Diese virtuellen Motoren werden dann z.B. bei Tests ein Steuergerät verwendet. In BOOST können spezielle Blöcke von Simulink verwendet werden.

Die Idee bei dem virtuellen Prüfstandprojekt weicht von diesen Grundfunktionen ab, sie ist eine Weiterentwicklung, eine Verwendungsmöglichkeit für das Hochschulwesen. Die virtuelle Motoren und Prüfstände wurden so konstruiert, dass sie für Messungen und Datenauswertungen perfekt sind. Alle Modelle bleiben in der MIL Phase, sie brauchen keine SIL oder HIL Weiterentwicklung, aber die Verwendung für solche Methoden ist auch durchführbar.

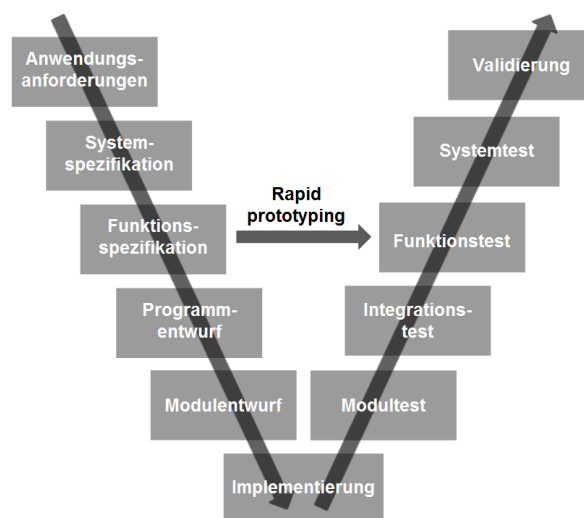


Abbildung 5: Das V-Modell

3. Motorprüfstandmodelle

In diesem Kapitel werden die angefertigten Matlab-Simulink Modelle ausführlich dargestellt. Diese Modelle wurden später ins CAMEO importiert. Die Modelle verhalten sich so wie andere Systeme, die mit CAMEO kompatibel sind. Die Software funktioniert mit Matlab-Modelle auch einwandfrei. Die Verbindung zwischen Matlab-Files und CAMEO, der Aufbau und der Betrieb der Modelle werden im Nachfolgenden erläutert.

3.1. Verbindung zwischen Matlab und CAMEO

Prinzipiell ist CAMEO eine HIL-basierte Software für Prüfstandmessungen. Die Software braucht einen Prüfstand und einen Motor für die Ausführung einer Messung. Matlab-Simulink Modelle sind aber MIL-basierte Modelle und keine Hardware steht zu Verfügung. Trotz des Unterschieds existiert die Möglichkeit, eine Verbindung zwischen den Softwares herzustellen.

Mit dem Real-Time Workshop von Matlab lassen sich HIL-kompatible Modelle erschaffen. Die Ingenieure von AVL haben einen Workshop für Non-Real-Time Simulation (NRTSIM) Files programmiert. Durch diesen Workshop können NRTSIM, oder abkürzend NRL-Files definiert werden. Wenn das Modell fertig ist, muss man aus MDL (Matlab) Files NRL-Files konvertieren. Ein NRL-File beinhaltet ein ganzes Modell, aber gegenüber der MDL-Datei ist es mit CAMEO kompatibel. Abbildung 6 zeigt, wie Matlab eingestellt werden soll. Der Solver muss „Fixed-Step“ sein. Nach der Auswahl des richtigen Workshops muss man auf „Build“ klicken. Wenn es keine Fehlermeldung gibt, generiert Matlab die NRL-Files automatisch. Die Arbeit in Matlab ist fertig in dieser Phase und die Arbeit in CAMEO kann begonnen werden.

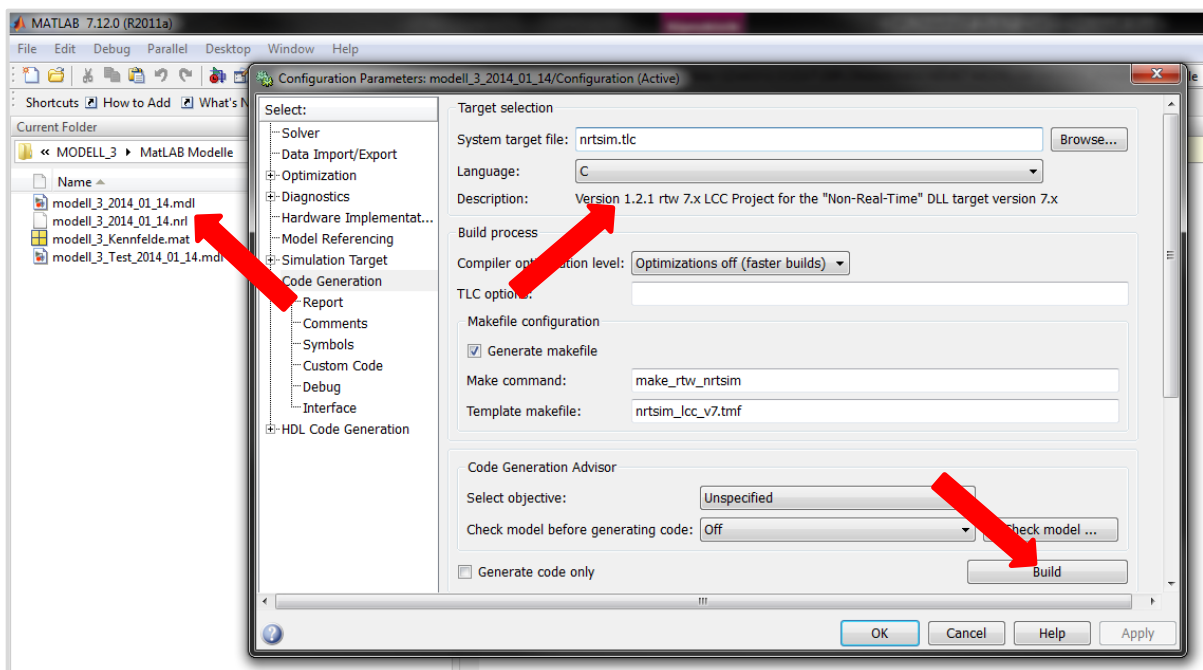
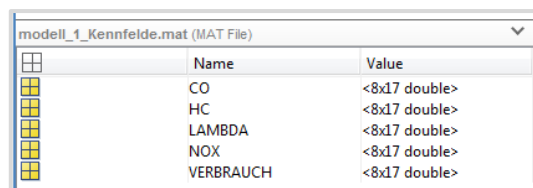


Abbildung 6: Kennfelder in einem MAT-File

3.2. Modellbildung in Matlab-Simulink

Die Simulink-Modelle sind derart aufgebaut, dass sie nur mit der Veränderung einiger Datensätze, für Otto- und auch für Dieselmotoren verwendet werden können. Damit wird die Arbeit der Lehrer einfacher, wenn sie später die Daten von einem unterschiedlichen Motor in das Modell importieren wollen. Alle Diagramme und Kennfelder beziehen sich auf äußere Variablen, die in einem MAT-File abgespeichert sind. Die Daten können mit Microsoft Excel oder Notepad editiert, dann einfach in dem MAT-File gelegt werden. Abbildung 7 zeigt eine MAT-Datei mit Kennfeldern drinnen.



Name	Value
CO	<8x17 double>
HC	<8x17 double>
LAMBDA	<8x17 double>
NOX	<8x17 double>
VERBRAUCH	<8x17 double>

Abbildung 7: Kennfelder in einem MAT-File

Drei Modelle sind mit diesem Verfahren aufgebaut. Zwei Modelle, ein Benzinmotor-Modell und ein Dieselmotor-Modell sind unkompliziert. Das Dritte, ein anderes Benzinmotor-Modell ist vielschichtig. Die Daten sind echte Messdaten von realen Motoren bei jedem Modell. Die Modelle bestehen aus einem Grundmodell und verschiedenen Subsystemen, weil CAMEO nur die Eingänge und die Ausgänge analysiert. Die Eingänge und Ausgänge, die für die Studenten während der Messung unnötig sind, werden in Subsystemen definiert. Diese Ports funktionieren in dem Modell fehlerfrei, aber werden von CAMEO nicht gesehen. Die Blöcke der Simulink-Modelle sind farbig, damit wird die Zusammengehörigkeit von einzelnen Teilen des Modells einfacher.

Die CAMEO-Modelle der AVL Mitarbeiter, die Struktur, der Betrieb und die Validierung der eigene Matlab-Modelle und CAMEO-Messungen werden im Nachfolgenden ausführlich dargestellt.

3.2.1. Modelle der AVL Mitarbeiter

Die Kollegen von AVL haben mehrere Modelle für innere Weiterbildungen hergestellt. Diese Modelle beinhalten reale Messdaten des Motors auf dem Prüfstand. Sie können zum Bildungswesen der Software beitragen, aber sind für akademische Schulung zu kompliziert. Mit diesen Modellen von AVL wird eine Messung mit dem Computer vorbereitet. Die Messdaten für die eigenen Motormodelle stammen aus Modellen von AVL. Zu Beginn der Arbeit, die Hilfe von CAMEO wurde verwendet. CAMEO ist mit vielen Systemen kompatibel, auch mit Matlab. Die CAMEO-Files, die wir von AVL bekommen haben, beinhalten schon ihre Matlab-Modelle. Sie verhalten wie ein echter Prüfstand, CAMEO sieht die Differenz nicht. Dieser Vorteil wurde später ausgebeutet. Die Messungen mit den Modellen von AVL waren funktionsfähig,

aber sehr kompliziert. Nach einigen Testläufen war bestimmt, dass die Schulung der Studenten individuelle Modelle braucht. Die erste Aufgabe war die Planung, wie die Modelle aussehen sollen, was die Eingangsparameter sind, was wir messen wollen. Der nächste Ablaufschritt nach der Formgebung der beabsichtigten Modelle war die Datensammlung. Die Vorteile von CAMEO war ein Nachteil bei der Modellbildung. Mit dieser Software wird die Arbeit von Ingenieuren einfacher. Sie müssen nur wenige Messungen mit CAMEO Online durchführen, CAMEO Offline rechnet dann die übrigen Punkte aus. Damit können sie Zeit und Geld sparen. Diese Messdaten waren nicht genügend für eigene Modelle. Messungen wurden mit den Files von AVL aufgestellt. Die nötigen Messpunkte wurden eingestellt und gemessen. Abbildung 8 zeigt eine Datensammlung. Die grauen Punkte sind die zu messende Messpunkte, die Blaue schon gemessen, der Gelbe ist der aktuelle Messpunkt.

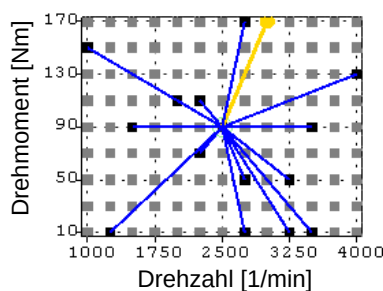


Abbildung 8: Quelle der Messdaten

Die Daten sollen auf jeden Fall aus dem Bereich Design Space gesammelt werden (Abbildung 9). Die grüne Linie zeigt die Grenze des Versuchsraums. Die Messung wurde in diesen Bereich ausgeführt. Die Daten außerhalb dieses Bereiches können nicht verwendet werden, weil die CAMEO-Modelle extrapolieren. Die Genauigkeit der Daten werden unbestimmt. In der Abhängigkeit von Eingangsparametern können die Modelle zahllose Dimensionen haben, die Modelle von AVL hatten durchschnittlich fünf veränderbare Parameter. Alle Eingangsparameter bedeuten eine Dimension, wir bekommen fünf verschiedene Kurven mit fünf Design Spaces. Die Veränderung von einem Parameter beeinflusst die anderen Vier. Man kann fünfdimensionale Modelle nicht verstehen, aber CAMEO kann damit einfach rechnen. Es muss aber beachtet werden, dass alle Messdaten im Bereich der grünen Linien sein müssen.

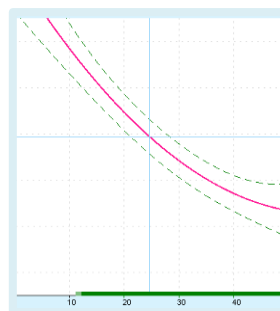


Abbildung 9: Der Design Space

3.2.2. Aufbau und Hauptelemente der Simulink-Modelle

Vor der ausführlichen Vorstellung der Simulink-Modelle ist die Darstellung der Hauptelemente erforderlich. Nur die wichtigsten Elemente werden präsentiert, damit sind die Modelle einfach erfassbar. Abbildung 10 zeigt die 16 wichtigsten Simulink-Elemente.

Das erste Element ist der Eingang. Damit werden die steuerbaren Eingangsparameter verändert und sind durch Matlab und CAMEO modifizierbar. Sie befinden sich in Subsystemen als Eingänge auch.

Das Zweite ist der Ausgang, hier erscheinen die Ausgangssignale der Modelle. Diese Signale werden dann in CAMEO durch grafische und numerische Displays gezeigt. Diese Elemente verbinden dann die Subsysteme mit Hauptmodellen.

Das Dritte ist das Subsystem, es beinhaltet komplexe Blöcke, die für Studenten unnötig sind und nicht gezeigt werden.

Das Vierte und Fünfte sind Kurven und Kennfelder. Sie beinhalten Daten in Matrizen. Diese haben ein oder zwei Eingänge, in Abhängigkeit der Eingangssignale erzeugen sie ein Ausgangssignal.

Das Sechste und Siebte sind ein Sammler und ein Verteilerelement. Sie behandeln die Signale in einer Vektor Form.

Das Achte ist das Display Element, damit können Signale gezeigt werden.

Das Neunte ist der Verstärker. Signale können damit einfach verändert werden.

Das Zehnte und Elfte sind ein Eingang und ein Ausgang, und können Signale ohne Linien weiterleiten. Bei komplexen Modellen können sie sehr lohnend sein.

Das Zwölfte und Dreizehnte sind Schalterelemente. Unterschiedliche Eingänge können mit diesen Blöcken verwendet werden. Das Zwölfte hat ein konstanter Schaltpunkt, dieser Punkt muss vorprogrammiert werden. Das Elfte kann mit einem Eingang gesteuert werden, womit es auch in CAMEO verändert werden kann.

Das Vierzehnte ist die Konstante, hier können konstante Eingänge definiert werden.

Das Fünfzehnte ist das Addition Element, für Addition der Signale.

Das Sechszehnte ist das Stopp Simulation Element. Wenn ein Signal sich mit diesem Block trifft, wird die Simulation gestoppt.

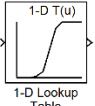
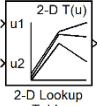
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
 In	 Out	 Subsystem	 1-D Lookup Table	 2-D Lookup Table			 Scope
9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.
 Gain	 From	 Goto	 Switch	 Multipoint Switch	 Constant		 Stop Simulation

Abbildung 10: Hauptelemente der Simulink-Modelle

3.2.3. Das erste eigene Matlab-Modell

Das erste Modell ist ein Benzinmotor-Modell. Hier werden die Drehzahl und das Drehmoment verändert. Lambda ist konstant 1 während der Parameterveränderung, der spezifische Verbrauch, der Schadstoffausstoß (CO, HC, NO_x) werden gemessen. Das Simulink-Modell in Testphase ist auf Abbildung 11 zu sehen. Die größte Herausforderung bei der Modellbildung ist, ob nach der erfolgreichen Koppelung mit CAMEO das Modell tatsächlich so funktionieren wird, wie ein realer Motor auf einem echten Prüfstand. Die Messdaten während der Messung können nicht konstant bleiben, bei realen Messprozessen nehmen die Sensoren Störsignale auch auf. Die Veränderung von Eingangsparametern kann nicht sofort ein Feedback auf den Ausgangsparametern geben. Ein realer Motor braucht auch Zeit, eine gegebene Drehzahl oder Drehmoment zu erreichen. Nach dem ersten Testlauf war selbstverständlich, dass ohne die Subsysteme „Verspätung“ und „Vibration“ das Modell nie wie ein realer Motor funktionieren wird. Diese Subsysteme werden im Folgenden auch dargestellt.

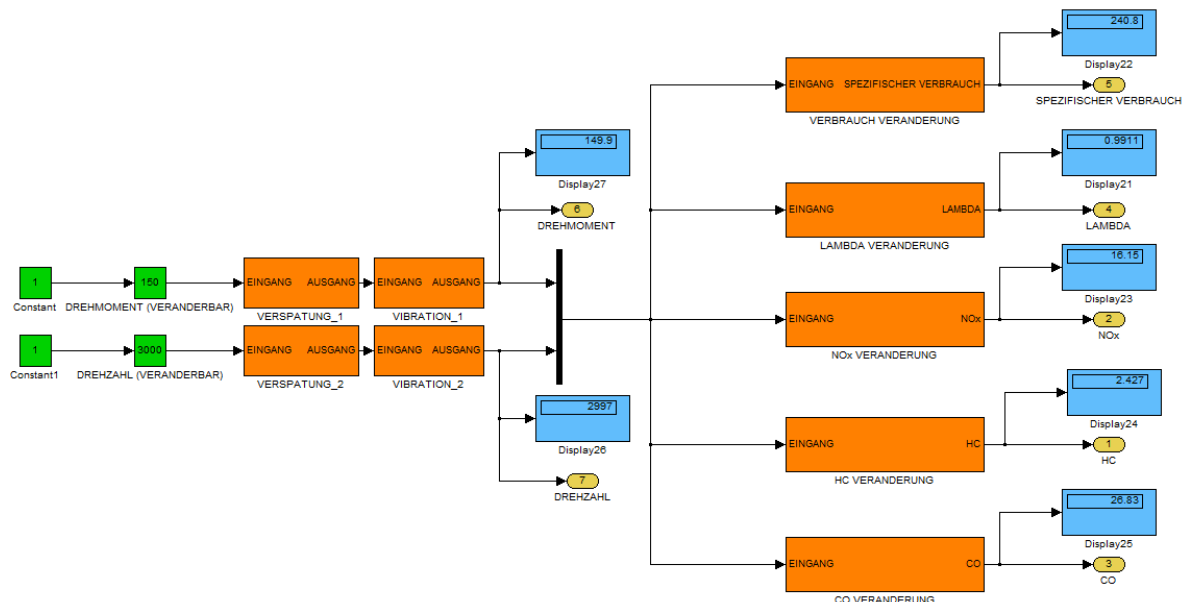


Abbildung 11: Blockdiagramm des ersten Modells in Testphase

Das fertiggestellte Modell besteht aus den folgenden Blöcken:

- Eingang-Ports
- Subsystem namens Verspätung
- Subsystem namens Vibration
- Subsysteme von Ausgangsparametern (Spezifischer Verbrauch, Lambda, NO_x, HC, CO)
- Displays
- Ausgang-Ports

Die Laborübung wurde für ungarischen Studenten vorbereitet, die Benennungen bei diesen Modellen wurden auf Ungarisch gegeben, aber für meine Diplomarbeit und für Fahrzeugingenieur-Studenten in ihrem Masterstudium habe ich auch deutsche Varianten fertiggestellt. Die wichtigen Teile wurden von mir, alles Andere von Matlab automatisch benannt. Im CAMEO erscheinen diese Namen, dort kann man nichts verändern, deshalb sind die korrekten Benennungen in Matlab-Modellen wichtig. Abbildung 12 zeigt das anfertigte Matlab-Modell für CAMEO.

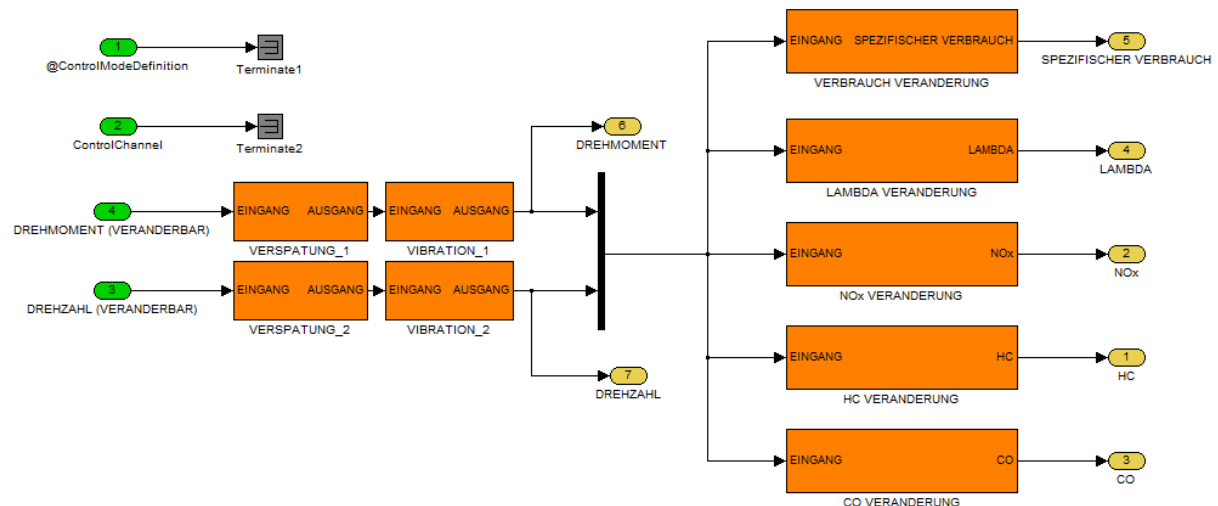


Abbildung 12: Blockdiagramm des ersten Modells

3.2.3.1. Subsystem namens Verspätung

Dieses Subsystem behindert die schlagartigen Veränderungen der Eingangssignale, die von Studenten veränderbar sind. Die Ausgangssignale ändern sich später und langsamer, wie bei einem realen Prozess. Dieses Subsystem ist unentbehrlich wichtig für die erfolgreiche Laborübung, weil die Studenten sehen und verstehen müssen, dass die Stabilisierung von Motorparametern bestimmte Zeit braucht. Das Subsystem ist ein auf Parallelkompensation-basierter PID Controller. Das Blockdiagramm wird auf Abbildung 13 dargestellt. Der rote Anzeiger benutzt man für das Einstellen des Controllers. Die Konstante der Integrator Elemente sind bei allen Eingangsparametern unterschiedlich, weil die Betriebsbereiche der Eingangsdaten nicht gleich sind.

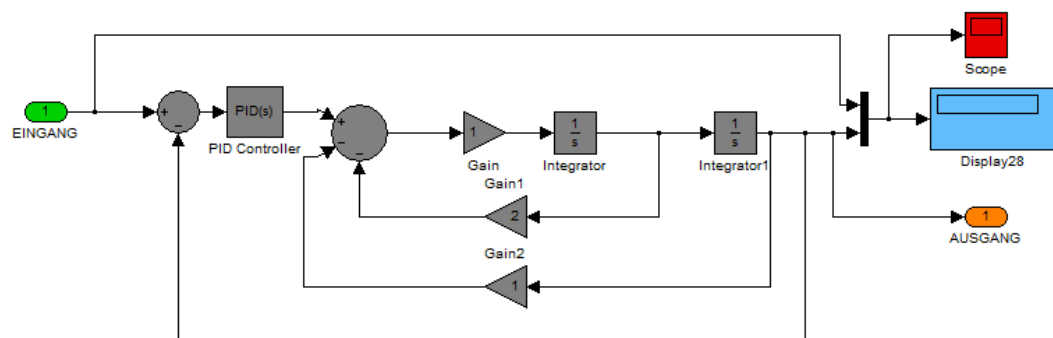


Abbildung 13: Blockdiagramm des Subsystems namens Verspätung

Ein Beispiel des Betriebs wird auf Abbildung 14 dargestellt. Hier wird eine einfache Lambdaveränderung im Matlab gesehen. An der X-Achse ist die Zeit, an der Y-Achse sind die Lambdawerte zu sehen. Die blaue Linie symbolisiert die schlagartigen Veränderungen der Eingangssignale vor dem PID Controller, die Grüne das Ausgangssignal nach dem Regelkreis. Mit diesem Subsystem wurde die reale Parameterveränderung erreicht und die Anforderungen befriedigt.

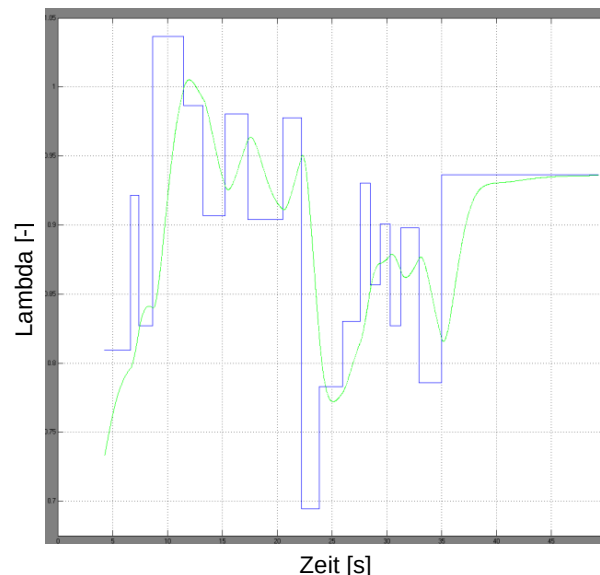


Abbildung 14: Subsystem namens Verspätung im Betrieb

3.2.3.2. Subsystem namens Vibration

Ohne dieses Subsystem bleiben die Ausgangsparameter immer konstant. Sie führt eine kontinuierliche Instabilität ins System ein, genauso wie Störsignale bei realen Prozessen. Motorische Prozesse sind nie ständig, die Sensoren auf dem Motor haben auch Fehlergrenzen, deshalb müssen sich die Ausgangsparameter der Modelle in einem engen Bereich kontinuierlich ändern. Der Zweck dieses Subsystems war - wobei es sich nur um einen virtuellen Prüfstand handelt und im Hintergrund nur eine Simulation läuft- die Vermittlung des Gefühls der Messung auf einem echten Prüfstand.

Abbildung 15 zeigt das Blockdiagramm des Subsystems. Die Gleichung (2.1) und die Konstruktion sind einfach, die originale Idee kommt von den Mitarbeitern von AVL. Zu dem Eingangssignal wird ein zufällig generierter positiver oder negativer Wert addiert, was noch innerhalb des Fehlerbereiches ist. Dieser Wert wird von uns angegeben.

$$\text{AUSGANG} = \text{EINGANG} \pm (\text{KONSTANT} \cdot \text{EINGANG}) \quad (2.1)$$

- EINGANG - Eingangssignal des Subsystems
- AUSGANG - Ausgangssignal des Subsystems
- KONSTANT - Ein kleiner Multiplikator

Die Auswirkung ist eine kontinuierliche Änderung der Ausgangssignale. Die Messdaten sind nie identisch, sie zeigen eine Vibration, wie bei realen Messungen auf einem Prüfstand.

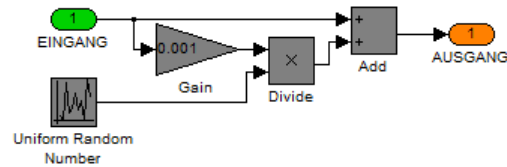


Abbildung 15: Blockdiagramm des Subsystems namens Vibration

3.2.3.3. Verbrauchsänderung

Die Werte des Subsystems werden in einem Kennfeld angegeben. Die Verbrauchswerte der einzelnen Punkte hängen von der Drehmoment- und der Drehzahlveränderung ab. Das Blockdiagramm wird auf Abbildung 16 dargestellt. Zu den zwei Eingangsparametern gehört ein Ausgangsparameter. Hier werden die Blöcke, die für die kontinuierliche Änderung der Ausgangssignale verantwortlich sind, auch verwendet. Der Wert des Ausgangsports von diesem Subsystem erscheint dann auf dem Ausgangsport des Hauptmodells und wird von CAMEO gezeigt.

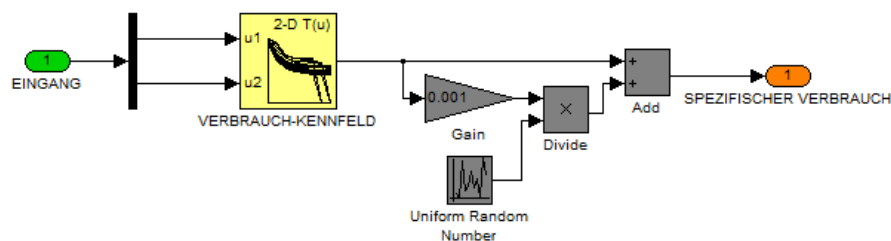


Abbildung 16: Blockdiagramm des Subsystems namens Verbrauchsveränderung

Die Darstellung der Ergebnisse war eine Herausforderung. Meine Aufgabe war die Erstellung einer Präsentation des Muscheldiagramms von spezifischem Verbrauch für die Studenten. Dazu wurde der Map Generator von CAMEO benutzt. Obwohl die Software für Kalibrierung der Kennfelder entwickelt wurde, ist für die Darstellung der Ergebnisse auch geeignet. Tabelle 1 ist eine Zusammenfassung der Messdaten, die in das Kennfeld programmiert werden. Diese Daten wurden für Abbildung 17 und 18 auch benutzt.

Tabelle 1: Werte des spezifischen Verbrauchs (Modell 1)

M\N	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500	4750	5000	5250	5500	5750	6000
20	500	500	500	500	500	503	506	509	512	515	518	521	525	531	537	543	550
40	355	360	350	355	360	365	370	375	380	385	390	400	420	440	470	490	500
60	298	300	297	298	300	305	315	320	325	335	340	350	360	375	385	395	400
80	265	268	265	265	268	272	277	285	290	300	312	320	335	345	360	380	385
100	257	258	256	255	257	258	263	268	273	284	291	310	320	335	355	365	375
120	249	249	247	247	248	251	255	260	268	275	285	300	320	337	355	365	375
140	0	244	242	240	243	248	254	258	267	275	285	310	320	335	345	0	0
160	0	0	243	238	239	250	257	265	275	285	296	310	317	0	0	0	0

Die horizontale Achse der Tabelle zeigt die Drehzahl [1/min], die vertikale Achse das effektive Drehmoment [Nm]. Der spezifische Verbrauch [g/kWh] wird in Abhängigkeit von diesen zwei Parametern geändert. Die Daten wurden von einem AVL CAMEO-Modell entnommen, das über reale Messdaten verfügt. In der Tabelle 1 ist der Messbereich auch zu sehen.

Auf Abbildung 17 wurde das Muscheldiagramm des spezifischen Verbrauchs präsentiert. Die blaue Farbe zeigt immer die Tiefstwerte, die Rote die Höchstwerte. Alle anderen Werte werden mit einer Farbübergang dargestellt. Die steife schwarze Linie demonstriert die Vollastkurve des Motors. Alle Werte sind notwendig für den richtigen Betrieb von Matlab und CAMEO, deshalb wurden Werte außerhalb des Betriebsbereiches auch gegeben (schwarze Punkte über der schwarzen Linie). Die Werte dieser Punkte werden als 0 programmiert. Damit können die Studenten sofort bemerken, dass der Motor in diesen Punkten nicht funktionieren kann.

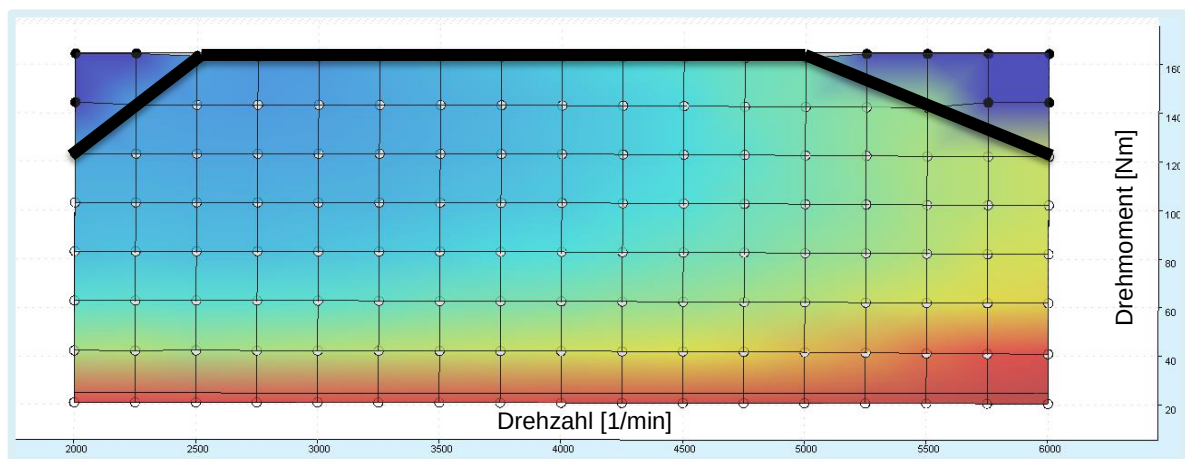


Abbildung 17: Muscheldiagramm des spezifischen Verbrauchs

Die Daten werden in der Realität dreidimensional abgebildet, für das einfache Verständnis der Kennfelder werden solche 3D Bilder erzeugt. Auf Abbildung 18 ist ein typisches Beispiel zu erkennen. Die Punkte außerhalb des Betriebsbereiches geben nicht eine 0, sie liegen immer in der Nähe der übrigen Punkte. Der Farbübergang ist gleichmäßiger, das Durchschau ist einfacher.

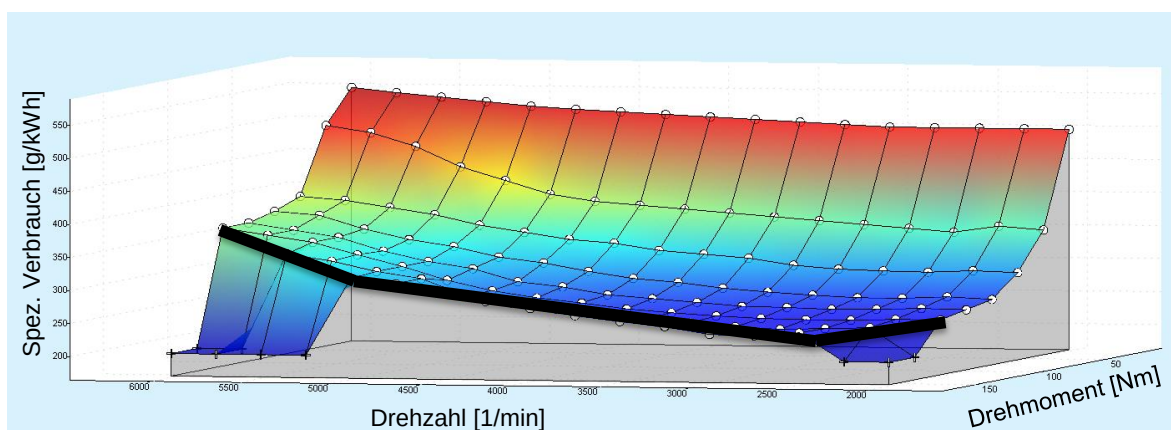


Abbildung 18: Dreidimensional Muscheldiagramm des spezifischen Verbrauchs

Die übrigen Subsysteme werden ausführlich nicht dargestellt. Die Differenz sind nur die Daten des Kennfeldes. Diese Daten können später verändert werden. Irgendeine Änderung von Kennfeldern beeinflusst den Betrieb der Modelle nicht. Nur der Messbereich und die Auflösung der Kennfelder müssen ersetzt werden. Wenn der Name des neuen Kennfeldes mit der Vorherigen nicht identisch ist, muss dieser Name auch ersetzt werden.

3.2.3.4. Lambda Änderung

Die Daten des ersten Modells wurden bei $\lambda=1$ gemessen. Alle Messdaten wurden bei allem Betriebszustand als einer 1 programmiert, deshalb wird nur der Aufbau des Subsystems gezeigt. Abbildung 19 präsentiert das Blockdiagramm des Subsystems. Die Elemente stimmen mit Abbildung 16 überein, unterschiedlich sind nur der Name des Ausgangsports und die Daten im Kennfeld. Die kontinuierliche Veränderung der Ausgangssignale wird hier auch gewährleistet.

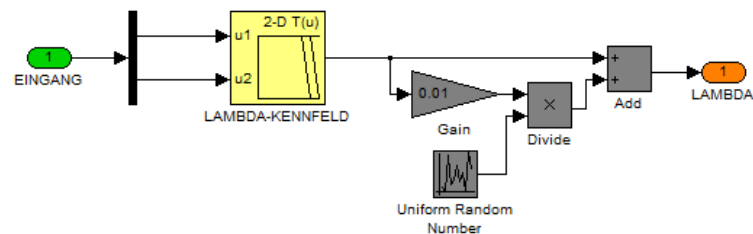


Abbildung 19: Blockdiagramm des Subsystems namens Lambda Veränderung

3.2.3.5. NO_x Änderung

Das Blockdiagramm des Subsystems ist völlig identisch mit Abbildung 16. Bei dem Aufbau unterscheiden sich nun das Kennfeld und die Namen des Ausgangsports. Abbildung 20 zeigt die (unterschiedlichen) Kennfelder, die in den Subsystemen zu finden sind. Die kontinuierliche Signalveränderung auf die Ausgangsports wird in allen Subsystemen gewährleistet. Die Messwerte weichen damit beim allen neuen Messungen ab, aber bleiben immer innerhalb der vorprogrammierten Fehlergrenze.

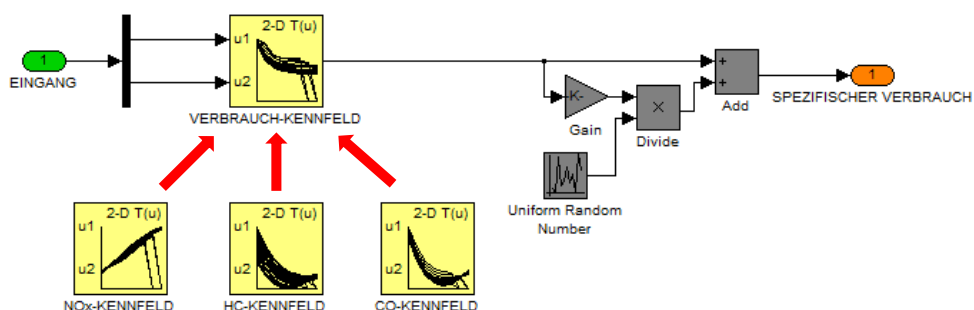


Abbildung 20: Unterschiede im Aufbau der Subsysteme

Tabelle 2 ist eine Zusammenfassung der Emissionswerte. Die horizontale Achse der Tabelle zeigt die Drehzahl [1/min], die vertikale Achse das effektive Drehmoment [Nm]. Die NO_x Emission [g/kWh] wird in Abhängigkeit von diesen zwei Parametern geändert. Abbildung 21 illustriert die NO_x Emission in 2D. Die steife schwarze Linie zeigt wieder die Vollastkurve des Motors. Schwarze Punkte über der Linie sind Werte außerhalb des Betriebsbereiches. Abbildung 22 darstellt das dreidimensionale Kennfeld der Emission. Die Werte der Punkte außerhalb des Betriebsbereiches sind wieder nicht 0. Sie liegen immer in der Nähe der übrigen Punkte, damit ist der Farbübergang viel einheitlicher.

Tabelle 2: Werte der NO_x Emission (Modell 1)

M\n	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500	4750	5000	5250	5500	5750	6000
20	3,9	4,2	4,4	4,6	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,7	4,8	5
40	6,2	6,4	6,5	6,6	6,6	6,6	6,5	6,4	6,3	6,2	6,1	5,9	5,9	5,8	5,7	5,8	5,9
60	8,4	8,6	8,7	8,7	8,7	8,6	8,5	8,3	8,1	7,9	7,7	7,6	7,4	7,3	7,2	7,1	7,1
80	10,5	10,7	10,8	10,8	10,7	10,6	10,4	10,3	10	9,8	9,6	9,4	9,2	9	8,8	8,8	8,7
100	12,5	12,6	12,7	12,7	12,7	12,5	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5	11,3	11	10,9	10,7	10,6	10,5
120	14,1	14,3	14,4	14,4	14,4	14,3	14,1	13,9	13,8	13,5	13,3	13,1	12,9	12,7	12,5	12,4	12,4
140	0	15,6	15,7	15,8	15,8	15,7	15,6	15,5	15,3	15,1	14,9	14,7	14,6	14,4	14,3	0	0
160	0	0	16,7	16,8	16,8	16,8	16,7	16,6	16,5	16,4	16,3	16	15,9	0	0	0	0

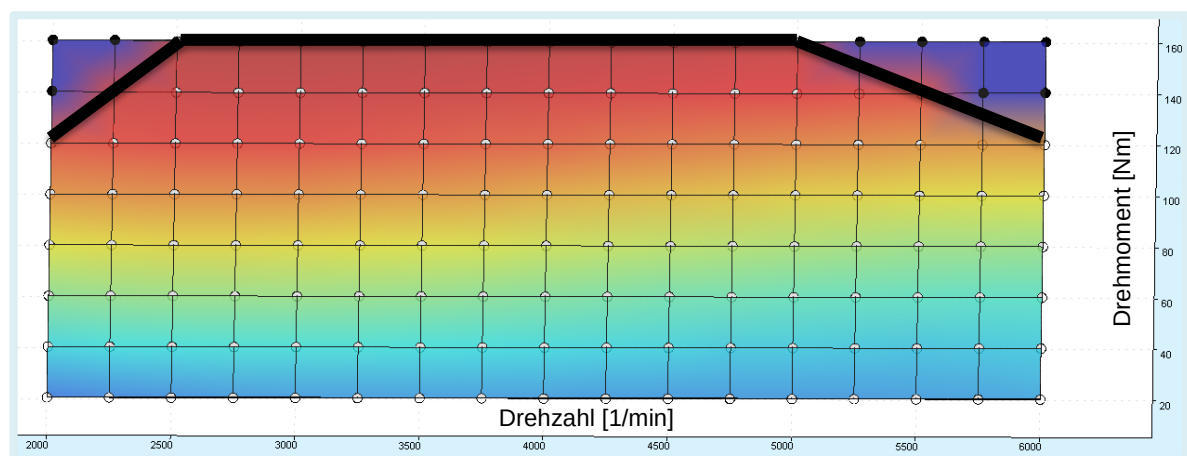


Abbildung 21: Zweidimensionale Illustration der NO_x Emission

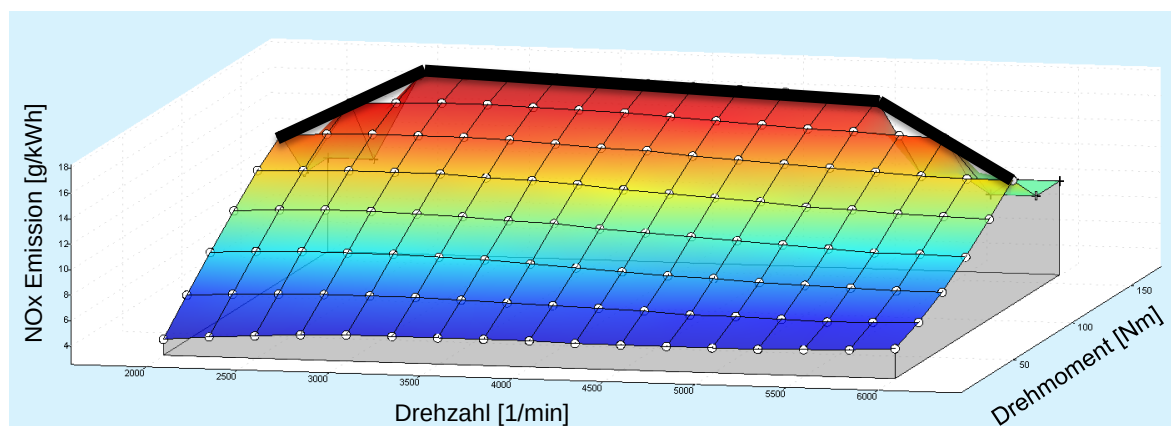


Abbildung 22: Dreidimensionale Illustration der NO_x Emission

3.2.3.6. HC Änderung

Der Aufbau des Subsystems stimmt mit dem Blockdiagramm der Verbrauchsänderung (Abbildung 16) überein. Die zweidimensionale Darstellung der HC Emission sieht man auf Abbildung 23. Mit steifen schwarzen Linien ist die Vollastkurve des Motors markiert. Schwarze Punkte sind Werte außerhalb des Betriebsbereiches. Die Messdaten sind in Tabelle 3 zu sehen. Die horizontale Achse der Tabelle zeigt die Drehzahl [1/min], die vertikale Achse zeigt das effektive Drehmoment [Nm]. Die Maßeinheit der HC Emission ist in [g/KWh] angegeben. Die dreidimensionale Illustration der Emissionswerte ist auf Abbildung 24 dargestellt.

Tabelle 3: Werte der HC Emission (Modell 1)

M\n	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500	4750	5000	5250	5500	5750	6000
20	12,2	11,8	11,4	11	10,5	10,1	9,7	9,2	8,8	8,3	7,8	7,4	6,9	6,5	6	5,6	5,2
40	8,45	8,1	7,8	7,4	7	6,6	6,3	5,9	5,5	5,1	4,7	4,3	3,9	3,6	3,2	2,8	2,5
60	5,8	5,5	5,2	4,9	4,6	4,3	4	3,7	3,3	3	2,7	2,3	2	1,7	1,4	1,1	0,8
80	4,1	3,9	3,6	3,4	3,2	2,9	2,6	2,4	2,1	1,8	1,5	1,3	1	0,8	0,5	0,3	0,1
100	3,1	3	2,8	2,6	2,4	2,2	1,99	1,8	1,6	1,3	1,1	0,9	0,7	0,5	0,4	0,2	0,1
120	2,7	2,6	2,5	2,3	2,2	2	1,9	1,7	1,5	1,4	1,2	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
140	0	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1	2	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	0	0
160	0	0	2,7	2,6	2,6	2,5	2,4	2,4	2,3	2,2	2,1	2	1,9	0	0	0	0

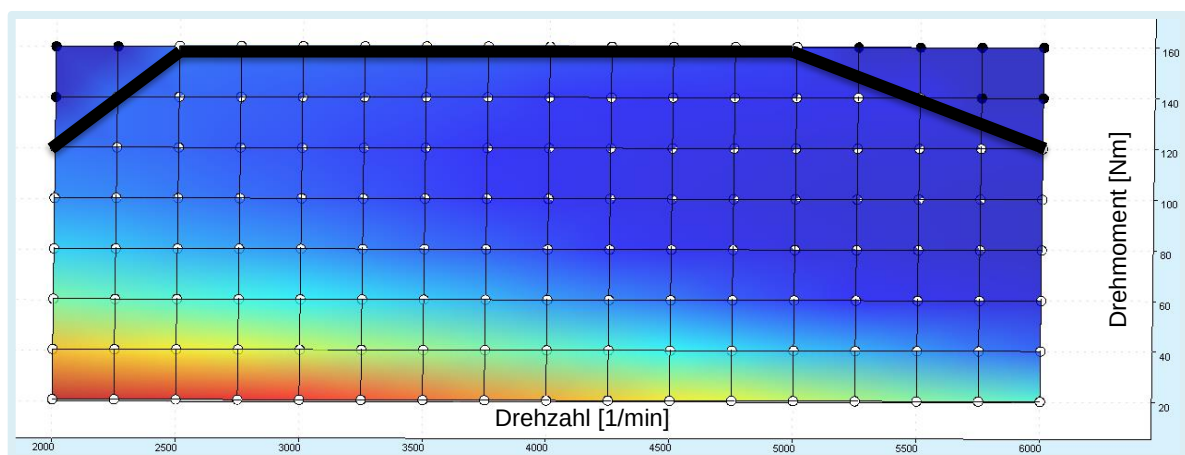


Abbildung 23: Zweidimensionale Illustration der HC Emission

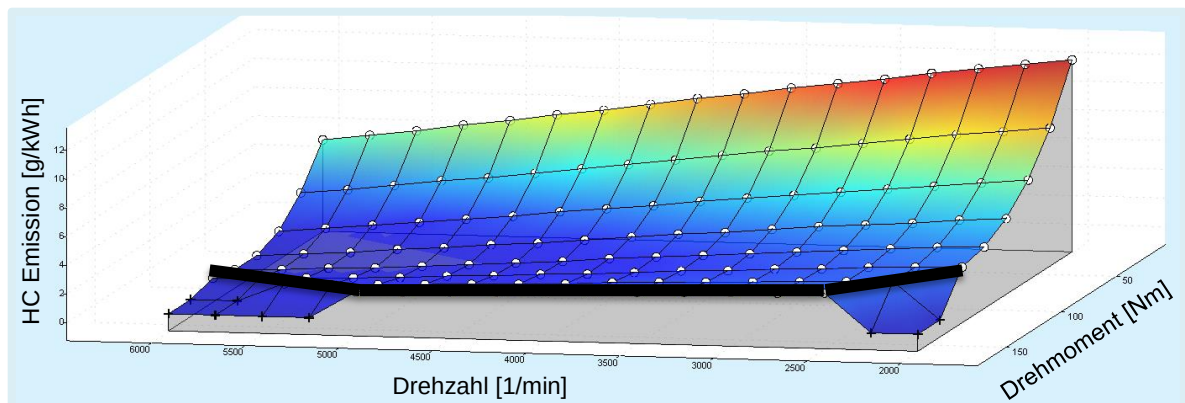


Abbildung 24: Dreidimensionale Illustration der HC Emission

3.2.3.7. CO Änderung

Der Aufbau kann bei der Verbrauchsänderung (Abbildung 16) gesehen werden. Die Unterschiede sind die Kennfelddaten. Die zweidimensionale Illustration der CO Änderung wird auf Abbildung 25 gezeigt. Die steife schwarze Linie zeigt die Vollastkurve des Motors. Schwarze Punkte sind Werte außerhalb des Betriebsbereiches. Die Messdaten sind in Tabelle 4 zu sehen. Die horizontale Achse der Tabelle zeigt die Drehzahl [1/min], die vertikale Achse das effektive Drehmoment [Nm]. Die Maßeinheit der CO Emission wurde in [g/KWh] definiert. Die dreidimensionale Illustration der Emissionswerte ist auf Abbildung 26 dargestellt.

Tabelle 4: Werte der CO Emission (Modell 1)

M\η	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500	4750	5000	5250	5500	5750	6000
20	112,5	108,6	106,2	102,6	99,9	97,5	95,5	94,1	93,2	93,0	93,0	94,3	96,1	98,9	102,8	108,0	114,3
40	62,1	59,9	57,7	56,0	54,0	52,3	51,4	51,2	50,4	50,9	51,7	53,6	56,0	59,7	63,7	69,2	75,5
60	28,6	28,0	27,1	26,1	25,2	24,7	24,2	24,3	24,5	25,2	26,5	28,5	31,0	34,6	38,8	44,1	50,4
80	10,8	10,9	10,9	10,8	10,6	10,5	10,6	10,8	11,6	12,5	13,8	15,8	18,3	21,6	25,8	30,8	36,5
100	4,9	5,8	6,3	6,8	7,0	7,3	7,6	8,0	8,6	9,5	10,9	12,6	14,9	17,8	21,3	25,7	30,7
120	8,0	9,4	10,3	11,1	11,5	11,8	12,1	12,5	13,1	13,6	14,5	15,8	17,4	19,6	22,3	25,6	29,5
140	0	19,0	20,0	20,8	21,2	21,3	21,3	21,4	21,3	21,1	21,5	21,9	22,6	23,6	25,0	0	0
160	0	0	32,6	33,1	33,1	32,7	32,2	31,5	30,6	29,5	28,8	27,7	26,9	0	0	0	0

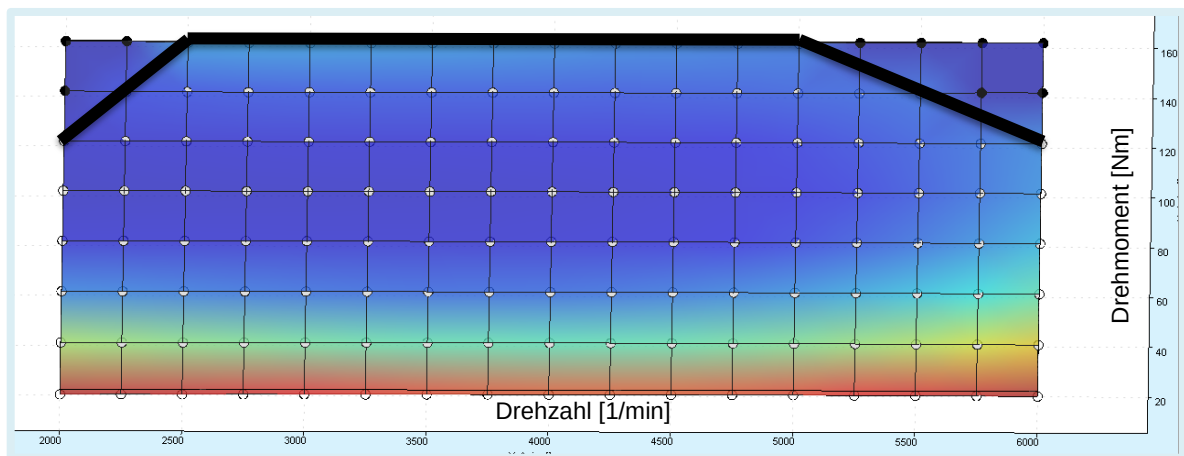


Abbildung 25: Zweidimensionale Illustration der CO Emission

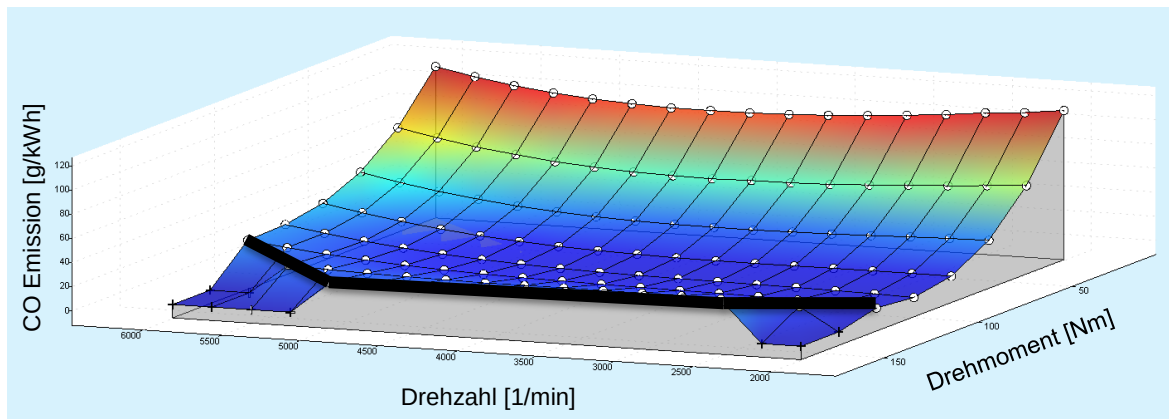


Abbildung 26: Dreidimensionale Illustration der CO Emission

3.2.4. Das zweite eigene Matlab-Modell

Das zweite Modell ist auch ein Benzinmotor-Modell. Die Werte wurden auch aus CAMEO-Messungen von AVL entnommen. Nach der Datensammlung wurde das Modell fertiggestellt. Die Messdaten gehören zu einem unterschiedlichen Motor mit unterschiedlichen Betriebsbereichen. Das Modell ist eine weiterentwickelte Variante des ersten Modells. Zwei vorprogrammierte Messverfahren und ein innerer Schalter befinden sich in dem Modell, der eine Schaltung zwischen den zwei Messverfahren zur Verfügung stellt. Mit Messverfahren 1 können die Studenten Messungen, - die mit dem ersten Modell identisch sind - durchführen. λ ist konstant 1, die Drehzahl und das Drehmoment sind veränderbar. Bei Messverfahren 2 kann λ verändert werden, Drehzahl = 3000 [1/min]. Die Ausgangsparameter hängen nur von der λ -Veränderung ab. Die Studenten können einfach untersuchen, wie λ die Emissionswerte, den spezifischen Verbrauch und das effektive Drehmoment beeinflussen kann. Das dazu gehörende Blockdiagramm ist auf Abbildung 27 sichtbar. Nu einige Elemente sind unterschiedlich. Dieses Modell besteht auch aus einem Grundmodell und aus verschiedenen Subsystemen.

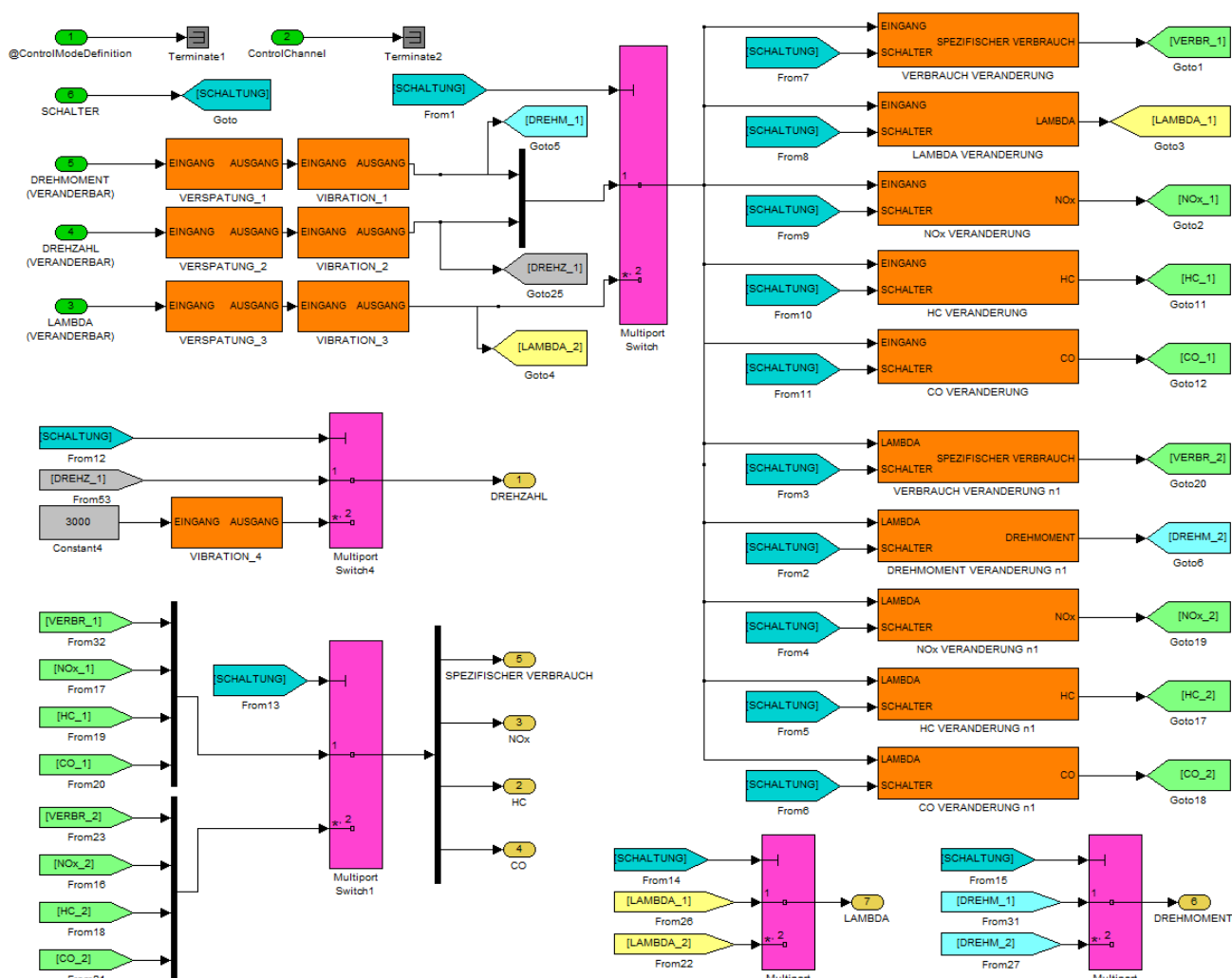


Abbildung 27: Blockdiagramm des zweiten Modells

Die Eingänge und Ausgänge, die während der Messung unnötig sind, werden in Subsystemen definiert. Die neuen Eingangsparameter in diesem Modell wurden mit der Lambdaveränderung und mit der Schaltung bestimmt. Mit der Hilfe des Schalters können die Studenten zwischen Messverfahren 1 und 2 - ohne irgendwelche Fehlermeldung – umschalten. Auch in den Subsystemen befinden sich Schalterelemente, sie reagieren gemeinsam auf das Schaltsignal. Die neuen Elemente im Modell 2 werden im Nachfolgenden ausführlich dargestellt. Die detaillierte Veranschaulichung der übrigen Elemente sind beim Modell 1 zu sehen.

3.2.4.1. Schalterelement

Die Schaltung zwischen Kanälen wird mit einem Schalter durchgeführt. In der CAMEO-Messung wird ein Knopf definiert und repräsentiert das Eingangssignal der Schaltung. Das Signal kann entweder ein oder zwei sein. Mit dieser Methode kann das System mit zwei Messverfahren gleichzeitig funktionieren. Die Schaltung braucht Schalterelemente für die zwei Typen von Eingangsparametern, für jedes Subsystem und jede Ausgangsparameter. Ein Signal regelt das ganze System, die Schalterelemente reagieren gemeinsam. Mit diesem Verfahren können die Ausgänge mehrere Eingangssignale gleichzeitig Messen, aber nur Ein indizieren. Der Betrieb der Schaltung während der Testphase kann auf Abbildung 28 gesehen werden.

Wenn der Eingangssignal = 1, dann kommen die Parameter aus den Subsystemen der ersten Messverfahren an. Die Werte der Subsysteme von Messverfahren 2 sind 0. Da die Ausgänge auch Schalterelemente haben, werden diese Zero-Werte von CAMEO nicht gesehen. Ist das Eingangssignal = 2, werden die Parameter aus den Subsystemen der zweiten Messverfahren ankommen, und die Werte von Messverfahren 1 bleiben 0.

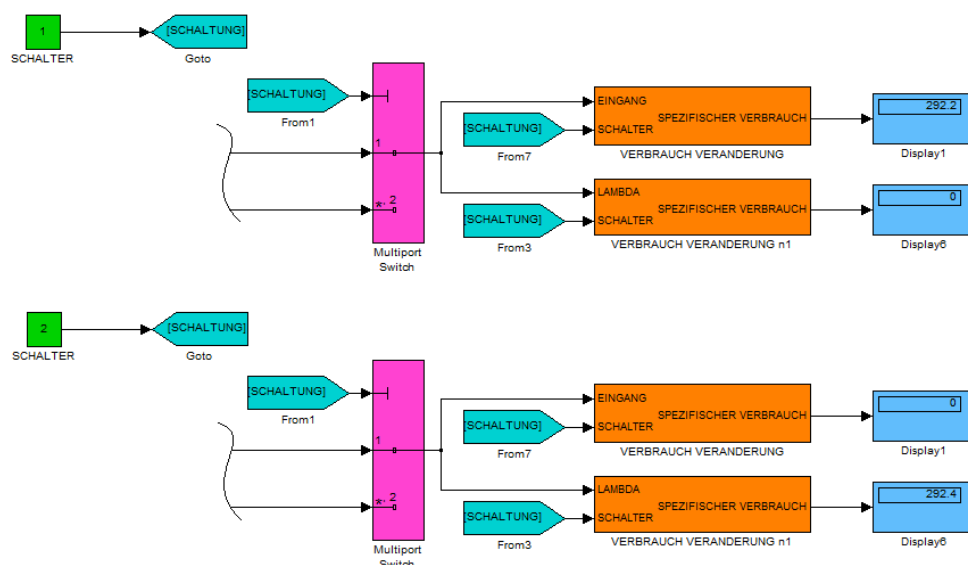


Abbildung 28: Teil des zweiten Modells im Testbetrieb

3.2.4.2. Das erste Messverfahren

Der Aufbau von Messverfahren 1 ist identisch mit dem ersten Modell. Nur die Kennfelddaten sind unterschiedlich und die Subsysteme haben Schalterelemente bekommen. Diese Unterschiede sind auf Abbildung 29 abgebildet. Das Bild zeigt das Subsystem der Verbrauchsveränderung während des Messverfahrens 1. Der Aufbau kann mit Abbildung 16 verglichen werden. Mit der Hilfe des Schalterelements zeigt der Ausgang 0, die Werte von Messverfahren 1 sind überall 0. Die Blöcke nach dem Schalter gewährleisten die kontinuierliche Veränderung der Ausgangssignale auch in diesem Fall.

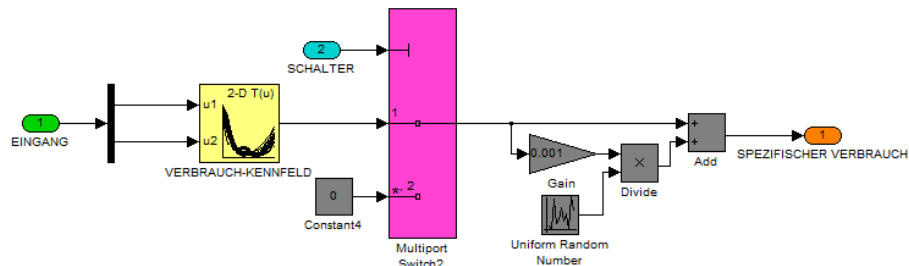


Abbildung 29: Blockdiagramm des Subsystems namens Verbrauchsveränderung

Im Nachfolgenden werden die Subsysteme von Messverfahren 1 dargestellt. Nur die Tabelle und die dreidimensionalen Illustrationen der Kennfelder werden ausführlich erläutert, weil die detaillierte Beschreibung beim ersten Modell schon beschrieben wurde. Dieses Modell funktioniert im ganzen Bereich des Kennfelds, deshalb befinden sich keine Zero-Werte in den Tabellen oder auf den Bildern.

3.2.4.3. Verbrauchsänderung beim Messverfahren 1

Der Aufbau ist vollkommen gleich mit dem Blockdiagramm auf Abbildung 29. Die Messdaten können in Tabelle 5 gesehen werden. Die horizontale Achse der Tabelle zeigt die Drehzahl [1/min], die vertikale Achse das effektive Drehmoment [Nm]. Die Maßeinheit des spezifischen Verbrauchs wurde in [g/KWh] bestimmt. Das dreidimensionale Muscheldiagramm sieht man auf Abbildung 30.

Die Lambda Veränderung wird nicht dargestellt, weil alle der Messdaten 1 sind.

Tabelle 5: Werte des spezifischen Verbrauchs (Modell 2, Messverfahren 1)

M\n	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500	4750	5000	5250	5500	5750	6000
0	544	563	613	566	674	588	640	640	624	662	627	591	604	618	628	639	650	664	680	696	712
20	345	441	428	446	533	445	449	473	496	487	545	598	554	518	525	536	547	559	572	587	602
40	354	345	324	297	328	347	337	325	328	353	388	414	377	343	345	348	352	358	364	371	379
60	307	281	287	272	256	276	273	268	275	312	298	276	283	289	290	292	295	300	304	310	317
80	270	259	238	241	229	248	253	260	268	273	260	252	277	301	302	304	306	310	315	321	327
100	261	254	245	251	264	271	278	275	274	289	286	283	292	301	301	301	302	304	308	312	317
120	285	277	265	248	222	230	255	275	278	273	256	240	240	239	236	233	231	230	230	231	233
140	317	294	260	236	241	239	246	247	248	257	270	279	265	253	251	247	244	242	241	241	242
160	362	329	308	297	276	250	246	255	268	279	264	251	276	295	279	273	268	266	265	265	266
180	425	402	378	348	313	281	281	288	312	371	356	323	319	322	355	348	345	349	346	342	343
200	509	483	445	412	397	370	353	366	362	321	360	409	403	393	366	413	441	430	421	414	438

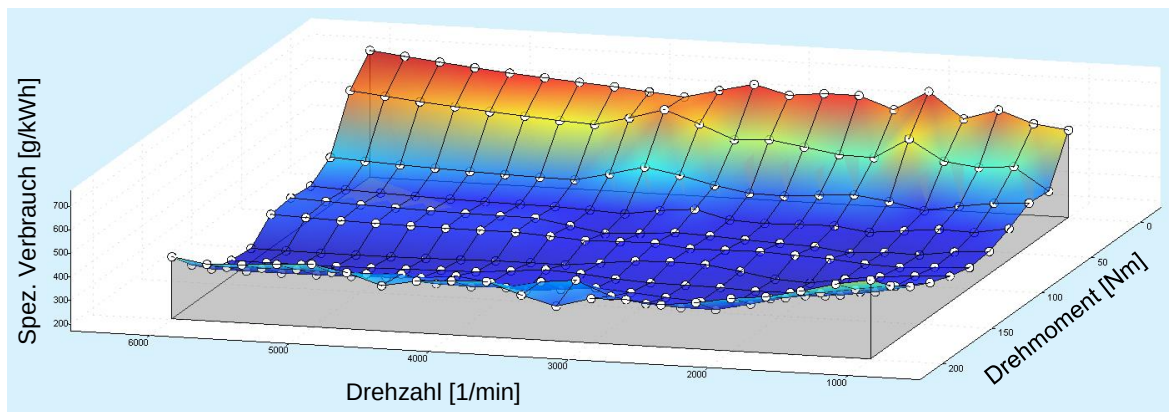


Abbildung 30: Dreidimensional Muscheldiagramm des spezifischen Verbrauchs

3.2.4.4. NO_x Änderung beim Messverfahren 1

Der Aufbau kann auf Abbildung 29 gesehen werden. Die Messdaten wurden in der Tabelle 6 zusammengefasst. Die horizontale Achse der Tabelle ist die Drehzahl [1/min], die vertikale Achse das effektive Drehmoment [Nm]. Die Maßeinheit der NO_x Emission wurde in [ppm] bestimmt. Die dreidimensionale Illustration der Emissionswerte lässt sich auf Abbildung 31 sehen.

Tabelle 6: Werte der NO_x Emission (Modell 2, Messverfahren 1)

M\n	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500	4750	5000	5250	5500	5750	6000
0	272	290	302	320	320	352	373	384	388	382	376	368	354	338	328	324	315	312	314	329	350
20	435	459	483	507	519	555	579	603	615	615	592	592	592	580	552	552	552	552	564	576	600
40	708	720	732	744	744	768	780	792	792	792	780	768	756	744	732	708	708	696	684	696	708
60	984	996	996	1008	1008	1032	1044	1044	1044	1032	1020	996	972	948	924	912	888	876	864	852	852
80	1248	1260	1260	1272	1260	1284	1296	1296	1284	1272	1248	1236	1200	1176	1152	1128	1104	1080	1056	1056	1044
100	1476	1488	1488	1500	1500	1512	1524	1524	1524	1500	1488	1464	1428	1404	1380	1356	1320	1308	1284	1272	1260
120	1668	1680	1680	1692	1692	1716	1728	1728	1728	1716	1692	1668	1656	1620	1596	1572	1548	1524	1500	1488	1488
140	1812	1824	1836	1848	1860	1872	1884	1896	1896	1884	1872	1860	1836	1812	1788	1764	1752	1728	1716	1692	1680
160	2018	2030	2042	2054	2066	2078	2090	2102	2102	2102	2059	2047	2027	2006	1994	1958	1946	1922	1898	1874	1850
180	2280	2280	2292	2292	2304	2316	2316	2328	2316	2304	2292	2268	2244	2220	2184	2148	2124	2100	2064	2040	2004
200	2496	2508	2508	2520	2520	2532	2532	2532	2532	2520	2496	2472	2448	2424	2400	2352	2328	2292	2256	2220	2196

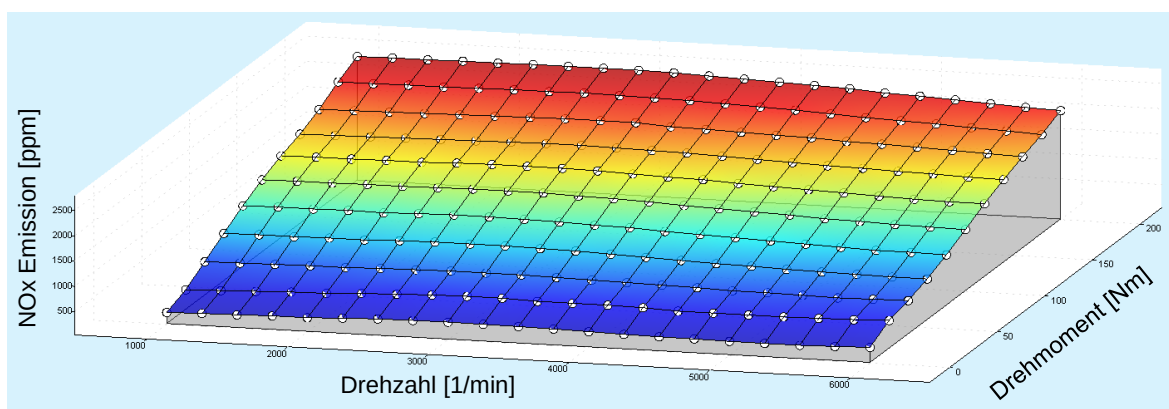


Abbildung 31: Dreidimensionale Illustration der NO_x Emission

3.2.4.5. HC Änderung beim Messverfahren 1

Der Aufbau wird auf Abbildung 29 gezeigt. Die Messdaten wurden in Tabelle 7 zusammengefasst. Die horizontale Achse ist die Drehzahl [1/min], die vertikale Achse das effektive Drehmoment [Nm]. Die Maßeinheit der HC Emission ist in [ppm]. Abbildung 32 stellt die dreidimensionale Illustration der Emissionswerte dar.

Tabelle 7: Werte der HC Emission (Modell 2, Messverfahren 1)

M\n	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500	4750	5000	5250	5500	5750	6000
0	8776	6932	6288	6227	5725	4463	4619	4786	4587	4397	3595	3019	3038	3303	3451	3640	3879	4196	4569	4992	5463
20	5983	5362	4253	4062	4255	3713	3292	3038	2939	2789	2837	2928	2788	2739	2872	3071	3319	3620	3970	4379	4837
40	4562	3510	3095	2794	3339	2571	2322	2259	2231	2187	2161	2410	2192	2282	2414	2602	2846	3138	3481	3879	4329
60	3254	2939	3135	2238	2031	1960	1887	1842	1769	1825	1793	1822	1882	1987	2171	2418	2716	3069	3473	3923	4435
80	3664	2912	2403	2162	1997	1793	1781	1851	1737	1505	1455	1478	1685	2009	2219	2501	2831	3219	3656	4141	4682
100	3553	2757	2159	1999	1862	1767	1743	1541	1382	1433	1413	1402	1453	1584	1726	1922	2172	2473	2827	3227	3683
120	2787	2486	2022	1776	1734	1533	1600	1406	1232	1183	1143	1168	1287	1449	1648	1898	2202	2551	2959	3417	3928
140	2394	2082	1793	1623	1464	1199	1106	1056	1040	1023	1137	1520	1662	1828	1915	2245	2624	3057	3537	4080	4668
160	2221	1918	1642	1491	1603	1073	988	1013	1144	1185	1125	1180	1701	2407	2918	3380	3894	4446	5043	5695	6419
180	2102	1924	1793	1696	1549	1098	992	949	975	1879	1570	1265	1626	2178	3527	4014	4515	4974	5598	6358	7110
200	2153	1991	1804	1672	1656	1291	972	858	972	1185	1187	1588	1866	2160	2392	3736	5225	5921	6647	7436	7840

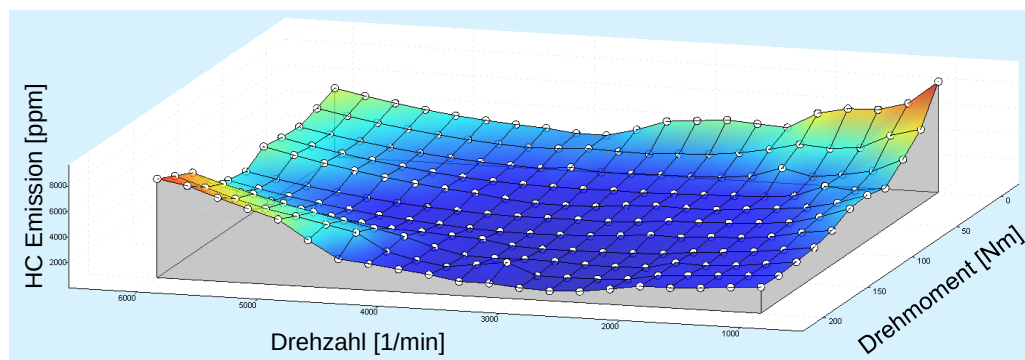


Abbildung 32: Dreidimensionale Illustration der HC Emission

3.2.4.6. CO Änderung beim Messverfahren 1

Das Blockdiagramm ist auf Abbildung 29 zu sehen. Tabelle 8 stellt eine Zusammenfassung der Emissionswerte dar. Die Maßeinheiten sind im Einklang mit Tabelle 7. Die 3D Illustration der CO Emission wird auf Abbildung 33 gezeigt.

Tabelle 8: Werte der CO Emission (Modell 2, Messverfahren 1)

M\n	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500	4750	5000	5250	5500	5750	6000
0	1,31	0,92	0,98	0,83	0,99	0,94	0,90	0,87	0,85	0,85	0,92	1,02	1,02	1,04	1,09	1,15	1,21	1,27	1,34	1,41	1,48
20	1,10	0,79	0,76	0,78	0,91	0,86	0,82	0,84	0,87	0,85	0,91	0,97	0,99	1,02	1,06	1,11	1,16	1,22	1,28	1,34	1,41
40	0,64	0,67	0,70	0,74	0,75	0,77	0,77	0,77	0,80	0,84	0,88	0,93	0,95	0,98	1,02	1,07	1,13	1,19	1,25	1,32	1,39
60	0,66	0,66	0,66	0,68	0,72	0,76	0,76	0,76	0,79	0,82	0,84	0,86	0,89	0,92	0,96	1,01	1,06	1,11	1,17	1,24	1,31
80	0,67	0,70	0,72	0,69	0,69	0,74	0,76	0,76	0,76	0,79	0,81	0,83	0,85	0,88	0,91	0,95	0,99	1,04	1,09	1,15	1,21
100	0,71	0,68	0,69	0,73	0,79	0,76	0,76	0,75	0,75	0,76	0,79	0,81	0,82	0,83	0,85	0,88	0,91	0,94	0,98	1,03	1,08
120	0,74	0,74	0,73	0,73	0,73	0,74	0,74	0,74	0,73	0,74	0,75	0,75	0,78	0,80	0,83	0,85	0,89	0,92	0,96	1,01	1,06
140	0,75	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,72	0,72	0,71	0,71	0,72	0,76	0,78	0,79	0,79	0,82	0,85	0,88	0,92	0,97	1,02
160	0,77	0,78	0,76	0,74	0,76	0,74	0,73	0,72	0,73	0,71	0,71	0,71	0,74	0,78	0,82	0,85	0,89	0,93	0,97	1,01	1,07
180	0,77	0,75	0,74	0,75	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,73	0,72	0,72	0,74	0,76	0,80	0,83	0,85	0,87	0,91	0,96	1,01
200	0,81	0,79	0,80	0,79	0,77	0,75	0,73	0,72	0,72	0,72	0,72	0,73	0,74	0,74	0,77	0,79	0,82	0,86	0,90	0,94	0,94

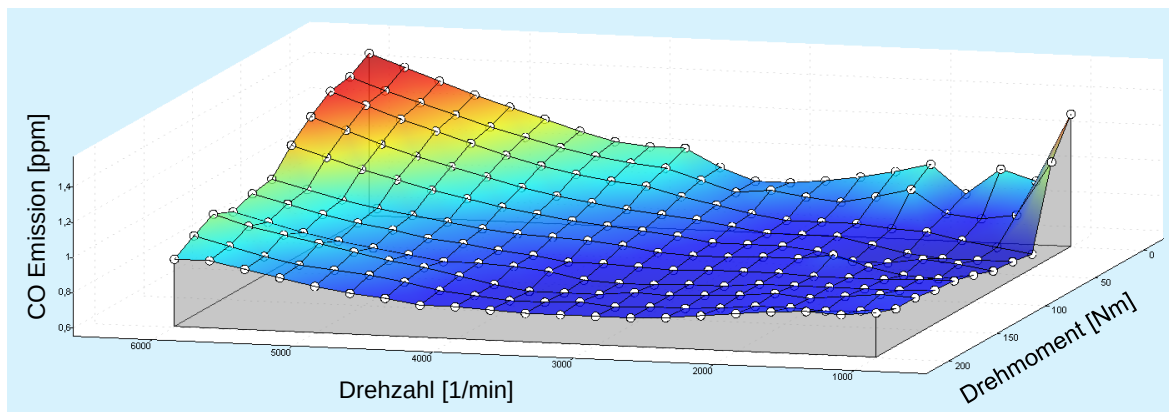


Abbildung 33: Dreidimensionale Illustration der CO Emission

3.2.4.7. Das zweite Messverfahren

Die Drehzahl wird bei konstanter Drosselklappe-Position auf 3000 [1/min] gesetzt. Die Messung findet beim derartigen Umstand statt. Lambda verfügt über einen breiten Messbereich mit diesem Verfahren. Die unterschiedliche Größe des verbrannten Kraftstoffs in gleicher Luftmenge beeinflusst die Emissionswerte. Nach der erfolgreichen Auswertung der Daten können die Studenten die Werte mit den Emissionskurven vergleichen, die sie früher gelernt haben. Der Zweck der zweiten Verfahren ist die Aneignung der Emissionsänderung in der Abhängigkeit von Lambdaveränderung.

Der Aufbau der Subsysteme sieht ähnlich aus wie Subsysteme von Messverfahren 1. Hier befinden sich aber nur ein Eingangsparameter und Kurven anstatt der Kennfelder. Die Ausgangsdaten ändern sich entlang diesen Kurven. Abbildung 34 ist ein Beispiel für die Subsysteme von Messverfahren 2. Das Bild zeigt das Blockdiagramm der Verbrauchsveränderung. Wenn das Eingangssignal des Schalters 2 ist, schaltet das Modell auf Messverfahren 2 um. Die beabsichtigte Drehzahl wird eingestellt, die entsprechenden Subsysteme werden aktiviert, die unnötige Subsysteme deaktiviert. Lambda ist zwischen 0,7 und 1,24 veränderbar. Die Änderung der Parameter wird während der Lambdaveränderung signifikant. Die Emissionswerte und das effektive Drehmoment des Motors ändern sich in einem breiten Messbereich. Die Änderung kann aber – abhängig von der Verbrennung – vorteilhaft oder eben nachteilig sein.

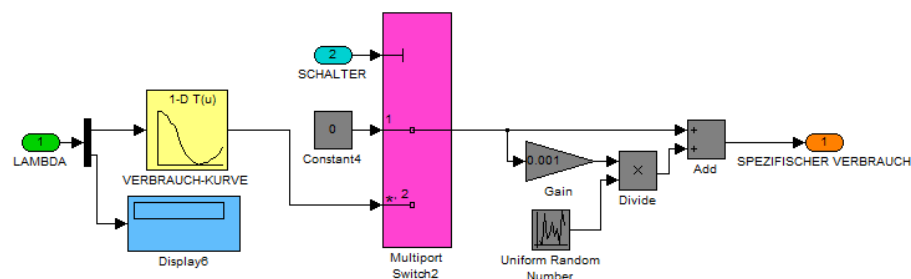


Abbildung 34: Blockdiagramm des Subsystems namens Verbrauchsveränderung

3.2.4.8. Verbrauchsänderung beim Messverfahren 2

Das Blockdiagramm ist auf Abbildung 34 zu sehen. Die Messdaten des echten Motors auf einem Prüfstand sind in einer Matrix angegeben. CAMEO importiert diese Daten in Abhängigkeit von der Lambdaveränderung. Die Kurve der Daten wird auf Abbildung 35 gezeigt und ist auch in der Tabelle 9 dargestellt.

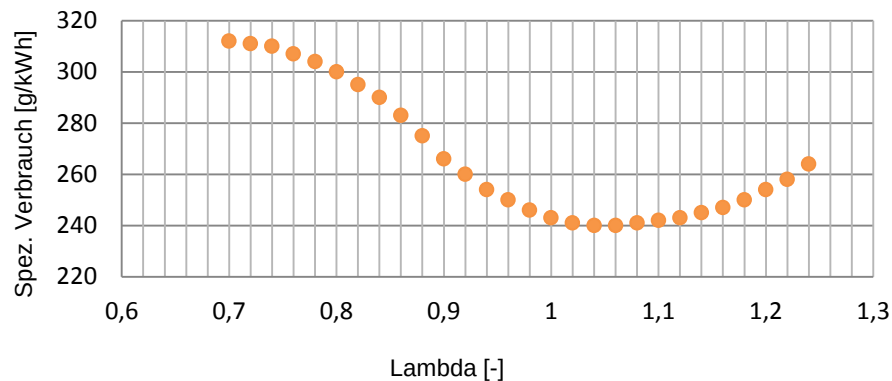


Abbildung 35: Kurve des spezifischen Verbrauchs

Tabelle 9: Werte des spezifischen Verbrauchs (Modell 2, Messverfahren 2)

LAMBDA	0,7	0,72	0,74	0,76	0,78	0,8	0,82	0,84	0,86	0,88	0,9	0,92	0,94	0,96
Verbrauch	312	311	310	307	304	300	295	290	283	275	266	260	254	250
LAMBDA	0,98	1	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1	1,12	1,14	1,16	1,18	1,2	1,22	1,24
Verbrauch	246	243	241	240	240	241	242	243	245	247	250	254	258	264

3.2.4.9. Drehmoment Änderung beim Messverfahren 2

Abbildung 36 zeigt die Kurve des Drehmoments. Die Messdaten, die von Lambda abhängig sind, werden in Tabelle 10 dargestellt.

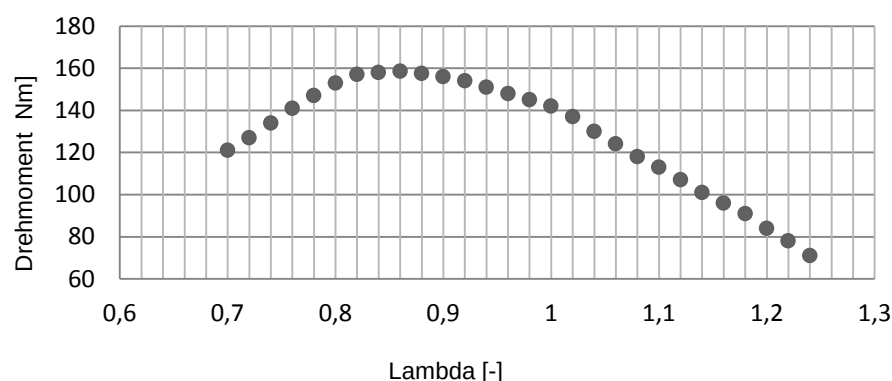


Abbildung 36: Kurve des effektiven Drehmoments

Tabelle 10: Werte des Drehmoments (Modell 2, Messverfahren 2)

LAMBDA	0,7	0,72	0,74	0,76	0,78	0,8	0,82	0,84	0,86	0,88	0,9	0,92	0,94	0,96
Drehmoment	121	127	134	141	147	153	157	158	159	158	156	154	151	148
LAMBDA	0,98	1	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1	1,12	1,14	1,16	1,18	1,2	1,22	1,24
Drehmoment	145	142	137	130	124	118	113	107	101	96	91	84	78	71

3.2.4.10. NO_x Änderung beim Messverfahren 2

Das Subsystem beinhaltet die Messdaten aus der Tabelle 11. Die Kurve der Emissionsdaten wird auf Abbildung 37 gezeigt.

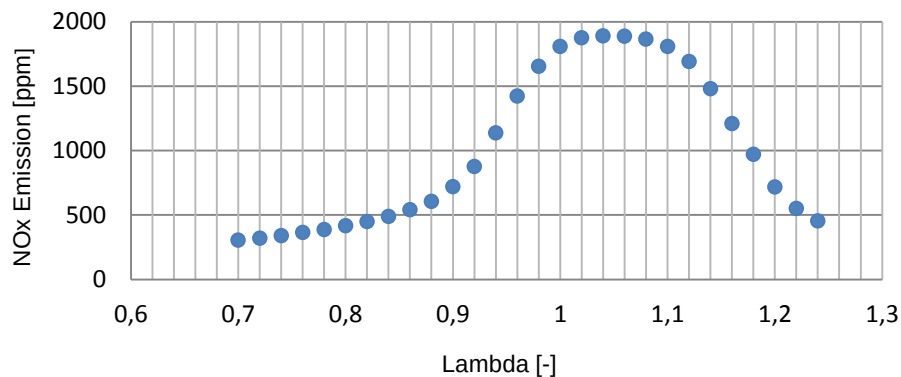


Abbildung 37: Kurve der NO_x Emission

Tabelle 11: Werte der NO_x Emission (Modell 2, Messverfahren 2)

LAMBDA	0,7	0,72	0,74	0,76	0,78	0,8	0,82	0,84	0,86	0,88	0,9	0,92	0,94	0,96
NOx	302	319	337	363	385	415	448	486	540	605	717	874	1136	1422
LAMBDA	0,98	1	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1	1,12	1,14	1,16	1,18	1,2	1,22	1,24
NOx	1652	1806	1874	1888	1886	1864	1806	1688	1479	1208	970	715	549	453

3.2.4.11. HC Änderung beim Messverfahren 2

Die Kurve der HC Emission beim Messverfahren 2 ist auf Abbildung 38 zu sehen. Die Messdaten wurden in Tabelle 12 dargestellt.

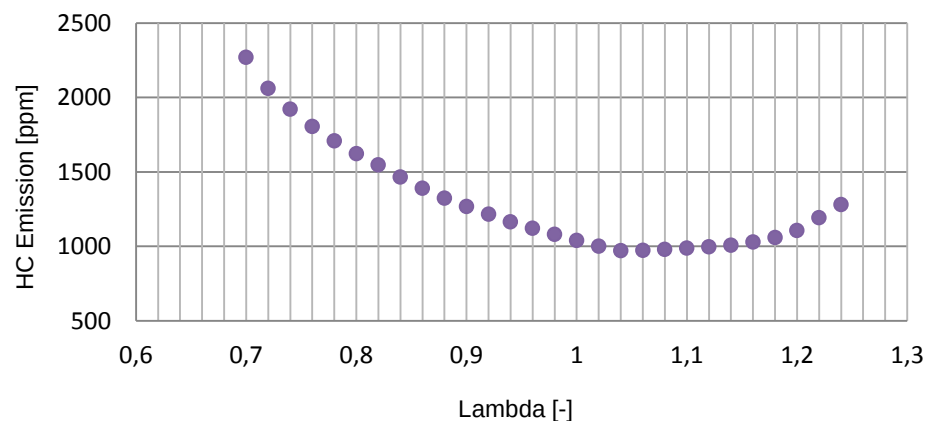


Abbildung 38: Kurve der HC Emission

Tabelle 12: Werte der HC Emission (Modell 2, Messverfahren 2)

LAMBDA	0,7	0,72	0,74	0,76	0,78	0,8	0,82	0,84	0,86	0,88	0,9	0,92	0,94	0,96
HC	2271	2061	1921	1806	1708	1623	1547	1467	1390	1325	1268	1216	1164	1123
LAMBDA	0,98	1	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1	1,12	1,14	1,16	1,18	1,2	1,22	1,24
HC	1081	1040	1001	972	974	980	988	998	1008	1029	1059	1108	1194	1281

3.2.4.12. CO Änderung beim Messverfahren 2

Die Kurve der CO Emission kann auf Abbildung 39 gesehen werden. Die Daten der Kurve sind in der Tabelle 13 aufzuweisen.

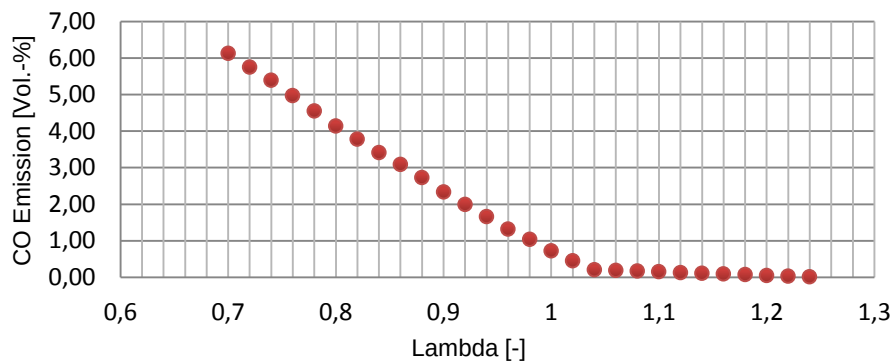


Abbildung 39: Kurve der CO Emission

Tabelle 13: Werte der CO Emission (Modell 2, Messverfahren 2)

LAMBDA	0,7	0,72	0,74	0,76	0,78	0,8	0,82	0,84	0,86	0,88	0,9	0,92	0,94	0,96
CO	6,13	5,75	5,39	4,97	4,55	4,14	3,78	3,41	3,09	2,73	2,33	1,99	1,66	1,32
LAMBDA	0,98	1	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1	1,12	1,14	1,16	1,18	1,2	1,22	1,24
CO	1,04	0,72	0,45	0,21	0,19	0,17	0,15	0,13	0,11	0,09	0,07	0,05	0,03	0,01

3.2.4.13. Verbrauch-Drehmoment Kurve des Motors

Eine Aufgabe der Studenten ist die Messung der Verbrauch-Drehmoment Kurve. Mit der Lambdaveränderung bekommen sie unterschiedliche Messdaten. Diese Daten müssen sie dann notieren und auswerten. Die Kurve der Daten ist auf Abbildung 40 dargestellt. Tabelle 14 zeigt die Messdaten der Punkte.

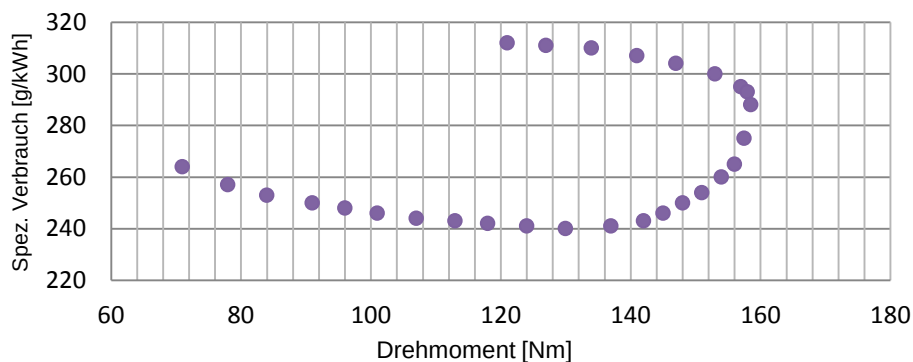


Abbildung 40: Die Verbrauch-Drehmoment Kurve

Tabelle 14: Werte der Verbrauch-Drehmoment Kurve (Modell 2, Messverfahren 2)

LAMBDA	0,7	0,72	0,74	0,76	0,78	0,8	0,82	0,84	0,86	0,88	0,9	0,92	0,94	0,96
Drehmoment	121	127	134	141	147	153	157	158	159	158	156	154	151	148
Verbrauch	312	311	310	307	304	300	295	290	283	275	266	260	254	250
LAMBDA	0,98	1	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1	1,12	1,14	1,16	1,18	1,2	1,22	1,24
Drehmoment	145	142	137	130	124	118	113	107	101	96	91	84	78	71
Verbrauch	246	243	241	240	240	241	242	243	245	247	250	254	258	264

3.2.5. Das dritte eigene Matlab-Modell

Die Messdaten von einem Dieselmotor wurden für das dritte Modell verwendet. Wie schon früher angeführt wurde, können die Modelle für beide Motortypen benutzt werden. Der erste Zweck des Modells war die Demonstration dieser Aussage, der Zweite die Präsentation des Verhaltens von einem Dieselmotor auf dem Prüfstand. Die Daten wurden in einem engen Bereich gemessen, deshalb hat man bei diesem Modell weniger Möglichkeit für die Parameterveränderung. Der Aufbau ist vollkommen identisch mit dem ersten Modell, das Blockdiagramm kann auf Abbildung 11 gesehen werden. Der Unterschied bei diesem Modell ist die Opazität, gegenüber dem Lambda Subsystem. Abbildung 41 zeigt diesen Unterschied.



Abbildung 41: Teilabschnitt des dritten Modells

3.2.5.1. Verbrauchsänderung

Das Subsystem ist gleich mit dem Subsystem beim ersten Modell. Der Aufbau ist auf Abbildung 16 zu sehen. Der einzige Unterschied ist das Kennfeld. Die Kennfelddaten [g/kWh] sind in Tabelle 15 dargestellt. Das dreidimensionale Muscheldiagramm sieht man auf Abbildung 42.

Tabelle 15: Werte des spezifischen Verbrauchs (Modell 3)

M\n	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
120	261	266	284	295	304	314	322
200	231	242	242	253	264	281	303
280	227	229	238	242	255	273	294
360	218	221	230	232	245	263	285
440	209	217	222	227	243	261	281
520	208	218	222	226	243	259	276
600	208	215	219	226	243	259	275
680	207	215	224	228	244	261	276
760	208	217	227	227	242	260	274
840	210	217	228	229	245	260	273

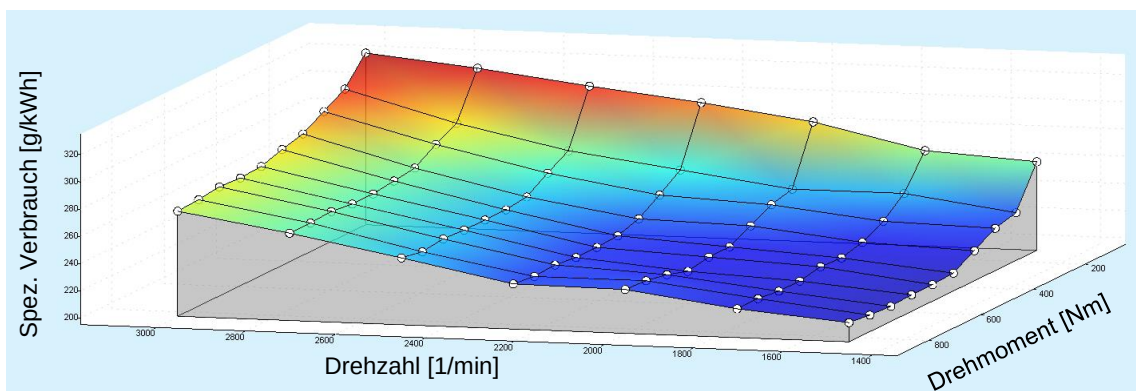


Abbildung 42: Dreidimensional Muscheldiagramm des spezifischen Verbrauchs

3.2.5.2. Änderung der Opazität

Die Blockdiagramme der folgenden Modelle werden nicht dargestellt, sie sind identisch mit dem Subsystem auf Abbildung 16. Der Unterschied ist das Kennfeld. Die 3D Illustration der Opazität kann auf Abbildung 43 gesehen werden. Die Werte der Opazität sieht man in Tabelle 16 (auf der linken Seite).

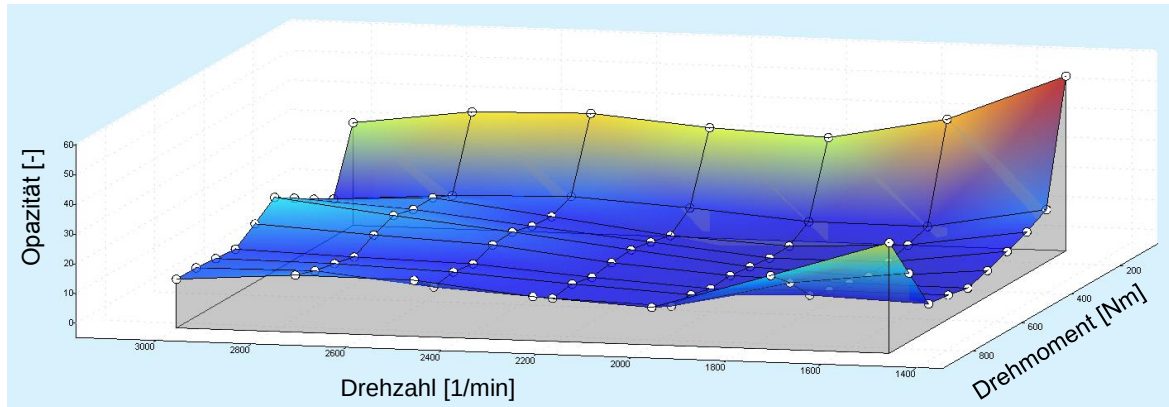


Abbildung 43: Dreidimensionale Illustration der Opazität

3.2.5.3. NO_x Änderung

Die gegebene NO_x Emissionswerte lassen sich in Tabelle 16 – auf der rechten Seite – sehen. Die 3D Illustration der Emission wurde auf Abbildung 44 dargestellt.

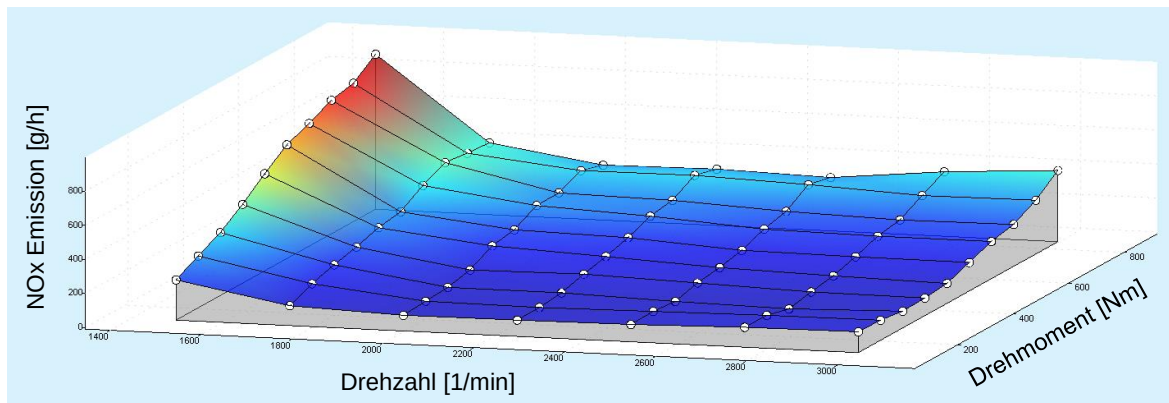


Abbildung 44: Dreidimensionale Illustration der NO_x Emission

Tabelle 16: Werte der Opazität (links) und der NO_x Emission (rechts) (Modell 3)

M\n	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
120	54,4	38,4	30,8	32,7	36,1	35,2	30,1
200	13,2	6,1	6,3	9,5	11,9	10,9	8,2
280	9,5	3,7	1,9	4	9	13,9	12
360	6,8	1,8	1,7	5,7	9,6	13,8	16,2
440	4,2	0,7	2,6	6,9	11,5	15,6	20,3
520	2,1	2,4	3,5	6,4	11	12,9	15,2
600	3,6	3,7	2,9	5,3	8,4	9,3	10,5
680	4,5	6	4,7	6,9	9,5	10,9	11,2
760	18,7	14	4,7	5,9	8,3	12,3	11,9
840	32,8	20,3	8,1	10,3	14,4	14,7	11,9

M\n	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
120	231,9	111,7	87,9	91,1	97,2	112,4	117,4
200	300,1	168,8	97,9	92,6	101,3	110,3	113,4
280	365,3	207,4	106,8	106,4	87,6	75,9	94
360	458,8	239,5	136,6	144	123,8	102,9	99
440	566,3	280,6	205,6	174,7	141,6	125	112,2
520	663,6	301,8	227,6	213,3	170,9	164,7	163
600	716,5	383,7	297,7	267,1	222,6	213,1	213,8
680	780	446,4	299,5	288	254,7	236,1	241,2
760	808	429	358,6	362,1	339,7	307	311,5
840	905,9	417,5	318,4	326,3	308,8	374,3	414

3.2.5.4. HC Änderung

Die Emissionswerte sieht man in Tabelle 17. Abbildung 45 zeigt die 3D Illustration der HC Emission. Wichtig ist, dass die Maßeinheit der Emission in Gramm/Stunde [g/h] angegeben ist. Die Ingenieure haben unterschiedliche Maßeinheiten bei ihren Messungen verwendet, diese wurden in der konkreten Messung auch angegeben.

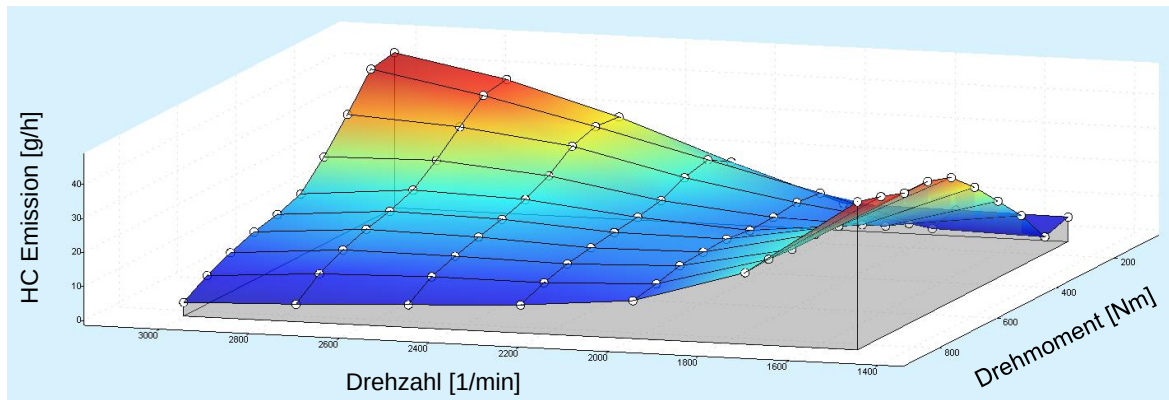


Abbildung 45: Dreidimensionale Illustration der HC Emission

3.2.5.5. CO Änderung

Die Emissionswerte wurden in Tabelle 17 angegeben. Die 3D Illustration dieser Daten kann auf Abbildung 46 gesehen werden.

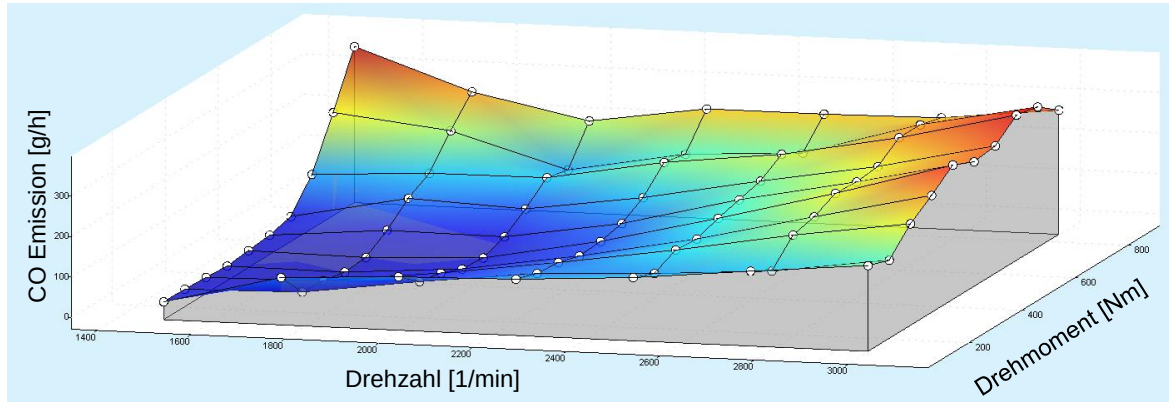


Abbildung 46: Dreidimensionale Illustration der CO Emission

Tabelle 17: Werte der HC (links) und der NO_x Emission (rechts) (Modell 3)

M\n	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
120	6,1	6,5	6,8	17,3	28,9	38,3	44,5
200	3,8	4,6	13,4	21,5	29,6	37,1	43,2
280	13,6	9,6	14,1	19,8	27,4	31,4	33,4
360	21,4	12,4	13,3	16,6	22,2	25,1	24,5
440	29	16,3	13	15,2	18,8	19,9	17,1
520	35,4	19,4	14	14,3	16,5	17,2	14,6
600	37,8	20,6	13,7	13,3	14,8	15,4	13
680	37,9	19,7	13,2	12,1	12,7	12,9	10,4
760	40,4	20,3	11,4	10,1	10,2	9,4	7,2
840	42,4	19,9	10	7,1	5,5	4	2,9

M\n	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
120	17	90	105	112	129	158	185
200	16	22	61	94	107	126	166
280	13	18	50	89	133	183	224
360	9	7	28	73	128	196	262
440	15	11	23	77	147	222	305
520	21	46	43	89	161	218	281
600	35	93	80	121	175	224	288
680	107	123	125	176	209	263	332
760	228	196	112	164	180	263	320
840	359	260	201	244	244	248	280

3.3. Aufbau der CAMEO-Messungen

Aus den fertigen Matlab-Modellen wurden NRL-Files generiert. Diese Dateien verhalten sich in CAMEO wie die anderen Prüfstandssysteme, die HIL basierte Software sieht keine Differenz. Nach dem erfolgreichen Import der Files kann die Arbeit mit CAMEO beginnen. Im Nachfolgenden werden die drei eigenen CAMEO-Messungen dargestellt.

3.3.1. Die erste eigene CAMEO-Messung

Der Aufbau der Messung ist sehr einfach, sie beinhaltet nur die nötigen Elemente. Eine veränderbare und eine automatische Messung wurden vorbereitet. Bei der veränderbaren Messung können die Studenten die Sollwerte des Drehmoments und der Drehzahl regeln, und die Änderung der Ausgangsparameter beobachten. Das Bedienfeld der Software ist auf Abbildung 47 zu sehen. Die identischen Farben zeigen die Zusammengehörigkeit der Kurven und des Displays. Die Messung besteht prinzipiell aus drei Typen von Elemente. Der erste Typ ist der Schieber für die Veränderung von Eingangsparameter. Die erste Messung hat zwei Schieber, einen für Drehmomentveränderung, und einen für Drehzahlveränderung. Sie werden jeweils an den Betriebsbereich der Kennfelddaten angepasst. Der zweite Typ ist das grafische Display der Messdaten. In dieser Messung befinden sich 7 Parameter, sie werden auf zwei Displays dargestellt. Die Aktualisierung der Daten findet in jeder Sekunde statt, die Änderung der Kurven hilft den Studenten, die motorischen Prozesse zu verstehen. Der Dritte Typ der Elemente ist das numerische Display. Die bestimmten Messdaten werden in jeder Sekunde aktualisiert. Die Studenten können dann die Daten ablesen und notieren.

Bei der automatischen Messung werden die vorgegebenen Messpunkte gemessen. Diese Punkte wurden in Test Vorbereitung definiert. Alle vorprogrammierten Daten befinden sich in dieser Messung (Abbildung 48).

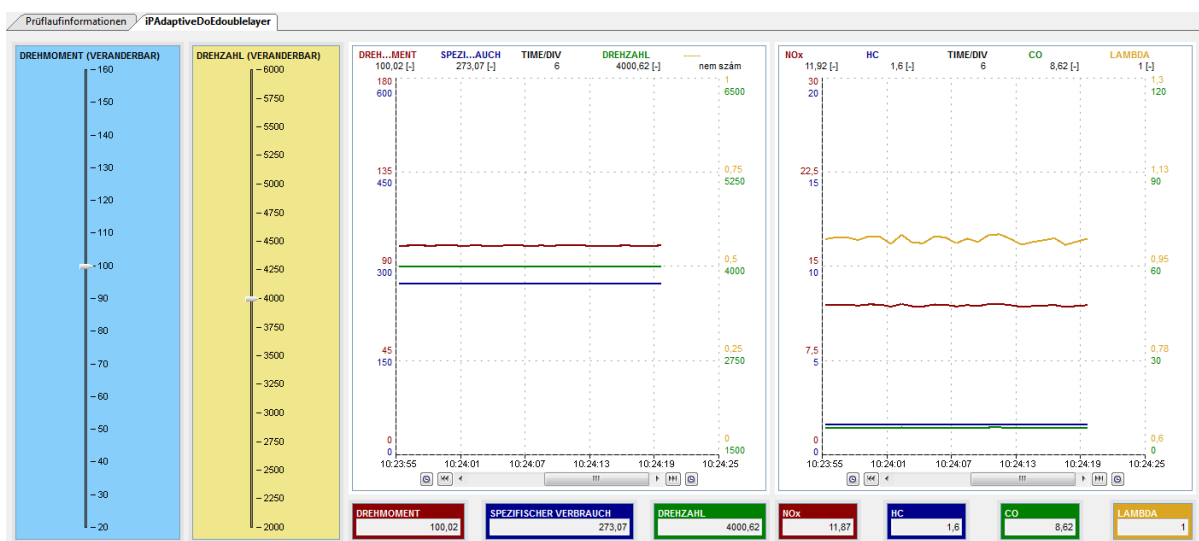


Abbildung 47: Die verstellbare CAMEO-Messung des ersten Modells

Die Studenten können die Software mit einem Mausklick starten, dann die automatische Parameteränderung beobachten. CAMEO sammelt die Messdaten in einer Tabelle, die am Ende der Messung abgespeichert wird. Die Studenten können diese Daten in Excel importieren und zu Hause eine Dokumentation mit vorgeschriebenen Diagrammen anfertigen.

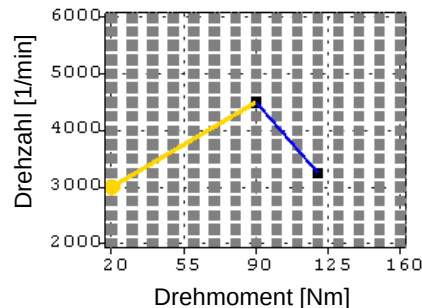


Abbildung 48: Die automatische CAMEO-Messung des ersten Modells

Nach dem Starten der veränderbaren oder der automatischen Messung erkennt die Software das Matlab-Modell, findet aber keinen Unterschied zwischen dem Modell oder einen echten Prüfstand. Die Messung läuft wie eine echte Prüfstandmessung. Die bestimmten Parameter werden eingestellt, die Drehzahl auf 4000 [1/min], das Drehmoment auf 100 [Nm]. Die Studenten verstellen entweder nur die Schieber oder starten eine Messung: ihre Aufgabe ist nämlich nicht die Aneignung der Software.

Die Validation des Modells ist unablässig. Bei der veränderbaren Messung müssen die Elemente auf die Parameterveränderung reagieren. Die Software hat die Anforderungen in Testläufen bestanden. Bei der automatischen Messung müssen die Daten mit den vorprogrammierten Werten identisch sein. Nach dem Starten der Software wurden die ersten 15 Punkte gemessen. Die Tabelle mit den Messwerten wird auf Abbildung 49 dargestellt. Die Software funktioniert fehlerlos, die Daten sind mit den vorprogrammierten Messdaten identisch. Die Kurven indizieren und die Displays befolgen die Parameterveränderung. Das Modell kann als betriebsbereit betrachtet werden.

Information Ereignisse Statistiken Messungen												
Name	Test Version	TargetTestPoint	DREHZAHL (VE)	DREHMOMENT	DREHZAHL	LAMBDA	HC	SPEZIFISCHER	NOx	DREHMOMENT	CO	
System		RunTest	Deutsches_Mod	Deutsches_Moc	Deutsches_Mod	Deutsches_Mod	Deutsches_Mod	Deutsches_Mod	Deutsches_Mod	Deutsches_Mod	Deutsches_Mod	Deutsches_Mod
Einheit			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Typ		Actual	Demand	Demand	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean
1	0	1	4500	90	4500,5	1,001	1,3009	301,56	10,562	90,009	12,366	
2	0	1	3250	120	3249,8	0,99881	1,9985	250,98	14,281	119,98	11,786	
3	0	1	4500	90	4499,5	0,99891	1,2994	301,47	10,538	89,99	12,337	
4	0	1	3000	20	3000,6	1,0012	10,51	499,98	4,7069	20,013	99,987	
5	0	1	2500	150	2500,2	0,99861	2,596	242,23	16,176	149,98	26,249	
6	0	1	2000	60	2000	0,99825	5,7911	297,98	8,3847	59,994	28,569	
7	0	1	2750	90	2749,9	0,99863	2,9965	259,98	11,733	89,988	8,7899	
8	0	1	2500	80	2500,4	1,0004	3,6018	265,03	10,804	80,005	10,913	
9	0	1	5500	130	5500,2	0,99736	0,99641	348,82	13,362	130	23,583	
10	0	1	2750	30	2750,7	1,0013	9,2087	427,46	5,6089	30,014	79,369	
11	0	1	4750	160	4749,9	0,99988	1,9995	309,96	15,998	159,99	27,695	
12	0	1	4000	60	4000,1	1,0002	3,3012	325,04	8,1019	60,006	24,513	
13	0	1	2750	80	2750,1	0,9994	3,3988	265,02	10,793	79,997	10,807	
14	0	1	4500	140	4499,2	0,99815	1,5968	284,98	14,87	139,97	21,448	
15	0	1	5000	70	5000,2	1,0006	1,5005	347,52	8,3056	70,007	24,667	

Abbildung 49: Validation des ersten Modells

3.3.2. Die zweite eigene CAMEO-Messung

Das zweite Modell hat auch eine verstellbare und eine automatische Messung. Die Software im Betrieb kann auf Abbildung 50 gesehen werden. Die Elemente sind identisch mit der ersten CAMEO-Messung. Die Unterschiede sind der Lambda-Schieber und der Schalter. Der Schalter im CAMEO ist ein virtueller Knopf mit zwei Ständen.



Abbildung 50: Die verstellbare CAMEO-Messung des zweiten Modells

Vor dem Starten der verstellbaren Messung müssen einige Parameter bei der Vorbereitung der Test eingestellt werden (Abbildung 51). Beim Starten beträgt die Drehzahl = 2000 [1/min], das Drehmoment = 100 [Nm], Lambda = 1, der Schalter steht in der ersten Position. Das Modell reagiert beim Messverfahren 1 auf die Veränderung des Drehmoments und der Drehzahl. Das Kanalwechseln kann jederzeit stattfinden, dazu muss der Knopf während der Messung in der zweiten Position eingestellt werden. Die Schaltung beeinflusst den kontinuierlichen Betrieb des Modells nicht. Beim Messverfahren 2 funktioniert nur der Schieber von Lambda. In diesem Betriebszustand ist die Drehzahl permanent 3000 [1/min]. Die Messung ist identisch mit einer Drosselklappe-Veränderung auf einem echten Motor. Damit kann ein mageres oder ein fettes Gemisch eingestellt werden. Die Studenten können die Daten der Verbrauch-Drehmoment Kurve in Messverfahren 2 notieren und dann auswerten. Beide Verfahren hat auch eine automatische Version. Die Studenten können den Messprozess mit einem einfachen Mausklick beginnen. Sie können sich anschauen, wie eine echte Messung auf einem echten Prüfstand aussieht.

Nr.	Beschreibung	Info	Typ
1	Channel: SCHALTER	Value (fx): 1	SetValue
2	Channel: DREHZAHL (VERANDERBAR)	Value (fx): 2000	SetValue
3	Channel: DREHMOMENT (VERANDERBAR)	Value (fx): 100	SetValue
4	Channel: LAMBDA (VERANDERBAR)	Value (fx): 1	SetValue

Abbildung 51: Eingestellte Parameter der verstellbaren CAMEO-Messung

In dieser Betriebsart werden die Daten der eingestellten Punkte automatisch gemessen. Diese Betriebspunkte wurden auch bei der Vorbereitung der Test definiert. Eine Validation des zweiten Modells war auch nötig. Die ersten 15 Messpunkte wurden auf Abbildung 52 und 53 dargestellt.

Die Messdaten sind identisch mit den vorher definierten Daten. Z.B. der vorprogrammierte Emissionswert beim Messverfahren 1, wenn die Drehzahl = 3500 [1/min] und das Drehmoment = 100 [Nm] ist, sind die folgende: NO_x = 1488 [ppm], HC = 1413 [ppm], CO = 0,79 [ppm]. Die Werte nach der Messung sind: NO_x = 1488,1 [ppm], HC = 1413,1 [ppm], CO = 0,791 [ppm].

Der Unterschied zwischen den vorprogrammierten und den gemessenen Daten stammen aus dem Subsystem namens Vibration. Sie zeigen, dass dieses Subsystem in ihrer Arbeit besteht. Die Software funktioniert fehlerlos. Die Kurven indizieren, die Displays befolgen die Parameterveränderung. Das Modell kann als betriebsbereit betrachtet werden.

Information Ereignisse Statistiken Messungen												
Name	Test Version	TargetTestPoint	DREHZAHL (VE)	DREHMOMENT	DREHZAHL	LAMBDA	HC	SPEZIFISCHER	NOx	DREHMOMENT	CO	
System		RunTest	Deutsces_Mode	Deutsces_Mode	Deutsces_Mode	Deutsces_Mode	Deutsces_Mode	Deutsces_Mode	Deutsces_Mode	Deutsces_Mode	Deutsces_Mode	Deutsces_Mode
Einheit			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Type		Actual	Demand	Demand	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean
1	0	1	3500	100	3500,4	0,99601	1413,1	286,18	1488,1	100,01	0,79074	
2	0	1	1000	100	1000,1	0,99348	3551,7	261,38	1475,6	99,985	0,70887	
3	0	1	5750	80	5751,7	0,99729	4144,9	320,71	1056,6	80,028	1,154	
4	0	1	5500	50	5499,5	0,99442	3476,3	333,93	774,05	50,001	1,2092	
5	0	1	1500	200	1499,9	0,99343	1803,6	444,51	2507,2	199,96	0,7986	
6	0	1	3250	160	3249,9	0,99447	1185,3	278,64	2101,4	159,98	0,70974	
7	0	1	2500	100	2500,3	0,99584	1742,3	278,24	1524,2	100,01	0,76057	
8	0	1	1250	50	1250,4	0,99653	3224,9	313,2	858,3	50,012	0,66604	
9	0	1	2000	20	1999,7	0,99284	4252,8	532,45	519,25	20,003	0,90756	
10	0	1	4750	0	4749,6	0,99439	3638,9	638,81	323,99	0,010988	1,1492	
11	0	1	4250	190	4250,7	0,99685	2172,8	357,95	2322,6	190,03	0,75155	
12	0	1	5250	120	5250,2	0,99573	2552,6	230,04	1524,1	120,01	0,92073	
13	0	1	5250	80	5250,5	0,99531	3219,3	310,03	1080,3	80,013	1,0414	
14	0	1	4750	70	4749,9	0,99451	2459,4	298,02	1020	70,003	0,97998	
15	0	1	5500	170	5500,4	0,99612	5323,1	305,62	1981,4	170,01	0,94112	

Abbildung 52: Validation der CAMEO-Messung (Modell 2, Messverfahren 1)

Information Ereignisse Statistiken Messungen												
Name	Test Version	TargetTestPoint	DREHZAHL (VE)	LAMBDA (VERA)	DREHZAHL	LAMBDA	HC	SPEZIFISCHER	NOx	DREHMOMENT	CO	
System		RunTest	Deutsces_Mode	Deutsces_Mode	Deutsces_Mode	Deutsces_Mode	Deutsces_Mode	Deutsces_Mode	Deutsces_Mode	Deutsces_Mode	Deutsces_Mode	Deutsces_Mode
Einheit			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Type		Actual	Demand	Demand	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean
1	0	1	3000	1,22	3002,2	1,2289	1060,4	260,3	506,68	74,942	0,021259	
2	0	1	3000	1,24	3001	1,2441	1175,7	265,53	433,38	69,582	0,0058813	
3	0	1	3000	1,2	3001,6	1,2062	923,02	254,38	663,51	82,169	0,043977	
4	0	1	3000	0,98	3001,8	0,98575	1069,8	245,28	1697,3	144,22	0,9534	
5	0	1	3000	0,7	2999,9	0,99899	2272	312	301,91	120,97	6,1301	
6	0	1	3000	0,72	3000,9	0,7223	2050,2	310,98	321,24	127,91	5,7273	
7	0	1	3000	1,12	2998,6	1,1147	826,01	243,66	1714,8	108,54	0,13464	
8	0	1	3000	0,94	3001,1	0,94336	1157,6	253,42	1184,5	150,55	1,6085	
9	0	1	3000	1,02	2999,5	1,0182	1003,8	241,23	1862,5	137,23	0,47562	
10	0	1	3000	0,92	3001,5	0,92458	1204,7	258,75	935,24	153,38	1,9238	
11	0	1	3000	0,8	3000,5	0,8015	1618,3	299,6	417,79	153,17	4,1241	
12	0	1	3000	0,78	3001,1	0,78283	1696,6	303,54	389,38	147,9	4,508	
13	0	1	3000	0,82	2998,8	0,81685	1558,1	295,83	442,9	156,15	3,8208	
14	0	1	3000	1,04	2999,8	1,0395	958,38	240,17	1886,3	130,26	0,23312	
15	0	1	3000	1,14	2998,8	1,1355	802,96	245,45	1525,5	102,31	0,11405	

Abbildung 53: Validation der CAMEO-Messung (Modell 2, Messverfahren 2)

3.3.3. Die dritte eigene CAMEO-Messung

Der Aufbau der dritten Messung ist vollkommen identisch mit der ersten Messung. Eine veränderbare und auch eine automatische Messung wurden für die Studenten vorbereitet. Die Parameterveränderung passiert auch mit der Verstellung der Schieber. Die Werte können auch auf grafische und numerische Displays gesehen werden. Die Messung während einem Testlauf wird auf Abbildung 54 dargestellt.

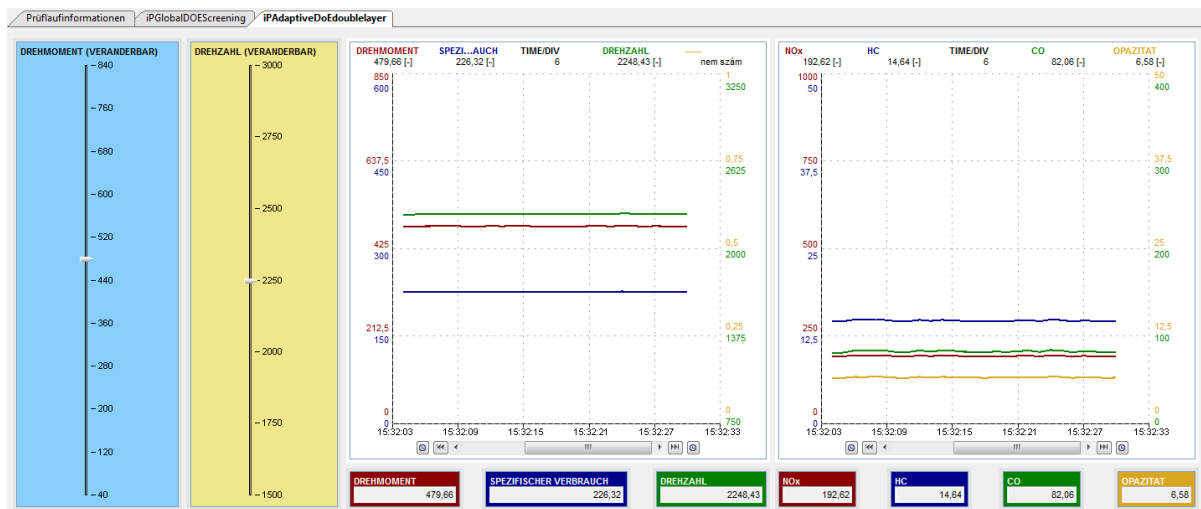


Abbildung 54: Die verstellbare CAMEO-Messung des dritten Modells

Die dritte Messung muss auch validiert werden. Abbildung 55 zeigt die Werte der ersten 15 Messpunkte. Die Schieber, die Kurven und die Displays funktionieren, sie befolgen die Parameterveränderung. Das Modell ist betriebsbereit.

Information	Ereignisse	Statistiken	Messungen										
Name	Test Version	TargetTestPoint	DREHZAHL (VE	DREHMOMENT	DREHZAHL	OPAZITÄT	HC	SPEZIFISCHER	NOx	DREHMOMENT	CO		
System		RunTest	Deutsches_Mod	Deutsches_Mod	Deutsches_Mod	Deutsches_Mod	Deutsches_Mod	Deutsches_Mod	Deutsches_Mod	Deutsches_Mod	Deutsches_Mod		
Einheit			-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Typ		Actual	Demand	Demand	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean		
	1	0	1	2250	480	2249.6	6.6345	14.725	226.47	193.65	479.92	82.788	
	2	0	1	2500	120	2500.9	36.204	29.044	304.1	97.626	120.09	129.56	
	3	0	1	1750	120	1750	38.392	6.498	266.01	111.91	120.05	89.832	
	4	0	1	2250	280	2249.2	3.9899	19.71	241.92	105.98	279.92	88.54	
	5	0	1	2750	600	2750.7	9.3373	15.43	259.13	213.76	600.16	224.95	
	6	0	1	2250	200	2249.4	9.4807	21.423	252.93	92.383	199.99	93.69	
	7	0	1	3000	200	3001.8	8.2403	43.497	303.33	114.1	200.17	167.46	
	8	0	1	2000	360	2001.1	1.7293	13.385	230.11	137.54	360.21	28.337	
	9	0	1	2250	480	2249.6	6.6349	14.726	226.47	193.64	479.92	82.797	
	10	0	1	2000	760	1998.9	4.7163	11.385	226.8	356.45	759.51	111.82	
	11	0	1	1750	760	1750.5	14.03	20.334	217.08	429.97	760.16	196.48	
	12	0	1	3000	680	3001.2	11.253	10.422	276.18	242.56	680.27	333.71	
	13	0	1	1750	840	1750.7	20.364	19.946	217.12	418.78	840.28	261.05	
	14	0	1	1500	440	1500.4	4.2007	29.036	209.06	566.94	440.08	15.027	
	15	0	1	1750	360	1750.5	1.804	12.44	221.07	239.97	360.11	7.0727	

Abbildung 55: Validation des dritten Modells

4. Motormodelle

Unter diesem Kapitel werden die physikalischen BOOST Modelle und die angefertigten Matlab-Simulink Modelle ausführlich dargestellt. Die Modelle sind aus echten, validierten Motordaten aufgebaut. Sie werden durch Matlab-Simulink in Real-Time gesteuert. Auf die Verbindung zwischen BOOST und Simulink, auf deren Aufbau und auf den Betrieb der Modelle wird im Nachfolgenden eingegangen.

4.1. Vorteile von physikalischen Motormodellen

Physikalische Motormodelle haben mehrere Vorteile gegen kennfeldbasierte Modelle. Bei kennfeldbasierten Modellen können nur ein oder zwei Parameter verändert werden. Bei physikalischen Modellen hat man eine breite Palette von Parametern, die verändert werden können.

Im Hintergrund der Modelle stehen komplexe Formeln, die in der Software vorprogrammiert sind. Neben den bekannten Formeln, die in vielen Büchern auch auffindbar sind, kann man empirische Formeln aus der Praxis finden.

4.2. BOOST Modelle

In der BOOST Software können Modelle aufgebaut werden, die mit der Hilfe von Matlab-Simulink in Real-Time simuliert werden können. Die Verbindung zwischen den Softwares ermöglicht einen harmonischen virtuellen Hintergrund für die Studenten. Die Softwares müssen für derartige Verwendung richtig eingestellt werden, weil die Experten diese Funktion nur bei speziellen Ereignissen benutzen. Diese Methode wird für Aufgaben benutzt, die mit BOOST nicht, aber mit Simulink lösbar sind. Ziel ist, diese Funktion für eine solche individuelle Simulation zu verwenden, die von Studenten in Real-Time gesteuert werden kann.

4.2.1. Steuerung der Modelle

Die virtuelle Umgebung wird durch das fertiggestellte Simulink-Modell gesteuert. Für den richtigen Betrieb der Softwares muss ein Matlab DLL Block in BOOST programmiert werden. Durch diese Datei können die steuerbaren und die messbaren Parameter eingestellt werden. Die Eingangsparameter müssen als Aktuatoren programmiert werden, die Modelle werden steuerbar durch diese Parameter in Matlab (Abbildung 56). Die acht Aktuatoren sind bei diesem Beispielmmodell die Drehzahl, das A/F Verhältnis des Injektors, die Phasenverschiebung der Zündung, die Phasenverschiebung des Einlassventils, die Phasenverschiebung des Auslassventils, das Verdichtungsverhältnis, das Verdichtungsverhältnis des Turboaufladers, und der Öffnungswinkel der Drosselklappe. Einige steuerbare Parameter sind für die Darstellung des realen Betriebs von einem Motor, wie z.B. der Öffnungswinkel der Drosselklappe bei den Benzinmotoren. Mit anderen steuerbaren Parametern kann beispielsweise die Konstruktion verändert werden.

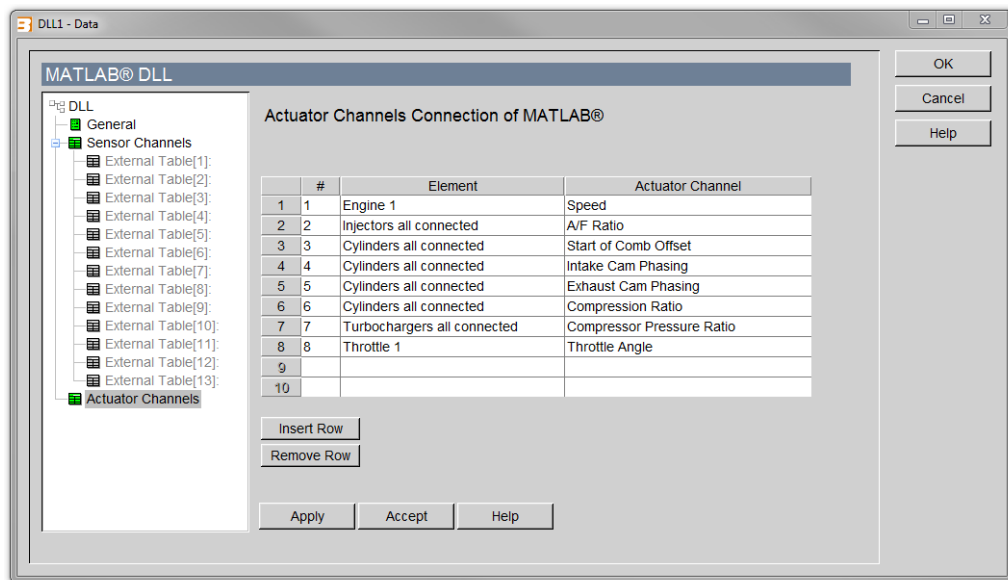


Abbildung 56: Aktuatoren bei einem Modell

Diese Eingangsparameter mit unterschiedlichen Zwecken können den Studenten beim Verständnis der komplexen motorischen Prozesse helfen. Sie können einfach wahrnehmen, wie viele Parameter die Funktion eines Motors beeinflussen.

Darstellende Parameter müssen als Sensoren eingestellt werden (Abbildung 57). Bei diesem Modell wurden 13 Sensoren benutzt, die den Druck, die Temperatur, den Ventilhub, den Lambdawert, die Drehzahl, die Leistung, den Verbrauch, den spezifischen Verbrauch, den effektiven Mitteldruck, die Emissionswerte (NO_x, CO, HC), die Mitte der Verbrennung (MFB50) zeigen. Für die Messung der Abgasemission sollten die originalen Vibe-Funktionen auf doppelten Vibe-Funktion (Vibe 2-Zone) umgestellt werden. Mit dieser Methode können die Emissionswerte in den einzelnen Zylindern dargestellt werden.

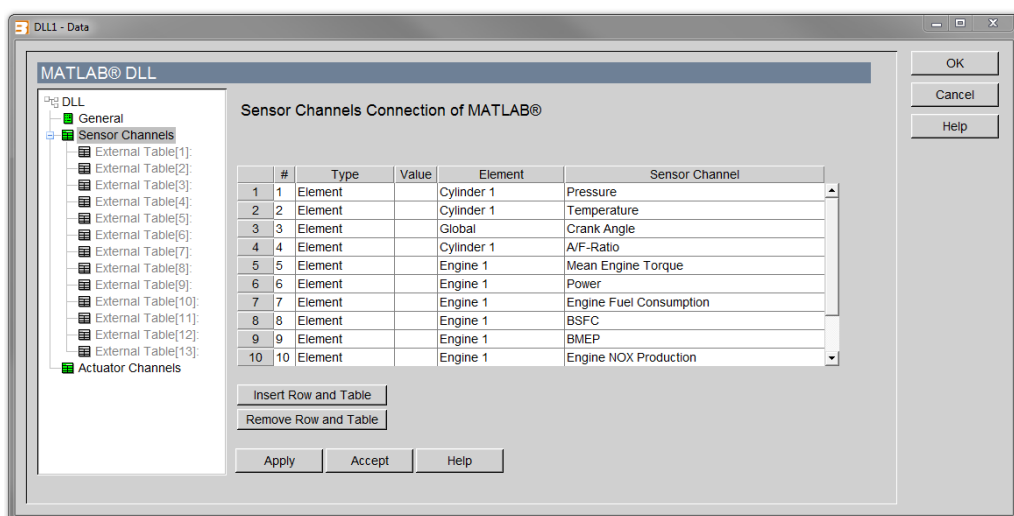


Abbildung 57: Sensoren bei einem Modell

Nach der Einstellung der Sensoren und Aktuatoren, und nach der Nachprüfung der Steuerbarkeit muss die BOOST Simulation gestartet werden. Während der Simulation muss nur das Modell erstellt werden. Abbildung 58 zeigt die Oberfläche, wo die Simulationen betätigt werden können. Eine BST-Datei konstruiert sich, die das BOOST Motormodell in einem C-Code beinhaltet. Der spezielle Block in der Simulink Software steuert diese Datei.

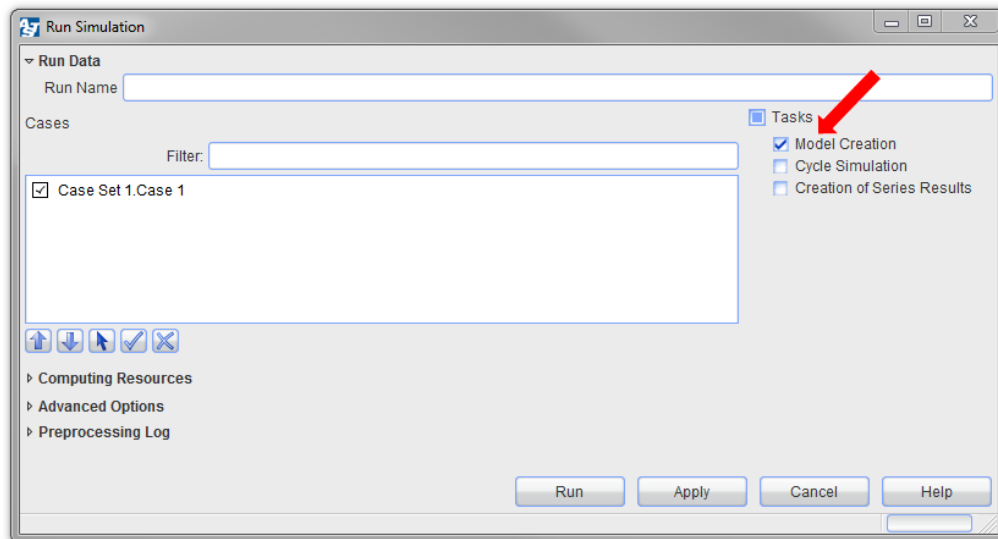


Abbildung 58: Erstellung eines BST-Files

4.2.2. Aufbau und Hauptelemente der BOOST Modelle

Die Darstellung der Hauptelemente gewährleistet das Verstehen der Funktion der Modelle. Die Bauteile des Motors haben grafische Ebenbilder, die alle programmierbar sind. Mit diesen grafischen Elementen können unterschiedlichen Motortypen einfach aufgebaut und simuliert werden. Die hauptsächlich verwendeten Elemente in den Modellen werden im Nachfolgenden dargestellt. Abbildung 59 beinhaltet diese Elemente.

Das Erste ist der Motor, hier können die Takte, die Drehzahl, die Zündfolge eingestellt werden. Mit diesem Element muss das Matlab DLL Block verbunden werden, damit die Drehzahl im Matlab veränderbar wird. Drucksensoren, Temperatursensoren, Emissionssensoren bekommen die Signale auch von diesem Block. Der spezifische Verbrauch, der effektive Mitteldruck, das Drehmoment, die Leistung werden ebenso von diesem Block gemessen.

Das Zweite ist der Zylinder, hier werden der Hub, die Zylinderbohrung, Temperaturen, Drücke, Lambda, die Zündung, die Ventile, Ventilhübe eingestellt. Mit der Verbindung des Matlab Elements können die Drücke, Temperaturen und das A/F Verhältnis gemessen werden.

Das Dritte ist der Injektor, dieses Element befindet sich nur in Benzinern-Modellen. Die unterschiedlichen Einspritzverfahren, Einspritzmengen können damit eingestellt werden. Durch Matlab kann das A/F Verhältnis des Elementes gesteuert werden.

Das Vierte ist die Umgebungsgrenze, wo die Parameter der eingesaugten Luft definiert werden können. Das Matlab Block wurde mit diesem Block nicht verbunden. Das Fünfte ist die Einengung, es hat eine einfache Verbindungsfunktion zwischen zwei Rohrelementen, die unterschiedliche Durchmesser haben. Dieser Block muss mit dem Matlab DLL nicht verbunden werden.

Das Sechste ist das Anschlussstück, dabei können Volumen eingestellt werden. Der Block ist mit dem Matlab DLL nicht gekoppelt.

Das Siebte ist die Drosselklappe, hier werden die unterschiedlichen Öffnungswinkel während der Simulationen definiert. Für die Real-Time Steuerung der Öffnung muss dieses Element mit dem DLL Block verbunden werden.

Das Achte ist der Knotenpunkt, damit können mehr als zwei Rohre verbunden werden. Es ist mit dem DLL nicht verknüpft.

Das Neunte ist der Wärmetauscher, hier können Volumen, Größen eingestellt werden. Es wird mit dem DLL auch nicht gekoppelt.

Das Zehnte ist der Katalysator, hier können Volumen, Größen, Emissionswerte, katalytische Vorgänge definiert werden. Beim Zyklus Simulation kann dieser Block nicht gesteuert werden, deshalb konnte es mit dem DLL nicht verbunden werden.

Das Elfte ist der Messpunkt, es kann für Simulationen im BOOST benutzt werden. Einige Parameter sind durch diesen Block messbar.

Das Zwölfte ist das Rohr, diese Elemente verbinden alle anderen Elemente. Sie haben auch mehrere veränderbare Parameter.

Das Dreizehnte ist der Luftfilter, hier können Volumen, Größen eingestellt werden. Es wird mit dem DLL auch nicht gekoppelt.

Das Vierzehnte ist der Turboauflader, es hat veränderbare Parameter bei der Kompressor und Turbinenseite auch. Für die Steuerung der Verdichtungsverhältnisse muss es mit dem DLL Block verbunden werden.

Das Fünfzehnte ist der Matlab DLL Block, womit die nötigen Blöcke verbunden werden müssen.

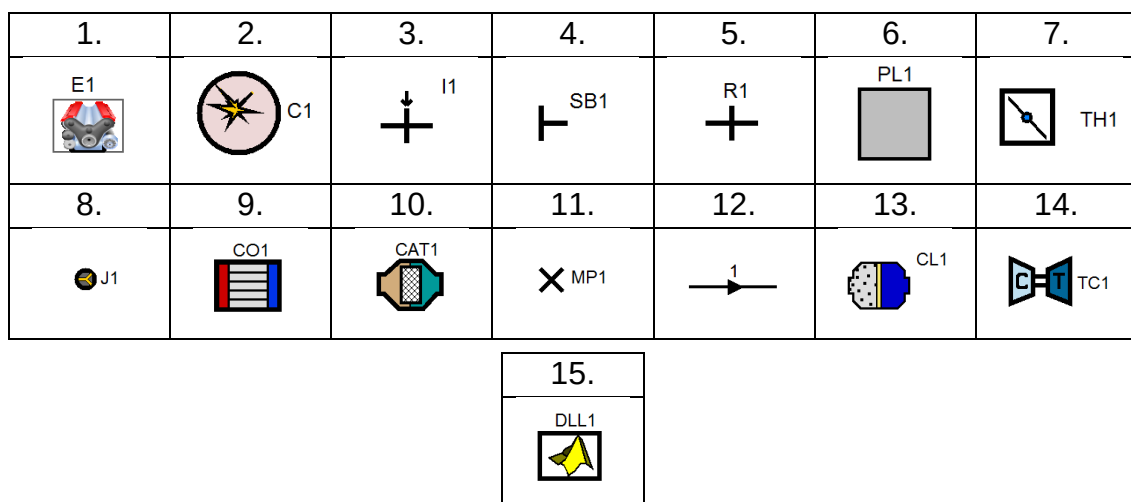


Abbildung 59: Hauptelemente der BOOST Modelle

4.2.3. Einzylinder 2-Takt Benziner

Das erste Modell ist ein Einzylinder 2-Takt Benziner-Motormodell. Der schematische Aufbau des Modells wird auf Abbildung 60 dargestellt. Die Zylinderbohrung und der Hubraum des Motors sind 54 mm. Die steuerbaren Parameter sind im Zylinder-Element, im Injektor-Element, im Motor-Element. Sie müssen mit den Matlab DLL Element verbunden werden.

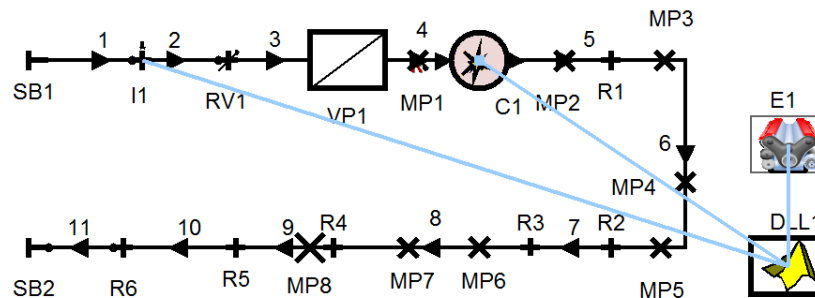


Abbildung 60: Das erste Motormodell

Die Aufbauelemente des ersten Modells:

- 1 Motor Element
- 1 Injektor
- 1 Matlab DLL für Steuerung
- 2 Umgebungsgrenzen
- 1 variabler Anschlussstück
- 6 Einengungen
- 1 Zylinder
- 8 Messpunkte
- 1 Drehventil
- 11 Rohre

Kanäle der Sensoren beim Modell 1:

- Drucksensor
- Spezifischer Verbrauch
- Temperatur
- Effektiver Mitteldruck
- Ventilhub
- NO_x
- Lambda
- CO
- Drehmoment
- HC
- Leistung
- MFB50
- Verbrauch

Kanäle der Aktuatoren beim Modell 1:

- Drehzahl des Motors
- A/F Verhältnis des Injektors
- Phasenverschiebung der Zündung
- Verdichtungsverhältnis

4.2.4. Einzylinder 4-Takt Benziner

Das zweite Modell ist ein Einzylinder 4-Takt Benziner-Motormodell. Abbildung 61 zeigt den Aufbau. Die Zylinderbohrung ist 84 mm, der Hubraum ist 90 mm.

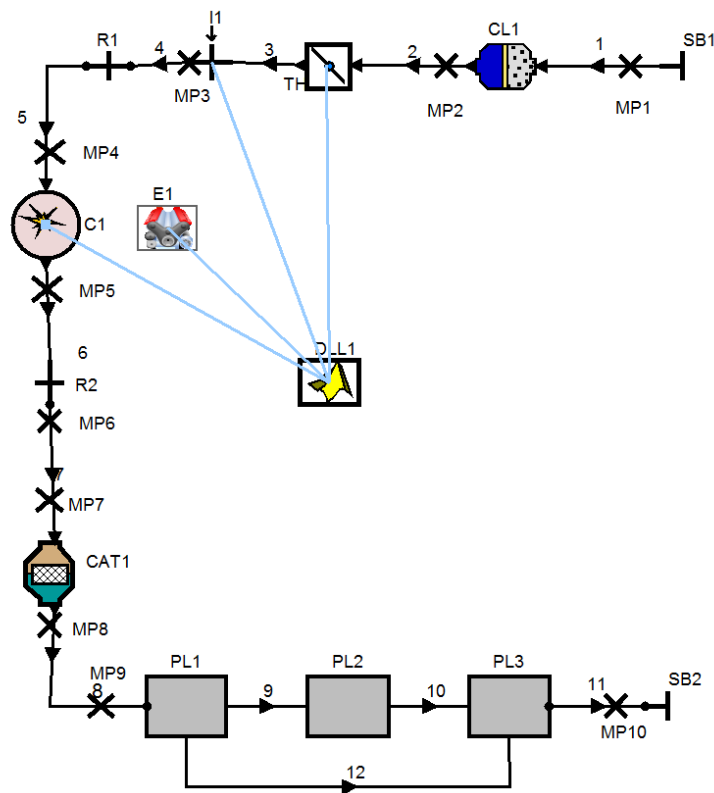


Abbildung 61: Das zweite Motormodell

Die Aufbauelemente des zweiten Modells:

- | | |
|------------------------------|----------------------|
| ▪ 1 Motor Element | ▪ 1 Katalysator |
| ▪ 1 Matlab DLL für Steuerung | ▪ 2 Umgebungsgrenzen |
| ▪ 1 Zylinder | ▪ 2 Einengungen |
| ▪ 1 Drosselklappe | ▪ 3 Anschlussstücke |
| ▪ 1 Injektor | ▪ 10 Messpunkte |
| ▪ 1 Luftfilter | ▪ 11 Rohre |

Kanäle der Sensoren beim Modell 2:

- | | |
|---------------|--------------------------|
| ▪ Drucksensor | ▪ Spezifischer Verbrauch |
| ▪ Temperatur | ▪ Effektiver Mitteldruck |
| ▪ Ventilhub | ▪ NO _x |
| ▪ Lambda | ▪ CO |
| ▪ Drehmoment | ▪ HC |
| ▪ Leistung | ▪ MFB50 |
| ▪ Verbrauch | |

Kanäle der Aktuatoren beim Modell 2:

- Drehzahl des Motors
- A/F Verhältnis des Injektors
- Phasenverschiebung der Zündung
- Phasenverschiebung des Einlassventils
- Phasenverschiebung des Auslassventils
- Verdichtungsverhältnis
- Öffnungswinkel der Drosselklappe

4.2.5. Einzylinder 4-Takt Motorrad Benziner

Das dritte Modell ist ein Einzylinder 4-Takt Benziner-Motormodell eines Motorrads. Abbildung 62 zeigt den schematischen Aufbau des Modells. Die Zylinderbohrung ist 46 mm, der Hubraum ist 54 mm. Das Modell hat zwei Einlassventile und ein Auslassventil.

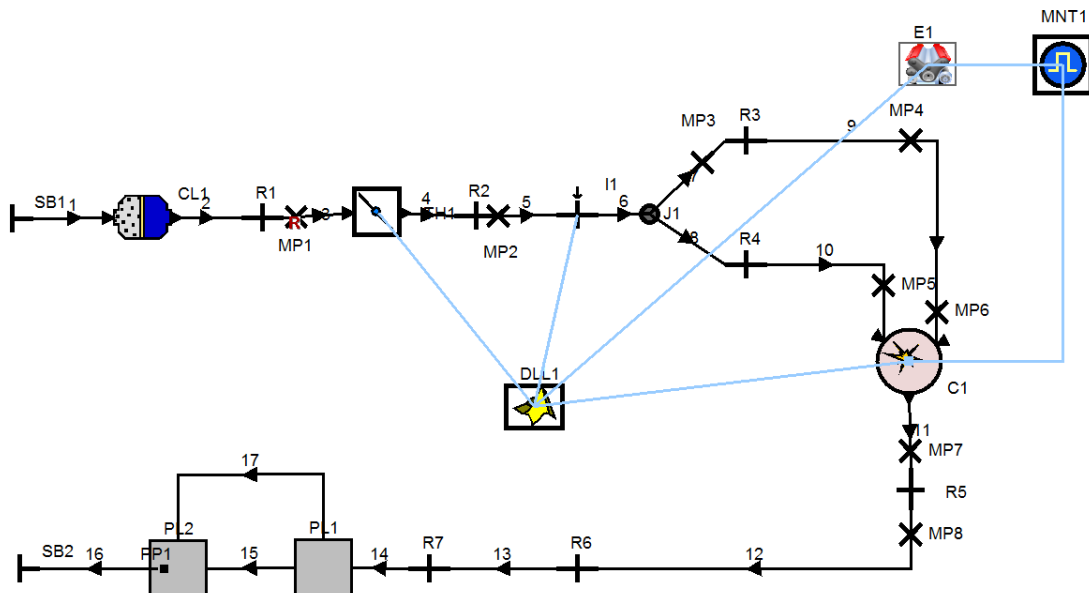


Abbildung 62: Das dritte Motormodell

Die Aufbauelemente des dritten Modells:

- 1 Motor Element
- 1 Matlab DLL für Steuerung
- 1 Zylinder
- 1 Drosselklappe
- 1 Injektor
- 1 Luftfilter
- 1 Knotenpunkt
- 2 Umgebungsgrenzen
- 2 Anschlussstücke
- 7 Einengungen
- 8 Messpunkte
- 16 Rohre

Kanäle der Sensoren beim Modell 3:

- Drucksensor
- Temperatur
- Ventilhub
- Lambda
- Drehmoment
- Leistung
- Verbrauch
- Spezifischer Verbrauch
- Effektiver Mitteldruck
- NO_x
- CO
- HC
- MFB50

Kanäle der Aktuatoren beim Modell 3:

- Drehzahl des Motors
- A/F Verhältnis des Injektors
- Phasenverschiebung der Zündung
- Phasenverschiebung des Einlassventils
- Phasenverschiebung des Auslassventils
- Verdichtungsverhältnis
- Öffnungswinkel der Drosselklappe

4.2.6. 3-Zylinder 2-Takt Diesel

Das vierte Modell ist ein 3-Zylinder 2-Takt Diesel-Motormodell. Abbildung 63 stellt den Aufbau dar. Die Zylinderbohrung ist 71,5 mm, der Hubraum ist 78,5 mm.

Die Aufbauelemente des vierten Modells:

- 1 Motor Element
- 1 Matlab DLL für Steuerung
- 1 Turboauflader
- 1 Wärmetauscher
- 1 Luftfilter
- 1 Einengung
- 1 Katalysator
- 2 Anschlussstücke
- 3 Zylinder
- 4 Umgebungsgrenzen
- 9 Knotenpunkte
- 16 Messpunkte
- 30 Rohre

Kanäle der Sensoren beim Modell 4:

- Drucksensor
- Temperatur
- Ventilhub
- Lambda
- Drehmoment
- Leistung
- Verbrauch
- Spezifischer Verbrauch
- Effektiver Mitteldruck
- NO_x
- CO
- Ruß
- MFB50

Kanäle der Aktuatoren beim Modell 4:

- Drehzahl des Motors
- Einspritzmenge des Injektors
- Phasenverschiebung der Zündung
- Verdichtungsverhältnis
- Verdichtungsverhältnis des Turboaufladers

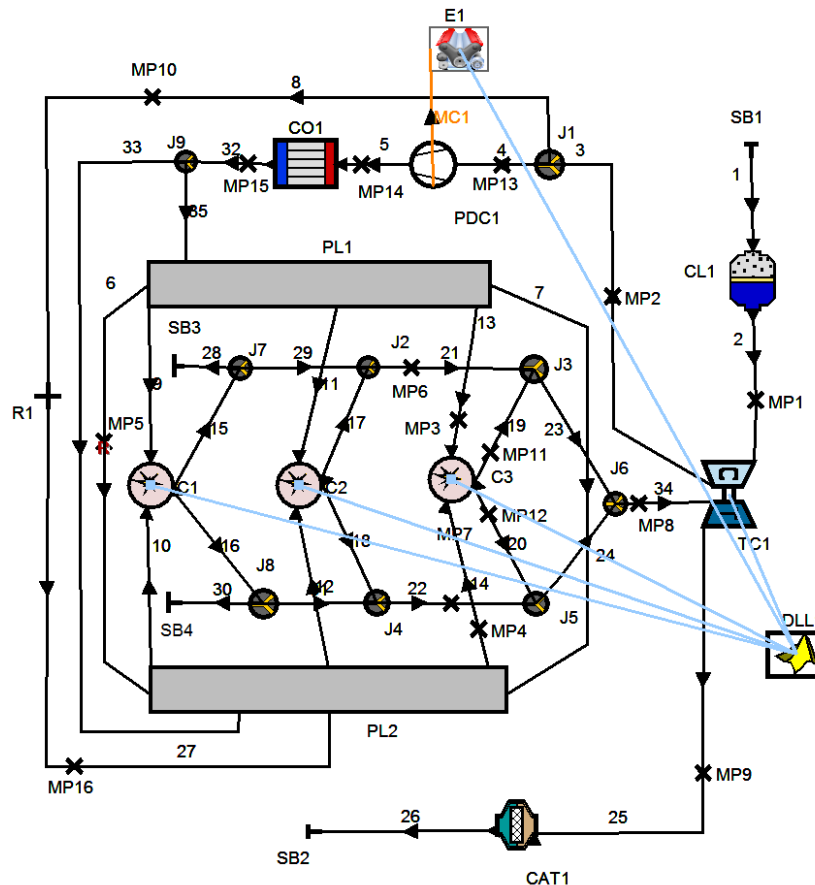


Abbildung 63: Das vierte Motormodell

4.2.7. 4-Zylinder 4-Takt industrieller Diesel

Das fünfte Modell ist ein 4-Zylinder 4-Takt industrieller Diesel-Motormodell. Abbildung 64 zeigt den schematischen Aufbau des Modells. Die Zylinderbohrung ist 75 mm, der Hubraum ist 78 mm.

Die Aufbauelemente des fünften Modells:

- | | |
|------------------------------|---------------------|
| ▪ 1 Motor Element | ▪ 4 Zylinder |
| ▪ 1 Matlab DLL für Steuerung | ▪ 6 Anschlussstücke |
| ▪ 2 Umgebungsgrenzen | ▪ 18 Messpunkte |
| ▪ 3 Knotenpunkte | ▪ 21 Rohre |

Kanäle der Sensoren beim Modell 5:

- Drucksensor
- Temperatur
- Ventilhub
- Lambda
- Drehmoment
- Leistung
- Verbrauch
- Spezifischer Verbrauch
- Effektiver Mitteldruck
- NO_x
- CO
- Ruß
- MFB50

Kanäle der Aktuatoren beim Modell 5:

- Drehzahl des Motors
- Einspritzmenge des Injektors
- Phasenverschiebung der Zündung
- Phasenverschiebung des Einlassventils
- Phasenverschiebung des Auslassventils
- Verdichtungsverhältnis

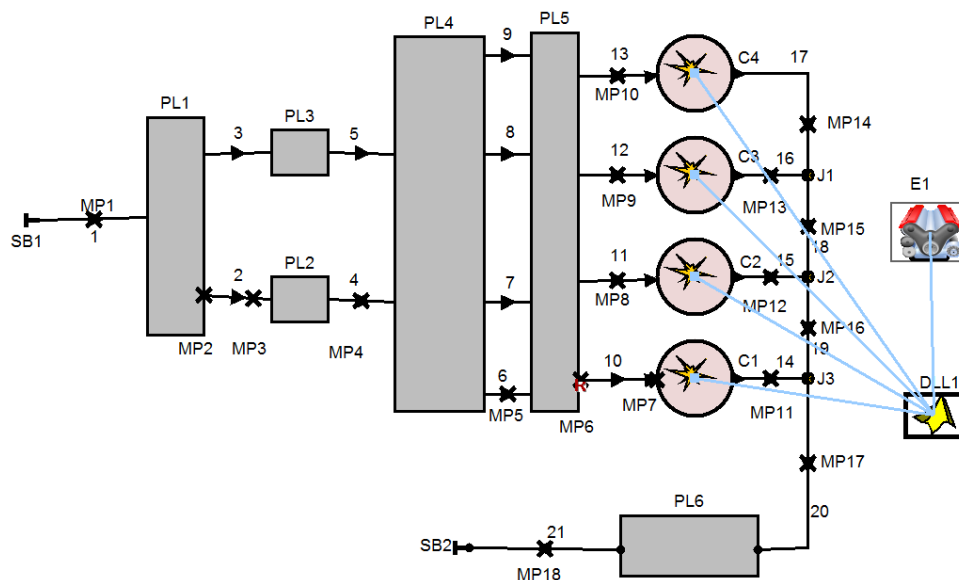


Abbildung 64: Das fünfte Motormodell

4.2.8. 4-Zylinder 4-Takt Diesel

Das sechste Modell ist ein 4-Zylinder 4-Takt Diesel-Motormodell. Abbildung 65 stellt den schematischen Aufbau dar. Die Zylinderbohrung ist 90 mm, der Hubraum ist 98 mm.

Die Aufbauelemente des sechsten Modells:

- 1 Motor Element
- 1 Luftfilter
- 1 Matlab DLL für Steuerung
- 1 Wärmetauscher

Weitere Aufbauelemente des sechsten Modells:

- 1 Turboauflader
- 2 Umgebungsgrenzen
- 3 Anschlussstücke
- 4 Zylinder
- 15 Rohre
- 18 Messpunkte

Kanäle der Sensoren beim Modell 6:

- Drucksensor
- Temperatur
- Ventilhub
- Lambda
- Drehmoment
- Leistung
- Verbrauch
- Spezifischer Verbrauch
- Effektiver Mitteldruck
- NO_x
- CO
- Ruß
- MFB50

Kanäle der Aktuatoren beim Modell 6:

- Drehzahl des Motors
- Einspritzmenge des Injektors
- Phasenverschiebung der Zündung
- Phasenverschiebung des Einlassventils
- Phasenverschiebung des Auslassventils
- Verdichtungsverhältnis
- Verdichtungsverhältnis des Turboaufladers

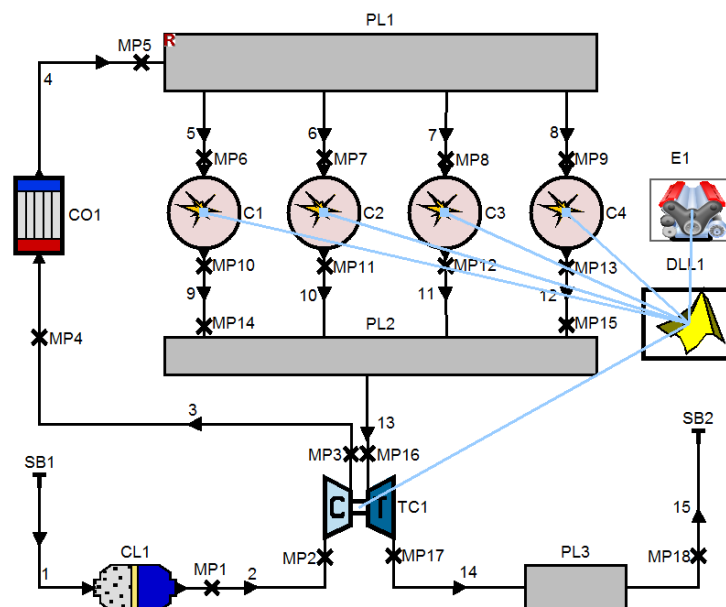


Abbildung 65: Das sechste Motormodell

4.2.9. 4-zylinder 4-Takt Benziner

Das siebte Modell ist ein 4-Zylinder 4-Takt Benziner-Motormodell. Der schematische Aufbau des Modells wird auf Abbildung 66 dargestellt. Die Zylinderbohrung ist 86 mm, der Hubraum ist 86 mm.

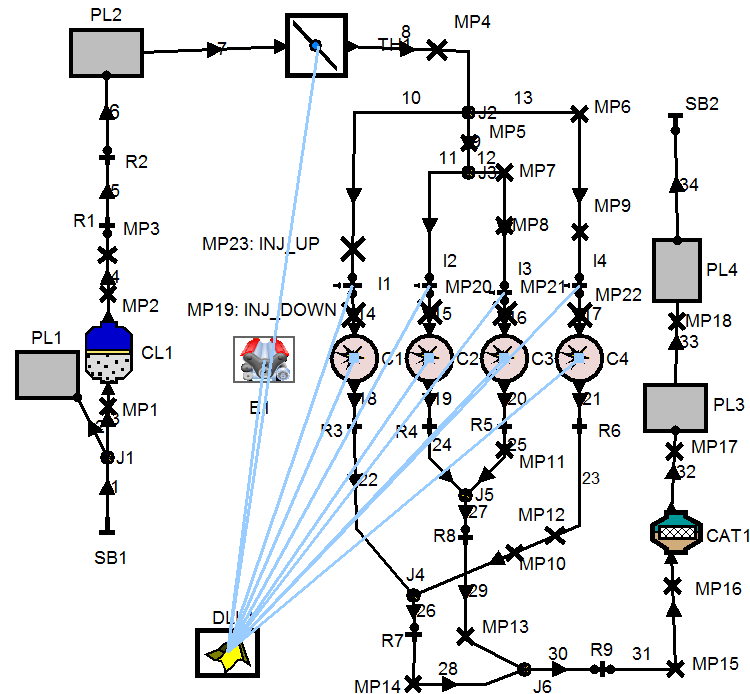


Abbildung 66: Das siebte Motormodell

Die Aufbauelemente des siebten Modells:

- 1 Motor Element
- 1 Matlab DLL für Steuerung
- 1 Luftfilter
- 1 Katalysator
- 1 Drosselklappe
- 2 Umgebungsgrenzen
- 4 Anschlussstücke
- 4 Zylinder
- 4 Injektoren
- 6 Knotenpunkte
- 9 Einengungen
- 18 Messpunkte
- 34 Rohre

Kanäle der Sensoren beim Modell 7:

- Drucksensor
- Temperatur
- Ventilhub
- Lambda
- Drehmoment
- Leistung
- Verbrauch
- Spezifischer Verbrauch
- Effektiver Mitteldruck
- NO_x
- CO
- HC
- MFB50

Kanäle der Aktuatoren beim Modell 7:

- Drehzahl des Motors
- A/F Verhältnis des Injektors
- Phasenverschiebung der Zündung
- Phasenverschiebung des Einlassventils
- Phasenverschiebung des Auslassventils
- Verdichtungsverhältnis
- Öffnungswinkel der Drosselklappe

4.2.10. 6-Zylinder 4-Takt Diesel

Das achte Modell ist ein 6-Zylinder 4-Takt Diesel-Motormodell. Der schematische Aufbau wird auf Abbildung 67 dargestellt. Die Zylinderbohrung ist 100 mm, der Hubraum ist 130 mm.

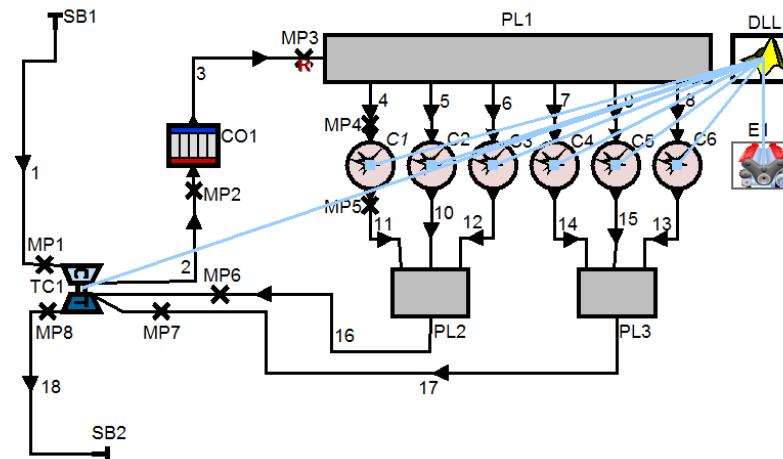


Abbildung 67: Das achte Motormodell

Die Aufbauelemente des achten Modells:

- 1 Motor Element
- 1 Matlab DLL für Steuerung
- 1 Turboauflader
- 2 Umgebungsgrenzen
- 3 Anschlussstücke
- 6 Zylinder
- 8 Messpunkte
- 18 Rohre

Kanäle der Sensoren beim Modell 8:

- Drucksensor
- Temperatur
- Ventilhub
- Lambda
- Drehmoment
- Leistung
- Verbrauch
- Spezifischer Verbrauch
- Effektiver Mitteldruck
- NO_x
- CO
- Ruß
- MFB50

Kanäle der Aktuatoren beim Modell 8:

- Drehzahl des Motors
- Einspritzmenge des Injektors
- Phasenverschiebung der Zündung
- Phasenverschiebung des Einlassventils
- Phasenverschiebung des Auslassventils
- Verdichtungsverhältnis
- Verdichtungsverhältnis des Turboaufladers

4.2.11. 6-Zylinder 4-Takt Truck Diesel

Das neunte Modell ist ein 6-Zylinder 4-Takt Truck Diesel-Motormodell. Der schematische Aufbau des Modells wird auf Abbildung 68 gezeigt. Die Zylinderbohrung ist 125 mm, der Hubraum ist 130 mm. Die steuerbaren Parameter sind im Zylinder-Element, im Injektor-Element, im Motor-Element und im Turboauflader-Element. Sie müssen mit den Matlab DLL Element verbunden werden.

Die Aufbauelemente des neunten Modells:

- | | |
|------------------------------|----------------------|
| ▪ 1 Motor Element | ▪ 2 Umgebungsgrenzen |
| ▪ 1 Matlab DLL für Steuerung | ▪ 4 Knotenpunkte |
| ▪ 1 Luftfilter | ▪ 6 Zylinder |
| ▪ 1 Katalysator | ▪ 16 Messpunkte |
| ▪ 1 Wärmetauscher | ▪ 23 Rohre |
| ▪ 2 Anschlussstücke | |

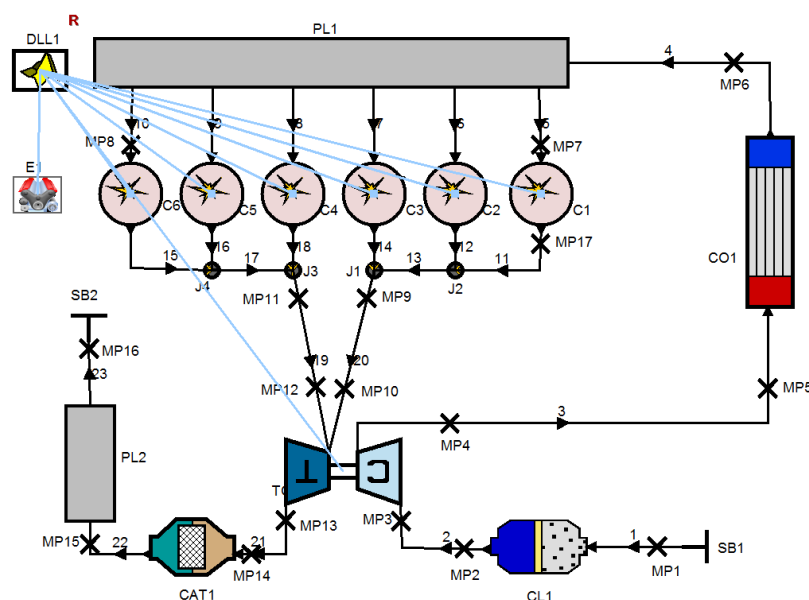


Abbildung 68: Das neunte Motormodell

Kanäle der Sensoren beim Modell 9:

- Drucksensor
- Temperatur
- Ventilhub
- Lambda
- Drehmoment
- Leistung
- Verbrauch
- Spezifischer Verbrauch
- Effektiver Mitteldruck
- NO_x
- CO
- Ruß
- MFB50

Kanäle der Aktuatoren beim Modell 9:

- Drehzahl des Motors
- Einspritzmenge des Injektors
- Phasenverschiebung der Zündung
- Phasenverschiebung des Einlassventils
- Phasenverschiebung des Auslassventils
- Verdichtungsverhältnis
- Verdichtungsverhältnis des Turboaufladers

4.2.12. 6-Zylinder 2-Takt Diesel

Das zehnte Modell ist ein 6-Zylinder 2-Takt Großdiesel-Motormodell. Der schematische Aufbau des Modells wird auf Abbildung 69 dargestellt. Die Zylinderbohrung ist 900 mm, der Hubraum ist 2100 mm.

Die Aufbauelemente des zehnten Modells:

- 1 Motor Element
- 1 Matlab DLL für Steuerung
- 1 Anschlussstück
- 1 Turboauflader
- 1 Wärmetauscher
- 3 Umgebungsgrenzen
- 6 variable Anschlussstücke
- 6 Knotenpunkte
- 6 Zylinder
- 8 Messpunkte
- 29 Rohre

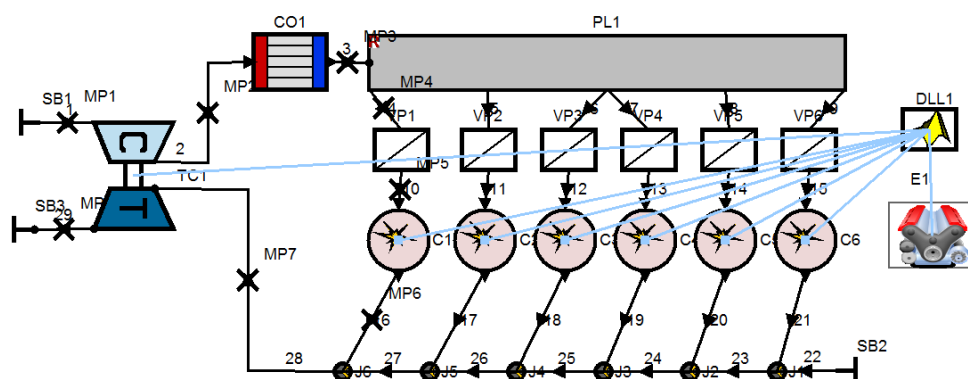


Abbildung 69: Das zehnte Motormodell

Kanäle der Sensoren beim Modell 10:

- | | |
|---------------|--------------------------|
| ▪ Drucksensor | ▪ Spezifischer Verbrauch |
| ▪ Temperatur | ▪ Effektiver Mitteldruck |
| ▪ Ventilhub | ▪ NO _x |
| ▪ Lambda | ▪ CO |
| ▪ Drehmoment | ▪ Ruß |
| ▪ Leistung | ▪ MFB50 |
| ▪ Verbrauch | |

Kanäle der Aktuatoren beim Modell 10:

- Drehzahl des Motors
- Einspritzmenge des Injektors
- Phasenverschiebung der Zündung
- Verdichtungsverhältnis
- Verdichtungsverhältnis des Turboaufladers

4.2.13. 6-Zylinder 4-Takt Benziner

Das elfte Modell ist ein Einzylinder 4-Takt Benziner-Motormodell. Der Aufbau wird auf Abbildung 70 gezeigt. Die Zylinderbohrung ist 82 mm der Hubraum ist 84,6 mm.

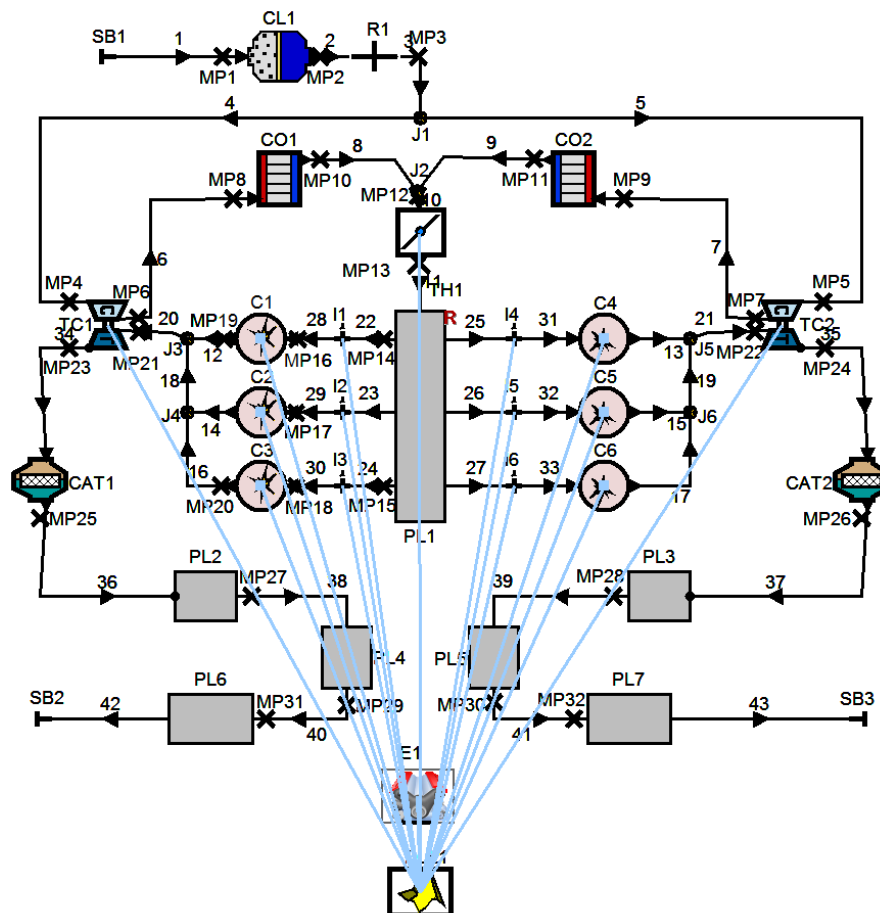


Abbildung 70: Das elfte Motormodell

Die Aufbauelemente des elften Modells:

- 1 Motor Element
- 1 Matlab DLL für Steuerung
- 1 Luftfilter
- 1 Drosselklappe
- 1 Einengung
- 2 Wärmetauscher
- 2 Turboauflader
- 2 Katalysator
- 3 Umgebungsgrenzen
- 6 Knotenpunkte
- 6 Zylinder
- 6 Injektoren
- 7 Anschlussstücke
- 32 Messpunkte
- 43 Rohre

Kanäle der Sensoren beim Modell 11:

- Drucksensor
- Temperatur
- Ventilhub
- Lambda
- Drehmoment
- Leistung
- Verbrauch
- Spezifischer Verbrauch
- Effektiver Mitteldruck
- NO_x
- CO
- HC
- MFB50

Kanäle der Aktuatoren beim Modell 11:

- Drehzahl des Motors
- A/F Verhältnis des Injektors
- Phasenverschiebung der Zündung
- Phasenverschiebung des Einlassventils
- Phasenverschiebung des Auslassventils
- Verdichtungsverhältnis
- Verdichtungsverhältnis des Turboaufladers
- Öffnungswinkel der Drosselklappe

Nach dem erfolgreichen Ablauf der Simulation erzeugen sich die BST-Files, die dann in Matlab-Simulink verwendet werden können. Die Dateien werden so benannt (Abbildung 71), dass sie später einfach identifiziert werden können.

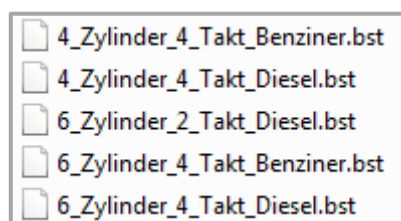


Abbildung 71: BST-Files der Motormodelle

4.3. Matlab-Simulink Modelle

Der richtige Lauf der Modelle, die in BOOST aufgebaut wurden, braucht spezielle Matlab-Simulink Modelle. Die Simulink-Modelle müssen kompatibel und benutzerfreundlich sein. Die Benutzeroberfläche muss bei allen Modellen identisch sein, weil die Studenten unterschiedliche Motormodelle bekommen. Elf unterschiedliche Modelle werden auf die Rechner installiert, bei jedem Rechner befindet sich nur Eine. Der Zweck der Laborübungen ist die einfache Darstellung und Lehren von motorischen Prozessen. Die Studenten sollen Simulink nicht kennen, deshalb müssen die Modelle durchschaubar und einfach behandelbar sein. Sie müssen die Messungen und die Auswertungen barrierefrei absolvieren.

Das Simulink Block, das von Ingenieuren bei AVL programmiert wurde, beruft sich auf das BST-File (Abbildung 72). Um das Block verwendet zu können, muss der Zugriffspfad des genauen Ordners von BOOST ins Matlab importiert werden. Mit der Hilfe von dem Block kann das genaue BST-File, die steuerbaren Sensoren und Aktuatoren angegeben werden, die für das Modell verwendet werden. Die definierten Sensoren und Aktuatoren in Simulink müssen in identischer Reihenfolge sein, genauso, wie sie im BOOST definiert wurden. Die Software erkennt diesen Fehler nicht, nur die Eingangsparameter werden unerwartete Ergebnisse auf den Ausgangparametern geben.



Abbildung 72: Der AVL BOOST Block in Simulink

Zu allen Rechnern im Computerraum gehört ein von den elf Motormodellen, die in BOOST aufgebaut und früher dargestellt wurden. Die Simulink-Modelle für Steuerung und Monitoring von Benziner- und Diesel-Modellen weichen voneinander nur in einigen Punkten ab. Bei den Benziner-Modellen ist eine reale quantitative Regelung mit der Hilfe von Steuerung der Drosselklappe verfügbar. Der Öffnungswinkel der Drosselklappe ist bei diesen Modellen ein veränderbarer Eingang. Die qualitative Regelung bei den Dieselmotoren wird mit der veränderbaren Einspritzmenge gesichert.

Abbildung 73 zeigt das Simulink-Modell eines Benziners, Studenten treffen sich mit diesen Oberfläche, wenn sie das Programm starten. In der Mitte der Abbildung befindet sich ein Block namens Motormodell. Dieser Block ist ein Subsystem, was der AVL BOOST Block und weitere nötige Blöcke beinhaltet. Diese Modellstruktur ermöglicht die Unsichtbarkeit des komplizierten Inhalts der Modelle. Diese Elemente sind für die Messung nicht relevant, sie gewährleisten nun die vorschriftsmäßige Funktion der Modelle.

Studenten können sich mit dieser Methode nur auf ihre Aufgabe, auf die Messung und auf Datenauswertung konzentrieren. Die Struktur der Modelle ist identisch mit der Struktur von Experten, die mit Simulink arbeiten. Die Eingänge sind auf der linken, die Ausgänge an der rechten Seite. Die Aktuatoren sind grüne Blöcke, in der Mitte steht das Motormodell, rechts liegen die grafische Display Elemente.

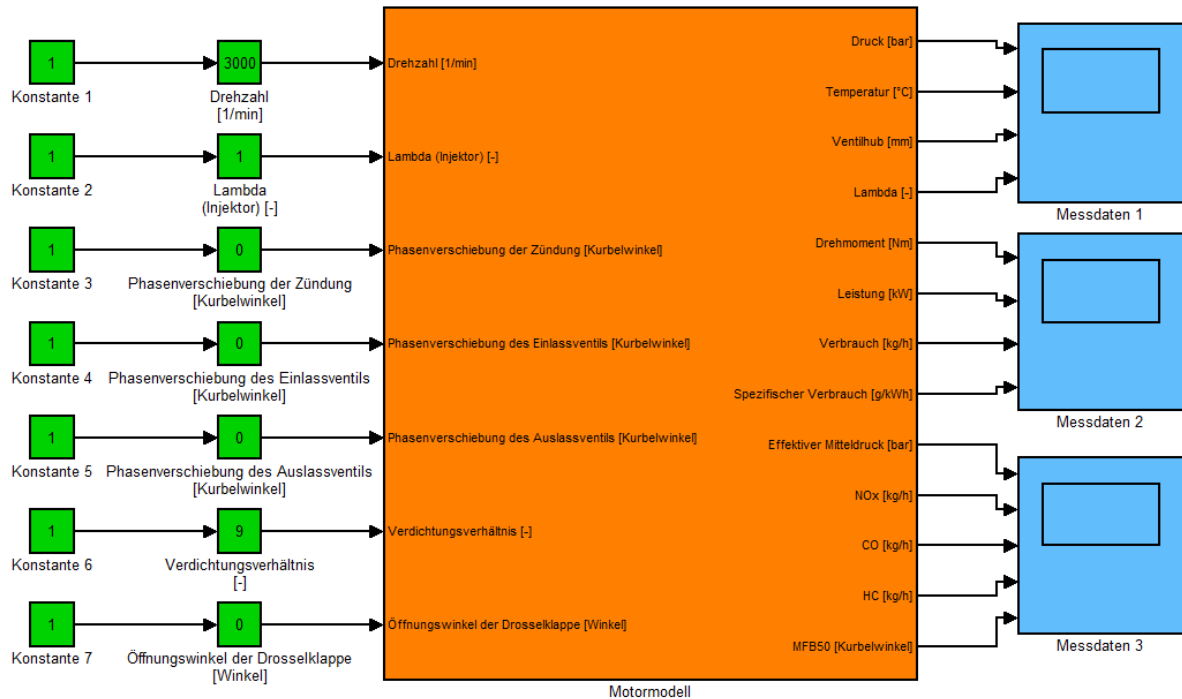


Abbildung 73: Das Simulink-Hauptmodell

Das Submodell von Benzinern-Modellen wurde auf Abbildung 74 dargestellt. Die Signale der eingestellte Aktuator im Hauptmodell kommen von der linken Seite. Sie werden von einem Sammlerelement zusammengesammelt und weitergeleitet. Das Signal kommt in einer Vektor Form in den AVL BOOST Block an. Das Ausgangssignal verlässt den Block auch als ein Vektor, dieser Vektor wird dann mit der Hilfe von einem Verteilerelement dividiert. Diese Signale werden für das Hauptmodell übergeben.

Die Simulink Blöcke haben ursprünglich ungarische Namen, aber für das einfache Verständnis des Aufbaus sind sie hier auf Deutsch dokumentiert. Diese Blöcke simulieren das Klopfen, den Stopp und den Ausfall des Motors. Mit diesen Funktionen können die Studenten motorische Prozesse viel einfacher verstehen als früher.

Die Öffnungskurven der Ventile werden durch ein eigenes Subsystem visualisiert. Die veränderbare Ventilsteuerung und die Phasenverschiebung der Ventile können auch mit dieser Methode gezeigt werden.

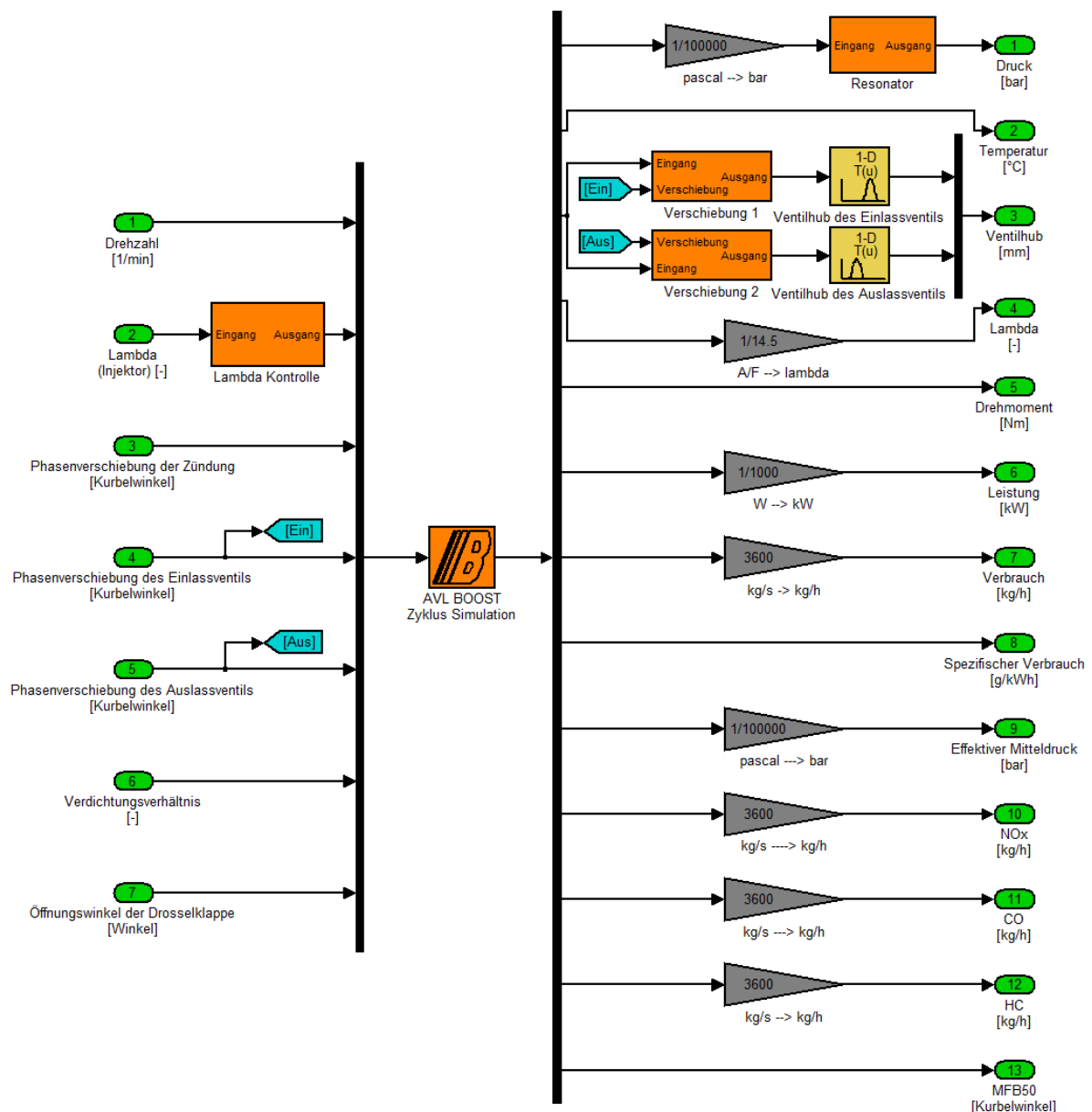


Abbildung 74: Das Simulink-Submodell

4.3.1. Darstellung der Ventilhub Kurven

Diese Kurven lassen sich nicht direkt darstellen, aber mit der Hilfe von diesen Blöcken können sie indirekt visualisiert werden. Die Ursache dieses Problems ist die begrenzte Parameterveränderung. Die eingestellten Aktuatoren in BOOST können nur einen Parameter verändern. Diese Kurven bestehen aus einer Menge von Datenpunkten in der Abhängigkeit von Kurbelwinkel (Abbildung 75 oben). Die direkte Veränderung von diesen Datenpunkten ist nicht realisierbar. Die Darstellung des jeweiligen Kurbelwinkels durch ein Sensorelement ist möglich, mit der Anwendung dieses Vorteils können die Ventilhub-Kurven mit speziellen Blöcken in Simulink gezeigt werden (Abbildung 75 unten). Dafür müssen die Daten der Kurven aus BOOST in eine DAT-Datei exportiert werden.

Dieses File kann dann einfach ins Matlab importiert werden. Der Veränderliche in Matlab hat zwei Varianten, Eine ist der Kurbelwinkel von 0° bis 720° , die Andere ist der Ventilhub in der Abhängigkeit von Kurbelwinkel Daten. Mit der Hilfe von diesen zwei Datensätzen können identischen Kurven in BOOST und Matlab auch definiert werden. Die Kurven sind in den gelben Blöcken programmiert, der Einlassventil und der Auslassventil haben eigene Blöcke. Die Einstellung dieser Kurven ist nicht genug. Mit dieser Methode werden sie immer konstant mit dem jeweiligen Kurbelwinkel ablaufen, die Aktuatoren für die Phasenverschiebung haben noch keine Einwirkung hier.

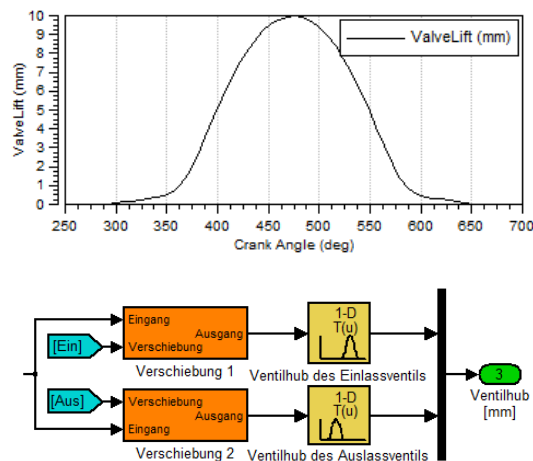


Abbildung 75: Eine Ventilhub Kurve in BOOST (oben) und in Simulink (unten)

Die reale Darstellung von veränderbarer Ventilsteuerung braucht weitere Blöcke. Mit diesen Elementen werden die Kurven auch in Matlab ordnungsmäßig funktionieren und auf dem Displayelement gezeigt werden. Die orangen Blöcke sind für die Phasenverschiebung verantwortlich. Die Elemente im Submodell sind für den korrekten Betrieb unverzichtbar (Abbildung 76). Das Eingangssignal, in diesem Fall der Kurbelwinkel, wird mit der Phasenverschiebung ergänzt. Das Submodell bekommt dieses Signal direkt von dem gesteuerten Aktuator, die Summe der Werte wird durch das Motormodell ins Hauptmodell geleitet. Mit dieser Methode werden die Ventilhub-Kurven immer richtig dargestellt.

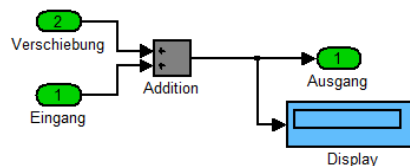


Abbildung 76: Verschiebung Submodell

4.3.2. Einfluss von Luftverhältnis

Der Einfluss von Luftverhältnis wurde durch andere Blöcke gewährleistet. Die Reaktion des BOOST Modells ist sehr langsam, die Simulation wird nur nach mehreren Zyklen gestoppt. Das ist aber nicht statthaft, deswegen wurde die Zyklussimulation noch in BOOST verlangsamt, oft der Zehntel der originalen Geschwindigkeit wurde verwendet. Die Kurven können mit diesem Verfahren einfach besichtigt werden. Neben dem Vorteil dieser Verlangsamung existiert ein großer Nachteil: das Motormodell kann mit extremen Lambda-Werten ziemlich lange funktionieren. Ein Lambda-Kontroller wurde deshalb in die Modelle eingebaut (Abbildung 77), die für enge Arbeitsbereiche der Benziner dient.

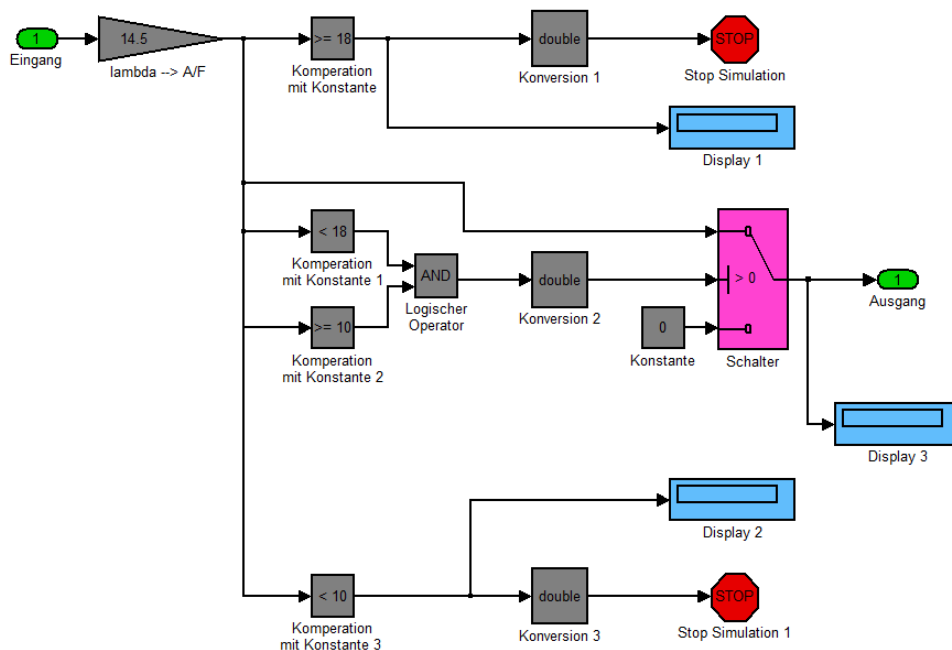


Abbildung 77: Submodell für Lambda Kontrolle

Der Lambda-Wert wird mit dem A/F Verhältnis multipliziert, weil in BOOST nur dieser Parameter gesteuert werden konnte. Das A/F ist für das Verhältnis von Luft- und Kraftstoffmenge. Das Verhältnis des Gemisches für die vollkommene Verbrennung ist 1 beim stöchiometrischen Gleichgewicht. Die dafür benötigte Luftmenge ist in Abhängigkeit von verschiedenen Kraftstoffen unterschiedlich, in diesem Fall 14,5 / 1. Nach dem 14,5 malen Verstärker kann das Signal auf drei Wegen weitergehen. Die Komparativ-Blöcke analysieren das Eingangssignal und bestimmen, ob sie es durchlassen, oder nicht. Das Signal kann immer auf einen Weg weitergehen, das Ergebnis hängt davon ab. Beim zu niedrigen A/F Verhältnissen, das Gemisch ist zu fett für die Verbrennung, die Simulation wird gestoppt. Das Ergebnis ist identisch mit den großen A/F Zahlen und mit dem mageren Gemisch.

Die A/F Werte, die im korrekten Arbeitsbereich des Motors sind, werden von dem Submodell auf den Ausgang geleitet. Die Simulation funktioniert dann fehlerlos. Für den Betrieb des Modells sind Konversionselemente, logische Operatoren und ein Schalterelement nötig. Mit der Hilfe von Displays kann einfach dargestellt werden, welcher Komparator das Signal weitergeleitet hat. Aktive Displays zeigen das aktuelle A/F Verhältnis, inaktive zeigen 0 Wert.

Das Submodell ist nur in Benzinern-Modellen aufzuweisen, es wurde mit dem Eingang des Injektors verbunden (Abbildung 74). Der A/F Wert in Zylindern erreicht nur nach einigen Zyklen den Betriebsbereich, deshalb konnte das Submodell nicht im Ausgangsbereich sondern im Eingangsbereich des Motormodells verwendet werden. Nach 5 Zyklen erreicht das Modell die Nennwerte.

4.3.3. Klopfen des Motors

Das Klopfen des Motors wurde auch mit einem Subsystem erzeugt. Der Aufbau des Modells ist auf Abbildung 78 dargestellt. Das Aussehen des Modells ähnelt dem Lambda Controller, aber seine Funktion ist unterschiedlich. Die Druckwerte, die im normalen Betriebsbereich sind, werden ohne Eingriffe auf dem unteren Zweig weitergeleitet. Die Druckwerte außerhalb des Betriebsbereichs werden eine Reaktion von den anderen Zweigen hervorrufen.

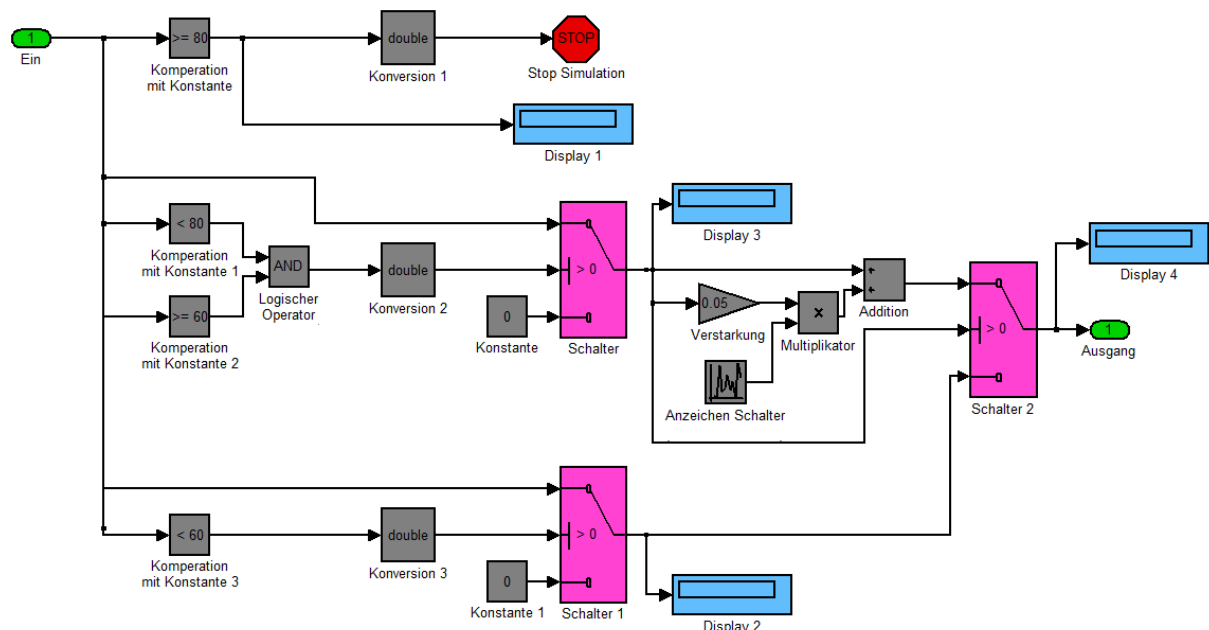


Abbildung 78: Resonator Submodell

Eine gewisse Anzahl der Druckwerte erzeugen ein Klopfsignal beim Ausgang. Dieser ist bei allen Modellen unterschiedlich. Das Signal ist identisch mit den realen Klopfsignalen. Diese Signale werden von Ingenieuren auch bei einem echten Prüfstand gemessen.

Mit einem Anzeichen-Schalter und einen Verstärker sehen die Druckwellen so aus, wie beim Klopfen des realen Motors. Das Signal ist eine vollkommene Reproduktion der echten Vorgänge. Bei zu hohen Drücken wird die Simulation gestoppt, es indiziert das Untergehen des Motors.

Das Submodell wurde vor den Drucksensor des ersten Zylinders eingebaut (Abbildung 74). Gegen den Lambda-Controller funktioniert dieses Submodell auf der Ausgangsseite auch fehlerlos, weil die Messwerte beim Starten der Simulation im normalen Betriebsbereich sind.

4.3.4. Ablauf der Simulation

Nach der erfolgreichen Fertigstellung der Simulink-Modelle müssen sie mit den BOOST Modellen gekoppelt werden. Die Ausgangsparameter müssen so eingestellt werden, wie sie in den originalen Modellen definiert wurden. Damit kann vermieden werden, dass die Motormodelle außerhalb des normalen Betriebsbereichs laufen. Jeder AVL BOOST Block (Abbildung 72) in den Modellen muss korrekt eingestellt werden, das entsprechende BST-File muss ausgewählt werden. Wenn es inkorrekt eingestellt ist, erscheint ein Fehler, die Simulation läuft nicht ab.

Vor dem Start der Matlab Software muss eine Verbindung zwischen den Softwares gewährleistet werden. Die Kommunikation mit BOOST wird durch das programmierte Script von Ingenieuren beim AVL erzeugt. Nach der Öffnung eines DOS Fensters muss das Script, dann Matlab gestartet werden. Der Start des Scripts ist nicht einfach für Computerverwender, die nicht programmieren können, deshalb wurden die drei benötigten Sätze in eine TXT-Datei eingelegt. Mit der Hilfe von diesen Befehlen kann das Script einfach gestartet werden. Nach der erfolgreichen Einstellung wird beim Starten der Simulation parallel ein AVL BOOST Script gestartet, was die Verbindung zwischen den Softwares gewährleistet (Abbildung 79). Es zeigt den Ablauf von Zyklen und die Grenze der Modelle während der Simulation. Studenten haben die Möglichkeit, die Eingangsparameter und die Ausgangsparameter auf einer eigenartigen Oberfläche zu verändern (Abbildung 80).

```

C:\Program Files (x86)\AVL\BOOST\v2013.2\bin\ia32-unknown-winnt_i11\boost.exe
BOOST TCP adaptor:
Connection to host:port - 10.4.200.43:61581 - established.
Data exchange started.

  AAA  UU  UU  LL  BBBB  00000  00000  SSSS  TTTTTT
  AAAA  UU  UU  LL  BBBB  0000000  0000000  SSSSS  TTTTTT
  AA  AA  UU  UU  LL  BB  BB  00  00  00  00  SS  TT
  AAAAAA  UU  UU  LL  BBBB  00  00  00  00  SSSSS  TT
  AAAAAA  UVU  UVU  LL  BB  BB  00  00  00  00  SS  TT
  AA  AA  UVUUU  LLLL  BBBB  0000000  0000000  SSSSS  TT
  AA  AA  UVU  LLLL  BBBB  00000  00000  SSSS  TT

VERSION v2013.2.0.0.0
AVL - Advanced Simulation Technologies
Platform: ia32-unknown-winnt_i11
Build date: Nov 11 2013 16:58:06
System date: 10.04.2014

```

Abbildung 79: Script von AVL BOOST

Die Eingangsparameter können durch die unten befindlichen Schieber verändert werden. Die Zahl der Eingangsparameter ist mit dem eingestellten steuerbaren Parameter des Motors identisch. Die Ausgangsparameter werden mit der Hilfe von grafischen Display-Elementen dargestellt.

Die Kurven reagieren in Real-Time auf die Veränderung der Eingangsparameter, sie ermöglichen die Darstellung des komplexen Betriebs der Motoren. Die angefertigte Oberfläche der virtuellen Umgebung ist ähnlich wie bei allen Modellen. Nur einige Eingangsparameter sind unterschiedlich, sie werden hier nicht dargestellt, weil sie keine weiteren Informationen über den Lauf der Modelle geben.

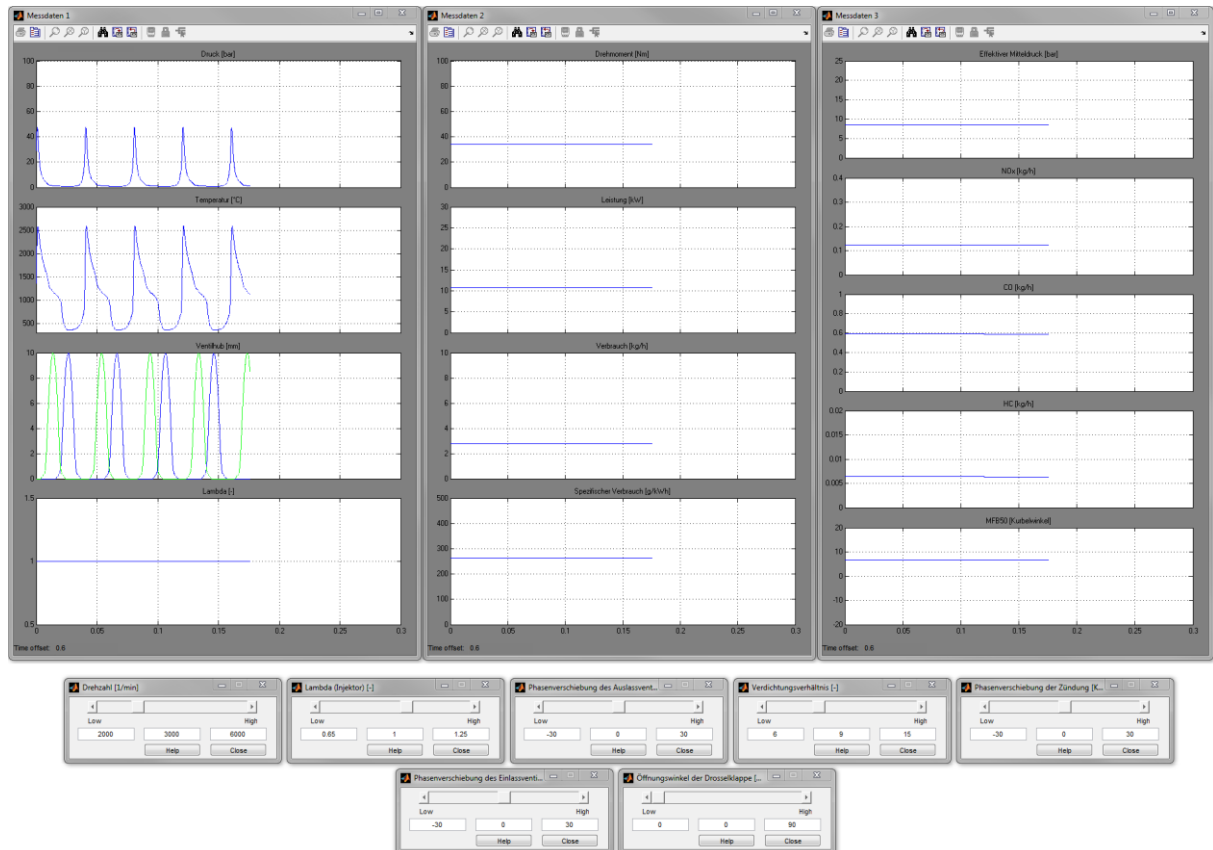


Abbildung 80: Oberfläche der Simulation in Matlab

4.3.5. Validation der Modelle

Der richtige Betrieb der Simulation und der Modelle muss mit einer Validation bewiesen werden. Die Kurven der evaluierten BOOST Zyklen müssen mit der gesteuerten Matlab-Modellen identische Ausgangswerte ergeben. Die Werte der Simulation sind bei den ersten 5 Zyklen nicht verwendbar, die Modelle brauchen Zeit für die Darstellung der korrekten Messwerte. Experten berücksichtigen diese Zyklen auch nicht, die Bilder zeigen den Betrieb von dem fünften Zyklus (Abbildung 81 und 82).

Abbildung 81 zeigt einige Validationsergebnisse in BOOST. Der Druckablauf, das Drehmoment, die Leistung und der spezifische Verbrauch wurden für die Darstellung der Ergebnisse ausgewählt.

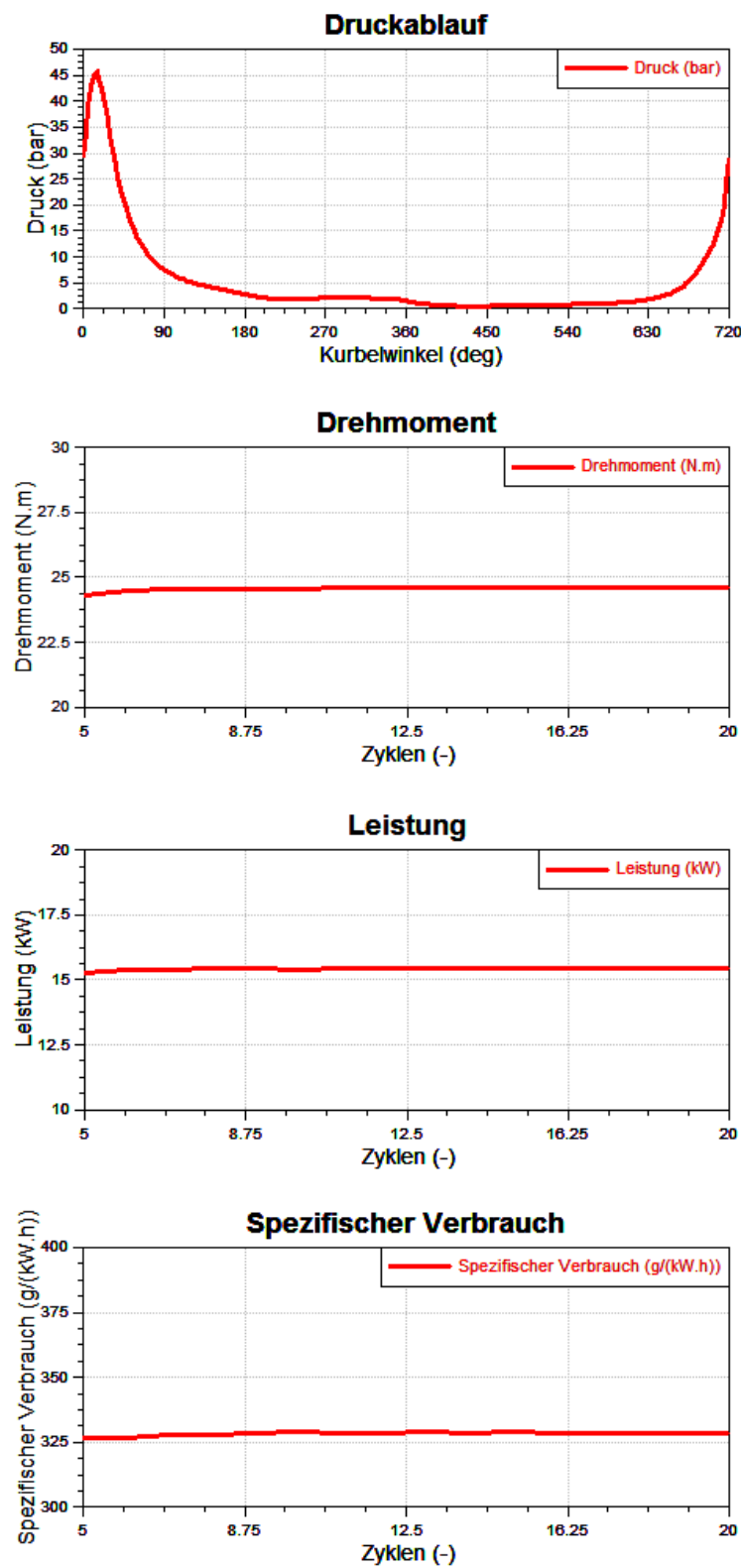


Abbildung 81: Validationsergebnisse in BOOST

Abbildung 82 zeigt die Validationsergebnisse in Matlab. Die zufällig ausgewählte Kurven, Messdaten und Maßeinheiten waren während der Testabläufe vollkommen identisch bei den beiden Softwares. Die Ergebnisse in BOOST und in Matlab zeigen keinen Unterschied, die Modelle sind für Ausbildung der Studenten bereit.

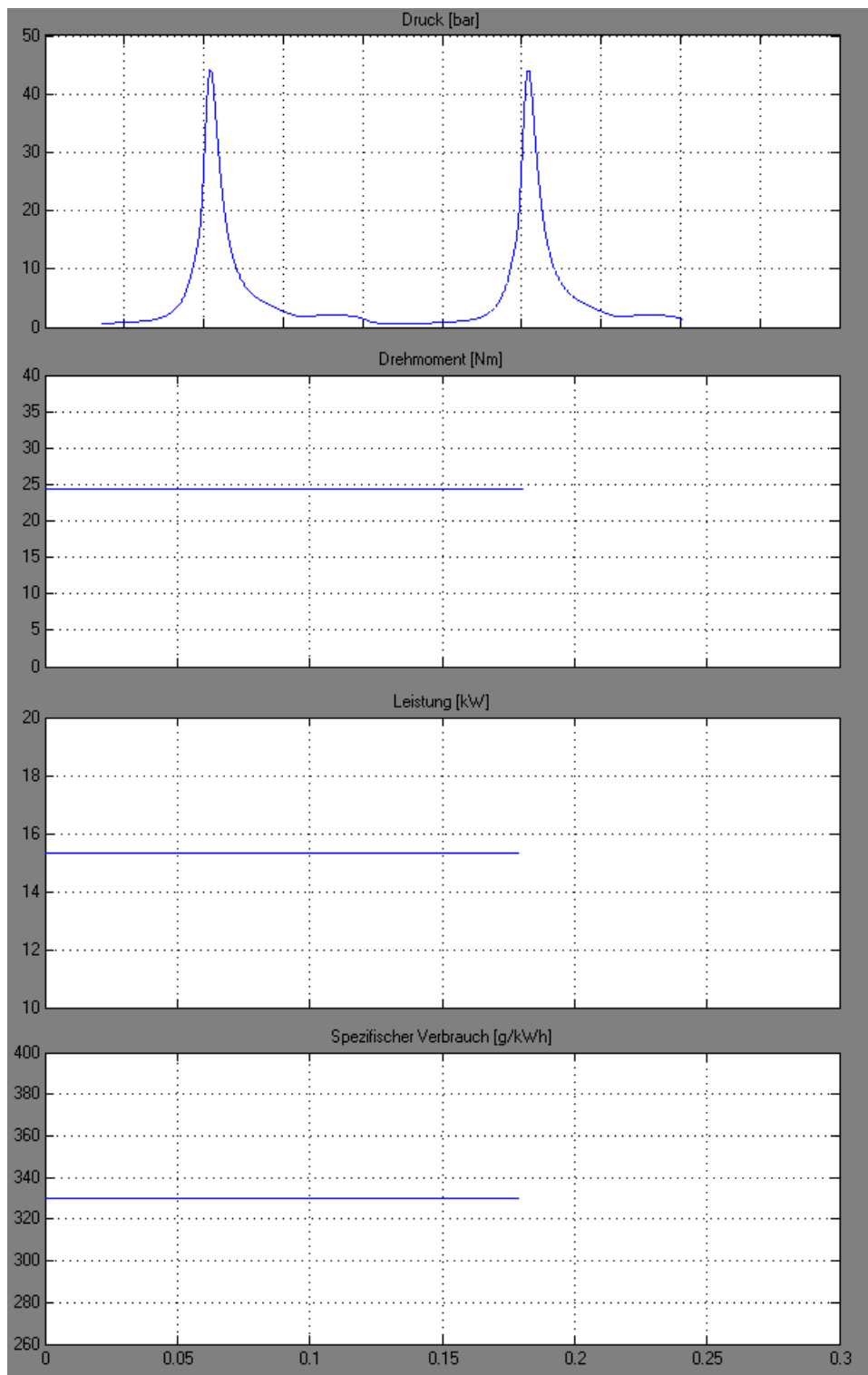


Abbildung 82: Validationsergebnisse in Matlab

5. Der virtuelle Motorprüfstand

Mit der Fertigstellung und Validation der Modelle konnte die Ausbildung mit diesen neuen Methoden begonnen werden. Früher konnten die Studenten an einer Laborübung nur als ein Zuschauer teilnehmen. Der Prüfstand kostet so viel, dass sie es nicht ausprobieren dürfen. Der Leiter der Laborübung hat ihnen den Prüfstand, eine Messung gezeigt. Mit dem virtuellen Prüfstand haben sie die Möglichkeit eigene Messungen und Datenauswertungen auszuführen. Abbildung 83 zeigt den Unterschied zwischen den zwei Ausbildungsmethoden. Die praktische Ausbildung der Studenten wird mit dem virtuellen Prüfstand weiterentwickelt.



Abbildung 83: Unterschied zwischen Ausbildungsmethoden

Der erste Meilenstein des Projekts war im Dezember 2013, das war die erste Probe des virtuellen Prüfstands mit der Hilfe von 30 Studenten. Sie hatten die Möglichkeit für die Erprobung von Prüfstandmodellen in CAMEO, damit konnten sie die Auswirkung der Veränderung von Eingangsparametern beabsichtigen. Nach dem positiven Feed-back wurde das Projekt erweitert.

Im April 2014 wurden BOOST und Matlab auf die Rechner im Computerraum installiert und die Motormodelle wurden bereit. Die zweite Probe des virtuellen Prüfstandes wurde mit 120 Studenten durchgeführt. Sie haben die Modelle ausprobiert und überprüft.

Die wöchentlichen Laborübungen beginnen im September 2014. Mit allen Rechnern werden die Studenten Messungen in CAMEO durchführen. Mit der Hilfe von Drehzahl, Drehmoment und Lambda Veränderung werden sie Messdaten bekommen. Diese werden dann in eine Excel Tabelle eingebracht. Am Ende ist das Resultat eine einfache Datenauswertung mit Excel-Kurven. Jeder Student muss eine Messung mit einem Modell durchführen, dann eine Berechnung machen. Die Messung besteht aus Veränderung von möglichen Parametern. Nach der Laborübung werden sie ein Gefühl haben, wie Motoren funktionieren können.

6. Zusammenfassung

Das virtuelle Prüfstandprojekt hat die gesetzten Ziele voll erreicht. Ich habe in den letzten Wochen des laufenden Semesters Übungen sowohl mit BSc, als auch mit MSc-Studenten durchgeführt. Diese Pilotanwendung hat gezeigt, dass die Studenten diese Werkzeuge sehr gerne benutzen, und dabei ihren praktischen Erfahrungen deutlich erweitern können. Aus diesem Test habe ich auch einige nützliche Rückmeldungen bekommen, die in den Modellen umgesetzt werden und damit steht nichts mehr im Wege den virtuellen Prüfstand ab dem Herbstsemester 2014 als festen Bestandteil der Lehre zu verwenden.

Diese Softwares sind die Grundsteine der modernen Motorentwicklung, und werden heutzutage von ausländischen Ingenieuren schon täglich benutzt. Ab jetzt können sich auch ungarischen Studenten mit diesen Entwicklungsmethoden vertraut machen.

Die Marktuntersuchung war erfolgreich, die verwendeten Softwares haben sich als hervorragend geeignet für die virtuelle Umgebung, für die Ausführung der Laborübungen inklusive eigene Messungen und Datenauswertung erwiesen. Die Hilfe von AVL List GmbH war sehr großzügig und nützlich. Die BOOST, CAMEO und fOX Teams haben die berufliche Unterstützung bis zum Ende des Projekts gewährleistet. Die Ausbildung der Studenten wird ab jetzt mit fortschrittlichen Simulationsverfahren begonnen. Sie können damit das Verhalten der unterschiedlichen Motoren schneller verstehen.

Die Dauerlizenzen von CAMEO 2013 und BOOST 2013 wurden aktiviert, die 10 Rechner des Computerraums am Lehrstuhl für Verbrennungsmotoren wurden für Benutzung der Studenten bereitgestellt.

Die Modellbildung war auch erfolgreich. Mit den CAMEO kompatiblen Simulink-Modellen können Studenten ausprobieren, wie eine Messung auf dem Prüfstand aussieht, wie eine Prüfstandsoftware funktioniert, und wie Motoren sich auf dem Prüfstand verhalten. Mit den BOOST kompatiblen Simulink Modellen können sie verschiedene Parameter der Motoren verändern, und das Ergebnis der komplexen Parameterveränderung untersuchen.

Die Verbindung der Softwares funktioniert fehlerlos, die aufgebauten Modelle haben bewiesen, dass sie für den virtuellen Prüfstand vollständig geeignet sind. Die Funktionen, die Messmöglichkeiten, die Auswertungsmöglichkeiten zeigen, dass solche virtuellen Laborübungen die praxisorientierte Überarbeitung der Unterrichtsmethoden sehr effizient unterstützen.

7. Ausblick, Möglichkeiten für Weiterentwicklung

Das Projekt war erfolgreich, Studenten hatten die Möglichkeit, Messungen in einer virtuellen Umgebung durchzuführen. Die Gefahr der Zerstörung des teuren Prüfstandes existiert mit diesem Verfahren nicht mehr. Ab September 2014 beginnen die Laborübungen mit den angefertigten Modellen, aber mehrere Möglichkeiten stehen noch für die Weiterentwicklung des virtuellen Prüfstandes zur Verfügung.

Drei Weiterentwicklungen können in der Zukunft realisiert werden: Die erste Möglichkeit ist die Erweiterung von BOOST Verwendung. Studenten benutzen schon die Software für einfache Modellbildungen. Mit der Verkopplung einer vielschichtigen Modellbildung und der Real-Time Simulation wäre die Vertiefung im komplexen Motorverhalten einfacher erreichbar. Mit diesem Verfahren könnten die Studenten den ganzen Prozess der modernen Simulationsverfahren begreifen.

Die zweite Möglichkeit wäre die Verwendung von BOOST RT 2014 Software, die Real-Time Version von BOOST. Sie haben dann eine Direktverbindung mit Matlab. Darüber hinaus werden sie mit Hardware-In-The-Loop Systemen verbunden.

Die dritte Möglichkeit ist die Verwendung von CAMEO. Für den virtuellen Prüfstand wurde CAMEO nur teilweise benutzt. Die Software hat eine breite Palette von Möglichkeiten, die später verwendet werden können. Die Zusammenstellung eines Testlaufs und die Offline-Datenauswertung sind auch realisierbar.

Mit diesen Methoden wird die Begreiflichkeit der heutigen Tendenzen (Funktion und Aufbau der Steuergeräte, Modell-In-The-Loop, Software-In-The-Loop Prozess-In-The-Loop Hardware-In-The-Loop) wesentlich erleichtert.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: CAMEO Online [2.]	9
Abbildung 2: CAMEO Online	10
Abbildung 3: CAMEO Online und Offline	10
Abbildung 4: Betrieb von CAMEO während einer Prüfstandmessung [2.]	11
Abbildung 5: Das V-Modell	14
Abbildung 6: Kennfelder in einem MAT-File	15
Abbildung 7: Kennfelder in einem MAT-File	16
Abbildung 8: Quelle der Messdaten	17
Abbildung 9: Der Design Space	17
Abbildung 10: Hauptelemente der Simulink-Modelle	18
Abbildung 11: Blockdiagramm des ersten Modells in Testphase	19
Abbildung 12: Blockdiagramm des ersten Modells	20
Abbildung 13: Blockdiagramm des Subsystems namens Verspätung	20
Abbildung 14: Subsystem namens Verspätung im Betrieb	21
Abbildung 15: Blockdiagramm des Subsystems namens Vibration	22
Abbildung 16: Blockdiagramm des Subsystems namens Verbrauchsveränderung ...	22
Abbildung 17: Muscheldiagramm des spezifischen Verbrauchs	23
Abbildung 18: Dreidimensional Muscheldiagramm des spezifischen Verbrauchs	23
Abbildung 19: Blockdiagramm des Subsystems namens Lambda Veränderung	24
Abbildung 20: Unterschiede im Aufbau der Subsysteme	24
Abbildung 21: Zweidimensionale Illustration der NO _x Emission	25
Abbildung 22: Dreidimensionale Illustration der NO _x Emission	25
Abbildung 23: Zweidimensionale Illustration der HC Emission	26
Abbildung 24: Dreidimensionale Illustration der HC Emission	26
Abbildung 25: Zweidimensionale Illustration der CO Emission	27
Abbildung 26: Dreidimensionale Illustration der CO Emission	27
Abbildung 27: Blockdiagramm des zweiten Modells	28
Abbildung 28: Teil des zweiten Modells im Testbetrieb	29

Abbildung 29: Blockdiagramm des Subsystems namens Verbrauchsveränderung...	30
Abbildung 30: Dreidimensional Muscheldiagramm des spezifischen Verbrauchs	31
Abbildung 31: Dreidimensionale Illustration der NO _x Emission	31
Abbildung 32: Dreidimensionale Illustration der HC Emission.....	32
Abbildung 33: Dreidimensionale Illustration der CO Emission.....	33
Abbildung 34: Blockdiagramm des Subsystems namens Verbrauchsveränderung...	33
Abbildung 35: Kurve des spezifischen Verbrauchs	34
Abbildung 36: Kurve des effektiven Drehmoments.....	34
Abbildung 37: Kurve der NO _x Emission.....	35
Abbildung 38: Kurve der HC Emission	35
Abbildung 39: Kurve der CO Emission	36
Abbildung 40: Die Verbrauch-Drehmoment Kurve	36
Abbildung 41: Teilabschnitt des dritten Modells	37
Abbildung 42: Dreidimensional Muscheldiagramm des spezifischen Verbrauchs	37
Abbildung 43: Dreidimensionale Illustration der Opazität	38
Abbildung 44: Dreidimensionale Illustration der NO _x Emission	38
Abbildung 45: Dreidimensionale Illustration der HC Emission.....	39
Abbildung 46: Dreidimensionale Illustration der CO Emission.....	39
Abbildung 47: Die verstellbare CAMEO-Messung des ersten Modells.....	40
Abbildung 48: Die automatische CAMEO-Messung des ersten Modells	41
Abbildung 49: Validation des ersten Modells.....	41
Abbildung 50: Die verstellbare CAMEO-Messung des zweiten Modells.....	42
Abbildung 51: Eingestellte Parameter der verstellbaren CAMEO-Messung.....	42
Abbildung 52: Validation der CAMEO-Messung (Modell 2, Messverfahren 1)	43
Abbildung 53: Validation der CAMEO-Messung (Modell 2, Messverfahren 2)	43
Abbildung 54: Die verstellbare CAMEO-Messung des dritten Modells.....	44
Abbildung 55: Validation des dritten Modells.....	44
Abbildung 56: Aktuatoren bei einem Modell	46
Abbildung 57: Sensoren bei einem Modell	46
Abbildung 58: Erstellung eines BST-Files	47
Abbildung 59: Hauptelemente der BOOST Modelle	48

Abbildung 60: Das erste Motormodell	49
Abbildung 61: Das zweite Motormodell	50
Abbildung 62: Das dritte Motormodell	51
Abbildung 63: Das vierte Motormodell.....	53
Abbildung 64: Das fünfte Motormodell	54
Abbildung 65: Das sechste Motormodell	55
Abbildung 66: Das siebte Motormodell.....	56
Abbildung 67: Das achte Motormodell.....	57
Abbildung 68: Das neunte Motormodell	58
Abbildung 69: Das zehnte Motormodell.....	59
Abbildung 70: Das elfte Motormodell.....	60
Abbildung 71: BST-Files der Motormodelle	61
Abbildung 72: Der AVL BOOST Block in Simulink	62
Abbildung 73: Das Simulink-Hauptmodell	63
Abbildung 74: Das Simulink-Submodell	64
Abbildung 75: Eine Ventilhub Kurve in BOOST (oben) und in Simulink (unten)	65
Abbildung 76: Verschiebung Submodell.....	65
Abbildung 77: Submodell für Lambda Kontrolle	66
Abbildung 78: Resonator Submodell	67
Abbildung 79: Script von AVL BOOST	68
Abbildung 80: Oberfläche der Simulation in Matlab.....	69
Abbildung 81: Validationsergebnisse in BOOST	70
Abbildung 82: Validationsergebnisse in Matlab	71
Abbildung 83: Unterschied zwischen Ausbildungsmethoden	72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Werte des spezifischen Verbrauchs (Modell 1)	22
Tabelle 2: Werte der NO _x Emission (Modell 1)	25
Tabelle 3: Werte der HC Emission (Modell 1)	26
Tabelle 4: Werte der CO Emission (Modell 1)	27
Tabelle 5: Werte des spezifischen Verbrauchs (Modell 2, Messverfahren 1)	30
Tabelle 6: Werte der NO _x Emission (Modell 2, Messverfahren 1)	31
Tabelle 7: Werte der HC Emission (Modell 2, Messverfahren 1)	32
Tabelle 8: Werte der CO Emission (Modell 2, Messverfahren 1)	32
Tabelle 9: Werte des spezifischen Verbrauchs (Modell 2, Messverfahren 2)	34
Tabelle 10: Werte des Drehmoments (Modell 2, Messverfahren 2)	34
Tabelle 11: Werte der NO _x Emission (Modell 2, Messverfahren 2)	35
Tabelle 12: Werte der HC Emission (Modell 2, Messverfahren 2)	35
Tabelle 13: Werte der CO Emission (Modell 2, Messverfahren 2)	36
Tabelle 14: Werte der Verbrauch-Drehmoment Kurve (Modell 2, Messverfahren 2)	36
Tabelle 15: Werte des spezifischen Verbrauchs (Modell 3)	37
Tabelle 16: Werte der Opazität (links) und der NO _x Emission (rechts) (Modell 3)	38
Tabelle 17: Werte der HC (links) und der NO _x Emission (rechts) (Modell 3)	39

Literaturverzeichnis

- [1.] Agócs, T. – Szabó, Zs.: Korszerű szimulációs módszerek, virtuális fékpad- és motormodellek a költséghatékony felsőoktatásért,
TDK Dissertation, Széchenyi István Universitát, Győr, 2014
- [2.] AVL List GmbH: Basics & Beyond the Basics AVL CAMEO 2013,
AVL List GmbH, Graz, 2013
- [3.] AVL List GmbH: BOOST Dokumentation,
AVL List GmbH, Graz, 2013
- [4.] AVL List GmbH: Lehrmaterial der CAMEO Schulung,
AVL List GmbH, Graz, 2013
- [5.] Basshuysen, R. van: Ottomotoren mit Direkteinspritzung 2. Auflage,
Vieweg+Teubner GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2008,
Kapitel 3: Gemischbildung und Verbrennungsverfahren
- [6.] Dipl. –Math. Beine, M.: The Successes and Challenges of Autocoding,
ATElektronik Vol. 02 2008, pp. 38-42.
- [7.] Bosch Műszaki útmutató füzetek: Motorelektronika,
Maróti Herausgeber
- [8.] Bosch Műszaki útmutató füzetek: Otto-motorok kipufogógáz technikája,
Maróti Herausgeber
- [9.] Dobes, T. – Kokalj, G. – Rotschädl, R. – Lick, P.: Trendsetting Management of
Control Unit Data, ATElektronik Vol. 03 2007, pp. 24-26.
- [10.] Heywood, J. B.: Internal Combustion Engine Fundamentals,
McGraw –Hill, Inc, 1988,
Kapitel 2: Engine Design and Operating Parameters
Kapitel 11: Pollutant Formation and Control
Kapitel 15: Engine Operating Characteristics
- [11.] Kalmár I. – Dr. Stukovszky, Zs.: Belsőégésű motorok folyamatai,
Műegyetemi Herausgeber, Budapest, 1998

- [12.] Dr. Klauda, M. – Dr. Lauff, U.: Function and Software Development for ECUs, ATZelektronik Vol. 06 2008, pp. 10-15.
- [13.] Dr. Lakatos, I. - Dr. Nagyszakolyai I.: Elektronikus dízel szabályozás, Novadat Bt, Győr, 1996
- [14.] Markus, E. – Randoll, H. – Knauer, M.: Development and Future Challenges to Engine Control, ATZelektronik Vol. 01 2006, pp. 2-5.
- [15.] Dr. Mauss, J. – Simons, M.: Chip simulation of automotive ECUs on PC, ATZelektronik Vol. 06 2012, pp. 44-48.
- [16.] Mollenhauer, K.: Handbuch Dieselmotoren, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1997
Kapitel 5.2: Elektronische Regelung der Dieseleinspritzung
- [17.] Pischinger, R. – Klell, M. – Sams, T.: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschinen 3. Auflage, Springer-Verlag, Wien, 2009
- [18.] Reif, K.: Bosch Autoelektrik und Autoelektronik 6. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2011
- [19.] Vogels, M. S. – Heindl, A. – Krenn, M. – Leithgöb, R. – Heppner, B.: High Performance ECU Calibration Using Realtime ECU Interface, ATZelektronik Vol. 02 2008, pp. 32-37.
- [20.] Wiley-ISTE: Formal Methods: Industrial Use from Model to the Code, ISTE Ltd, London, 2012