



Benjamin Nowak, B.Sc.

Einfluss der Schaltstrategie im RDE – Trade-off Fahrbarkeit zu Emission

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Dipl.-Ing Claus Matzer

Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Dipl.-Ing Christian Jung

AVL List GmbH

Beurteiler

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger

Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Graz, im Mai 2020

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

KURZFASSUNG

Titel: Einfluss der Schaltstrategie im RDE – Trade-off Fahrbarkeit zu Emission

Autor: Benjamin Nowak, B.Sc.

1. Stichwort: Simulation
2. Stichwort: Fahrstrategie
3. Stichwort: Gangauswahl

Durch die immer strenger werdenden Zertifizierungsverfahren - vorgegeben durch Euro 6 und Co. - sehen sich namhafte Automobilhersteller bei der gegenläufigen Abhängigkeit von Fahrbarkeit und Emission gezwungen, die Priorität auf die Reduktion des Kraftstoffverbrauches und zusätzlicher Emissionen zu legen. Diese Priorisierung betrifft hauptsächlich die Applikation von Automatikgetriebe und Motor. Sie beeinflusst die Applikation des Fahrzeuges dahingehend, dass der Betriebsbereich des Motors bei sehr niedrigen Drehzahlen und daher niedriger Drehmomentreserve liegt. In Abhängigkeit des Antriebsstrangpotenzials führt dies zu Einbußen hinsichtlich Fahrbarkeit (Fahrspaß), wodurch der Hersteller das markentypische Fahrverhalten und damit sein Alleinstellungsmerkmal verliert.

Bis zu diesem Zeitpunkt gab es noch keine zugänglichen Publikationen, inwiefern sich die Applikation des Getriebes auf die gegenläufige Abhängigkeit von Fahrbarkeit und Emission auswirkt. Ziel dieser Diplomarbeit ist es den Unterschied einer Schaltstrategie mit erhöhter Fahrbarkeit (mit z.B. Drehmomentreserve, Hochschaltverhinderungen in Kurven etc.) von einer vermeintlich ökonomischeren Strategie (Deaktivierung von Fahrbarkeitsfunktionen) aufzuzeigen, bei der allerdings jeglicher Fahrspaß verloren gehen kann. Hauptaugenmerk wird auf die im tatsächlichen Fahrbetrieb entstehenden Emissionen gelegt, wodurch der RDE-Zyklus herangezogen wird. Aufgrund der sich stetig verkürzenden Entwicklungszeiten von Fahrzeugen und infolgedessen dem zunehmenden Einsatz von Simulationen wird in dieser Diplomarbeit ein komplettes Fahrzeug mit Fahrer, sowie Strecke simuliert. Dabei werden für den jeweils gleichen Streckenabschnitt die in der Getriebesoftware implementierten Fahrbarkeitsfunktionen einbeziehungsweise ausgeschaltet und deren Einfluss untersucht. Diese zeigen, dass mit einer optimierten Applikation des Getriebes eine Senkung der Schadstoffemissionen trotz erhöhter Fahrbarkeit erreicht werden kann.

ABSTRACT

Title: Influence of the shift strategy in an RDE-cycle – Trade-off between drivability and emission

Author: Benjamin Nowak, B.Sc.

1st keyword: Simulation

2nd keyword: Driving Strategy

3rd keyword: Gear Selection

Due to continuously changing emission standards and new testing procedures, car manufacturers are enforced to push the development into the direction of vehicle-emission reduction, and therefore focus is given on the engine. Consequently, the contrary drivability of the vehicle is given lower priority as the calibration of the automatic transmission must cope with the predetermined operating points of the engine. These operating points are usually at lower engine speeds and higher engine torque. As less acceleration reserve is available at lower engine speeds, this can lead to a decreasing drivability and thus driving pleasure.

Until this point of time there has hardly been done research on how the calibration of the transmission influences the vehicles emissions. The topic and aim of this thesis are to investigate and compare two different shift strategies. One strategy has a higher drivability due to, for example, increasing acceleration potential or the prevention of upshifts in curves. The other one has a supposedly more economic strategy without the usage of drivability functions. Focus is on exhaust emissions resulting during vehicle operation. As the number of simulation-based development rises, the analysis in this thesis is also done in a virtual environment, including an entire vehicle, a driver and a road profile. The simulation results show that it is possible to achieve both, a better driving pleasure and less emissions, with an optimized calibration of the shift strategy.

VORWORT UND DANKSAGUNG

Diese Diplomarbeit wurde von der Firma AVL List GmbH ausgeschrieben und in der Abteilung DTC (Getriebe- und Hybridkalibration) umgesetzt. Besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Christian Jung für die Möglichkeit diese Diplomarbeit durchzuführen, und für seine kompetente und fachliche Unterstützung. Außerdem danke ich meinem geschätzten Kollegen Herrn Matthias Weinzerl für die vorherigen Leistungen, ohne welche diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Weiters möchte ich mich besonders bei der Abteilung DEM (Modellierung und Komponentenidentifikation) für ihre außerordentliche Unterstützung bedanken. Ich danke zudem allen Kolleginnen und Kollegen der AVL, welche mir zur erfolgreichen Durchführung der Arbeit mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben.

Seitens der Technischen Universität Graz möchte ich recht herzlich Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger als auch Herrn Dipl.-Ing Claus Matzer meinen Dank aussprechen.

Überdies bedanke ich mich bei meinen Freunden und Studienkollegen, welche die Studienzeit zu eine der wertvollsten Erfahrungen meines Lebens gemacht haben.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, welche mir in allen Aspekten meines Lebens Rückhalt geben, und mir somit diese Ausbildung ermöglicht haben.

Danke an alle!

Graz, 10.05.2020

Benjamin Nowak

ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN

a	Beschleunigung
ABS	Antiblockiersystem
AT	Automatic Transmission (Automatikgetriebe)
AVL	AVL List GmbH
BSFC	Brake Specific Fuel Consumption (spezifischer Kraftstoffverbrauch)
CF	Conformity Factor (Übereinstimmungsfaktor)
CMC	Common Model Compiler
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Co-Simulation	Cooperative Simulation
CRETA	AVL CRETA™ - Calibration Data Lifecycle Management System
CVT	Continuously Variable Transmission (Stufenloses Getriebe)
DCT	Dual Clutch Transmission (Doppelkupplungsgetriebe)
DEM	Modeling Component Identification
DPF	Diesel Partikel-Filter
DS	Downshift (Rückschaltung)
DTC	Passenger Car Transmission and Hybrid Calibration
EAS	Exhaust Aftertreatment System (Abgasnachbehandlungssystem)
ECU	Electronic Control Unit (elektronisches Steuergerät)
EGR	Exhaust Gas Recirculation (Abgasrückführung)
EO	Engine Out (Motorauslass)
ETB	Engine Test Bed
FMI	Functional Mockup Interface
FMU	Functional Mockup Unit
F _{Res}	Resultierende Kraft
F _W	Widerstandskraft
FWD	Front Wheel Drive (Vorderradantrieb)
F _Z	Zugkraft
GPS	Global Positioning System
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
HC	Hydrocarbons (Unverbrannte Kohlenwasserstoffe)
HiL	Hardware in the Loop
ICOS	Independent Cooperative Simulation
INCA	Integrated Calibration and Application Tool

m	Masse
M	Drehmoment
MOBEO	AVL MOBEO™ - Model Based Engine Optimization
Model.CONNECT	AVL Model.CONNECT™ - Model Integration and Co-simulation Platform
MT	Manual Transmission (Schaltgetriebe)
n	Drehzahl
NEDC	New European Driving Cycle
NO _x	Stickoxid
O ₂	Sauerstoff
OBD	On-Board Diagnose
PEMS	Portable Emission Measuring System
P _{gB}	Leistungsbedarf für gleiche Beschleunigung
PI	Proportional-Integral
P _{kG}	Leistungsbedarf für konstante Geschwindigkeit
PM	Particulate Matter (Feinstaub)
P _{max}	maximale Antriebsleistung
P _{mr}	Leistungsgewicht des Fahrzeuges
PN	Partikelanzahl
PP	Pedalposition
RDE	Real Driving Emissions
RWD	Rear Wheel Drive (Heckantrieb)
SCR	Selective Catalytic Reduction (selektive katalytische Reduktion)
SiL	Software in the Loop
SO ₂	Schwefeldioxid
SOP	Start of Production
SPA	AVL SPA™ - Driveability Calibration and Visualization Tool
SUV	Sport Utility Vehicle
TCU	Transmission Control Unit (Getriebesteuergerät)
THC	Total Hydrocarbon Content (Kohlenwasserstoffgehalt)
TP	Tailpipe (Ausgang Abgasanlage)
US	Upshift (Hochschaltung)
v	Geschwindigkeit
VSM	AVL VSM™ - Vehicle Simulation Modeling Tool
VTB	Virtual Test Bed
WLTC	Worldwide harmonized Light Vehicles Test Cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light Vehicles Test Procedures
ΔM	Drehmomentreserve

INHALTSVERZEICHNIS

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG.....	II
KURZFASSUNG.....	III
ABSTRACT.....	IV
VORWORT UND DANKSAGUNG	V
ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN	VI
INHALTSVERZEICHNIS	VIII
1 EINLEITUNG.....	1
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....	2
2.1 VERBRENNUNGSPRODUKTE UND SCHADSTOFFE EINES VERBRENNUNGSMOTORS.....	2
2.2 ABGASGESETZGEBUNG UND GRENZWERTE.....	4
a) <i>Worldwide harmonized Light Vehicles Test Procedure - WLTP</i>	5
b) <i>Real Driving Emissions Test - RDE</i>	6
2.3 CO-SIMULATION.....	9
2.4 SCHALTSTRATEGIE.....	11
a) <i>Grundlagen</i>	11
b) <i>Zugkraftdiagramm</i>	11
c) <i>Schaltkennfeld</i>	14
d) <i>Struktur und Aufbau</i>	17
e) <i>Signalverarbeitung</i>	17
f) <i>Fahrsituationserkennung (Fahrbarkeitsfunktionen & Modes)</i>	19
g) <i>Gangauswahl</i>	24
2.5 APPLIKATION.....	25
a) <i>Anforderungen</i>	25
b) <i>Applikationsprozess</i>	26
3 SIMULATIONSUMGEBUNG UND EINGANGSDATEN	27
3.1 VEHICLE SIMULATION MODEL – VSM	27
a) <i>Fahrzeug-Setup</i>	30
b) <i>Teststrecken-Setup</i>	33
c) <i>Fahrer-Setup</i>	34
d) <i>Ein- und Ausgangsgrößen</i>	35

Inhaltsverzeichnis

3.2	MOTOR-/ABGASMODELL	36
a)	<i>Gesamtmodell</i>	37
b)	<i>Teilmodelle</i>	39
c)	<i>Ein- und Ausgangsgrößen</i>	42
d)	<i>Kennfelderzeugung und Berechnungen</i>	42
3.3	SCHALTSTRATEGIESOFTWARE.....	45
a)	<i>Gesamtmodell (Simulink Modell)</i>	45
b)	<i>Datenstands Anpassung</i>	48
c)	<i>Ein- und Ausgangsgrößen</i>	55
3.4	MODEL.CONNECT	56
a)	<i>Aufbau</i>	56
b)	<i>Kopplungsmechanismus</i>	57
c)	<i>Verbindung der Ein -und Ausgangsgrößen</i>	59
d)	<i>Berechnungen zur Ergebnisanalyse</i>	60
4	SZENARIEN UND ERGEBNISANALYSE	61
4.1	SZENARIO 1 MIT DEAKTIVIERTEN FAHRBARKEITSFUNKTIONEN.....	62
a)	<i>Übersicht Szenario 1</i>	62
b)	<i>Bewertung der Fahrbarkeit Szenario 1</i>	63
4.2	SZENARIO 2 MIT ALLEN FAHRBARKEITSFUNKTIONEN	66
a)	<i>Übersicht Szenario 2</i>	66
b)	<i>Bewertung der Fahrbarkeit Szenario 2</i>	67
4.3	ANALYSE DER ERGEBNISSE	68
a)	<i>Gegenüberstellung der Szenarien</i>	68
b)	<i>Emissionsvergleich</i>	77
c)	<i>Schlussfolgerungen</i>	79
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	81
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	X
	TABELLENVERZEICHNIS	XII
	FORMELVERZEICHNIS.....	XII
	LITERATURVERZEICHNIS	XIII

1 EINLEITUNG

Durch die seit September 2018 gültige Abgasnorm 6d-TEMP müssen Automobilhersteller an allen neu zugelassenen Fahrzeugen neben den Prüfstandstests WLTP (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure), auch Straßenmessungen, sogenannte RDE-Messungen (Real Driving Emissions), am Gesamtfahrzeug durchführen. Seit Januar 2020 gilt zusätzlich die strengere Abgasnorm 6d für neue Typzulassungen. Im WLTP-Zyklus werden der Kraftstoffverbrauch und die Emissionen mitgemessen. Der RDE-Zyklus soll als Ergänzung dienen, um die Einhaltung der Schadstoffgrenzwerte im realen Betrieb sicherzustellen. In diesen Messungen müssen RDE-Übereinstimmungsfaktoren (CF Conformity Factor) für Stickoxidemissionen (NO_x) und die Partikelanzahl nachgewiesen werden. [1] Um diese sich zunehmend verschärfenden Grenzwerte einzuhalten, bedarf es einer aufwendigen Abstimmung aller Fahrzeugkomponenten. Da der Motor die Schadstoffemissionen verursacht, werden von der Motorapplikation Drehzahl und Drehmomentvorgaben erstellt, an die sich die Getriebeapplikation halten muss. Infolgedessen verliert die Fahrbarkeit des Fahrzeuges zunehmend an Bedeutung. Diese Herausforderung führt oft dazu, dass die in der Getriebe-Software hinterlegten Funktionen – welche zur Verbesserung der Fahrbarkeit beitragen sollen – zumeist deaktiviert, oder nur sehr vorsichtig appliziert, werden. Inwiefern diese Deaktivierungen tatsächlich die Schadstoffemissionen beeinflussen ist nahezu unbekannt. Aufgrund der sich stetig verkürzenden Entwicklungszeiten von Fahrzeugen und infolgedessen dem zunehmenden Einsatz von Simulationen wird in dieser Diplomarbeit ein komplettes Fahrzeug mit Fahrer, sowie Strecke simuliert.

Zu Beginn dieser Arbeit wird auf die Verbrennungsprodukte und Schadstoffe eines Verbrennungsmotors eingegangen. Als Nächstes wird eine kurze Übersicht über die zwei oben genannten Fahrzeugzertifizierungstests (WLTP und RDE) gegeben. Anschließend wird der grundsätzliche Aufbau einer Co-Simulation erklärt und besonders auf die Aufgaben einer Schaltstrategie eingegangen. Zudem wird demonstriert, welche Anforderungen an eine Getriebeapplikation gestellt werden und wie die Applikation abläuft. Im Anschluss wird auf jeden Teilbereich der Simulationsumgebung genauer eingegangen. Nach der Ergebnisanalyse werden zuletzt die Auswirkungen der zwei Szenarien, mit und ohne aktivierten Fahrbarkeitsfunktionen, abgeleitet.

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Folgende Abschnitte geben einen Einblick in die Produkte, sowie Schadstoffe bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen. Danach wird auf die aktuelle Abgasnorm (Euro-Norm) und zugehörigen Prüfverfahren eingegangen. Danach wird beschrieben, weshalb die Verwendung einer Co-Simulation sinnvoll ist, sowie der Aufbau einer Ge-triebesoftware und dessen prinzipiellen Schaltstrategiefunktionen erklärt.

2.1 Verbrennungsprodukte und Schadstoffe eines Verbrennungs- motors

In herkömmlichen Verbrennungsmotoren werden Diesel- oder Benzinkraftstoffe eingesetzt. Diese bestehen aus vielen verschiedenen Kohlenwasserstoffverbindungen, welche bei der „vollständigen“ Verbrennung durch chemische Reaktion mit Sauerstoff (O_2) Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) bilden. In der Realität läuft diese Oxidation mit Sauerstoff über Zwischenprodukte bzw. Zwischenreaktionen ab, wodurch es zu unvollständigen Verbrennungen kommt und die Abgaszusammensetzung beeinflusst wird.

Die wichtigsten Verbrennungsprodukte sind:

- Wasser (H_2O)
- Wasserstoff (H_2)
- Kohlendioxid (CO_2)
- Kohlenmonoxid (CO)
- Unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC)
- Stickoxide (NO und NO_2 - kurz NO_x)
- Partikel einschließlich Ruß (PM)
- Aldehyde, Bleiverbindungen und Schwefeldioxid (SO_2)

Abbildung 2-1 zeigt anteilig die Abgasprodukte eines Dieselmotors.

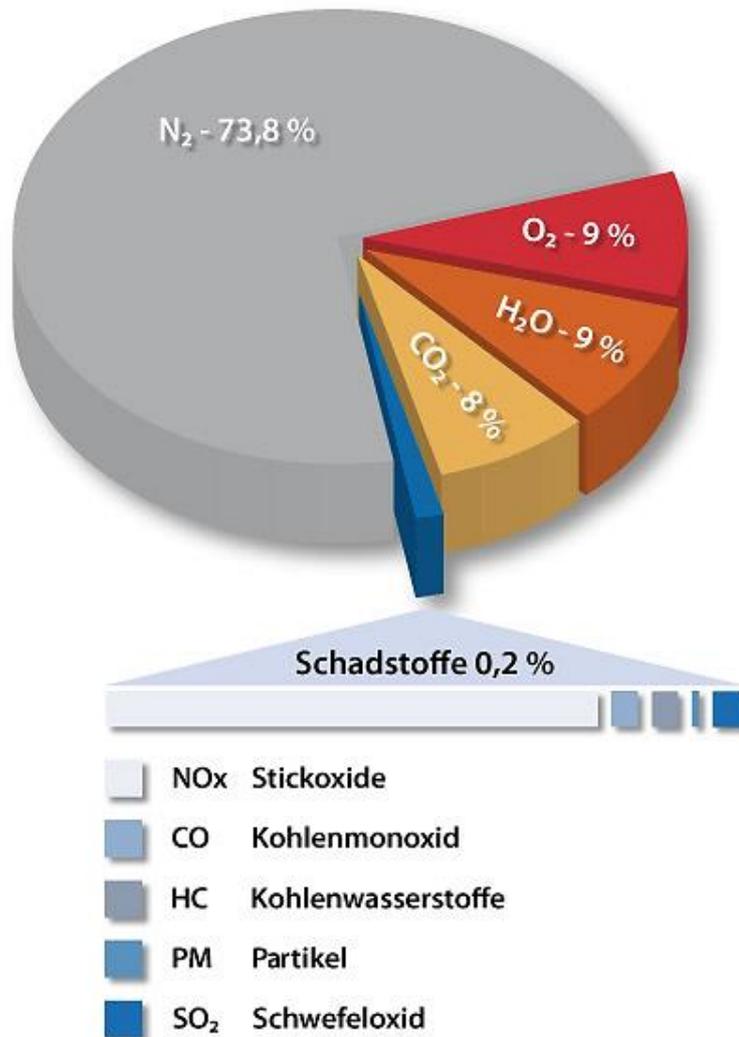


Abbildung 2-1: Abgaszusammensetzung eines Dieselmotors [2]

Diese Verbrennungsprodukte sind teilweise sehr schädlich für Mensch und Umwelt. Während Kohlendioxid hauptsächlich für den Treibhauseffekt und einhergehende Klimaerwärmung verantwortlich ist, führen Stickoxide oder Partikel unter anderem zu Schleimhautreizungen sowie Krebserkrankungen. Aus diesem Grund wurden Schadstoffgrenzwerte in Abgasgesetzgebungen festgelegt. [3]

2.2 Abgasgesetzgebung und Grenzwerte

In der EU werden die Grenzwerte der Verbrennungsprodukte bei der Typprüfung von Fahrzeugen gemessen. Die derzeit gültige Norm ist „Euro 6“, wobei es hier 9 Unternormen gibt. Die für diese Arbeit interessanten Normen sind Euro 6d-Temp sowie Euro 6d. Das TEMP steht dabei für „temporär“. Ab Januar 2021 gilt nur noch die Abgasnorm 6d für neuzugelassene Fahrzeuge.

In diesen ist festgelegt, dass Neuwagen den WLTC-Zyklus sowie den RDE-Zyklus bestehen müssen. Bei der Norm Euro 6d-TEMP beträgt der CF-Faktor für Stickoxide 2,1, während bei der strengeren Euro 6d der Faktor bei 1,43 liegt. Für die Partikelanzahl beträgt der Konformitätsfaktor jeweils 1,5. Wenn demnach ein Dieselfahrzeug am Prüfstand 6×10^{11} Partikel pro Kilometer ausstoßen darf, beträgt der Grenzwert während des RDE-Tests 9×10^{11} Partikel pro Kilometer. Diese Aufschläge schließen die Messtoleranzen von heutigen portablen Messgeräten mit ein. Weitere Grenzwerte werden in folgender Tabelle veranschaulicht. [1]

Tabelle 2-1: Grenzwerte für Euro 6d-TEMP und 6d für Dieselfahrzeuge im WLTP [4]

Schadstoffe	Euro 6d-TEMP	Euro 6d
CF für NO_x	2,1	1,43
CF für PM	1,5	1,5
CO [mg/km]	500	500
NO_x [mg/km] (im RDE)	80 (168)	80 (114,4)
HC+ NO_x [mg/km]	170	170
PN [1/km] (im RDE)	6×10^{11} (9×10^{11})	6×10^{11} (9×10^{11})

Der CO_2 -Ausstoß wird seit 2008/09 durch die Europäische Kommission und das Europäische Parlament geregelt. Seit 2020 darf der durchschnittliche CO_2 -Ausstoß einer Neuwagenflotte nur mehr 95g/km für Personenkraftwagen betragen und ist somit der Niedrigste weltweit. Da der Verbrauch in direktem Zusammenhang mit dem CO_2 -Ausstoß steht, fördert diese drastische Emissionssenkung auch die Kosten für Mobilität. Der Grenzwert gilt hierbei nicht für einzelne Hersteller, sondern für den europäischen Gesamtflottenwert. Für die Fahrzeughersteller wird der Grenzwert anhand des durchschnittlichen Fahrzeuggewichtes berechnet. Dabei werden für alternative Antriebe, welche besonders sparsam sind, sogenannte Super-Credits ausgestellt, wodurch diese Fahrzeuge mehrfach angerechnet werden. Wenn diese Grenzwerte nicht eingehalten werden, sind Strafzahlungen fällig. [5]

a) Worldwide harmonized Light Vehicles Test Procedure - WLTP

Die Testprozedur WLTP basiert auf realen Fahrdaten, welche weltweit ermittelt wurden. Der Testzyklus WLTC setzt sich aus vier Phasen zusammen. Dieser deckt unterschiedliche dynamische Fahrsituationen von Stadt- bis hin zu Autobahnfahrt ab, wodurch realistische Ergebnisse der Verbrauchs- und Emissionsmessungen erreicht werden sollen.

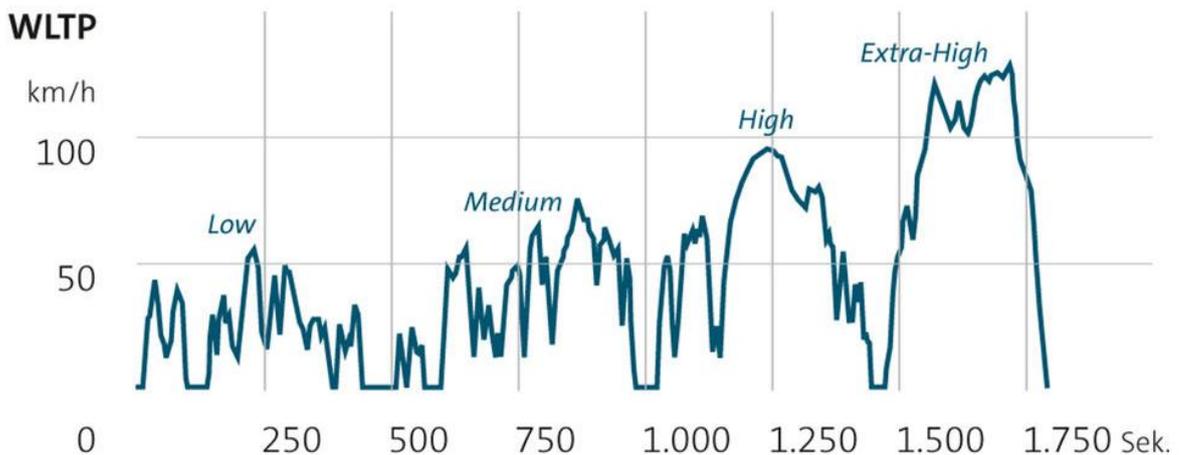


Abbildung 2-2: Fahrzeuggeschwindigkeit (km/h) in Abhängigkeit der Zeit (τ) beim WLTP Klasse 3 bestehend aus den vier Phasen [6]

Durchgeführt wird der WLTP in einem zertifizierten Testlabor am Rollenprüfstand unter genau vorgegebenen Prüfbedingungen. Dadurch ist es nicht nur möglich reproduzierbare Messungen zu erhalten, sondern diese auch mit anderen Fahrzeugen verschiedener Hersteller zu vergleichen.

Der WLTP wird in drei Klassen unterteilt, die sich aus dem Leistungsgewicht des Fahrzeuges P_{mr} (Motorleistung/Leergewicht in W/kg) ergeben. Zusätzlich zu den erhältlichen Motor-Getriebe-Kombinationen werden auch fahrzeugspezifische Konfigurationen wie Reifen, Sonderausstattungen oder Aerodynamik berücksichtigt; alle Nebenverbraucher, wie Klimaanlage oder Sitzheizung, bleiben allerdings ausgeschaltet. [7]

Ein Überblick über den WLTP-Zyklus wird in Tabelle 2-2 gegeben.

Tabelle 2-2: WLTP im Überblick [7]

<i>WLTP</i>	
<i>Fahrzeugklassen</i>	Klasse 1: Fahrzeuge mit $P_{mr} \leq 22W/kg$ Klasse 2: Fahrzeuge mit $22 < P_{mr} \leq 34W/kg$ Klasse 3: Fahrzeuge mit $P_{mr} > 34W/kg$
<i>Starttemperatur</i>	$23^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$; Kaltstart
<i>Zykluslänge</i>	23,25km
<i>Zyklusdauer</i>	1800s
<i>Durchschnittsgeschwindigkeit</i>	46,5km/h
<i>Höchstgeschwindigkeit</i>	131km/h
<i>Standzeitanteil</i>	13%
<i>Schaltpunkte</i>	individuell berechnet
<i>Sonderausstattungen</i>	berücksichtigt

b) Real Driving Emissions Test - RDE

Das im realen Straßenverkehr entlang einer beliebigen Strecke durchgeführte Prüfverfahren RDE ist ein Prüfzyklus, welcher den WLTP ergänzt. Dieser soll repräsentativ für den Betrieb eines Fahrzeuges unter normaler Belastung sein. Der Betriebsbereich des Motors ist im Vergleich zu Fahrzyklen am Prüfstand höher, da Einflüsse wie Straßenneigung, Fahrdynamik, Wind, aber auch Nebenverbraucher wie eine Klimaanlage umfasst werden. Dies führt zu realistischen und repräsentativen Ergebnissen. Abbildung 2-3 zeigt schematisch den unterschiedlichen Betriebsbereich des Motors eines „alten“ NEDC (New European Drive Cycle) und der neuen WLTC und RDE-Zyklen.

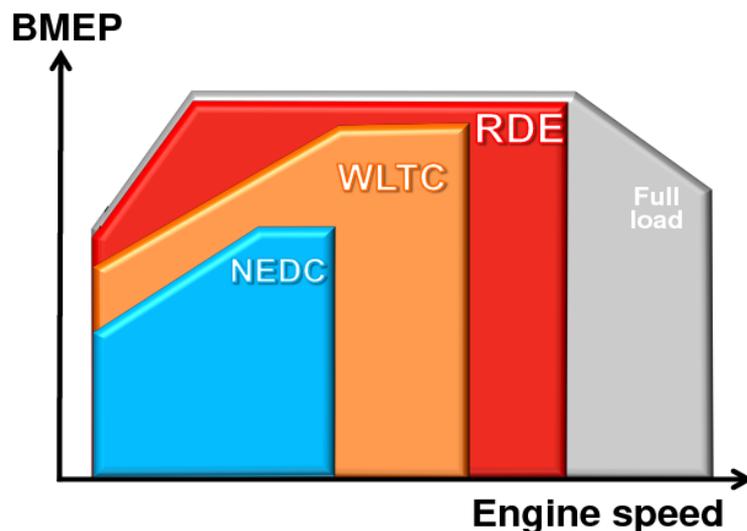


Abbildung 2-3: Vergleich von Fahrzyklen und dem Betriebsbereich eines Motors [8]

2 Theoretische Grundlagen

Dabei müssen, wie bei allen Gesetzgebungen, gewisse Kriterien eingehalten werden. Die Fahrstrecke setzt sich aus in etwa einem Drittel Stadt-, Land- und Autobahnanteil zusammen, wobei jeweils mindestens 16km gefahren werden müssen. Im Stadtanteil darf maximal eine Geschwindigkeit von 60km/h erreicht werden, im Landanteil höchstens 90km/h und auf der Autobahn mindestens 90km/h. Die Dauer der Messung muss zwischen 90 und 120 Minuten betragen. Neben einzuhaltenden Umweltbedingungen gehen zudem Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte in die Bewertung einer gültigen Messung ein. Diese können selbstverständlich aufgrund von unterschiedlichen Fahrern und deren Fahrstil, oder aufgrund unterschiedlichen Verkehrsaufkommens deutlich voneinander abweichen. Dadurch können Fahrten zwar nicht direkt miteinander verglichen werden, jedoch können die Emissionen, wie sie im alltäglichen Leben auftreten, gemessen und beurteilt werden. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über den RDE-Zyklus.

Tabelle 2-3: RDE unter gemäßigten Bedingungen im Überblick [7]

	<i>RDE</i>
<i>Prüfverfahren</i>	gilt für alle Typpenehmigungen
<i>Temperatur</i>	0-30°C, Kaltstart
<i>Zykluslänge</i>	mind. 16km pro Streckenanteil
<i>Zyklusdauer</i>	90-120 Minuten
<i>Geschwindigkeitsbereich</i> <i>Stadt; Land; Autobahn</i>	0-60km/h; 60-90km/h; 90-145km/h
<i>Höchstgeschwindigkeit</i>	160km/h
<i>Standzeitanteil Stadt</i>	6-30%
<i>Sonderausstattungen</i>	berücksichtigt

2 Theoretische Grundlagen

Die durch das Fahrzeug entstehenden Schadstoffemissionen und der Kohlendioxid-ausstoß werden mit Hilfe eines portablen Messgerätes PEMS (Portable Emission Measuring System), welches am Heck des Fahrzeuges montiert ist, mitgemessen. Die Stromversorgung erfolgt dabei üblicherweise über Lithium-Ionen-Akkus. Die Höhe, Position und Geschwindigkeit des Fahrzeuges werden durch ein GPS-Gerät aufgezeichnet. Zur Bestimmung von weiteren wichtigen Motor- und Fahrzeugparametern wird eine Verbindung zum Motorsteuergerät hergestellt.

Die Auswertung der Daten erfolgt nach einem vorgegebenen Verfahren. Die daraus resultierenden normierten Werte werden anschließend mit den Prüfstandgrenzwerten durch den CF-Faktor in Relation gestellt. [9]

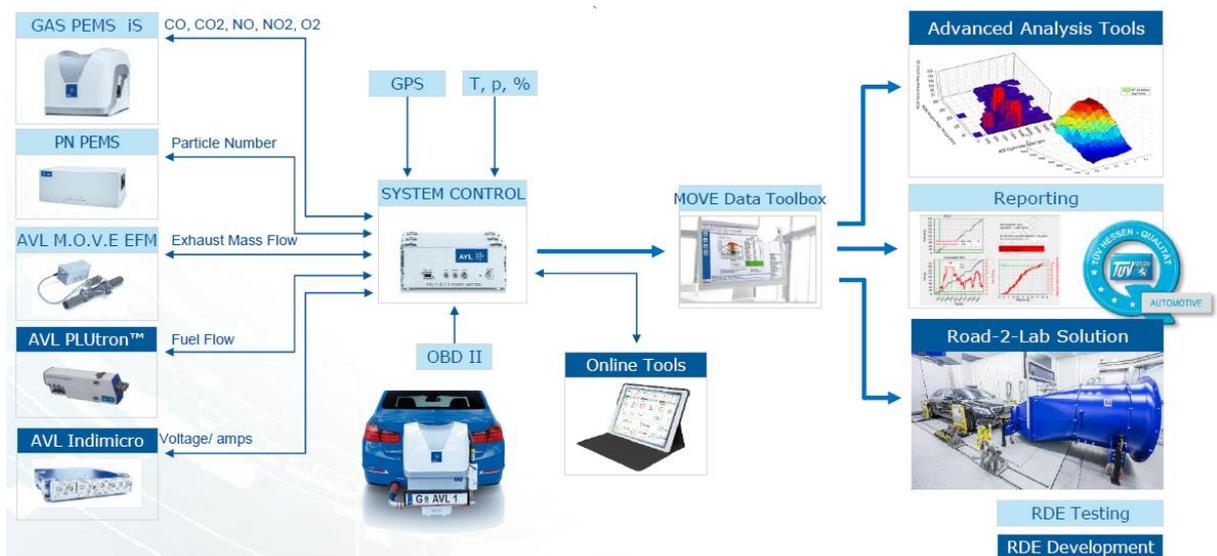


Abbildung 2-4: AVL M.O.V.E iS RDE-Messsystem [10]

2.3 Co-Simulation

Aufgrund der steigenden Komplexität von Systemen und dem gegenläufigen Sinken der Entwicklungszeit kommen heutzutage vermehrt Modell- und Simulationsprogramme zum Einsatz. Um Zeit und Kosten zu sparen, wird während des Entwicklungsprozesses der sogenannte modellbasierte Ansatz verwendet, bei dem voneinander unabhängige Subsysteme erstellt werden.

Angenommen, es soll ein Gesamtsystem, wie zum Beispiel ein Fahrzeug, modelliert werden. Dieses Fahrzeug wird üblicherweise in Subsysteme aufgeteilt, wie zum Beispiel dem Verbrennungsmotor, dem Getriebe, dem Fahrwerk. Diese Subsysteme werden anschließend Teams zugeordnet, welche sich zumeist auf diesen Teilbereich spezialisiert haben. Diese Teams müssen nicht nur firmeninterne Mitarbeiter, sondern können auch externe Dienstleister sein. Jedes Team hat üblicherweise eigene Vorgehensweisen, um die Aufgabenstellung zu lösen, und kann unabhängig von anderen Teams arbeiten. Das bedeutet allerdings auch, dass unterschiedlichste Simulationsprogramme verwendet werden, um deren Komponenten und Subsysteme zu modellieren.

Eine Co-Simulation (Cooperative Simulation) ermöglicht es nun, diese voneinander unabhängigen und selbstständig laufenden Systeme zu einem Gesamtsystem zusammenzuführen. Dabei werden die Subsysteme als Blackbox betrachtet und müssen in der Lage sein, Eingangs- und Ausgangssignale zu bekommen, beziehungsweise zu liefern. Während der Simulation tauschen diese innerhalb definierter Zeitschritte deren Daten untereinander aus und arbeiten an der Lösung des Gesamtsystems. Die Steuerung des Datenaustausches wird durch die Verwendung einer Kontrollinstanz ermöglicht. Dabei können die Solver der einzelnen Programme voneinander unabhängig arbeiten und tauschen Informationen lediglich innerhalb definierter Zeitintervalle aus. [11]

Abbildung 2-5 stellt den Zusammenhang zwischen den einzelnen Tools und der Co-Simulationsplattform dar. In dieser Arbeit wird die Co-Simulationsplattform Model.CONNECT verwendet, auf welche im Kapitel 3.4 näher eingegangen wird.

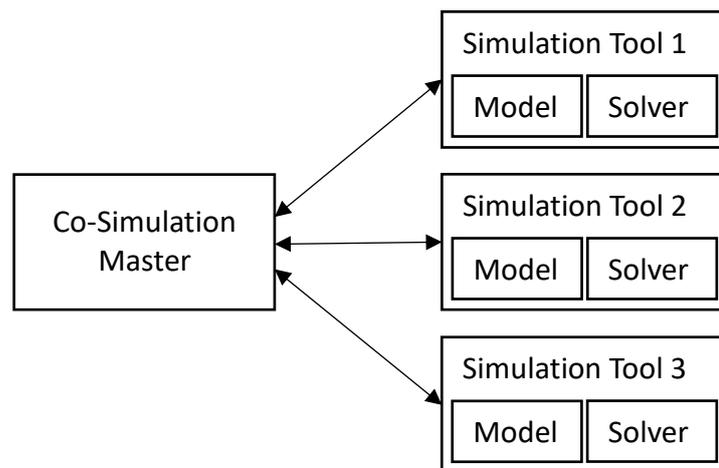


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung einer Co-Simulationsumgebung

2.4 Schaltstrategie

Im Vergleich zu Fahrzeugen mit manuellen Getrieben, wo die Schaltung der Gänge durch den Fahrer durchgeführt wird, muss in Automatikgetrieben eine Software den optimalen Schaltzeitpunkt berechnen. Außerdem müssen unter anderem das Öffnen und Schließen der Kupplung oder das Schalten des Ganges mit Hilfe von zum Beispiel Aktuatoren oder Reglern übernommen werden. Dies ist Aufgabe der elektronischen Getriebesteuerung. In diesem Kapitel wird speziell auf die Applikation des Schaltzeitpunktes, der sogenannten Schaltstrategie, sowie auf die Aufgaben der Applikation einer Getriebesteuerung eingegangen.

a) Grundlagen

Um das Fahrverhalten im realen Straßenverkehr so sicher und angenehm wie möglich zu gestalten, ist es Aufgabe der Schaltstrategie bestimmte Fahrsituationen zu erkennen und diese Informationen so zu verarbeiten, dass für jede Situation der richtige Gang gewählt wird. Dabei ist die Bestimmung des Schaltzeitpunktes im Teillastbereich hauptsächlich ein Kompromiss zwischen Fahrbarkeit und Kraftstoffverbrauch. Im Volllastbereich hingegen werden die Schaltzeitpunkte größtenteils durch die maximale Motordrehzahl und das maximale Motordrehmoment bestimmt. In beiden Fällen kann der optimale Zeitpunkt zum Durchführen einer Schaltung mit Hilfe eines Zugkraftdiagrammes gefunden werden.

b) Zugkraftdiagramm

Ein Zugkraftdiagramm stellt den Verlauf der Antriebskraft eines Motors (reduziert um den Antriebsstrangwirkungsgrad) und der Summe der Fahrwiderstände des Fahrzeuges (z.B. Rollwiderstand, Reibungswiderstand, Luftwiderstand, Beschleunigungswiderstand) in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit dar. Daraus können die Höchstgeschwindigkeiten des Fahrzeuges, das maximale Steigungsvermögen, sowie die Überschusszugkraft der einzelnen Gänge entnommen werden. Die Leistung berechnet sich dabei aus der Multiplikation der Zugkraft mit der entsprechenden Geschwindigkeit. [12]

In Abbildung 2-6 ist solch ein Zugkraftdiagramm dargestellt. Die dicken Linien stellen dabei die Punkte maximaler Leistung für jeden Gang, die strichlierten Linien den Zugkraftbedarf für unterschiedliche Steigungen dar.

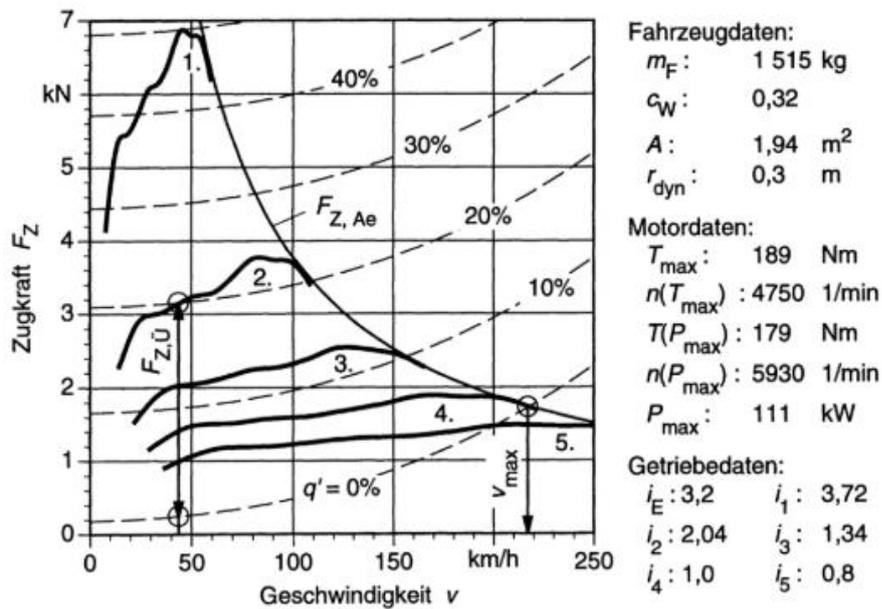


Abbildung 2-6: Zugkraftdiagramm mit den Bedarfskurven bei unterschiedlichen Steigungen für einen Mittelklassewagen mit 2-Liter-Ottomotor [12]

Im Allgemeinen kann aus der Differenz der erzeugten Zugkraft des Motors – charakterisiert durch die Motorkennlinie – und der Fahrwiderstände die Beschleunigung des Fahrzeuges berechnet werden (siehe Abbildung 2-7). Dies kann vereinfacht wie folgt beschrieben werden:

$$F_{Res} = m \cdot a \equiv F_Z - F_W \tag{2-1}$$

$$\rightarrow a = \frac{F_Z - F_W}{m} \tag{2-2}$$



Abbildung 2-7: Mathematische Beschreibung des Beschleunigungsvorganges eines Fahrzeuges

Wird solch ein Zugkraftdiagramm zusätzlich mit einem Motorkennfeld kombiniert, welches auch Kennlinien für unterschiedliche Pedalstellungen (siehe Abbildung 2-8) beziehungsweise zusätzlich Kennlinien konstanten Verbrauchs liefert (wie zum Beispiel in Abbildung 3-10), so kann der optimale Betriebspunkt des Motors gefunden werden. Daraus können wiederum statische Schaltzeitpunkte berechnet werden. Diese Schaltkennlinien werden anschließend in einem sogenannten Schaltkennfeld dargestellt, welches in Abschnitt c) erklärt wird.

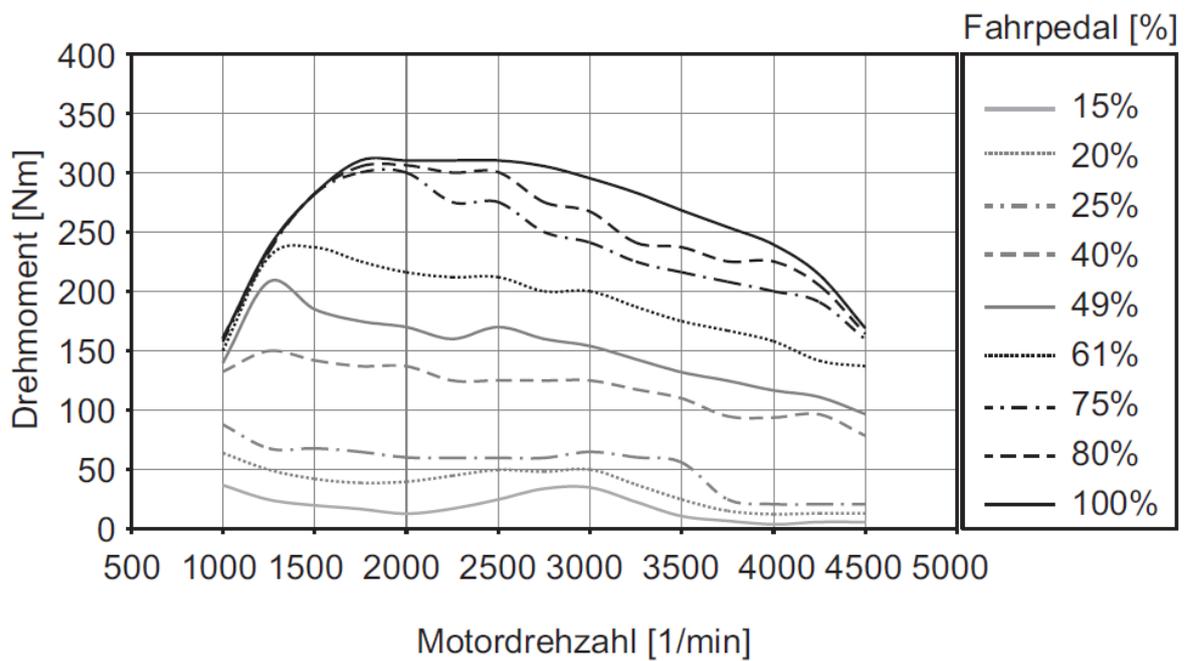


Abbildung 2-8: Drehmomentkennfeld eines Dieselmotors in Abhängigkeit von der Pedalposition [13]

c) Schaltkennfeld

Ein Schaltkennfeld, auch Shiftmap genannt, gibt Aufschluss darüber, wann eine Hoch- oder eine Rückschaltung in den nächsten Gang erfolgt. Dieses Kennfeld gilt jedoch für einen bestimmten Straßengradienten. Ändert sich dieser infolge einer Steigung oder eines Gefälles, wird in andere Kennfelder umgeschaltet oder interpoliert. Eingangsparmeter des Kennfeldes stellen die Fahrpedalstellung, welche durch den Fahrer vorgegeben wird, sowie die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit, dar. Abbildung 2-9 zeigt exemplarisch ein solches Kennfeld. Die durchgezogenen Linien stellen den Zeitpunkt einer Hochschaltung, die strichlierten Linien den Zeitpunkt einer Rückschaltung dar. Zwischen Hoch- und Rückschaltkennlinie ist zudem eine Hysterese zu erkennen, um Schaltpendeln zu vermeiden.

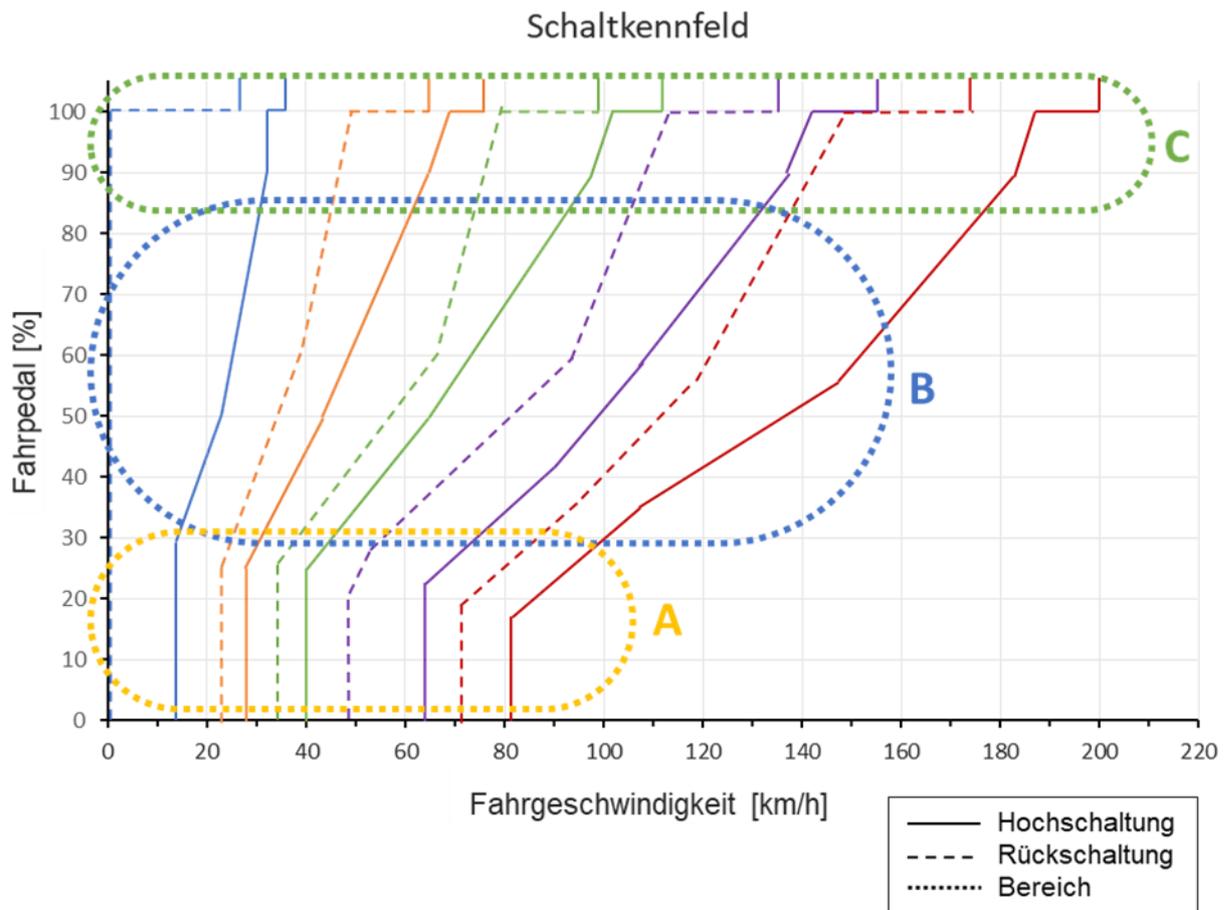


Abbildung 2-9: Konventionelles Schaltkennfeld mit Einteilung in 3 Bereiche in Anlehnung an [14]

In Abbildung 2-9 sind zusätzlich die Bereiche eines Schaltkennfeldes dargestellt. Die Einteilung kann wie folgt beschrieben werden: [14]

- Bereich A: für Konstantfahrten
- Bereich B: für dynamische Manöver (Beschleunigung, Fahrbarkeit)
- Bereich C: für maximale Leistung

Die Schaltkennlinien im Bereich A für Rückschaltungen ergeben sich aus der minimalen Motordrehzahl, bei dem der Antriebsstrang noch vernünftig betrieben werden kann. Die Hochschaltungen werden für minimalen Kraftstoffverbrauch ausgelegt. Die Schaltkennlinien sind dabei nahezu parallel zur Y-Achse. Dies bedeutet, dass die Schaltzeitpunkte fast unabhängig von der Pedalposition sind, und hauptsächlich von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängen. Dieser Bereich wird hauptsächlich für Konstantfahrten verwendet.

Bereich C hingegen wird durch die maximale Motordrehzahl und der zugehörigen Leistung bestimmt. Die Kennlinien über 100 Prozent Pedalwert stellen dabei die sogenannten Kickdown Linien dar. Unter Kickdown versteht man einen On-/Off-Schalter, welcher bei voll durchgetretenem Fahrpedal aktiviert werden kann, sofern das Fahrpedal diese Funktion unterstützt. Durch diesen mechanischen Druckpunkt wird das Fahrpedal (konfigurationsabhängig) auf einen Wert von etwa 120 Prozent gesetzt, wodurch der niedrigste mögliche Gang ausgewählt wird. Dem Fahrer wird dadurch die maximale Motorleistung zur Verfügung gestellt um die höchste Beschleunigung in der aktuellen Fahrsituation zu ermöglichen.

Bereich B verknüpft die Bereiche A und C fließend und macht den größten Bereich aus. Dieser Bereich ist für dynamische Fahrbarkeit und Beschleunigungen unter Berücksichtigung von Kraftstoffverbrauch ausgelegt.

Abbildung 2-10 beschreibt beispielhaft eine Hoch- und eine Rückschaltkennlinie für einen vorgegebenen Straßengradienten. Zum leichteren Verständnis wird im Folgenden angenommen, dass sich das Kennfeld, durch eine Steigung oder ein Gefälle, nicht verändert. Vorgegeben durch die Fahrzeuggeschwindigkeit und den Fahrpedalwert ergibt sich der aktuelle Arbeitspunkt (AP). Möchte der Fahrer das Fahrzeug auf konstanter Geschwindigkeit halten, so bleibt auch das Fahrpedal konstant. Wird nun, zum Beispiel infolge einer Steigung, das Fahrzeug langsamer, so wird bei Erreichen der Rückschaltkennlinie (A) ein Gang nach unten geschaltet, wodurch mehr Raddrehmoment zur Verfügung gestellt wird. Gegenätzlich wird, beispielsweise wegen eines Gefälles, die Geschwindigkeit erhöht, wodurch bei Erreichen der Hochschaltkennlinie (C) ein Gang hochgeschaltet wird, um somit die Motordrehzahl wieder zu verringern. Wenn der Fahrer jedoch beschleunigen möchte, so erhöht er den Fahrpedalwert; nach Erreichen der Rückschaltkennlinie (B) wird zur Erhöhung des Radmomentes einen Gang rückgeschaltet. Herrscht jedoch kein Beschleunigungswunsch, so verringert der Fahrer den Fahrpedalwert; nach Erreichen der Hochschaltkennlinie wird einen Gang hochgeschaltet. Dadurch kann der Motor in einem niedrigeren Drehzahlbereich betrieben werden, um den Verbrauch des Fahrzeuges zu senken. [15]

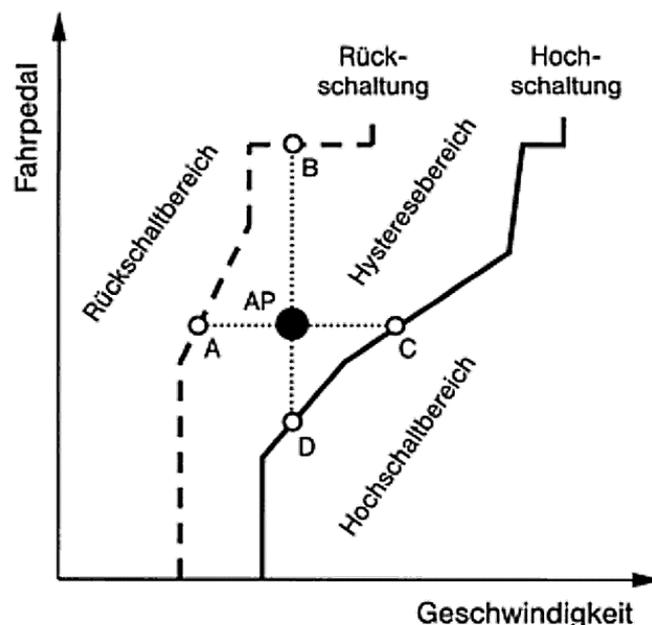


Abbildung 2-10: Schaltkennlinien der Schaltstrategie [15]

Um die Anforderungen des Verbrauchs und der Fahrbarkeit so gut wie möglich zu erfüllen, haben konventionelle Schaltstrategien unterschiedliche Fahrprogramme. In diesen Fahrprogrammen sind die statischen Schaltkennlinien, je nach Einsatzzweck, optimiert. Zusätzlich werden in heutigen modernen Automatikgetrieben Motorkennlinien, wie die Vollastkennlinie, Pedal Maps, BSFC (Brake Specific Fuel Consumption) Maps und viele mehr in die Software eingebunden und können, genauso wie die Fahrbarkeitsfunktionen, die Schaltkennlinien dynamisch verändern.

Die Schaltzeitpunkte werden aber nicht nur anhand des optimalen Verbrauches oder der besten Performance berechnet. Weitere Anforderungen, wie unter anderem Sicherheit, Komfort, Fahrverhalten, NVH, müssen berücksichtigt werden. Die Schaltstrategie stellt sich somit als sehr komplex heraus. Nachfolgender Abschnitt beschreibt daher die grundsätzliche Struktur und den Aufbau einer modernen Schaltstrategie näher.

d) Struktur und Aufbau

Die Schaltstrategie ist Teil der TCU (Transmission Control Unit), welche für die Bestimmung des optimalen Ganges verantwortlich ist. Der Programmablauf der Schaltstrategie kann in 3 Schritte unterteilt werden:

- e) Signalverarbeitung
- f) Fahrsituationserkennung (Fahrbarkeitsfunktionen & Modes)
- g) Gangauswahl

e) Signalverarbeitung

Zur Bestimmung des optimalen Ganges muss die TCU so viele Informationen wie möglich vom Fahrzeug, sowie dem Fahrer bekommen. Dies geschieht entweder durch Sensoren, oder durch Daten und Berechnungen, welche von anderen Steuereinheiten zur Verfügung gestellt werden. Abbildung 2-11 zeigt exemplarisch, wie die TCU mit dem Fahrzeug in Verbindung steht.

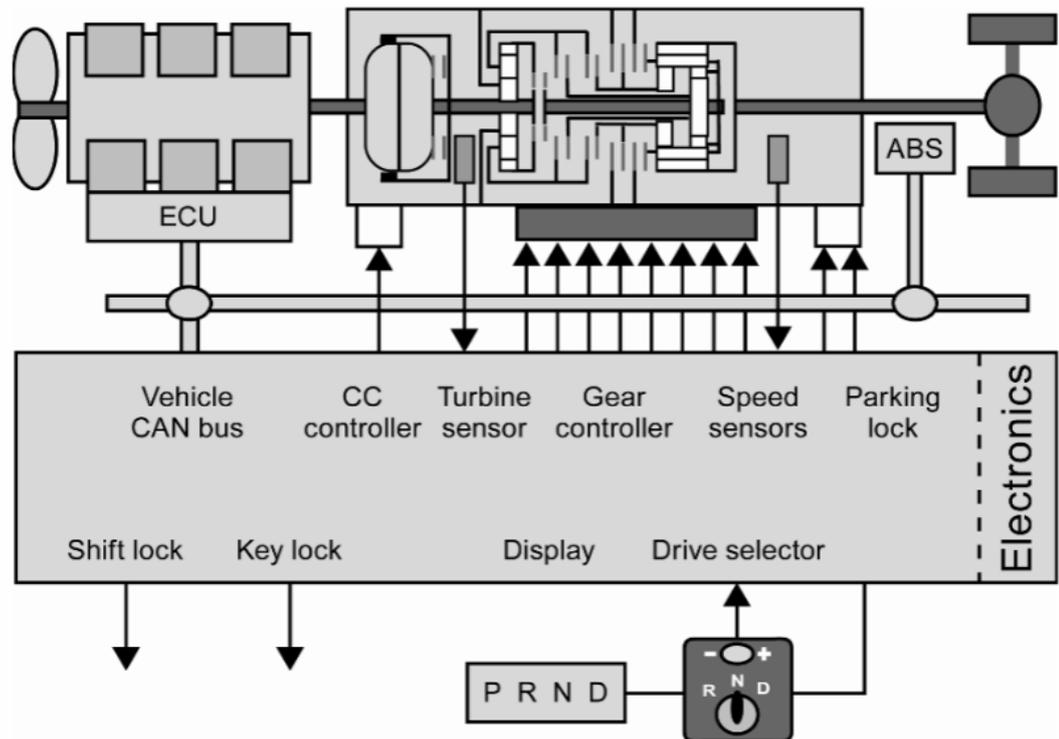


Abbildung 2-11: Eingangs- und Ausgangssignale einer Getriebesoftware [12]

Im Folgenden werden die wichtigsten Eingangsgrößen der Schaltstrategie genannt.

2.4.1.e.1 Getriebesignale

- Torque Converter: Turbinendrehzahl
- Getriebeausgangsdrehzahl
- Kupplungsposition-/druck
- Getriebeöltemperatur

2.4.1.e.2 Fahrzeugsignale

- Längs-, Quer- und Vertikalbeschleunigung
- Raddrehzahl beziehungsweise Schlupf
- Lenkwinkel
- ECU-Signale wie Aktivierung der Zündung
- Motorsignale: Motordrehzahl und Motordrehmoment, Kühlmitteltemperatur etc.

2.4.1.e.3 Fahrersignale

- Fahrpedalposition
- Kickdown
- Wählhebelposition (Park, Neutral, Drive, Reverse, Manual)
- Schaltwippen
- Tempomat (Cruise-Control)
- Druckknöpfe (Sport Mode, Downhill Mode, Offroad Mode, ECO-Mode, ESP-Off-Mode)
- Bremslicht, Bremsdruck

f) Fahrsituationserkennung (Fahrbarkeitsfunktionen & Modes)

Die Fahrsituation wird einerseits durch manuelle Eingabe (Wählhebel, Drückknöpfe etc.) bestimmt. Andererseits erkennt die Getriebesoftware anhand der zuvor beschriebenen Eingangssignale bestimmte Fahrsituationen mit Hilfe von sogenannten Fahrbarkeitsfunktionen. Durch diese werden im Hintergrund vom Fahrer unbemerkt andere Modes ausgewählt, wodurch eine Anpassung der Schaltzeitpunkte erfolgt. Im Folgenden werden die wichtigsten Modes und Funktionen beschrieben.

2.4.1.f.1 Manual Mode (Tip Mode)

In Fahrzeugen mit Automatikgetrieben hat der Fahrer auch die Möglichkeit den Gang selbst zu wählen. Dazu wird der Wählhebel in die Position M gebracht. Das Schalten wird entweder durch Schaltwippen am Lenkrad oder durch Tasten am Wählhebel ermöglicht. Prinzipiell soll dem Fahrer die größtmögliche Freiheit bei der Gangauswahl gegeben werden. Bei Überschreitungen von Grenzdrehzahlen wird jedoch auch durch die Software eingegriffen und eine Schaltung erzwungen oder verhindert. Diese Kennlinien werden erzwungene Hoch- und Rückschaltkennlinien genannt.

2.4.1.f.2 Drive Mode (Normal Mode)

Ebenso wie der Manual-Mode kann der Drive-Mode (D) mit dem Wählhebel ausgewählt werden. In diesem Modus wird standardmäßig die sogenannte Basic-Shiftmap ausgewählt. Dieses Kennfeld ist das am häufigsten verwendete, welches für das Fahren auf ebener Straße unter normalen Bedingungen ausgelegt ist. Schaltungen werden hierbei in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Pedalposition durchgeführt (siehe Abbildung 2-9).

2.4.1.f.3 Sport Mode

Der Sport-Mode (S) kann Schaltzeitpunkte verzögern, wodurch das Drehzahlniveau steigt und das Fahrzeug leistungsorientierter gefahren werden kann. Zusätzlich kann die Hysterese zwischen den Hoch- und Rückschaltkennlinien vergrößert werden, um so zweifache Rückschaltungen zu verhindern und ein direkteres Fahrverhalten zu ermöglichen. Wenn dieser Modus nicht mit dem Wählhebel ausgewählt werden kann, so bestimmt oft eine Fahrbarkeitsfunktion ob eine sportliche Fahrweise vorliegt und die Schaltkennlinien angepasst werden sollen (siehe Abschnitt Fahrertyp-Erkennung). [13]

2.4.1.f.4 Up-/Downhill Mode

Um den zusätzlichen Fahrwiderstand bei Bergauffahrten zu kompensieren, werden Bergauf-Schaltkennlinien, sogenannte Uphill-Shiftmaps, verwendet. Dies gelingt durch Verschieben der Hoch- und Rückschaltungen zu höheren Drehzahlen und führt zu mehr Leistung und besserer Performance des Motors. Wie sehr sich dabei die Schaltkennlinien von der Basic-Shiftmap verschieben, hängt von der Steigung und der Motorkennlinie ab. [15]

Bei Bergabfahrten hingegen verringert sich der Fahrwiderstand, wodurch das Fahrzeug selbstständig beschleunigen würde. Um dies zu verhindern werden die Hochschaltungen, und unter Umständen die Rückschaltungen der Downhill-Shiftmaps, zu höheren Drehzahlen verschoben. Die durch spätes Hochschalten und früheres Rückschalten erhöhte Motordrehzahl bewirkt dabei eine verstärkte Motorbremswirkung und unterstützt somit das gewünschte Fahrverhalten bei gleichzeitiger Entlastung der Bremse. [15]

Die Erkennung der Steigung kann dabei über zwei unterschiedliche Wege erfolgen. Die erste Variante ist die Verwendung eines Sensors. Die zweite und übliche Variante ist die Berechnung der Steigung über den Vergleich der gewünschten zur tatsächlichen Beschleunigung des Fahrzeuges bei einer bestimmten Pedalposition beziehungsweise Motordrehmoment. Dabei wird ein Straßenwiderstandsmodell in der TCU hinterlegt und berechnet die Steigung anhand deren Differenz. [13]

Der Fahrwiderstand kann sich in der Praxis allerdings auch durch Veränderung des Fahrzeuggewichtes, unter anderem durch Zuladung oder Ziehen eines Anhängers, verändern. Um ebenso die gewünschten Beschleunigungswerte zu erreichen und Schaltpendeln zu verhindern, wird auch anhand dieses zusätzlichen

Fahrwiderstandes der Hill Mode ausgewählt. Aus diesem Grund wird diese Funktion auch Last- und Steigungserkennung genannt. Diese wird in Abschnitt 3.3.1.a.1 kurz vorgestellt.

2.4.1.f.5 Fast-Off

Wenn der Fahrer den Fuß vom Fahrpedal sehr rasch löst und gleich wieder betätigt, durch zum Beispiel ein plötzlich kreuzendes Fahrzeug im Stadtverkehr, so würde die Getriebesoftware eine Hochschaltung mit erneuter Rückschaltung durchführen. Die Fahrbarkeitsfunktion Fast-Off erkennt dabei solch ein Fahrmanöver und verhindert oder verzögert die Hochschaltung, was zu einem angenehmeren Fahrverhalten -insbesondere im Stadtverkehr oder bei aggressivem Fahrstil - führt. Ob das Fahrpedal rasch gelöst wurde, wird durch den Gradienten der Pedalstellung bestimmt. Wird ein zu hoher negativer Gradient erkannt und ein bestimmter Grenzwert des Pedalwertes unterschritten, so beginnt eine Hochschaltverhinderung solange das Fahrzeug im Schub-Betrieb ist. Ein positiver Pedalgradient bewirkt das Aufheben der Hochschaltverhinderung nach Ablauf einer definierten Zeit. Ein erneutes Überschreiten eines negativen Pedal-Grenzwertes innerhalb dieser Zeitspanne aktiviert diese Funktion erneut. Grundsätzlich ist die Funktion durch eine definierte maximale Motordrehzahl limitiert. [15]

2.4.1.f.6 Bremskraft-/Verzögerungsabhängige Rückschaltung

Wie sich aus dem Namen bereits ableiten lässt, wird bei dieser Funktion, abhängig von der Höhe des Bremsdruckes, beziehungsweise durch spontane Fahrzeugverzögerung, vorausschauend eine Rückschaltung durchgeführt. Die Begründung liegt darin, dass nach einer Verzögerung zumeist ein erneuter Beschleunigungswunsch auftritt. Durch die frühere Rückschaltung soll gewährleistet werden, dass die zur Beschleunigung notwendige Leistung alsbald abgerufen werden kann. Die Schaltanforderung muss nicht vom Fahrer über die Erhöhung der Fahrpedalposition gefordert werden, wodurch keine Schaltverzögerung auftritt und wiederum das Ansprechverhalten des Fahrzeuges verbessert wird. Als Nebenaspekt kann durch den vermehrten Einsatz der Motorbremse die Betriebsbremse entlastet und demzufolge der Bremsenverschleiß minimiert werden. [16]

2.4.1.f.7 Kurven-Erkennung

Diese Funktion erkennt eine Kurve und verhindert infolgedessen eine Hochschaltung. Dadurch steht dem Fahrer beim Kurvenausgang mehr Drehmoment zur Verfügung und führt zu einem besseren Ansprechverhalten des Fahrzeuges und erhöht somit die Fahrbarkeit. Die Kurvenerkennung erfolgt dabei grundsätzlich durch die Querschleunigung des Fahrzeuges. Alternativ kann diese auch durch die unterschiedlichen Raddrehzahlen bestimmt werden. Die Applikation ist dabei stark abhängig vom jeweiligen Gang. Je niedriger der Gang beziehungsweise die Fahrzeuggeschwindigkeit ist, desto höher ist üblicherweise auch die Schwelle zum Ansprechen der Funktion. Zusätzlich wird der Lenkwinkel als Bewertungsfaktor herangezogen, um zum Beispiel bei Fahrten im Kreisverkehr mit niedrigen Beschleunigungen ebenso eine Hochschaltung zu verhindern. Bei höheren Geschwindigkeiten und höheren Gängen wird zunehmend der Lenkwinkel zur Bestimmung einer Kurve verwendet. Zumeist wird eine Kombination aller drei Methoden verwendet, um die Genauigkeit des Systems zu verbessern. [16]

2.4.1.f.8 Fahrertyp-Erkennung

Durch Gewichtung unterschiedlicher Einflussfaktoren wie Fahrpedal (Tipp-Impulse), Längs- und Querschleunigung, Lenkwinkel, Fahrzeuggeschwindigkeit und Weiteren, wird ein Fahrertyp errechnet. Die Fahrertyperkennung teilt den Fahrer infolgedessen in Klassen (z.B. Normal, Sport, Race) ein. Mittels Interpolation zwischen den entsprechenden Kennfeldern werden daraufhin die Schaltzeitpunkte dem Fahrstil des Fahrers angepasst, wodurch ein besseres Fahrverhalten erzielt werden kann. [16]

2.4.1.f.9 Höhen-Erkennung

In größeren Höhenlagen verlieren besonders Saugmotoren durch die niedrigere Dichte der Luft an Leistung. Diesen Leistungsverlust erkennt die ECU und sendet ein entsprechendes Signal an die TCU. Die Höhenerkennung verschiebt die Schaltkennlinien zu höheren Motordrehzahlen und minimiert somit eine für den Fahrer spürbare Auswirkung des Leistungsverlustes. [16]

2.4.1.f.10 Hot Mode

Um das Getriebe vor Überhitzung zu schützen, wird die Getriebeöltemperatur überwacht. Wird ein Grenzwert überschritten, so wird der Hot Mode aktiviert. Dies bedeutet, dass die Anzahl an Schaltungen reduziert wird. Außerdem werden hohe Drehzahlen verhindert, um die Wärmeabgabe zu reduzieren. Zu niedrige Drehzahlen werden ebenso vermieden, damit die Ölpumpe genügend Kühlleistung zur Verfügung stellen kann. Zur Verringerung der Wärme wird auch die Überbrückungskupplung des Torque Converters vermehrt geschlossen. [16]

2.4.1.f.11 Warmlauf-Erkennung

Um den Motor und das Getriebe bei niedrigen Außentemperaturen so schnell wie möglich auf Betriebstemperatur zu bringen, werden niedrige Drehzahlen eher vermieden, wodurch mehr Wärme erzeugt wird. Weiters kann die Kupplung des Torque Converters geöffnet bleiben. Diese Funktion unterstützt das rasche Erhitzen des Katalysators, damit dieser so rasch als möglich die Abgase des Motors in ungiftige Moleküle umwandeln kann. Um dies zu erreichen, kann zum Beispiel die Schaltkennlinie des ersten Ganges hin zu höheren Drehzahlen verschoben werden. [16]

g) Gangauswahl

Zur Berechnung des Ganges werden, wie zuvor beschrieben, die Eingangs- und Ausgangsgrößen der Software verarbeitet. Anhand dieser Signale wird anschließend die Fahrsituation bestimmt und ein Schaltkennfeld ausgewählt. Die prinzipielle Gangauswahl erfolgt kennlinienbasiert (statisch) durch die vorhandene Fahrzeuggeschwindigkeit beziehungsweise der Ausgangsdrehzahl des Getriebes sowie der Fahrpedalposition. Anschließend werden die Fahrbarkeitsfunktionen und Modes, welche Schaltungen erzwingen oder verhindern können, und der Fahrertyp bewertet. Anhand von dynamischen Korrekturen wird schließlich der finale Zielgang ausgewählt. Eine Übersicht über solch einen Programmablauf wird in Abbildung 2-12 gezeigt. Tatsächliche Modelle können selbstverständlich einen etwas unterschiedlichen Aufbau aufweisen.

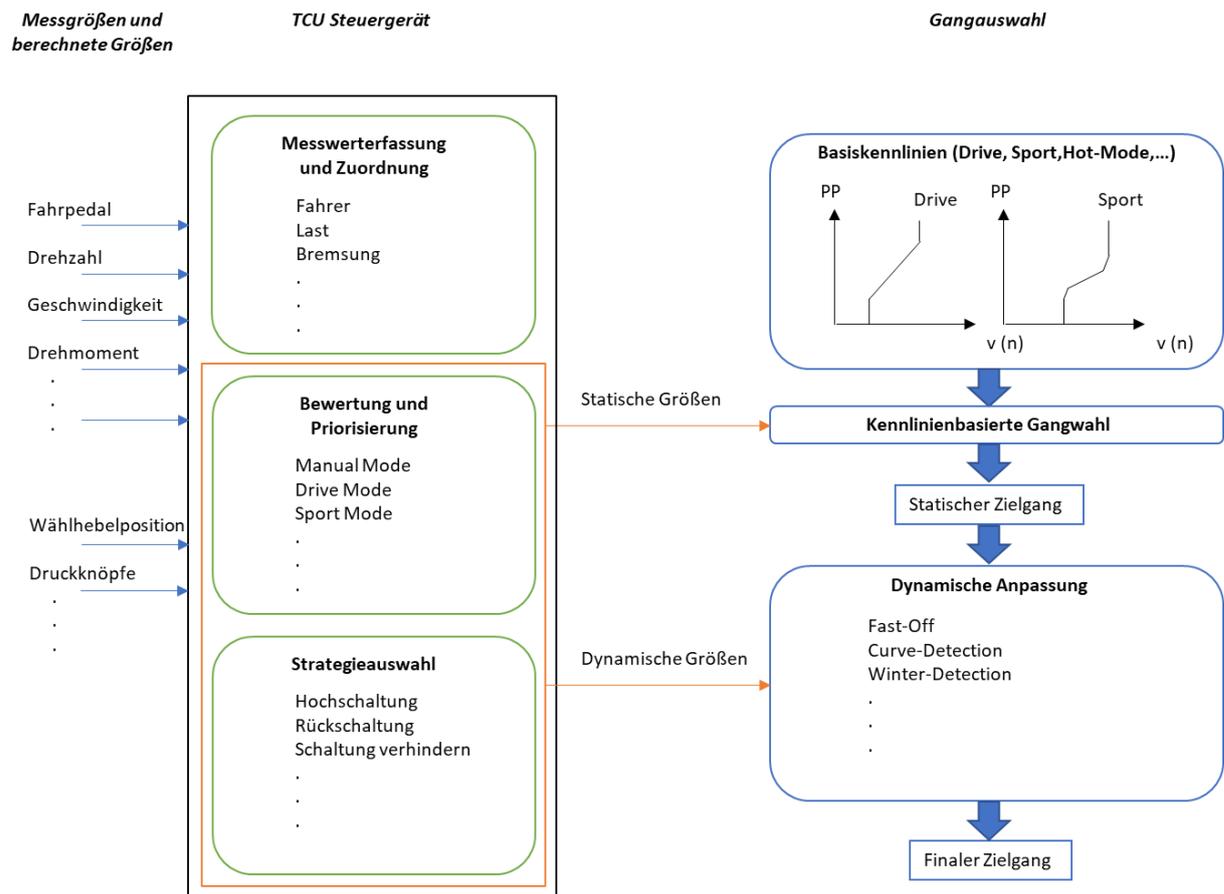


Abbildung 2-12: Schematische Struktur und Ablauf der Schaltstrategie in Anlehnung an [17]

2.5 Applikation

Da zur Durchführung dieser Arbeit ein großer Anteil an Applikation notwendig war, werden im Folgenden kurz die Anforderungen sowie der grundsätzliche Ablauf eines Applikationsprozesses dargestellt.

a) Anforderungen

Um die gegensätzlichen Anforderungen von Emission, Komfort und Dynamik so gut wie möglich zu erfüllen, bedarf es einer entsprechenden Applikation des Antriebsstranges. Dabei muss je nach Fahrzeugdesign ein Kompromiss zwischen den einzelnen Anforderungen gefunden werden. Abbildung 2-13 zeigt, welche Begriffe üblicherweise mit der Fahrbarkeit eines Fahrzeuges verbunden werden.

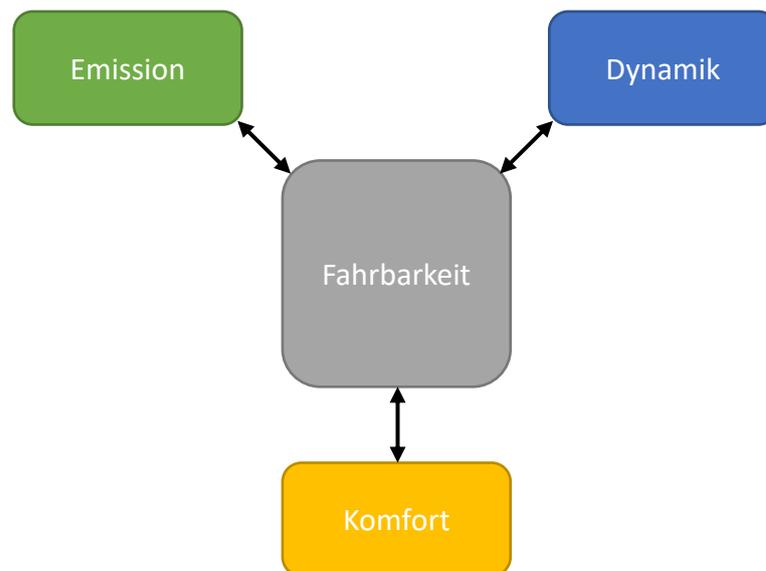


Abbildung 2-13: Gegensätzliche Anforderungen eines Fahrers

b) Applikationsprozess

Die Applikation von Antriebsstrangsystemen bedarf einer gewissen Struktur, um die Entwicklungszeit zu verkürzen und um die benötigten Meilensteine zu erreichen. Diese kann prinzipiell in folgende Hauptaufgabenbereiche unterteilt werden: [16]

- **Basisapplikation**
 - Grundeinstellungen des Getriebesystems am Komponentenprüfstand
 - Hardwareorientierte Applikation am Antriebsstrangprüfstand
 - Erstellung von grundlegenden Datenblättern
- **Schaltzeitpunkte**
 - Offline-Applikation im Büro ohne Verbindung zur TCU (Transmission Control Unit)
 - Standard Mapping (Hoch- und Rückschaltkennlinien, Pedal Map) für Normal Mode, Manual-Mode
 - Fortgeschrittenes Mapping für Berg Mode und Sport Mode
 - Definition von Standard Funktionen (Fast-Off, Kurven-Erkennung, Warmlauf-Erkennung etc.)
 - Spezialfunktionen (Fahrertyp-Erkennung, Bremsrückschaltungen etc.)
- **Schaltablauf**
 - Optimierung von Kupplungsansteuerung
 - Torque Converter Kupplung-Anpassung
- **Diagnose**
 - Grundlegende Diagnose (elektrisch)
 - Funktionen (mechanisch und hydraulisch)
 - Systemsicherheit
 - Kommunikation und Anzeige

3 SIMULATIONSUMGEBUNG UND EINGANGSDATEN

3.1 Vehicle Simulation Model – VSM

AVL VSM ist ein Dynamiksimulationsprogramm, welches das Fahrverhalten eines Fahrzeuges präzise nachbilden und so den Entwicklungsprozess unterstützen und effizienter machen kann. Die Komplexität der Komponenten kann dabei durch den objektorientierten, nichtlinearen modularen Aufbau je nach Anwendungsfall erhöht werden, wodurch eine genaue Vorhersage der longitudinalen, lateralen und vertikalen Dynamik erreicht wird. VSM kann aber auch in realen Testumgebungen in Echtzeit eingesetzt werden. Dies gelingt durch Integration der Simulationsumgebung mit einem dynamischen Prüfstand, wie einem Hardware-in-the-Loop (HiL), einem Motoren- oder Antriebsstrangprüfstand. Der virtuelle Motor kann zum Beispiel durch einen realen Motor ersetzt, und das Verhalten der anderen Komponenten, sowie deren Zusammenspiel simuliert werden. VSM simuliert somit das Fahrzeug und steuert die ausgetauschten Komponenten am Prüfstand. [18]

Oberste Ebene stellen in VSM das Fahrzeug, der Fahrer und die Strecke dar. Eine Ebene darunter werden Komponenten, wie unter anderem der Motor, der Antriebsstrang oder die Federung definiert. Abbildung 3-1 zeigt den prinzipiellen Aufbau von VSM.

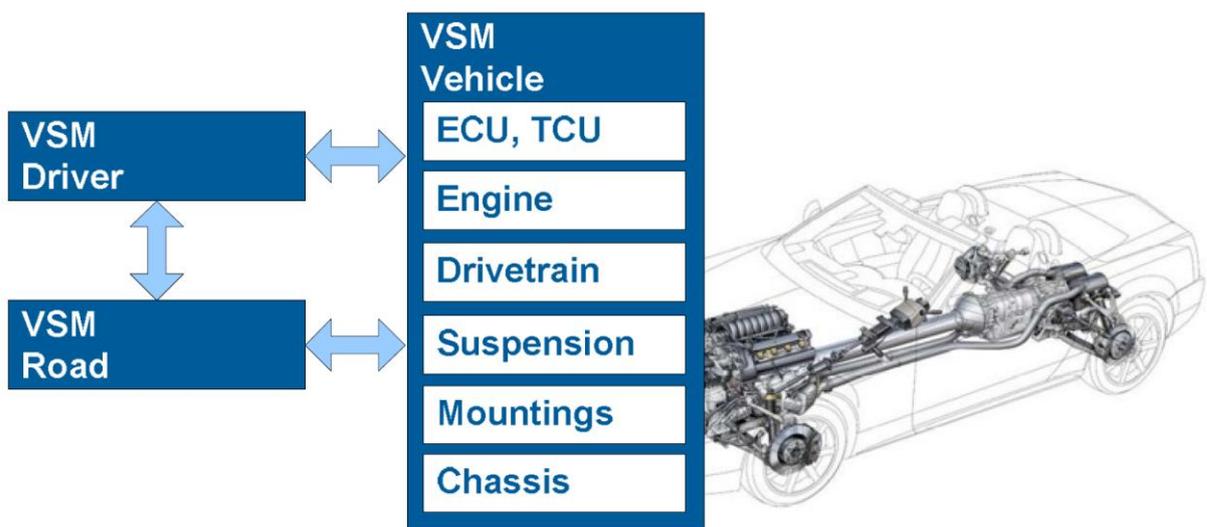


Abbildung 3-1: Grundsätzliche Struktur von VSM [18]

Die nachfolgende Liste liefert einen groben Überblick über die Einstellungsmöglichkeiten in VSM.

- **Fahrzeug**

- Chassis
 - Fahrzeuggeometrie (Schwerpunkt, Masse etc.)
 - Aerodynamik
 - Bremse
 - Sitz
- Radaufhängung
 - Kinematik
 - Federung und Dämpfung
- Reifen
- Antriebsstrang
 - Konfiguration (FWD, RWD, 4WD)
 - Differenzial
 - Getriebe (Manuell - MT, Automatik - AT, Doppelkupplung - DCT, Stufenlos - CVT)
 - Kupplung
 - Kühlungssystem
- Motor/Hybrid
 - Basisdaten (Zylinder, Trägheit, Hubraum etc.)
 - Motorkennfelder (statisch und dynamisch)
 - Befestigung

- **Teststrecke**

- Strecke (GPS-Daten, Geschwindigkeit etc.)
- Umgebungsbedingungen

- **Fahrer**

- Fahrertyp (Pedalanforderung, Lenkung etc.)
- Schaltverhalten (Schaltkennfeld etc.)

3 Simulationsumgebung und Eingangsdaten

Damit das Fahrzeug realistisch abgebildet werden kann, bedarf es der genauen Konfiguration und Anpassung der einzelnen Komponenten, welche über voreingestellte mathematische Modelle beschrieben werden. Über die Benutzeroberfläche „Parameter Set“ können deren Eingangsgrößen durch Parameter und Tabellen verändert werden. Wenn die voreingestellten Modelle nicht verwendet werden möchten, können diese auch in Matlab & Simulink überarbeitet werden. Wurden alle Parameter festgelegt, wird für jede Komponente ein sogenanntes Setup angelegt, wodurch es später möglich ist mehrere Konfigurationen (zum Beispiel unterschiedliche Reifendaten) testen zu können. Abbildung 3-2 zeigt exemplarisch die Benutzeroberfläche mit den Einstellungsmöglichkeiten des Motors.

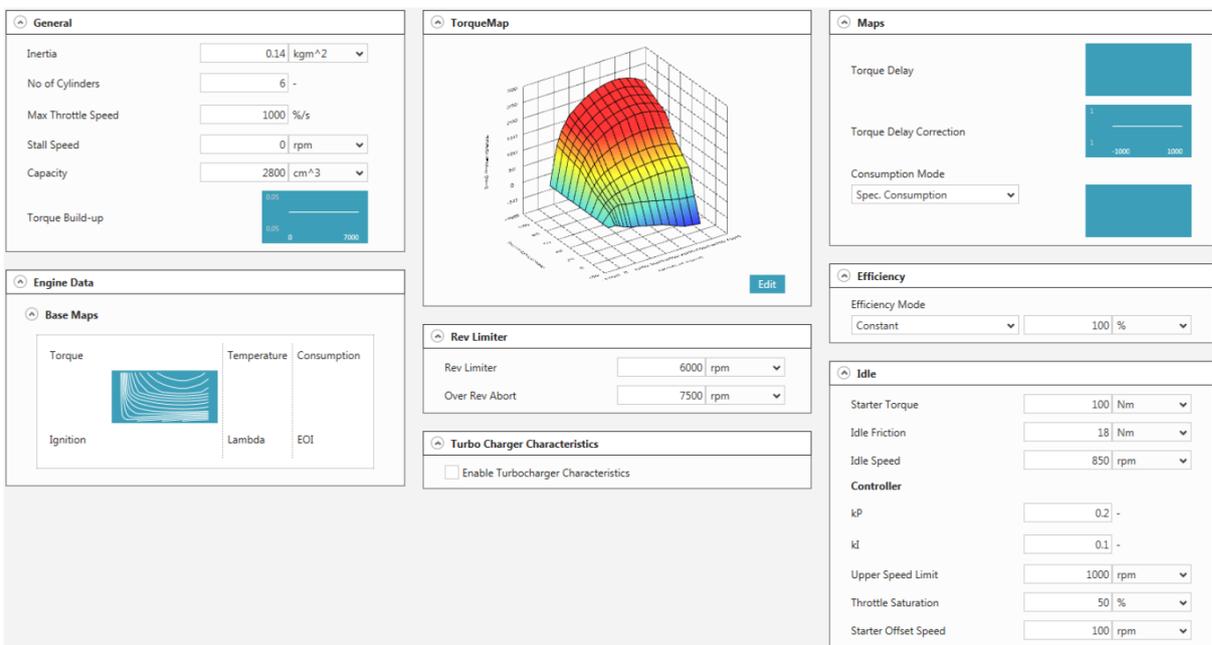


Abbildung 3-2: Setup- Fenster für einen Motor [19]

Das in dieser Arbeit verwendete Simulationsmodell eines SUVs wurde im Zuge eines vorherigen Projektes angelegt und dessen Fahrverhalten durch Messungen am realen Fahrzeug validiert und verifiziert. Aufgrund der Komplexität und des Umfangs dieser Eingangsdaten wird im Folgenden nur auf die wichtigsten Komponenten und deren Parametrisierung eingegangen.

a) Fahrzeug-Setup

3.1.1.a.1 Chassis

- Länge: ~4700mm
- Breite: ~1800mm
- Höhe: ~1700mm
- Gesamtgewicht: ~1700kg

3.1.1.a.2 Antriebsstrang

Das Fahrzeug besitzt einen Frontantrieb mit quer eingebautem Reihenmotor. Das automatisierte Schaltgetriebe ist ein 7-Gang Doppelkupplungsgetriebe. Die Kraftübertragung zur Vorderachse erfolgt über ein Differenzialgetriebe. Abbildung 3-3 zeigt das verwendete Setup in VSM.



Abbildung 3-3: Schematische Antriebsstrang-Konfiguration

Getriebe: Im Getriebe-Setup werden die Daten des Getriebes definiert. Diese sind unter anderem: Übersetzungsverhältnisse, Wellensteifigkeit, Trägheit der Ein- und Ausganswellen, Wirkungsgrad, Dämpfung, Flankenspiel, Schaltstrategie. Die Gangauswahl des Automatikgetriebes (Schaltstrategie) erfolgt hierbei lediglich durch einfache last- und geschwindigkeitsbasierte Schaltkennlinien. Um eine reale Getriebe-Software benutzen zu können, welche viel umfangreicher und komplexer ist, muss daher eine externe Getriebe-Software verwendet werden. Die verwendete Schaltstrategie wird in Kapitel 3.3 erläutert.

3.1.1.a.3 Motor

Das von VSM vorgegebene Motormodell kann in Abhängigkeit von der gewünschten Leistung prinzipiell keine Aussage über die Emissionen, sondern lediglich über den Verbrauch machen. Da für diese Arbeit jedoch Emissionen benötigt werden, muss dieses Modell ersetzt werden. In Abbildung 3-4 wird illustriert, wie die Einbindung eines externen Modells mit Hilfe einer Co-Simulationsplattform erfolgt. Über das externe Motormodell wird in Kapitel 3.2 eingegangen.

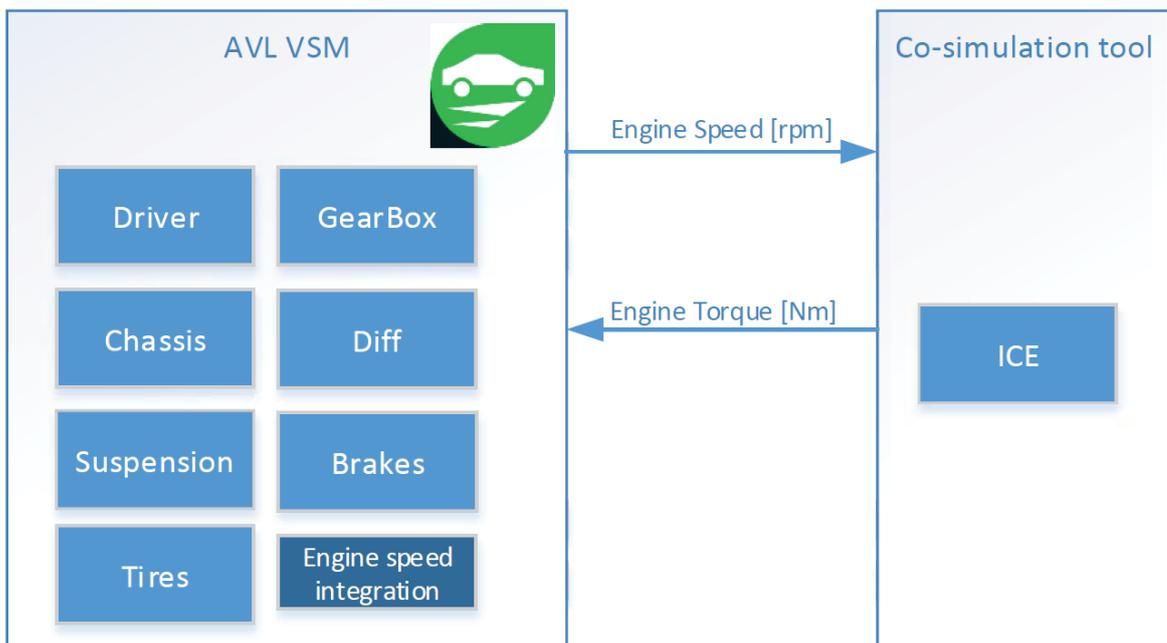


Abbildung 3-4: Einbindung eines externen Motormodells in VSM [19]

Die Einbindung eines neuen Motormodells wird in VSM durch zwei Arten unterstützt. Erste Variante ist der komplette Ersatz des Motormodells. Da das neue Motormodell diesen Ansatz, aufgrund eines anderen Aufbaus und infolgedessen anderen benötigten Eingangsdaten, nicht unterstützt, wird die zweite Variante angewandt. Hierbei wird das in VSM verwendete Motormodell nicht ersetzt, sondern die Drehzahl des Motors wie gehabt über das Rotationsgleichgewicht zwischen Motordrehmoment und dem Gegendrehmoment des Antriebsstranges berechnet. Allerdings wird das Motordrehmoment, im Gegensatz zur konventionellen Konfiguration, nicht aus den statischen und dynamischen Motorkennfeldern berechnet, sondern durch ein externes Motormodell geliefert.

Die Motordrehzahl wird über die Winkelbeschleunigung berechnet und kann über folgenden Zusammenhang beschrieben werden:

$$\ddot{\varphi} = \frac{M_{Kurbelwelle\ extern} + M_{Starter} - M_{Antriebsstrang} - M_{Nebenaggregate}}{I_{Motor}} \quad (3-1)$$

$\ddot{\varphi}$	rotatorische Beschleunigung der Kurbelwelle
$M_{Kurbelwelle\ extern}$	Motordrehmoment
$M_{Starter}$	Drehmoment des Starters
$M_{Antriebsstrang}$	Gegendrehmoment des Antriebsstranges
$M_{Nebenaggregate}$	Drehmoment der Nebenverbraucher
I_{Motor}	Trägheit des Motors

Wie in Abbildung 3-2 zu erkennen ist, gibt es einige Tabellen und Parameter, die ausgefüllt werden müssen, damit unter anderem die Drehzahlberechnung korrekt durchgeführt wird. Generelle Parameter stellen die Trägheit des Motors, Zylinderanzahl, Hubraum, Standdrehzahl oder maximale Drehzahl dar. Durch Tabellen werden Kennlinien, wie die Drehmomentkennlinie, der absolute Kraftstoffverbrauch, oder die Turbolader-Charakteristik beschrieben, um nur einige zu nennen. Obwohl, wie oben erklärt, das Drehmoment nicht aus den in VSM hinterlegten Kennfeldern berechnet wird, werden diese trotzdem benötigt, da andere Komponenten, wie der Fahrer, unter gewissen Umständen darauf zugreifen. Diese Kennfelder des neuen Motors wurden durch Mapping (Anfahren von Punkten) in einer eigenen Softwareumgebung erstellt und in VSM übertragen. Abbildung 3-10 zeigt ein solches Motor-kennfeld. Auf die Simulationsumgebung des Motors wird in Abschnitt 3.2 näher eingegangen.

b) Teststrecken-Setup

Im Teststrecken-Setup wird die zu fahrende Strecke festgelegt. VSM stellt dem Benutzer die Möglichkeit zur Verfügung GPS-Koordinaten einer beliebigen Strecke hochzuladen, woraus eine Strecke erzeugt wird. Hierbei werden zuerst die Punkte durch Splines verbunden, wodurch die Krümmung der Kurven bestimmt werden kann. Oft müssen diese Datenpunkte zusätzlich gefiltert werden, um mögliches Signalrauschen oder andere Effekte auszugleichen. Um anschließend ein realistisches Straßenprofil zu erhalten, werden entlang dieses Streckenprofils Straßenneigung, Rauheit, Geschwindigkeitsprofil, Höhenprofil und weitere Parameter angepasst. Abbildung 3-5 zeigt beispielhaft das Streckenprofil einer importierten Strecke.

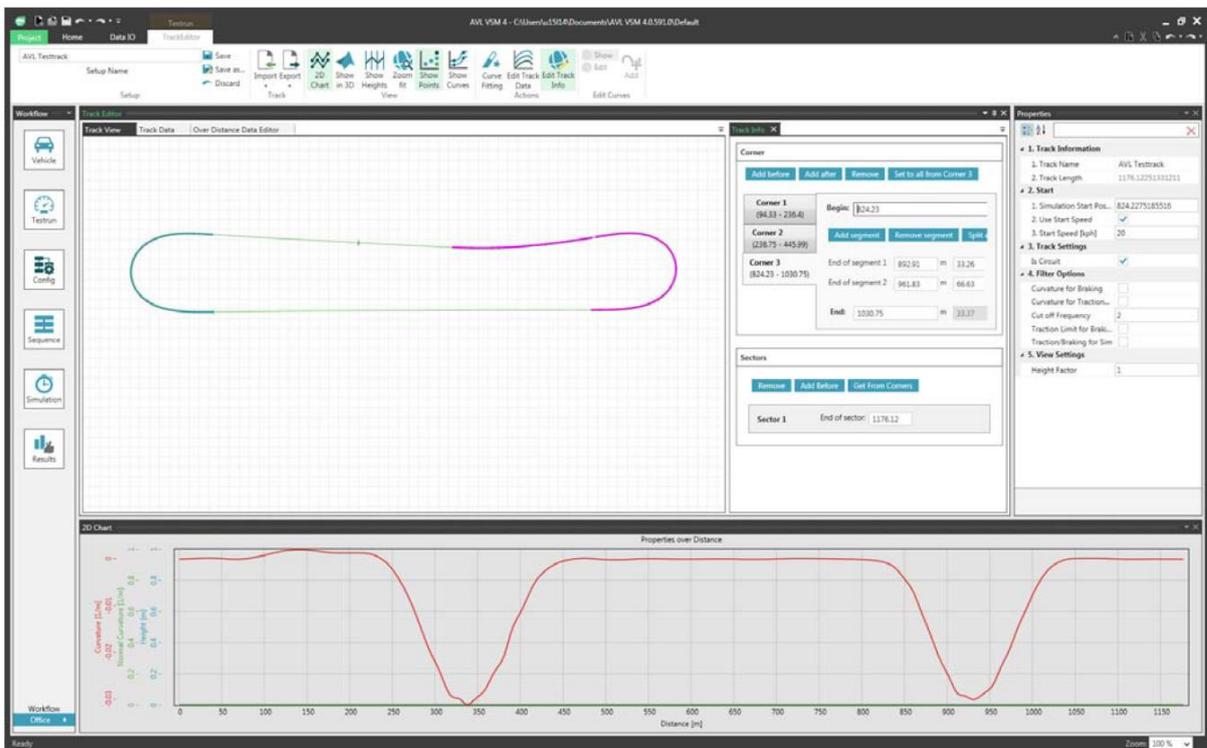


Abbildung 3-5: Teststrecken-Setup Fenster in VSM [19]

In dieser Arbeit wird nur ein Abschnitt des Streckenprofils einer RDE-Strecke verwendet, da dieser im Zuge des Projektes mit der bereits vorhandenen VSM-Simulationsumgebung abgestimmt wurde. Die GPS-Koordinaten sowie das Geschwindigkeitsprofil wurden durch eine Messfahrt am realen Fahrzeug im Zuge des Projektes erstellt. Als passende Strecke erwies sich der Rechberg in der Umgebung von Graz. Gefahren wurde hierbei mit einem normalen Fahrverhalten. Das verwendete Fahrzeug besaß eine ähnliche Performance wie das zu simulierende Fahrzeug.

Daten der Strecke:

- Länge: 3790m
- Höhenmeter: 232m aufwärts
- Durchschnittsgeschwindigkeit: 57km/h

c) Fahrer-Setup

Damit VSM eine Strecke entlang eines Geschwindigkeits- beziehungsweise Kurvenprofils nachfahren kann, wird ein virtueller Fahrer, welcher den gewünschten Fahrstil eines realen Fahrers widerspiegeln soll, benötigt. Hierfür werden Parameter wie Lenkung, Beschleunigungs- sowie Bremsvorgänge und Gangschaltung definiert. VSM stellt dem Benutzer drei unterschiedliche Fahrermodelle zur Verfügung, welche entsprechend den Anforderungen angepasst werden können. Nachfolgend werden der positionsgesteuerte sowie der in dieser Arbeit verwendete krümmungsgesteuerte Fahrer beschrieben, welcher im Zuge des Projektes parametrisiert und erfolgreich validiert wurde.

Der positionsgesteuerte Fahrer vergleicht die aktuelle Position des Fahrzeuges mit der vorgegebenen Führungslinie und berechnet sich über eine vorausschauende Zeitvorgabe die benötigten Lenk-, Beschleunigungs- und Bremswerte. Die Vorgabe wird dabei durch die im Teststrecken-Setup hinterlegte Strecke und zugehörigem Geschwindigkeitsprofil entnommen. An jedem Punkt sieht der Fahrer somit eine gewisse Zeit, und daher auch Distanz (berechnet aus der vorausschauenden Zeit und der Fahrzeuggeschwindigkeit) nach vorne und berechnet daraus, wo sich das Fahrzeug entlang der Strecke befinden muss und wie dessen Steuerkurs auszusehen hat. Je nach aktueller Position/Steuerkurs zu vorausschauender Position/Steuerkurs betätigt das Fahrermodell das Fahrpedal, die Bremse und das Lenkrad, um so die gewünschte Position bestmöglich zu erreichen. [19]

Der krümmungsgesteuerte Fahrer versucht der Zielkrümmung und dem vorgegebenen Geschwindigkeitsprofil, welche vom Teststreckensetup zu Verfügung gestellt werden, so gut wie möglich zu folgen, indem proportionale und integrale Parameter (PI) die Steuerung, sowie die Fahr- und Bremspedalbetätigung, übernehmen. Der Controller, welcher die benötigten Regelgrößen vorgibt, ist hierbei ein PI-Typ. Dies bedeutet, dass dessen Regelprinzip zum einen auf die aktuelle Abweichung des Ziel- und tatsächlichen Wertes beruht (Proportionale Komponente). Zum anderen ergibt sich die Regelung aus der Anhäufung dieser Abweichungen (Integrale Komponente). [19] Die Abstimmung der zugehörigen Proportionalitäts-, Progressions- sowie Integralfaktoren und deren Limits ist maßgebend für das realitätsgetreue Verhalten des virtuellen Fahrers. Die Applikation dieses komplexen Zusammenspieles wurde bereits vor Beginn dieser Diplomarbeit im zugehörigen Projekt durchgeführt und darf ohne weitere Untersuchung verwendet werden. Das angewandte Fahrermodell simuliert hierbei einen relativ durchschnittlichen Fahrer mit moderatem Lenk-, Beschleunigungs- und Bremsverhalten. Infolgedessen werden zumeist auch Kickdowns oder extreme Bremsmanöver vermieden.

d) Ein- und Ausgangsgrößen

Prinzipiell kann durch die implementierten Daten das Fahrzeug bereits eine Strecke abgefahren werden. Da allerdings das Motordrehmoment und der vorgegebene Gang von externen Modellen geliefert werden, muss VSM Ein- und Ausgangsgrößen zur Verfügung stellen. Das Motormodell benötigt zum Beispiel die Pedalposition des Fahrers oder die berechnete Motordrehzahl als Input, während die Schaltstrategiesoftware Größen wie die Fahrzeuggeschwindigkeit oder den Lenkwinkel benötigt. Über die tatsächlich verwendeten Signale wird in Kapitel 3.4 genauer eingegangen.

3.2 Motor-/Abgasmodell

Aufgrund der zunehmenden Komplexität von Antriebssystemen ist es heutzutage unumgänglich bereits in der Konzeptphase, bis hin zur Implementierung, Simulationsumgebungen einzusetzen. Dadurch werden nicht nur die Entwicklungszeiten, sondern auch die Kosten drastisch reduziert.

In der modellbasierten Entwicklung von Motormodellen kommen echtzeitfähige Modelle zum Einsatz. Prinzipiell kann zwischen empirischen, physikalischen und semi-physikalischen Modellen unterschieden werden. Empirische Modelle basieren auf Messungen beziehungsweise Erfahrungswerten. Sie weisen innerhalb definierter Parameter eine hohe Genauigkeit bei sehr schneller Rechenzeit auf. Sie können allerdings nicht in der Vorentwicklungsphase eingesetzt werden, da noch keine Messdaten zur Verfügung stehen. Physikalische Modelle hingegen stützen sich auf physikalische Gesetzmäßigkeiten. Durch physikalische Komponenten kann ein größerer Anwendungsbereich abgedeckt werden, da sie eine bessere Extrapolation aufweisen und die Möglichkeit bieten, Hardwarespezifikationen einfach zu ändern. Aufgrund des hohen Aufwandes der Modellbildung und der Komplexität des Systems werden auch diese kaum in der Entwicklungsphase eingesetzt. Das semi-physikalische Modell kombiniert die Vorteile der empirischen und physikalischen Modelle. Dadurch kann ein optimales Zusammenspiel zwischen Genauigkeit, Berechnungszeit und Parametrisierung erreicht werden. [20]

In dieser Arbeit wird ein semi-physikalisches Motor- und Abgasmodell verwendet, welches von der Abteilung DEM (Modeling Component Identification) zur Verfügung gestellt wurde. Damit dieses in CRUISE M erstellte Motormodell in die Model.CONNECT Simulationsumgebung importiert und dort verwendet werden kann, ohne dass projektspezifische Daten preisgegeben werden, wurde dieses Modell durch einen CMC (Common Model Compiler) in ein FMI (Functional Mockup Interface) exportiert.

Im folgenden Abschnitt wird eine Übersicht über den Aufbau und die Funktionsweise des gesamten Motormodells geliefert. Für eine detailliertere Beschreibung der Vorgangsweise der Modellerstellung wird auf die Literatur [21] verwiesen.

a) Gesamtmodell

Das Gesamtmodell des Dieselmotors besteht prinzipiell aus dem Motor, einem ECU-Modell sowie Sensoren und Aktuatoren. Der Motor besteht dabei aus Modellen von Motor- und Abgasnachbehandlungskomponenten, Luftpfaden und Wärmeübergängen. Zur Ansteuerung des Motormodells wird ein Steuergerät benötigt, eine sogenannte ECU. Die vom Fahrzeug verwendete ECU wird üblicherweise über einen Hardware-in-the-Loop (HiL) Prüfstand mit der Simulation verbunden. Damit das Simulationsmodell allerdings eigenständig am Computer laufen kann, aber dennoch wie am Prüfstand betrieben wird, wurde eine ECU-Software entwickelt. Diese Software-in-the-Loop (SiL) Umgebung bietet den Vorteil, dass keine ECU-Hardware benötigt wird und die komplette Simulation des Motors am Computer durchgeführt werden kann. Die Modelle der Sensoren und Aktuatoren verbinden alle drei Bereiche miteinander. Sie müssen sorgfältig modelliert werden, um eine hohe Modellgenauigkeit zu gewährleisten. [21] Abbildung 3-6 zeigt die drei Teilbereiche des Gesamtmodells in Verbindung mit den gewählten Umweltbedingungen. Auf die wichtigsten Teilbereiche des Gesamtmodells wird in Kapitel 3.2b) eingegangen.

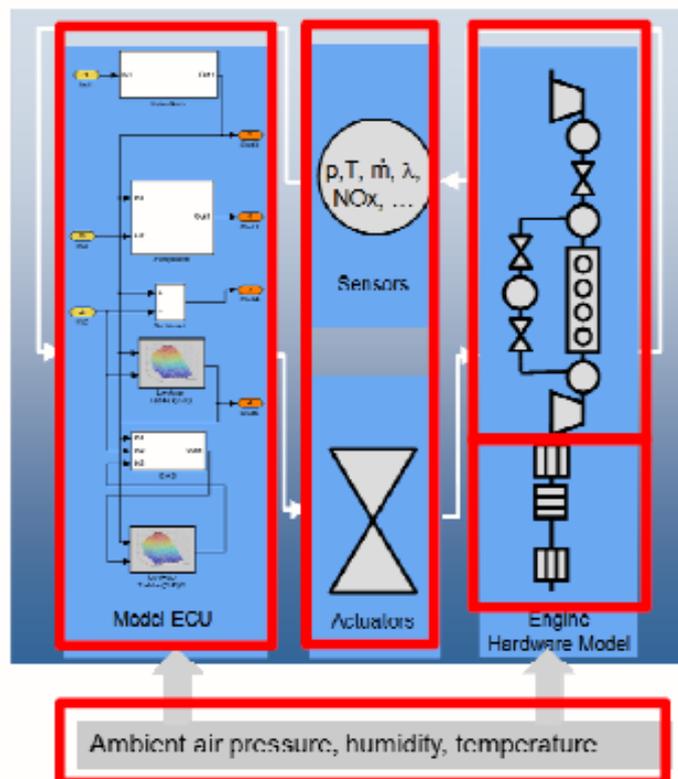


Abbildung 3-6: Gesamtmodell bestehend aus ECU-Steuergerät, Sensoren/Aktuatoren, Motor und Umweltbedingungen [20]

3 Simulationsumgebung und Eingangsdaten

Um all diese multi-physikalischen Modelle als eine gesamte Simulation betreiben zu können, müssen sie einer entsprechenden Simulationsumgebung zusammengeführt werden. Hierfür wird das Simulationsprogramm CRUISE M verwendet. Die semi-physikalischen Submodelle des Motors und der Abgasnachbehandlung werden im Simulationsprogramm AVL MOBEO (Model Based Engine Optimization) modelliert. Dieses Programm unterstützt die Kombination von Simulation und Testing, um bereits in der Konzeptphase Ergebnisse zu liefern, welche anschließend in der weiteren Entwicklungsphase bis hin zum SOP (Start of Production) durch Abstimmung aus Messdaten optimiert werden. [20]

Abbildung 3-7 zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer CRUISE M Simulationsumgebung mit integrierten MOBEO Modellen. Das Gesamtmodell kann hierbei in den Luftpfad, das Motormodell und das Modell des Abgassystems eingeteilt werden.

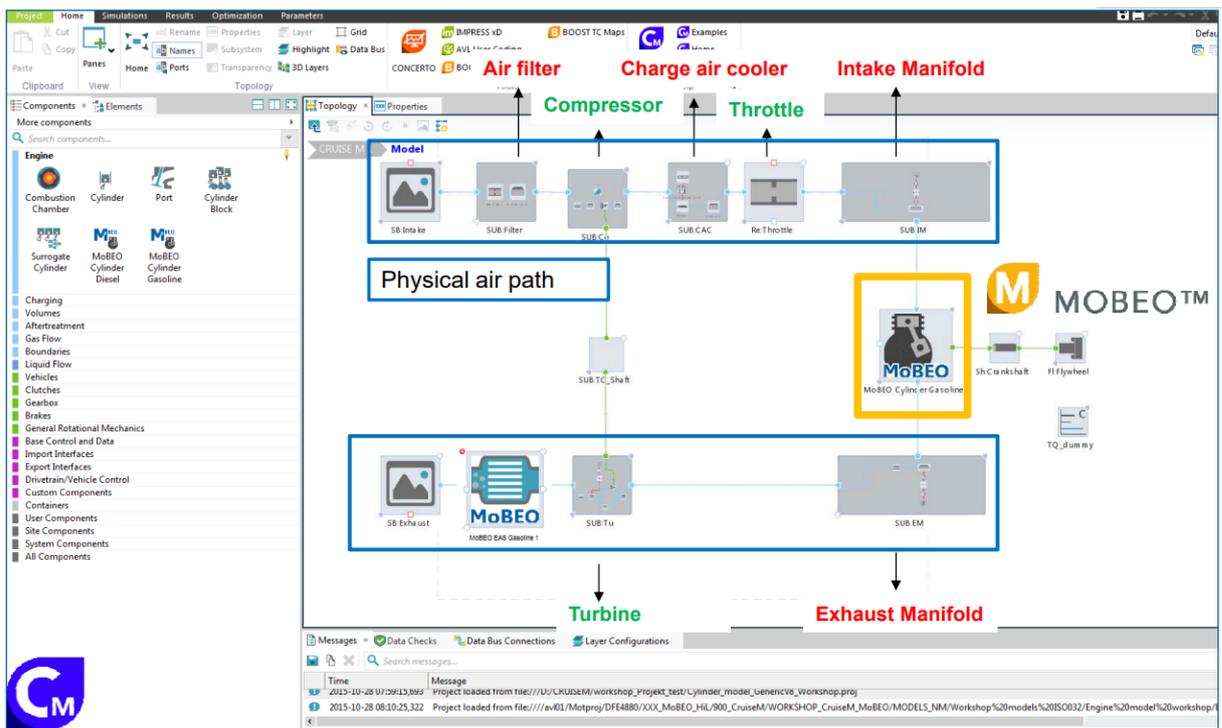


Abbildung 3-7: CRUISE M Simulationsumgebung [22]

b) Teilmodelle

3.2.1.b.1 Zylindermodell

Das Zylindermodell und dessen Submodelle stellen das aufwendigste Teilmodell dar. Zur Modellierung werden die realen Randbedingungen als Ein- und Ausgangsgrößen herangezogen. Diese werden in Abbildung 3-8 dargestellt. Der Großteil der Verbrennung wird hierbei durch das Netzwerk der Teilmodelle berechnet. Jedoch wird die Verbrennung nicht kurbelwinkelaufgelöst, sondern als stationärer Effekt abgebildet. [21] Dies bedeutet, dass Wellenvorgänge im Ein- und Auslasskanal nicht erfasst werden, sondern der ein- und auslassseitige Behälter mit konstantem Druck oder der Abgasbehälter mit zeitlich veränderlichem Druck angenommen werden. Dieser nulldimensionale Ansatz wird auch Füll- und Entleer-Methode genannt, da ein Sammelbehälter ohne räumliche Ausdehnung unter Verwendung der Energie- sowie Kontinuitätsgleichung für Kontrollvolumen zur Modellbeschreibung dient. [23] Der Einfluss von Lage und Dauer der Einspritzereignisse wird jedoch miteinbezogen, wodurch sich durch die stetige Änderung der Eingangsgrößen ein dynamisches Motormodell ergibt. Der empirische Anteil der Teilmodelle ist unterschiedlich ausgeprägt und ersetzt räumlich oder zeitlich komplexe Systeme durch effektive Mittelwerte. Beispielhaft wird der effektive Wärmeübergangskoeffizient vom Arbeitsraum auf die Zylinderwand empirisch ermittelt. Durch die Verwendung dieser empirischen Modelle wird nicht nur die Komplexität des Modells verringert, sondern gleichzeitig die Berechnungsgeschwindigkeit erhöht. [21]

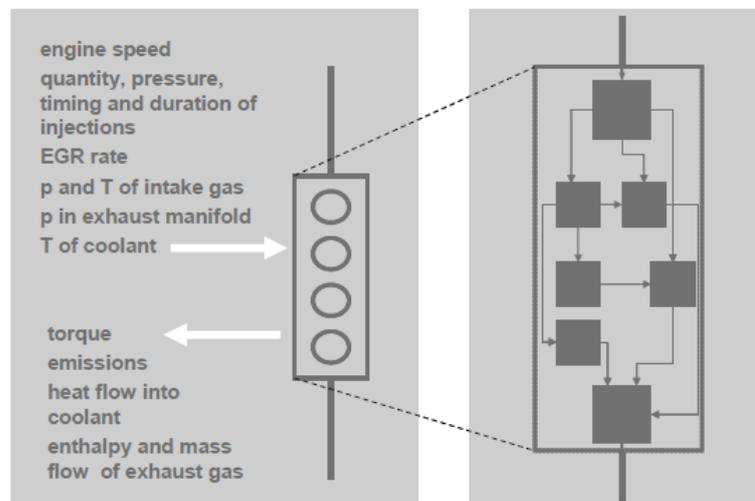


Abbildung 3-8: Ein- und Ausgangsgrößen des Zylindermodells in Verbindung mit dem zugehörigen Submodell-Netzwerk [21]

In der Vorentwicklungsphase sind die Werte der empirischen Parameter durch Erfahrungswerte vorgegeben. Im weiteren Verlauf eines Projektes werden diese Parameter durch Messergebnisse abgestimmt und deren Güte somit verbessert. [21] Abbildung 3-9 zeigt den generellen Workflow zur Erstellung des Motormodells, angefangen von der Parametrisierung des Motormodells mit grundlegenden Motordaten bis hin zur Optimierung mit Hilfe von Messdaten.

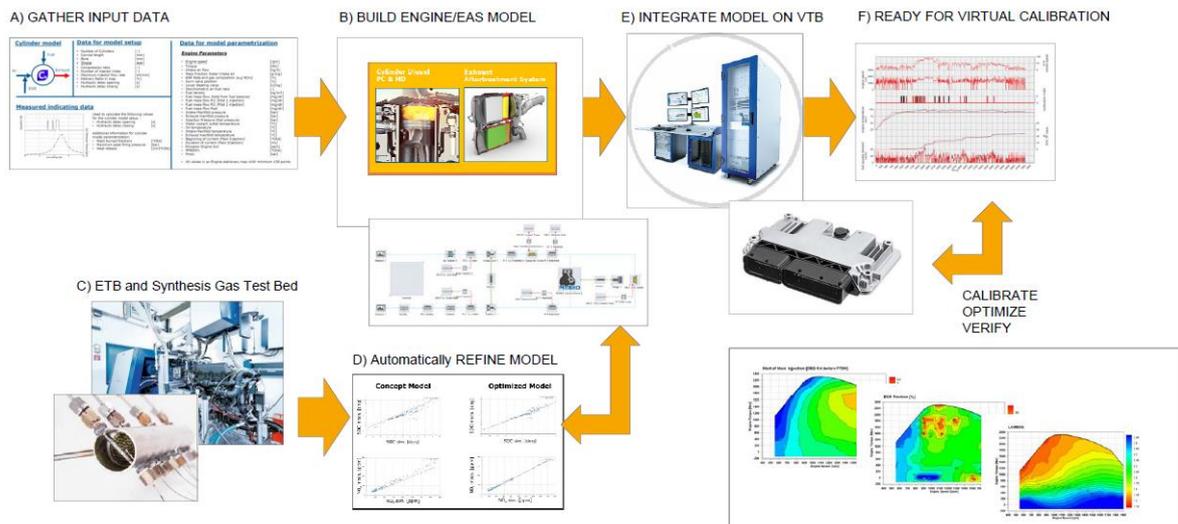


Abbildung 3-9: Workflow zur Erstellung des Motormodells [22]

3.2.1.b.2 Luftpfad

Der Luftpfad wird durch nulldimensionale physikalische Modelle beschrieben. Diese sind auf Volumina und Strömungswiderstände reduziert. In deren Wechselwirkung können die meisten dynamischen Effekte quantitativ erfasst werden. Durch hochentwickelte Wärmeübergangsmodelle weisen diese Volumina eine Wärmekapazität auf und modellieren den Wärmeübergang von ihrer Außenwand zur Umgebung. [21]

3.2.1.b.3 Turbolader

Um den Massenstrom und den Wirkungsgrad der Turbine zu bestimmen, wird zur Vereinfachung die Freilauflinie genutzt. Da Turbine und Kompressor auf einer Welle liegen, ist die mechanische Antriebsleistung des Kompressors gegeben. Der Massenstrom der Turbine und die aufgenommene Leistung werden aus dem Kompressor-Kennfeld bei gegebener Drehzahl entnommen. Das Kennfeld kann hierbei durch Extrapolation der Prüfstandmessungen abgesichert werden. Die Drehzahl des Turboladers ändert sich durch die Differenz zwischen mechanischer Antriebsleistung und aufgenommener Leistung für die Kompression. [21]

3.2.1.b.4 Abgasnachbehandlung

Die Abgasnachbehandlung besteht aus den katalytischen Komponenten, dem Partikelfilter sowie zugehörigen Verbindungsrohren, Injektoren und Sensoren. Erstere beinhalten folgende Phänomene: [21]

- Oxidationskatalysator:
 - nulldimensionale Abbildung
 - Wärmekapazität und Wärmeverlust nach außen
 - Kinetik für HC- und CO-Verbrennung
 - NO/NO₂ –Umwandlung
 - HC-Speicherung und Desorption
- Dieselpartikelfilter (DPF):
 - nulldimensionale Abbildung
 - Feinstaub-Reduktion mit sehr hohem Wirkungsgrad
- SCR-Katalysator:
 - nulldimensionale Abbildung
 - Wärmekapazität und Wärmeverlust nach außen
 - NO_x-Reduktion als Funktion von Temperatur, NO₂-Anteil und Raumgeschwindigkeit

3.2.1.b.5 Steuereinheit

Das ECU-Steuergerät verfügt über die wichtigsten Steuer- und Regelfunktionen einer realen ECU. Diese wären unter anderem: [21]

- Haupteinspritzmengenberechnung basierend auf Fahrerwunsch und Motorzustand
- Einspritzzeitpunktberechnung und Verlauf der Vor- und Nacheinspritzungen
- Momenten- beziehungsweise Mengenbegrenzung zur Emissionsreduktion
- Luftmassen- und Ladedruckregelung
- Leerlaufdrehzahlregelung

c) Ein- und Ausgangsgrößen

Das in dieser Arbeit verwendete Modell muss aufgrund des Einsatzes der Co-Simulation etwas angepasst werden, denn das VSM-Modell gibt dem Motor kein Drehmoment, sondern eine Pedalposition vor. Die benötigte Einspritzmenge und das sich daraus ergebende Drehmoment wird somit über den Wert der Pedalposition berechnet. Üblicherweise ist hingegen ein Fahrer im Motormodell integriert, welcher über das geforderte Drehmoment auf die Pedalposition zurückrechnet und die Einspritzmenge bestimmt. Den Pedalwert als Eingangsgröße zu verwenden stellt somit auch sicher, dass nicht zwei Fahrermodelle verwendet werden. Die zweite wichtige Eingangsgröße ist die benötigte Drehzahl, welche wie im Kapitel 3.1a) beschrieben, über das Rotationsgleichgewicht bestimmt wird. Ausgangsgrößen sind unter anderem die Motoremissionen in Volumenkonzentration, der Kraftstoffverbrauch in Kilogramm pro Stunde sowie das Drehmoment in Newtonmeter.

d) Kennfelderzeugung und Berechnungen

Damit die Schaltstrategiesoftware richtig parametrisiert werden kann, müssen Kennfelder wie das in Abbildung 3-10 dargestellte Verbrauchskennfeld erstellt werden. Die strichpunktierten Linien stellen die Motorleistung für unterschiedliche Pedalpositionen, die durchgezogenen Linien konstanten spezifischen Kraftstoffverbrauch, sowie die strichlierten Linien die Schaltkennlinien in der Ebene dar.

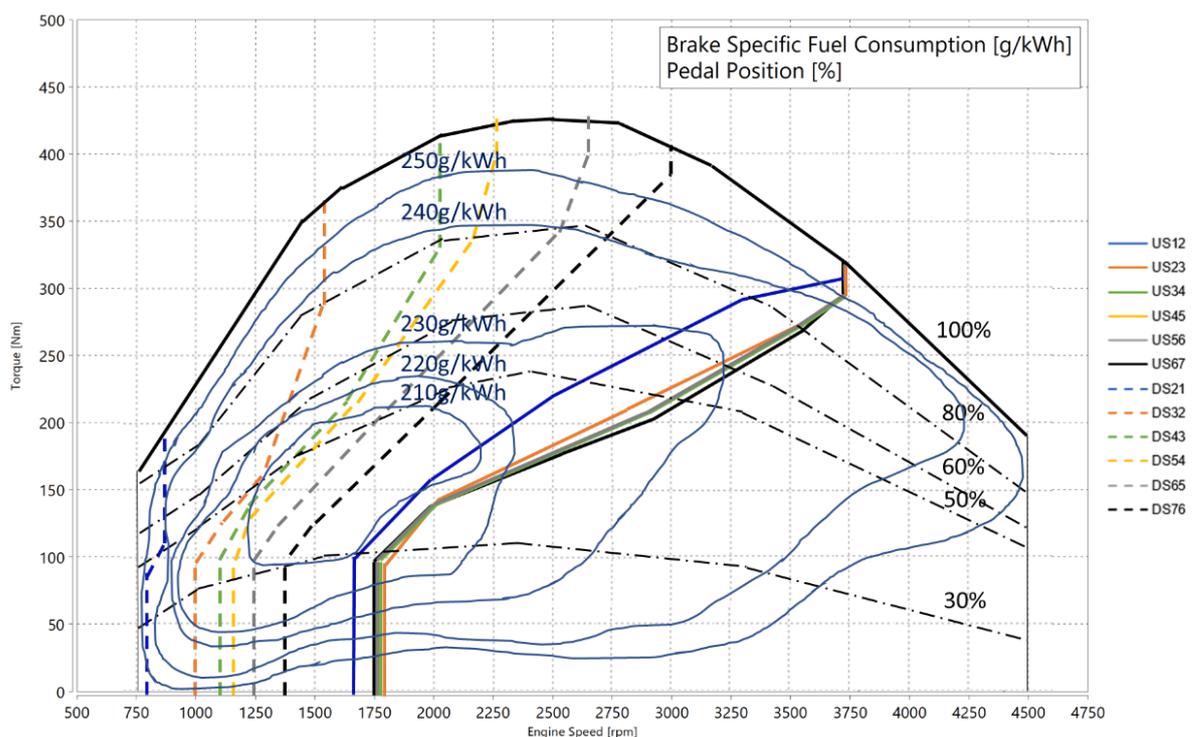


Abbildung 3-10: Schematisches Motor-/Verbrauchskennfeld mit den zugehörigen Schaltkennlinien

Die Daten für diese Kennfelder werden durch Mapping in der Simulationsumgebung Model.CONNECT generiert. Um diese Daten weiterverwenden zu können, müssen diese zuerst entsprechend aufbereitet werden. Das letztendliche Erstellen der Kennfelder erfolgt mit Hilfe des Programmes AVL Concerto.

Der spezifische Kraftstoffverbrauch ergibt sich aus dem Kraftstoffverbrauch dividiert durch die Leistung.

$$\text{BSFC} \left[\frac{g}{kWh} \right] = \frac{\text{Massenstrom Kraftstoff} \left[\frac{kg}{h} \right]}{\frac{M[Nm] \cdot 2 \cdot \pi \cdot n[rpm]}{60}} \quad (3-2)$$

Die Emissionen von Kohlenstoffmonoxid CO, Kohlenstoffdioxid CO₂, Kohlenwasserstoff THC und Stickoxid NO_x sind molbasiert und werden daher in Massenemissionen umgewandelt. Die Berechnung wird im Folgenden beschrieben.

$$\text{CO} \left[\frac{kg}{h} \right] = \text{Abgasmassenstrom} \left[\frac{kg}{h} \right] \cdot \frac{\text{Molare Masse}_{CO}}{\text{Molare Masse}_{Abgas}} \cdot \frac{\text{CO} - \text{Emiss. [ppm]}}{10^6} \quad (3-3)$$

$$\text{CO}_2 \left[\frac{kg}{h} \right] = \text{Abgasmassenstrom} \left[\frac{kg}{h} \right] \cdot \frac{\text{Molare Masse}_{CO_2}}{\text{Molare Masse}_{Abgas}} \cdot \frac{\text{CO}_2 - \text{Emiss. [\%]}}{100} \quad (3-4)$$

$$\text{THC} \left[\frac{kg}{h} \right] = \text{Abgasmassenstrom} \left[\frac{kg}{h} \right] \cdot \frac{\text{Molare Masse}_{THC}}{\text{Molare Masse}_{Abgas}} \cdot \frac{\text{THC} - \text{Emiss. [ppm]}}{10^6} \quad (3-5)$$

$$\text{NO}_x \left[\frac{kg}{h} \right] = \text{Abgasmassenstrom} \left[\frac{kg}{h} \right] \cdot \frac{\text{Molare Masse}_{NO_x}}{\text{Molare Masse}_{Abgas}} \cdot \frac{\text{NO}_x - \text{Emiss. [ppm]}}{10^6} \quad (3-6)$$

3 Simulationsumgebung und Eingangsdaten

Tabelle 3-1 gibt die molaren Massen der entsprechenden Emissionskomponenten an. Bei den Stickoxiden wird die Normdichte von NO₂ verwendet. Da das Abgas bei einem Dieselmotor hauptsächlich aus Luft besteht, wird für die Abgaskomponente die molare Masse von Luft herangezogen.

Tabelle 3-1: Molaren Massen der Emissionskomponenten

<i>Komponenten</i>	<i>Molare Masse [g/mol]</i>
CO	28,01
CO ₂	44,01
THC	14,026
NO _x	46,01
Abgas	28,95

Motordaten:

- Hubraum: 2l
- Anzahl der Zylinder: 4
- Leistung: 125kW
- Nenndrehzahl: 3500rpm
- Maximales Drehmoment: 430Nm
- Leerlaufdrehzahl: 800rpm
- Kraftstoff: Diesel

3.3 Schaltstrategiesoftware

Die Schaltstrategiesoftware ist in einem Fahrzeug in der TCU hinterlegt und besteht aus einer Software sowie dem dazugehörigem Datenstand. Da die reale TCU nicht verwendet wird, wurde in einer vorherigen Arbeit ein Matlab Simulink Modell aufgebaut, welches die wichtigsten Funktionen der realen Software beinhaltet. Der Aufbau dieses Modells wird in Abschnitt 3.3a) erklärt. Der Datenstand der Software wird im Programm CRETA gespeichert und nach entsprechender Applikation in das Simulationsmodell eingebunden. Dieser Vorgang wird im Abschnitt 3.3.1.a.3 erläutert.

a) Gesamtmodell (Simulink Modell)

Die gesamte Schaltstrategie ist in einem Simulink Modell hinterlegt. Das Programm Simulink verwendet hierbei grafische Schaltblöcke zur Strukturierung und Visualisierung des Modells. Diese Schaltblöcke wiederum besitzen Ein- und Ausgänge. Die Berechnung der Ausgänge erfolgt durch hinterlegte Gleichungen, welche unter anderem technische und physikalische Problemlösungen beschreiben. Durch die Verbindung dieser Blöcke ergibt sich somit das Gesamtmodell. Nach der Parametrisierung des Modells kann dieses anschließend für die Simulation verwendet werden.

In der obersten Ebene werden zuerst die Eingangssignale verarbeitet beziehungsweise in Funktionsblöcken validiert, um die Richtigkeit der Signale zu überprüfen. Weiters sind auf dieser Ebene einige Funktionsblöcke zur Bestimmung der Fahrsituation abgelegt, wie das Kurven-Erkennungs Modell oder das Modell zur Last- und Steigungserkennung. Die Ausgänge all dieser Funktionsblöcke dienen zum Schluss als Eingänge in das Gangauswahlmodell. In Abbildung 3-11 wird die oberste Ebene des Simulink Modells dargestellt.

3 Simulationsumgebung und Eingangsdaten

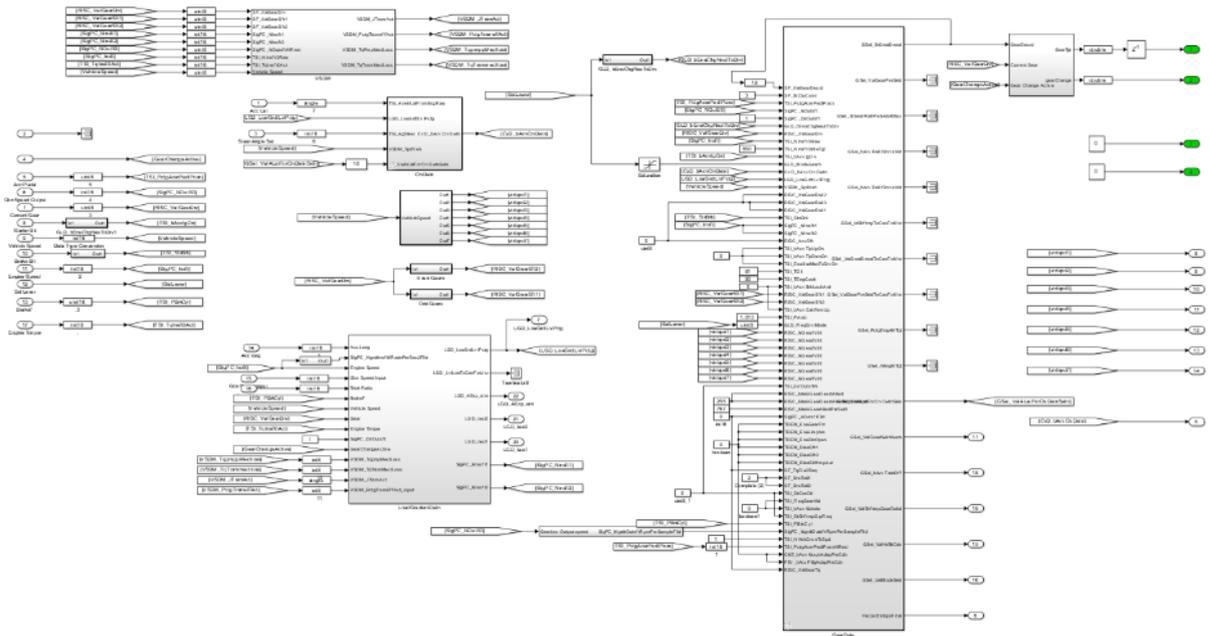


Abbildung 3-11: Schaltstrategie-Modell in Simulink

3.3.1.a.1 Modell zur Last- und Steigungserkennung

Dieses Modell berechnet die Steigung der Fahrbahn. Einige wichtige Eingangsgrößen sind hierbei:

- Längsbeschleunigung
- Fahrzeuggeschwindigkeit
- Übersetzungsverhältnis
- Motordrehzahl
- Motordrehmoment
- Gang
- Bremskraft
- Getriebeeingangs-drehzahl

Die Steigung wird allerdings nicht nur durch diese Eingangsgrößen bestimmt, sondern auch durch Parameter beziehungsweise Kennfelder, welche im jeweiligen Datenstand der Software hinterlegt sind. Die Berechnung der Steigung selbst erfolgt durch Submodelle.

Ein Submodell der Last- und Steigungserkennung berechnet zum Beispiel die erwartete Beschleunigung des Fahrzeuges. Dessen Submodelle berücksichtigen unter anderem Effekte wie das Durchrutschen der Kupplung oder Wirkungsgrade.

Durch die hinterlegten Widerstandskennlinien und das zur Verfügung gestellte Drehmoment ergibt sich die überschüssige Antriebskraft des Motors und im Zuge dessen die erwartete Beschleunigung. Letztendlich wird aus der Differenz von tatsächlicher zu erwarteter Beschleunigung die Steigung des Fahrzeuges berechnet.

3.3.1.a.2 Kurven-Erkennungs Modell

Das Modell zur Erkennung einer Kurve wird mit folgenden Eingangsgrößen verknüpft:

- Querschleunigung
- Fahrzeuggeschwindigkeit
- Lenkwinkel
- Steigung
- Parameter zur Bestimmung des ausgewählten Modus

3.3.1.a.3 Gangauswahlmodell

Das bedeutendste und komplexeste Modell ist das Modell zur Bestimmung des erforderlichen Ganges. Als Eingangsgrößen dienen nicht nur die von Model.CONNECT zur Verfügung gestellten Signale, sondern ebenso die berechneten Signale der vorherigen Funktionsblöcke. Die Anzahl der Signale liegt durch dessen Submodelle (Signalverarbeitung und Fahrsituationserkennung) schnell im dreistelligen Bereich, wodurch die Komplexität eines solchen Modells ersichtlich wird. Anhand dieser Signale wird entschieden, wie mit der aktuellen Fahrsituation umgegangen wird. Der gewünschte Gang wird durch unterschiedliche Priorisierung der Fahrbarkeitsfunktionen und Modes berechnet. Der letzte Funktionsblock des Modells vergleicht den gewünschten Gang mit dem Aktuellen, beziehungsweise überprüft, ob bereits eine Schaltung durchgeführt wird, und bestimmt daraus den Zielgang als finale Ausgangsgröße.

b) Datenstandsanpassung

Damit die Modelle Berechnungen durchführen können, müssen diese auch entsprechend parametrisiert werden. Hierfür wird das Programm INCA verwendet. Um den geänderten Datenstand der Schaltstrategiesoftware in einer separaten Datei zu speichern, wird das Tool AVL CRETA herangezogen. In diesem können Datenstände für unterschiedliche Fahrzeugvarianten generiert, und wiederum in das benötigte Ausgabeformat exportiert werden.

In dieser Arbeit wird eine bereits im Fahrzeug implementierte Software mit zugehörigem Datenstand verwendet. Der Datenstand muss allerdings an den unterschiedlichen Motor entsprechend angepasst werden. Dies bedeutet, dass dessen Schaltkennfelder verändert werden müssen. Die Vorgehensweise zur Änderung der Schaltkennlinien wird im folgenden Abschnitt erläutert. Im darauffolgenden Abschnitt wird beschrieben, welche Fahrbarkeitsfunktionen anschließend deaktiviert werden.

3.3.1.b.1 Anpassung des Schaltkennfelds

Damit die Getriebesoftware den zum Betriebspunkt des Motors passenden Gang vorgeben kann, müssen dessen Schaltkennfelder festgelegt werden. In dieser Arbeit werden die Schaltkennfelder für ebene Fahrt, sowie die Kennfelder für Bergauf- sowie Bergabfahrt im Drive-Modus angepasst. Als Grundlage dienen die bereits implementierten Kennfelder. Die Anpassung der Schaltkennlinien erfolgt mit einem speziellen Tool. Anschließend kann in einer Tabelle die Abhängigkeit von der Getriebeausgangsdrehzahl beziehungsweise der Fahrzeuggeschwindigkeit zum Pedalwert ausgegeben werden. Die Grundabstimmung der Kennfelder soll eine möglichst gute Fahrbarkeit des Fahrzeuges erzielen. Die Überprüfung dieser Kennfelder wird in weiterer Folge mit dem Programm SPA durchgeführt.

In dieser Arbeit werden nur die Schaltkennfelder des Drive-Modus verändert, da auch nur diese in der Simulation verwendet werden und dieser Modus hauptsächlich Anwendung findet. In der benutzten Software werden drei Kennfelder zur Verfügung gestellt, das Kennfeld für ebene Fahrbahn, sowie die Interpolationskennfelder für Bergauf- und Bergabfahrt.

▪ Schaltkennfeld auf ebener Fahrbahn

Zu Beginn wird das wichtigste Kennfeld, das für ebene Fahrbahn, abgestimmt. Die Kennlinien werden anfangs durch die Motordrehzahl bestimmt, welche in Abbildung 3-12 gezeigt werden. Die Hochschaltkennlinien, auch Upshift-Lines (US) genannt, stellen die durchgezogenen Linien dar. Die Rückschaltkennlinien, oder Downshift-Lines (DS), werden strichliert dargestellt.

Hochschaltkennlinien:

Fahrpedalposition > 95%: Hier wird darauf geachtet, dass die maximale Drehzahl des Motors nicht überschritten wird, wobei sich die entsprechenden Schaltkennlinien ergeben. Für diesen Motor ist dies bei etwa 3800 Umdrehungen pro Minute der Fall. Dies wird bei allen Gängen durchgeführt.

Fahrpedalposition < 25%: In diesem Bereich wird darauf Rücksicht genommen, dass die Drehzahl im Bereich „minimalen Verbrauchs“ liegt. Die Zieldrehzahl zur erforderlichen Hochschaltung kann hier im BSFC-Kennfeld (siehe Abbildung 3-10) abgelesen werden. Diese liegt bei einer Motordrehzahl von etwa 1800 Umdrehungen pro Minute. Die Hochschaltung vom ersten in den zweiten Gang erfolgt hingegen aus Komfortgründen so früh wie möglich. Diese ergibt sich aus der minimalen Drehzahl im zweiten Gang, bei welcher der Motor noch vernünftig betrieben werden kann.

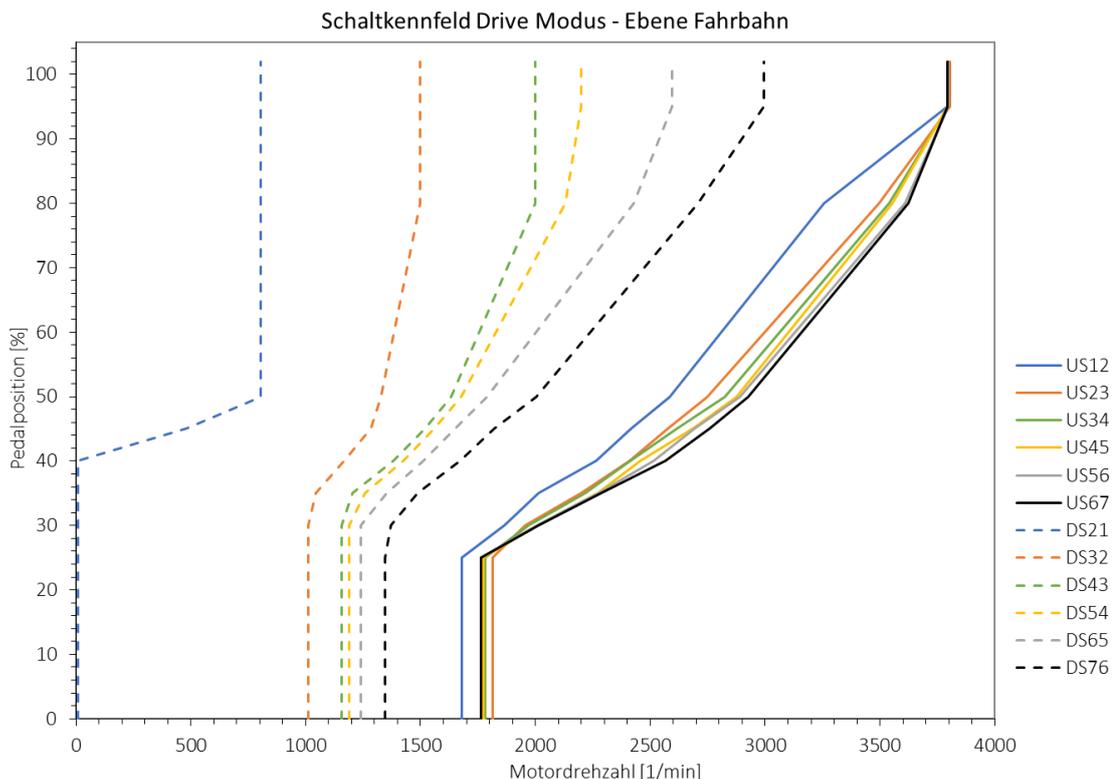


Abbildung 3-12: Schaltkennlinien in Abhängigkeit von der Pedalposition und der Motordrehzahl

Rückschaltkennlinien:

Fahrpedalposition < 25%: Die Rückschaltkennlinien werden so abgestimmt, dass die Rückschaltung bei möglichst niedriger Motordrehzahl erfolgt. Als minimale Motordrehzahl wird ein Wert von etwa 1000 Umdrehungen pro Minute festgelegt. Jedoch muss dabei auch auf das Geschwindigkeitsband zwischen Hoch- und Rückschaltung (siehe Abbildung 3-13) Rücksicht genommen werden, welches in etwa zwischen 4 und 6 Stundenkilometern betragen soll, um ein Schaltpendeln zu vermeiden. Aufgrund dieses Kompromisses wird das Band bei höherer Geschwindigkeit etwas größer. Die Motordrehzahlen liegen dadurch im Bereich zwischen 1000 und 1350 Umdrehungen pro Minute. Die Rückschaltung vom zweiten in den ersten Gang wird aus Komfortgründen so festgelegt, dass diese erst knapp bei Fahrzeugstillstand erfolgt.

Fahrpedalposition > 95%: In diesem Bereich werden die Rückschaltkennlinien so gewählt, dass das Drehzahlband des Motors so gut wie möglich ausgenutzt wird. Als Richtwert soll die Kennlinie so festgelegt werden, dass nach der Rückschaltung erst nach zwei Sekunden wieder in den nächsten Gang geschaltet wird. Da die Fahrzeugbeschleunigung mit zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit abnimmt, werden die Kennlinien immer weiter zu höheren Drehzahlen verschoben. Dies bedeutet, dass das Geschwindigkeitsband zwischen Hoch- und Rückschaltkennlinie in hohen Gängen geringer ist als in niedrigen. Dies ist mit einer früheren Rückschaltung verbunden, wodurch alsbald eine höhere Antriebsleistung geliefert, und infolgedessen ein besseres Beschleunigungsverhalten erreicht wird.

Übergangsbereich:

80% < Fahrpedalposition < 95%: Der Übergang der Hoch- und Rückschaltkennlinien wird so definiert, dass ein möglichst vertikaler Übergang erfolgt. Dadurch wird eine Schaltung vermehrt durch Geschwindigkeitsveränderungen, und nicht durch Fahrpedalpositionsänderungen ausgelöst. Bei höheren Fahrpedalpositionen wird somit die Drehzahl des Motors nahezu voll ausgenutzt.

40% < Fahrpedalposition < 80%: Die Abstimmung im mittleren Bereich wird maßgeblich durch die Verwendung von Hysteresekurven vorgegeben. Hierbei wird darauf geachtet, dass zwischen den einzelnen Hoch- und Rückschaltkennlinien eine Hysterese vorliegt, wodurch Schaltpendeln verhindert wird. Außerdem sollen die Kennlinien so ausgelegt sein, dass bei Beschleunigung mit konstantem Fahrpedal ein harmonisches Schaltverhalten erreicht wird.

25% < Fahrpedalposition < 40%: Der Übergang wird so definiert, dass Fahrpedalpositionsänderungen schnell zu einer Hoch- oder Rückschaltung führen, um das Ansprechverhalten des Fahrzeuges zu verbessern.

Die Getriebeausgangsdrehzahl, beziehungsweise die Fahrzeuggeschwindigkeit, werden durch die Getriebeübersetzung bestimmt, woraus sich das in Abbildung 3-13 abgebildete Schaltkennfeld ergibt.

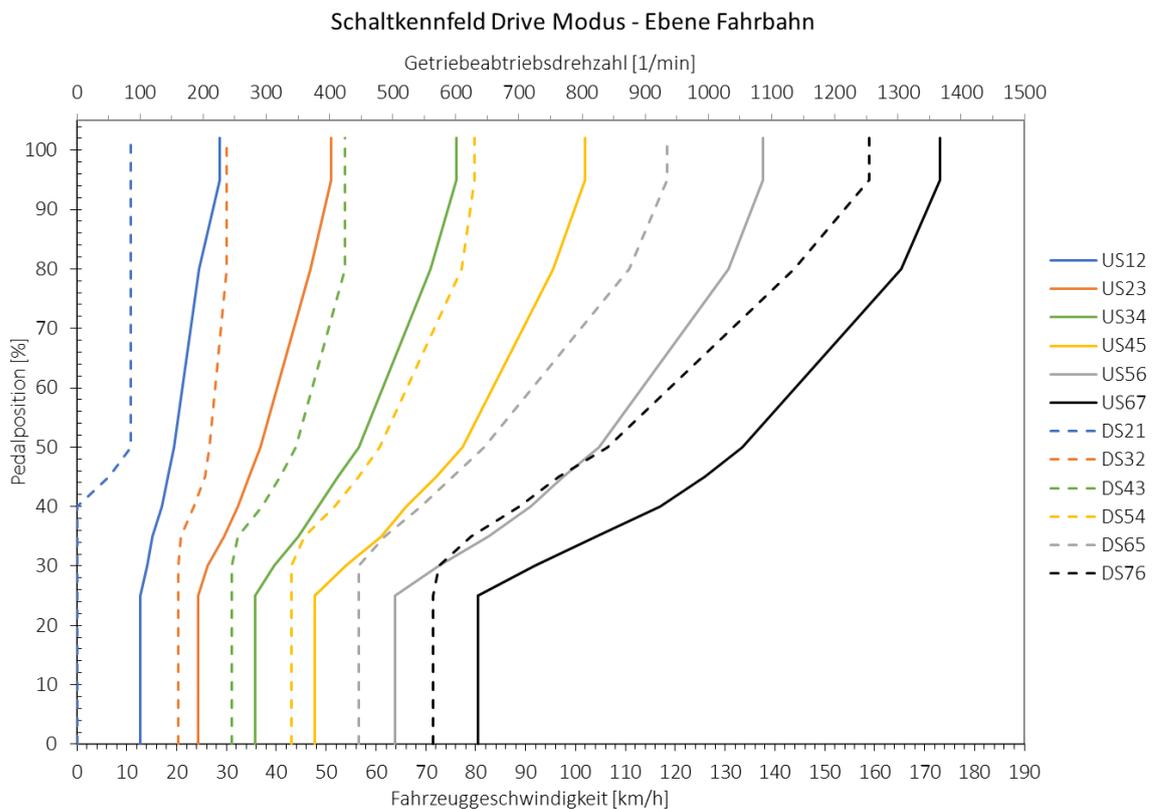


Abbildung 3-13: Schaltkennfeld im Drive Modus auf ebener Fahrbahn

▪ Schaltkennfeld für Bergauffahrt

Die Kennlinien der Hochschaltungen für Bergauffahrt, beziehungsweise die Kennlinien für erhöhten Fahrwiderstand, werden so festgelegt, dass die maximale Motordrehzahl in allen Pedalpositionen ausgenutzt wird. Die Rückschaltkennlinien werden ebenso zu höherer Drehzahl versetzt, wodurch sichergestellt werden soll, dass bei Bergauffahrt immer genügend Leistung zur Verfügung steht. Die minimale Motordrehzahl wird auf etwa 1800 Umdrehungen pro Minute festgelegt. Damit das Geschwindigkeitsband zwischen der Hoch- und Rückschaltkennlinie zwischen dem zweiten und dritten Gang (US23 – DS32) groß genug ist, liegt letztere bei einer Motordrehzahl von etwa 1500 Umdrehungen pro Minute. Die Rückschaltkennlinie vom zweiten auf den ersten Gang bleibt im Vergleich zu ebener Fahrbahn gleich. Das Schaltkennfeld für Bergauffahrt wird in Abbildung 3-14 gezeigt. Prinzipiell darf nicht vergessen werden, dass dieses Kennfeld für einen maximalen Fahrwiderstand gilt. Befindet sich das Fahrzeug beispielsweise nur auf einer leichten Steigung, so wird zwischen dem Kennfeld auf ebener Fahrbahn und diesem entsprechend interpoliert.

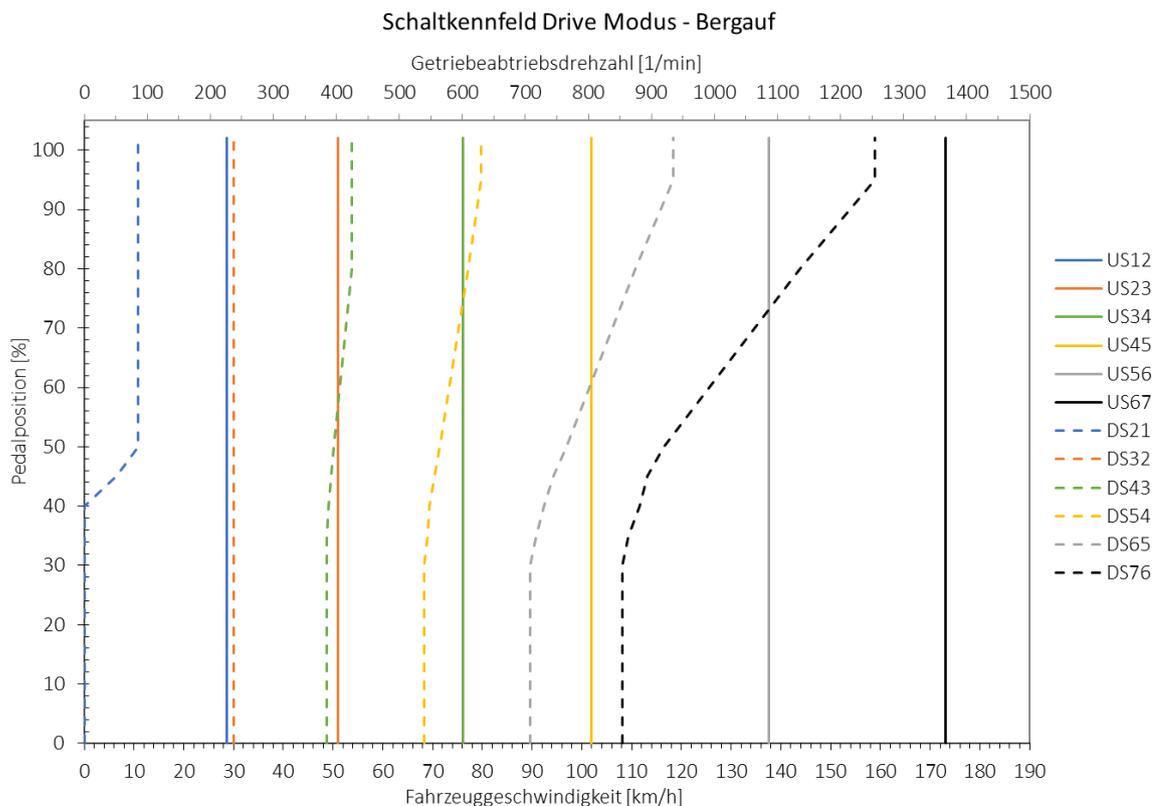


Abbildung 3-14: Schaltkennfeld im Drive Modus für Bergauffahrt

▪ Schaltkennfeld für Bergabfahrt

Bei Bergabfahrt werden, wie bei Bergauffahrt, die Schaltkennlinien für Hochschaltungen bei größtmöglichem Gefälle zu maximaler Motordrehzahl verschoben. Dadurch wird bei Bergabfahrt die Motorbremse besser ausgenützt, weil dessen Bremswirkung bei höheren Drehzahlen des Motors größer ist. Die Rückschaltkennlinien werden wie auf ebener Fahrbahn verwendet. Ist eine frühere Rückschaltung bei Geschwindigkeitsabnahme erforderlich, wird dies durch die Funktion der bremskraftabhängigen Rückschaltung erkannt und die Schaltzeitpunkte der Rückschaltungen werden zu höheren Drehzahlen verschoben.

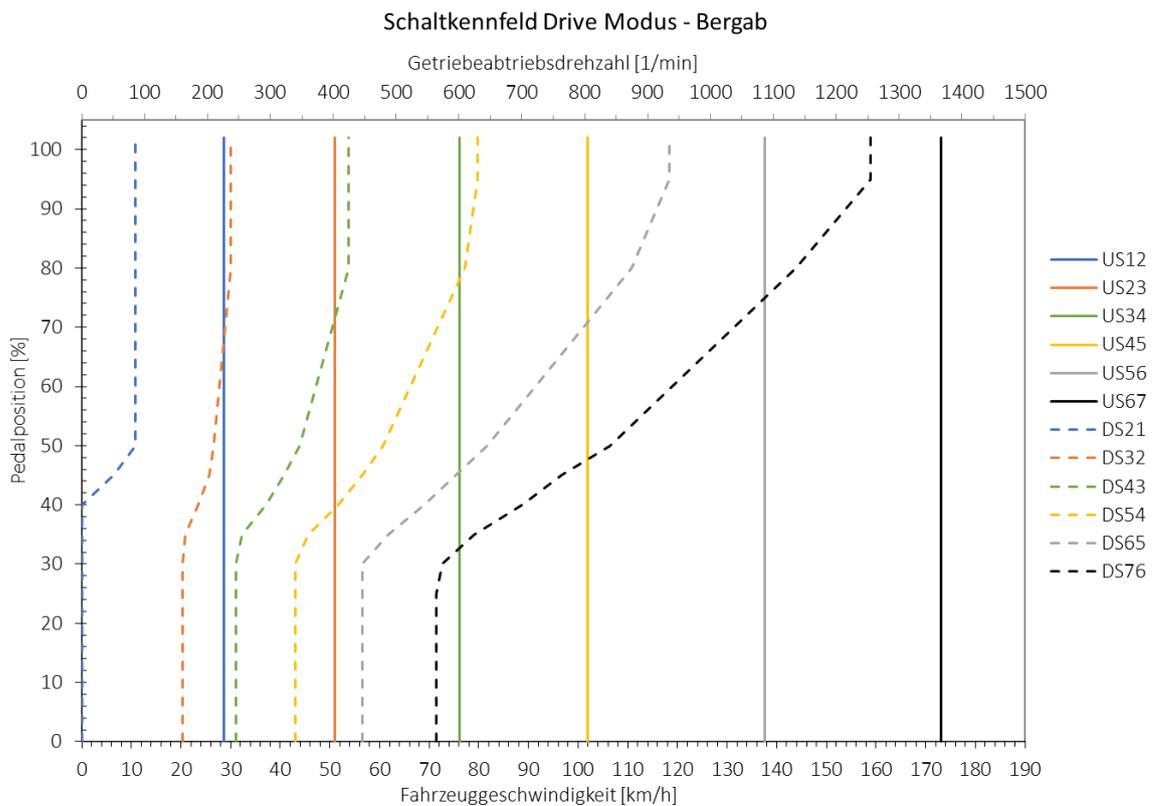


Abbildung 3-15: Schaltkennfeld im Drive Modus für Bergabfahrt

3.3.1.b.2 Einbindung in die vollständige Schaltstrategiesoftware

Nun müssen diese Schaltkennfelder in die bereits bestehende Software importiert werden. Die Software ist als a2l-Datei in Creta abgelegt. Dessen Datenstände sind als hex-Datei gespeichert.

Um die originale Software der Schaltstrategie nicht zu verändern, wird diese geklont und ein neues Projekt angelegt. Anschließend wird der Datenstand verändert. Die Schaltkennlinien des Drive Modus werden am besten mittels der Filterfunktion gefunden. Folgende Filter werden hierbei für die drei unterschiedlichen Kennfelder verwendet:

- *Gsel_NPoint*ForShftmp1RoadNorm_M → ebene Fahrbahn
- *Gsel_Npoint*ForShftmp1RoadUp_M → Bergauffahrt
- *Gsel_Npoint*ForShftmp1RoadDwn_M → Bergabfahrt

Für jede Schaltkennlinie ist eine Tabelle hinterlegt, wo die Getriebeausgangsdrehzahl der Pedalposition zugeordnet wird. Abbildung 3-16 zeigt, wie die gewünschten Kennfelder in Creta gefunden werden. Sind alle Änderungen fertiggestellt, so wird ein neuer Datenstand, auch Revision genannt, erstellt. Diese Revision wird nun als Basis für die Funktionsdeaktivierung herangezogen, auf welche im nächsten Abschnitt eingegangen wird.

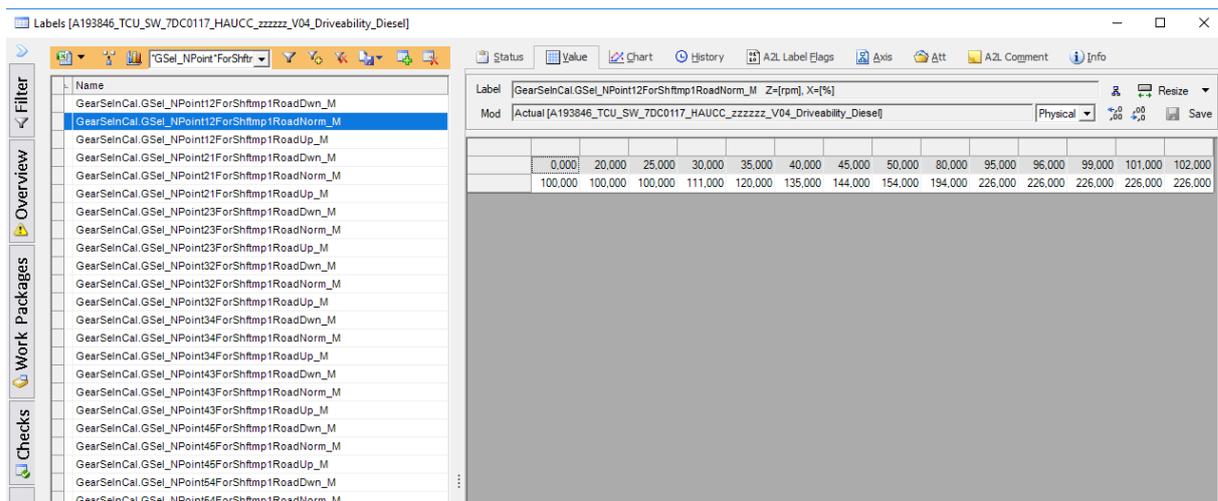


Abbildung 3-16: Anpassung des Datenstandes in Creta [24]

3.3.1.b.3 Deaktivierung

Die Deaktivierung der Fahrbarkeitsfunktionen wird ebenso in INCA vorgenommen und anschließend der Datenstand mit dem Programm CRETA erzeugt. In dieser Arbeit werden folgende Parameter verändert:

- GearSelInCal.GSel_ValTmrCrvDetnDeb → Curve-Detection
- GearSelInCal.GSel_NBrkGrdtCmpOfs → Brake Press. Dep. Downsh.
- GearSelInCal.GSel_NBrkCmpOfs → Brake Press. Dep. Downsh.
- GearSelInCal.GSel_PBrkThdOn_P → Brake Press. Dep. Downsh.
- GearSelInCal.GSel_ValTmrBrkCmpDebMode → Brake Press. Dep. Downsh.
- GearSelInCal.GSel_ValPedlGrdtThdFastOff → Fast-Off
- GearSelInCal.GSel_ValTmrThdFastOff → Fast-Off

c) Ein- und Ausgangsgrößen

Die vorhin vorgestellten Revisionen ohne und mit Deaktivierung der Fahrbarkeitsfunktionen werden nun als Matlab-Datei exportiert und jeweils in das Simulink Modell importiert. Diese beiden vollständigen Simulink Modelle können somit in die entsprechende Model.CONNECT-Simulationsumgebung geladen werden. Damit ein Simulink Modell in solch eine Simulationsumgebung eingebunden werden kann, müssen dessen Ein- und Ausgangsgrößen entsprechend vorbereitet werden. Hierfür wird die Schnittstelle ICOS (Independent Co-Simulation) herangezogen, welche im Zuge des Projektes bereits erstellt wurde.

Aufgrund dessen, dass das Simulink Modell und zugehörige Eingangssignale vorbereitet werden müssen, und dies mit einem großen Arbeitsaufwand verbunden ist, werden in dieser Arbeit irrelevante Eingangssignale nicht in die Software eingebunden, wodurch einige Modes und Funktionen nicht aktiviert werden können. Dies ist unter anderem der Modus für Kaltstart beziehungsweise Katalysator-Vorheizung. Das Modell wurde aber so vorbereitet, dass die wichtigsten und relevantesten Funktionen der Schaltstrategie funktionieren. Dies beinhaltet die Funktionen Fast-Off, Kurven-Erkennung und die bremskraftabhängige Rückschaltung.

3.4 Model.CONNECT

Model.CONNECT ist eine Co-Simulationsplattform, welche virtuelle und reale Komponenten miteinander verbindet und so ein Gesamtsystem erstellen kann. Die Einbindung der Modelle erfolgt entweder durch Standard-Schnittstellen wie FMI, oder durch spezifische Schnittstellen von bekannten Simulationstools. Neben der Möglichkeit das Gesamtsystem zu simulieren, bietet Model.CONNECT ebenso die Möglichkeit die Ergebnisse zu analysieren und daraus Berichte zu erstellen. In nachfolgenden Abschnitten wird auf die Integration der zuvor beschriebenen Modelle in Model.CONNECT und deren Zusammenführung zu einem Gesamtmodell eingegangen.

a) Aufbau

Zu Beginn werden die einzelnen Modelle dem Co-Simulationsprogramm hinzugefügt. Wie in Abbildung 3-17 illustriert, werden hier die VSM Umgebung, das Motor-/Abgasmodell sowie das Modell der Schaltstrategiesoftware eingebunden. Damit diese nun Daten austauschen können, werden deren Ein- und Ausgänge (Ports) miteinander verbunden.

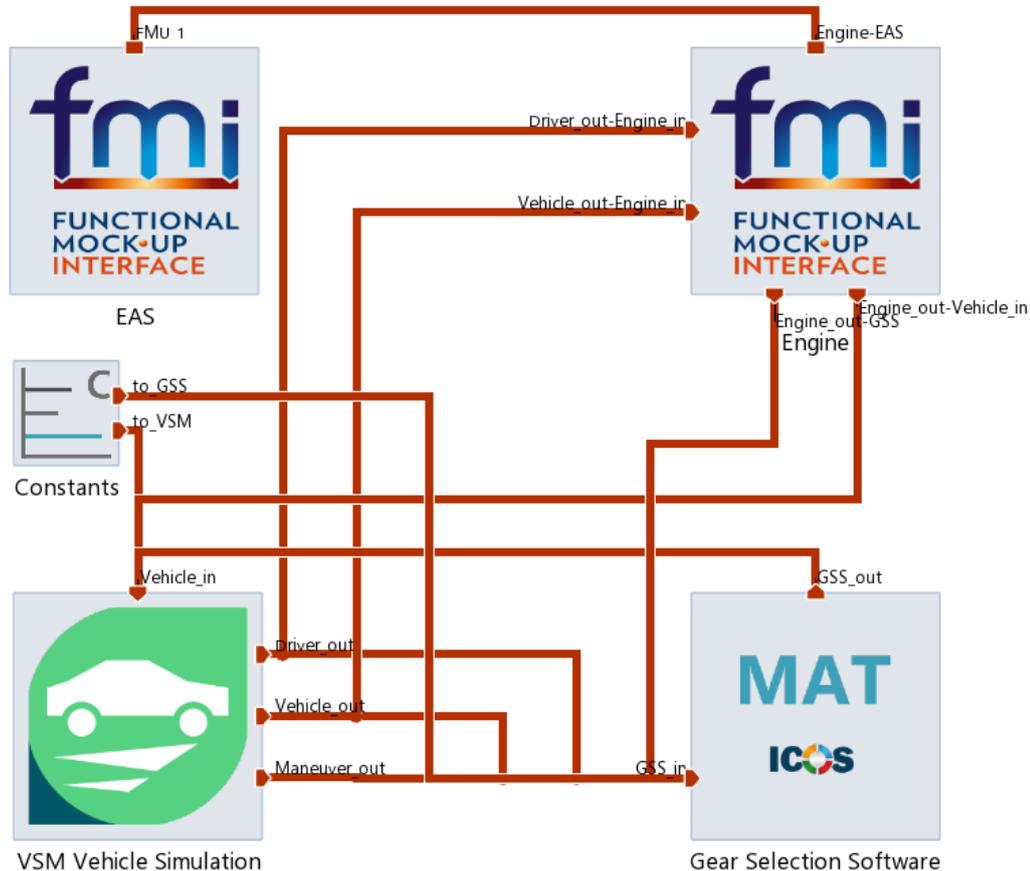


Abbildung 3-17: Verknüpfung der Simulationsmodelle durch Bundles und Ports [25]

Die Verknüpfung kann automatisch erfolgen, sofern Model.CONNECT eine eindeutige Zuordnung findet, oder wird manuell durchgeführt. Bei der Verbindung der Ports ist darauf zu achten, dass alle Einheiten richtig definiert sind. Zur übersichtlichen Darstellung werden die Signale in sogenannten Bundles zusammengefasst (rote Linien in Abbildung 3-17). Auf die in dieser Arbeit gekoppelten Ein- und Ausgangsgrößen wird in Abschnitt c) eingegangen. Zusätzlich zu den Modellen wird der Block „Constants“ in die Simulationsumgebung eingefügt. In diesem werden Konstanten definiert, um zum Beispiel die Wählhebelposition des Fahrzeuges festzulegen. Weitere Konstanten dienen dazu, dass VSM die externe Drehmomentvorgabe und die externe Gangauswahl zulässt. Zur Freischaltung werden definierte Konstanten den jeweiligen Ports zugeordnet. Dadurch ist auch festgelegt, wie mit den entsprechenden Signalen umgegangen werden soll. Nachdem die Ports miteinander verbunden wurden, muss festgelegt werden, wie diese Modelle miteinander kommunizieren sollen. Auf den Kopplungsmechanismus wird in nächstem Abschnitt eingegangen.

b) Kopplungsmechanismus

Die Modelle führen ihre Berechnungen prinzipiell in unterschiedlichen Berechnungsschritten t durch. VSM arbeitet mit einem Berechnungsschritt von 2000Hz, während das Motormodell mit 1000Hz und das Modell der Schaltstrategie lediglich mit 100Hz arbeiten. Damit nun sichergestellt ist, dass diese richtig miteinander kommunizieren, wird festgelegt wann und in welcher Reihenfolge die Auswertung der Ein- und Ausgänge durchgeführt wird. Der Datenaustausch der einzelnen Elemente erfolgt somit in definierten Synchronisationsschritten T . Dieser wird auf 1000Hz gesetzt. In Abbildung 3-18 wird dieser Zusammenhang dargestellt.

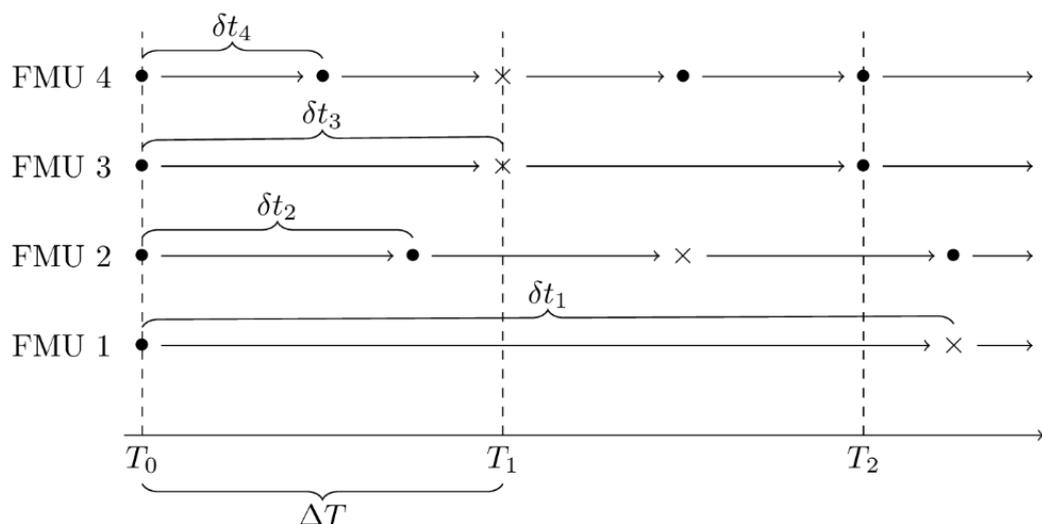


Abbildung 3-18: Zeitschritte des Kopplungsmechanismus [25]

In dieser Simulationsumgebung wird die parallele Auswertereihenfolge verwendet. Sie hat den Vorteil, relativ schnell Berechnungen durchführen zu können. Bei der parallelen Auswertereihenfolge führen alle Elemente der Simulationsumgebung ihre Berechnungen mit den Werten durch, welche beim vorherigen Synchronisationszeitpunkt verfügbar waren. Werden innerhalb dieser Synchronisationsschritte neue Eingangswerte benötigt, erfolgt eine Extrapolation. Die Eingangswerte werden dabei standardmäßig vom Ende eines Berechnungsschrittes t bezogen. Dies kann mit Hilfe von Abbildung 3-19 anhand zweier in Verbindung stehender Modelle einfacher verdeutlicht werden. FMU B führt beispielsweise innerhalb eines Synchronisationsschrittes von T_0 nach T_1 zwei Berechnungen durch. Wenn FMU B zum Zeitpunkt $t_0 = T_0$ seinen Input u_0^B aktualisiert, so hat FMU A noch keinen Output y_1^A berechnet. Der Output von FMU A zum Zeitpunkt t_1 wird dabei als Input zum Zeitpunkt t_0 genommen. FMU B muss seinen Input somit aus den früheren Werten extrapolieren. Zum Zeitpunkt t_1 wurde der Output y_1^B berechnet. Da Zeitpunkt t_1 auch kein Synchronisationszeitpunkt ist, muss der Input u_1^B ebenso extrapoliert werden. Daraus ergibt sich zum Zeitpunkt $T_1 = t_2$ der Output y_2^B als auch der Output y_1^A und der beschriebene Simulationsschritt beginnt von vorne. [25]

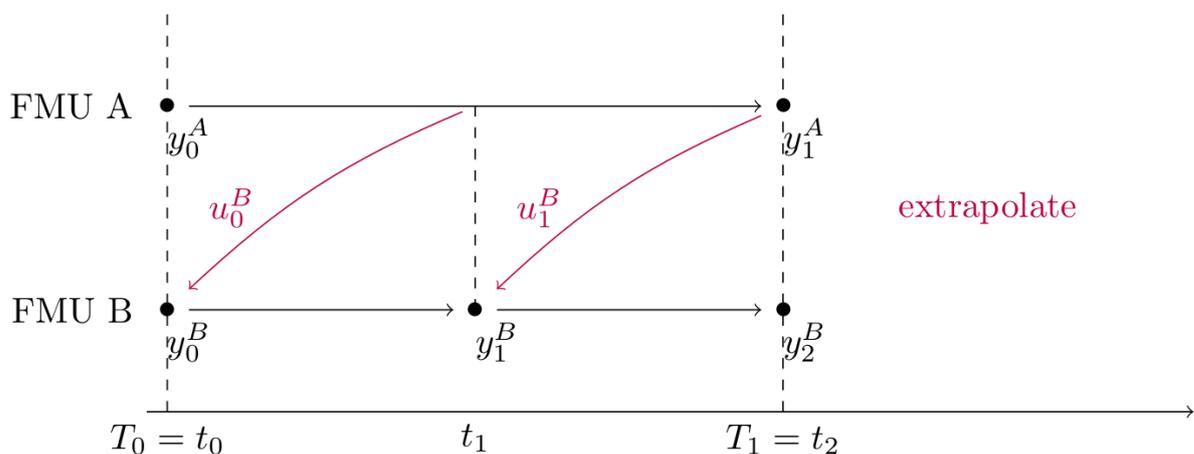


Abbildung 3-19: Parallele Auswertereihenfolge [25]

c) Verbindung der Ein -und Ausgangsgrößen

Im Folgenden werden die wichtigsten Verbindungen der einzelnen Modelle gezeigt.

Tabelle 3-2: Zuordnung der Ein- und Ausgangsgrößen der einzelnen Modelle

VSM ↔ Motor	
Driver.Accelerator Pedal	→ CMC Interface.Pedal_Demand
Vehicle.ECU.Current Gear	→ CMC Interface.Gear
Vehicle.Engine.Engine Speed	→ CMC Interface.N_Demand
Vehicle.Vehicle Speed	→ CMC Interface.Vehicle_Speed
Engine.Extern Crankshaft Torque	← CMC Interface.MD
VSM ↔ Schaltstrategie	
Driver.Accelerator Pedal	→ Acc Pedal
Driver.Brake Switch	→ Brake Bit
Driver.Steer Angle	→ Steer Angle Set
Vehicle.Acceleration Lateral	→ Acc Lat
Vehicle.Acceleration Longitudinal	→ Acc long
Vehicle.BrakeMasterCylinder Pressure	→ BrakeF
Vehicle.Drivetrain.Gearbox.Input Speed	→ Gbx Speed Input
Vehicle.Drivetrain.Gearbox.Output Speed	→ Gearbox Speed Output
Vehicle.Drivetrain.Total Ratio	→ Total Ratio
Vehicle.ECU.Current Gear	→ Current Gear
Vehicle.ECU.Gear Change Active	→ Gear Change Active
Vehicle.Engine.Engine Speed	→ Engine Speed
Vehicle.Vehicle Speed	→ Vehicle Speed
Maneuver.Ignition State	→ Starter Bit
Vehicle.External Demand Gear	← Gear
VSM ↔ Konstanten	
Engine.Extern Crankshaft Torque Enable	← 1 (externe Drehmomenteinbindung)
Vehicle.External Demand Gear Mode	← 2 (externe Gangvorgabe)
Motor ↔ Schaltstrategie	
CMC Interface..MD	→ Engine Torque
Schaltstrategie ↔ Konstanten	
Sel lever	← 4 (Wählhebelposition 2-R 3-N 1-P 4-D 6-M)

d) Berechnungen zur Ergebnisanalyse

Bevor mit der Simulation gestartet werden kann, müssen noch die zur Auswertung benötigten Ausgangsgrößen berechnet werden. Diese werden in Model.CONNECT unter dem Menüpunkt „Results“ angelegt. Die Formeln zur Berechnung der Massenströme wurden bereits in Kapitel 3.2d) beschrieben. Um die während der Simulationszeit entstehenden Emissionsmassen zu erhalten, werden die Massenströme über die Zeit integriert. Weiters werden dessen Werte auf die zurückgelegte Distanz bezogen. Als Beispiel wird die Formel zur Berechnung des CO-Ausstoßes gezeigt. Die Berechnung der CO-, CO₂-, THC-, NO_x- und PM-Emissionen erfolgt analog.

$$\text{CO} \left[\frac{\text{mg}}{\text{km}} \right] = \frac{\int \frac{\text{Massenstrom CO} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \cdot dt}{3600}}{\text{Fahrtstrecke}[\text{m}]} \cdot 10^3 \cdot 10^6 \quad (3-7)$$

Weiters wird der verbrauchte Kraftstoff berechnet, welcher sich ebenso über das Integral des Massenstromes ergibt, dividiert durch die Dichte des Dieselkraftstoffes. Letztere wird mit 0,84 Kilogramm pro Liter angenommen. Der Kraftstoffverbrauch, bezogen auf die zurückgelegte Distanz, ergibt sich somit wie folgt:

$$\text{Kraftstoffverbrauch} \left[\frac{\text{l}}{100\text{km}} \right] = \frac{\int \frac{\text{Massenstrom Kraftstoff} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \cdot dt}{3600}}{\text{Dichte Diesel} \left[\frac{\text{kg}}{\text{l}} \right] \cdot \text{Fahrtstrecke}[\text{m}]} \cdot 10^5 \quad (3-8)$$

4 SZENARIEN UND ERGEBNISANALYSE

Auf Basis der vorher beschriebenen Kapitel werden nun die Simulationen des RDE Streckenabschnitts durchgeführt. Hierbei folgt der Fahrer des dieselbetriebenen Fahrzeuges dem vorgegebenen Geschwindigkeitsprofil unter entsprechender Anpassung von Fahr- und Bremspedalstellung. Die Schaltstrategiesoftware entscheidet über den passenden Gang und die Schaltung erfolgt dementsprechend automatisch. Die Strecke wird mit zwei unterschiedlichen Datenständen der Schaltstrategiesoftware simuliert, wodurch sich zwei Szenarien ergeben.

Im ersten Szenario werden drei Fahrbarkeitsfunktionen deaktiviert, welche den größten Anteil zur Verbesserung der Fahrbarkeit beitragen. Aus Sicht des Fahrzeugherstellers werden diese Funktionen allerdings oft abgeschaltet, da die Befürchtung besteht, dass durch die durchschnittlich höhere Motordrehzahl mehr Emissionen zustande kommen. Die drei deaktivierten Funktionen sind die Kurvenerkennung, Fast-Off und die bremskraftabhängige Rückschaltung. Durch die Deaktivierung erfolgt die Berechnung des Ganges somit nahezu nur noch kennlinienbasiert und kann nicht durch zusätzliche Funktionen beeinflusst werden. Ausgenommen von der Deaktivierung ist jedoch die Last- und Steigungserkennung, da diese standardmäßig immer aktiv ist, um sicherzustellen, dass auch während Bergfahrt die benötigte Antriebsleistung vorhanden ist. Im zweiten Szenario werden hingegen alle Fahrbarkeitsfunktionen eingeschaltet, wodurch eine deutlich bessere Fahrbarkeit des Fahrzeuges erreicht wird. Die Plausibilisierung der Messsignale wird mit Experten der entsprechenden Fachbereiche durchgeführt. In diesem Kapitel werden zunächst die zwei unterschiedlichen Szenarien vorgestellt und deren Schalthäufigkeit analysiert. Zusätzlich werden die Szenarien mit dem Programm AVL SPA M bewertet und auf Basis der erhaltenen Werte wird eine Aussage über die Fahrbarkeit getroffen. Anschließend wird auf die unterschiedlichen Gangvorgaben eingegangen und deren Unterschiede gegenübergestellt. Im letzten Abschnitt werden die Emissionen zueinander in Relation gesetzt und Ursachen für deren Unterschiede begründet.

4.1 Szenario 1 mit deaktivierten Fahrbarkeitsfunktionen

a) Übersicht Szenario 1

In Abbildung 4-1 werden die wichtigsten Signale zur Beurteilung der Simulation gezeigt. Diese sind die Quereschleunigung, der von der Getriebesoftware geforderte Gang, der Gradient für die Steigungserkennung, die Fahrpedalposition, die Fahrzeuggeschwindigkeit, das Drehmoment des Motors sowie der Bremsdruck.

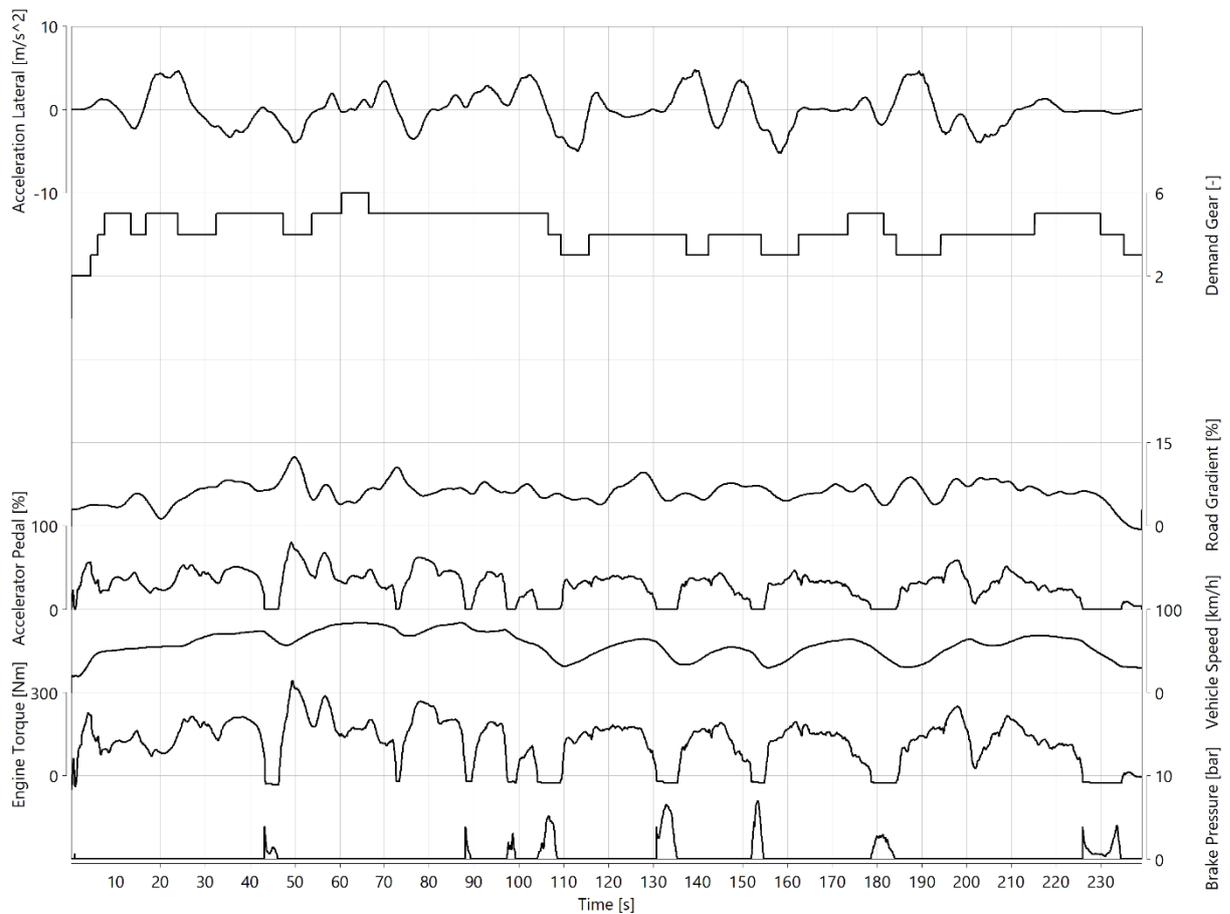


Abbildung 4-1: Ergebnisse mit deaktivierten Fahrbarkeitsfunktionen

Aus der Messung ergeben sich folgende Vergleichswerte:

- Durchschnittsgeschwindigkeit: 57km/h
- Durchschnittliche Motordrehzahl: 1951rpm
- Anzahl aller Schaltungen: 25
- Anzahl an Hochschaltungen: 13
- Anzahl an Rückschaltungen: 12

b) Bewertung der Fahrbarkeit Szenario 1

Um die Fahrbarkeit der verwendeten Schaltstrategie zu beurteilen, wird das Programm AVL SPA M herangezogen. Dieses bewertet anhand objektiver Kriterien das Beschleunigungspotential des Antriebsstranges im entsprechenden Gang, wodurch schließlich eine Aussage über die Fahrbarkeit des Fahrzeuges getroffen wird. Das Beschleunigungspotential ergibt sich aus der Differenz der maximal möglichen Beschleunigung in diesem Gang, welche anhand der Vollastkennlinie und dem hinterlegten Fahrzeugmodell berechnet wird, und der tatsächlichen Beschleunigung des Fahrzeuges. Prinzipiell gilt, je höher das Beschleunigungspotential ist, desto besser wird auch die Fahrbarkeit des Fahrzeuges bewertet und das Rating geht nach oben.

Um besser zu verstehen, weshalb das Beschleunigungspotential im Gang zur Fahrbarkeit des Fahrzeuges beiträgt, wird der Zusammenhang mit Hilfe von Abbildung 4-2 kurz erläutert. Die Linie P_{KG} stellt die Leistung zur Aufrechterhaltung einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit dar. Auf dieser Linie befinden sich zwei unterschiedliche Betriebspunkte A und B. Punkt A ergibt sich durch einen niedrigeren Gang, Punkt B durch einen höheren Gang. Um eine gewisse Beschleunigung zu erreichen, ist ein Leistungsanstieg erforderlich. Die Linie P_{gB} zeigt den Leistungsbedarf für gleiche Beschleunigung. Der Betriebspunkt des Motors im Punkt A befindet sich bei höherer Motordrehzahl und niedrigerem Motormoment. Die Drehmomentreserve ΔM_A ist mit dem Beschleunigungspotential im Gang A gleichzusetzen. Vom Punkt A ist es möglich, die gewünschte Beschleunigung gerade noch unter Vollast (A^*) zu erreichen. Um die gleiche Beschleunigung vom Punkt B zu bekommen, wird zum einen ein viel größeres Drehmoment benötigt, da der Beschleunigungswiderstand mit Übersetzung ins Schnelle zunimmt. Andererseits erkennt man aber, dass die gewünschte Beschleunigung in diesem Gang nicht erreicht werden kann, da die Drehmomentreserve ΔM_B beziehungsweise das Beschleunigungspotential im Gang B kleiner als das dafür notwendige Drehmoment B^* ist. Da sich, durch das Nichterfüllen des Beschleunigungswunsches, das Fahrzeug träge anfühlt, wirkt sich das negativ auf die Fahrbarkeit des Fahrzeuges aus. Damit der Fahrer dennoch diese Beschleunigung erfährt, müsste er einen Gang zurück in den Betriebspunkt A schalten. Diese Rückschaltung wäre wiederum mit einer verminderten Fahrzeugbeschleunigung verbunden, wodurch das Ansprechverhalten und demzufolge die Fahrbarkeit verringert werden.

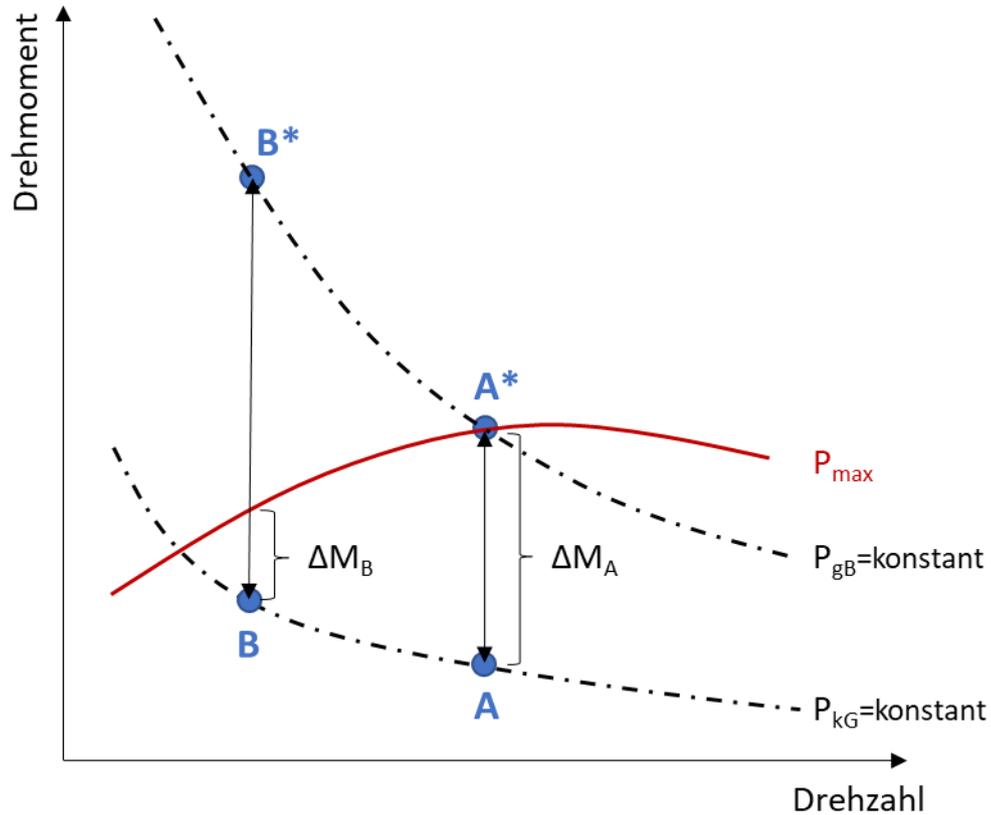


Abbildung 4-2: Leistungsbedarf durch Beschleunigungswunsch und Beziehung zur Fahrbarkeit in Anlehnung an [16]

Das von SPA M ausgegebene Rating des Beschleunigungspotentials im Gang kann die Werte von 1 bis 10 annehmen. Die Interpretation dieses Ratings wird wie folgt beschrieben:

Tabelle 4-1: Interpretation der Fahrbarkeit anhand des SPA M Ratings

Rating	Beschreibung der Fahrbarkeit
1-2	Fahrzeug nicht fahrbereit
2-3	Eingeschränkter oder unsicherer Fahrzeugbetrieb möglich
3-4	Stark fehlerhaftes Fahrverhalten
4-5	Inakzeptabel → Beschwerden des Kunden
5-6	Unzufrieden → Kunde ist enttäuscht
6-7	Akzeptabel → kaum Kundenerwartungen erfüllt
7-8	Gut → die meisten Kundenerwartungen werden erfüllt
8-9	Sehr gut → alle Kundenerwartungen werden erfüllt
9-10	Exzellente → Erwartungen des Kunden werden übertroffen

4 Szenarien und Ergebnisanalyse

Das Rating des Beschleunigungspotentials im Gang entlang der Messung von Szenario 1 wird in Abbildung 4-3 gezeigt. Das mittlere Rating für Szenario 1 ergibt den Wert 7,3. Dies bedeutet, dass die Fahrbarkeit aus Kundensicht gut ist und der Großteil der Kundenerwartungen erfüllt wurden. In den meisten Fällen ist solch ein Rating bereits für SOP ausreichend.

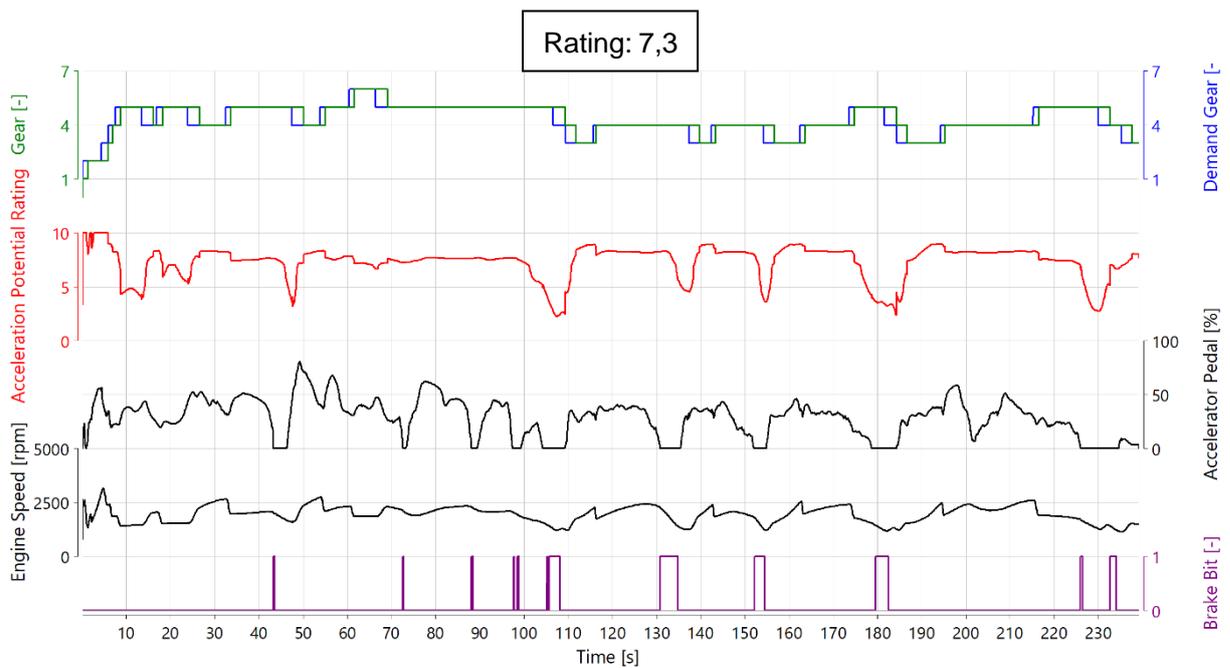


Abbildung 4-3: SPA Analyse des Beschleunigungspotentials mit deaktivierten Funktionen

4.2 Szenario 2 mit allen Fahrbarkeitsfunktionen

a) Übersicht Szenario 2

Wie bei Szenario 1 werden auch in Abbildung 4-4 die wichtigsten Parameter zur Beurteilung der Messung gezeigt. Als Eingangsgröße für die Kurvenerkennung dient besonders die Querbearbeitung. Zusätzlich werden darin die Beschleunigungsgrenzen zur Erkennung einer Kurve dargestellt. Der Kurvenerkennung wird durch Überschreiten eines Grenzwertes erkannt, während der Kurvenerkennung durch Unterschreiten des zweiten Beschleunigungsgrenzwertes bestimmt wird. Diese Grenzwerte sind geschwindigkeitsabhängig und werden mit zunehmender Geschwindigkeit geringer. Bei höheren Geschwindigkeiten führt somit die gleiche Querbearbeitung schneller zu einer Kurvenerkennung. Das grün dargestellte Bitsignal dient zusätzlich als Visualisierung, zu welchem Zeitpunkt eine Kurve erkannt wurde. Das violett dargestellte Bit hingegen zeigt, wann die Funktion Fast-Off aktiviert wurde. Der Bremsdruck spielt für die bremskraftabhängige Rückschaltung eine wichtige Rolle und wird deshalb ebenfalls dargestellt.

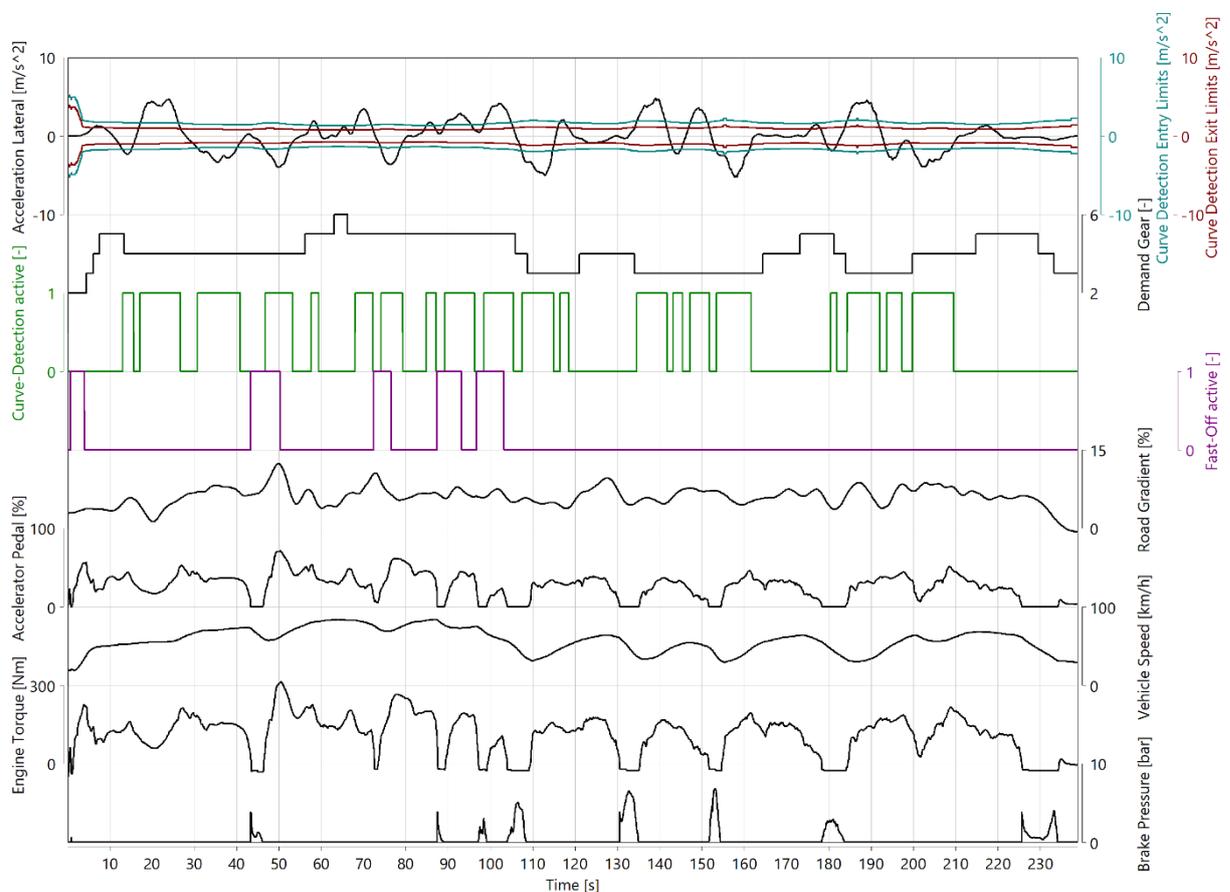


Abbildung 4-4: Ergebnisse mit aktivierten Fahrbarkeitsfunktionen

Aus der Messung ergeben sich folgende Vergleichswerte:

- Durchschnittsgeschwindigkeit: 57km/h
- Durchschnittliche Motordrehzahl: 2111rpm
- Anzahl aller Schaltungen: 19
- Anzahl an Hochschaltungen: 10
- Anzahl an Rückschaltungen: 9

b) Bewertung der Fahrbarkeit Szenario 2

Abbildung 4-5 stellt das über den Zyklus berechnete SPA M-Rating des Beschleunigungspotentials im Gang über die Dauer des Streckenabschnittes dar.

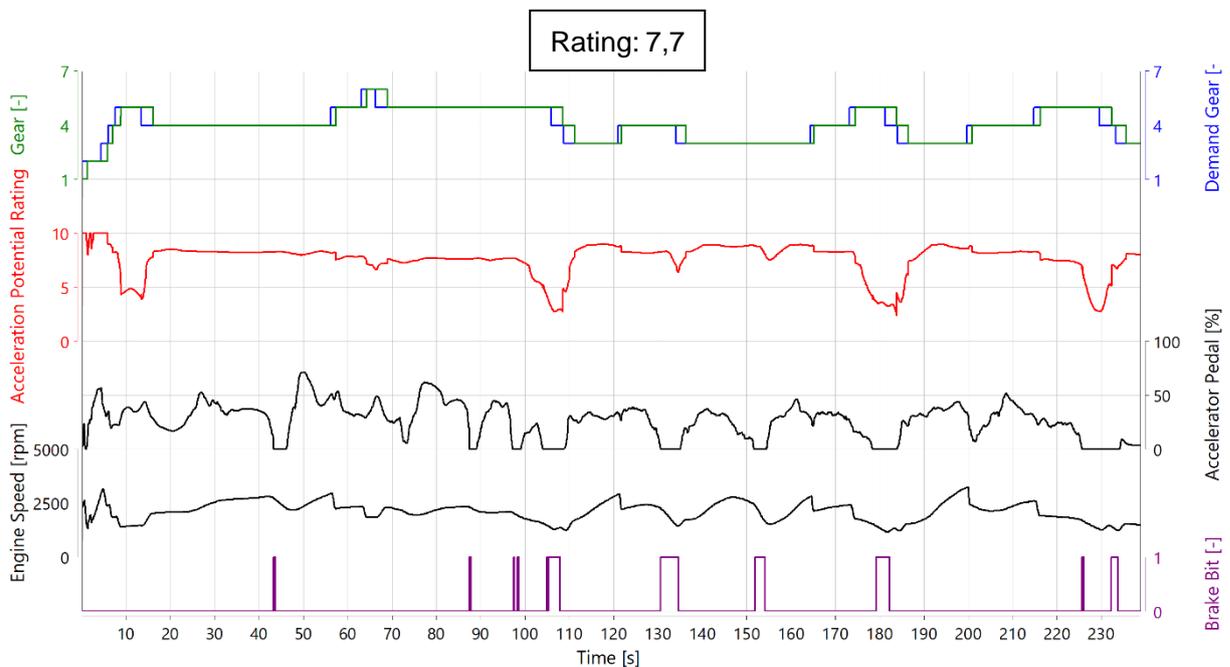


Abbildung 4-5: SPA Analyse des Beschleunigungspotentials mit aktivierten Funktionen

Im Mittel ergibt sich ein Rating vom Wert 7,7. Auch wenn dieser Wert nur einen Unterschied von 0,4 im Vergleich zum ersten Szenario aufweist, kann hierbei eine deutlich bessere Fahrbarkeit des Fahrzeuges erwartet werden. Die Abstimmung der Schaltstrategie ist in diesem Fall für den Großteil der Kunden bereits so gut, dass beinahe alle Kundenerwartungen erfüllt werden.

4.3 Analyse der Ergebnisse

a) Gegenüberstellung der Szenarien

Die Simulationsergebnisse von Szenario 1 und 2, mit und ohne Fahrbarkeitsfunktionen, sind in Abbildung 4-6 abgebildet. Zusätzlich zu den zuvor gezeigten Abbildungen wird hier auch die Motordrehzahl dargestellt. Die grün und violett dargestellten Bits gehören zu Szenario 2, damit besser verglichen werden kann, aus welchem Grund die Getriebesoftware den entsprechenden Gang angefordert hat oder nicht. Auf die Unterschiede der zwei Szenarien wird in den anschließenden Abbildungen näher eingegangen und vor allem untersucht, ob die gewünschte Fahrbarkeit gegeben ist und inwiefern der von der Software vorgegebene Gang diese beeinflusst.

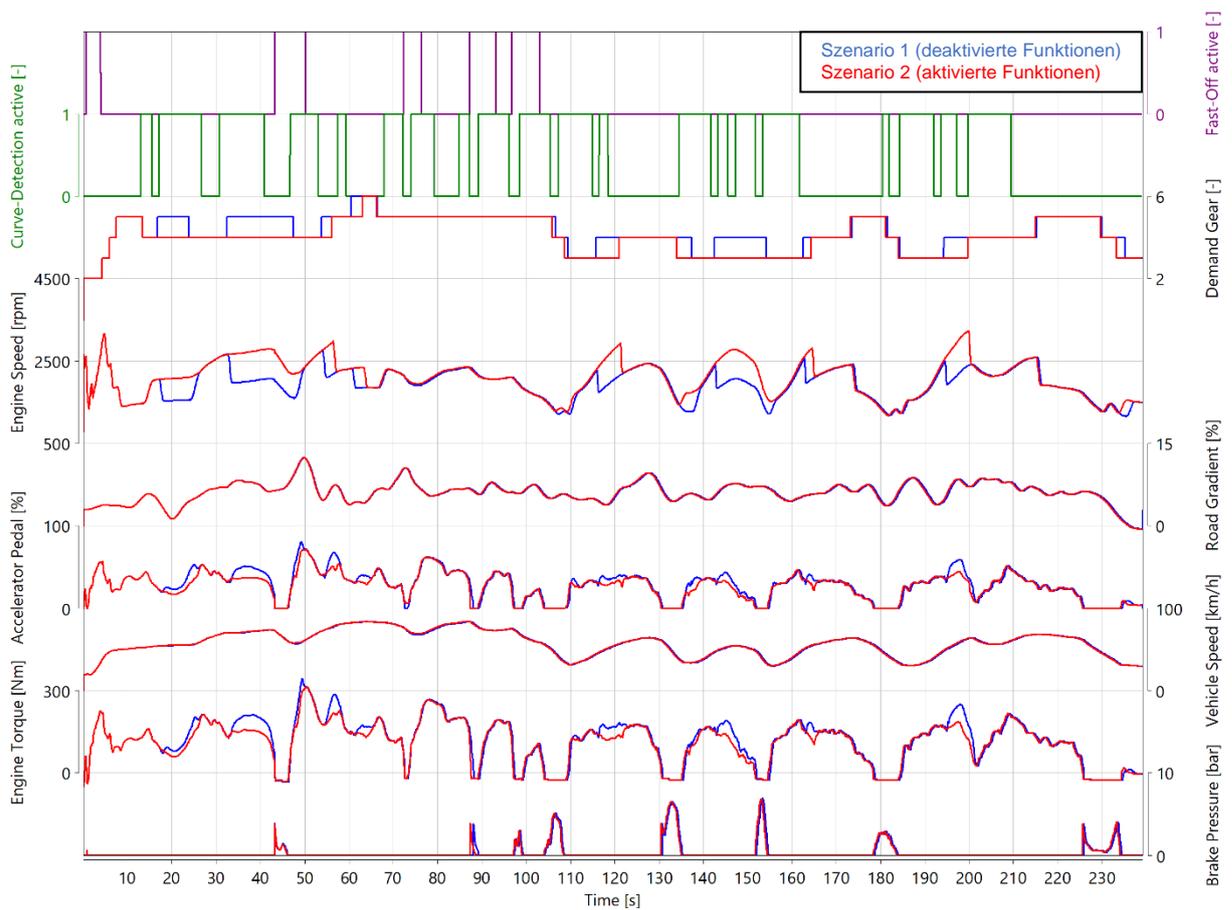


Abbildung 4-6: Gegenüberstellung der zwei Szenarien

4.3.1.a.1 Gegenüberstellung Abschnitt 1

In Abbildung 4-7 wird der erste Teilbereich der zwei gegenübergestellten Szenarien präsentiert. Zum Zeitpunkt des Cursors 1 kann festgestellt werden, dass mit deaktivierten Funktionen eine Hochschaltung vom vierten in den fünften Gang gefordert wurde, da die Fahrpedalposition sinkt und somit die Hochschaltkennlinie bei zugehöriger Geschwindigkeit im entsprechenden Schaltkennfeld durchquert wird. Zum gleichen Zeitpunkt wird mit aktivierten Funktionen trotz selbiger Eingangsgrößen keine Hochschaltung gefordert. Grund hierfür ist, dass die Kurvenerkennung diese verhindert hat. Dies wird durch das grüne Bitsignals dargestellt, welches ein paar zehntel Sekunden vor diesem Zeitpunkt eine Kurve erkannt hat. Obwohl die Kurve beim Cursor 1 bereits vorbei ist, wird noch keine Schaltung angefordert, da nach jeder Kurvenerkennung ein Timer, abhängig vom Gang und der Motordrehzahl, hochzählt. Dieser soll eine zu frühe Hochschaltung nach einer Kurve verhindern, da zumeist nach einer Kurvenfahrt der Fahrer wieder Drehmoment zum Beschleunigen benötigt. Tritt der Fahrer somit wieder vermehrt ins Fahrpedal, muss mit dem bereits gewählten niedrigeren Gang nicht mehr zurückgeschaltet werden, wodurch sofort Drehmoment zur Verfügung steht und infolgedessen die Fahrbarkeit merkbar verbessert wird.

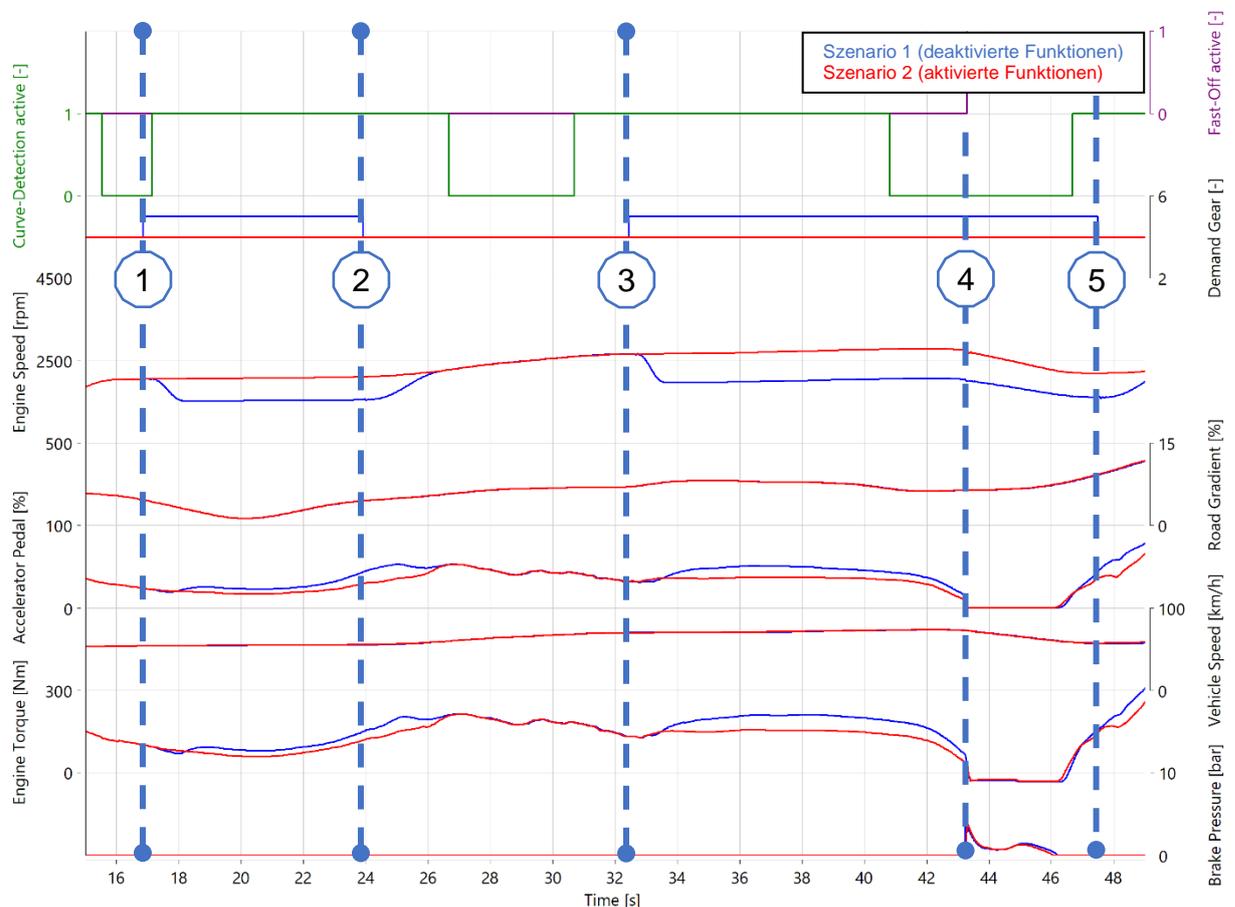


Abbildung 4-7: Gegenüberstellung der zwei Szenarien Abschnitt 1

Die geforderte Rückschaltung beim Cursor 2 (Abbildung 4-7) kommt zustande, da zur Erreichung der geforderten Geschwindigkeit im Vergleich zum Szenario 2 mehr Drehmoment benötigt wird und die Rückschaltkennlinie durch die erhöhte Fahrpedalposition geschnitten wird. Die Drehmomentreserve des Motors ist im fünften Gang zu gering, um den Beschleunigungswunsch des Fahrers zu erfüllen. Im vierten Gang steht dem Fahrer hingegen genügend Drehmoment bei Kurvenausgang zur Beschleunigung zur Verfügung, was wiederum die Fahrbarkeit erhöht. Der Unterschied der Drehmomentreserven zwischen den beiden Szenarien kann hier deutlich gesehen werden.

Die erneute Hochschaltung bei Cursor 3 mit deaktivierten Funktionen wird wie bei Cursor 1 durch die Überquerung der Hochschaltkennlinie gefordert. Da sich das Fahrzeug zu diesem Zeitpunkt in einer Kurve befindet, wird ebenso keine Schaltung mit aktivierten Funktionen angefordert. Im weiteren Verlauf muss auch nicht hochgeschaltet werden, da der bereits gewählte Gang für diese Fahrsituation richtig gewählt wurde.

Beim Cursor 4 befindet sich das Fahrzeug mit deaktivierten Funktionen im fünften Gang. Durch die Verringerung der Fahrpedalposition wird die Hochschaltkennlinie jedoch nicht geschnitten und es kommt zu keiner weiteren Hochschaltung. Mit aktivierten Funktionen wird allerdings in einem niedrigeren Gang gefahren, wodurch es zu einer Hochschaltung hätte kommen können. Allerdings erkennt die Funktion Fast-Off eine rasche Fahrpedaländerung und verhindert ab diesem Zeitpunkt eine weitere Hochschaltung. Dadurch kann eine Pendelschaltung erfolgreich vermieden werden. Beim Szenario 1 mit einem höher gewählten Gang muss nämlich zum Zeitpunkt des fünften Cursors wieder auf den vierten Gang zurückgeschaltet werden, da das vorgegebene Geschwindigkeitsprofil ohne die Rückschaltung nicht mehr erfüllt werden kann. Dem Fahrer steht keine ausreichende Drehmomentreserve zur Erfüllung des Beschleunigungswunsches zur Verfügung.

Über den betrachteten Abschnitt werden beim Szenario mit deaktivierten Funktionen vier Schaltungen durchgeführt, die nicht notwendig gewesen wären. Das Fahrzeug wirkt in dieser Phase subjektiv sehr nervös auf den Fahrer. Zudem kann dem Beschleunigungswunsch des Fahrers nicht nachgekommen werden. Im Gegensatz dazu steht dem Fahrer bei aktivierten Funktionen immer ausreichend Drehmoment zur Verfügung. Dies bewirkt ein angenehmes Ansprechverhalten des Fahrzeuges und erhöht dessen Fahrbarkeit.

4.3.1.a.2 Gegenüberstellung Abschnitt 2

Der in Abbildung 4-8 gezeigte Teilbereich lässt erkennen, dass beim Cursor 1 eine Hochschaltung im Szenario 1 gefordert wird, während diese im Szenario 2 erst beim Cursor 2 gefordert wird. Gründe für diese deutlich spätere Hochschaltung sind einerseits die Erkennung einer Kurve ein paar zehntel vor Cursor 1, wodurch der weiter oben beschriebene Timer die Ganganforderung verhindert. Andererseits wird danach nicht hochgeschaltet, da die Steigung der Straße wieder zunimmt und somit mehr Drehmoment gefordert wird. Erst nach Durchqueren der Hochschaltkennlinie durch die erhöhte Geschwindigkeit erfolgt die Ganganforderung bei Cursor 2. Die geforderte Hochschaltung von Szenario 1 beim dritten Cursor und Szenario 2 beim vierten Cursor kann analog zu den Hochschaltungen von Cursor 1 und 2 erklärt werden. Die Rückschaltung bei Cursor 5 erfolgt bei Szenario 1 und 2 praktisch zum gleichen Wegpunkt. Der Zeitunterschied der beiden Messungen ergibt sich dadurch, dass Szenario 1 durch die vermehrte Anzahl an Schaltungen nicht genau das geforderte Geschwindigkeitsprofil einhalten konnte, wodurch es ein paar hundertstel Sekunden später am selben Wegpunkt ankommt. In beiden Fällen kommt die Rückschaltanforderung aufgrund des erhöhten Beschleunigungswunsches zustande.

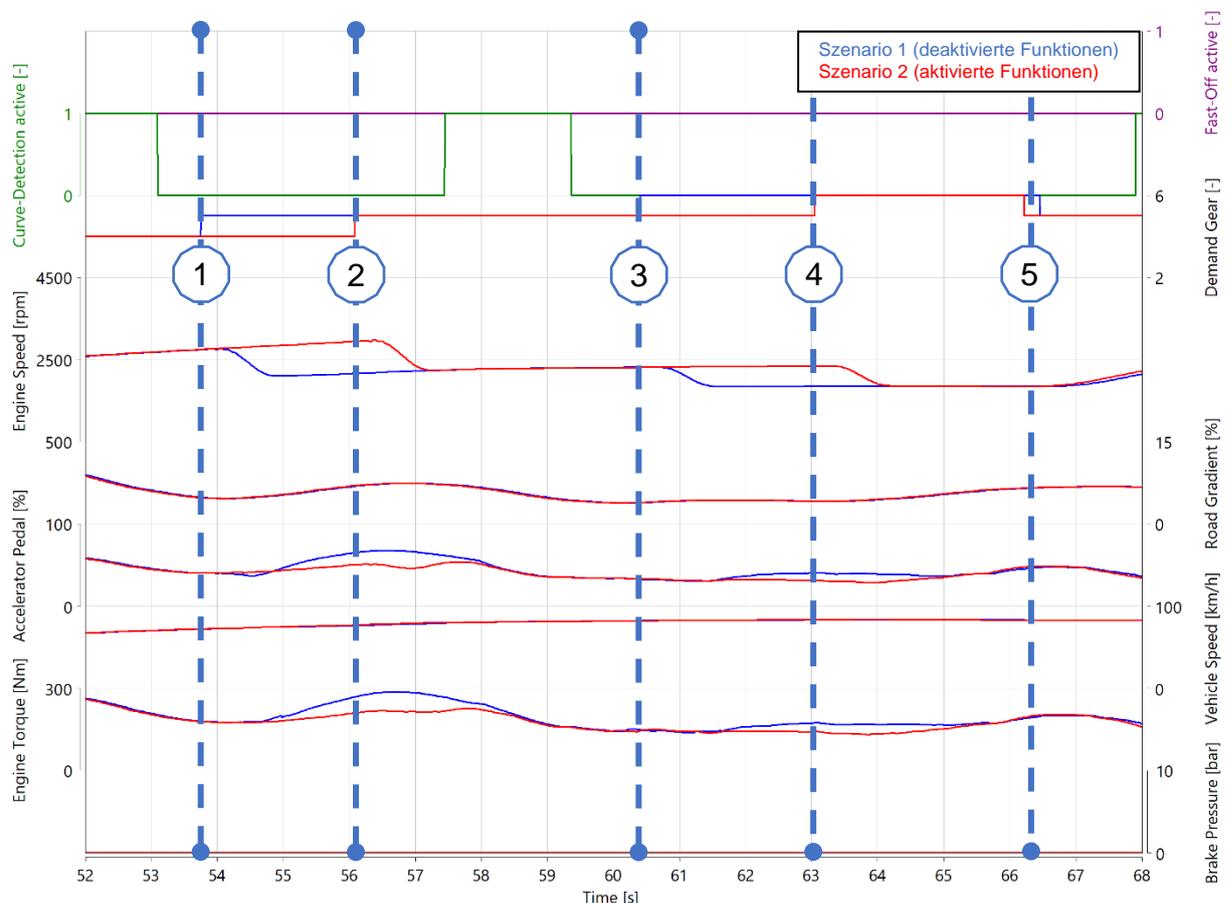


Abbildung 4-8: Gegenüberstellung der zwei Szenarien Abschnitt 2

4.3.1.a.1 Gegenüberstellung Abschnitt 3

Die von Cursor 1 und 2 geforderten Rückschaltungen, welche in Abbildung 4-9 zu erkennen sind, kommen durch die sinkende Fahrzeuggeschwindigkeit und der damit verbundenen Durchquerung der Rückschaltkennlinien zustande. Dabei ist weiters zu sehen, dass die Rückschaltung von Szenario 2 wenige zehntel Sekunden vor Szenario 1 gefordert wird. Hierfür gibt es zwei Begründungen. Die erste Begründung ist, dass das erste Szenario dem zweiten etwas hinterherhinkt, da derselbe Wegpunkt erst etwas später angefahren wird. Dies ist vor allem anhand der Überlagerung der zwei Kurven des Bremsdruckes zu sehen. Diese Zeitverzögerung darf somit nicht als verfrühte Rückschaltung gezählt werden. Tatsächlich kommt durch die Funktion der bremskraftabhängigen Rückschaltung ein Zeitunterschied zwischen Szenario 1 und 2 zustande. Durch die frühere Rückschaltung kann zum einen die Motorbremse besser ausgenutzt werden, zum anderen ist zur erneuten Beschleunigung bereits früher der jeweilige Gang eingelegt. Dadurch kann wiederum ein besseres Ansprechverhalten erzielt werden.

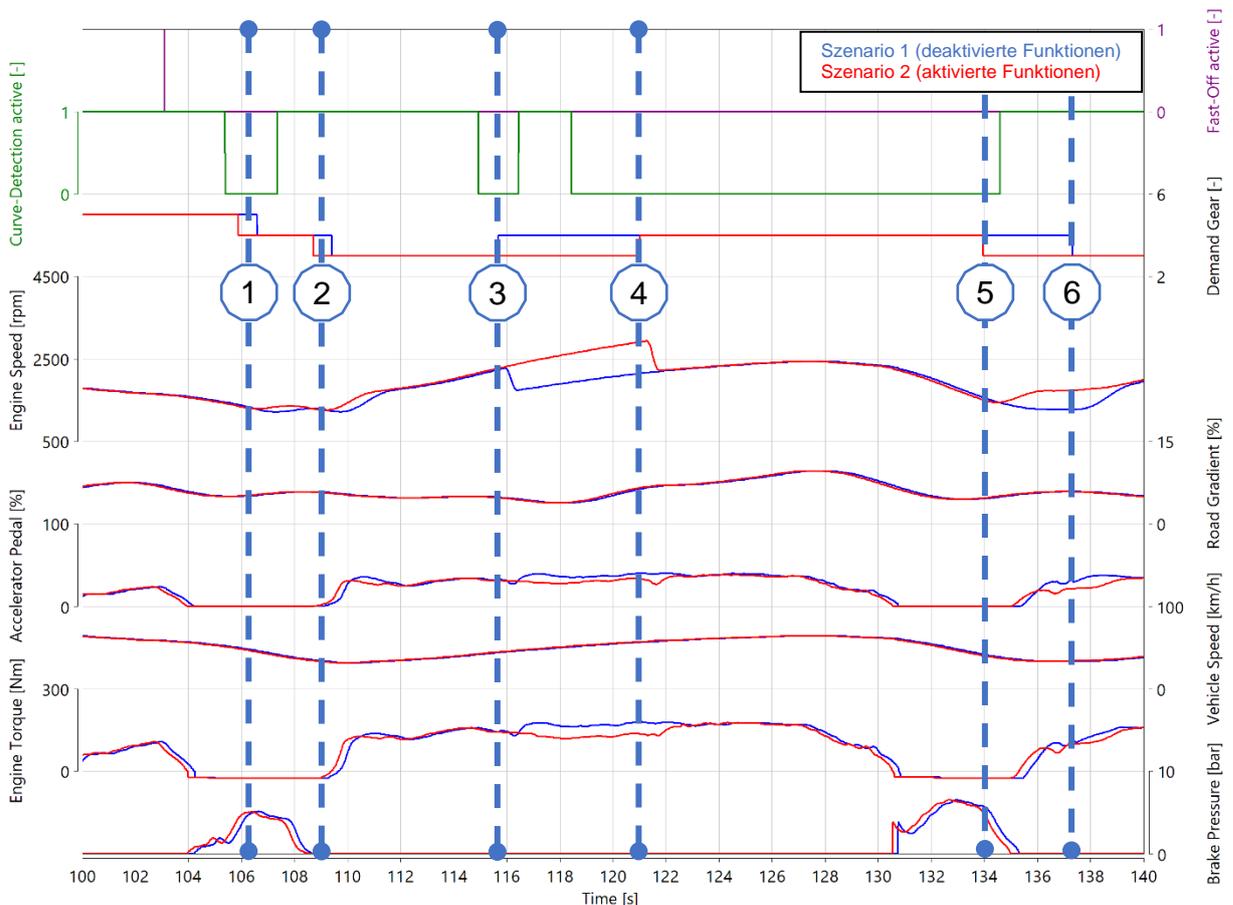


Abbildung 4-9: Gegenüberstellung der zwei Szenarien Abschnitt 3

Zum Zeitpunkt des dritten Cursors in Abbildung 4-9 erfolgt keine Hochschaltung bei Szenario 2, da kurz davor eine Kurve erkannt wurde. Daraufhin befindet sich das Fahrzeug wieder in einer Kurve, wodurch die Hochschaltung nicht gefordert wird. Erst nach Ablauf des Timers nach Verlassen der Kurve (siehe Cursor 4) kommt die Anforderung zur Hochschaltung. Ähnlich wie zuvor erfolgt beim fünften Cursor eine Rückschaltung von Szenario 2 mit aktivierten Fahrbarkeitsfunktionen aufgrund des Bremsdruckes und der damit verbundenen Veränderung der Schaltzeitpunkte. Diese Anforderung kommt bei Szenario 1 nicht. Dennoch erfolgt wenige Sekunden später eine Rückschaltung, da sich der gewählte Gang durch die erneute Beschleunigung nicht für die vorliegende Fahrsituation eignet.

4.3.1.a.2 Gegenüberstellung Abschnitt 4

Die in Abbildung 4-10 dargestellte Hochschaltung von Szenario 1 beim Cursor 1 wird im Szenario 2 ebenso nicht gefordert, da sich das Fahrzeug kurz davor in einer Kurve befand. Anschließend verhindern weitere Kurvenerkennungen diese. Aufgrund der sinkenden Geschwindigkeit zum Zeitpunkt des zweiten Cursors erfolgt im ersten Szenario wieder die Rückschaltung. Ebenso wird im Szenario 1 zum Zeitpunkt des Cursors 3 eine frühere Hochschaltung vom dritten in den vierten Gang im Vergleich zu Szenario 2 und Cursor 4 gefordert. Die verspätete Hochschaltung im Szenario 2 mit aktivierten Funktionen kommt dadurch zustande, da der Timer der Kurvenerkennung diese verhindert und erst nach Ablauf dieser Zeitspanne hochgeschaltet wird.

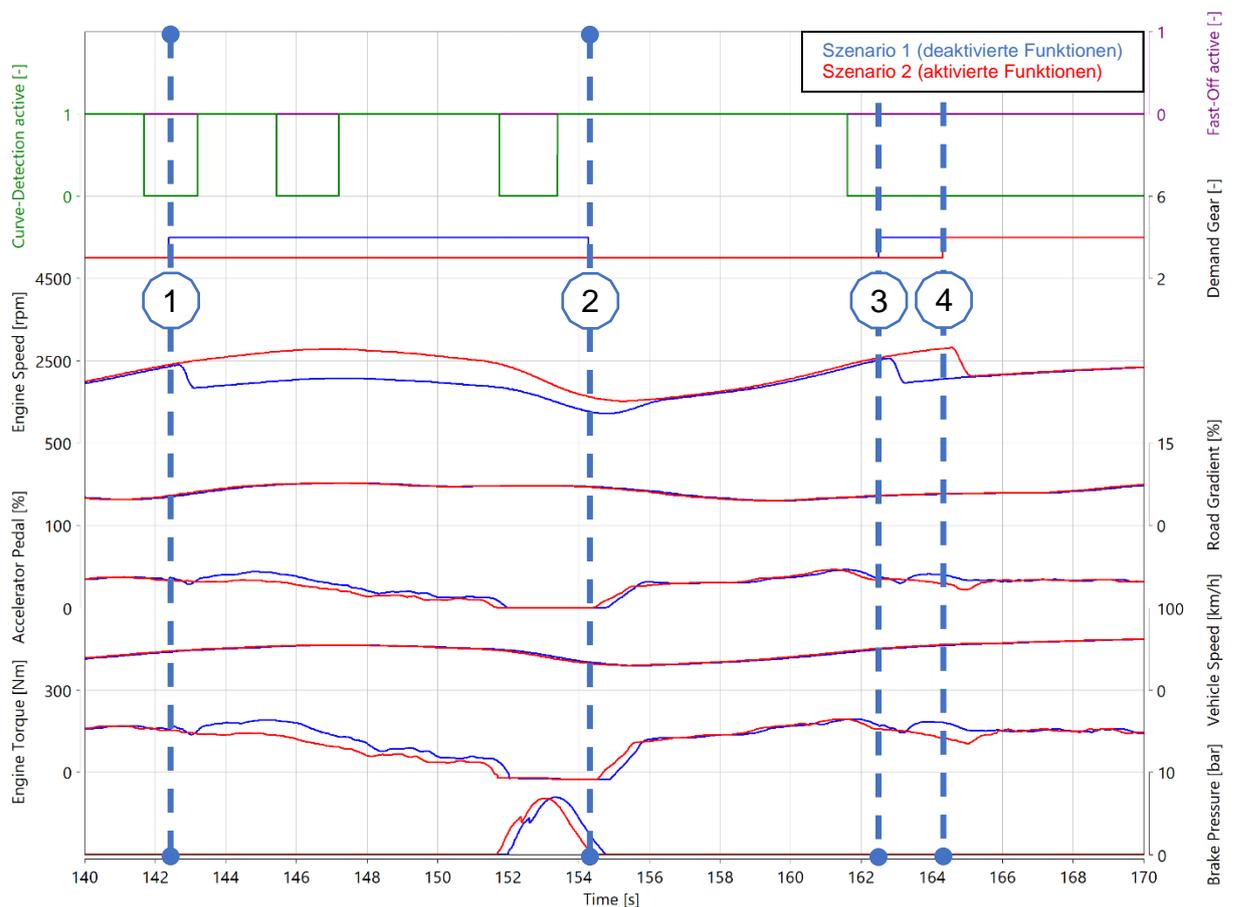


Abbildung 4-10: Gegenüberstellung der zwei Szenarien Abschnitt 4

4.3.1.a.1 Gegenüberstellung Abschnitt 5

Der letzte Teilbereich der Simulationsergebnisse wird in Abbildung 4-11 gezeigt. Die beim Cursor 1 gezeigte Hochschaltanforderung von Szenario 1 kommt beim Szenario 2 nicht, da sich das Fahrzeug in einer Kurve befindet. Die Hochschaltanforderung vom dritten in den vierten Gang kommt erst beim zweiten Cursor zustande. Über die nächsten 30 Sekunden werden bei beiden Szenarien genau die gleichen Gänge angefordert und das Fahrzeug sowie dessen Fahrer verhalten sich genau gleich. Die nicht exakte Überlagerung der roten und blauen Kurven ist auf die etwas verspätete Ankunft von Szenario 1 zum selben Wegpunkt wie in Szenario 2 zurückzuführen. Wie zum Zeitpunkt des Cursors 3 zu sehen ist, erfolgt beim Szenario 2 eine bremskraftabhängige Rückschaltung. Die Rückschaltung von Szenario 1 erfolgt hingegen erst zum Zeitpunkt des Cursors 4.

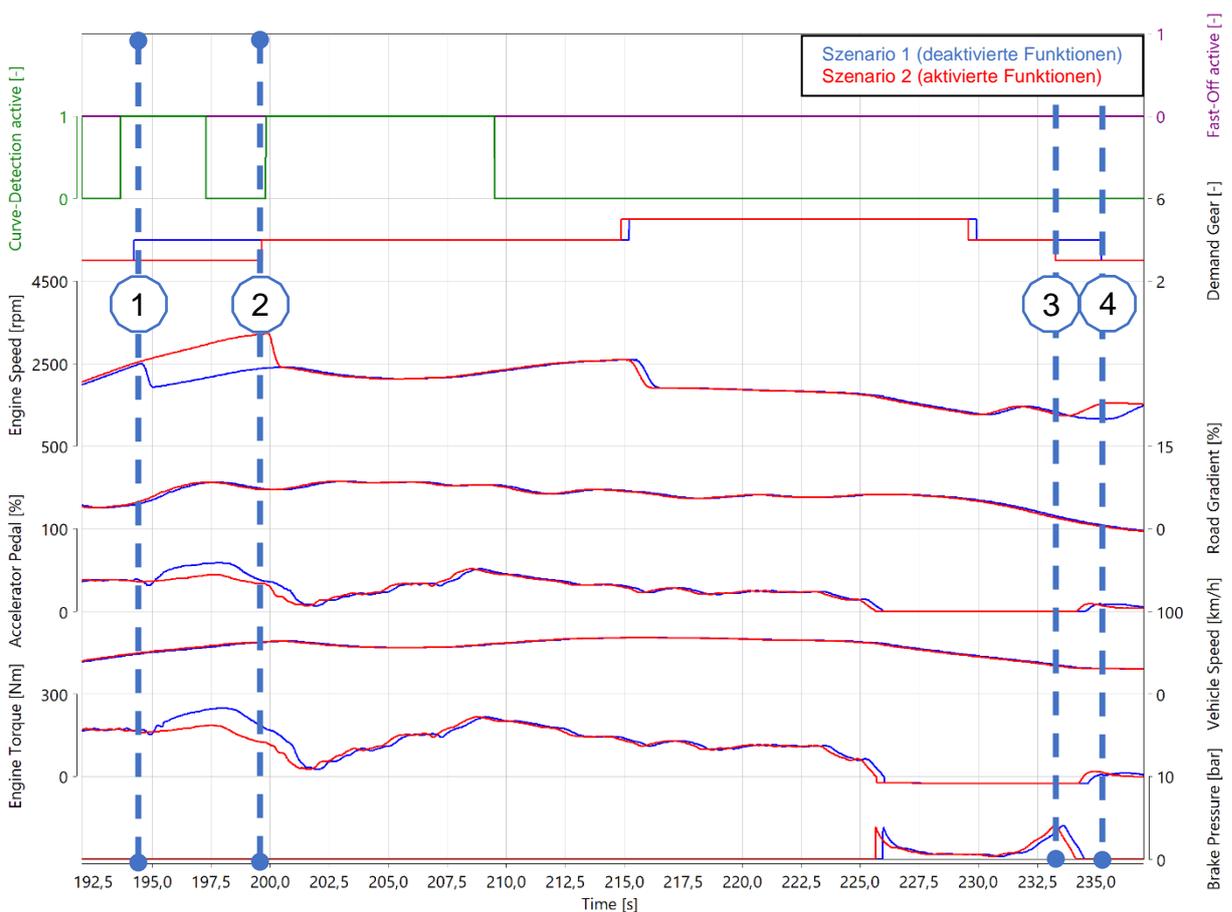


Abbildung 4-11: Gegenüberstellung der zwei Szenarien Abschnitt 5

4.3.1.a.1 Zusammenfassung der Gegenüberstellungen

Die zuvor beschriebene detaillierte Gegenüberstellung der Simulationsfahrt der Rechberg-Strecke mit ein- und ausgeschalteten Funktionen kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Kurvenerkennung:
 - Hochschaltverhinderung aufgrund Kurvenerkennung 3
 - Hochschaltverzögerung da Fahrzeug in Kurve 1
 - Hochschaltverzögerung da Fahrzeug kurz nach Kurve 4
- Bremskraftabhängige Rückschaltung:
 - Frühere Rückschaltung 4
- Fast-Off:
 - Hochschaltverhinderung aufgrund Fast-Off 1

In Tabelle 4-2 werden zusätzliche Parameter der beiden Simulationen miteinander verglichen. Die mittlere Motordrehzahl ist bei eingeschalteten Fahrbarkeitsfunktionen durch die geringere Anzahl an Hochschaltungen um rund 160 Umdrehungen pro Minute höher als bei ausgeschalteten Funktionen. Dies bedeutet eine Erhöhung von etwa 8 Prozent. Das mittlere Drehmoment des Motors ist hingegen bei aktivierten Funktionen um rund 7 Prozent geringer im Vergleich zu den deaktivierten Funktionen.

Tabelle 4-2: Gegenüberstellung der Ergebnisse

<i>Analysedaten</i>	<i>Fahrbarkeitsfunktionen</i>	
	<i>AUS</i>	<i>EIN</i>
<i>Distanz</i>	3790,29 m	3790,29 m
<i>mittlere Geschwindigkeit</i>	57 km/h	57 km/h
<i>mittlere Motordrehzahl</i>	1951 rpm	2111 rpm
<i>mittleres Motordrehmoment</i>	119 Nm	111 Nm
<i>mittlerer Gang</i>	4,28	4,03
<i>max. Fahrpedalposition</i>	80,6%	71,1%
<i>max. Motordrehzahl</i>	2781 rpm	3229 rpm
<i>max. Motordrehmoment</i>	341 Nm	313 Nm

b) Emissionsvergleich

Im nächsten Schritt werden die Ergebnisse der Emissionen zueinander in Relation gesetzt. Die prozentuale Berechnung der Emissionen wird anhand folgender Gleichung durchgeführt.

$$\text{prozentuale Abweichung in \%} = \frac{\text{Szenario 2} - \text{Szenario 1}}{\text{Szenario 1}} \quad (4-1)$$

In Tabelle 4-3 wird das Verhältnis der Emissionsergebnisse der ein- und ausgeschalteten Fahrbarkeitsfunktionen gezeigt. Der Kohlendioxid ausstoß steigt mit eingeschalteten Funktionen um etwa ein Prozent an. Dieser steht mit dem Kraftstoffverbrauch durch die molekulare Bindung in direktem Zusammenhang, wodurch sich dieser ebenso um ein Prozent erhöht. Der erhöhte Ausstoß kann durch die im Mittel höhere Motordrehzahl erklärt werden. Diese führt dazu, dass der Motor, in Verbindung mit dem etwas geringeren Drehmoment, in einem Betriebspunkt mit niedrigerem Wirkungsgrad betrieben wird. Der erläuterte Zusammenhang kann auch durch das in Abbildung 3-10 dargestellte Motorkennfeld veranschaulicht werden.

Tabelle 4-3: Abweichung der Emissionen am Ausgang der Abgasanlage (TP) und am Motorauslass (EO)

<i>Emissionen</i>	<i>Fahrbarkeitsfunktionen EIN im Verhältnis zu AUS</i>
<i>CO₂ TP</i>	1,0 %
<i>CO TP</i>	-11,7 %
<i>NO_x TP</i>	-7,6 %
<i>THC TP</i>	-0,3 %
<i>Feinstaub TP</i>	0 %
<i>Feinstaub EO</i>	-11,2 %

Da das zur Verfügung gestellte Motormodell eine FMU ist, können interne Parameter, wie zum Beispiel das Luftverhältnis, nicht ausgelesen werden. Dadurch ist eine Analyse, wieso sich die Schadstoffemissionen unterscheiden, nicht möglich. Dies ist aber auch nicht notwendig, da das Motormodell bereits erfolgreich in anderen Projekten validiert wurde und somit dessen Ausgangsgrößen ohne weitere Analyse verwendet werden dürfen. Der Vergleich des Kohlenmonoxid-Ausstoßes in Tabelle 4-3 zeigt eine Reduktion von knapp 12 Prozent mit eingeschalteten Funktionen. Ein ähnliches Bild zeigt sich beim Vergleich der Stickoxide, welche um knapp 8 Prozent niedriger sind. Bei den Kohlenwasserstoffen ergibt sich hingegen mit eingeschalteten Fahrbarkeitsfunktionen nur eine geringe Veränderung. Diese sind um etwa drei Zehntel Prozent gesunken. Das im Abgasmodell verwendete Modell des Partikelfilters ergibt, dass alle Partikel herausgefiltert werden, wodurch sich die Feinstaubemissionen beider Szenarien nicht verändern und null sind. Deshalb werden zusätzlich die Emissionen am Motorauslass ausgegeben. Auch hier ist ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Szenarien festzustellen. Die Feinstaubemissionen am Motorauslass sind bei eingeschalteten Funktionen um rund 11 Prozent geringer als bei ausgeschalteten Funktionen.

c) Schlussfolgerungen

Die detaillierte Analyse der Szenarien ergibt, dass beim zweiten Szenario mit aktivierten Fahrbarkeitsfunktionen drei Hochschaltungen durch die Kurvenerkennung verhindert wurden. Als Konsequenz muss nicht mehr zurückgeschaltet werden, wodurch insgesamt sechs Schaltungen weniger stattgefunden haben. In Bezug auf Szenario 1 mit deaktivierten Funktionen ergibt sich dadurch eine Reduktion an Schaltungen von 24 Prozent. Dieser deutliche Unterschied kann vor allem bei zügiger Fahrweise und kurvenreicher Streckenführung hohe Auswirkungen auf die Fahrbarkeit eines Fahrzeuges haben, da sich das Ansprechverhalten des Antriebsstranges durch die Schaltverhinderung verbessert. Dies bedeutet nämlich, dass der Beschleunigungswunsch des Fahrers ohne geforderte Rückschaltung nahezu sofort umgesetzt werden kann, da kein Schaltverzug vorliegt. Hingegen muss bei einem zuvor höher gewählten Gang wieder zurückgeschaltet werden. Der sogenannte Schaltverzug ergibt sich bei einem konventionellen manuellen Getriebe oder Automatikgetriebe durch das Öffnen beziehungsweise Schließen der Kupplung, um infolgedessen den Gang zu wechseln. Dieser Gangwechsel ist mit einer Zugkraftunterbrechung verbunden, wodurch zudem Komforteinbußen durch Schaltrucken entstehen. Bei einem Doppelkupplungsgetriebe ergibt sich durch die zusätzliche Rückschaltung zwar keine Zugkraftunterbrechung, aber dennoch kann der gewünschte Beschleunigungszuwachs nicht sofort erreicht werden. Grund hierfür ist, dass während des Schaltvorganges auch Energie zum Angleich der Drehzahlen zwischen Voll- und Hohlwelle benötigt wird, wodurch ein leichter Drehmomenteinbruch entsteht und somit eine geringere Beschleunigung erreicht wird. Ein weiterer Aspekt, der sich durch die geringere Schalhäufigkeit ergibt ist, dass die Lebensdauer des Getriebes beziehungsweise weiterer Antriebsstrangbauteile theoretisch erhöht werden kann. Die Begründung hierfür liegt darin, dass durch weniger Schaltungen die Gefahr von dynamischen Drehmomentspitzen verringert werden kann. Demgemäß können sich wiederum niedrigere Bauteilbelastungen ergeben.

Die fünf Hochschaltverzögerungen kommen zustande, da sich das Fahrzeug entweder in oder kurz nach einer Kurve befindet. Prinzipiell sollen Hochschaltungen in Kurven vermieden werden, damit es zu keinen Lastverschiebungen kommt und somit die Fahrstabilität beibehalten werden soll. Die Hochschaltverzögerungen bis kurz nach der Kurve sollen hingegen die Fahrbarkeit erhöhen, da zumeist nach dieser wieder beschleunigt wird. Dadurch ist noch genügend Beschleunigungspotential vorhanden, um dem Beschleunigungswunsch des Fahrers gerecht zu werden. Das erhöhte

Beschleunigungspotential im Gang wurde zudem unter Zuhilfenahme des Programmes AVL SPA M dargelegt.

Die sich mit aktivierten Fahrbarkeitsfunktionen früheren Bremsrückschaltungen ergeben eine verbesserte Fahrbarkeit aufgrund folgender Hinsicht. Nach dem Bremsvorgang erfolgt zumeist ein erneuter Beschleunigungsvorgang. Durch die vorausgehende Rückschaltanforderung und der damit verbundenen früheren Einlegung des niedrigeren Ganges wird das Ansprechverhalten des Fahrzeuges erhöht, indem die Rückschaltung nicht erst durch den Fahrer, durch Erhöhung der Pedalposition, gefordert werden muss. Dies bewirkt, dass zum Zeitpunkt des Beschleunigungswunsches keine Schaltverzögerung auftritt.

Die Funktion Fast-Off hat in Kombination mit der Kurvenerkennung eine Hochschaltung, beziehungsweise eine Pendelschaltung verhindert, wodurch sich das Fahrzeug nicht so nervös anfühlt und die Fahrbarkeit des Fahrzeuges erhöht wird.

Als Konsequenz der vorangegangenen Untersuchungen ergibt sich, dass durch Aktivierung zusätzlicher Fahrbarkeitsfunktionen nicht nur die Fahrbarkeit des Fahrzeuges erhöht, sondern ebenso eine Verringerung der emittierten Schadstoffe bei nahezu gleichem Kraftstoffverbrauch innerhalb eines realen Fahrzyklus (RDE) erzielt werden kann.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Durch die zunehmenden Maßnahmen seitens der Gesetzgebung zur Senkung der Emissionen im Straßenverkehr sehen sich Automobilhersteller gezwungen, den Verbrauch eines Fahrzeuges zu minimieren. Dadurch rückt die Fahrbarkeit eines Fahrzeuges etwas in den Hintergrund, wodurch Funktionen zur Verbesserung dieser oft deaktiviert werden. Ziel dieser Arbeit ist es aufzuzeigen, ob die Deaktivierung von Fahrbarkeitsfunktionen in der Getriebesoftware tatsächlich eine Reduktion der Emissionen mit sich bringt.

Um die Entwicklungszeit, und vor allem auch die Entwicklungskosten zu senken, werden heutzutage vermehrt Simulationsumgebungen aufgebaut. Diese Herangehensweise wurde auch in der vorliegenden Diplomarbeit genutzt, um Untersuchungen des Verbrauches und der Emissionen unter Berücksichtigung der vorliegenden Gesetzgebung abzuleiten. Durch den Einsatz einer Co-Simulation wird es ermöglicht, mehrere eigenständige Simulationsprogramme miteinander zu verbinden. Das in dieser Arbeit verwendete Co-Simulationsprogramm ist AVL Model.CONNECT. Die Simulationsprogramme beziehungsweise -modelle wurden darin durch sogenannte Ports, also Eingangs- und Ausgangssignale, miteinander verknüpft. Durch den Austausch von Daten innerhalb definierter Zeitschritte ergeben diese dann eine Gesamtsimulation. Um eine Fahrzeugdynamiksimulation eines dieselbetriebenen Fahrzeuges entlang einer RDE-Strecke durchzuführen, wurde das Simulationsprogramm AVLM VSM 4 verwendet. Dieses berechnet das Verhalten des Fahrzeuges und des Fahrers auf der vorgegebenen Strecke. Letztere wurde durch eine bereits bekannte RDE-Route mit GPS-Koordinaten ins Simulationsprogramm implementiert. Da das Motormodell in VSM keine Emissionen berechnen kann, musste ein anderes Modell miteinbezogen werden. Hierbei wurde ein bereits validiertes Motor- und Abgasmodell in die Simulationsumgebung implementiert, welches als FMU zur Verfügung gestellt wurde. Dieses wird als definierte Größe betrachtet und weist damit ein festgelegtes, aber realistisches Verhalten auf. Als Eingangsgröße in das Modell dient hauptsächlich die Fahrpedalposition des in VSM integrierten Fahrermodells, während das Motordrehmoment in das Fahrzeugmodell von VSM zurückgeschickt wird. Das dritte eigenständig laufende Simulationsprogramm neben VSM und dem Motor-/Abgasmodell ist die in Simulink aufgebaute Schaltstrategiesoftware. Dessen Schaltkennfeldanpassung erfolgt auf Basis generischer Motorenkennfelder sowie durch Abstimmung mit dem vorhandenen

Motormodell. Augenmerk wurde auf die unterschiedliche Schaltstrategie und dessen Fahrbarkeitsfunktionen gelegt. Die Datenstandsänderung der Getriebesoftware wurde mit Hilfe des Programmes INCA durchgeführt und so verändert, dass die Funktionen Fast-Off, Kurvenerkennung und die bremskraftabhängige Rückschaltung deaktiviert und aktiviert werden können. Nach entsprechender Applizierung der miteinander verknüpften Programme wurde die Simulation eines RDE-Streckenabschnittes durchgeführt. Daraufhin wurden die zwei Szenarien, jeweils mit deaktivierten und aktivierten Fahrbarkeitsfunktionen, untersucht und gegenübergestellt. Die Analyse der Daten zeigte eine deutliche Verminderung der Schaltheufigkeit mit aktivierten Fahrbarkeitsfunktionen. Diese bewirken einen im Schnitt niedrigeren Gang, wodurch auch die durchschnittliche Motordrehzahl höher liegt. Der Kraftstoffverbrauch stieg demgemäß um etwa ein Prozent an. Hingegen wurde aber festgestellt, dass die Schadstoffemissionen von Kohlenstoffmonoxid, Stickoxid, sowie Feinstaub um rund 8 bis 12 Prozent niedriger sind als bei deaktivierten Fahrbarkeitsfunktionen. Dieser Zusammenhang zwischen Fahrbarkeit und Emission zeigt auf, dass sich bei entsprechender Abstimmung des Antriebsstranges sogar eine erhöhte Fahrbarkeit in Verbindung mit einem niedrigeren Schadstoffausstoß ergeben kann.

Die vorgestellten Ergebnisse dürfen jedoch nicht einfach auf einen kompletten RDE-Zyklus hochgerechnet werden. Um nähere Rückschlüsse auf die Auswirkungen der Schaltstrategie auf Fahrbarkeit beziehungsweise Emission und Verbrauch schließen zu dürfen, bedarf es weiteren Analysen. Ein Ansatz wäre zunächst, die Schaltstrategie auf einen kompletten RDE-Zyklus zu optimieren. In weiterer Folge sollten mehrere unterschiedliche RDE-Fahrten durchgeführt werden, um möglichst viele Fahrsituationen abzudecken. Hierbei wäre eine bedarfsgerechte Applizierung der Schaltstrategie für unterschiedliche Streckenabschnitte – wie Bergfahrt, Stadtfahrt oder Autobahnfahrt etc. – sinnvoll. Dabei ist darauf zu achten, dass auch Emissionskennfelder mit entsprechender Gewichtung miteinbezogen werden, um die optimalen Schaltzeitpunkte zu finden. Außerdem könnten in Zukunft einzelne Fahrbarkeitsfunktionen betrachtet werden, um deren individuelle Auswirkungen näher zu beurteilen. Zudem könnten, anhand der Simulation eines WLTP-Zyklus, weitere Analysen hinsichtlich des Verbrauchs durchgeführt werden.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1: Abgaszusammensetzung eines Dieselmotors [2].....	3
Abbildung 2-2: Fahrzeuggeschwindigkeit (km/h) in Abhängigkeit der Zeit (τ) beim WLTP Klasse 3 bestehend aus den vier Phasen [6]	5
Abbildung 2-3: Vergleich von Fahrzyklen und dem Betriebsbereich eines Motors [8] .	6
Abbildung 2-4: AVL M.O.V.E iS RDE-Messsystem [10]	8
Abbildung 2-5: Schematische Darstellung einer Co-Simulationsumgebung.....	10
Abbildung 2-6: Zugkraftdiagramm mit den Bedarfskurven bei unterschiedlichen Steigungen für einen Mittelklassewagen mit 2-Liter-Ottomotor [12]	12
Abbildung 2-7: Mathematische Beschreibung des Beschleunigungsvorganges eines Fahrzeuges	12
Abbildung 2-8: Drehmomentkennfeld eines Dieselmotors in Anhängigkeit von der Pedalposition [13].....	13
Abbildung 2-9: Konventionelles Schaltkennfeld mit Einteilung in 3 Bereiche in Anlehnung an [14]	14
Abbildung 2-10: Schaltkennlinien der Schaltstrategie [15]	16
Abbildung 2-11: Eingangs- und Ausgangssignale einer Getriebesoftware [12].....	18
Abbildung 2-12: Schematische Struktur und Ablauf der Schaltstrategie in Anlehnung an [17]	24
Abbildung 2-13: Gegensätzliche Anforderungen eines Fahrers	25
Abbildung 3-1: Grundsätzliche Struktur von VSM [18]	27
Abbildung 3-2: Setup- Fenster für einen Motor [19].....	29
Abbildung 3-3: Schematische Antriebsstrang-Konfiguration	30
Abbildung 3-4: Einbindung eines externen Motormodells in VSM [19]	31
Abbildung 3-5: Teststecken-Setup Fenster in VSM [19].....	33
Abbildung 3-6: Gesamtmodell bestehend aus ECU-Steuergerät, Sensoren/Aktuatoren, Motor und Umweltbedingungen [20].....	37
Abbildung 3-7: CRUISE M Simulationsumgebung [22]	38
Abbildung 3-8: Ein- und Ausgangsgrößen des Zylindermodells in Verbindung mit dem zugehörigen Submodell-Netzwerk [21].....	39
Abbildung 3-9: Workflow zur Erstellung des Motormodells [22]	40
Abbildung 3-10: Schematisches Motor-/Verbrauchskennfeld mit den zugehörigen Schaltkennlinien	42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-11: Schaltstrategie-Modell in Simulink.....	46
Abbildung 3-12: Schaltkennlinien in Abhängigkeit von der Pedalposition und der Motordrehzahl	49
Abbildung 3-13: Schaltkennfeld im Drive Modus auf ebener Fahrbahn.....	51
Abbildung 3-14: Schaltkennfeld im Drive Modus für Bergauffahrt	52
Abbildung 3-15: Schaltkennfeld im Drive Modus für Bergabfahrt	53
Abbildung 3-16: Anpassung des Datenstandes in CRETA [24].....	54
Abbildung 3-17: Verknüpfung der Simulationsmodelle durch Bundles und Ports [25]	56
Abbildung 3-18: Zeitschritte des Kopplungsmechanismus [25]	57
Abbildung 3-19: Parallele Auswertereihenfolge [25].....	58
Abbildung 4-1: Ergebnisse mit deaktivierten Fahrbarkeitsfunktionen	62
Abbildung 4-2: Leistungsbedarf durch Beschleunigungswunsch und Beziehung zur Fahrbarkeit in Anlehnung an [16]	64
Abbildung 4-3: SPA Analyse des Beschleunigungspotentials mit deaktivierten Funktionen.....	65
Abbildung 4-4: Ergebnisse mit aktivierten Fahrbarkeitsfunktionen	66
Abbildung 4-5: SPA Analyse des Beschleunigungspotentials mit aktivierten Funktionen	67
Abbildung 4-6: Gegenüberstellung der zwei Szenarien.....	68
Abbildung 4-7: Gegenüberstellung der zwei Szenarien Abschnitt 1	69
Abbildung 4-8: Gegenüberstellung der zwei Szenarien Abschnitt 2	71
Abbildung 4-9: Gegenüberstellung der zwei Szenarien Abschnitt 3	72
Abbildung 4-10: Gegenüberstellung der zwei Szenarien Abschnitt 4	74
Abbildung 4-11: Gegenüberstellung der zwei Szenarien Abschnitt 5	75

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1: Grenzwerte für Euro 6d-TEMP und 6d für Dieselfahrzeuge im WLTP [4]	4
Tabelle 2-2: WLTP im Überblick [7]	6
Tabelle 2-3: RDE unter gemäßigten Bedingungen im Überblick [7]	7
Tabelle 3-1: Molaren Massen der Emissionskomponenten	44
Tabelle 3-2: Zuordnung der Ein- und Ausgangsgrößen der einzelnen Modelle	59
Tabelle 4-1: Interpretation der Fahrbarkeit anhand des SPA M Ratings	64
Tabelle 4-2: Gegenüberstellung der Ergebnisse	76
Tabelle 4-3: Abweichung der Emissionen am Ausgang der Abgasanlage (TP) und am Motorauslass (EO)	77

FORMELVERZEICHNIS

(2-1).....	12
(2-2).....	12
(3-1).....	32
(3-2).....	43
(3-3).....	43
(3-4).....	43
(3-5).....	43
(3-6).....	43
(3-7).....	60
(3-8).....	60
(4-1).....	77

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] ADAC, „Euro 6d-TEMP (WLTP): Alle Pkw-Modelle im Überblick,“ [Online]. Available: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/neuwagenkauf/euro-6d-temp-modelle/>. [Zugriff am 15 12 2019].
- [2] NGK Spark Plug Europe GmbH, „Abgase und Schadstoffe,“ 2020. [Online]. Available: <https://t.tekniwiki.com/de/lambdasonden/grundlagen-abgaswissen/abgase-und-schadstoffe.html>. [Zugriff am 24 01 2020].
- [3] R. v. B. Fred Schäfer, „Schadstoffreduzierung und Kraftstoffverbrauch von Pkw-Verbrennungsmotoren,“ 1993. [Online]. Available: https://books.google.at/books?hl=de&lr=&id=f_LQBgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP10&dq=schadstoffe+verbrennungsmotor&ots=w-LB85ly01&sig=wJl8KxLDFZCeROWAddcllnw1Uhl&redir_esc=y#v=onepage&q=schadstoffe%20verbrennungsmotor&f=false. [Zugriff am 08 01 2020].
- [4] B. Geringer und W. Tober, „Gesetzliche Vorschriften - Abgasgesetzgebung,“ 2010. [Online]. Available: http://www.auto-umwelt.at/_gesetzg/gesvs_abg.htm. [Zugriff am 10 01 2020].
- [5] VDA, „CO₂-Regulierung bei PKW und leichten Nutzfahrzeugen,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/co2-regulierung-bei-pkw-und-leichten-nfz/co2-regulierung-bei-pkw-und-leichten-nutzfahrzeugen.html>. [Zugriff am 14 01 2020].
- [6] Porsche Austria GmbH & Co OG, „NEFZ, WLTP und RDE: ein Vergleich im Überblick,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.volkswagen.at/wltp>. [Zugriff am 03 01 2020].
- [7] Jörg Kirst, „Der Dieselmotor - Zukunft oder Ende?,“ 2018. [Online]. Available: https://www.berlin.de/senuvk/umwelt/luft/luftreinhaltung/luftreinhalteplan_2025/download/2_Kirst_Dieselmotor.pdf. [Zugriff am 04 01 2020].
- [8] E. Bouvier, D. Kihás, J.-S. Roux, S. Vankayala, D. Jeckel, C. Rivière und M. Uchanski, „The influence of advanced boosting on transient NO_x control in Light Vehicle Diesel engines,“ 2016.

- [9] Europäischen Kommission, „Verordnung (EU) 2016/427 der Kommission vom 10. März 2016 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 6) (Text von Bedeutung für den EWR),“ 2016. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32016R0427>. [Zugriff am 24 01 2020].
- [10] M. Schöggel, „REAL DRIVING EMISSIONS (RDE) Was steckt wirklich dahinter?,“ 2018. [Online]. Available: https://www.avl.com/documents/1982862/8084402/10_RDE+Real+Driving+Emissions+was+steckt+wirklich+dahinter.pdf. [Zugriff am 22 01 2020].
- [11] P. Smolek, „Objektorientierte Modellierung und dynamische Co-Simulation mit CATIA V6 am Beispiel von Kraftfahrzeugsystemen,“ 2013.
- [12] G. Naunheimer, Harald; Bertsche, Bernd; Lechner, Fahrzeuggetriebe: Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion, 2. Auflage Hrsg., 2007.
- [13] R. Fischer, G. Jürgens, F. Küçükay, R. Najork und B. Pollak, Das Getriebebuch, Wien: Springer-Verlag, 2012.
- [14] D. V. Ngo, „Gear Shift Strategies for Automotive Transmissions,“ 2012.
- [15] H. Wallentowitz und K. Reif, Handbuch Kraftfahrzeugelektronik: Grundlagen-Komponenten- Systeme- Anwendungen, 2 Hrsg., Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011, p. 724.
- [16] C. Jung, *Shift Strategy Calibration Training*, Graz: AVL LIST GmbH, 2014, p. 220.
- [17] G. Walliser, Elektronik im Kraftfahrzeugwesen: Steuerungs-, Regelungs- und Kommunikationssysteme, 4 Hrsg., Renningen: expert verlag, 2004, p. 417.
- [18] J. Zehetner, P. Schöggel, M. Dank und K. Meitz, „Simulation of driveability in real-time,“ in *SAE Technical Papers*, 2009.
- [19] AVL List GmbH, „AVL VSM 4 - Real Time Vehicle Dynamics Simulation,“ AVL List GmbH, Graz, 2018.
- [20] G. Broustail und S. Ananthan, „Model Based Development and Calibration,“ in *AVL UK Expo 2015*, 2015.
- [21] M. Schüßler, I. Allmer, B. Hollauf, M. Kordon, C. Kozlik, G. Seewald, H. Hülser und AVL List GmbH, „Modellbasierte Emissionsoptimierung auf Triebstrang-Ebene,“ Graz, 2008.

- [22] F. Dorfer, „MOBEO™-A Game Changer in Model-based Calibration for Future Propulsion Systems,“ Graz, 2017.
- [23] E. Köhler und R. Flierl, Verbrennungsmotoren: Motormechanik, Berechnung und Auslegung des Hubkolbenmotors, 5 Hrsg., Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- [24] AVL List GmbH, „AVL CRETA 5 - Calibration Data Manager,“ AVL List GmbH, Graz, 2019.
- [25] AVL List GmbH, „Model.CONNECT - Integration of Virtual and Real Components,“ AVL List GmbH, Graz, 2019.