

**Bewertung von alternativen Antriebskonzepten in Fahrzeugen
mit unterschiedlichen Einsatzcharakteristiken**

Von der Fakultät Maschinenwesen

der

Technischen Universität Dresden

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

angenommene Dissertation

M. Sc. Ahmed, Mohamed Ali Hassan
akad. Grad, Name, Vorname

geb. am: 27.05.1972 in El-Minia, ÄGYPTEN

Tag der Einreichung: 27.09.2004

Tag der Verteidigung: 17.12.2004

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. G. Bernhardt
Prof. Dr.-Ing. habil. E. Bach
Dr.-Ing. G. Bröhl

Prof. Dr.-Ing. B. Schlecht
Vorsitzender der Promotionskommission

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	I
VERZEICHNIS DER SYMBOLE UND INDIZES	IV
1 Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung und Zielstellung.....	2
2 Stand der Technik	4
2.1 Einführung.....	4
2.2 Simulationswerkzeuge.....	4
2.3 Hybride Antriebsentwicklung.....	6
2.4 Allgemeine Untersuchungen zu Alternativen in der Fahrzeugtechnik.....	9
2.5 Der Brennstoffzellenantrieb.....	15
2.6 Die Traktorsimulation.....	19
3 Mathematisches Modell und Simulation	22
3.1 Überblick.....	22
3.2 Beschreibung des Programmablaufes.....	24
3.3 Mathematisches dynamisches Modell der Fahrzeugkomponenten.....	28
3.3.1 Verbrennungsmotor - Modell.....	28
3.3.2 Fahrzeug - Modell.....	29
3.3.3 Kupplungs - Modell.....	30
3.3.4 Getriebe - Modell.....	31
3.3.5 Hinterachs - Modell.....	33
3.3.6 Antriebsrad - Modell.....	33
3.3.7 Elektromotor - Modell.....	35
3.3.8 Modell der Traktionsbatterien.....	35
3.3.9 Modell der Brennstoffzellen.....	36
3.4 Zusammenwirken des Fahrsimulationsprogrammes und SIMULINK.....	37

4 Prüfstand und Messgerät	38
4.1 Rollenprüfstand.....	38
4.2 Abgasemissionsgeräte.....	40
4.3 Fahrzyklen.....	42
5 Bewertung der Simulationsergebnisse	45
5.1 Allgemeine Einführung.....	45
5.2 Verifikation der Simulationsergebnisse auf dem Rollenprüfstand mit dem Messfahrzeug Ford Transit.....	45
5.3 Simulationsbetrachtungen zu alternativen Antriebskonzepten.....	50
5.3.1 Einführung.....	50
5.3.2 Monovalentes Erdgasfahrzeug „Fiat Multipla“.....	50
5.3.3 Hybridfahrzeug „Toyota Prius“.....	53
6 Betrachtungen zur Optimierung von Transportprozessen auf dem Feld in der Ernte im Parallelverfahren	56
6.1 Allgemeine Einführung.....	56
6.2 Randbedingungen.....	57
6.3 Simulationsergebnisse.....	60
6.3.1 Fahrstrecke 1, 16 Tonnen grenzbeladen	60
6.3.2 Fahrstrecke 2, 16 Tonnen grenzbeladen	61
6.3.3 Fahrstrecke 3, 16 Tonnen grenzbeladen	62
6.3.4 Fahrstrecke 1, 24 Tonnen grenzbeladen	63
6.4 Verhalten des Traktors mit getriebenem und gezogenem Anhänger.....	65
6.4.1 Randbedingungen.....	66
6.4.2 Veränderte Geschwindigkeit und ebene Strecke.....	67
6.5 Verhalten des Traktors für verschiedene mittlere Geschwindigkeiten.....	70
7 Zusammenfassung und Ausblick	73

LITERATURVERZEICHNIS	75
ANLAGE A1	81
ANLAGE A2	92
ANLAGE A3	102
ANLAGE A4	136

VERZEICHNIS DER SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN

➤ Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
A_{Fz}	Fahrzeugfläche	m^2
A_h	Fläche der Haube	m^2
A_Z	Fläche der Zelle	m^2
B	Kraftstoffverbrauch	g/h
b_e	Spezifischer Kraftstoffverbrauch	g/kWh
B_T	Arbeitsbereite	m
c_1, c_2	Konstante der Widerstände	-
$c_{p-Abgase}$	Spezifische Wärme bei konstantem Druck des Abgases	kJ/kg K
c_{p-Kf}	Spezifische Wärme bei konstantem Druck des Kraftstoffs	kJ/kg K
c_w	Luftwiderstandsbeiwert	-
d	Dicke	m
dv/dt	Beschleunigung	m/s^2
E_{Abg}	Abgasemission des Fahrzeuges	g/kW h
$E_{Abg-Aus}$	Abgasemission des Verbrennungsmotors	g/kW h
F_B	Beschleunigungswiderstandskraft	kN
F_L	Luftwiderstandskraft	kN
F_R	Rollwiderstandskraft	kN
F_S	Steigungswiderstandskraft	kN
F_W	Gesamte Widerstandskräfte	kN
g	Erdbeschleunigung	m/s^2
h_{Luft}	Enthalpie der Luft	kJ/kg K
H_u	Unterer Heizwert	kJ/kg K
I_B	Strom der Batterie	A
I'	Strom einer Zelle	A
m	Zulässige Gesamtmasse	kg
M_D	Motordrehmoment	N m
M_{D-ist}	Ist-Motordrehmoment	N m
M_{Ga_soll}	Soll-Ausgangsdrehmoment des Getriebes	N m

M_{Ga_ist}	Ist-Ausgangsdrehmoment des Getriebes	N m
M_{Ge_soll}	Soll-Eingangsdrehmoment des Getriebes	N m
M_{Ge_ist}	Ist-Eingangsdrehmoment des Getriebes	N m
M_{Ha_ist}	Ist-Ausgangsdrehmoment der Hinterachse	N m
M_{Ha_soll}	Soll-Ausgangsdrehmoment der Hinterachse	N m
M_{He_ist}	Ist-Eingangsdrehmoment der Hinterachse	N m
M_{He_soll}	Soll-Eingangsdrehmoment der Hinterachse	N m
M_{K-soll}	Soll-Kupplungsdrehmoment	N m
M_{Neben}	Drehmoment der Nebenaggregate	N m
$M_{Träg}$	Trägheitsmoment	N m
M_{Ver}	Verlustmoment	N m
m_{Luft}	Luftmassenstrom	kg/s
\dot{m}_{Kf}	Kraftstoffmassenstrom	kg/s
m_B	Masse des Motorblocks	kg
m_H	Masse der Motorhaube	kg
m_N	Masse des Nebenaggregates	kg
P_a	Radleistung	kW
P'	Leistung einer Zelle	kW
P_B	Batterieleistung	kW
$(P_B)_{APU}$	Unterstützungsleistung	kW
$(P_B)_{total}$	Gesamte Batterieleistung	kW
P_e	Fahrleistung	kW
P_i	Inverter-/Kontrollerleistung	kW
P_m	Elektrische Motorleistung	kW
P_N	Elektrische Nebenleistung	kW
Q_{Abgas}	Abgasenergie	W
Q_{B1}	Wärme zum Motorblock	W
Q_{B2}	Luftstromwärme	W
Q_{HUK}	Konvektionswärme von der Haube zur Umgebung	W
Q_{HUS}	Strahlungswärme von der Haube zur Umgebung	W
Q_K	Wärmeenergie des Kühlers	W

$Q_{Kühl}$	Wärmeenergie des Kühlmittels	W
Q_{Kf}	Kraftstoffenergie	W
Q_{NHK}	Konvektionswärme zur Haube	W
Q_{NHL}	Wärmeübertragung zur Haube	W
Q_{NHS}	Strahlungswärme zur Haube	W
Q_{NUK}	Konvektionswärme zur Umgebung	W
Q_{NUS}	Strahlungswärme zur Umgebung	W
Q_Z	Wärme vom Zylinder	W
r_{dyn}	Dynamischer Reifenhalbmesser	m
S	Reifenschlupf	-
T_{Abgas}	Abgastemperatur	K
T_H	Haubentemperatur	K
T_K	Korrekturfaktoren	K
$T_{Kühl}$	Temperatur des Kühlmittels	K
T_{NI}	Innere Motorblocktemperatur	K
T_{N2}	Äußere Motorblocktemperatur	K
T_U	Umgebungstemperatur	K
T_Z	Zylindertemperatur	K
v	Fahrgeschwindigkeit	km/h
U	Batteriespannung	Volt
Z_{Stack}	Stack-Zahl	-
Z_{String}	String-Zahl	-
Z_{Zell}	Zellenzahl	-
α	Steigungswinkel	°
η_B	Wirkungsgrad der Batterie	%
η_e	Effektiver Wirkungsgrad	%
η_{EM}	Wirkungsgrad des Elektro-Motors	%
η_G	Wirkungsgrad des Generators	%
η_{HU}	Wirkungsgrad der Strahlungswärme	%
η_i	Elektrischer Wirkungsgrad des Inverters	%
η_m	Elektrischer Wirkungsgrad des Motors	%

η_{PG}	Wirkungsgrad des Planetengetriebes	%
η_{tr}	Übertragungswirkungsgrad	%
λ	Wärmeleitungskoeffizient	W/m K
ρ_{Luft}	Luftdichte	kg/m ³
σ	Stefan-Boltzmann Konstante	W/ m ² K ⁴
ω	Winkelgeschwindigkeit	rad/s

➤ Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

Abkürzungen	Ausdruck
A/F	Luft/Kraftstoff-Verhältnis
ABS	Antiblockiersystem
AC	Wechselstrom
ANN	Artificial Neural Network
APU	Auxiliary Power Unit
CAA	Clean Air Act
CAAA	Clean Air Admentments
CARB	California Air Resources Board
CNG	Compressed Natural Gas
CO	Kohlenmonoxid
CVT	Stufenloses Getriebe
DC	Gleichstrom
DI	Direkteinspritzung
DME	Direct Dimethyl Ether
DOE	Department Of Energy
EMF	Elektrische magnetische Kraft
EPA	Environmental Protection Agency
EU	Europäische Union
EV	Elektrofahrzeug
FEV	Zukünftiges Elektrofahrzeug
FTP 75	Federal Test Procedure
HEV	Hybridfahrzeug

HPU	Hybrid Power Unit
IC	Verbrennungsmotor
LEV	Low Emission Vehicle
LPG	Flüssiggas
LRR	Low Rolling Resistance
NAAQS	National Ambient Air Quality Standards
NECAR	New Electric Car
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NMHC	Nicht- Methan Kohlenwasserstoff
NO _x	Stickoxide
PEM	Proton Exchange Membrane
PM	Partikel
SCAQMD	South Coast Air Quality Management District
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
SFTP	Supplemental Federal Test Procedure
SULEV	Super Ultra Low Emission Vehicle
TLEV	Transitional Low Emission Vehicles
VVT	Variable Valve Timing
ULEV	Ultra Low Emission Vehicles
ZEV	Zero Emission Vehicle

1 Einführung

Der weltweit steigende Mobilitätsbedarf führt in der Zukunft zur weiteren Zunahme des Primärenergiebedarfs. Die Rohstoffvorräte unserer Erde sind begrenzt. Rohstoffe, die heute verbraucht werden, stehen zukünftigen Generationen nicht mehr zur Verfügung. Die sparsame und effiziente Nutzung der Ressourcen stellt deshalb den Schlüssel zu einer nachhaltigen Entwicklung dar. Im Mittelpunkt steht dabei der Energieverbrauch.

Vor allem die Industrieländer stehen vor der Herausforderung, ihren Verbrauch an begrenzten Energierohstoffen Schritt für Schritt zurückzufahren. Der Wirtschaftsbereich der Europäischen Union kann dabei eine positive Bilanz vorweisen. Eingeschlossen in diese Bilanz ist der Verkehrsbereich. Die modernen Fahrzeugflotten konnten durch die ständige Weiterentwicklung den Streckenkraftstoffverbrauch und die Abgasemissionen erheblich absenken. Eine Entwicklung, die noch nicht am Ende ist. Trotz dieser positiven Tendenz gerät die globale Bilanz durch eine dramatische Zunahme der Fahrzeugflotten, besonders in den Entwicklungsländern, kontinuierlich in eine Schieflage. Die Energieverbräuche steigen und die Ressourcen der Energieträger Öl, Gas und Kohle nehmen ab. Es ist bekannt, dass weltweit besonders in hochentwickelten Industrieländern dieser Entwicklung durch Alternativ-Konzepte entgegengesteuert wird.

Im Verkehrsbereich sind dies unter anderem veränderte Fahrzeugkonzepte (z. B. Hybridfahrzeuge) sowie die mittel- und längerfristige Substitution der konventionellen, mineralölstämmigen Kraftstoffe durch Erdgaskraftstoffe (SynFuel, nach der Shell-Mittel-Destillat-Synthese, SMDS, hergestellt) oder Kraftstoffe (Sun Fuel) aus regenerativen Energieträgern wie Restholz, Energiepflanzen oder Biomüll. Diese Entwicklungen werden durch eine permanente Reduzierung der Abgasemissionen von verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen begleitet. Insbesondere sind dies einerseits die limitierten Schadstoffe, welche in den einzelnen Ländern gesetzlich verankert sind, und andererseits die CO₂-Emission, die z. B. noch auf einer freiwilligen Selbstverpflichtung der Automobilindustrie (in Deutschland 140 g/km CO₂ – Ausstoß) basieren.

Alle diese Entwicklungen gilt es im Voraus abzuschätzen bzw. mit fundierten Betrachtungen in den Entwicklungsprozess einzuordnen. Dies gilt besonders für solche Länder, z. B. Ägypten, die den Technikfortschritt aus ökonomischer und ökologischer Betrachtung in sehr kurzer Zeit einzuführen haben. Die Simulationswerkzeuge aller Art werden bekannterweise dazu genutzt, um Fehlentwicklungen zu vermeiden. Je nach Aufgabe und Zielstellung sind diese Werkzeuge fachgerecht anzupassen und zu verifizieren. Im Speziellen werden konventionelle und alternative Antriebskonzepte für Fahrzeuge der verschiedensten Einsatzbedingungen mit einem Simulationswerkzeug bewertet.

1.1 Aufgabenstellung und Zielstellung

In dieser Arbeit erfolgt die Bewertung der Leistungsübertragung eines Antriebsmotors bis hin zum Antriebsrad eines Fahrzeuges. Diese Bewertung der einzelnen Elemente zur Leistungsübertragung im Gesamtsystem wird mit einem zu entwickelnden Simulationsprogramm auf der Basis von MATLAB 6.1/SIMULINK 4.1 durchgeführt. Für den Vergleich der zu untersuchenden Konzepte werden der Kraftstoffverbrauch und die Abgasemission herangezogen, wobei die Verifikation auf dem Rollenleistungsprüfstand bzw. direkt auf der Straße mit definierten Umläufen vorgenommen wird. Die Basis für eine Bewertung bilden die zum Nachweis der Abgasgrenzwerte gültigen Fahrzyklen. Im Einzelnen sind das der NEFZ-Zyklus (Neuer Europäischer Fahrzyklus) und der FTP 75-Zyklus (Federal Test Procedure). Des Weiteren dient zur Verifikation der Simulationsergebnisse ein interner Stadtzyklus (Dresden-Zyklus), der auf das genutzte Messfahrzeug abgestimmt ist.

In die Aufgabenstellung werden weiterhin folgende Fahrzeugkonzepte einbezogen:

- Erdgasfahrzeuge (NGV),
- Hybride, elektrische Fahrzeuge (HEV) und
- Spezialfahrzeuge für den landwirtschaftlichen Einsatz.

Die Grundlage für die Simulation bildet das jeweilige Fahrzeug mit dem vorgegebenen Antriebsstrang, der durch den Hersteller mithilfe der stationären Kennfelder

beschrieben worden ist. Aufgrund dieser Tatsache war es notwendig, für die verschiedenen Antriebsvarianten entsprechende Simulationsmodelle (Blöcke, Daten) zu erstellen bzw. anzupassen. Somit ist die Entwicklung eines überschaubaren und leicht handhabbaren Simulationsprogramms eine Grundvoraussetzung für die Durchführung der Untersuchungen.

Die Basis für die Simulationsbetrachtungen bildet das Programmpaket „Advisor“ (**Advanced Vehicle Simulator**), welches durch die Anstalt für Verbrennungsmotoren (AVL GmbH, Prof. H. List, Graz, Österreich) zur Verfügung gestellt wurde. Dieses Programmpaket läuft als Grundversion in der Entwicklungsumgebung von MATLAB/SIMULINK. Eine Anpassung der speziellen Module in ihren einzelnen Berechnungsschritten wurde vorgenommen, wodurch eine Erweiterung des Programms hervorging. Besonders in den Abschnitten zur Bewertung und Darstellung der ermittelten Ergebnisse ist „Advisor“ eingesetzt worden.

Im Rahmen dieser Arbeit sind somit allgemeingültige Modelle zur Bewertung der Leistungsübertragung in Straßenfahrzeugen und landwirtschaftlichen Spezialfahrzeugen, wie Traktoren, zu entwickeln.

2 Stand der Technik

2.1 Einführung

Es gehört zum Stand der Technik, dass Konzeptstudien zu Fahrzeugen der verschiedensten Art mithilfe von Simulationsbetrachtungen entwickelt werden.

Je nach Zielstellung werden kundenspezifische Fragen wie Mobilität, aktive und passive Sicherheit, Komfort, Zulässigkeit, Wirtschaftlichkeit usw., herstellerepezifische Fragen wie Kostensenkung, Verkürzung der Entwicklungszeit, Innovationen usw. und übergeordnete Anforderungsprofile wie Emissionen, Verbrauch, Recycling, Geräusche usw. in die Betrachtungen einbezogen. Je nach Aussagekraft werden dann verschiedene Modellebenen in den Simulationen berücksichtigt.

Im Allgemeinen werden bei der Antriebsstrangsimulation die rein mechanischen Komponenten wie Verbrennungsmotor, Kupplung, Getriebe, Gelenkwellen, Achsgetriebe und Antriebsrad (konventioneller Antrieb) berücksichtigt. Die Auswirkungen elektromagnetischer und mechanischer Hilfskomponenten werden je nach Fragestellung in die Simulationsebene einbezogen.

Dies bezieht sich auch auf die Bewertung von Alternativkonzepten wie Hybridfahrzeuge oder klassische Elektro- und Brennstoffzellenantriebe.

Ohne Einbußen an Komfort und Mobilität sind diese bezüglich des Emissionsminderungs- und Verbrauchsminderungspotenziales in den Stand der Technik einzuordnen.

2.2 Simulationswerkzeuge

Aus der Literatur sind eine Vielzahl von Simulationswerkzeugen bekannt. Im Einzelnen sind dies (auszugsweise):

SIMPLEV: (Simple Electric Vehicle Simulation Program) Es ist durch Idaho National Engineering Laboratory entwickelt worden. Das Programm dient zur Simulation des Kraftstoffverbrauches, der Abgasemissionen und weiterer beschreibender Parameter. Es dient der Simulation von Elektro- und Hybridfahrzeugen /1/.

Fasima II: Mit diesem Simulationsprogramm steht an der Universität Stuttgart ein Werkzeug zur Verfügung, das die Untersuchung auch komplexer Antriebsstrangkonfigurationen ermöglicht /2/.

CarSim: Das Programm ist ein Simulationswerkzeug, das durch AeroVironment entwickelt wurde. Die ausgegebenen Ergebnisse dieses Simulationsprogramms sind mit den gemessenen Daten verifiziert worden /3/.

HVEC: (Hybrid Vehicle Evaluation Code) Es ist durch Lawrence Livermore National Laboratory entwickelt worden. Das Programm simuliert elektrische Fahrzeuge und Hybridfahrzeuge. Hier können Kraftstoffverbräuche, Abgasemissionen und charakteristische Merkmale mit dem Programm ermittelt werden. Das Simulationswerkzeug basiert auf MATLAB/SIMULINK /4/.

CSMHEV: Es ist ein Simulationsprogramm, das durch „Colorado School of Mines“ erstellt wurde, um das Verhalten des Hybridfahrzeuges zu bewerten. Das Simulationswerkzeug basiert auf MATLAB/SIMULINK /5/.

FaSimu: Das Simulationsprogramm wurde durch das Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik der HTW Dresden (FH) entwickelt. Die vorhandene Version ermöglicht die lineare Fahrsimulation auch eines Hybridfahrzeuges. Die Fahrzeugkonfiguration lässt sich modular - je nach Einsatzzweck - zusammenstellen. Dieses ist durch Auswahl vorhandener Module, wie z. B. Getriebe, Schaltprogramm, Elektromotor und Batterien, aus Kennfeld-Datenbanken möglich. Das Simulationsprogramm basiert auf TURBO PASCAL /6/.

V-Elph: Das Simulationsprogramm ist durch die Texas A&M Universität entwickelt worden. Das Programm befasst sich mit der Kontrollstrategie des Hybridfahrzeuges. Die erweiterte Version des Simulationsprogramms ermittelt das Verhalten für HEV. Das Simulationswerkzeug basiert auf MATLAB/SIMULINK /7/.

2.3 Hybride Antriebsentwicklung

Trotz des sehr hohen Entwicklungsstandes der verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeuge (z. B. Diesel-Pkw mit Abgasnachbehandlung) wird weltweit nach alternativen Antriebskonzepten gesucht. Diese Konzepte sind durch eine Reduzierung des Energieverbrauchs, der Abgasemissionen (einschließlich der CO₂-Emission), der Geräuschemission und des möglichen lokalen emissionsfreien Betriebes in sensiblen Gebieten charakterisiert /8/.

Dem gegenüber erhöhen sich bei den bisherigen hybriden Antriebssystemen die Fahrzeugmasse und die Herstellungskosten. Besonders problematisch ist die Kundenakzeptanz für eine umfassende Markteinführung. Der Kunde (möglicher Käufer) wägt ab, welche Vorteile das hybride Antriebssystem gegenüber den konventionell angetriebenen Fahrzeugen hat. Erkennt er diese nicht, dann wird auch die modernste, aber sehr teure Technik vom Markt nicht angenommen /9/. Die bisherigen Verkaufszahlen in Deutschland dokumentieren diese Haltung. Diese zögerliche Markteinführung ändert sich dann schlagartig in den hochentwickelten Ländern, wenn die Energiepreise der Erdölressourcen drastisch ansteigen werden und der Gesetzgeber durch Gesetze und Verordnungen die Voraussetzung für die Einführung derartiger Technologien schafft.

Hybridfahrzeuge sind definitionsgemäß Fahrzeuge mit mindestens zwei Energiewandlern (Verbrennungsmotor und Elektromotor) und zwei verschiedenen Speichern (Kraftstoff und Batterie).

Hybridfahrzeuge werden in Seriell- und Parallelhybride unterschieden. Die Einteilung hängt mit der Art des Antriebes zusammen. Während bei einem seriellen Hybrid das Antriebsmoment grundsätzlich vom Elektromotor bereitgestellt wird, können beim parallelen Hybrid der Verbrennungsmotor und der Elektromotor über Kupplungen einzeln oder zusammen für den Antrieb genutzt werden.

Es ist erkennbar, dass bei den Hybriden das Elektrofahrzeug (E-Antrieb) und der konventionelle Antrieb kombiniert sind.

Somit sind die Vorteile des lokal emissionsfreien Betriebes des E-Antriebes (begrenzte Reichweite, innerorts) mit dem konventionellen Antrieb für den Weitreckenverkehr miteinander kombinierbar. Je nach Entwicklungsstand ist es möglich, den

Verbrennungsmotor einmal mit alternativen Kraftstoffen wie Erdgas, Pflanzenölen, Methanol, DME, Synfuel, Sunfuel, Wasserstoff usw. zur Absenkung der Abgasemissionen zu nutzen und zum anderen den Verbrennungsmotor durch den elektro-chemischen Wandler (Brennstoffzelle) zu ersetzen /10/.

Hierbei soll nicht unerwähnt bleiben, dass die On-board-Speicherung gasförmiger Energieträger (Druckspeicher- z. B. für Erdgas 200 bar, für Wasserstoff bis 700 bar - oder Flüssigspeicher - Kryotechnologie – z. B. für Erdgas –162 °C und Wasserstoff – 253 °C) für die Nutzung in Hybrid oder konventionellen Fahrzeugen äußerst problematisch ist und sich in einer umfassenden Entwicklung befindet /11/.

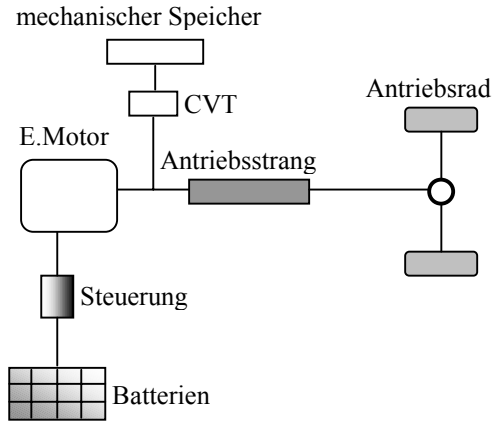
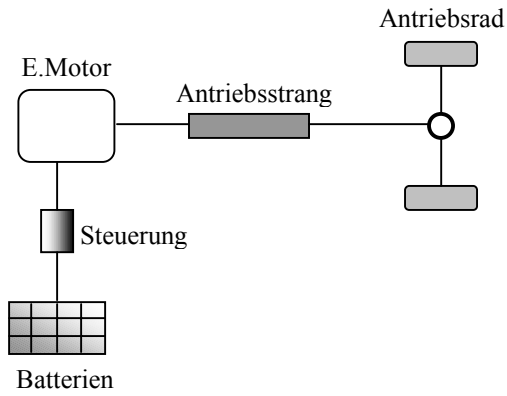
Die Batteriespeicher, welche sowohl für Elektro-Fahrzeuge als auch für Hybridfahrzeuge von funktionsbestimmender Bedeutung sind, wurden und werden umfassend entwickelt und erprobt. Einen zusammenfassenden Überblick über Hochleistungsbatterien gibt die Literaturstelle /12/. Ein umfassender Feldtest mit 60 Elektro-Fahrzeugen und vier zur Verfügung stehenden Hochenergiebatteriesystemen (Natrium-Schwefel (Na/S), Natrium - Nickelchlorid (Na/NiCl₂), Nickel-Cadmium (Ni/Cd) und Blei-Gel) entsprechend des Standes der Technik fand auf der Insel Rügen im Zeitraum von 1992 bis 1996 statt /13/.

Die Ergebnisse waren sowohl für die verschiedenen E-Antriebsstrangkonfigurationen als auch für die Batterie-Systeme (Schnellaufladung, Ladezyklen, Energieinhalt, Reichweite) im abgegrenzten Bewegungsraum vielversprechend für dieses Antriebssystem.

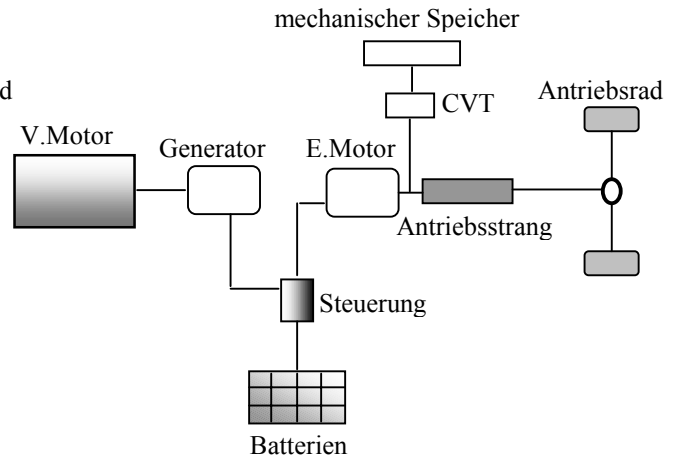
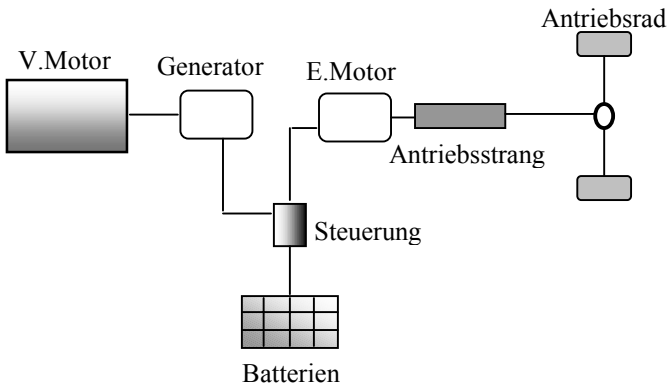
▪ **Paralleles Hybridkonzept**

Bei einem parallelen Hybridkonzept (Abb. 2.1) werden zwei Antriebsquellen verwendet. Es besteht durch die Anordnung der Baugruppen die Möglichkeit, den konventionellen Antriebsstrang, den E-Antrieb oder die Kombination beider zu nutzen /14/, wodurch der emissionsfreie Kurzstreckenbetrieb (z. B. innerorts) und der Weistreckenbetrieb (z. B. außerorts) abgedeckt werden kann. Zur Beschleunigung des Fahrzeuges wird die Kombination (Boosterbetrieb) beider zur Anwendung gebracht. Eine Bremsenergierückgewinnung ist möglich. Die Leistung der Antriebsmotoren ist auf die Fahrzeugmasse und auf die Einsatzcharakteristik abgestimmt.

▪ **Elektrofahrzeug**



▪ **Serielles Hybridfahrzeug**



▪ **Paralleles Hybridfahrzeug**

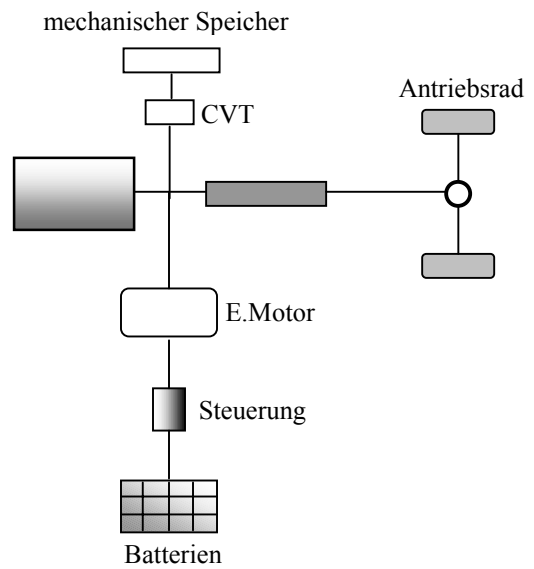
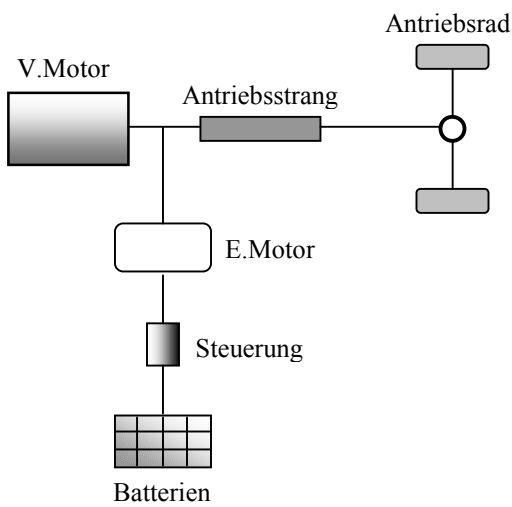


Abb. 2.1 :Kraftflüsse in Elektrofahrzeugen und Hybridfahrzeugen

Praktisch realisiert ist dieses Konzept in den Fahrzeugen Toyota Prius /15/ (erstes auf dem Markt befindliches Serienfahrzeug), Renault Kangoo /16/ und VW Golf II /17/.

▪ **Serielles Hybridkonzept**

Beim seriellen Hybrid wird die Antriebsleistung grundsätzlich über die E-Seite realisiert. Die Elektroenergie wird über die Verbrennungsmotor/Generatoreinheit erzeugt und entweder direkt dem Antriebsstrang zugeführt oder in der Batterie, je nach Ladungszustand, zwischengespeichert (Abb. 2.1) /18, 19/.

Vorteilhaft ist, dass die Verbrennungsmotor/Generatoreinheit im optimalen Kennfeldbereich (minimaler Kraftstoffverbrauch, minimale Abgasemissionen) betrieben und die Energierückgewinnung (E-Motor/Generator-Batterie) ohne Weiteres realisiert werden kann. Nachteilig ist der schlechtere Wirkungsgrad durch die mehrfache Energiewandlung und die erhöhte Fahrzeugmasse. Praktisch realisiert ist dieses Konzept im Citroen Xsara /20/, im Fiat Ecodriver /21/ und Audi duo /22/.

Aus dem seriellen Hybrid lassen sich formal auch Brennstoffzellenantriebe ableiten, indem die Verbrennungsmotor/Generatoreinheit durch ein Brennstoffzellenmodul (Brennstoffzelle mit Brenngaserzeugung bzw. Brenngasbereitstellung) ersetzt werden kann.

Hybridfahrzeuge werden bei verschiedenen Herstellern aus der Produktpalette der konventionellen Fahrzeuge abgeleitet. Es sind Prototypen bzw. Entwicklungsmuster zur Darstellung von Konzepten bzw. zur Erprobung von Einzelkomponenten und Teilsystemen.

Im Weiteren wird der Stand der Technik auszugsweise dahingehend wiedergegeben, dass dokumentiert wird, welche Bedeutung alternative Konzepte für die zukünftige Fahrzeugentwicklung haben.

2.4 Allgemeine Untersuchungen zu Alternativen in der Fahrzeugtechnik

Moeller F. H. /23/ hat Experimente für einen Kombiwagen des Typs VW Passat 1.9 TDI mit Turboaufladung, Direkteinspritzung durchgeführt. Der Kraftstoffverbrauch des Fahrzeuges wurde auf einer 20 km langen Strecke mit verschiedenen durchschnittlichen Geschwindigkeiten mithilfe des Bordreisecomputers gemessen.

Die Ergebnisse dienen zur Berechnung der allgemeinen Kräftefordernisse und des Motorwirkungsgrades. Außerdem wurden diese Ergebnisse mit zwei theoretischen Modellen von Hybridfahrzeugen gleichen Typs (VW Passat) und Gewichts verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass das simulierte Hybridfahrzeug gegenüber dem mit Dieselmotorkraftstoff betriebenen Fahrzeug geringere Kraftstoffverbräuche und Abgasemissionen aufweist.

Nach E. Noreikat /24/ wird das Fahrzeug weiterhin der wichtigste Träger der menschlichen Mobilität bleiben. Damit ergeben sich aber auch erhebliche Probleme bezüglich der Schonung von Erdölressourcen und des Umweltschutzes. Die Verschärfung der Emissionsgesetze, eine Reglementierung des Kraftstoffverbrauchs und die Endlichkeit der Erdölreserven (Energievorräte) werfen die Frage auf, welche Stellung alternative Energien (z. B. elektrischer Strom, Wasserstoff, Methanol, Erdgas) und alternative Antriebe (z. B. die Brennstoffzelle) in der Zukunft einnehmen können. Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge besitzen ein hohes Potenzial zur Lösung der mit herkömmlichen Fahrzeugen verbundenen Probleme. Ein Brennstoffzellenfahrzeug bringt gegenüber herkömmlichen Fahrzeugen folgende Vorteile:

- hoher Wirkungsgrad bei der Wandlung von chemischer zu elektrischer bzw. mechanischer Energie,
- lokale Schadstofffreiheit, in Bezug auf die gesamte Energiekette,
 - Minderung der Schadstoffemissionen,
 - deutliche Reduzierung der CO₂-Emission und
- geringe Lärmemission.

Die ständig steigenden Anforderungen des Kunden bezüglich Umweltverträglichkeit, Technikvorteil, Imagevorteil und Kosten können vom Brennstoffzellenfahrzeug erfüllt werden. Sie stehen aber erst am Anfang ihrer Entwicklung. Dennoch besitzt die Brennstoffzelle das herausragende Potenzial, als künftiger Antrieb für Kraftfahrzeuge zu dienen.

Die Untersuchung eines autarken Hybrides beschreibt T. Vollmer /25/. Ideal wäre also ein Antriebskonzept, das einerseits alle Möglichkeiten der Kraftstoffeinsparung im

verbrennungsmotorischen Betrieb ausschöpft und andererseits einen Kurzstreckenbetrieb mit rein elektromotorischem Antrieb ermöglicht. Diesem Ideal will der autarke Hybrid nahe kommen. Eine Kombination geeigneter Komponenten des Antriebsstrangs (Verbrennungsmotor, Getriebe, E-Maschine, etc.) ermöglicht die Erarbeitung einer optimalen Konfiguration. Der Verbrennungsmotor (konventionelle Bauart, verbrauchs- und schadstoffarm) wird ausschließlich in Fahrbereichen eingesetzt, wo er verbrauchsoptimal (z. B. Wirkungsgrad 42 % bei einem Turbodiesel-Direkteinspritzer) und umweltschonend arbeitet und gegebenenfalls gleichzeitig die elektrischen Komponenten mit Energie versorgen kann (Bordnetz, Laden der Batterie). Ziele dieser Arbeit sind die Reduzierung von Primärenergieverbrauch und Schadstoffemissionen sowie die Möglichkeit des emissionsfreien Betriebes in Ballungszentren.

Bei B. Kraßer /26/, bedingt durch die Betriebsweise des „Autarken Hybrid“, wird die Batterie von dem als Generator wirkenden elektromechanischen Energiewandler aufgeladen. Bei geringer Leistungsanforderung durch den Fahrer treibt der Wandler das Fahrzeug an. Der Wirkungsgrad aller Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs geht somit quadratisch in die elektrische Energiebilanz ein. Für die Kraftstoffeinsparung ist deshalb ein hoher Wirkungsgrad dieser Komponenten entscheidend. Als Ziel wurde definiert, dass der Wandler mindestens 90 %, der Wechselrichter mindestens 95 % Wirkungsgrad erreichen soll. Ebenfalls im Sinne einer Energieeinsparung ist auf ein geringes Fahrzeuggewicht zu achten. Es wurde deshalb festgelegt, dass Wandler und Wechselrichter zusammen ein Gesamtgewicht von 20 kg nicht überschreiten sollen. Der Antrieb ist so auszulegen, dass die geforderte Dauerleistung bei einer Drehzahl des Verbrennungsmotors von 2000 U/min erreicht wird. Ab diesem Wert bis zur Maximaldrehzahl des Verbrennungsmotors von ca. 6000 U/min soll die Leistung, wenn möglich, konstant bleiben, das entspricht einer Drehzahlspitzung von 1:3. Durch eine Zahnradstufe mit einem festen Übersetzungsverhältnis von 1:3 wird die Drehzahl des Elektromotors (Nenn Drehzahl 6000 U/min; Maximaldrehzahl 18000 U/min) auf das Drehzahlniveau des Verbrennungsmotors herabgesetzt. Die Überlegungen zur Kraftstoffeinsparung zeigen, dass bei einer elektrischen Antriebsleistung von 8 kW die Einsparung maximal ist. Um

ein gutes Beschleunigungsverhalten sowie einen akzeptablen rein elektrischen Betrieb zu erreichen, sollte der elektrische Antrieb kurzfristig (ca. 30 s) die doppelte Leistung bzw. das doppelte Moment abgeben können.

Nach P. Dietrich /27/ können Hybridantriebe damit definiert werden, dass sie über mindestens zwei Energiespeicher (Kraftstoff und Elektromotor) und über zwei Energiewandler (z. B. Verbrennungsmotor und Elektromotor) verfügen. Vor allem unter dem Aspekt des Verbrauchs liegt die Verwendung eines Energiespeichers nahe, der rekuperativ eingesetzt werden kann. Der Verbrennungsmotor als Antriebsquelle verfügt über die Vorteile eines geringen Leistungsgewichtes und eines energiedichten Kraftstoffs. Leider verursacht er bei der Energieumsetzung auch lokal Abgasemissionen und es mangelt ihm an der Möglichkeit zur Rekuperation von kinetischer Fahrzeugenergie (Bremsenergie). Demgegenüber steht der Elektroantrieb mit einem flexiblen 4-Quadranten-Betrieb und den lokal besseren Abgasemissionen bei vorteilhaftem Lärmverhalten. Die Batterie stellt zumindest heute als Energiespeicher eine technische und wirtschaftliche Limitierung dar.

D. Gospodaric /28/ begründet, dass der häufige Ersatz verschiedener mechanischer und hydraulischer Systeme durch mechatronische Systeme in einer stark steigenden Anzahl von elektrischen/elektronischen Systemen im Fahrzeug resultiert. Beispiele für diese Tendenzen sind nicht nur in Hybrid- und Elektrofahrzeugen zu finden. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit für eine qualifizierte Entwicklung solcher Systeme sowie deren Verhalten auf Komponenten- und Systemebene. Vorgehensweisen für die Berechnung, Integration und Implementierung bei der Betrachtung elektromagnetischer Komponenten in Antriebssträngen von Hybrid- und Elektrofahrzeugen werden gezeigt. Die geeignete Modellierung von elektrischen Komponenten und deren Integration in eine Gesamtfahrzeug- und Antriebsstrangsimulation gibt die Möglichkeit, auf Komponentenebene zu optimieren und gleichzeitig Normal- und Ausnahmestände im System zu erkennen. Dabei können relativ schnell weitreichende simulative Tests von Gesamtfahrzeugen durchgeführt werden, sodass neben den Standardgrößen wie mechanische, elektrische Leistung und Energie (bei Elektro- und Hybridfahrzeugen), auch sekundäre Größen

wie Kraftstoffverbrauch und Emissionen (bei konventionellen und Hybridfahrzeugen) abgeleitet werden können. Voraussetzung hierfür ist eine akkurate Modellierung nicht nur der elektrischen Komponenten, sondern auch insbesondere der für diese Sekundärgrößen relevanten mechanischen Komponenten wie Verbrennungsmotor und Abgassystem.

U. Höpfner /29/ zeigt in Untersuchungen zu den Umweltauswirkungen des Elektrofahrzeuges in der Gegenüberstellung mit einem konventionell angetriebenen Fahrzeug sehr unterschiedliche und oft widersprüchliche Ergebnisse. Eine Ursache dafür liegt in der lückenhaften Datenbasis für derartige Untersuchungen, sodass häufig Verallgemeinerungen und pauschale Annahmen notwendig wurden. Mit den Ergebnissen des Forschungsprojekts auf der Insel Rügen steht nunmehr ein hinsichtlich der Fülle und dem Detail einzigartiges Untersuchungsmaterial zur Verfügung. Außerdem wurden seitens des Auftraggebers die Rahmenbedingungen für eine eingehende wissenschaftliche Dokumentation und Auswertung geschaffen. Somit konnten in der „Vergleichenden Ökobilanz“ erstmals zahlreiche, für die Beurteilung der Umweltauswirkungen maßgebliche, Einflüsse berücksichtigt werden:

- Die bei Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren differierenden Baugruppen wurden von der Rohstoffgewinnung über die Aufbereitung und Nutzung bis zur Wiederverwertung von Sekundärrohstoffen verfolgt, desgleichen die Bereitstellungskette für Energie von der Förderung bis zur Nutzung im Kfz.
- Der Energieverbrauch der Rügen-Elektrofahrzeuge und ihrer Baugruppen, besonders der Batterien, wurde im Detail auf zahlreiche Einflussgrößen hin untersucht und zahlenmäßige Abhängigkeiten beschrieben.
- Der Einfluss der Einsatz- und Nutzungsbedingungen auf Energieverbrauch und Emissionen der Elektro- und Verbrennungs-Kfz wurde in einem Rechenmodell erfasst, welches die wesentlichen Parameter in Sensitivitätsanalysen zu variieren erlaubt.
- Alle Emissionen wurden nach dem Ort ihrer Entstehung in dicht besiedeltem, schwach besiedelten und unbesiedelten Gebieten („Emissionsortsklasse I, II, III“) analysiert. Damit wurden zugleich die Voraussetzungen geschaffen, um Umweltwirkungen nach Ort und Qualität der Wirkung zu unterscheiden.

Das Konzept der „Vergleichenden Ökobilanz“ weist zusätzlich folgende Merkmale auf:

Für Analyse und Vergleich gelten weitestgehend das Bezugsjahr 1996 und der Bezugsraum Deutschland. Dabei werden den Elektrofahrzeugen der Rügen-Generation neue Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren gegenübergestellt, welche die Auflagen der aktuellen Gesetzgebung erfüllen. Die Emissionen der stationären Quellen, d. h. der Kraftwerke und der Raffinerien werden für den bundesdeutschen Durchschnitt dieser Quellen im Bezugsjahr ermittelt. Für andere Prozesse gelten die jeweils aktuellen lokalen Randbedingungen.

Durch W. Boll /30/ wurde ein Fahrtrieb mit einem 55 kW-Dieselmotor und einem Elektromotor in Verbindung mit einem 5-Gang Schaltgetriebe gewählt. Der Elektromotor ist ein Asynchronmotor. Er befindet sich in einem Zwischenflansch zwischen dem Verbrennungsmotor und dem Schaltgetriebe. Der Läufer des Elektromotors ist mit der Getriebeeingangswelle drehfest verbunden. Bei Schaltvorgängen muss wegen des vergrößerten Trägheitsmomentes der Getriebewelle stets elektrisch mitsynchronisiert werden. Der Elektromotor ist auf eine Nennleistung von 14 kW ausgelegt, kann aber im Minutenbereich mit über 20 kW belastet werden. Die Batterie befindet sich im Heck des Fahrzeugs. Sie ist zweigeteilt und besteht aus 100 NiCd - Zellen mit einer Nennspannung von 120 V und einem Energieinhalt von 4,5 kWh. Damit wird eine Reichweite von über 20 km erreicht.

Das Mehrgewicht gegenüber dem Basisfahrzeug beträgt 310 kg, die Zuladung bleibt aber erhalten. Jedoch schrumpft der Kofferraum auf ca. 70 % seines ursprünglichen Volumens.

Es wird dargelegt, dass im Elektrobetrieb die mögliche Fahrgeschwindigkeit von 86 km/h höher liegt als in einer innerstädtischen emissionsfreien Zone nötig wäre /31/. Hieraus folgt auch die weitere Zielvorgabe, die Fahrleistung und Reichweite im emissionsfreien Betrieb auf ein sinnvolles Maß zu beschränken.

T. Allgeier /32/ beschreibt eine Bosch-Motorsteuerung, die für den Betrieb mit Erdgas modifiziert wurde. Die wichtigsten Stellgrößen der drehmomentgeführten Motorsteuerung sind Gaseinblasung mit Multipoint-Technik, zylinderindividuelle Zündung und Füllungssteuerung mit elektronisch betätigter Drosselklappe. Neben der

Funktionalität, wie sie auch bei Benzinmotoren eingesetzt wird, beinhaltet die Steuerung spezifische Funktionen für Gasbetrieb, um die Vorteile eines Erdgasverbrennungsmotors voll ausschöpfen zu können. Dazu zählt der hohe Wirkungsgrad bei gleichzeitig niedrigen CO₂-Emissionen. Die Beurteilung des Konzepts erfolgte an einem abgasturboaufgeladenen 3 Zylinder 1,0 l Opel Ecotec Motor. Die Prüfstandsergebnisse zeigen eine Reduzierung der CO₂-Emissionen von über 30 % gegenüber dem Serienbenzinmotor. Nahe an der Volllast, bei der ein effektiver Mitteldruck von rund 21 bar erreicht wird, steigt der Motorwirkungsgrad auf das Niveau eines Dieselmotors.

T. Spörl berichtet über ein Programm FASIMA11 /2/. Es gestattet die Untersuchung komplexer Antriebsstrangkonfigurationen. Als Anwendungsbeispiel wird die Untersuchung eines Fahrzeuges der Kompaktklasse vorgestellt. Die Serienvariante eines Fahrzeuges mit 5-Gang-Handschaltgetriebe wurde mit zwei hybriden Varianten und einer Variante mit einem CVT - Getriebe verglichen /33/.

Die rechnerische Simulation ist ein wertvolles Hilfsmittel zur Quantifizierung ihrer Eigenschaften bereits in der Konzeptphase. Da nicht für jeden neuen Triebstrang und für jede neue Fragestellung ein neues Simulationsprogramm erstellt oder ein bereits bestehendes umprogrammiert werden kann, wurden Simulationsprogramme erarbeitet, bei denen der Benutzer den zu simulierenden Antriebsstrang aus Grundbausteinen aufbauen kann, ohne in den Programmcode eingreifen zu müssen. Insgesamt hat diese Untersuchung gezeigt, dass es nur durch eine Erweiterung eines bestehenden Fahrzeuges durch zur Zeit verfügbare Komponenten auf autarken Hybridbetrieb noch nicht zwangsweise zu Kraftstoffeinsparungen kommen muss.

2.5 Der Brennstoffzellenantrieb

Eine Brennstoffzelle ist eine Vorrichtung zur direkten Umwandlung chemischer Energie in elektrische Energie - analog zur Batterie. Anders als bei galvanischen Zellen oder Batterien entlädt sich eine Brennstoffzelle aber nicht, und sie kann auch nicht aufgeladen werden. Sie arbeitet kontinuierlich, solange von außen Brennstoff und Oxidationsmittel zugeführt werden. Dabei liegt der thermische Wirkungsgrad heutiger Brennstoffzellen maximal bei etwa 45 %.

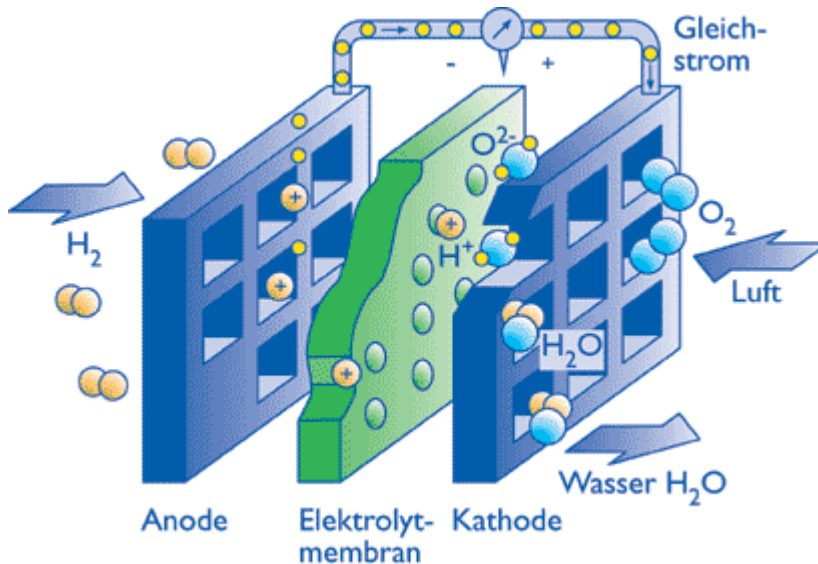


Abb. 2.2: Schematisches Diagramm der Reaktionen in einer einfachen Brennstoffzelle

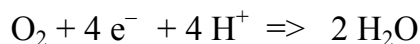
Eine Brennstoffzelle enthält eine Anode, an der Brennstoff zuströmt (meist Wasserstoff oder wasserstoffreiche Gase), und eine Kathode, an der das Oxidationsmittel zuströmt, meist Luft oder Sauerstoff (Abb. 2.2) /34/.

Die beiden Elektroden sind durch einen elektrolytischen Ionenleiter voneinander getrennt. Bei einer PEM Brennstoffzelle lässt eine hauchdünne Membran nur Protonen, also positiv geladene Wasserstoff-Ionen (H^+), passieren. Die Elektronen der Wasserstoff-Atome werden am Dreiphasenkontakt (Elektrode, Katalysator, Membran) von der Elektrode aufgenommen, während die Wasserstoff-Ionen mit den Sauerstoff-Ionen auf der anderen Seite reagieren. Durch den Elektronenüberschuss auf der Wasserstoff-Seite und den Elektronenmangel auf der Sauerstoff-Seite des Elektrolyts bilden sich Plus- und Minuspol (Kathode/Anode) aus. Die Energie stammt aus der Reaktion der Wasserstoffteilchen mit den Sauerstoffteilchen.

Formal lautet die Anodenreaktion /35/:



Die Kathodenreaktion lautet:



Als Abfallprodukt entsteht an der Kathode lediglich unbedenkliches Wasser bzw. Wasserdampf. Dieses muss kontinuierlich abgeführt werden, damit die Zelle nicht überflutet wird.

Eine weitere für den Fahrzeugeinsatz speziell für APU eingesetzte Brennstoffzelle ist die SOFC.

Diese Brennstoffzelle ist eine Hochtemperaturbrennstoffzelle, die bei Temperaturen von etwa 800 °C arbeitet. Bei diesen Temperaturen ist der Feststoffelektrolyt („Solid Oxide“) - Zirkoniumdioxid (ZrO_2) mit Zusatzstoffen - in der Lage, Sauerstoff-Ionen zu transportieren. Geeignete Brennstoffe sind in diesem Fall neben reinem Wasserstoff auch Kohlenmonoxid, Methan oder Erdgas. An der Kathode wird Luft oder Sauerstoff zugeführt. Die hohe Arbeitstemperatur solcher Feststoffoxid-Brennstoffzellen erlaubt die direkte Zufuhr von Methan als Brennstoff, der nicht den Einsatz eines teuren Platinkatalysators an der Anode erfordert. Diese Zellen sind außerdem relativ unempfindlich gegenüber Verunreinigungen im Brennstoff, z. B. Schwefel- und Phosphorverbindungen - diese würden die Wirksamkeit der anderen Brennstoffzellentypen beeinträchtigen.

▪ Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEM-FC)

Mit 80-100 °C typischer Betriebstemperatur, einschließlich der Möglichkeit, diese Zelle bei Raumtemperatur zu betreiben, muss dieser Typ den Niedertemperaturbrennstoffzellen zugeordnet werden. Aufgrund der vergleichsweise niedrigen Betriebstemperatur eignet sich dieser Brennstoffzellentyp für mobile Anwendungen. Der NECAR 4 von DaimlerChrysler AG verwendet beispielsweise die PEM-FC-Technik und wird mit Flüssigwasserstoff angetrieben, der sich in einem zylindrischen, an eine große Thermosflasche erinnernden, Kältetank im hinteren Fahrzeugbereich befindet /36/.

Laut DaimlerChrysler AG bieten Brennstoffzellen die Reichweite konventioneller Verbrennungsmotoren und die emissionstechnischen Vorteile von Elektrofahrzeugen. Anders als bei Elektrofahrzeugen, die über Nacht an die Ladestation angeschlossen werden müssen, braucht man zum Tanken aber nur wenig Zeit. Und doch ist das Fahrzeug so geräuscharm wie ein Elektrofahrzeug und hat nur wenige sich bewegende Einzelteile /37/.

Eingesetzt werden Wasserstoff-Sauerstoff-Zellen mit Ionenaustausch-Membranen oder immobilisierten Phosphorsäureelektrolyten seit den 60er Jahren - z. B. in den

Gemini- und Apollo-Raumfahrtprogrammen der USA, weil sie mit geringer Masse der Brennstoffzelle und der benötigten Gase große Mengen elektrischer Energie erzeugen können. Das Wasser ist zudem ein willkommenes „Abfallprodukt“ für die Astronauten.

Toyota baut deshalb in sein Brennstoffzellenauto weder Druckflaschen noch Tiefkühl tanks ein, sondern einen Metallhydrid-Speicher. Er bindet Wasserstoff in einem feinporigen Kristallgitter. Auch das ist teuer und aufwändig. Und dann ist da immer noch die Sache mit den Tankstellen. Busse mit Brennstoffzellen werden in vielen Städten bereits getestet. Sie tanken einfach im Depot. Auch für andere Fahrzeugflotten wie Kurierdienste oder Taxis ist das möglich. Für den Individualverkehr aber müssten – zigtausend teure neue Tankstellen eingerichtet werden. Da spielen die Mineralölfirmen nicht mit.

DaimlerChrysler AG stellte deshalb im November 2000 die Neuentwicklung NECAR 5 vor. Das Fahrzeug wird mit Methanol betankt. Mittels eines sogenannten „Reformers“ wird daraus dann der notwendige Wasserstoff gewonnen. Methanol, volkstümlich „Methylalkohol“ genannt, hat den Vorteil, ganz normal gezapft werden zu können. Jede Tankstelle könnte ihn praktisch ab sofort verkaufen. Für die Umwelt ist dieses ein Kompromiss. Denn NECAR 5 lässt eben nicht nur Wasserdampf aus dem Auspuff, sondern auch Kohlendioxid.

Ein künftiger Schwerpunkt der Forschungsförderung in diesem Bereich wird deshalb bei der Entwicklung der Brennstoffzellen-Technologien gesetzt. Brennstoffzellen spielen eine zentrale Rolle, da sie - unabhängig von einer künftigen Wasserstoffnutzung - mit Erdgas oder Methanol relativ kurzfristig einsetzbar sein können und sowohl Strom als auch Nutzwärme mit hohem Wirkungsgrad und geringen Emissionen erzeugen /38/.

Seitens der Automobilindustrie werden seit einiger Zeit deutlich verstärkte, z. T. erhebliche Anstrengungen unternommen, die Antriebstechniken im Straßenverkehr zu optimieren und dabei insbesondere den spezifischen Verbrauch zu reduzieren sowie die Emissionsbilanz zu verbessern. Neben konventionellen Optionen spielen dabei in wachsendem Umfang auch alternative Konzepte bei Antrieben und Energieträgern eine Rolle. Die Brennstoffzelle (unter Nutzung sowohl konventioneller als auch regenerativer Brennstoffe) ist hierbei zunehmend in den Vordergrund gerückt .

Brennstoffzellen für mobile Anwendungen werden derzeit hauptsächlich für den Antrieb von Straßenfahrzeugen (Pkw und Busse) diskutiert und entwickelt. Darüber hinaus sind auch weitere Ansätze - etwa Brennstoffzellen als leistungsfähige Energiequelle (Batterie-Ersatz) in Fahrzeugen mit herkömmlichem Verbrennungsmotor oder ihre Anwendung als Antriebssysteme bei elektrischen Bahnen oder bei Schiffen - vorgeschlagen und zum Teil auch weiter verfolgt worden. Im vorliegenden Bericht wird der Schwerpunkt auf den Pkw-Einsatz gelegt.

Praktisch realisiert ist dieses Konzept im Nissan Micra IQ /39/, im Mercedes-Benz Stadtbus von der DaimlerChrysler AG /40/ und im Opel Zafira /41/.

2.6 Die Traktorsimulation

Die Simulationsrechnung ist derzeit ein fester Bestandteil der Traktorentwicklung. In dieser Arbeit werden die Abgasemissionen, Kraftstoffverbrauch und Zugkraft am Rad ermittelt. Zielstellung dabei ist, die Optimierung des Kraftstoffverbrauchs und die Abgasemissionen vom speziellen Fahrzeug (landwirtschaftlicher Traktor) zu verringern /42/.

Während die meisten anderen Einflussfaktoren bekannt oder einfach zu bestimmen sind, liegen kaum gesicherte Erkenntnisse über die tatsächlichen Fahrgeschwindigkeiten landwirtschaftlicher Transporteinheiten vor. Die Geschwindigkeiten verstehen sich als Durchschnittswerte für die im realen Verkehr erreichbaren Geschwindigkeiten. Die zugrundegelegten Rahmenbedingungen von bauartbedingter Höchstgeschwindigkeit und Motorleistung sind durch die Entwicklung des letzten Jahrzehnts jedoch völlig überholt worden, sodass von der Gültigkeit dieser Mittelwerte nicht mehr ausgegangen werden kann. Sowohl die bauartbedingten Höchstgeschwindigkeiten der Traktoren als auch ihre Leistungsfähigkeit wurden in diesem Zeitraum erheblich gesteigert. Um zu einem praxisrelevanten Ansatz zu kommen, sollten die zu gewinnenden Fahrgeschwindigkeitswerte auf öffentlichen Straßen gemessen werden.

Für die Bestimmung eines Bauteillastkollektives bei Transportfahrten ist die Definition einer einzelnen Referenzstrecke aufgrund der vielfältigen Einsatzarten nicht möglich, statt dessen muss das Gesamtkollektiv aus verschiedenen Einzelkollektiven

zusammengesetzt werden. Um diese auf veränderte Traktordaten anpassen zu können, muss eine geeignete Normierung gefunden werden. Die zeitliche Gewichtung der Einzelkollektive wird durch das geplante Einsatzprofil des Traktors beeinflusst. Die Definition dieser Einsätze unterscheidet sich von Hersteller zu Hersteller, ein angepasstes Gesamtkollektiv kann jedoch aus normierten Einzelkollektiven berechnet werden.

Die maximale Fahrgeschwindigkeit auf schlechten Straßen wird, falls es die Fahrsicherheit zulässt, vor allem durch den Fahrkomfort begrenzt. In der Simulation stellt daher der Fahrkomfort ein wichtiges Beurteilungskriterium für die Schwere einer Fahrt dar. Das Verhalten realer Fahrer kann jedoch nicht vollständig nachgebildet werden. Bei Messungen sollte eine möglichst lange Strecke verwendet werden, da sonst Einzelhindernisse relativ hohe Teilschädigungen erzeugen (Lastkollektive eines Traktorrumpfes).

Um die Dynamik des Getriebes zu untersuchen, wird ein entsprechendes Ersatzmodell der Mechanik und der Hydraulik erstellt. Das Ersatzmodell der Mechanik umfasst die Torsionsschwingungen des Antriebsstranges. Besondere Beachtung bei der Modellierung fanden die Kardangelenwellen und die Axialkolbenmaschinen. Die Kinematik der Kolben in der Axialkolbenmaschine wurde detailliert untersucht, um die Kräfte und Momente auf den Triebflansch der Axialkolbenmaschine zu bestimmen. Die Modellierung des Hydrauliksystems beschreibt die Kopplung der beiden Axialkolbenmaschinen. Das Ersatzmodell kann folglich stationäre und transiente Betriebszustände wiedergeben. Die Güte des Ersatzmodells ist durch den Vergleich von Messung und Rechnung bestätigt worden. Bei landwirtschaftlichen Getrieben sind generell ein Vielzahl von Konfigurationen und Lastzuständen möglich. Diese ergeben sich durch den möglichen Antrieb verschiedener Geräte über die Front- bzw. Heckgelenkwellen bei unterschiedlichen Motordrehzahlen. Variabel sind hier nicht nur der Leistungsverbrauch, sondern auch die Trägheitsmomente, die Steifigkeiten der verwendeten Gelenkwellen und die aktuellen Kardangelenwinkel. Bei der Vario - Getriebeserie ist darüber hinaus auch noch die Übersetzung stufenlos wählbar. Für eine systematische Untersuchung der Parameterkombination kann zunächst eine Eigenanalyse des Gesamtsystems in Abhängigkeit der Parameter durchgeführt werden.

Mithilfe der Mehrkörpersimulation werden ein Traktor mit Dreipunktanbau oder ein Traktor mit Anhänger untersucht. Dazu wurden Messungen bei Fahrten über Einzelhindernisse und auf der genormten Testfahrbahn „smooth track“ durchgeführt und mit der Simulation verglichen. Die Untersuchungen sollen aufzeigen, ob sich die Mehrkörpersimulation für die Erzeugung realistischer Lastkollektive von Traktorrumpf und Verbindungsbauteilen bei Transportfahrten eignet. Zur Durchführung der Versuche wurde ein Versuchstraktor vom Typ Fendt 509C verwendet. Die Modellierung des Traktors erfolgte mit dem Mehrkörpersimulationsprogramm SIMPACK /43/.

3 Mathematisches Modell und Simulation

3.1 Überblick

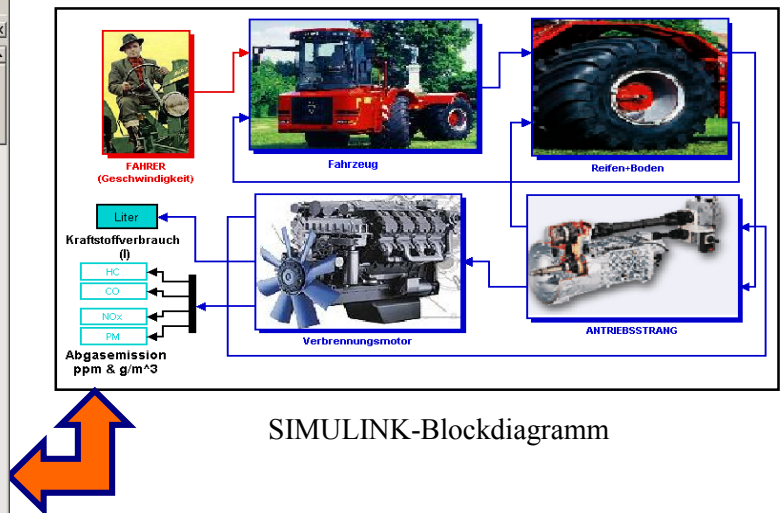
Die numerische Simulation von Mehrkörpersystemen hat in den letzten zwanzig Jahren einen hohen Stellenwert erhalten. Die Simulation wird mit dem Programm SIMULINK durchgeführt. SIMULINK ist eine Erweiterung von MATLAB, die speziell für die Simulation mithilfe einer graphischen Darstellung des dynamischen Systems eingesetzt wird /44/. Funktionsblöcke aus verschiedenen Bibliotheken werden in einem graphischen Fenster so verbunden, dass ein Modell des Systems übersichtlich programmiert werden kann. Dieses Modell ermöglicht eine aussagekräftige Darstellung des Systems, das leicht zu handhaben bzw. zu editieren ist und darüber hinaus viele Möglichkeiten der Datenausgabe bietet. Die Toolboxen stellen eine Ansammlung von MATLAB - Funktionen und SIMULINK – Blöcken dar, die besonders für die Anwendungen im Fahrzeugsektor geschaffen wurden /45/. Das Fahrzeug-Simulationsprogramm besteht aus Modellen, Dateien und Skripttexten, die durch das MATLAB und SIMULINK Programm verarbeitet werden (Abb. 3.1).

```

C:\matlabR12\work\AnhaengerNK\Verbrennungsmotor\VerbrennungsmotorG.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
1 % Datei: Verbrennungsmotor1.m
2 %
3 % Data source:[Vehicle Research Institute University of Applied Science-Dre.
4 %
5 %
6 %
7 %
8 %
9 %
10 %
11 %
12 disp(['Laden Daten: Verbrennungsmotor1 - Dieselmotor 300 kW']);
13
14 %
15 %
16 % Drehzahl und Drehmoment des Motors
17 %
18 % (r/min), bereich der Drehzahl und des Drehmoments
19 Drehzahl=[700 900 1100 1200 1350 1500 1700 1880]*2*pi/60
20
21 % (N*m), torque range of the engine
22 Drehmoment=[100 350 700 1050 1400 1750 1825]
23
24 %
25 %
26 % Abgasemissionenkennfelder
27 %
28 % (g/s),Kennfeld des Kraftstoffverbrauches
29 Kf_Kennfeld_gpKWh = [
30 325 222 203 205 210 210 210
31 300 218 198 196 199 204 204
32 290 217 197 193 194 194 194
33 270 221 196 192 192 192 192
34 250 222 198 193 189 190 190

```

MATLAB-Datei



SIMULINK-Blockdiagramm

Abb. 3.1: Flussdiagramm der Verbindung zwischen SIMULINK - Modell und MATLAB – Datei

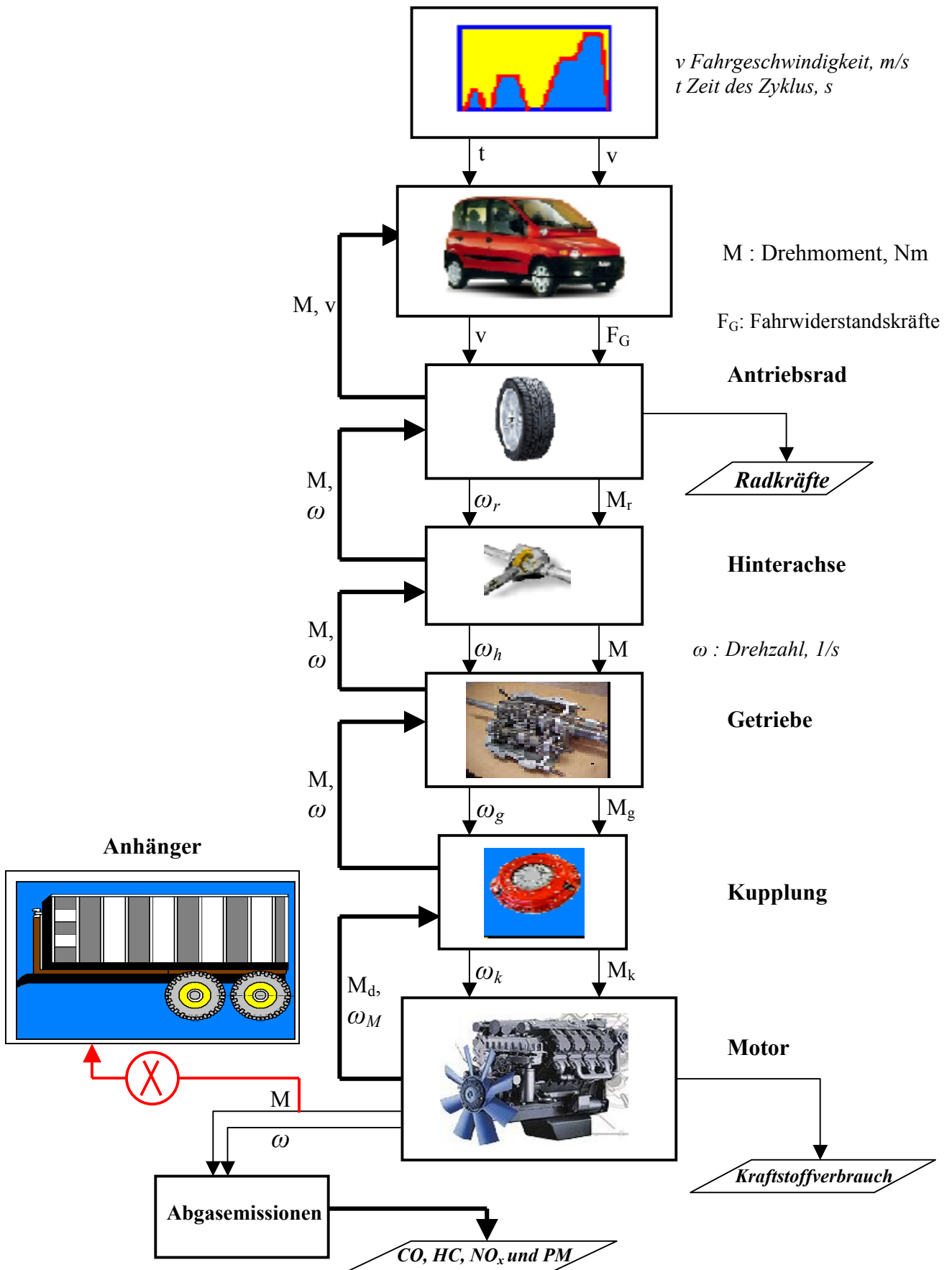


Abb. 3.2 : Struktur des Simulationsprogramms für das Fahrzeug

In der Abb. 3.2 ist die Struktur des Programms, welches in der Anlage 1 (Abb. A1.3) schrittweise erklärt ist, dargestellt. Ausgehend von dem gewählten Fahrprofil werden die Fahrwiderstandskräfte und das Moment am Antriebsrad ermittelt. Diese werden durch die Hinterachse, über das Getriebe bis hin zur Kupplung geleitet. An der Kupplung stehen das Antriebsmoment und Reaktionsmoment (Motormoment) im Gleichgewicht. Das Motormodell, welches durch stationäre Kennfelder beschrieben ist, ermittelt jetzt das dazugehörige (drehzahlabhängige) Moment.

Das Motormoment (äquivalent dem Mitteldruck) und die Motordrehzahl ermöglichen jetzt die Zuordnung zu den entsprechenden, in den Motorkennfeldern abgelegten, Größen (z. B. Emissionen, Kraftstoffverbrauch, usw.). Die Zwischenwerte werden linear bzw. mit einer quadratischen Funktion aus den Kennfeldgrößen interpoliert.

Die Emissionsdaten der Kennfelder werden über einen Korrekturfaktor „ T_K “ (Anlage 1, Gl. A1.18 bis A1.24), der über ein vereinfachtes thermodynamisches Motormodell ermittelt wird, korrigiert. Dieses Motormodell ist im Programmpaket „Advisor“ enthalten und in Anlage 1 erläutert.

Das Fahrzeug-Simulationsprogramm bietet eine Unterstützung für die detaillierte Simulation und Analyse von Antriebsstrang-Komponenten. Der Vorteil von SIMULINK liegt in der Modellierflexibilität. Es ermöglicht, Eingangsdaten (Kennfelder), stationäre Fahrzeugdaten und komplexe Algorithmen mit analytischen Methoden zu verarbeiten. Das Fahrzeug-Simulationsprogramm kann die wichtigen Leistungsdaten des Fahrzeuges berechnen. Dazu zählen die:

- Kraftstoff- bzw. Energieverbräuche,
- Abgasemissionen von Fahrzeugen nach Fahrzyklen,
- Strategie und Bewertung der Steuerungslogik für Hybridfahrzeuge und
- Optimierung des Antriebsstranges zur Reduktion des Kraftstoffverbrauches oder die Anpassung der Fahrleistung.

3.2 Beschreibung des Programmablaufes

Das Fahrzeugmodell des Simulationsprogramms basiert auf der konventionellen Bauteilanordnung, wie sie in Abb. 3.3 dargestellt ist. Es zeigt die Konfiguration des

Fahrzeuges, welches sich mit dem Verbrennungsmotor und dem Antriebsstrang im Fahrzyklus bewegt. Dieses Blockdiagramm ist ebenfalls unter Verwendung von SIMULINK entstanden. Jeder SIMULINK - Block steht für einen Komplex des Fahrzeugaggregates und schließt die Beschreibung mit entsprechenden Gleichungen ein. Das Blockdiagramm beschreibt die Eingangs- und Ausgangsvariablen und zeigt deren graphische Darstellung /46/. Es besteht die Möglichkeit, auf jeden SIMULINK - Block zuzugreifen, um weitere Informationen oder Beschreibungen zu erhalten.

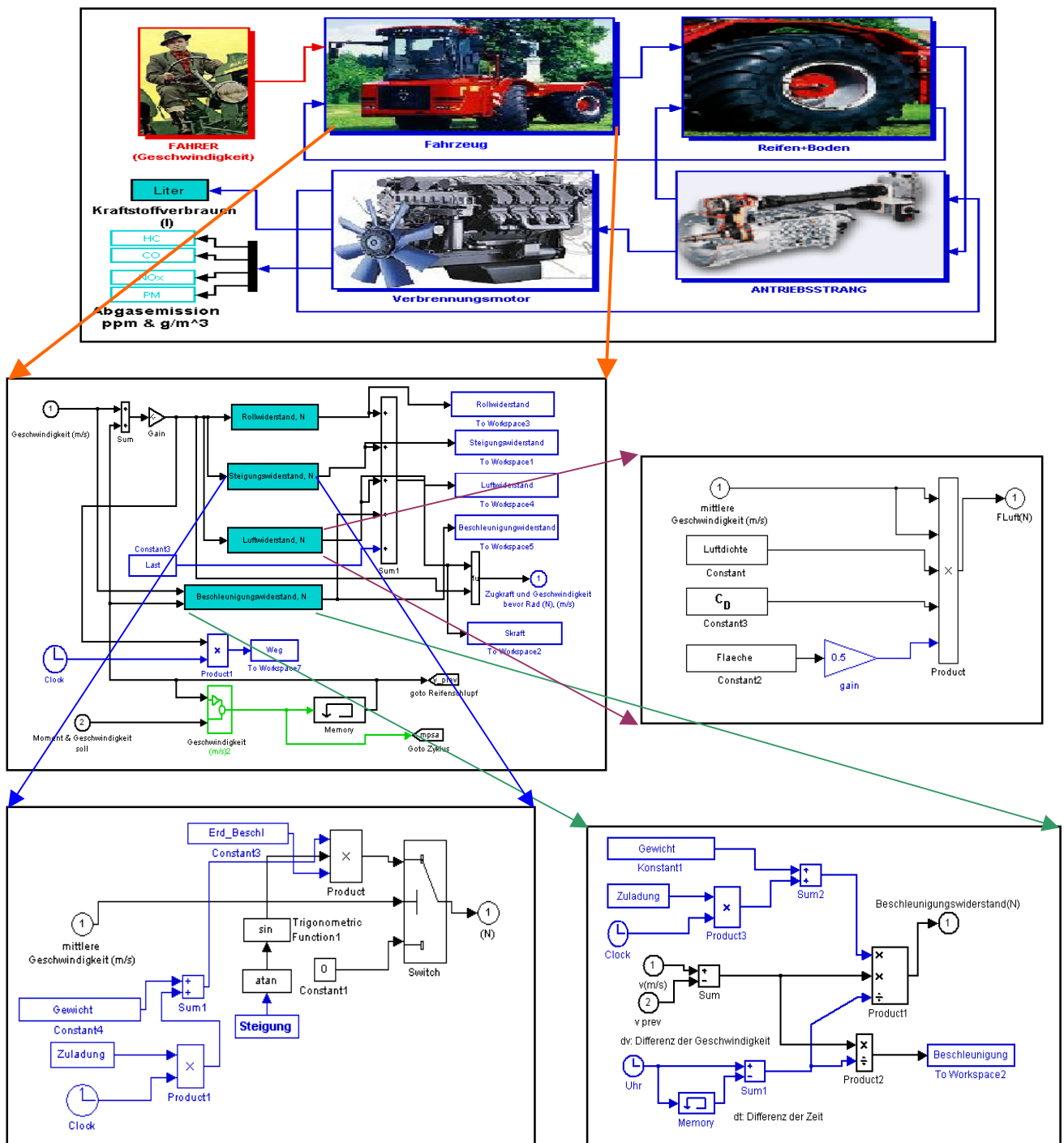


Abb. 3.3: Blockdiagramm einer Fahrzeugkomponente

Während der Simulationsberechnungen werden die Dateien und Informationen aus der MATLAB - Datei in die Berechnung abgerufen. Die Abb. 3.4 zeigt den Ablauf des Simulationsprogramms, der sich in drei Grundschritte teilt:

- Eingangsparameter formulieren, Randbedingungen und Spezifikationen für vorherbestimmte Funktionen der Zeit festlegen (d. h. Steuerungsblöcke festlegen). Diese Aktivität wird von dem in der Eingangsdatei gekennzeichneten Block angezeigt.

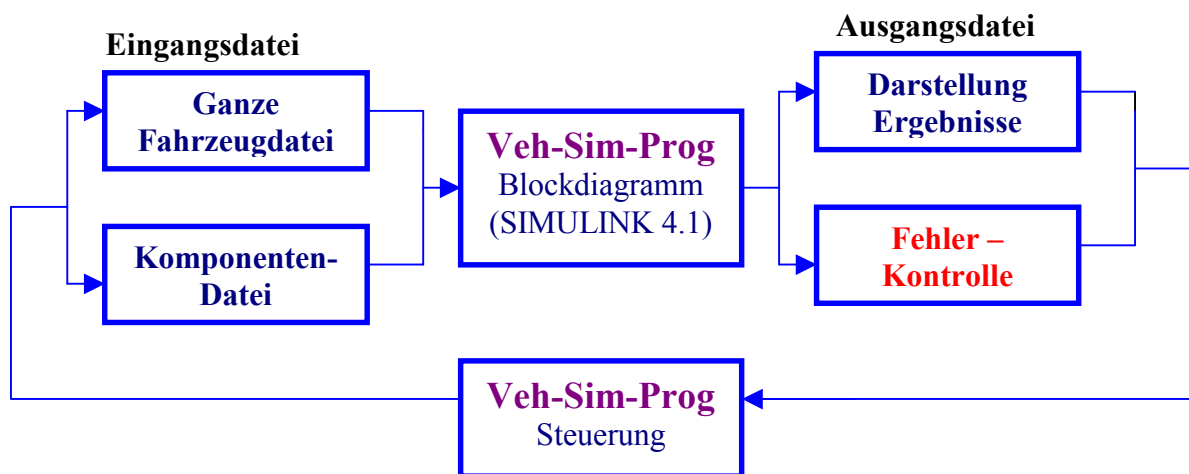


Abb. 3.4: Schematische Flussdatei des Fahrzeug-Simulationsprogramms

- Für die Durchführung der Simulation sind die Anfangsbedingungen und Konstanten im Aufbau des Programms vorher zu definieren, damit eine Berechnung der Folgeparameter möglich ist. In einer Ausgabedatei sind alle Eingangsvariablen aufgelistet. Mit dieser „Rückkopplung“ kann festgestellt werden, ob fehlerhafte Eingabedatensätze vorliegen /47/.
- Die Simulation wird ausgeführt. Um Werte von diskreten Punkten über der Zeit zu berechnen, werden die zur Fahrzeugbeschreibung dienenden Gleichungen verwendet. Es ist möglich, die Ergebnisse in eine oder mehrere Ausgabedateien zu schreiben. Diese Aufgabe wird durch Operationen durchgeführt, bis die Abarbeitung aller Simulationsschritte erfolgt ist. Die Ausgabe ist in der Abb. 3.4 mit dem als „Ausgangsdatei“ gekennzeichneten Block dargestellt.

Die Gültigkeit und Genauigkeit der Simulation bestimmen in erster Linie die Eingabedatensätze. Maßgebend für die Zeitdauer der Simulation sind die verwendete Rechentechnik und die Simulationsschrittweite, wobei der Zeitaufwand durch größere Intervalle verkürzt werden kann. Wenn die Simulationssoftware produktiv eingesetzt werden soll, müssen die Eingabedatensätze mit dem Fahrzeug korrelieren. In diesem Fall hat der Bediener einen hohen Datenbeschaffungsaufwand. Die Eingabedateien werden so kommentiert, dass nachfolgende Benutzer mit geringfügigem Aufwand und wenigen Änderungen eine erneute Simulationsuntersuchung ausführen können.

Alle Parameter des Simulationsprogramms, die dabei verwendet werden, sind mit kinematischen und dynamischen Gleichungen beschrieben /48/. Sie werden im Allgemeinen im Programm als Variable editiert. Neue Werte oder Parameter werden aus einer oder mehreren Eingabedateien gelesen und anschließend in einer oder mehreren Ausgabedateien als „Feedback“ herausgeschrieben. Das ermöglicht dem Benutzer zu kontrollieren, ob die angenommenen Parameter richtig vom Simulationsprogramm interpretiert wurden. Wesentlich für die Bedienung des Programms ist die Schnittstelle, damit Bedienerdaten komfortabel in Softwareerfordernisse umgewandelt werden können. Es ist wünschenswert, die dem Nutzer vertrauten, typischen Eingangsparameter für das Simulationsprogramm einzusetzen. Dieses hat enorme Auswirkungen auf die Entwicklungsmethoden, welche einen automatischen Ablauf des Simulationsprogramms ermöglichen sollen. Wenn die eingegebenen Parameter außerhalb bestimmter Bereiche liegen, ist eine Berechnung mithilfe der Gleichungen, die den Bewegungsablauf beschreiben, nicht möglich. Für die Verwendung des Simulationsprogramms müssen einerseits die erforderlichen Parameter richtig definiert werden und andererseits grundlegende Kenntnisse des Programms vorliegen. Mit der erforderliche Analyse aller Eingabeparameter erhöht sich der Aufwand zur Durchführung einer Simulation.

Im Prozess ist es notwendig, dass bestimmte Werte von anderen Variablen abhängen. Diese müssen vorab berechnet werden, um die Simulation starten zu können. Für einige Prozesse ist es notwendig, dass dem Benutzer Unterprogramme (Routinen) zur Verfügung stehen. Diese Unterprogramme bestehen wiederum aus einem Geflecht komplexer Unterprogramme.

3.3 Mathematisches dynamisches Modell der Fahrzeugkomponenten

3.3.1 Verbrennungsmotor - Modell

Das Fahrzeugmodell basiert auf einer konventionellen Bauteilanordnung, wie sie Abb. 3.1 zeigt. Der Verbrennungsmotor ist über die Kupplung mit dem Getriebe verbunden. Zwischen dem Getriebe, der Hinterachse und den Fahrzeugrädern erfolgt eine mechanische Verbindung. Die hier auftretenden Verluste zwischen den Bestandteilen werden nicht detailliert modelliert (z. B. mechanische Übertragungsverluste über der Last), sie können jedoch später in die Simulation einfließen. Die auftretende Reibung und damit einhergehende Verluste in rotierenden Bestandteilen sind mit den einzelnen Komponenten verbunden und können auch in den Wirkungsgradkennfeldern spiegelbildlich sein. Bei der Bewegung des Fahrzeuges treten Fahrwiderstände wie der Rollwiderstand, der Luftwiderstand, der Steigungswiderstand und der Beschleunigungswiderstand auf. Der Motor stellt über den Antriebsstrang die erforderliche Leistung bereit, um die Fahrwiderstände, welche am Antriebsrad bzw. am Schwerpunkt des Fahrzeuges angreifen, zu überwinden. Zur Simulation der Bewegungsabläufe des Fahrzeuges werden iterativ zu jedem Zeitpunkt (in der Schrittweite des Simulationsprogramms) die wirkenden Kräfte am Rad berechnet. Die Abb. 3.5 stellt das SIMULINK - Blockdiagramm des Fahrzeugmotormodells dar.

- **Gleichungen im Motor - Modell**

$$M_{ist} = M_{D_ist} - M_{Träg} - M_{Neben} \quad [3.18]$$

$$M_{Neben} = P_{Neben} / \varpi \quad [3.19]$$

$$M_{D_ist} = M_{K_soll} \quad [3.20]$$

$$M_{soll} = M_{K_soll} + M_{Träg} + M_{Neben} \quad [3.21]$$

$$M_{Träg} = I_M \cdot (d\varpi / dt) \quad [3.22]$$

$$\varpi_{ist} = \varpi \quad [3.23]$$

$$\varpi_{soll} = \varpi_K \quad [3.24]$$

$$\dot{m}_{Ks} = m_{Ks} / t \quad [3.25]$$

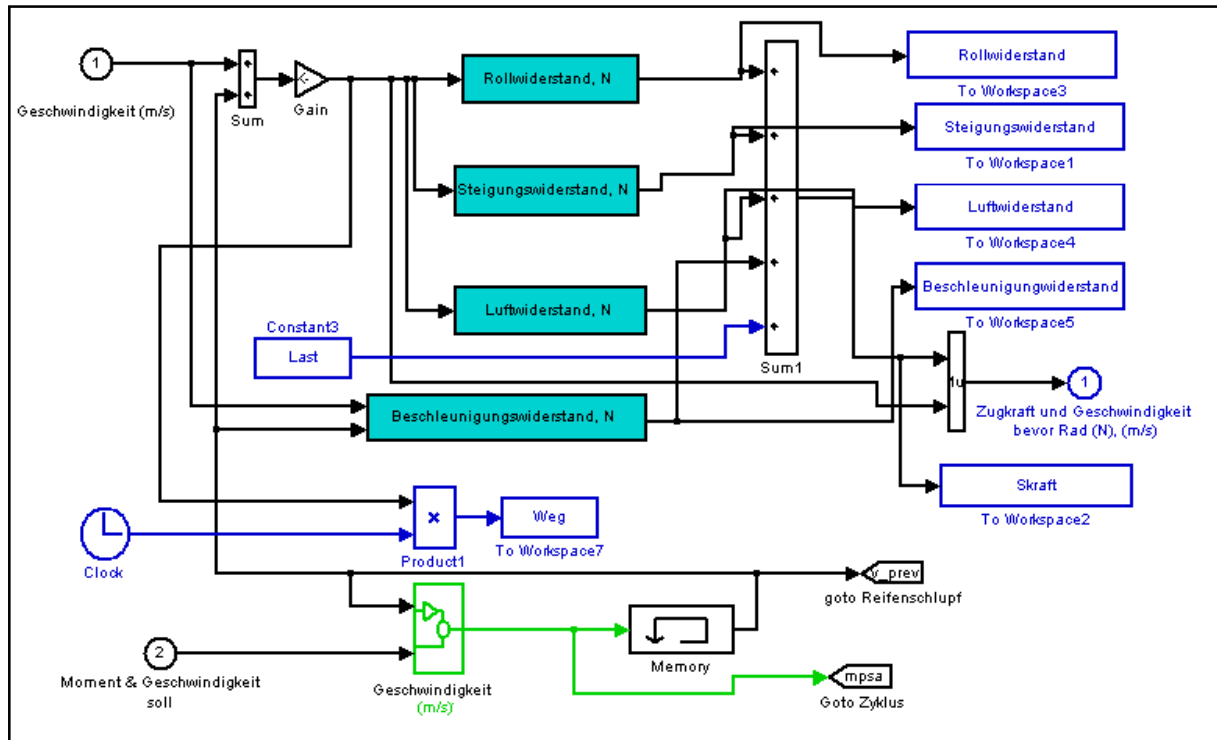


Abb. 3.6: Blockdiagramm zur Ermittlung der Fahrwiderstände

3.3.3 Kupplungs - Modell

Die Kupplung überträgt das gewünschte Drehmoment und die Drehzahl vom Verbrennungsmotor zum Getriebe. In diesem Modul werden alle Bewegungsabläufe berücksichtigt, die am Rad während des Antriebes oder der Bremsung wirken.

Die Kupplung kann in drei Phasen unterschieden werden:

- geöffnet,
- schlupfend und
- geschlossen.

Wenn die Kupplung geöffnet ist, kann kein Drehmoment übertragen werden. Die dem Motor zugewandte Kupplungsseite läuft mit der Motordrehzahl um. Die abgewandte Kupplungsseite bewegt sich mit der Drehzahl, die über das Getriebe am Rad vorgegeben ist. Dies kann Null sein. Während der Schlupfphase ist die Schlupfkonstante als Funktion der Eingangsdrehzahl zu definieren und einzugeben.

Wenn die Kupplung geschlossen ist, wird das vom Motor abgegebene Drehmoment mit gleicher Drehzahl an das Getriebemodul übergeben.

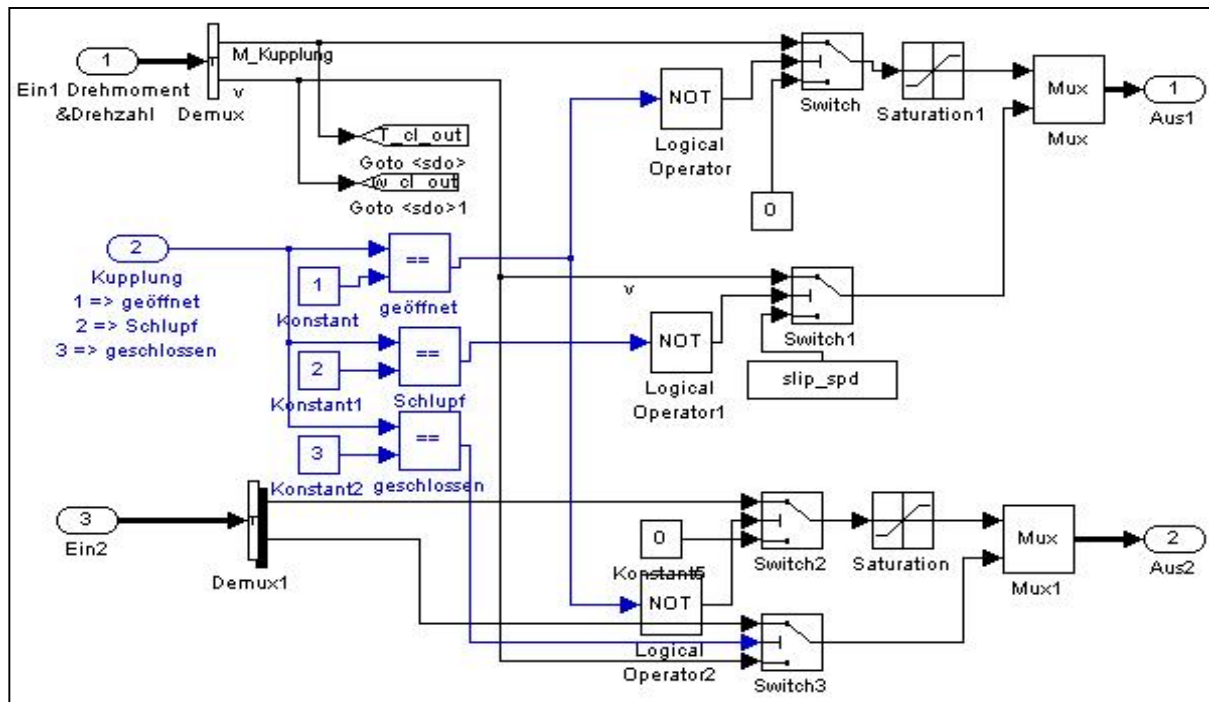


Abb. 3.7: SIMULINK - Blockdiagramm der Kupplung

3.3.4 Getriebe - Modell

Das Getriebe wird verwendet, um das vom Antriebsmotor abgegebene Drehmoment auf die Räder der Hinterachse zu übertragen. Durch die Variation der Übersetzung können verschiedene Drehzahlen und Drehmomente am Getriebeausgang dargestellt werden. Das Simulationsmodell des Getriebes übernimmt die Parameter Drehmoment und Drehzahl aus dem Motormodell und übergibt diese neu berechneten Werte dem Hinterachsmodell. In diesem Simulationsmodell sind Steuerungsvariablen (z. B. Schaltpunkte, Gang, Last und Drehzahl), die das Betriebsverhalten des Getriebe Modells steuern, enthalten.

Folgende Berechnungen werden im Getriebe Simulationsblock berücksichtigt:

- die Änderung des Drehmoments und der Fahrgeschwindigkeit durch das Übersetzungsverhältnis,
- der Drehmomentverlust, der durch das Trägheitsmoment der Getriebewellen verursacht wird und

- der Drehmomentverlust, der durch die Reibung in den Zahnradstufen und Lagerungen auftritt.

Die jeweiligen Wirkungsgrade des Getriebes werden im Programm über die Verlustmomente (Verlustleistung: $P_v = M_{ver} * \omega$) berücksichtigt. Sie beinhalten die lastabhängigen Reibungsverluste (z. B. in den Zahnradpaaren, die im Eingriff sind, und die Lagerreibung) sowie die lastunabhängigen Reibungsverluste (z. B. die Plansch- und Quetschverluste, Tauchschmierungs- und die Schmierungsverluste in den Lagern und die Dichtungsverluste in den Wellendurchtritten). Die Abb. 3.8 zeigt ein SIMULINK - Blockdiagramm für das Getriebe mit seinen beschreibenden Gleichungen:

$$M_{Ge_soll} = (M_{Ga_soll} / i_G) + M_{Träg} + M_{Ver} \quad [3.27]$$

$$M_{Träg} = I_G * (d\omega / dt) \quad [3.28]$$

$$\omega_{Ge} = \omega_{Ga} * i_G \quad [3.29]$$

$$M_{Ga_ist} = (M_{Ge_ist} * i_G) - M_{Träg} - M_{Ver} \quad [3.30]$$

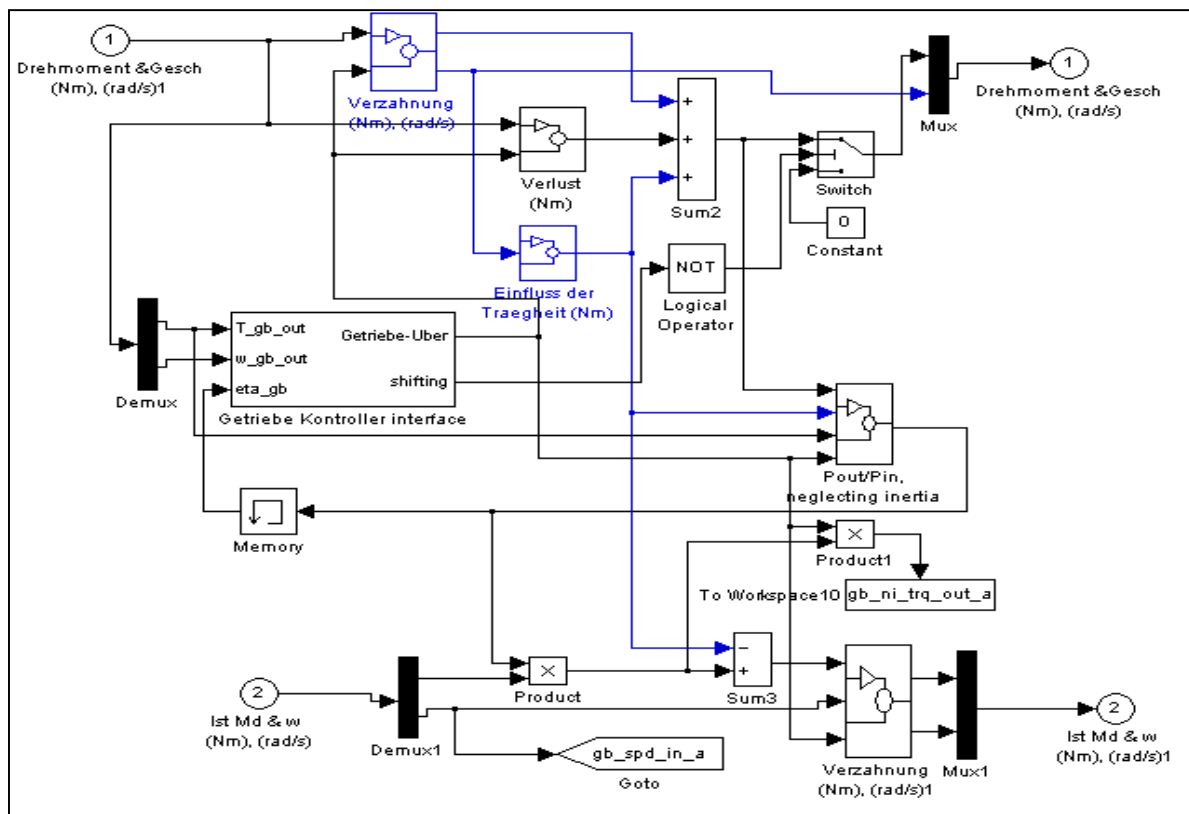


Abb. 3.8: SIMULINK - Blockdiagramm des Getriebes

3.3.5 Hinterachs - Modell

Dieses Modell berechnet das gewünschte Drehmoment und die Drehzahl unter Berücksichtigung der Hinterachsübersetzung vom Getriebe-Modell zum Antriebsrad-Modell. Das Hinterachs-Modell berücksichtigt die Verluste, Trägheitsmomente und die Hinterachsübersetzung. Es wird vorausgesetzt, dass der Drehmomentverlust konstant ist /48/. Die Übersetzung legt die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Motordrehzahl fest. Je höher die Drehzahl ist, umso höher ist die Leistung. Die berechneten Verluste, z. B. durch das Trägheitsmoment und den Wirkungsgrad, werden innerhalb des Hinterachs-Modells der Radseite zugeordnet, siehe hierzu Abb. 3.9 mit dem SIMULINK-Blockdiagramm der Hinterachse.

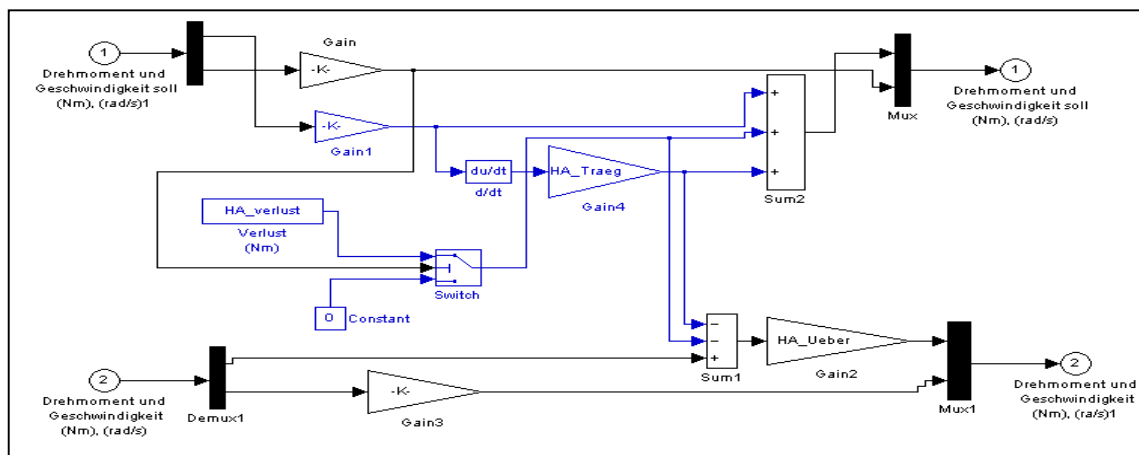


Abb. 3.9: SIMULINK-Blockdiagramm der Hinterachse

$$M_{Ha_soll} = M_{He_soll} + M_{Träg} + M_{Ver} \quad [3.31]$$

$$M_{Träg} = I_H \cdot (d\omega / dt) \quad [3.32]$$

$$\omega_{He} = \omega_{Ha} \cdot i_d \quad [3.33]$$

$$M_{Ha_ist} = M_{He_istl} - M_{Träg} - M_{Ver} \quad [3.34]$$

3.3.6 Antriebsrad - Modell

Der Berechnungsablauf im Modell des Antriebsrades überträgt das Drehmoment und die Geschwindigkeit vom Fahrzeugblock auf das Reifen-Modell. Ebenso ist es unter bestimmten Bedingungen (Schlupf am Antriebsrad) notwendig, die am Rad tatsächlich wirkenden Drehmomente über das Hinterachs-Modell zurück zum Motormodell zu verfolgen. Im Antriebsrad-Modell sind die Verluste, der Radschlupf und das Radträgheitsmoment eingearbeitet. Der Reifenschlupf (S) wird mit Hilfe der

Seitenkräfte und Normalkräfte in Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit des Rades und der Geschwindigkeit des Fahrzeuges berechnet. Die Abb. 3.10 stellt das SIMULINK -Blockdiagramm des Antriebsrads dar.

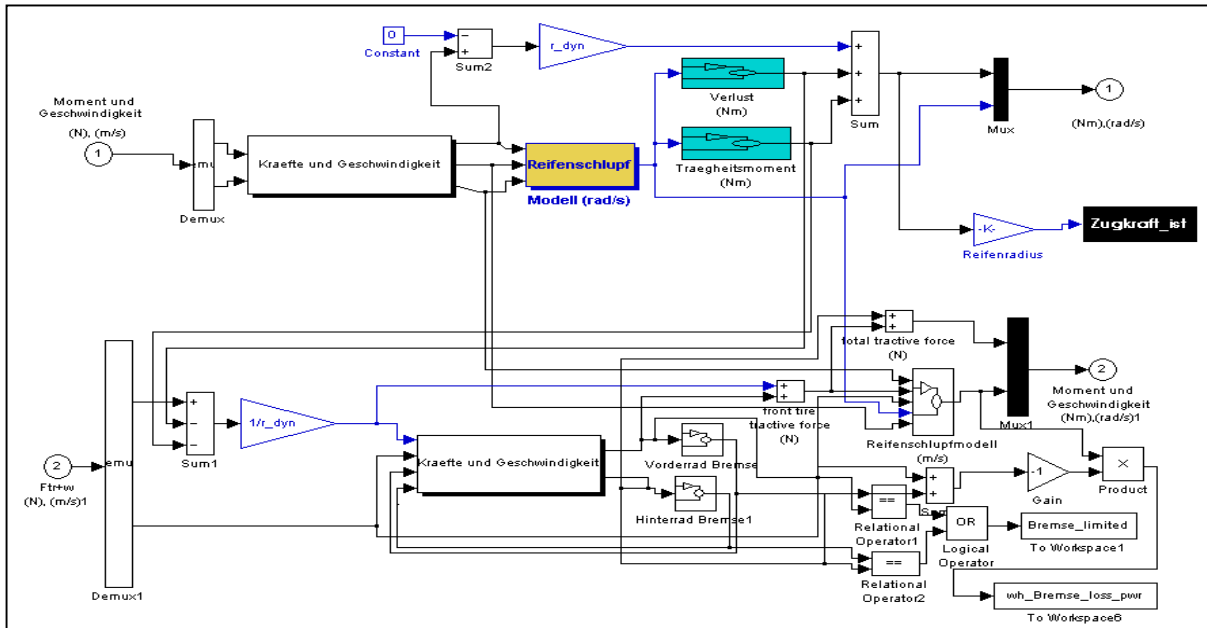


Abb. 3.10: SIMULINK - Blockdiagramm des Antriebsrads

$$M_{Ra_soll} = M_{Re_soll} + M_{Träg} + M_{Ver} \quad [3.35]$$

$$M_{Träg} = I_R \cdot (d\omega / dt) \quad [3.36]$$

$$M_{Ra_ist} = M_{Re_ist} - M_{Träg} - M_{Ver} \quad [3.37]$$

Im Simulationsablauf befinden sich Traktionskontrollblöcke. Diese besitzen die Funktion, den Schlupf der Reifen zu minimieren, um damit das maximale Moment auf die Aufstandsfläche zu übertragen. Der Reifenschlupf wird mit der folgenden Formel bestimmt (Abb. 3.11).

$$S = (v - \omega \cdot r_{dyn}) / v \quad [3.38]$$

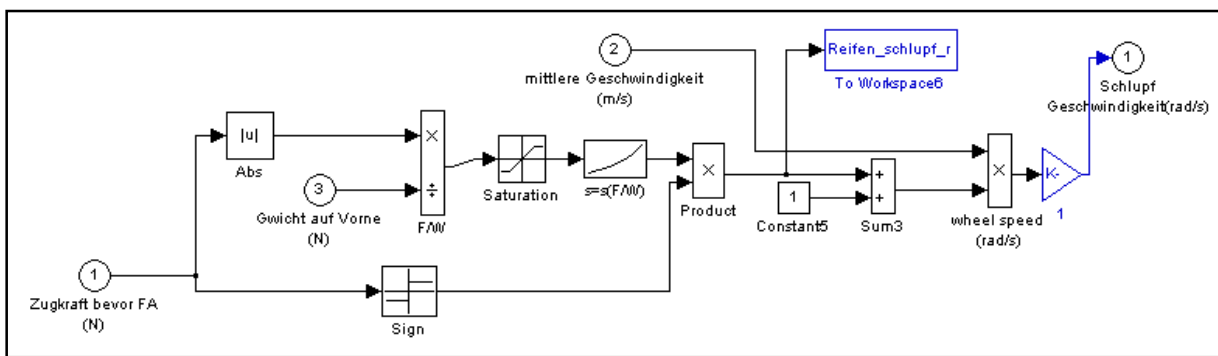


Abb. 3.11: SIMULINK-Blockdiagramm des Reifenschlupfmodells

3.3.7 Elektromotor - Modell

Mithilfe des am Rad wirkenden Eingangsdrehmoments und der Drehzahl wird die Leistung am Rad ermittelt. Die Abb. 3.12 zeigt die Konfiguration des Elektroantriebes. Diese ist von der Dateneingabe (z. B. r_{dyn}) und der entsprechenden Übersetzung abhängig. Anhand eines doppelt linearen Interpolationsschemas werden die entsprechenden Zwischenwerte bestimmt. Über die am Rad erforderliche Leistung P_a (Radleistung) und den Übertragungswirkungsgrad η_{tr} wird die Leistung am Motor P_m berechnet /49/:

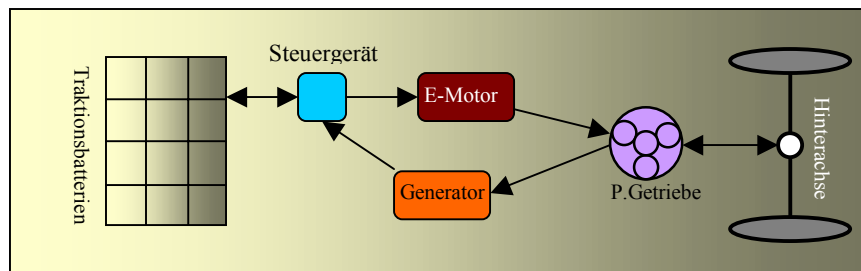


Abb. 3.12 :Konfiguration des Elektroantriebes

$$P_a = P_m \cdot \eta_{\text{tr}} \quad [3.39]$$

Die elektrische Motorleistung P_m errechnet sich aus dem Produkt des elektrischen Motordrehmoments M_m mit der Motordrehzahl n_m . Darüber hinaus wird die am Motor herrschende Drehzahl aus der Übersetzung i_G und der am Rad vorhandenen Winkelgeschwindigkeit berechnet.

$$P_m = M_m \cdot \omega_m \quad [3.40]$$

$$\omega_m = \omega_{\text{Ant}} \cdot i_G \quad [3.41]$$

Die maximale Motorleistung wird aus der maximalen Antriebsleistung P_d und dem Übertragungswirkungsgrad bestimmt.

$$(P_m)_{\text{max}} = P_d \cdot \eta_{\text{tr}} \quad [3.42]$$

Dabei ist $(P_m)_{\text{max}}$ von der Motordrehzahl bzw. Fahrgeschwindigkeit und η_{tr} vom Antriebsdrehmoment bzw. der Drehzahl abhängig.

3.3.8 Modell der Traktionsbatterien

Der Wechselrichter erhält seine Informationen vom Steuergerät. Die Information zur Leistung des Elektro-Motors kann mit dem Übertragungswirkungsgrad und der Radleistung zu jedem entsprechenden Betriebspunkt berechnet werden.

$$P_i = P_m \cdot \eta_m \quad [3.43]$$

Die Traktionsleistung der Batterien P_B berechnet sich nach den folgenden Gleichungen:

$$P_B = P_i \cdot \eta_i \quad [3.44]$$

$$P_i = P_B / \eta_i \quad [3.45]$$

Die gesamte abgeforderte Leistung der Batterien wird auch durch die Hilfsleistung der Nebenaggregate (P_B)_{aux} und der Steuerleistung (P_B)_{APU} wie folgt berechnet:

$$(P_B)_{total} = (P_B)_{APU} + (P_B)_{aux} + P_B \quad [3.46]$$

Wenn die Leistung der Batterie positiv ist, gibt die Batterie Leistung ab. Ist die Leistung der Batterie negativ, wird diese aufgeladen.

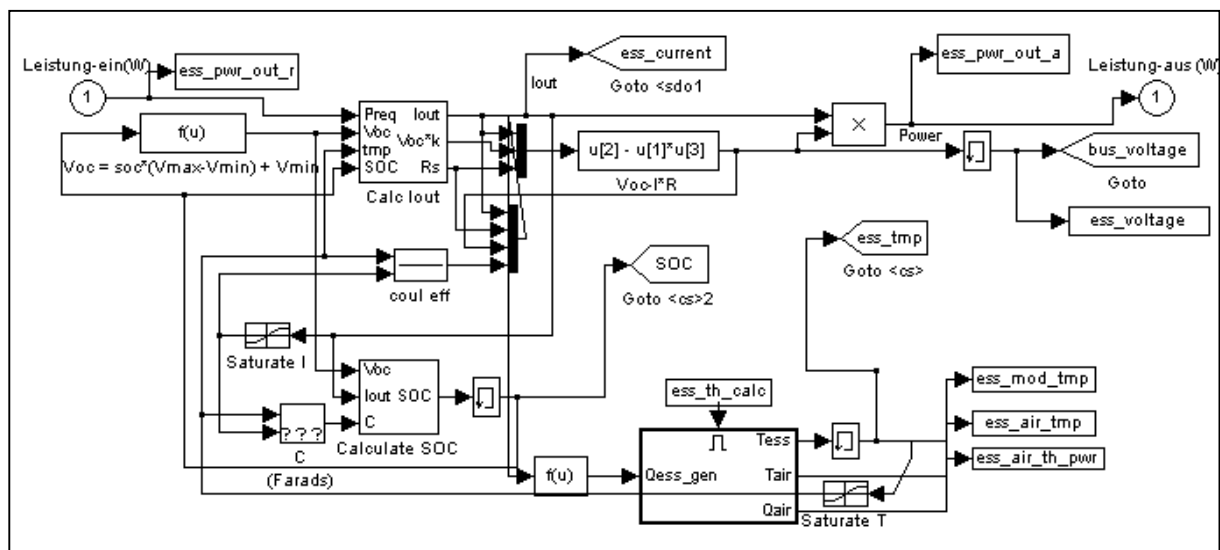


Abb. 3.13: SIMULINK-Blockdiagramm der Traktionsbatterien

3.3.9 Modell der Brennstoffzellen

Die Brennstoffzelle ist ein elektrochemischer Energiewandler. Aus Wasserstoff und Sauerstoff wird Energie in Form von Gleichstrom erzeugt. Eine Zelle einer Brennstoffzelle erzeugt etwa 0,7 Volt. Um die größeren Spannungen und Leistungen, wie sie in einem Pkw erforderlich sind, zu erzeugen, werden mehrere Zellen zu Stacks verbunden /50/.

Das Simulationsmodell des Fahrzeuges benötigt die Informationen zu den Brennstoffzellen (Eigenschaften der Spannung, des Stromes und der elektrischen Leistung für Nebenaggregate) als Eingabedaten. Die elektrische Nettoleistung des Systems ist die Differenz zwischen der ausgegebenen Leistung der Brennstoffzellen

4 Prüfstand und Messgeräte

4.1 Rollenprüfstand

Rollenprüfstände sind Laboreinrichtungen, auf denen die Bedingungen der Bewegung eines Kraftfahrzeuges auf der Straße (Fahrwiderstände) übertragen werden können. Die Summe der Fahrwiderstände bestimmt die vom Antriebsmotor an die Räder des Fahrzeuges aufzubringende Kraft für das Fortbewegen des Fahrzeuges. Aus dem Zusammenwirken von Fahrwiderständen und Antriebsleistung können die Fahrleistungen des Fahrzeuges, die Höchstgeschwindigkeit und die Steigfähigkeit abgeleitet werden. Rollenprüfstände sind ein wichtiger Bestandteil einer modernen Kfz – Prüf- und Messtechnik und werden nach Messaufgabe mit Spezialmesstechniken (z. B. Kraftstoffverbrauch, Abgasmesstechnik usw.) aufgerüstet.

Der für die Untersuchungen genutzte Rollenprüfstand von der Firma Schenck Pegasus GmbH besteht aus einem Rollensatz mit Wirbelstrombremse, einem Steuergerät (LSG 2010) und einem Fahrerleitgerät. Mit dem Steuergerät sind die Betriebsmodi $v = \text{konst}$, $F = \text{konst}$ und $F = f(v)$ darstellbar. Die technischen Parameter des verwendeten Rollenprüfstandes sind in Tabelle 4.1 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 4.1: Technische Parameter des Schenck – Doppelrollenprüfstandes

Laufrollendurchmesser	0,364 m
max. Leistung	230 kW
max. Zugkraft	5000 N
max. Prüfgeschwindigkeit mit Schwungscheibe	160 km/h
Achslast	3000 kg
max. Schwungmasse	4000 lbs (1lbs = 0,45359 kg)
Kraftstoffverbrauchsmessgerät	PLU 116 H (Pierburg Union, Neuss)
Abgasmesstechnik	MEXA-1440 ATM (Horiba)
Messwerterfassungssystem	TDS 100 (RD Elektronik, Hohenkirchen)
Auswertesoftware	Diadem [©]

Für die Erfassung aller notwendigen Messgrößen sind das Messwerterfassungssystem TDS 100 von der RD-Elektronik GmbH, Hohenkirchen, und zur Auswertung das Softwareprogramm Diadem[©] verwendet worden. Einen schematischen Überblick über die Funktionalität des Rollenprüfstandes zeigt die Abb. 4.1.

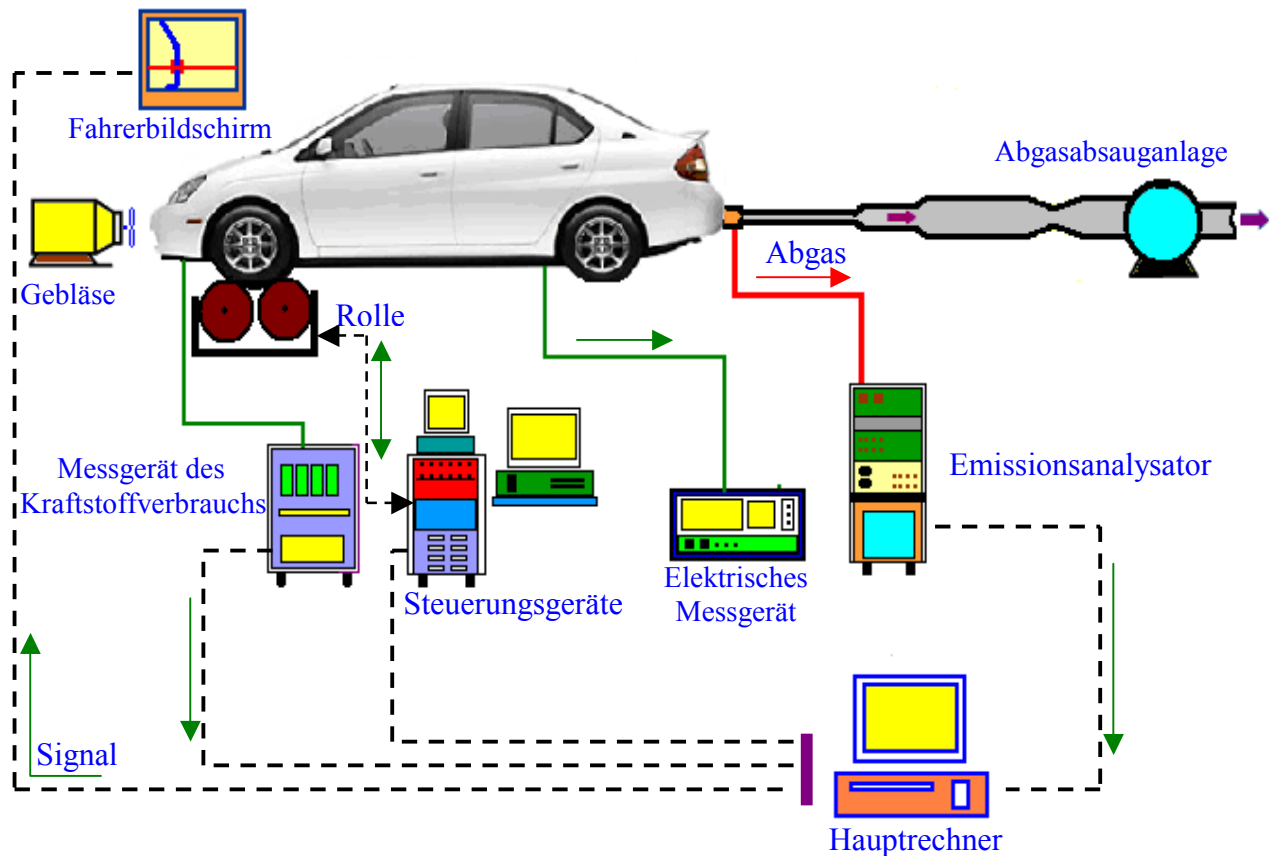


Abb.4.1: Auslegung des Rollenprüfstands und das Versuchshybridfahrzeug „Prius Toyota“

Der Rollenprüfstand ist ein Doppelrollenprüfstand. Beschleunigungen und Verzögerungen werden über angeflanschte Schwungmassen simuliert. Wird eine Straßenfahrt (Zyklus) auf dem Rollenprüfstand nachgebildet, dann ist es notwendig, die Fahrwiderstandskräfte zu berechnen und dem Prüfstandsleitrechner zu übergeben. Durch diese Maßnahme wird das zu prüfende Fahrzeug an den Rollenprüfstand durch eine korrigierte Zugkraft angepasst.

Bei Änderung der Geschwindigkeit ändert sich die Bremskraft des Prüfstandes in Form einer quadratischen Kennlinie, die wie folgt beschrieben werden kann:

$$F(v) = K_2 + K_1 \cdot v^2 \quad [4.1]$$

Für das Messfahrzeug „Ford Transit“, welches zur Verifizierung des Simulationsprogramms herangezogen wurde, ergibt sich die nach Gl. 4.1 simulierte Fahrwiderstandskurve (Abb. 4.2).

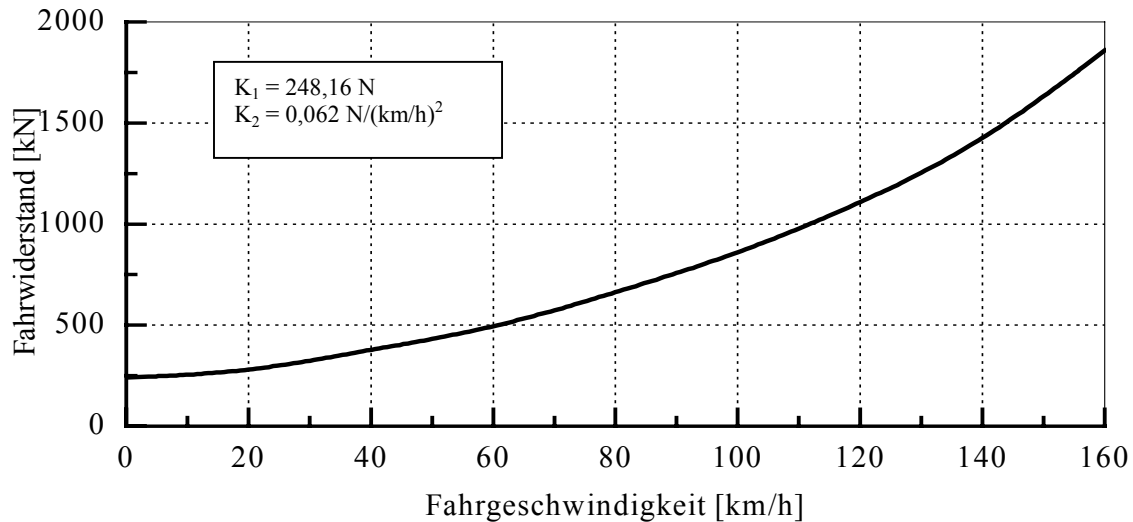


Abb. 4.2: Fahrwiderstandskurve des Fahrzeuges Ford Transit /51/

Mit der Systemparametrierung des Prüfstandsprogramms am Rollenprüfstand werden alle angeschlossenen Geräte, Baugruppen und Module der Prozessperipherie definiert und beschrieben. Hier ist auch die Kommunikation mit dem Programm Diadem[©] zu definieren. Die vom Programm Diadem[©]-Programm vordefinierten Namen der Zyklen können verwendet oder eigene vorgegeben werden. Zusätzlich integrierte Bedienfunktionen bieten die Möglichkeit Konstanten, Kalibrierparameter und Variablen mit Grenzwerten zu definieren und an das Programm Diadem[©] weiterzugeben.

Alle ermittelten Ein- und Ausgangsgrößen, die mit den Prüfstandsprogrammen ermittelt werden, bekommen einen Namen zugeordnet.

Das Labor des Rollenprüfstandes ist so ausgestattet, dass alle geforderten Abgasbestandteile in ihrem Messbereich ermittelt werden können. Hier sind alle gesetzlich vorgegebenen Zyklen hinterlegt.

4.2 Abgasemissionsgeräte

Auf dem Rollenprüfstand stand eine Abgasmessanlage vom Typ MEXA-1440 AFM (Fa. HORIBA GmbH) zur Verfügung. Neben der Messung der Abgaskomponenten CO, HC, NO_x und CO₂ kann mit dieser Messanlage das Kraftstoff-Luftverhältnis ermittelt werden /52/.

Die Messbereiche für die Abgaskomponenten sind so ausgelegt, dass eine Emissionsmessung bei Ottomotoren sowohl unter den Bedingungen des Rollenprüfstandes als auch unter praxisrelevanten Bedingungen auf der Straße erfolgen kann.

Das Messsystem besteht aus 4 Analysatoreinheiten sowie der Steuerungs- und Auswerteeinheit. Außerdem werden die physikalischen Randbedingungen (z. B. Temperatur, Druck und Luftfeuchtigkeit) ermittelt. Die Analysatoreinheiten sind in einem 19"-Gehäuse untergebracht und können von einer üblichen 12 V Gleichstrombatterie gespeist werden. Das ganze System ist kompakt, um die Montage in der Fahrerkabine eines Personenwagens zu ermöglichen. Die Messprinzipien der Analysatoren sind folgende:

CO, CO₂, HC: NDIR -Messverfahren (Nicht – Dispersives – Infrarot – Absorption – Verfahren). Die MEXA 1440 AFM ist für den Straßeneinsatz gut geeignet, sie kann am Einsatzort zur Analyse des Motorverhaltens und des Katalysatorwirkungsgrads genutzt werden.

- **NDIR Multikomponentenanalysator**

Ältere Systeme nutzen die Licht-Streuung im infraroten Bereich zur Ermittlung von CO, CO₂ und HC. Die Gaskorrelationsmethode besitzt einen infraroten Halbleiterbilddetektor. Dieses System kann die Konzentrationen von bis zu drei Gasbestandteilen simultan messen. Hier werden zwei Arten von Signalen verglichen, um Messfehler zu reduzieren. Der infrarote Halbleitersensor besitzt eine höhere Messgenauigkeit, da er unabhängig von Vibrationseinflüssen arbeitet. Somit kann die Empfindlichkeit des infraroten Analysators beeinflusst werden. Das MEXA -1440 AFM kann mit einem eingebauten atmosphärischen Drucksensor ausgestattet werden, um genaue Ergebnisse sicherzustellen, wenn beim Straßeneinsatz die Höhendifferenz aufgezeichnet werden soll. Die Änderungen des atmosphärischen Druckes im Verlauf eines Testzyklus sind bei der Ermittlung der Gaskonzentrationsberechnung zu berücksichtigen. Es erfolgt eine Korrektur bei der Verdünnung des Gases und der Darstellung und Berechnung der Messergebnisse.

4.3 Fahrzyklen

Der FTP 75 Zyklus ist für Zulassung von leichten Nutzfahrzeugen vorgeschrieben. Hier müssen Fahrzeuge auf zwei Zyklen, ergänzend zum Bundestestverfahren, getestet werden. Der FTP 75 Zyklus hat kurze, aggressive Bestandteile mit einem hohen Geschwindigkeitsmodul (US06), um der Veränderung der Luftkonditionierung (SC03) gerecht zu werden. Der FTP 75 Zyklus wird vom FTP 72 Zyklus abgeleitet und fügt eine dritte Phase von 505 Sekunden hinzu, die mit der ersten Phase von FTP 72, aber mit einem betriebswarmen Motor, identisch ist. Die dritte Phase beginnt, nachdem das Fahrzeug 10 Minuten im Leerlauf war /58/. Die Abgasemissionen aus jeder Phase werden in g/km analysiert. Die Zulagenfaktoren sind 0,43 für den Kaltstart, 1,0 für die vorübergehende Phase und 0,57 für die Warmstartphase. Der FTP 75 Zyklus besteht aus den folgenden Phasen (Abb. 4.3):

- Kaltstartphase,
- vorübergehende Phase und
- Warmstartphase.

Der zweite Fahrzyklus ist der NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus). Er wird in einem Labor bei einer Umgebungstemperatur von 20°C bis 30°C auf einem Rollenprüfstand, beginnend mit einem Kaltstart, ausgeführt. Der Zyklus besteht aus einer Serie von Beschleunigungen, konstanten Geschwindigkeiten, Verzögerungen und Leerlaufanteilen. Die maximale Geschwindigkeit im Stadtzyklusteil ist 50 km/h, die durchschnittliche Geschwindigkeit beträgt 19 km/h. Im sich anschließenden Überlandzyklus beträgt die maximale Geschwindigkeit 120 km/h. Der Zyklus ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Die folgende Tabelle 4.1 zeigt die Grundparameter der zwei Fahrzyklen:

Tabelle 4.1 : Die Definition von Fahrzyklen FTP 75 und NEFZ

Charakter	(FTP 75)	(NEFZ)	Einheit
Zeit	2477	1220	s
Weg	17.77	11.15	km
max. Geschwindigkeit	91.25	120	km/h
max. Beschleunigung	1.48	1.06	m/s ²
mittlere Beschleunigung	0.51	0.53	m/s ²
max. Verzögerung	- 1.48	- 1.39	m/s ²
Leerlaufzeit	359	291	s
Schrittzahl	22	13	-

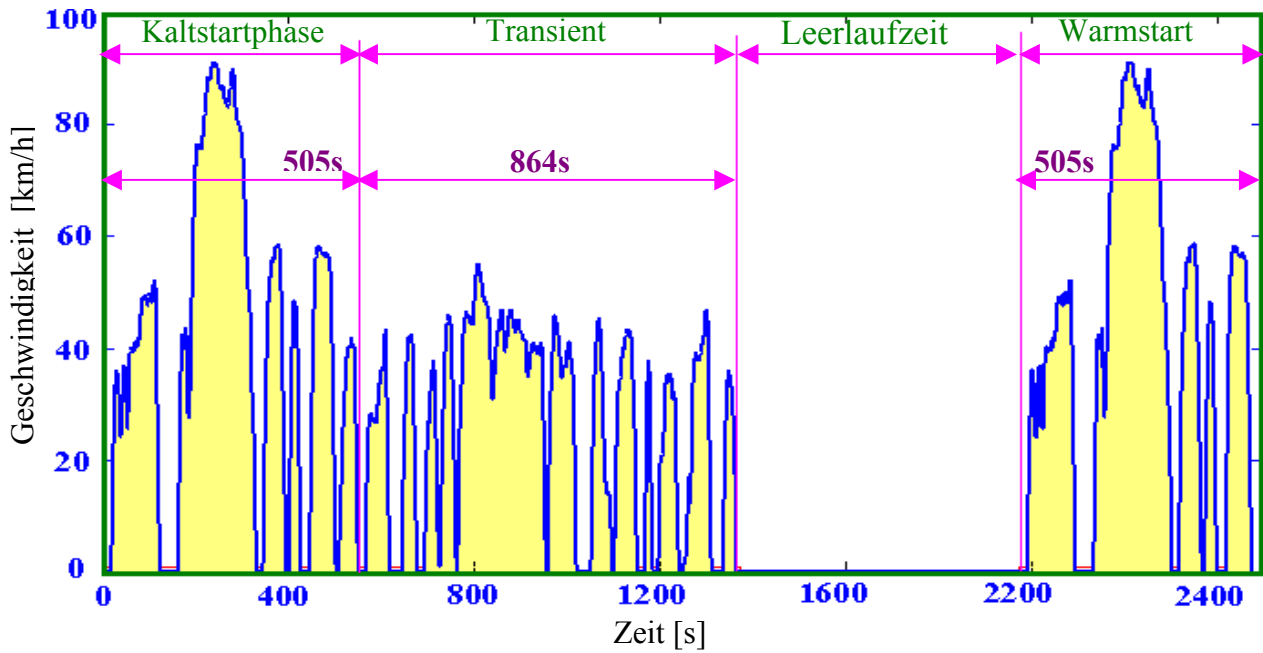


Abb. 4.3: Federal Test Procedure (FTP 75) /53/

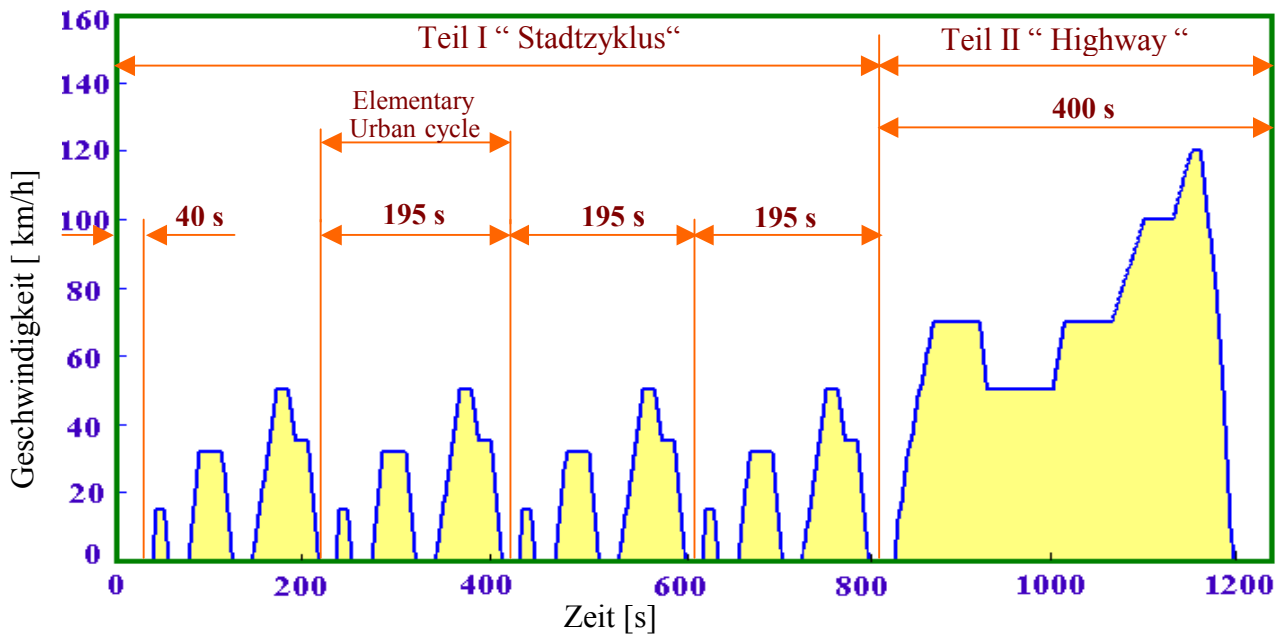


Abb. 4.4: Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ) /53/

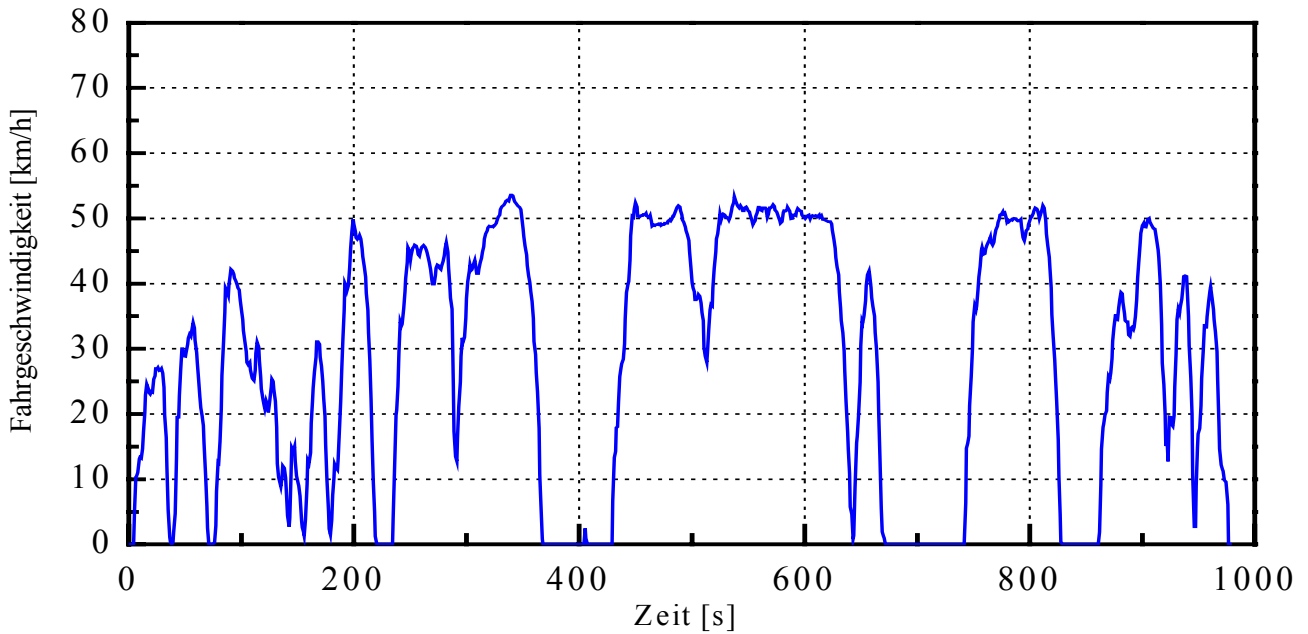


Abb. 4.5: Dresden-Stadtzyklus

Dieser Zyklus (Abb. 4.5) zeigt einen Stadtzyklus-Dresden. Der Stadtzyklus wird, ausgehend von einem Kaltstart, auf einem Rollenprüfstand durchfahren. Mit diesem Stadtzyklus-Dresden erfolgte eine bessere Anpassung an das reale Fahrzeugverhalten. Tabelle 4.2 stellt die Spezifikationen des Fahrzyklus in der Stadt Dresden (Straßenuntersuchungen mit dem Messfahrzeug Ford Transit) dar. Dieser Fahrzyklus ist über Messfahrten mit dem Versuchsfahrzeug „Ford Transit“ verkehrsnah ermittelt worden.

Tabelle 4.2: Die Spezifikationen des Fahrzyklus in Dresden-Stadt

Parameter	Wert	Einheit
ges. Zyklusdauer	977	s
Zykluslänge	7.72	km
max. Geschwindigkeit	53.91	km/h
mittl. Geschwindigkeit	28.41	km/h
max. Beschleunigung	2.43	m/s ²
mittl. Beschleunigung	0.49	m/s ²
max. Verzögerung	3.29	m/s ²
mittl. Verzögerung	0.45	m/s ²
Leerlaufzeit	188	s
Zahl der Schritte	8	-

5 Bewertung der Simulationsergebnisse

5.1 Allgemeine Einführung

Das im Rahmen der Arbeit entwickelte Simulationsprogramm ist mit Rollenprüfstandsmessungen und mit realen Fahrversuchen auf der Straße (Dresden-Zyklus) verifiziert worden. Für den grundlegenden Vergleich wurde das Messfahrzeug „Ford Transit“ herangezogen. Im Weiteren sind danach ein monovalentes Erdgas- und ein Hybridfahrzeug simuliert worden. Für die Beantwortung spezieller Fragen ist ebenfalls der beschriebene Rollenprüfstand genutzt worden.

Die jeweiligen Spezifikationen und gewählten Eingabeparameter sind in der Anlage A3 dargestellt. Für die Simulation sind, je nach Fragestellung, die folgenden Kennfelder im Arbeitsbereich des Antriebsmotors des Fahrzeuges eine notwendige Voraussetzung:

- Streckenkraftstoffverbrauch (Zyklusverbrauch):
Motorenkennfeld des spezifischen Kraftstoffverbrauchs (g/kWh) oder Energieverbrauchs (MJ/kWh)
- Abgasemissionen : CO-Kennfeld
HC-Kennfeld
NO_x-Kennfeld

Die Genauigkeit der Kennfelder spiegeln sich in Simulationsergebnissen wider. Die weitere Basis für die Bewertung bilden die Fahrzyklen (Abschnitt 4.3).

5.2 Verifikation der Simulationsergebnisse auf dem Rollenprüfstand mit dem Messfahrzeug Ford Transit

Das Versuchsfahrzeug ist, wie beschrieben, mit dem Rollenprüfstand abgeglichen worden. Zur Überprüfung der grundlegenden Daten wurden im jeweiligen Vergleichszyklus die Zugkräfte gemessen. Da das Messfahrzeug nicht mit einer Drehmomentmessrichtung ausgerüstet war, sind deshalb die Motorparameter (Leistung, Drehmoment und Volllastkennlinie) berechnet worden. Über die vorliegende Volllastkennlinie sind die Wirkungsgrade der Leistungsübertragung angepasst worden. Die Anpassung gilt als abgeschlossen, wenn die Abweichungen in einem Toleranzbereich von der Volllastkennlinie $\Delta \pm 2 \%$ liegen.

Der Rollenprüfstand ist mit einem Fahrerleitgerät, welches dem Fahrer den jeweiligen Zyklus sichtbar macht, ausgestattet. Das Fahrzeug ist vor jedem Versuch in einen definierten Ausgangszustand (Kühlmitteltemperatur, Schmieröltemperatur, Reifenfülldruck usw.) versetzt worden, sodass die Startbedingungen (Betriebswarmer Motor und Messtechnik) gleich waren.

Der Zyklus ist dann auswertbar, wenn der Fahrer bei der konstanten Fahrt die Toleranzen von $\Delta v = \pm 2 \text{ km/h}$ bei der Geschwindigkeit und bei der Zeit von $\Delta t = \pm 1 \text{ s}$ eingehalten hat. Bei der beschleunigten Fahrt wird der Toleranzbereich nach einem einprogrammierten Algorithmus (zyklusabhängig) vergrößert. Wird bei Beschleunigungsvorgängen der Toleranzbereich überschritten, so wird softwaremäßig der gefahrene Zyklus für nicht auswertbar erklärt.

Für den Vergleich werden vereinbarungsgemäß der NEFZ- und FTP-75 Zyklen herangezogen und für die Abstimmung zwischen Straße und Rollenprüfstand wird ein interner Dresden-Zyklus genutzt.

Im ersten Schritt werden die Zykluslängen und die Zugkräfte miteinander verglichen. Die Auswertung zeigt, dass die Zykluslängen sich in einen Toleranzfeld von kleiner als $\pm 2 \%$ bewegen (Tabelle 5.1). Die auf dem Rollenprüfstand ermittelte Zykluslänge ist im Allgemeinen etwas größer als die mit der Simulation ermittelte Länge. Die Ursache wird im Schlupf zwischen Rad und Rolle gesehen.

Tabelle 5.1: Vergleich der Zykluslängen

Zyklus	Zykluslänge bei Schlupf =0 (km)	Zykluslänge Simulation (km)	Zykluslänge Rollenprüfstand (km)	Abweichung (%)
NEFZ	11,15	10,97	11,21	$\leq \pm 2$
FTP-75	17,77	17,76	18,13	$\leq \pm 1$
Dresden-Zyklus	7,72	7,70	7,78	$\leq \pm 1$

Bei den Zugkräften ergeben sich größere Abweichungen. Sie bewegen sich im Toleranzbereich von $+ 3 \%$ (Beschleunigung, Konstantfahrt) und $- 4 \%$ (Verzögerung, Schaltzeiten). Eine Detailanalyse (Abb.5.1) macht deutlich, welche Unterschiede bei

der Zugkraft auftreten. Obwohl die Geschwindigkeitsverläufe nur geringfügige Abweichungen haben, weichen die Zugkraftverläufe zwischen Rollenprüfstand und Simulation voneinander ab. Es ist erkennbar, dass die Beschleunigungs- und Verzögerungsabläufe bei der Simulation mit beinahe konstanter Zugkraft ablaufen.

Das ist darin begründet, dass die Zugkräfte nur von der Luftwiderstandskraft (F_L) und von der Beschleunigungswiderstandskraft (F_B) abhängen. Da die Beschleunigung bzw. Verzögerung konstant ist, werden die Zugkräfte nur von der untergeordneten Luftwiderstandskraft zusätzlich beeinflusst.

Bei den Rollenprüfstandsuntersuchungen werden die Zugkräfte durch die vorgegebenen Schaltzeitpunkte (Zugkraftunterbrechung- Massenträgheitsmomente des Rollenprüfstandes) beeinträchtigt und führen somit zu größeren Abweichungen gegenüber der Simulationsbetrachtung.

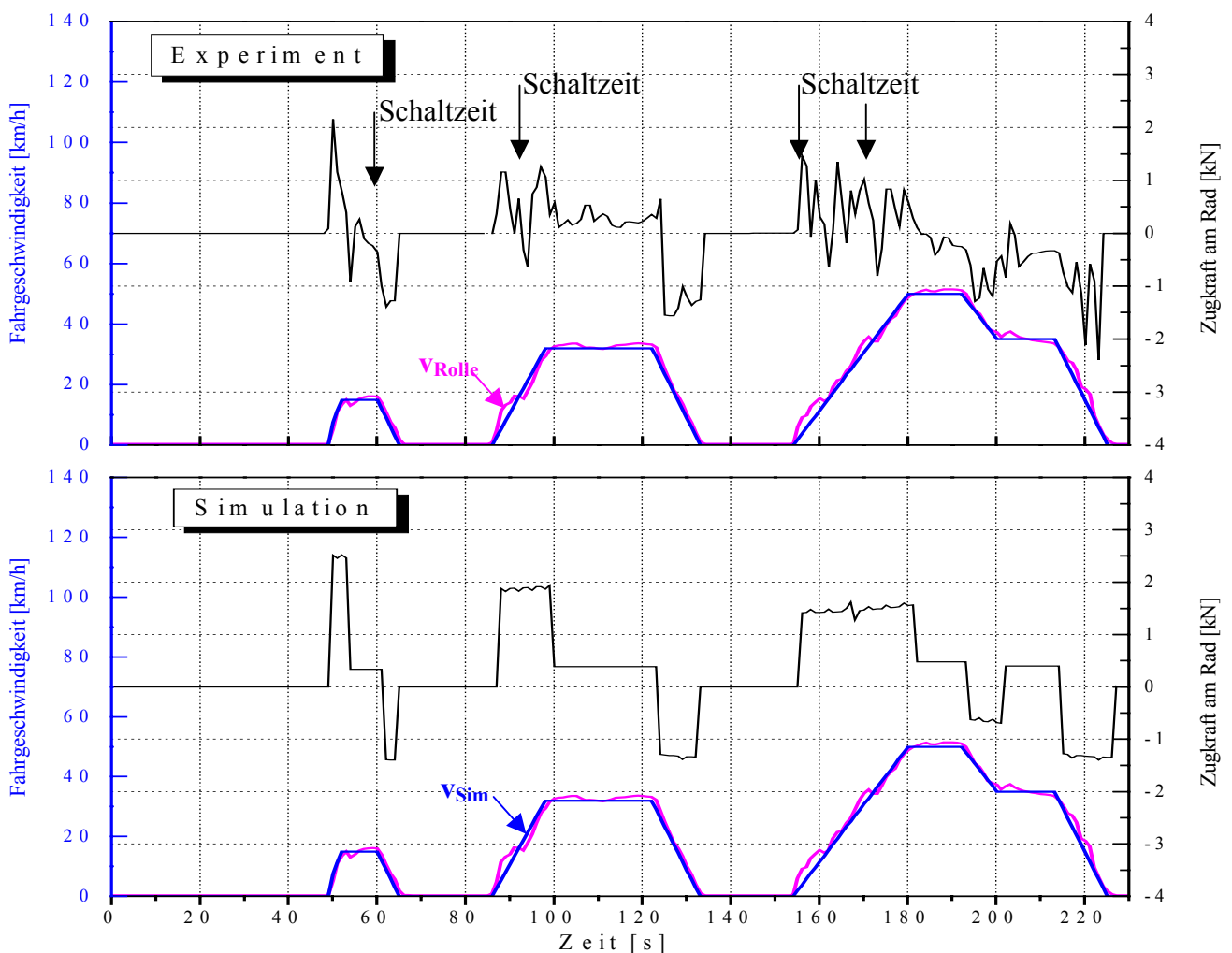


Abb.5.1: Ausschnittsbetrachtungen zum NEFZ bezüglich der Zugkräfte

Die vollständige Auswertung zu den Toleranzen zwischen Experiment und der Simulation ist in der Anlage 3 dargestellt.

Im Weiteren werden die Ergebnisse zum Kraftstoffverbrauch und zu den Abgasemissionen in Tabelle 5.2 gegenübergestellt.

Die prozentuale Abweichung ist nach folgender Gleichung ermittelt worden.

$$Abweichung = \frac{Wert_{Sim} - Wert_{Exp}}{Wert_{Sim}} * 100 \quad [\%]$$

Tabelle 5.2 : Ergebnisvergleich zwischen Simulation und Rollenprüfstand

Während NEFZ	Einheit	Simulation	Rollenprüfstand	Abweichung
Kraftstoffverbrauch	l/100 km	11,40	11,440	- 0,35 %
CO-Emission	g/Zyklus	40,9	36,03	+11,98 %
HC-Emission	g/Zyklus	2,08	2,331	- 12,02 %
NO _x -Emission	g/Zyklus	2,424	2,75	- 13,6 %
Während FTP 75				
Kraftstoffverbrauch	l/100 km	10,88	10,94	- 0,50 %
CO-Emission	g/Zyklus	81,9	95,8	-16,97 %
HC-Emission	g/Zyklus	3,86	3,09	+22,6 %
NO _x -Emission	g/Zyklus	6,191	6,197	- 0,10 %
Während Dresden -Fahrzyklus				
Kraftstoffverbrauch	l/100 km	10,98	11,07	- 0,82 %
CO-Emission	g/Zyklus	36,59	38,01	- 3,85 %
HC-Emission	g/Zyklus	5,12	4,50	+12,1 %
NO _x -Emission	g/Zyklus	3,76	4,26	- 13,30 %

Es ist erkennbar, dass der Kraftstoffverbrauch in sehr engen Grenzen abweicht. Größere Abweichungen ergeben sich bei den Abgasemissionen, die wie folgt begründet sind:

- Die Abgasemissionen werden über eine definierte Sonde und einen endlichen Verbindungsschlauch der messbereiten Abgasmessanlage zugeführt. Aufgrund der Längenverhältnisse ergibt sich eine definierte Totzeit zwischen dem Ort der Schadstoffentstehung (Brennraum) und der zeitbezogenen Messwertanzeige des Analysators. Obwohl diese versuchstechnisch ermittelt werden, können bestimmte Abweichungen nicht ausgeschlossen werden (Zuordnungsfehler zur Basiszugkraft).

- Kalibrierungsgenauigkeiten der Analytoren. Der Messbereich (Messbereichsende - Zweipunktkalibrierung) wird im Allgemeinen über das zu wählende Kalibriergas (z. B. 500 ppm HC) festgelegt. Im instationären Betriebsmodus (z. B. bei Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen) kann dieser kurzzeitig überschritten werden, wodurch der Fehler (z. B. 1% zum kalibrierten Endwert) größer wird.
- Die zur Simulation verwendeten Abgasemissionskennfelder beziehen sich hauptsächlich auf stationäre Betriebspunkte. Die Bestimmung der erforderlichen Zwischenwerte erfolgt mit dem gewählten Interpolationsverfahren. Beim Durchfahren der Zyklen wechseln sich jedoch stationäre und instationäre Betriebsmodi ab. Diese instationären Vorgänge werden bei der Simulation auf quasistationäre Vorgänge zurückgeführt.
- Auf dem Rollenprüfstand kann der vorgegebene Fahrzyklus nur in bestimmten Toleranzbereichen (s. Abschnitt 4) nachgefahren werden (Fahrereinfluss).
- Der Kontakt zwischen dem Antriebsrad (Reifen) und den Rollen des Prüfstandes ist kraftschlüssig. Obwohl theoretisch (auch bei der Simulation) ein Schlupf ausgeschlossen wird, tritt dieser in der Praxis auf (Zuordnungsfehler Raddrehzahl/Motordrehzahl). Der Schlupf ist bei einer Verzögerung größer als bei der Beschleunigung.
- Der Rollwiderstandsbeiwert ($f_R = F_R / m_F \cdot g$) auf der Rolle weicht von dem Wert auf der Straße ab. Somit wird die Rollwiderstandskraft ($F_R = m_F \cdot g \cdot f_R$) nur ungenau ermittelt. Dieser Fehler geht in die Kräftebilanz ($F_Z = F_w$) am Antriebsrad direkt ein und führt somit zu Fehlern bei der Drehmoment/Drehzahl-Zuordnung im Motorenkennfeld.
- Das im Simulationsprogramm umgesetzte mathematische Modell kann aufgrund der vorgegebenen Randbedingungen (z. B. Zusammenfassung von Trägheitsmomenten, konstanter Rollwiderstandsbeiwert usw.) das reale Fahrzeug als physikalisches Ausgangsmodell nicht exakt beschreiben.

Die aufgezeigten Ergebnisse zwischen Simulation und praktischen Messungen lassen die Schlussfolgerung zu, dass das entwickelte Simulationsprogramm eine reale Fahrzeugbewegung wiedergeben kann. Der in der Tabelle 5.2 ausgewiesene Toleranzbereich entspricht dem Stand der Technik.

5.3 Simulationsbetrachtungen zu alternativen Antriebskonzepten

5.3.1 Einführung

In der Fahrzeugtechnik werden verschiedene alternative Konzepte mit folgenden Zielstellungen verfolgt:

- Nutzung eines Emissionsminderungspotenzials,
- Schonung der Rohölreserven,
- Nutzung unerschöpflicher Energie,
- Minimierung des Energieverbrauchs und
- Vorbereitung der Nutzung der Zukunftsenergie „Wasserstoff“.

Den alternativen Konzepten werden die Nutzung von alternativen Kraftstoffen in den herkömmlichen Verbrennungsmotoren und die Hybridsysteme zugeordnet. Alternative Kraftstoffe sind, gegenüber den bekannten flüssigen Diesel- und Ottokraftstoffen, Erdgas, Flüssiggas, Biogas, Deponie-, Faul- und Klärenenergie, Pflanzenöle, Biodiesel, Alkohole und Wasserstoff. Zu den Hybridkonzepten, die in Kombination mit einer zweiten Antriebsquelle und Speicher arbeiten, werden die Hybridfahrzeuge gezählt. Sie sind entsprechend dem Stand der Technik eine Antriebskombination von Verbrennungsmotor und Elektromotor. Diese Systeme schließen die bekannten Elektrofahrzeuge und die Brennstoffzellenfahrzeuge ein. Im Rahmen dieser Betrachtungen werden ein monovalentes Erdgasfahrzeug und das auf dem Markt befindliche Hybridfahrzeug „Toyota Prius“ einbezogen.

5.3.2 Monovalentes Erdgasfahrzeug „Fiat Multipla“

Das analysierte Fahrzeug wird ausschließlich mit Erdgas (monovalent) betrieben. Der Erdgasmotor ist ein fremdgezündeter 4-Takt-Ottomotor. Der Erdgasmotor wird

on-board im Druckbereich von 200 bar gespeichert und danach über die Erdgasanlage in jedes Saugrohr im Niederdruckbereich (äußere Gemischbildung) zugeführt. Erdgasfahrzeuge aller Art zeichnen sich durch extrem niedrige Abgasemission aus.

Die für die Simulation notwendigen Eingabedaten und die Motorkennfelder sind in Anlage A3 dargestellt.

Die Simulationsergebnisse werden in der Tabelle 5.3 gezeigt.

Tabelle 5.3: Ergebnisvergleich zwischen Simulation und Schadstoff-Typprüfwerte nach KBA-Angabe

Während NEFZ	Einheit	Simulation	Schadstoff-Typprüfwerte nach KBA-Angabe		Reduzierung (%)
			Erdgas	Benzin	
Energieverbrauch	m ³ /km	0,109	0,11	-	
CO-Emission	g/km	0,534	0,609	0,811	- 34,2
HC-Emission	g/km	0,0585	0,066	0,121	- 51,6
NO _x -Emission	g/km	0,0497	0,054	0,066	- 24,7

Da es auf dem Rollenprüfstand nicht möglich war, den Energieverbrauch des Erdgasfahrzeuges zu ermitteln, werden die Simulationsergebnisse mit den vom Kraftfahrtbundesamt (KBA) angegebenen Schadstoff-Typprüfwerten verglichen. Die Basis bildet wiederum der NEFZ - Fahrzyklus. Die positive Bilanz der Abgasemissionen eines Erdgasfahrzeuges wird ausgewiesen. Das ausgewiesene Reduzierungspotenzial bezieht sich auf die Emissionen des benzingetriebenen, artgleichen Fahrzeuges (Abb. 5.2).

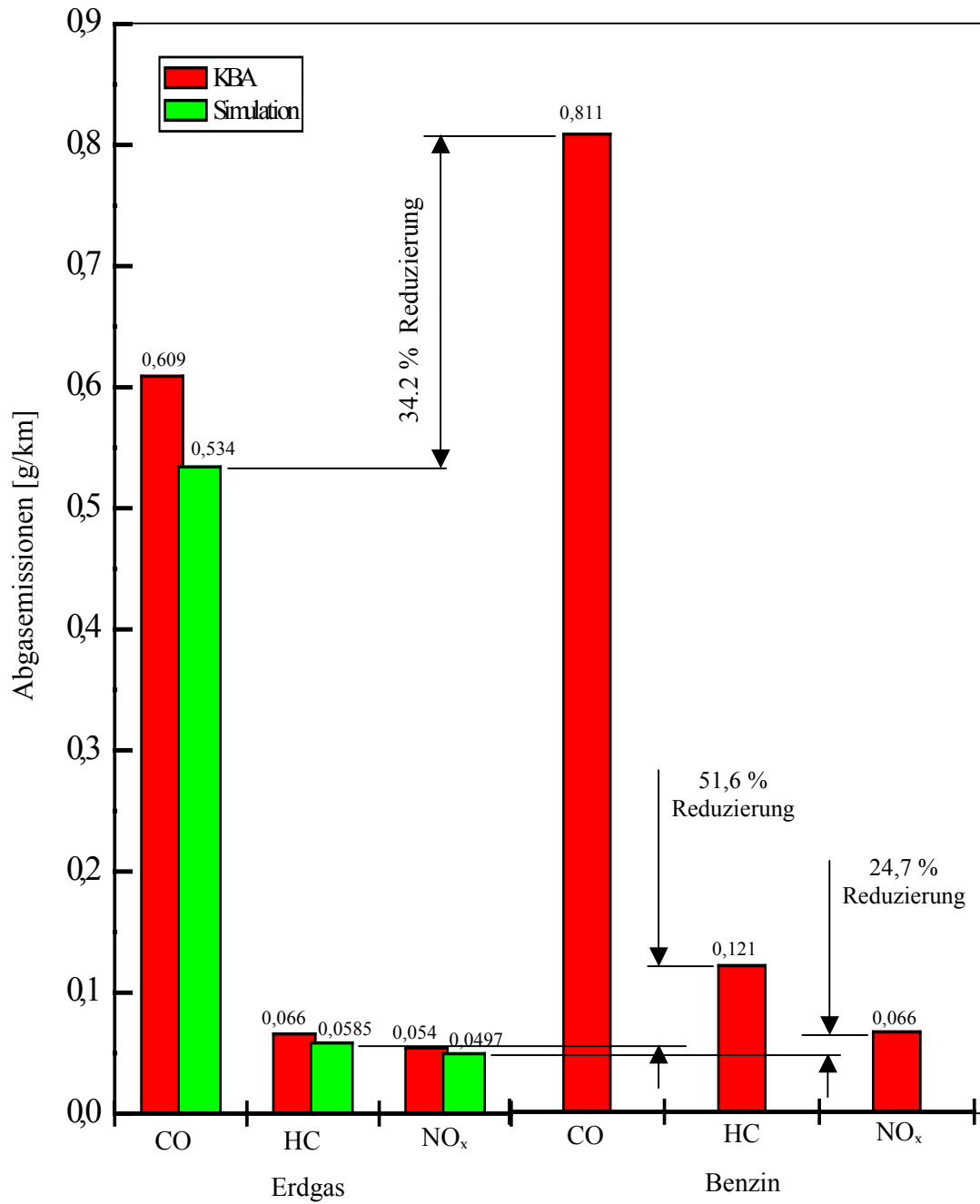


Abb. 5.2: Grafischer Vergleich der Abgasemissionen eines Erdgasfahrzeuges mit dem artgleichen Ottofahrzeug

5.3.3 Hybridfahrzeug „Toyota Prius“

Das untersuchte Hybridfahrzeug wird mit einem Ottomotor und einem Elektromotor angetrieben. Die weitere Leistungsübertragung erfolgt über ein komplexes Planetengetriebe, das über ein spezielles Fahrzeugmanagement den jeweils optimalen Leistungspfad wählt.

Unter dieser technischen Besonderheit werden die Vorteile des hybriden Antriebssystems wirksam umgesetzt, d.h., die jeweiligen Betriebsregime wie E-Antrieb, konventioneller motorischer Antrieb und die Kombination beider Betriebsarten. Das Strukturschema des Hybridsystems ist in Abb. 5.3 dargestellt.

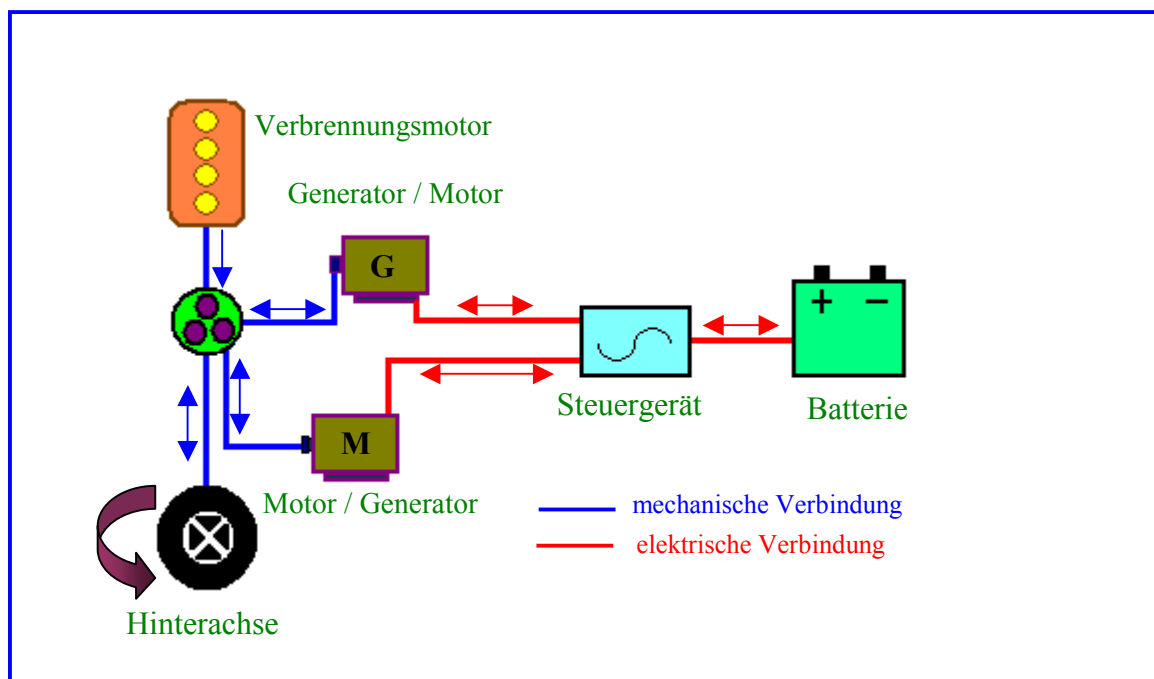


Abb. 5.3: Strukturschema des hybriden Antriebssystems /54/

Die für die Simulation notwendigen Eingabeparameter und Kennfelder sind in Anlage A3 dargestellt.

Aus dem Kräftegleichgewicht am Antriebsrad ($F_Z = F_w$) wird die jeweilige aufzubringende Leistung am Antriebsrad berechnet ($P_R = M_R \cdot \omega$). Bei Hybridfahrzeugen wird die Leistung über zwei Pfade (1. Pfad: Batterie – E-Motor- Planetengetriebe - Achsgetriebe; 2. Pfad: Verbrennungsmotor - Planetengetriebe -

Achsgetriebe) bereitgestellt. Da die Leistungsflüsse aufgrund des komplexen Aufbaus maßtechnisch nicht nachvollzogen werden konnten, wird die folgende Simulationsstrategie gewählt.

Das geforderte Drehmoment am Rad wird vorerst ausschließlich vom E-Antrieb über die Batterie bereitgestellt. Die Grenze ist der Ladezustand der Batterie, wird der Ladezustand von 0,70 erreicht, dann wird das Drehmoment über den konventionellen Leistungspfad bereitgestellt und gleichzeitig die Batterie wieder aufgeladen. Nach Erreichen des Grenzladezustandes (0,95 ~ 0,99) in der Batterie kann der E-Antrieb wieder ein Drehmoment abgeben. Der konventionelle Pfad stellt nur noch die Drehmomentdifferenz (je nach Bedarf) bereit.

Die Basis für die elektromotorische Leistungsübertragung bildet der momentane Ladezustand der Batterie. Über die zur Verfügung stehende Batterieleistung (P_B) im Arbeitsbereich der Batterie wird die Leistung bzw. das Drehmoment am Antriebsrad über das Simulationsprogramm in definierten Zeitschritten berechnet. Aus der Drehmomentbilanz am Antriebsrad können jetzt die jeweiligen Anteile der Pfade ermittelt werden.

Der Simulationsblock (SOC) ermittelt den Ladezustand der Batterie. Ist die Grenzladeung erreicht, dann wird die Batterie über den Generator, der vom Verbrennungsmotor angetrieben wird, mit maximaler Ladeleistung aufgeladen. Befindet sich das Fahrzeug im Bremszustand, dann wird die Energierückgewinnung zur Aufladung der Batterie ebenfalls genutzt. Aufgrund der komplizierten Leistungsflüsse, die messtechnisch nicht verfolgt werden konnten, ist die Simulation über den Kraftstoffverbrauch über die Fahrzyklen auf dem Rollenprüfstand skaliert worden. Die Simulationsergebnisse sind in Tabelle 5.4 dargestellt worden.

Der Kraftstoffverbrauch wird nach KBA-Anlage im NEFZ für das untersuchte Fahrzeug mit 5.1 l/100 km angegeben. Gegenüber diesem Verbrauchswert liegt ein Fehler von ca. 8 % vor. Gegenüber den durchgeführten Rollenprüfstandsuntersuchungen liegt der Fehler unter 5 %.

Das erreichte Simulationsergebnis liegt somit in der vorgegebenen Fehlergrenze und erbringt den Nachweis, dass die gewählte Steuerungsstrategie der Realität sehr nahe kommt.

Tabelle 5.4: Ergebnisvergleich Simulation und Rollenprüfstand

Während NEFZ	Einheit	Simulation	Rollenprüfstand	Abweichung
Kraftstoffverbrauch	l/100 km	5,5	5,41	+1,6 %
CO-Emission	g/Zyklus	7,04	6,28	+12 %
HC-Emission	g/Zyklus	0,580	0,524	+9,6 %
NO _x -Emission	g/Zyklus	1,09	0,996	+9,17 %
<i>Während FTP 75</i>				
Kraftstoffverbrauch	l/100 km	5,61	5,66	- 0,90 %
CO-Emission	g/Zyklus	11	12,14	-12,7 %
HC-Emission	g/Zyklus	0,662	0,435	+11,4 %
NO _x -Emission	g/Zyklus	2,50	2,25	- 10 %
<i>Während Dresden -Fahrzyklus</i>				
Kraftstoffverbrauch	l/100 km	5,65	5,88	- 4 %
CO-Emission	g/Zyklus	9,15	8,09	+13,1 %
HC-Emission	g/Zyklus	0,720	0,630	+14,3 %
NO _x -Emission	g/Zyklus	1,32	1,22	+8,6 %

Im Weiteren lassen die Ergebnisse den Schluss zu, dass mit dem erarbeiteten Simulationsprogramm auch Hybridfahrzeuge bezüglich der Fragestellung Kraftstoffverbrauch und Abgasemissionen bewertet werden können.

6 Betrachtungen zur Optimierung von Transportprozessen auf dem Feld in der Ernte im Parallelverfahren

6.1 Allgemeine Einführung

Bedingt durch die räumliche Ausdehnung zählt die Landwirtschaft zu den transportintensiven Zweigen der Volkswirtschaft. Besonders die Pflanzenproduktion erfordert ein kostenintensives Transportgutaufkommen. Für den Transport und die Ernteprozesse in der Landwirtschaft werden umfangreiche Technologien mit dem Ziel entwickelt, Kosten zu minimieren. Der landwirtschaftliche Transport ist durch eine Reihe von Besonderheiten gekennzeichnet /55/:

- ✦ Unterschiedliche transporttechnische Guteigenschaften,
- ✦ Ungleichmäßiger zeitlicher Anfall von Erntegut,
- ✦ Enge Verbindung der Transportprozesse mit den durch Pflanze, Witterung und Boden beeinflussten Ernte-, Sammel- und Verteilerprozessen.

Trotz dieser Besonderheiten ist auf eine energiesparende und umweltschonende Fahrweise stets zu achten. Im folgenden Abschnitt wird deshalb eine Transportaufgabe bei der Maisernte untersucht. Die Untersuchung wird nur bis zum Feldrand betrachtet. Die Fahrstrecken auf der Straße sind unabhängig von der Feldeinteilung und beeinflussen das Ergebnis durch einen konstanten Wert. Dieser konstante Wert beeinflusst das Ergebnis nur in seiner Tendenz. Die selbstfahrende Arbeitsmaschine (z. B. Häcksler) mit einem definierten Erntegutmassenstrom (\dot{m}) wird von einer Traktor-Hängereinheit zum Abtransport des Erntegutes unterstützt. Dabei wird unterstellt, dass das Transportfahrzeug das Erntegut bis zur Beladungsgrenze aufnimmt und zum Feldrand transportiert. Ein weiteres Fahrzeug steht zur Aufnahme des Erntegutes bereit. Dieser Wechselprozess wiederholt sich kontinuierlich.

Für die Optimierung dieses Transportprozesses wird ebenfalls, wie beschrieben, das Programm MATLAB/SIMULINK angewendet. Die Besonderheiten der Fahrdynamik der Traktor-Hängereinheit werden über ein spezielles Rad-Bodendruck-Modell berücksichtigt. Durch die unterschiedlichen Radstände des Traktors und des Hängers ergeben sich unterschiedliche Rollwiderstandsbeiwerte, die im Verhältnis 100/60 auf-

geteilt werden (1. Achse 100 %, 2. Achse 60 %). Als variable Größe in die Simulation geht die Feldlänge mit unterschiedlichen Geländeprofilen ein. Untersucht werden soll, welche Feldlänge bezüglich Kraftstoffverbrauch und emittierten Abgasemissionen für das Transportfahrzeug Traktor mit Anhänger (Wechselwirkung zwischen Beladung - Grenzbeladen – Leertransport) optimal ist.

6.2 Randbedingungen

Ein Feldhäcksler stellt kontinuierlich einen Massenstrom $\dot{m}=26,7 \text{ kg/s}$ für die Beladung der Transporteinheit (Traktor mit Anhänger) zur Verfügung. Somit ist der Anhänger, der eine Zuladung von 16 t bzw. 24 t zulässt, in 600 Sekunden bzw. 900 Sekunden beladen. Die Verteilung der Ladungsmassen auf die zwei Achsen des Anhängers erfolgt nach dem Schlüssel 65% auf die 1. Achse und 35 % auf die zweite Achse. Bei diesen Betrachtungen bleibt der Rollwiderstandsbeiwert $f_R = 0,10$ konstant. Die Simulation erfolgt in einer Schrittweite von 1 Sekunde. Die Abb. 6.1 kann verwendet werden, um für Transportfahrzeuge mit unterschiedlicher Beladung die Beladezeit zu bestimmen.

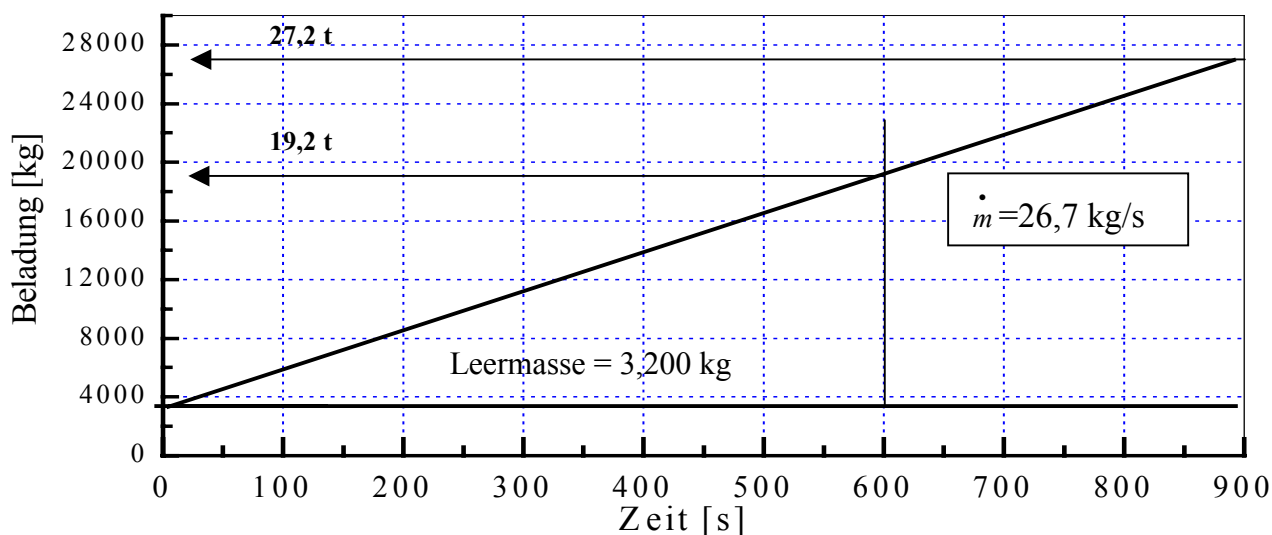


Abb. 6.1: Die Beladungsfunktion über die Zykluszeit

Die speziellen Parameter, die für die Simulation genutzt werden, sind in Tabelle 6.1 dargestellt.

Tabelle 6.1: Die technischen Spezifikationen des Traktors und des Hängers (z. B. TerraDOS) /56/

Parameter	Wert	Parameter	Wert
Typ des Traktors	TerraDOS	Leergewicht (Traktor), kg	3.000
Achsstand, m	3,0	Beladung, kg/s	26,7
Schwerpunkthöhe, m	1,15	Leerlaufdrehzahl, min^{-1}	700 ± 50
r_{dyn} , m	0,65	Kühlungsmittel	Wasser
Übersetzung der Hinterachse	3,93	Kraftstoffdichte, kg/m^3	820
Oberfläche, m^2	4,48	Heizwert, MJ/kg	43,0
Luftwiderstandsbeiwert (c_w), -	0,45	Luftdichte, kg/m^3 bei NT	1,20
Zulässiges Gesamtgewicht, kg	3.200	c_p -Abgas, kJ/kg K	1,089
Typ des Motors	OM457Euro2		
Leistung, kW @ min^{-1}	300@ 2000	Hänger	
Drehmoment, Nm @ min^{-1}	2000 @ 1100	Achsstand & r_{dyn} , m	1,30 & 0,55
Hubvolumen, l	11,98	Schwerpunkthöhe, m	1,10
Zylinderzahl	6 in Reihe	Maximale Zuladung, t	16 & 24
Verbrennungsverfahren	Diesel, Luftverteilt	Leergewicht, kg	3.200

Entsprechend der Zielstellung soll die Transporteinheit das Ernteprodukt vom Feldhäcksler bis zur Grenzbeladung aufnehmen. Erntemaschine und Transporteinheit fahren während dieser Phase mit einer konstanten Fahrgeschwindigkeit von $v = 8 \text{ km/h}$. Das vollbeladene Fahrzeug fährt gleichfalls mit einer Fahrgeschwindigkeit von $v = 8 \text{ km/h}$ bis zum Feldrand. Das Leerfahrzeug fährt mit $v = 16 \text{ km/h}$ zur Erntemaschine zurück und beginnt danach wieder mit der Aufnahme des Ladegutes (Feldeinteilung).

Als weitere variable Parameter werden verschiedene Fahrstrecken und Feldlängen in die Simulation einbezogen. Die untersuchten Fahrstrecken und Feldlängen sind in der Abbildung 6.2 dargestellt. Es ist erkennbar, dass diese immer mit einer ebenen Strecke beginnen.

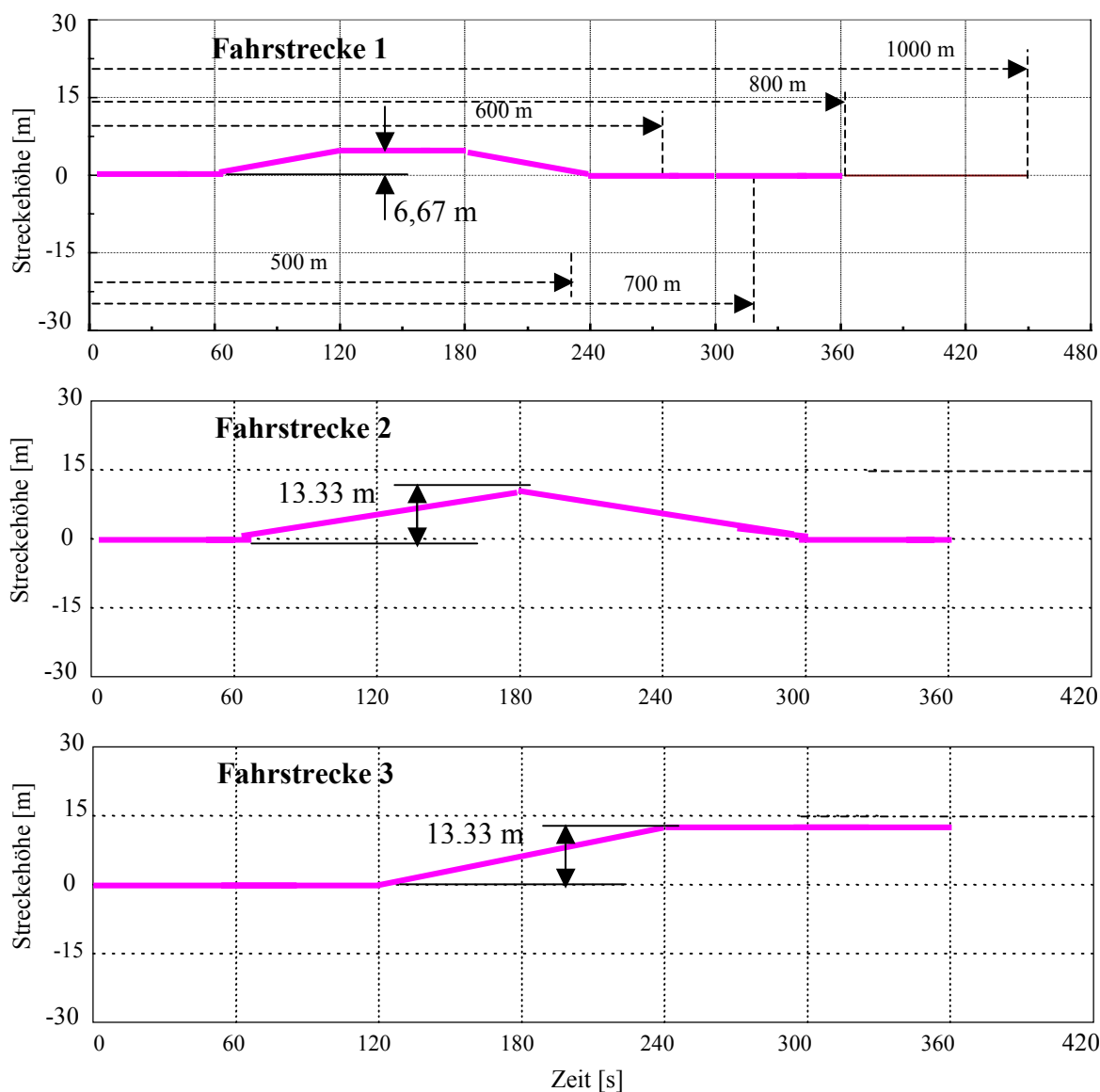


Abb. 6.2: Fahrstrecken und Feldlängen

Es ist ersichtlich, dass das Transportmittel, bei vorgegebener Beladungsfunktion, auf unterschiedlichen Abschnitten der jeweiligen Fahrstrecken den Beladungszyklus beginnt bzw. beendet. Zur Erhöhung der Aussagefähigkeit der Simulationsbetrachtungen sind deshalb 12 artgleiche Fahrzeuge einbezogen worden. Die dargestellten Ergebnisse erhalten somit, unter den vereinbarten Randbedingungen, eine statistisch gesicherte Aussagekraft. Ein weiteres Problem für eine reale Bewertung der Fahrten des Transportfahrzeuges sind die Wendungen. Ein derartiges Fahrzeug führt bestimmte Wendemanöver durch. Hierbei wird ein Zeitfonds von 10 s mit einer Fahrgeschwindigkeit von 8 km/h in der Simulation berücksichtigt. Der Verbrennungsmotor wird während dieses Abschnittes im gleichen Lastpunkt betrieben.

6.3 Simulationsergebnisse

6.3.1 Fahrstrecke 1, 16 Tonnen grenzbeladen

Die Ergebnisse für die emittierten Abgasemissionen und für den Kraftstoffverbrauch sind in der Abb. 6.3 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich ein Optimum für die Feldlänge von 700 m ergibt. Die Simulationsergebnisse sind auf das in der Landwirtschaft übliche Flächenmaß Hektar (ha) bezogen. Die durch die Erntemaschine bearbeitete Fläche wird durch den zurückgelegten Weg und die Arbeitsbreite, im speziellen Fall eine Schnittbreite von 6 m, ermittelt.

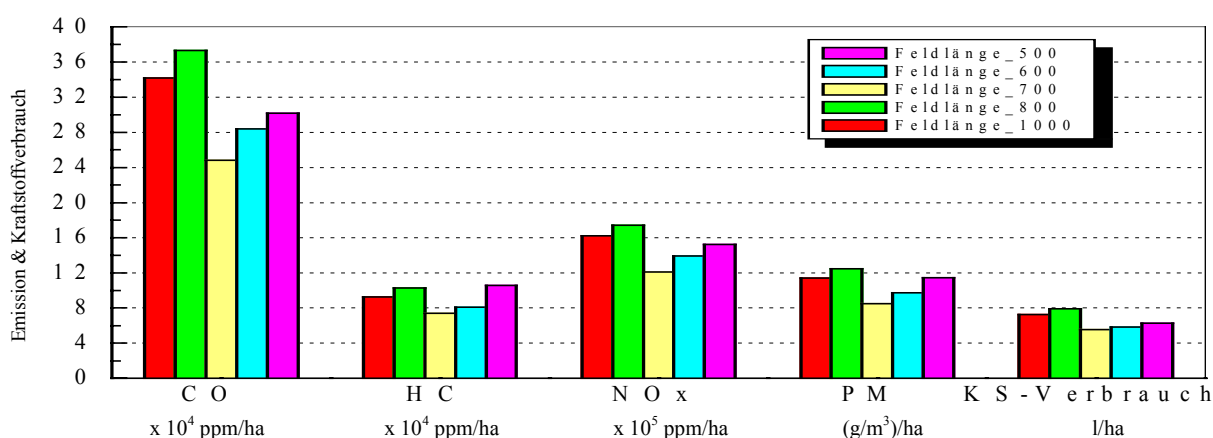


Abb. 6.3: Summierte Abgasemission und Kraftstoffverbrauch pro Hektar

Die Ergebnisse zeigen, dass die Feldlänge durch die Aneinanderreihung der wirksamen Fahrprofile (Ebene, Steigung, Gefälle usw.) während des Transportprozesses die Zielparameter wesentlich beeinflusst. Obwohl die Anzahl der Beladungen bei allen Betrachtungen gleich ist, ergeben sich dadurch unterschiedliche Ergebnisse. Zur weiteren Interpretation der Einzelergebnisse werden diese auf eine Einheitsfeldlänge von 800 m (mittlere Feldlänge des Freistaates Sachsen) wie folgt bezogen:

$$\Delta = - (Wert_{800} - Wert_{Feldlänge}) * 100 / Wert_{800} \quad [\%]$$

Beispiel: $\Delta_{KS-Verbrauch} = - (7,91 - 5,55) * 100 / 7,91 = - 29,84 \%$ Kraftstoffverbrauchsminderung. Die auf Feldlänge 800 m normierten Werte sind in Tabelle 6.2 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 6.2 : Differenz der Bestandteile der Abgasemission und des Kraftstoffverbrauchs für verschiedene Feldlängen

Feldlänge [m] (Bezug: 800 m)	1.000	700	600	500
Differenz-CO [%]	-8,40	-33,40	-24,0	-7,11
Differenz-HC [%]	-10,3	-27,96	-21,65	2,62
Differenz-NO _x [%]	-9,39	-30,33	-20,10	-12,46
Differenz-PM [%]	-8,19	-31,94	-21,83	-7,95
Differenz-KS-Verbrauch [%]	-8,1	-29,84	-26,04	-20,48

6.3.2 Fahrstrecke 2, 16 Tonnen grenzbeladen

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte ebenfalls wie unter Punkt 6.3.1 beschrieben. Die summierten Einzelwerte für die Bewertungsparameter sind in Abb. 6.4 und die normierten Werte in Tabelle 6.3 dargestellt.

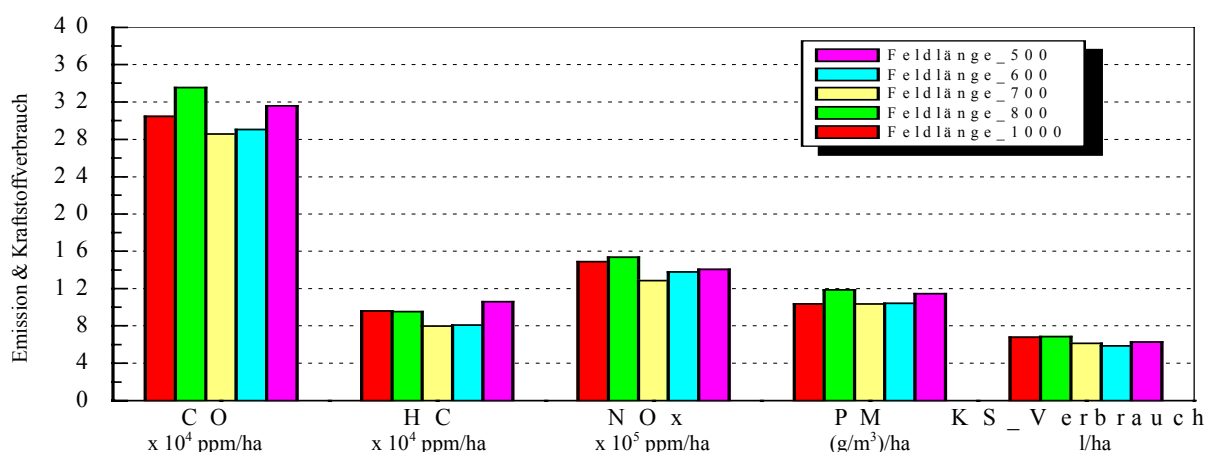


Abb. 6.4: Summierte Abgasemission und Kraftstoffverbrauch pro Hektar

Tabelle 6.3 : Differenz der Bestandteile der Abgasemission und des Kraftstoffverbrauchs für verschiedene Feldlängen in Prozent

Feldlänge [m] (Bezug: 800 m)	1.000	700	600	500
Differenz-CO [%]	-3,16	-7,09	-11,08	-4,94
Differenz-HC [%]	4,23	-20,71	-11,47	9,69
Differenz-NO _x [%]	-4,64	-15,11	-16,58	-9,70
Differenz-PM [%]	-12,29	-6,95	-5,16	-2,32
Differenz-KS-Verbrauch [%]	6,82	6,26	-4,48	1,12

Es zeigt sich, dass die Tendenz nicht eindeutig ist. Bezüglich der Emissionen liegen die Minima bei einer Feldlänge von 700 m und für den Kraftstoffverbrauch bei 600 m. Die Erklärung dafür ist wiederum in der Motorenbelastung im Zusammenhang mit dem Fahrprofil zu finden. Die Fahrstrecke 2 beinhaltet längere Steigungs- und Gefällestrecken, wodurch andere Bereiche der Basiskennfelder-Motoren- für die Emission und den Kraftstoffverbrauch bewertet werden.

6.3.3 Fahrstrecke 3, 16 Tonnen grenzbeladen

Die Abb. 6.5 stellt die Ergebnisse der emittierten Abgasemissionen und des Kraftstoffverbrauches pro Hektar dar. Es ist ersichtlich, dass ein Optimum für die Feldlänge von 700 m vorhanden ist.

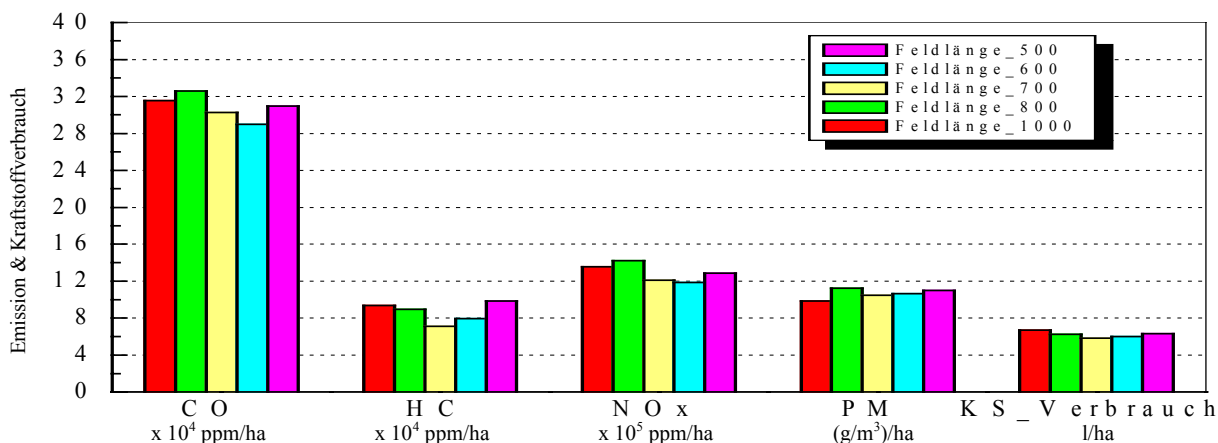


Abb. 6.5: Summierte Abgasemission und Kraftstoffverbrauch pro Hektar

Tabelle 6.4 : Differenz der Bestandteile der Abgasemission und des Kraftstoffverbrauchs für verschiedene Feldlängen in Prozent

Feldlänge [m] (Bezug: 800 m)	1.000	700	600	500
Differenz-CO [%]	-9,16	-14,70	-13,36	-5,70
Differenz-HC [%]	0,63	-16,17	-15,23	11,03
Differenz-NO _x [%]	-3,30	-15,81	-10,41	-8,46
Differenz-PM [%]	-12,66	-12,57	-12,07	-3,20
Differenz-KS-Verbrauch [%]	-0,90	-10,66	-14,60	-8,20

Die Abgasemissionen für alle Feldlängen erreichen bis zu 32,5 x 10⁴ ppm/ha für CO, 10 x 10⁴ ppm/ha für HC, 14,4 x 10⁵ ppm/ha für NO_x und 11,7 (g/m³)/ha für PM. Der Kraftstoffverbrauch beträgt 7,2 l/ha. Bezüglich der Emissionen liegen die Minima bei

einer Feldlänge von 700 m und für den Kraftstoffverbrauch bei 600 m. Die bezogenen Werte sind in Tabelle 6.4 zusammenfassend dargestellt.

6.3.4 Fahrstrecke 1, 24 Tonnen grenzbeladen

Die Abb. 6.6 zeigt die Ergebnisse der emittierten Abgasemissionen und des Kraftstoffverbrauches für Fahrstrecke 1 mit grenzbeladen 24 t. Es ist ersichtlich, dass sich das Optimum ebenfalls bei einer Feldlänge von 700 m ergibt. In Tabelle 6.5 sind wiederum die bezogenen Werte zusammenfassend dargestellt. Auch hier bilden sich die günstigsten Werte bei einer Feldlänge von 700 m heraus.

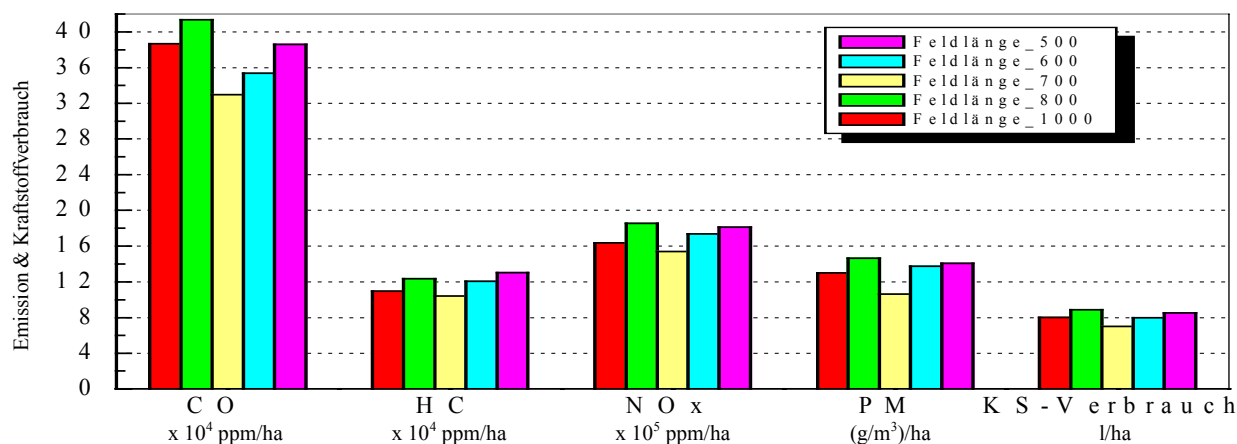


Abb. 6.6: Summierte Abgasemission und Kraftstoffverbrauch pro Hektar

Tabelle 6.5 : Differenz der Bestandteile der Abgasemission und des Kraftstoffverbrauchs für verschiedene Feldlängen

Feldlänge [m] (Bezug: 800 m)	1.000	700	600	500
Differenz-CO [%]	-6,43	-20,24	-14,51	-6,63
Differenz-HC [%]	-11,03	-15,57	-2,11	5,60
Differenz-NO _x [%]	-11,96	-17,13	-6,57	-2,42
Differenz-PM [%]	-11,32	-27,40	-6,48	-4,16
Differenz-KS-Verbrauch [%]	-9,48	-20,77	-9,93	-3,72

In Abb. 6.7 ist der bezogene Kraftstoffverbrauch noch einmal zusammenfassend dargestellt. Die bezogenen Verbrauchsminima liegen bei einer Feldlänge von 700 m. Die Kurvenzüge zeigen dem Anwender, bei welcher Feldlänge und welchen Beladungsbedingungen der betrachtete Parameter ein Minimum wird.

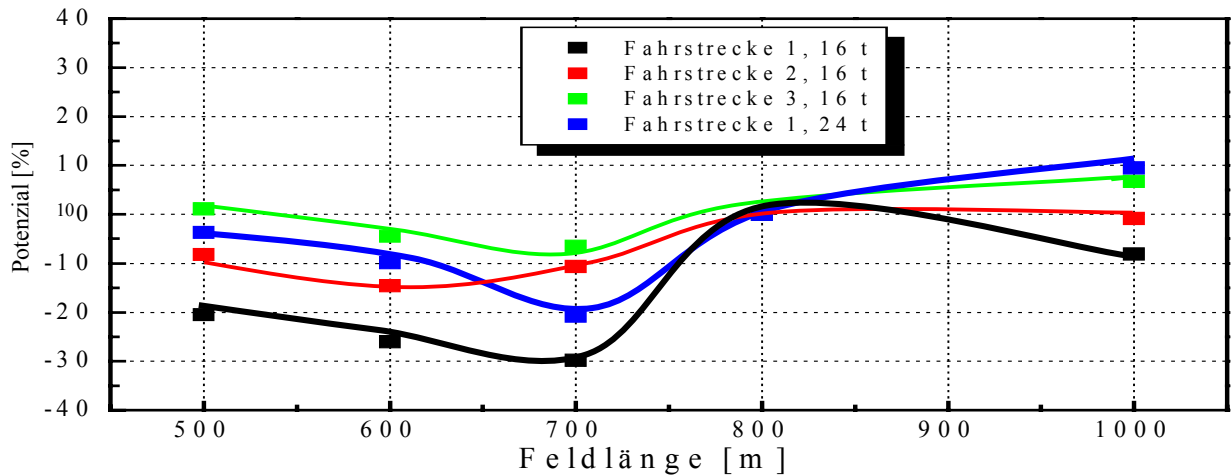


Abb. 6.7: Potenzial der unterschiedlichen Feldlängen für Kraftstoffverbrauch

Die Betriebskosten werden unter anderem durch den Kraftstoffverbrauch direkt beeinflusst. Aus diesem Grunde werden die errechneten Kraftstoffverbräuche nochmals als Absolutwerte aufgetragen. Der Betrachter kann erkennen, welches Einsparpotenzial bei definierter Transportleistung möglich ist. Im speziellen Fall liegen die Optima bei 5,8 l/ha (Fahrstrecke 1, 16 t) und 7,5 l/ha (Fahrstrecke 1, 24 t). Die Auswirkungen der Kombinationen (Feldlänge, Fahrprofil, Beladung) auf den Kraftstoffverbrauch sind tendenziell ableitbar.

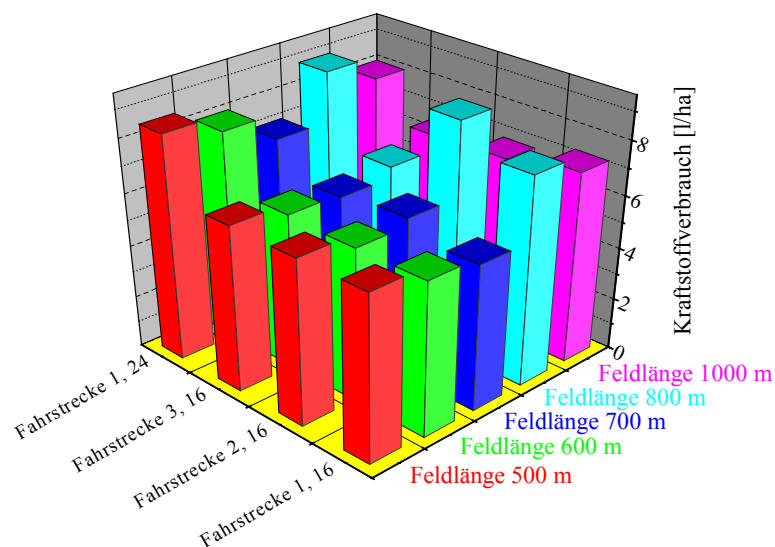


Abb. 6.8: Summierter Kraftstoffverbrauch pro Hektar

6.4 Verhalten des Traktors mit getriebenem und gezogenem Anhänger

Die Traktoren werden vorrangig für spezielle landwirtschaftliche Aufgaben, wie z. B. Bodenbearbeitung, Pflegearbeiten und Transportaufgaben entwickelt und eingesetzt. Gleichzeitig wird ständig der Durchsatz der selbstfahrenden Erntemaschinen gesteigert. Somit besteht die technologische Notwendigkeit, dass jeweilige Erntegut zum Bestimmungsort zu transportieren. Im Allgemeinen wird dazu eine Transporteinheit (z. B. Traktor plus Tandem-Anhänger) zum Einsatz gebracht. Die Traktoren sind bezüglich der Antriebsleistung und des Adhäsionsgewichtes diesen Aufgaben im begrenzten Maße angepasst worden. Trotzdem besteht ein gewisser Widerspruch zwischen installierter, aber hinreichenden Leistung und dem Gewicht (hier speziell die Achslast) des Traktors, um die mehr als doppelt so schweren Anhänger zu ziehen. Eine Möglichkeit wäre, den Anhänger mit einer Antriebseinheit zu versehen. In der Literatur werden diese Entwicklungen mit dem Begriff „Triebachsanhänger“ bezeichnet. Durch diese Maßnahme könnten die Traktoren mit einer geringeren Leistung und einem geringeren Gewicht ausgeführt werden.

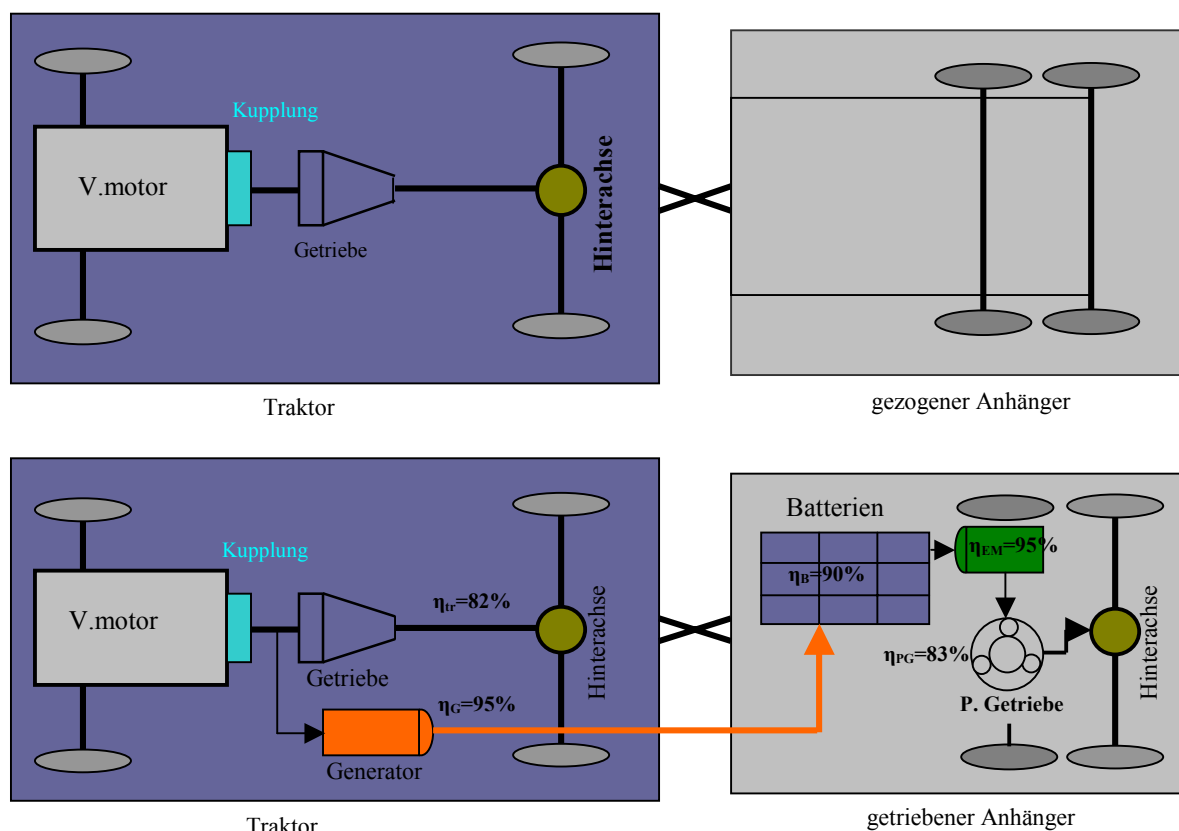


Abb. 6.9: Struktur des Traktors mit Anhänger /47/

Im vorliegenden Fall werden ein konventioneller Antrieb (Traktor mit Verbrennungsmotor, Getriebe, Achsgetriebe), der einen 20 t - Tandemanhänger zieht (gezogene Variante), und ein hybrides Antriebssystem, welches aus einem Traktor, der zusätzlich mit einem Generator ausgerüstet ist, und eine Antriebseinheit für den Anhänger (E-Speicher, E-Motor, Planetengetriebe) miteinander verglichen. In diesem gewählten Antriebskonzept übernimmt der Traktor Führungsaufgaben, Aufgaben für die Energieversorgung des getriebenen Tandemhängers und stellt anteilig Zugkräfte für die eigene Fortbewegung bereit. Die Abbildungen 6.9 stellt die Antriebskonzepte von Traktor und Anhänger dar.

6.4.1 Randbedingungen

Die Simulationsuntersuchung ermittelt das Verhalten des speziellen Fahrzeuges für einen definierten Fahrzyklus auf ebenen Fahrstrecken. Die Abb. 6.10 stellt die veränderte Geschwindigkeit über der Zeit dar. Die Gesamtmasse wird mit 80 % für den Anhänger und 20 % für den Traktor aufgeteilt

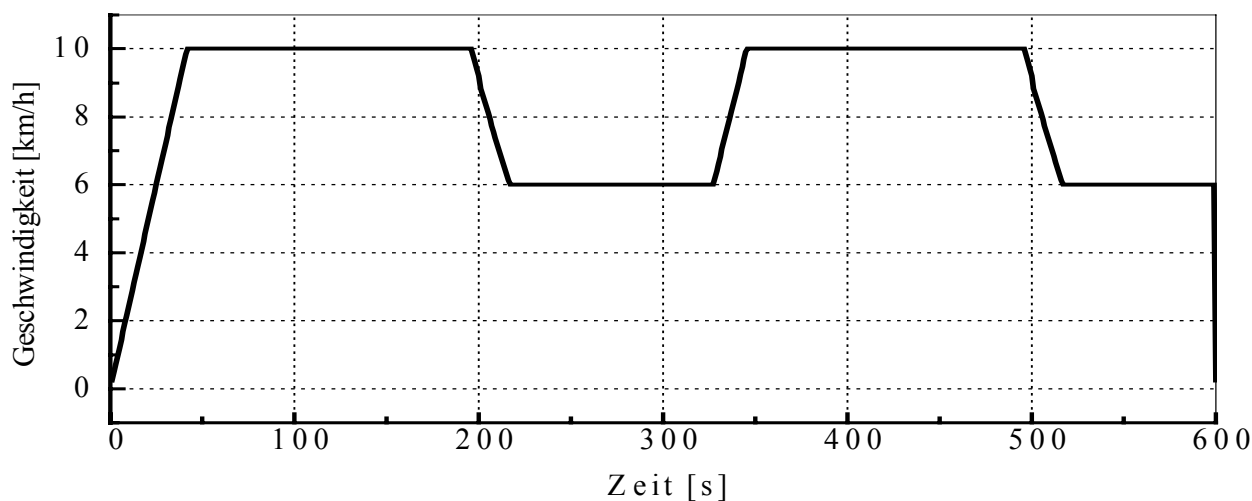


Abb. 6.10 : Fahrzyklus

Tabelle 6.6: Die technischen Spezifikationen des getriebenen Hängers

Parameter	Wert	Parameter	Wert
Batterien		Generator	
Typ	NiMH	Typ	Magnet-Generator
Masse, kg	220	Masse, kg	33
Max. Spannung, V	273	Max. Leistung, kW	30
Wirkungsgrad, %	90	Wirkungsgrad, %	95
E-Motor		Drehmoment, Nm	55
Typ	Magnet-Motor	Getriebe	
Masse, kg	57	Typ	Planetengetriebe
Max. Leistung, kW	30	Wirkungsgrad, %	83
Wirkungsgrad, %	95		

Die speziellen Parameter, die für den getriebenen Anhänger genutzt werden, sind in Tabelle 6.6 dargestellt. Die weiteren Daten des Traktors und des Anhängers bleiben unverändert und sind in Tabelle 6.1 aufgezeigt.

6.4.2 Veränderte Geschwindigkeit und ebene Strecke

Die Abb. 6.11 zeigt, dass die benötigte Leistung des Traktors mit getriebenem Anhänger geringer als mit gezogenem Anhänger ist. Das Ergebnis basiert auf der Annahme, dass die Wirkungsgradkette des hybriden Antriebs günstiger als die Wirkungsgradkette des konventionellen Antriebs ist (Abb. 6.9).

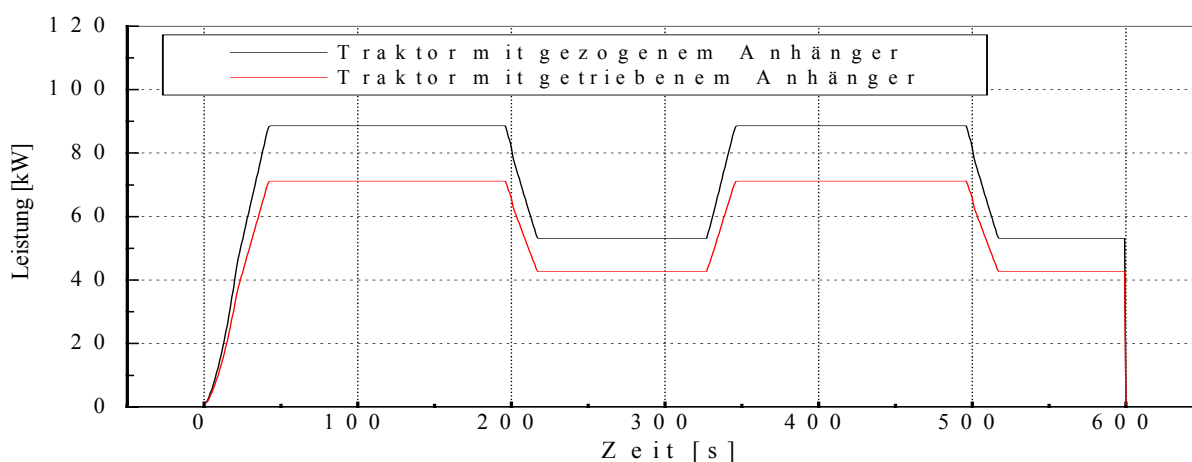


Abb. 6.11: Fahrleistung des Traktors mit Anhänger während Fahrzyklus

Die Abb. 6.12 und 6.13 zeigen das Drehmoment und die Fahrgeschwindigkeit für die beiden Fälle getriebener und gezogener Anhänger. Es ist ersichtlich, dass das notwendige Drehmoment des Verbrennungsmotors für den gezogenen Anhänger größer als das Drehmoment des Verbrennungsmotors (anderer Kennfeldbereich) für den getriebenen Anhänger ist. Die zugrunde liegenden Kennfelder sind in der Abb. A4.9-Anlage 4 dargestellt. Die Abb. A4.9 zeigt, dass der spezifische Kraftstoffverbrauch für den getriebenen Anhänger im gesamten Bereich günstiger als der spezifische Kraftstoffverbrauch für den gezogenen Anhänger ist. Im Vergleich zwischen den beiden Fällen beträgt die Einsparung 6,7 % für den getriebenen Anhänger gegenüber dem nicht angetriebenen Anhänger.

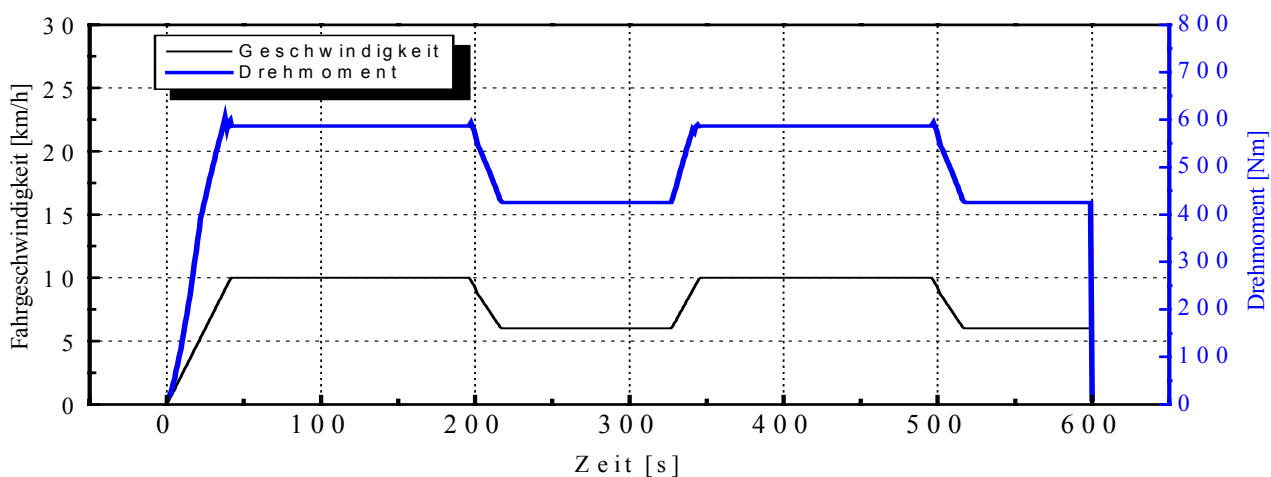


Abb.6.12 : Drehmoment und Geschwindigkeit über die Zykluszeit (getriebener Anhänger)

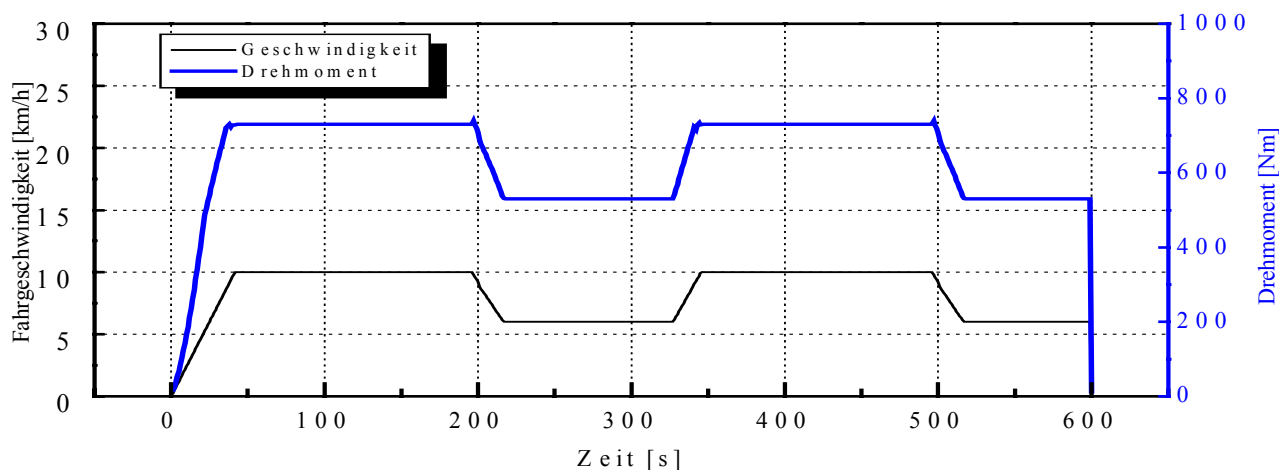


Abb.6.13 : Drehmoment und Geschwindigkeit über die Zykluszeit (gezogener Anhänger)

Die Abb. 6.14 zeigt den summierten Kraftstoffverbrauch des Traktors mit dem Anhänger während des gewählten Fahrzyklus. Der Kraftstoffverbrauch des Traktors mit getriebenem Spezialfahrzeug beträgt 3,228 l/Zyklus und für den Traktor mit gezogem Spezialfahrzeug 3,461 l/Zyklus. Der Unterschied des Energieverbrauches ist damit zu erklären, dass in der getriebenen Phase die verbrauchte Leistung niedriger als in der gezogenen Phase ist.

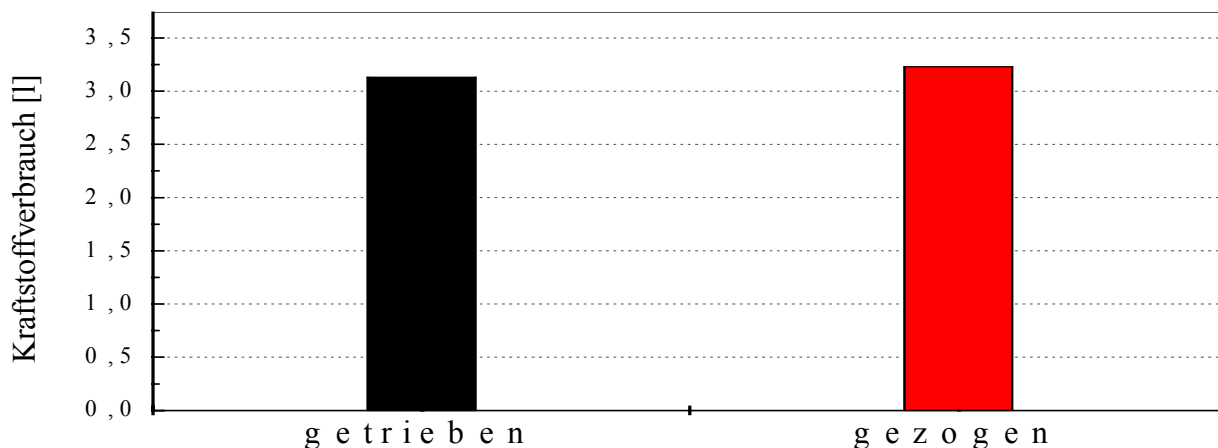


Abb. 6.14: Summierter Kraftstoffverbrauch des Traktors mit Anhänger

In der Abb. 6.15 sind die summierten Abgasemissionen des Traktors mit dem Anhänger während des eigenen Fahrzyklus dargestellt. Sie stellen den Vergleich zwischen den beiden untersuchten Fällen dar. Die Ergebnisse bestätigen, dass die abgegebenen Abgasemissionen für den Traktor im getriebenen Fall geringer sind als im gezogenen Fall. Dieses wird besonders für die Bestandteile CO-, NO_x- und Partikel-Emission

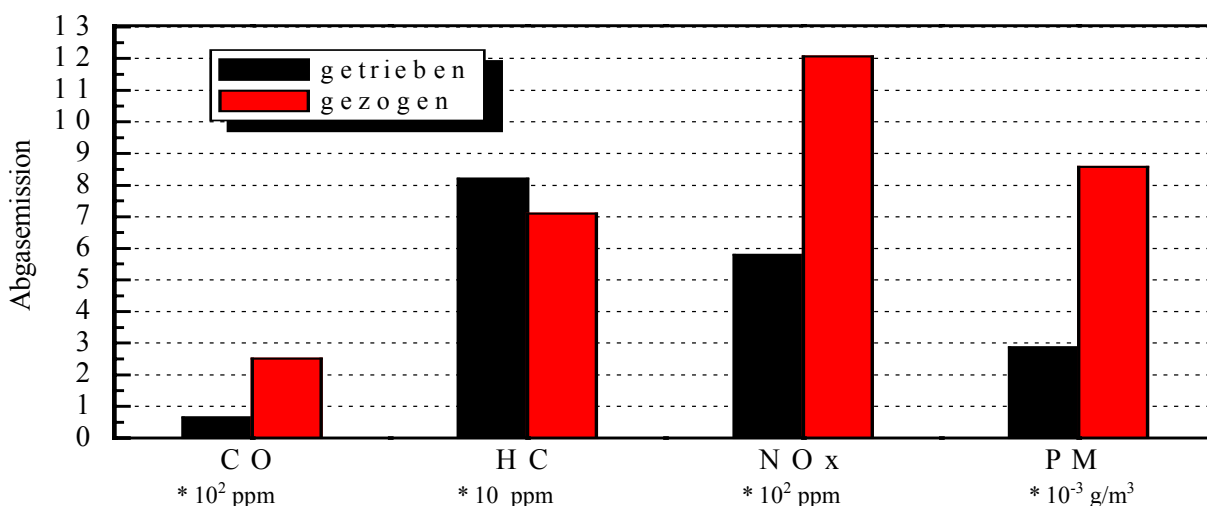


Abb.6.15: Summierte Abgasemissionen des Traktors mit Anhänger

deutlich. Die Abb. 6.15 zeigt weiterhin, dass die Tendenz der HC-Emission gegenläufig ist. Dies ist darin begründet, dass der Motorbetriebspunkt (M_d, n) bei der getriebenen Variante unter dem der gezogenen Variante liegt. Das Verbrennungsverfahren im unteren Teillastpunkt des Motors weist in dem Punkt eine höhere HC-Emission aus. Eine zielgerichtete Abstimmung des Motorprozesses auf diesen speziellen Arbeitsbereich des Motors wäre deshalb notwendig.

6.5 Verhalten des Traktors für verschiedene mittlere Geschwindigkeiten

Die Abb. 6.16 zeigt einerseits die Fahrgeschwindigkeit über der Zeit. Andererseits sind die verschiedenen mittleren Fahrgeschwindigkeiten („ v_m “) des Traktors, die in der Simulation mit 13,05 km/h, 8,16 km/h und 5,71 km/h berechnet wurden, dargestellt. Wie zu erkennen ist, wird der Traktor mit verschiedenen mittleren Fahrgeschwindigkeiten betrachtet.

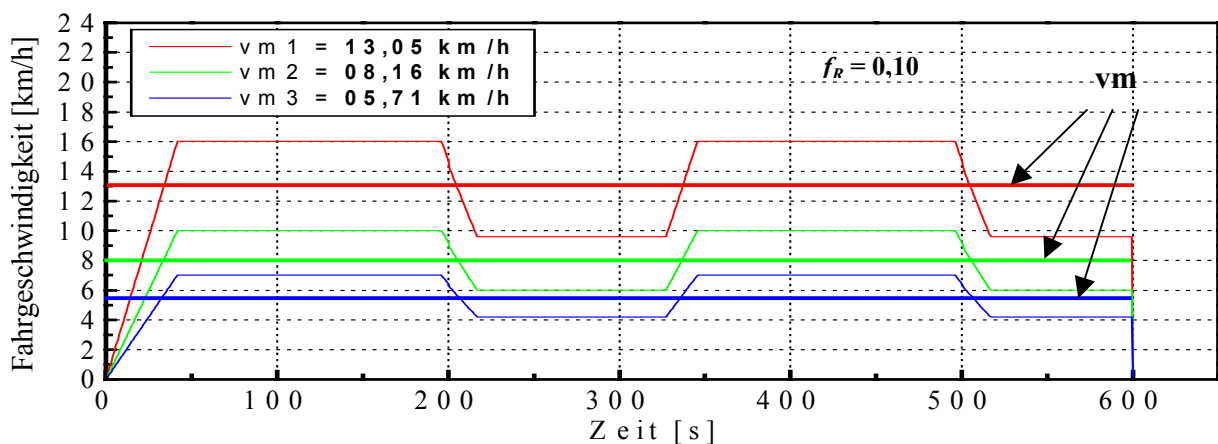


Abb. 6.16: Verschiedene mittlere Fahrgeschwindigkeiten

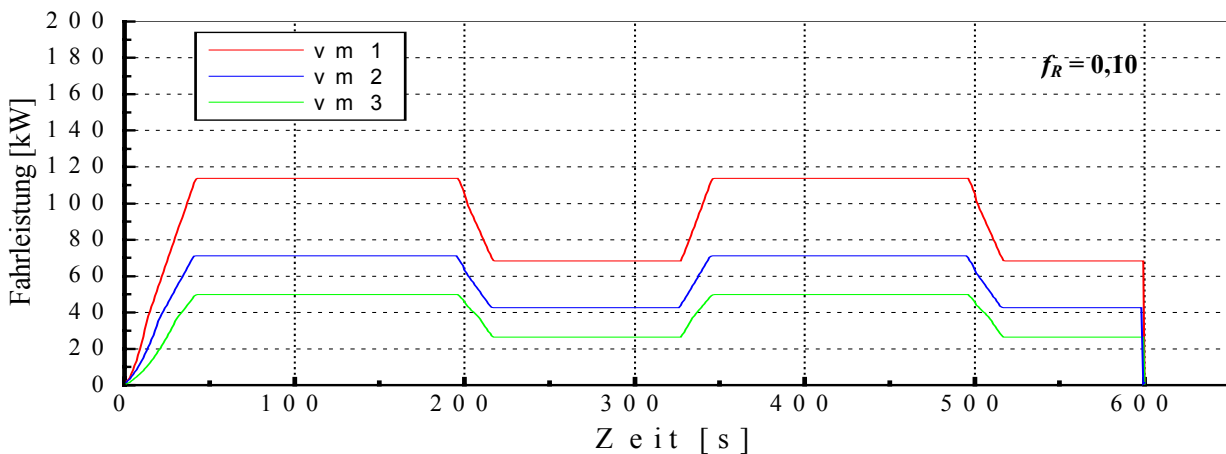


Abb. 6.17: Fahrleistung des Traktors für verschiedene mittlere Geschwindigkeiten

Die Abb. 6.17 zeigt die Fahrleistung des Traktors für verschiedene mittlere Geschwindigkeiten. Die Fahrleistung ist von der Geschwindigkeit abhängig. Sie steigt mit der zunehmenden Fahrgeschwindigkeit an.

Die Abb. 6.18 zeigt den summierten Kraftstoffverbrauch des Traktors für verschiedene mittlere Geschwindigkeiten. Es ist ersichtlich, dass mit steigender mittlerer Geschwindigkeit der summierte Kraftstoffverbrauch ansteigt. Der summierte Kraftstoffverbrauch beträgt:

4,615 l/Zyklus für v_{m1} ,

3,131 l/Zyklus für v_{m2} und

2,310 l/Zyklus für v_{m3} .

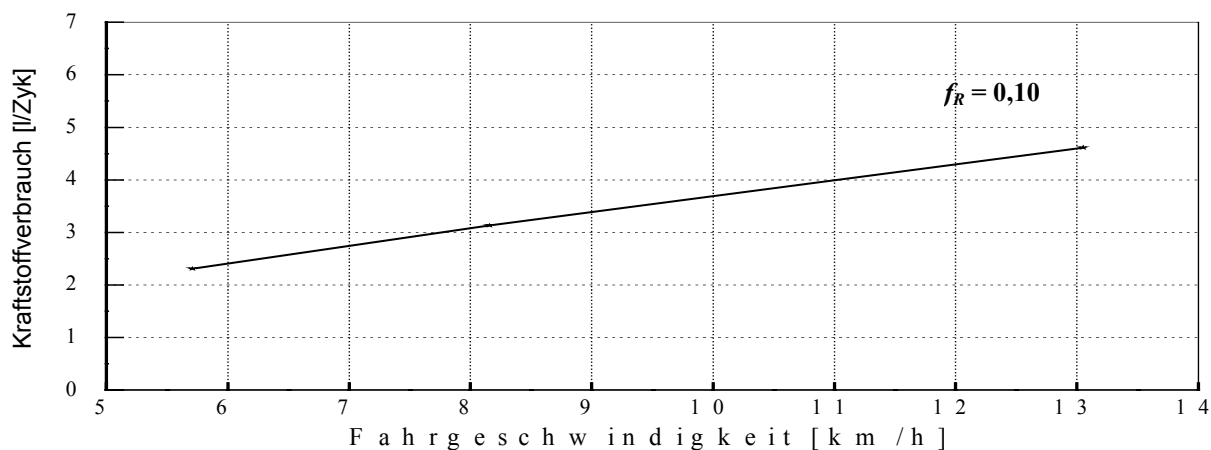


Abb. 6.18: Summierter Kraftstoffverbrauch des Traktors für verschiedene mittlere Fahrgeschwindigkeiten

Die Abb. 6.19 stellt die Abgasemissionen des Traktors für verschiedene mittlere Geschwindigkeiten dar. Die Abgasemissionen sind von der Fahrgeschwindigkeit des Traktors abhängig. CO-, HC- und PM-Emission steigen mit der zunehmenden Geschwindigkeit an. Während die Geschwindigkeit des Traktors zunimmt, verbessert sich das Gemischbildungsverhalten. Daraus folgt, dass die Abgasemissionen gesenkt werden. Im Fall der NO_x -Emission zeigt die Abb. 6.19, dass die NO_x -Emission mit der zunehmenden Fahrgeschwindigkeit zunimmt. Da die NO_x -Emission vom effektiven Mitteldruck abhängt, folgt daraus, dass die hohe Brenngastemperatur die Bildung des thermischen NO_x begünstigt.

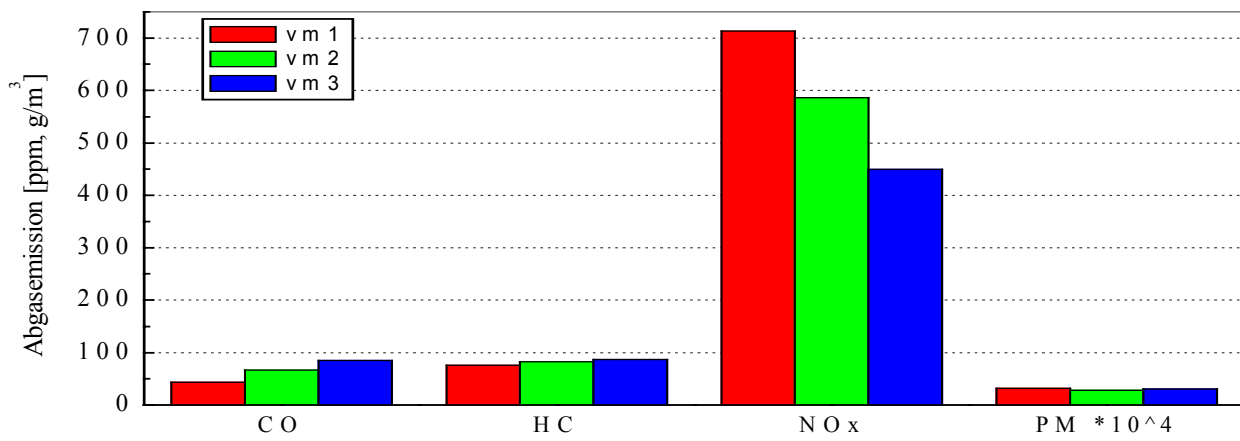


Abb. 6.19: Abgasemissionen des Traktors für verschiedene mittlere Fahrgeschwindigkeiten

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist ein Simulationsprogramm auf der Basis von MATLAB/SIMULINK entwickelt worden. Das Programm ist modular aufgebaut, sodass verschiedene Tools eingefügt bzw. ausgeblendet werden können. Aufgrund des gewählten Simulationsablaufes ist der Nachweis erbracht worden, dass sowohl Leistungsübertragungskonzepte konventioneller Fahrzeuge als auch alternative Konzepte bewertet werden können.

Das Simulationsprogramm ist auf der Basis verschiedener Fahrzyklen (NEFZ, FTP 75, Dresden-Zyklus) und eines Messfahrzeuges auf dem Rollenprüfstand bezüglich der Bewertungsparameter Kraftstoffverbrauch und Abgasemissionen skaliert worden. Die mittleren und partiellen Abweichungen liegen in einem Toleranzbereich von kleiner 10 %. Diese Abweichung ist im Besonderen auf die teilweisen unscharfen Randbedingungen (Kennfelder) bzw. auf die Toleranzbereiche der genutzten Messtechniken zurückzuführen.

Das Simulationsprogramm verfügt über ein einfaches Bedienkonzept und über eine zielführende Menüführung, sodass auch ein ungeübter Nutzer in kurzer Zeit die formulierten Aufgaben mit hinreichender Genauigkeit lösen kann. Die Basis für den jeweiligen Vergleich bildete jeweils die Baugruppenanordnung von konventionellen bzw. alternativen Serienfahrzeugen.

Im Rahmen einer Variantenbetrachtung ist es mit diesem Programm möglich, mögliche Kombinationen der Leistungsübertragung so miteinander zu kombinieren, dass entsprechende Antworten abgeleitet werden können. Es ist somit mit der entwickelten Software möglich, jeweils die ideale Leistungsübertragungskette für den vorgegebenen Anwendungsfall abzuleiten.

Es wurde der Nachweis erbracht, dass sowohl Straßenfahrzeuge als auch spezielle Fahrzeuge der Landwirtschaft (z. B. Traktor mit Anhänger) mit differenzierten Transportaufgaben mit dem vorgestellten Programm optimiert werden können.

Eine weiterführende Optimierung von Transportabläufen mit einer zukunftsweisenden Transporttechnik (z. B. selbstfahrender Anhänger oder Triebachsenanhänger, Leistungsverzweigungskonzepte, Brennstoffzellenantriebe usw.) könnte zum idealen

Transport - oder Spezialfahrzeug führen. Dieses wäre z. B. durch eine energiesparende und emissionsarme Fahrweise charakterisiert.

LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Cole, G.H., SIMPLEV; A simple electric vehicle simulation program, version 2.0., EG&G Idaho Inc.: Idaho, 1993
- /2/ Th. Spörl, A. Flaig, G. Lechner „FASIMU II – Modellierung und Simulation beliebiger Antriebsstrangkonzeppte“ VDI Bericht, München, 19. und 20. Oktober 1995
- /3/ Mechanical Simulation Corporation „CarSim Educational User Manual“ January, 2000
- /4/ S. Wilkins, M. U. Lampérth „An Object-Oriented Modelling Tool of Hybrid Powertrains for Vehicle Performance Simulation“ The 19th International Battery, Hybrid, and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium (EVS19) opens at the Busan Exhibition and Convention Center (BEXCO), October 19, 2002
- /5/ D. Nelson „Validation of ADVISOR as a Simulation Toll for a Series Hybrid Electric Vehicle Using the Versinia Tech FutureCar Lumina“ M.Sc. Blacksburg, Virginia, 1997
- /6/ R. Plitzner, G. Kutzke „Erarbeitung eines Algorithmus zur Ermittlung des Energiebedarfes eines Hybridantriebes unter Beachtung einsatznaher Bedingungen“ Diplomarbeit, HTW-Dresden, 1995
- /7/ Z. Rahman, K. Bulter, M. Ehsani „Designing Parallel Hybrid Electric Vehicle Using V-ELPH 2.01“ American Control Conference, California, June 1999
- /8/ Office of Transmission Technologies „DOE Hybrid Electric Vehicle Program.....Why HEV’s“ July, 1999
- /9/ P. Dietrich, G. Günter, K. Boulouchos 2 Antriebsstrategien für eine umweltfreundliche Mobilität, Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Jahrgang 104, 7-8/2002
- /10/ Internet: <http://www.ott.doe.gov>
- /11/ D. Rand, R Wood, R. Dell „Batteries for Electric Vehicles“ by Research Studies Press Ltd, 1998
- /12/ R. Gordon, P. Fusey, S. Streater, M.Hill „Mild Hybrid Operation with a Downsized Diesel Engine – A Practical Approach to Outstanding Fuel Economy“ MECCA. Nr 1, January, 2003
- /13/ Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) „Erprobung von Elektrofahrzeugen der neuesten Generation auf der

- Insel Rügen und Energieversorgung für Elektrofahrzeuge durch Solarenergie und Stromtankstellen“ Bonn, Dezember 1996
- /14/ D. Assanis, G. Delagrammatikas, R. Fellini, Z. Filipi, J. Liedtke, N. Michelena, P. Papalambros, D. Reyes, D. Rosenbaum, A. Sales, M. Sasena „An Optimization Approach to Hybrid Electric Propulsion System Design“ Automotive Research Center, College of Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 48109-2125
- /15/ W. Seifert „Fahrbericht Toyota Prius“ Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Mai 2002
- /16/ RENAULT „Annual General Meeting“ April 30, 2004
- /17/ Ph. Dietrich, G. Scherer, K. Boulouchos „Antriebsstrategien für eine umweltfreundliche Mobilität“ ATZ, August 2002
- /18/ P. Coenen „HEVAN, a Series Hybrid Electric Van as Concept Development Platform“ EV's 18, Berlin, Germany, 2001
- /19/ K. Wipke, T. Markel, D. Nelson „Optimizing Energy Management Strategy and Degree of Hybridization for a Hydrogen Fuel Cell SUV“ EV's 18, Berlin, Germany, 2001
- /20/ T. Richard, J. Arjan, R. Winkel „Chapter 3: Hybrid Vehicles for Different Applications“ International Energy Agency, Report 2000
- /21/ „World Energy Outlook“ International Energy Agency, Paris, Insights 2001
- /22/ DOE Annex V Team „Introduction of Hybrid Electric Vehicles“ Department of Energy– USA Ministry of Science & Technology PRC, Beijing, October 12, 1999
- /23/ F. H. Moeller „Prime Movers for Series Hybrid Vehicles“ Society of Automotive Engineers, 970287, 1997
- /24/ E. Noreikat „Brennstoffzellen für Elektrofahrzeuge – Entwicklungsschritte werden deutlich“ Fachtagung (Elektrofahrzeuge: Technologie-Innovation für den zukünftigen Verkehr) in Berlin 24. und 25. April 1997
- /25/ T. Vollmer „Der Autark Hybrid: Auslegung des Gesamtsystems“ VDI Bericht Nr. 1225, 1995
- /26/ B. Kraßer „Elektrische Antriebsaggregate für den Autarken Hybriden“ VDI Bericht Nr. 1225, 1995
- /27/ P. Dietrich „Das ETH Hybrid III Antriebskonzept“ VDI Bericht Nr. 1225, 1995

- /28/ D. Gospodaric „Antriebsstrang- und Gesamtfahrzeugsimulation von Hybrid- und Elektrofahrzeugen“ VDI-Berichte 1704, Tagung Dresden, 24. und 25. Oktober 2002
- /29/ U. Höpfner „Vergleich von Elektrofahrzeugen und Verbrennungsmotorfahrzeugen – Bilanz aus Rügen“ Fachtagung (Elektrofahrzeuge: Technologie-Innovation für den zukünftigen Verkehr) in Berlin 24. und 25. April 1997
- /30/ W Boll „Der Parallel-Hybridantrieb von Mercedes-Benz“ VDI Bericht Nr. 1225, 1995
- /31/ S. Fengchun, C. Yong, Z. Chengning, S. Liqing „Study on Performance of Electric Bus“ EV's 18, Berlin, Germany, 2001
- /32/ T. Allgeier „Motorsteuerung für Erdgasfahrzeuge“ 3. Symposium in Berlin 25. – 26. Oktober 2001
- /33/ K. Brinkmann, W. Köhler „Experiences and a Concept for Future Electric Vehicles“ EV's 18, Berlin, Germany, 2001
- /34/ J. Larminie, A. Dicks „Fuel Cell Systems Explained“ John Wiley & Sons, Ltd – Baffins Lane, Chichester, West Sussex, Po19 1UD, England, 2000
- /35/ B. Cook „An Introduction To Fuel Cells And Hydrogen Technology“ Heliocentris 3652 West 5th Avenue, Vancouver, BC V6R-1S2, Canada, December 2001
- /36/ M. Bürsch „Wasserstofftechnologie und Brennstoffzellen“ BMBF-Förderschwerpunkt, Dezember 1996
- /37/ Internet: www.glossar.de
- /38/ U. Köhler, F. Kruger, J Kümpers, E. Niggemann „Entwicklungsfortschritte bei Blei-, Nickel-Metallhydrid- und Lithium- Ionen-Batterien“ Fachtagung (Elektrofahrzeuge: Technologie-Innovation für den zukünftigen Verkehr) in Berlin 24. und 25. April 1997
- /39/ Association of Canada (BC) „A Comparison of Motor Vehicle Insurance Rates“ Vancouver, Calgary and Toronto, 1999
- /40/ G. Hoogers „Brennstoffzellen – Motoren der Zukunft?“ WILEY-VCH Verlag GmbH, D-69451 Weinheim, 2000
- /41/ R. Choundhury „Well-to-Wheel Analyse des Energieverbrauchs und der Triebhausgas-Emissionen von fortschrittlicher Kraftstoff/Fahrzeug-Systemen“ How Word Fuels Conference, Brüssel, 21. Mai 2002

- /42/ H. Bork, J. Srnik, F. Pfeiffer, E. Negele, R. Hedderich „Modellbildung, Simulation und Analyse eines stufenlosen leistungsverzweigten Traktorgetriebes“ Buch, S. 329:349, 2000
- /43/ Internet: <http://www.claas.de>
- /44/ G. Rill „Simulation von Kraftfahrzeugen“ Vieweg-Verlag, 1994
- /45/ J. Hoffmann „MATLAB & SIMULINK Beispielorientierte Einführung in die Simulation dynamischer Systeme“ Verlag Addison-Wesley-Longman, 1998
- /46/ Handbetrieb „Mechanical Simulation Corporation“ Ann Arbor, MI.1997
- /47/ Handbetrieb „Advanced simulator vehicle“ NREL, USA, Feb.2000
- /48/ SIMPLEV: A Simple electric Vehicle Simulation Program version 1.0, DOE/ID-10293, Idaho Falls, ID, June 1991
- /49/ H. Pandzo, B. Eisenmenger, M. Monsour „Groub 6C. Computer Simulation Car“ Due in 7th septemper 1998
- /50/ Wieler, J. Ritter „Recherche zur PKW-Brennstoffzelle“ Abschlussbericht, 13.06.2002
- /51/ N. Fuß, M. Roszyk „Untersuchungen am Rollenleistungsprüfstand“ Diplomarbeit, HTW Dresden, Oktober 1998
- /52/ „Mobile Air-to-Fuel Ratio Analyzer“ MEXA-1440 AFM, Bulletin: HRE-2123A
- /53/ F. Schäfer, R. Basshysen „Schadstoffreduzierung und Kraftstoffverbrauch von Pkw- Verbrennungsmotor“ Springer-Verlag, Deutschland, 1993
- /54/ „Toyota Hybrid system“ 2000 Press Information, Toyota Motor Corporation, International Public Affairs Division, Toyota City, Japan, 2000
- /55/ „Technologische Prozesse der Pflanzenproduktion“ Autorenkollektiv, Verlag: VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin, 1984
- /56/ HOLMER Maschinenbau GMBH „Technische Daten und Beschreibung“ Stand:10.2000
- /57/ K.B. Wipke, M.R. Cuddy, S.D. Burch „ADVISOR 2.1: A User-Friendly Advanced Powertrain Simulation Using a Combined Backward/Forward Approach“ NREL/JA-540-26839, September 1999

- /58/ R. Fellini, N. Michelena, P. Papalambros, M. Sasena „Optimal Design of Automotive Hybrid Powertrain Systems“ University of Michigan, Ann Arbor, Michigan 48109, US
- /59/ R. D. Senger “Validation of ADVISOR as a Simulation Tool for a Series Hybrid Electric Vehicle Using the Virginia Tech FutureCar Lumina“ M. Sc., Mechanical Engineering, Blacksburg, Virginia, September 18, 1997
- /60/ J. Murrel „Emission Simulations“ Midwest Research Institute, National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy , 1996
- /61/ Clean Air Act Amendments of 1990 - Conference Report to Accompany S.1630, 101st Congress, 2nd Session, House of Representatives, Report 101- 952, U.S. Government Printing, Washington, DC, 1990
- /62/ U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air and Radiation, Office of Mobile Sources „ Response to Comments for the Final Regulations for Revisions to the Federal Test Procedure for Emissions from Motor Vehicles “ August 15, 1996
- /63/ „Alternative Fuels Emissions, Economics, and Performance “Book Published by Society of Automotive Engineers, 400 Commonwealth Drive, Inc. 1995
- /64/ Internet: <http://www.epa.gov>
- /65/ U.S. Environmental Protection Agency „FUEL ECONOMY GUIDE“ model year 2003
- /66/ „Global Diesel Emission Trends“ Automotive Engineering International Journal , pp 114-118, June, 1998
- /67/ William M. Anderson „An Electric Van with Extended Range” Paper, 900181 presented at the international Congress and Exposition, Detroit MI February
- /68/ Internet: <http://www.dieselnet.com>
- /69/ Metz N. „Entwicklung der Luftqualität, Abgasemissionen und der Gesetzgebung inklusive der Testzyklen in Europa“ 2. Dresdener Motorenkolloquium, Deutschland, 1997
- /70/ Velji A. „Abgasrückführung aus neuer Sicht“ 4. Dresdener Motorenkolloquium, Dresden, Deutschland, 2001
- /71/ Yasuhiro Daisho „Evaluation of the Performance of a Dual Fuel Engine“ International Conference and Exhibition for Natural gas Vehicles, Cologne, Germany, 26-28 May 1998

- /72/ „Verkehrstaschenbuch 2003/2004“ Aral Aktiengesellschaft, 46. Auflage 2003
- /73/ Hatazawa S. „The Introduction of Natural Gas garbage Trucks for Reduction Air Pollution in Yokohama City“ International Conference and Exhibition for Natural gas Vehicles, Cologne, Germany, 26-28 May 1998
- /74/ Notification of the Ministry of Science, Technology and Environment No.3, B.E.2540 dated June 23(1997)
- /75/ Internet: <http://www.fueleconomy.gov>
- /76/ Anleitungsbuch „Ford Transit 100“ 2000
- /77/ M. Koschowitz, J. Schollmeyer, T. Theisen „Operating Natural Gas Vehicles with Gases of Different Composition“ International conference and exhibition for natural gas vehicles, Cologne, Germany, 26-28 May 1998
- /78/ „Abgasemissionen und Kraftstoffverbrauch-Kennfelder“ FIAT-INDUSTRIE, Italien, 2001
- /79/ Dodd, Z. Holubecki „Umrechnung der Lichtschwärzungszahl in die Massenkonzentration des Rußes im Abgas“ MIRA-Bericht Nr. 1965/10, Nuneaton, 1965

ANLAGE A1
Mathematische Modelle

A1 Mathematische Modelle

A1.1 Das thermodynamische Modell des Verbrennungsmotors

Das thermische Modell des Verbrennungsmotors berücksichtigt vier Komponenten: den Zylinder, den Motorblock, die Nebenaggregate und die Motorhaube des Fahrzeuges. Der Kühlmittelkreislauf ist ein eigenständigen Modell, das die Kühlflüssigkeit mit seinem Wärmeübergangswiderstand berücksichtigt. Die Wärme wird vom Verbrennungsmotor generiert und an den Motorblock abgeführt. Die Kühlflüssigkeit überträgt durch erzwungene Konvektion und Strahlung (siehe Abb. A1) die Wärme an die Umgebung /57/. Die Berechnungen für die einzelnen Wärmeübertragungsschritte sind detailliert weiter unten ausgeführt.

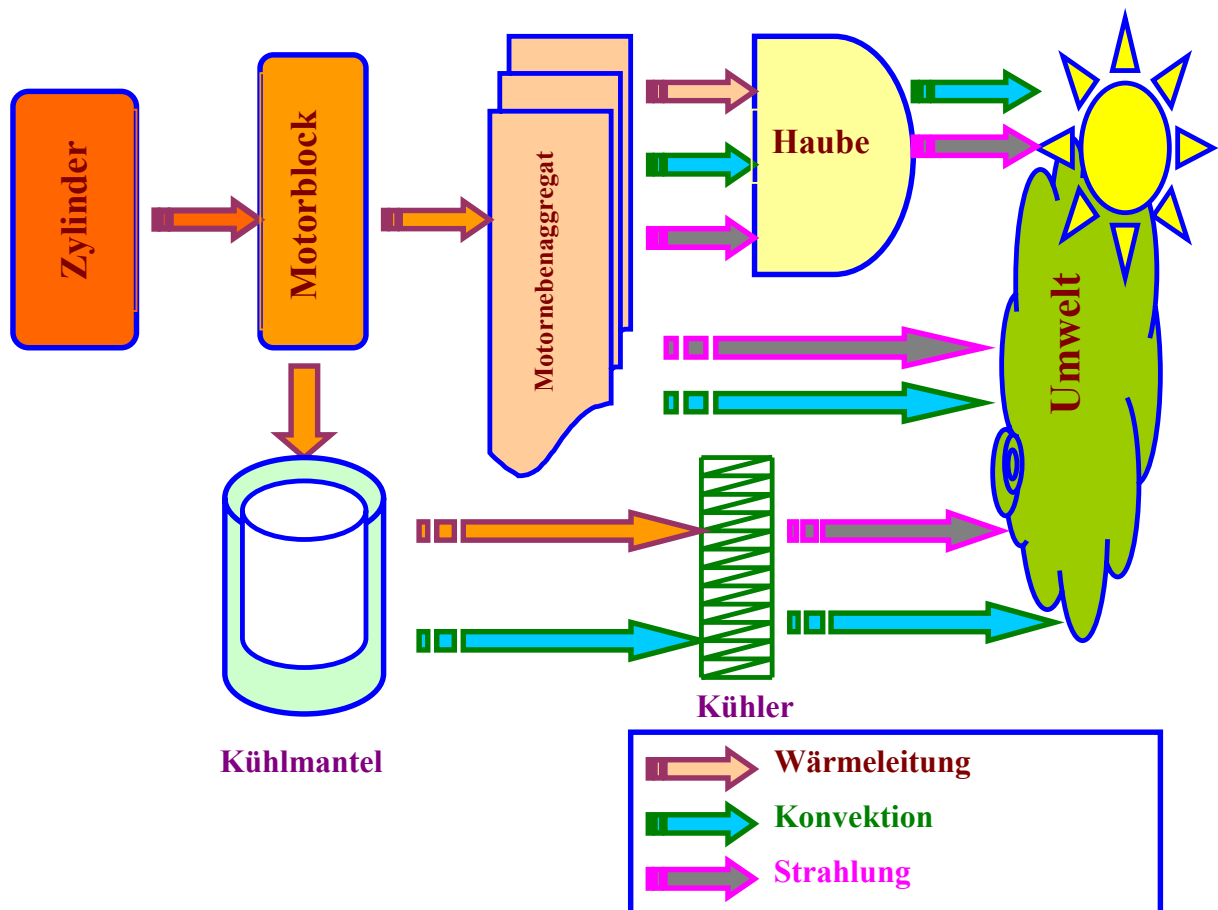


Abb. A1: Schematisches Thermomodell des Verbrennungsmotors

A1.1.1 Thermisches Gleichgewicht des Zylinders /57/

Das thermische Gleichgewicht wird berechnet, indem die zugeführte Energie abzüglich der abgegebenen Leistung inklusive des Abgasmassenstroms berechnet wird.

$$\begin{aligned} Q_k &= Q_{Kf} - P_e - Q_{Abgas} \\ &= \dot{m}_{Kf} * H_u - \dot{M}_D * \varpi - \dot{m}_{abgas} * c_{p-Abgas} * (T_{Abgas} - T_U) \end{aligned} \quad [A1.1]$$

Die Wärme wird über den Zylinder zum Motorblock durch Wärmeleitung übertragen. Die Wärmeleitfähigkeit [W/mK] wird in der Motoreingabedatei angegeben, ein typischer Wert ist 500 [W/mK] /47/.

A1.1.2 Thermisches Gleichgewicht des Motorblocks

Überblick zur Berechnung der Eingangswärme (Q_Z) vom Zylinder zum Motorblock durch Wärmeleitung /57/:

$$Q_Z = f_Z * (T_z - T_B) \quad [A1.2]$$

wobei: $f_Z = \lambda * A/d$ (W/K)

$$Q_{B1} = f_B * (T_B - T_N) \quad [A1.3]$$

Von der übrigen Eingangswärme im Motorblock ($Q_Z - Q_{B1}$) wird angenommen, dass sie vom Kühlmittel absorbiert wird, wenn der Kühlmittelfluss eintritt. Das Kühlmittel wird über einen Thermostat gesteuert, wenn die Motorblocktemperatur den Einschaltpunkt von 90 °C übersteigt.

$$Q_{Kühl} = \begin{cases} Q_Z - Q_{B1} & T_i > f_{B_tstat} (90^\circ\text{C}) \\ 0 & T_i \leq f_{B_tstat} (90^\circ\text{C}) \end{cases} \quad [A1.4]$$

Wenn der Thermostat anspricht, wird ein Teil der Kühlmittelwärme durch Konvektion, Strahlung und Leitung an den Kühler abgegeben. Dieser Betrag wird auf Grundlage von einem angenommenen Kühlerwirkungsgrad von ca. $\eta_z = 0,7$ und einem gegebenen Massestrom der Luft von ca. $\dot{m}_{Luft} = 1$ kg/s berechnet /57/.

$$\dot{Q}_{B2} = \eta_Z * \dot{m}_{Luft} * c_{p-Luft} * (T_{Kühl} - T_U) \quad [A1.5]$$

Der Massestrom der Kühlmittelflüssigkeit am Ausgang des Kühlers wird berechnet, indem die Eingangswärme zum Kühler ($\dot{Q}_{Kühl}$) abzüglich der verbleibenden Restwärme (\dot{Q}_k) addiert wird. Dadurch kann die Luftstromwärme (\dot{Q}_{B2}) für das Kreislaufsystem des Kühlmittels berechnet werden.

$$\dot{Q}_k = \dot{Q}_{Kühl} - \dot{Q}_{B2} \quad [A1.6]$$

A1.1.3 Thermisches Gleichgewicht der Motornebenaggregate

Durch die Wärmestrahlung wird von der Motorausenseite Energie an die Motorhaube abgegeben /57/:

$$\dot{Q}_{NHS} = \eta_{NH} * \sigma * A (T_N^4 - T_H^4) \quad [A1.7]$$

Wobei : $\eta_{NH} = 80 \%$

Der gewählte Wärmeübertragungskoeffizient beschreibt den Wärmeübergang durch natürliche und erzwungene Konvektion der beiden korrespondierenden Bauteile:

$$\dot{Q}_{NHK} = h_{Luft} * A_h (T_N - T_H) \quad [A1.8]$$

Ein Teil der Wärme (\dot{Q}_{B2}) wird aus den Motornebenaggregaten an der Haube durch Wärmeleitung transferiert. Diese Leitfähigkeit (z. B. 10 W/mK) wird in die Motoreingabedatei gegeben /57/.

$$\dot{Q}_{NHL} = f_{cH} * (T_N - T_H) \quad [A1.9]$$

Wobei: $f_{cH} = \lambda * A_h / \delta \dots\dots(W/K)$

Die Wärme wird von der Außenseite direkt zur Umgebungsluft durch Strahlung adsorbiert. Es wurde angenommen, dass dieser Oberflächenbereich 50 % der äußeren Oberfläche ist /58/.

$$Q_{NUS} = \eta_{NU} * \sigma * A(T_N^4 - T_U^4) \quad [A1.10]$$

Durch die natürliche und erzwungene Konvektion mit der Umgebungsluft wird Wärme an die Umgebungsluft abgeführt. Hierzu wird eine verfügbare äußere Oberfläche von 50 % angenommen.

$$Q_{NUK} = h_{Luft} * A(T_N - T_U) \quad [A1.11]$$

Die Berechnung der Wärmestrahlung der Haube an die Umgebung erfolgt nach:

$$Q_{HUS} = \eta_{HU} * \sigma * A_h(T_H^4 - T_U^4) \quad [A1.12]$$

Die ausgestrahlte Wärme von der Motorhaube zur Umgebungsluft durch natürliche und erzwungene Konvektion wird gegeben mit:

$$Q_{HUK} = h_{Luft} * A_h(T_H - T_U) \quad [A1.13]$$

A1.1.4 Temperaturgleichungen

- **Temperatur des Kolbens und des Zylinders**

Es wird eine gesamte Masse für den Motorblock und den Zylinder mit 1,8 kg/kW angenommen /59/. Weiterhin gilt die Annahme, dass von diesen beiden Massen lediglich 20 % in die Berechnung eingehen.

$$T_Z = \int_0^t \frac{Q_k - Q_Z}{m_Z * c_{P-Kf}} dt \quad [A1.14]$$

- **Temperatur des Motorblocks**

Es wurde angenommen, dass 80 % der Gesamtmasse des Motors in die Berechnung einfließt.

$$T_B = \int_0^t \frac{Q_Z - Q_{Kühl} - Q_{Bl}}{m_B * c_{P-Kf}} dt \quad [A1.15]$$

- **Temperatur des Motornebenaggregates**

Es wurde eine Masse des Nebenaggregates im Simulationsprogramm definiert. Als Definition wurde hierzu eine Masse von 0,8 kg je kW Motorleistung angenommen.

$$T_N = \int_0^t \frac{Q_{B1} - Q_{NHK} - Q_{NHL} - Q_{NUK} - Q_{NHS} - Q_{NUS}}{m_N * c_{P-Kf}} dt \quad [A1.16]$$

- **Temperatur der Motorhaube**

Es wurde angenommen, dass die Masse der Motorhaube 10 % der Masse des Motornebenaggregates ist.

$$T_H = \int_0^t \frac{Q_{NHK} + Q_{NHS} + Q_{NHL} - Q_{HUK} - Q_{HUS}}{m_H * c_{P-H}} dt \quad [A1.17]$$

Das Simulationsprogramm benutzt die berechnete Temperatur, um den Faktor der Temperaturkorrektur zu berechnen.

$$E_{Abg} = E_{Abg_Aus} * T_K \quad [A1.18]$$

$$T_N = (90 - T_{K\u00fch1}) / (76) \quad [A1.19]$$

$$T_{K\u00fch1} = T_B \quad [A1.20]$$

Korrekturfaktor f\u00fcr HC-Emission /60/

$$T_K = 1 + 7.4 * (T_N)^{3.072} \quad [A1.21]$$

Korrekturfaktor f\u00fcr CO-Emission

$$T_K = 1 + 9.4 * (T_N)^{3.21} \quad [A1.22]$$

Korrekturfaktor f\u00fcr NO_x-Emission

$$T_K = 1 + 0.6 * (T_N)^{7.3} \quad [A1.23]$$

Korrekturfaktor f\u00fcr PM-Emission

$$T_K = 1 + 7.4 * (T_N)^{3.072} \quad [A1.24]$$

A1.2 Die Gleichungen des Fahrzeug-Modells

Gesamt Fahrwiderstandskraft

$$F_w = F_R + F_L + F_S + F_B \quad [A1.25]$$

Rollwiderstandskraft

$$F_R = m_{Fz} * g * (c_1 v + c_2 v^2) \cos(\alpha) \quad [A1.26]$$

Luftwiderstandskraft

$$F_L = 0.5 * \rho_L * c_w * A_{Fz} * v^2 \quad [A1.27]$$

Steigungswiderstandskraft

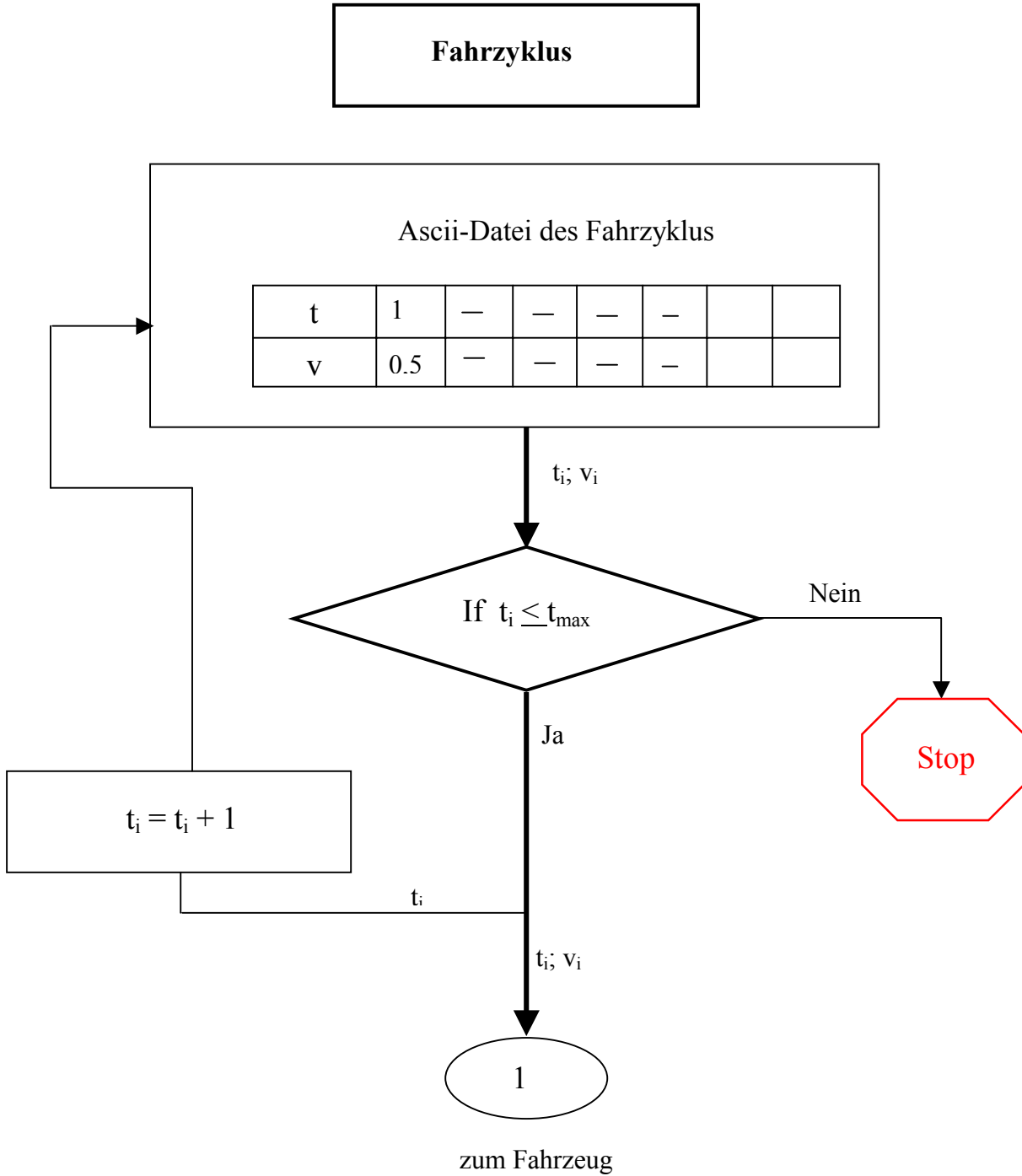
$$F_S = m_{Fz} * g * \sin(\alpha) \quad [A1.28]$$

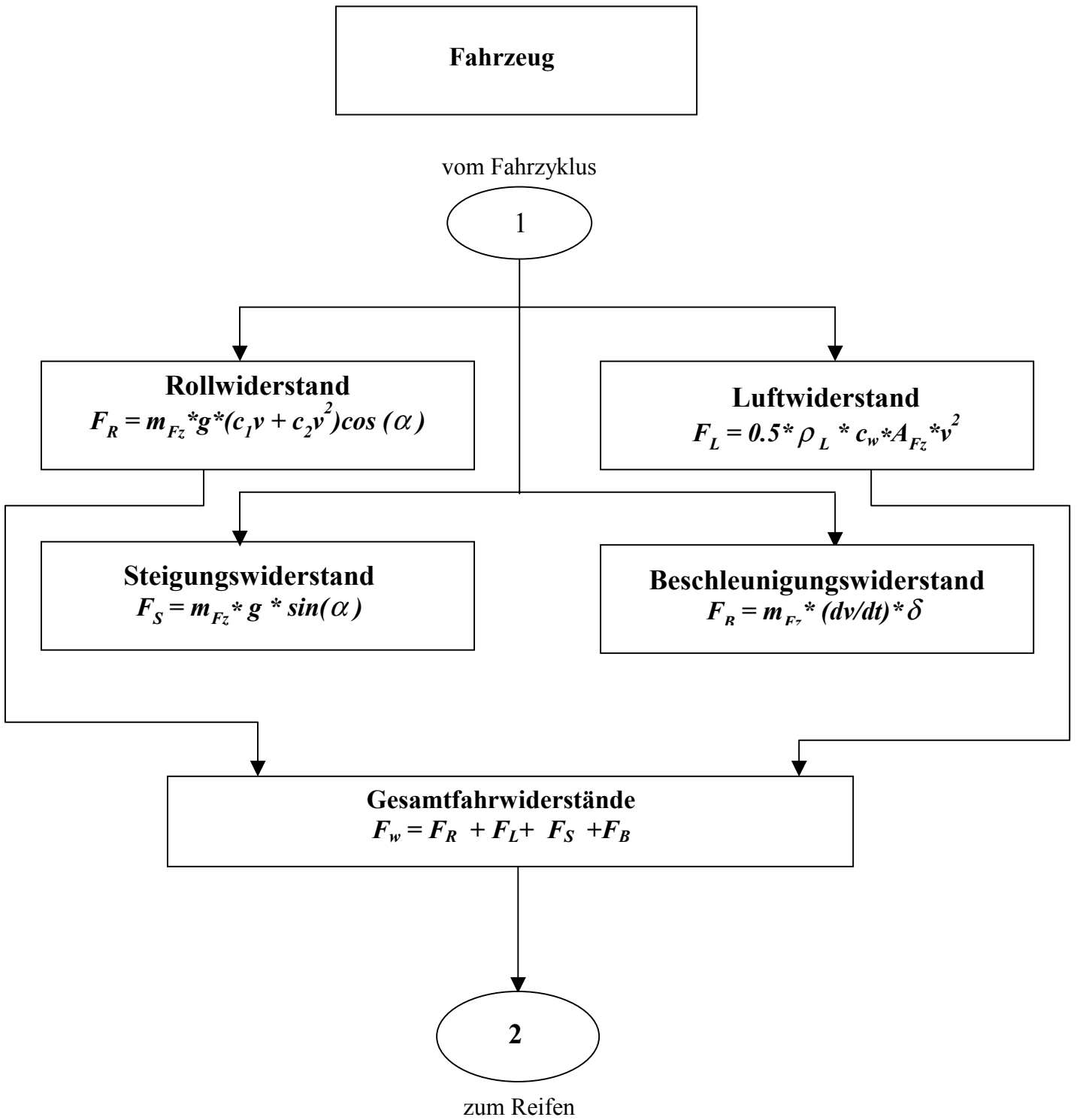
Beschleunigungswiderstandskraft

$$F_B = m_{Fz} * (dv/dt) * \delta \quad [A1.29]$$

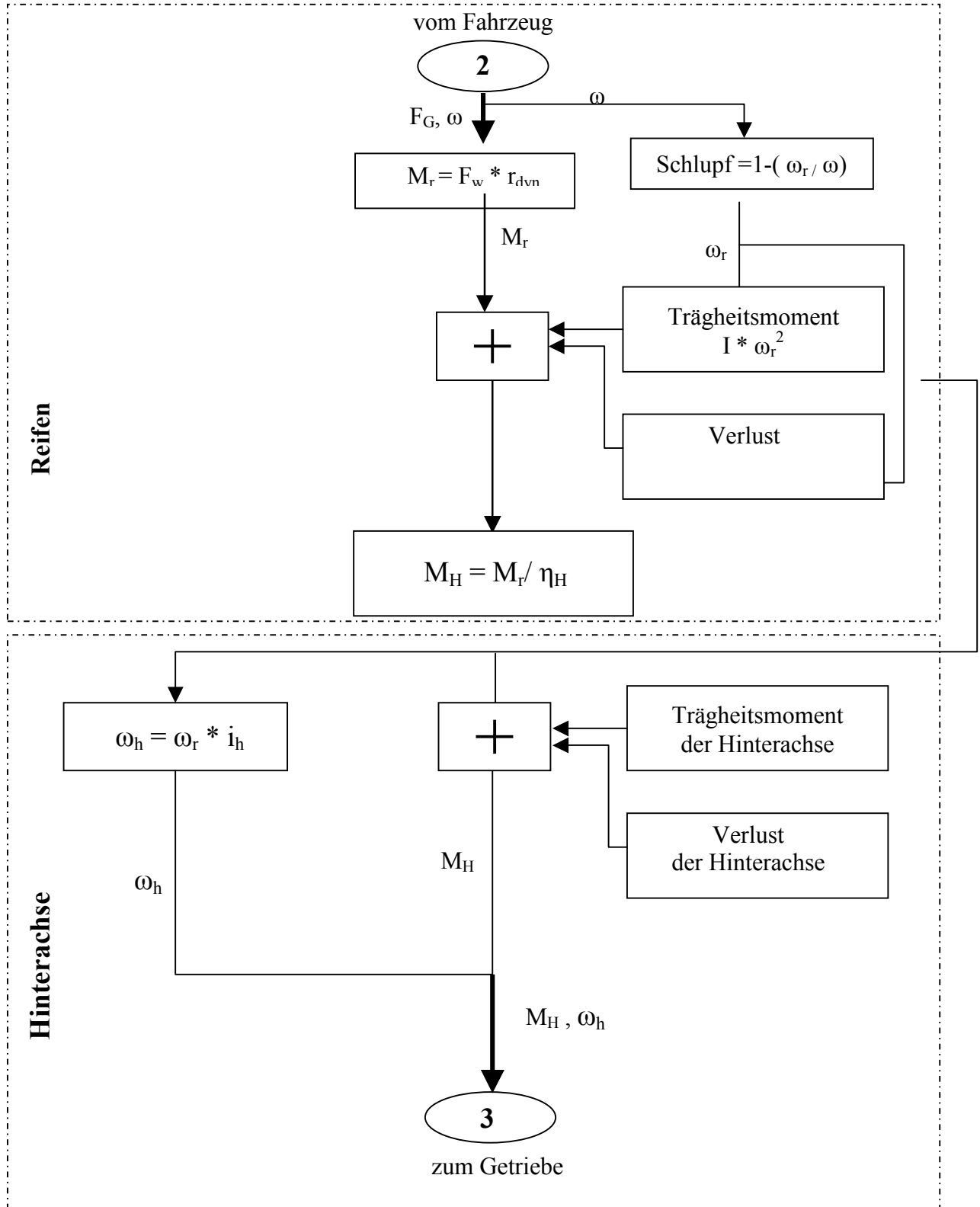
Mit dem Massenzuschlag δ werden die Massenträgheitsmomente der rotierenden Massen berücksichtigt.

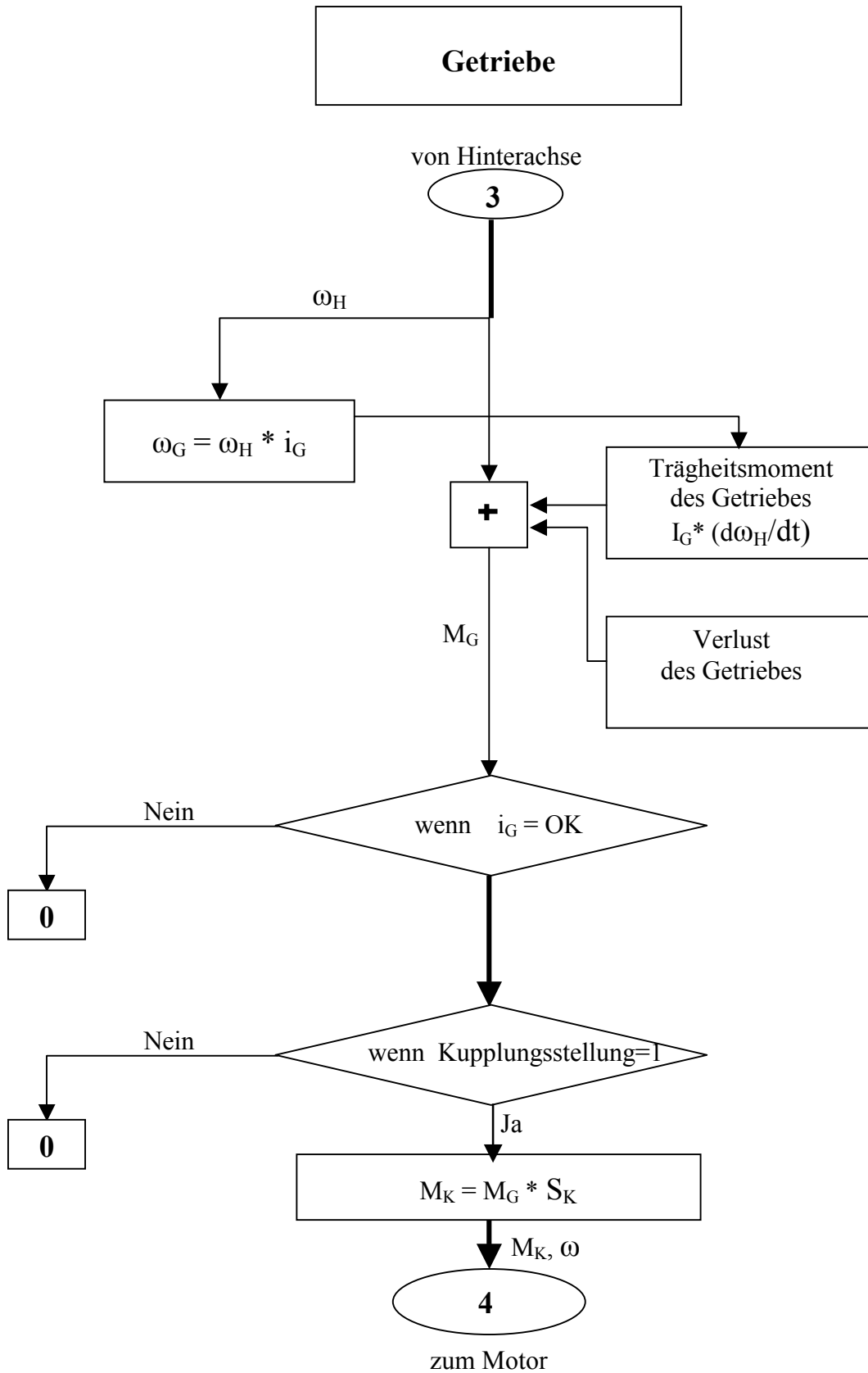
A1.3 Algorithmus des Simulationsprogramms

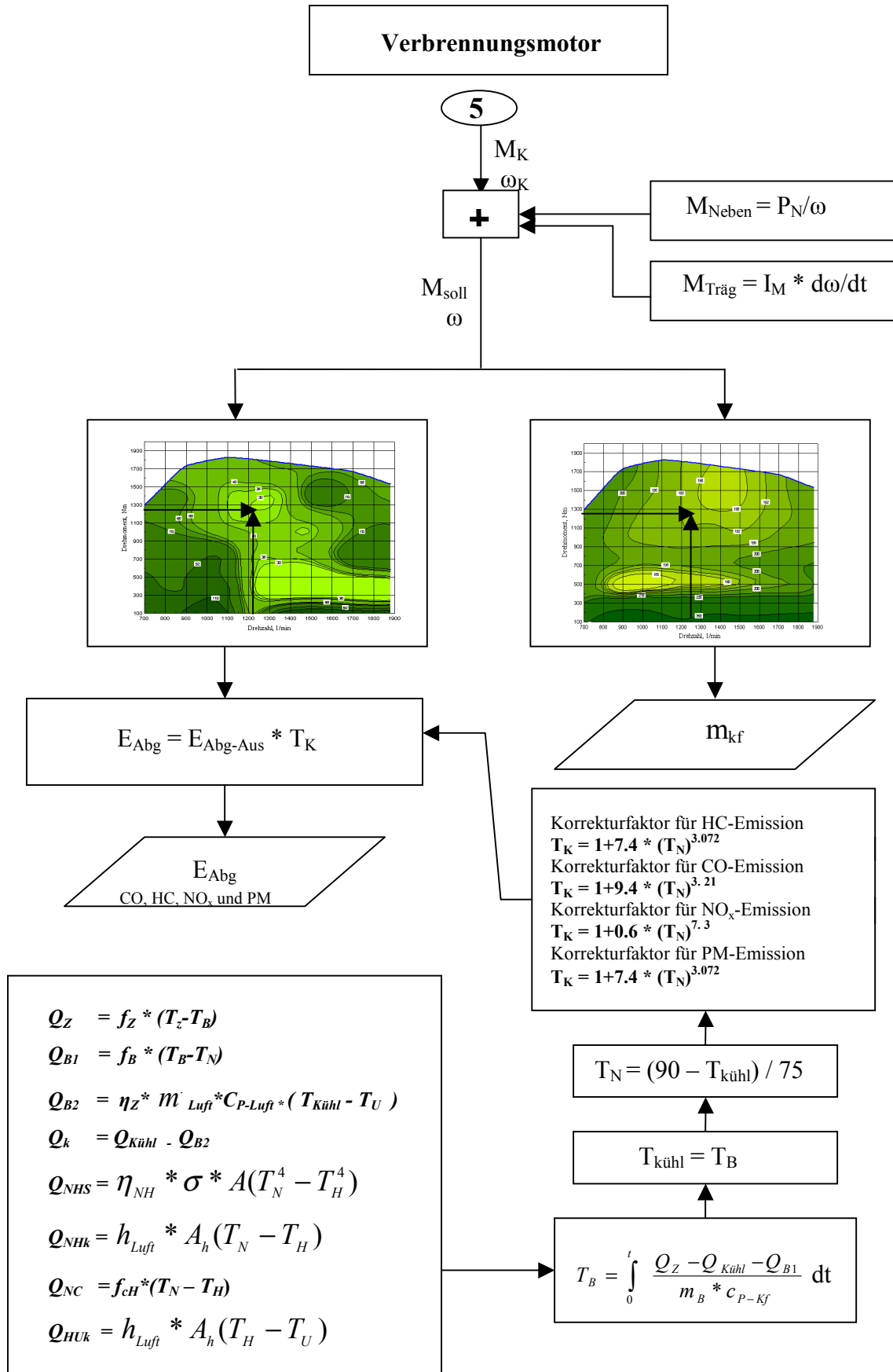




Reifen und Hinterachse







ANLAGE A2
Abgasemissions-Forderungen

A2 Abgasemissions-Forderungen

A2.1 Einführung

Dieses Kapitel behandelt die geltenden Gesetze und Bestimmungen der USA, der Europäischen Union und die landesspezifischen Gesetze (inkl. Japan) zur Abgasemission.

Zur Aufstellung von Grenzwerten und Richtlinien zur Bestimmung der Abgasemission für Fahrzeuge mit herkömmlichen Kraftstoffen und Alternativkraftstoffen (Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Stickoxide) wurde die Umweltschutzagentur „Environmental Protection Agency“ (EPA) gegründet, diese legt auch die Kraftstoffqualität fest. Der Clean Air Act (CAA) bevollmächtigte auch die EPA dazu, Bestimmungen im „National Ambient Air Quality Standards“ (NAAQS) einzuführen /61/. Hier werden die Maximalkonzentrationen mit einem adäquaten Sicherheitszuschlag bestimmter Schadstoffe in der Umgebungsluft festgeschrieben, damit die öffentliche Gesundheit ausreichend geschützt ist. Hier werden die drei ausgewählten zu prüfenden Schadstoffe im NAAQS festgeschrieben. Dieses sind die Abgasemissionen der ottomotorischen Fahrzeuge Kohlenmonoxide (CO), Stickoxide (NO_x) und nichtmethanhaltige Kohlenwasserstoffe (NMHC). Zusätzlich sind beim Dieselmotor die Abgasbestandteile Partikel (PM) zu prüfen. Die Konzentration bestimmter Schadstoffe in der Umgebungsluft hat in der Vergangenheit abgenommen (z. B. Schwefeldioxid und Bleiverbindungen), die durch die Substitution der Bleiverbindungen mit Additiven im Wesentlichen zu begründen ist /62/.

A2.2 Bundesabgasemissionsstandard (USA)

1998 wurde definiert, dass Lastkraftwagen (Benzin oder Diesel) nicht mehr als 5,36 g/kWh emittieren dürfen. Personenwagen und Lastwagen (bis zu 1700 kg) sind in den Emissionsbestandteilen NO_x, CO und nichtmethanhaltige Kohlenwasserstoffen (NMHC) gleichgestellt, dies gilt bis zu einer Nutzungsdauer bzw. Fahrleistung von 5 Jahren oder 80.000 km. Für eine Nutzungsdauer von 10 Jahren oder 160.000 km gelten geringere Anforderungen.

Die in der Tabelle A2.1 zusammengefassten Abgasemissionsstandards müssen von 40 % im Modelljahr 1994, 80 % im Modelljahr 1995 und 100 % bei Dieselfahrzeugen aller Fahrzeuge eines Herstellers bis zu 2722 kg Gross Vehicle Weight (GVW) erfüllt werden.

Die Nutzungsdauer für die leichteren Nutzfahrzeuge (1700 kg) ist gleich der von Personenwagen und Lastwagen. Schwere Lastwagen (2722 kg GVWR) müssen 40 % im Modelljahr 1995, 80 % im Modell 1996 und 100 % bei dieselmotorischem Antrieb die Abgasemissionswerte erfüllen. Sowohl bei diesel- als auch ottomotorisch betriebenen Lastwagen über 2.722 kg GVW müssen die Grenzwerte zur Abgasemission eingehalten werden, die in der Tabelle A2.1 dargestellt sind /62/.

Tabelle A2.1: Grenzwerte der Abgasemission in den USA /63/

Dauer	NMHC (g/km)	CO (g/km)	NO_x (g/km)	PM (g/km)
Leicht- Lkw (< 1.700 kg Gewicht)				
5 Jahre oder 80.000 km	0,16	2,11	0,25	-
10 Jahre oder 160.000 km	0,19	2,6	0,37	-
Leicht- Lkw (1.700-2.609 kg Gewicht)				
5 Jahre oder 80.000 km	0,20	2,7	0,43	-
10 Jahre oder 160.000 km	0,25	3,4	0,60	0,05
Leicht- Lkw (< 2.722 kg GVWR)				
5 Jahre oder 80.000 km	-	-	-	0,05
10 Jahre oder 160.000 km	-	-	-	0,06
Lkw (1700-2.609 kg Gewicht – Benzin oder Diesel)				
5 Jahre oder 80.000 km	0,20	2,73	0,43	-
10 Jahre oder 160.000 km	0,29	3,98	0,61	0,06
Lkw (> 2.609 kg)				
5 Jahre oder 80.000 km	0,24	3,1	0,68	-
Lkw (> 2.609 kg GVWR - Benzin oder Diesel)				
10 Jahre oder 160.000 km	0,78	1,057	0,124	-

A2.3 USA: Bundesstaatliche und Kalifornische Gesetzgebung

Viele Bundesstaaten haben ihre eigenen spezifischen Gesetze erlassen, die die Verwendung von alternativen Fahrzeugen (Antrieben) berücksichtigen. In den meisten Fällen sind die bundesstaatlichen Gesetze darauf gerichtet, die Luftqualität zu verbessern und/oder eine sparsame Energiepolitik einzuführen. Kalifornien nimmt hierbei eine herausragende Position ein. Die hier existierenden klimatischen Bedingungen würden zu Luftqualitätsproblemen führen, wenn die seit langem angewandten Programme zur Verminderung von Luftschadstoffen nicht frühzeitig beschlossen worden wären /64/.

Die Zertifizierung von nachgerüsteten Systemen zum alternativen Kraftstoffeinsatz, die im „California Air Resources Board“ (CARB) festgeschrieben worden sind, haben den legalen Einsatz von „Compressed Natural Gas“ (CNG) und „Liquified Petrol Gas“ (LPG) im Fahrzeug ermöglicht. Das EPA kann darauf bestehen, dass die nicht von CARB genehmigten Systeme von nachgerüsteten Fahrzeugen wieder in den Originalzustand versetzt werden. Das CARB hat neue Emissionsgrenzwerte festgelegt /65/. Sie erfordern im Jahre 2000, dass ca. 10 % oder 200.000 der neuen am Markt verkauften Fahrzeuge alternative Fahrzeuge sind. Generell müssen alle im Staat verkauften neuen Autos noch weniger HC, CO und NO_x nach dem Jahr 2000 emittieren. Der CARB - Standard verlangt, dass 90 Tankstellen in Südkalifornien Alternativkraftstoffe anbieten müssen. Diese restriktive Gesetzgebung des CARB umfasst auch die Forderung, dass 23 % aller neuen Aufträge von 1998 elektrische Fahrzeuge sein sollten oder die Abgasemission eines „Zero Emission Vehicles“ (ZEV) erfüllen müssen, Tabelle A2.2.

Tabelle A2. 2: Schadstoffgrenzwerte für abgasarme Fahrzeuge/66/

Schadstoffanteil	TLEV	LEV	ULEV
NMHC (g/km)	0,125	0,075	0,04
CO (g/km)	3,4	3,4	1,7
NO _x (g/km)	0,2	0,2	0,2
HC (g/km)	-	0,002	0,002
Formaldehyd (g/km)	0,015	0,015	0,008

Die im Bundesstaat geltenden lokalen Gesetze und Bestimmungen beeinflussen die Verwendung von Alternativkraftstoffen. Die Gesetze sind im Allgemeinen darauf ausgerichtet, die Luftverschmutzung zu reduzieren.

Zur Erfüllung der Luftgesetzgebung können entweder Fahrzeuge mit geringen Emissionswerten oder Fahrzeuge mit der Verwendung von saubereren Kraftstoffen in Betracht gezogen werden. Diese alternativen Kraftstoffe können aus Benzin oder Diesel hergestellt werden, dies ist jedoch energetisch ungünstig. Hierzu wurden Energiegesetze definiert, die im allgemeinen Interesse sind und die die Verwendung von Alternativen vorsehen, die nicht aus Benzin oder Diesel hervorgehen. Die folgenden Abgasemissionsdaten (Tabelle A2.3) gelten für Personenwagen und im Bundesstaat Kalifornien für leichte Lastwagen.

Tabelle A2.3: Die Abgasemission für Bundesgrenzwerte & Kaliforniengrenzwerte

	HC (g/km)	CO (g/km)	NO_x (g/km)	Gesamt (g/km)
Bundesgrenzwerte (Van)	0,410	3,40	1,00	4,81
Kalifornien Grenzwerte (Van)	0,560	9,00	1,00	10,56
<i>Elektrische Vans</i>				
Benzen	0,037	0,00	0,037	0,074
LPG	0,038	0,077	0,017	0,132
CNG	0,090	0,367	0,029	0,486

Hieraus wird ersichtlich, dass die APU als eine "Brücke" zu einem noch emissionsärmeren Fahrzeug mit nahe null Abgasemission zu sehen ist. Aus dieser Sicht ist es sinnvoll, elektrische Antriebssysteme im Fahrzeug einzusetzen. Ebenso können die Abgasemissionen aus dem LPG-betriebenen Fahrzeug herangezogen werden. Hier sind die Gesamtemissionen fast 40 mal geringer als es der Bundesstandard für Personenwagen vorgibt und 80 mal geringer als die gegenwärtige in Kalifornien geltende Norm für Lkw /67/.

A2.4 Abgasemissionsgrenzwerte in der Europäischen Union (EU)

Die europäische Abgasgesetzgebung hat mit Verabschiedung der Grenzwertstufen bis einschließlich EURO 4 für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge sowie EURO 5 für

Nutzfahrzeuge entscheidende Fortschritte hinsichtlich der Abgasgrenzwerte erreicht. Für Pkw mit Ottomotor ist eine über EURO 4 hinausgehende Grenzwertstufe aller Voraussicht nach nicht erforderlich /68/. Die Notwendigkeit einer Fortschreibung der Abgasgrenzwerte besteht in erster Linie für Dieselmotoren. Die vorgeschlagenen Grenzwerte für Partikel werden in Tabelle A2.4 dargestellt. Beide Vorschläge richteten ihre Aufmerksamkeit auf die Schwebstaubkonzentration in der Luft.

Tabelle A2.4: Vorgeschlagene Grenzwerte der EU für die Partikel /68/

	Durchschnittlicher Zeitraum	Grenzwert ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Implementationsdaten
PM₁₀	24h-Wert	50 (25 *Jahr)	2005
PM₁₀	Jahresmittelwert	30	2005
PM₁₀	24h-Wert	50 (7 *Jahr)	2010
PM₁₀	Jahresmittelwert	20	2010

Die EU hat eine weitere Senkung für bodennahes Ozon vorgesehen. Die Weltgesundheitsorganisation hat eine Richtlinie für Europa vorgeschlagen, dass bei einer Belastung von $< 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,06 ppm) eine ungünstige Beeinflussung der menschlichen Gesundheit auftreten könnte, deswegen müsste der Grenzwert unterhalb dieser Ebene liegen. Die Emissionsreduktionsziele stellen dann eine akzeptable Luftqualität in Europa dar, wenn die derzeitigen Abgasemissionen um 60 % bis 70 % bei NO_x , die Schwebstaubkonzentration und die Ozonvorläufer (NO_x und HC) gesenkt werden können. Untersuchungen haben ergeben, dass in eng bebauten Gebieten eine wesentlich höhere Konzentration von Partikeln durch Dieselemissionen vorliegt.

Eine von Ford Motor Co. erstellte Studie untersuchte das komplette Abgasverhalten eines Diesel-Motors im Vergleich zu einem Benzin-Motor. Es wurde hier festgestellt, dass eine um 22 % geringere PM, 27 % THC und 21 % NO_x -Emission zugunsten des Fahrzeugs mit Ottomotoren vorliegt. Tabelle A2.5 zeigt die Grenzwerte der Abgasemission in der EU.

Tabelle A2.5: Grenzwerte der Abgasemission in der europäischen Union /69/

Stufe	Jahr	CO (g/km)	HC (g/km)	HC+NO _x (g/km)	NO _x (g/km)	PM (g/km)
<i>Diesel</i>						
Euro1	1992	2,72	-	0,97	-	0,14
Euro 2 - IDI	1996	1,00	-	0,70	-	0,08
Euro 2 – DI	1999	1,00	-	0,90	-	0,10
Euro 3	2000	0,64	-	0,56	0,50	0,05
Euro 4	2005	0,50	-	0,30	0,25	0,025
<i>Benzin</i>						
Euro 3	2000	2,30	0,20	-	0,15	-
Euro 4	2005	1,00	0,10	-	0,08	-

Mit der derzeitigen Generation der am Markt verfügbaren Motoren können die neuen Grenzwerte für CO, HC, NO_x und Partikel zukünftig nicht eingehalten werden. Neue innermotorische und Abgasnachbehandlungssysteme werden diese Erfordernisse erfüllen. Hier existieren schon zertifizierte Motoren, die diesen neuen Standard erfüllen. Die Grenzwerte werden in Tabelle A2.6 für LEV II dargestellt, die in Klammern angezeigten Werte sind die aktuellen Grenzwerte.

Tabelle A2.6: Vorgeschlagene LEV II Grenzwerte der Abgasemission

Jahr	Art der Schadstoffe				
	CO (g/km)	HC (g/km)	NO _x (g/km)	HC + NO _x (g/km)	PM (g/km)
2000	B ⁽¹⁾ : 3,7 (3,54)	B: 0,32	B: 0,24	B: -(0,8)	B:-
	D ⁽²⁾ : 1,03 (1.6)	D: -	D: 0,80	D: 0,9 (1,13)	D: 0,05 (0,8)
2005	B: 1,6	B: 0,16	B: 0,08	B: 0,0	B: 0,0
	D: 0,8	D: 0,00	D: 0,48	D: 0,48	D: 0,042

⁽¹⁾ B: Benzin⁽²⁾ D: Diesel

Das CARB beabsichtigt einen neuen Emissionsgrenzwert für leichte Fahrzeuge festzuschreiben. Die nächste Abbildung A2.1 stellt diese Grenzwerte für Europa dar (ESC Test) /63/.

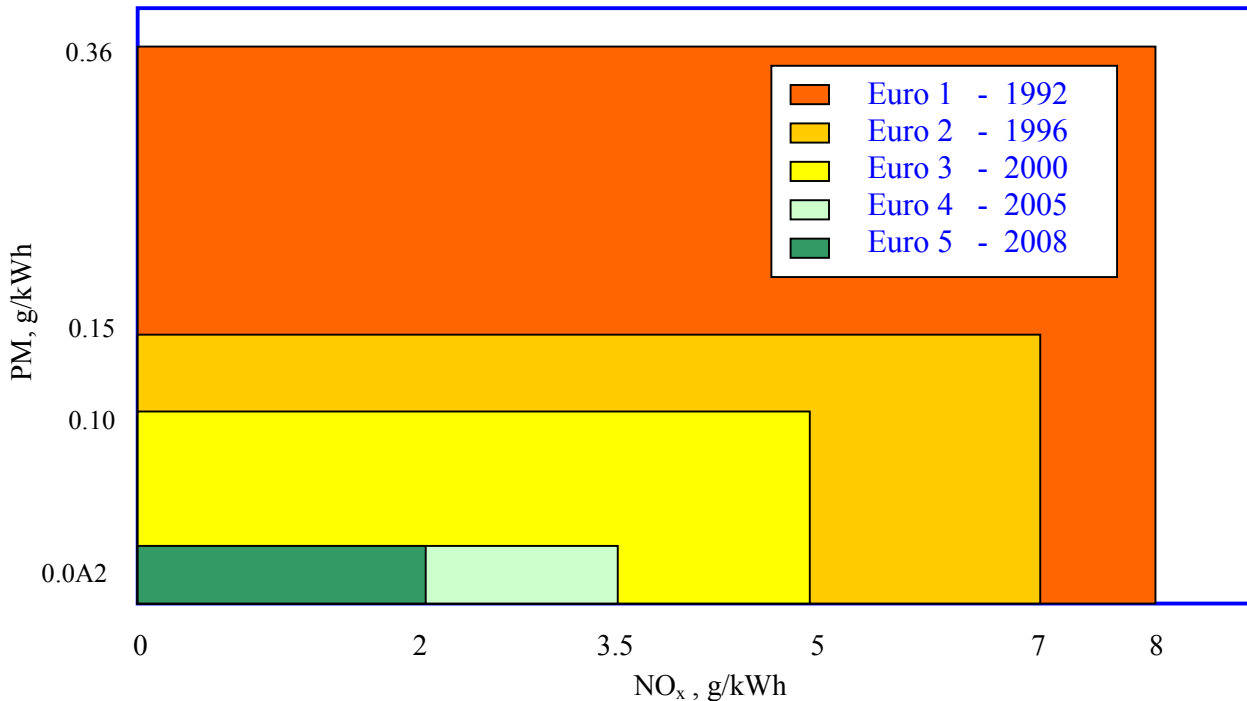


Abb. A2.1: NO_x und Partikel Emissionen in der EU für LKW /70/

Die Tabelle A2.7 zeigt die Abgasemissionsnorm der EU für leichte Nutzfahrzeuge. Das nutzbare Fahrzeugleben (life cycle) für den Zweck von Emissionsbestimmungen ist 80.000 km für die Stufe Euro 3 und 100.000 km für die Euro 4, die 2005 in Kraft tritt /71/. Die Bestimmungen für 2000/2005 schließen mehrere zusätzliche Maßnahmen ein, wie:

- Die EU Mitgliedsstaaten können Steueranreize für eine frühzeitige Einführung von Fahrzeugen mit einer höheren Stufe schaffen, die vor 2005 in Betrieb genommen werden.
- Die Anforderungen an On Board Diagnostik (OBD) werden schrittweise zwischen 2000 und 2005 eingeführt.
- Die Anforderungen für die Kaltstartphase (7°C) erhalten für Benzinfahrzeuge ab 2002 Gesetzeskraft.

Tabelle A2.7: EU Emissionsstandard für leichte Nutzfahrzeuge /72/

Klasse	Norm	Jahr	CO (g/km)	HC (g/km)	HC+NO _x (g/km)	NO _x (g/km)	PM (g/km)
<i>Diesel</i>							
<1305 kg	Euro 1	1994.10	2,72	-	0,97	-	0,14
	Euro 2	1998.01	1,00	-	0,60	-	0,10
	Euro 3	2000.01	0,64	-	0,56	0,50	0,05
	Euro 4	2005.10	0,50	-	0,30	0,25	0,025
1305-1760 kg	Euro 1	1994.10	5,17	-	1,40	-	0,19
	Euro 2	1998.01	1,20	-	1,10	-	0,15
	Euro 3	2000.01	0,80	-	0,7A2	0,65	0,07
	Euro 4	2005.10	0,63	-	0,39	0,33	0,04
<i>Benzin</i>							
< 1305 kg	Euro 1	1994.10	2,72	-	0,97	-	-
	Euro 2	1998.01	2,20	-	0,50	-	-
	Euro 3	2000.01	2,30	0,20	-	0,15	-
	Euro 4	2005.10	1,00	0,10	-	0,08	-
1305-1760 kg	Euro 1	1994.10	5,17	-	1,40	-	-
	Euro 2	1998.01	4,00	-	0,65	-	-
	Euro 3	2000.01	4,17	0,25	-	0,18	-
	Euro 4	2005.10	1,81	0,13	.	0,10	-

Die Emissionen für Diesel- und Erdgasmotoren können sowohl nach dem ETC- als auch ESC - Fahrzyklus getestet werden. Der Hersteller hat hier die Auswahl. Die in Tabelle A2.8 dargestellten Emissionswerte gelten auch für Gasmotoren von schweren Nutzfahrzeugen.

Tabelle A2.8: Emissionsstandard für Diesel und Gasmotoren, (g/kWh)

Tier	Datum & Kategorie	Fahrzyklus	CO	NMHC	CH ₄	NO _x ^(a)	PM ^(b)
Euro III	1999.10, EEVs	ETC	3,0	0,40	0,65	2,0	0,02
	2000.10	ETC	5,45	0,78	1,6	5,0	0,16
							0,21 ^(c)
Euro IV	2005.10	ETC	4,0	3,5	1,1	3,5	0,03
Euro V	2008.10	ETC	4,0	2,0	1,1	2,0	0,03

a - Nur für erdgasbetriebene Motoren

b - nicht anwendbar für Gasmotoren ab dem Jahre 2000 und 2005

c - nicht anwendbar für Motoren von weniger als 750 cm³ Hubvolumen pro Zylinder und eine max. Motordrehzahl unterhalb 3.000 min⁻¹

Die Tabelle A2.9 zeigt die Bestimmungen der Abgasgesetzgebung für „Low Emission Vehicle“ (LEV) an, die ab dem Modelljahr 2004 in den Markt eingeführt werden. Nach Mai 2003 gilt der Standard von 0,15 g/km NMHC als emissionsrelevante Größe nicht mehr. Der Multiplikator von derzeit 50 für SULEV beträgt dann 2,0 und der Multiplikationsfaktor für die Kaltstartphase für CO 10,0.

Tabelle A2.9: Vorgeschlagener LEV II Emissionsstandard /62/

Abgasemission des Fahrzeugs	Bezugsbasis (km)	NMOG (g/km)	CO (g/km)	NO_x (g/km)	PM (g/km)
TLEV	80.450	0,08	2,11	0,25	0,025
	193.080	0,01	2,61	0,37	
LEV	80.450	0,05	2,11	0,031	0,006
	193.080	0,06	2,61	0,044	
ULEV	80.450	0,023	1,06	0,031	0,006
	193.080	0,008	1,3	0,044	
SULEV	193.080	0,003	0,62	0,001	0,006

A2.5 Die Grenzwerte der Abgasemission in verschiedenen Ländern

Die Standardemissionen für Fahrzeuge mit Dieselmotoren sind in der Tabelle A2.10 aufgeführt. Die Tabelle A2.10 stellt die Entwicklung der Grenzwerte der Abgasemissionen in Japan vom Jahr 1986 bis zum Jahr 2002 dar.

Tabelle A2.10: Japanische Emissionsstandards für Diesel Fahrzeuge /73/

Fahrzeuggewicht	Jahr	CO (g/km)		HC (g/km)		NO_x (g/km)		PM (g/km)	
		max	mittel	max	mittel	max	mittel	max	mittel
<1265 kg	1986	2,7	2,1	0,62	0,40	0,98	0,70	-	-
	1990	2,7	2,1	0,62	0,40	0,72	0,50	-	-
	1994	2,7	2,1	0,62	0,40	0,72	0,50	0,34	0,20
	1997	2,7	2,1	0,62	0,40	0,55	0,40	0,14	0,08
	2002	-	0,63	-	0,12	-	0,28	-	0,052
> 1265 kg	1986	2,7	2,1	0,62	0,40	1,26	0,90	-	-
	1990	2,7	2,1	0,62	0,40	0,84	0,60	-	-
	1994	2,7	2,1	0,62	0,40	0,84	0,60	0,34	0,20
	1997	2,7	2,1	0,62	0,40	0,55	0,40	0,14	0,08
	2002	-	0,63	-	0,12	-	0,30	-	0,056

Die Schweden haben eine Gesetzgebung für die Regionen Stockholm, Göteborg und Malmö erlassen, die in den besonders emissionsbelasteten Stadtzentren für schwere Nutzfahrzeuge Anwendung findet. Alle Lkw und Busse, die in diesen Bereichen betrieben werden, müssen den Euro 1 Standardemission mindestens erfüllen.

Von 1999 an müssen alle schweren Nutzfahrzeuge dem Euro 2 Standard entsprechen. Eine allgemeine Befreiung ist für Fahrzeuge anwendbar, die älter als acht Jahre sind oder wenn deren Neuanschaffung zu kostspielig ist. Eine Befreiung kann für ältere Fahrzeuge ausgegeben werden, wenn sie mit genehmigten Ausrüstungen nachgerüstet werden. Eine Ausnahme kann für ältere Fahrzeuge erteilt werden, wenn diese mit einem System der Art B ausgerüstet sind. Die 9 oder 10-jährigen Fahrzeuge können sowohl mit dem Typ Art A oder B nachgerüstet werden /74/, wie es in Tabelle A2.11 und A2.12 dargestellt ist.

Tabelle A2.11: Schwedische Anforderungen an die Abgasnachrüstsyste

Schadstoffanteil	Art A	Art B
Partikel	-20%	-80%
Kohlenwasserstoff	-60%	-60%
NO _x	Nicht mehr	Nicht mehr
Schallemission	Nicht mehr	Nicht mehr

Die nächste Tabelle A2.12 stellt die Grenzwerte der Abgasemissionen in Thailand im Jahr 1993 für CO- und HC- Emission dar.

Tabelle A2.12: Emissionsstandard für Fahrzeugmotoren in Thailand (Ottomotor) /75/

Messdatum	Abgase	Grenzwerte	Messgerät	Methode
vor November 1, 1993	CO HC	4.5% 600 ppm	nichtstreuendes Infrarot	Vermessung der Abgase während des Leerlaufs
nach November 1, 1993	CO HC	1.5% 200 ppm		

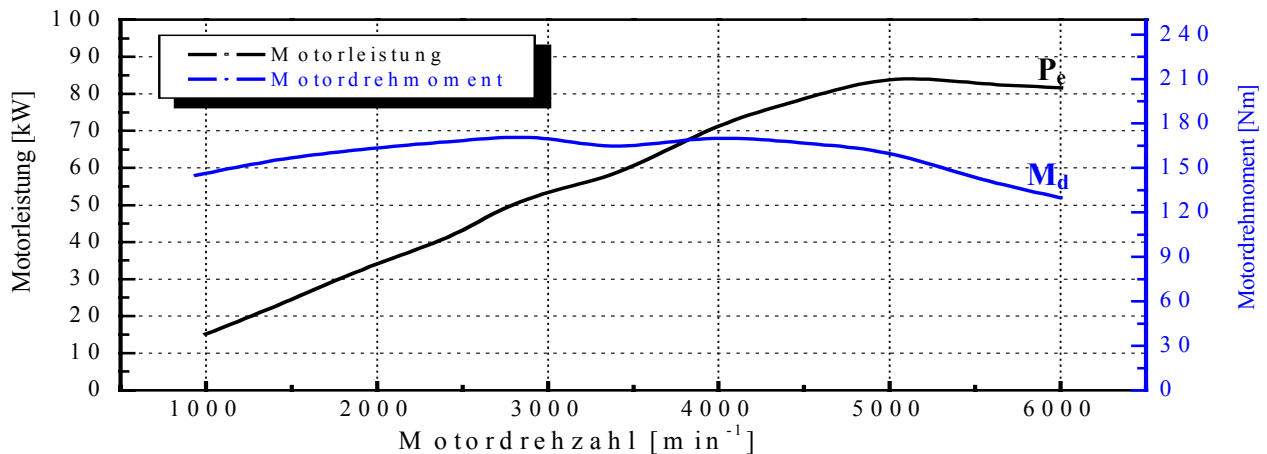
ANLAGE A3
Technische Daten und Ergebnisse
der Untersuchungen

A3 Technische Daten und Ergebnisse der Untersuchungen

Tabelle A3.1: Technische Spezifikationen des Messfahrzeuges „Ford Transit“ und Eingabewerte /76/

Parameter	Wert	Parameter	Wert
Achsstand, m	3,57	Verbrennungsmotortyp	2.0-I-i-DOHC
r_{dyn} , m	0,313	Zylinderzahl	4 in Reihe
Getriebeübersetzung, i_g -I	3,89	Leistung, kW @ min^{-1}	85 @ 5200
Getriebeübersetzung, i_g -II	2,08	Drehmoment, Nm @ min^{-1}	170 @ 2700
Getriebeübersetzung, i_g -III	1,34	Hubvolumen, l	1,998
Getriebeübersetzung, i_g -IV	1,0	Leerlaufdrehzahl, min^{-1}	850 ± 50
Getriebeübersetzung, i_g -V	0,80	Verbrennungsverfahren	Multipoint-Einspritzung
Übersetzung der Hinterachse	4,56	Zündfolge	1-3-4-2
Oberfläche, m^2	3,71	Kühlungsmittel	Wasser
Luftwiderstandsbeiwert (c_w), -	0,35	Zündsystem	Elektronisch
Zulässiges Gesamtgewicht, kg	2550	Ölfilter	EFL 106
Leergewicht, kg	1773		
Zuladung, kg	300	Kraftstoff	Superbenzin Bleifrei
Rollwiderstandsbeiwert f_R	0,016		
Leistung der Nebenaggregate, W	700		

- **Vollastkennlinien des Verbrennungsmotors 2.0-I-DOHC**

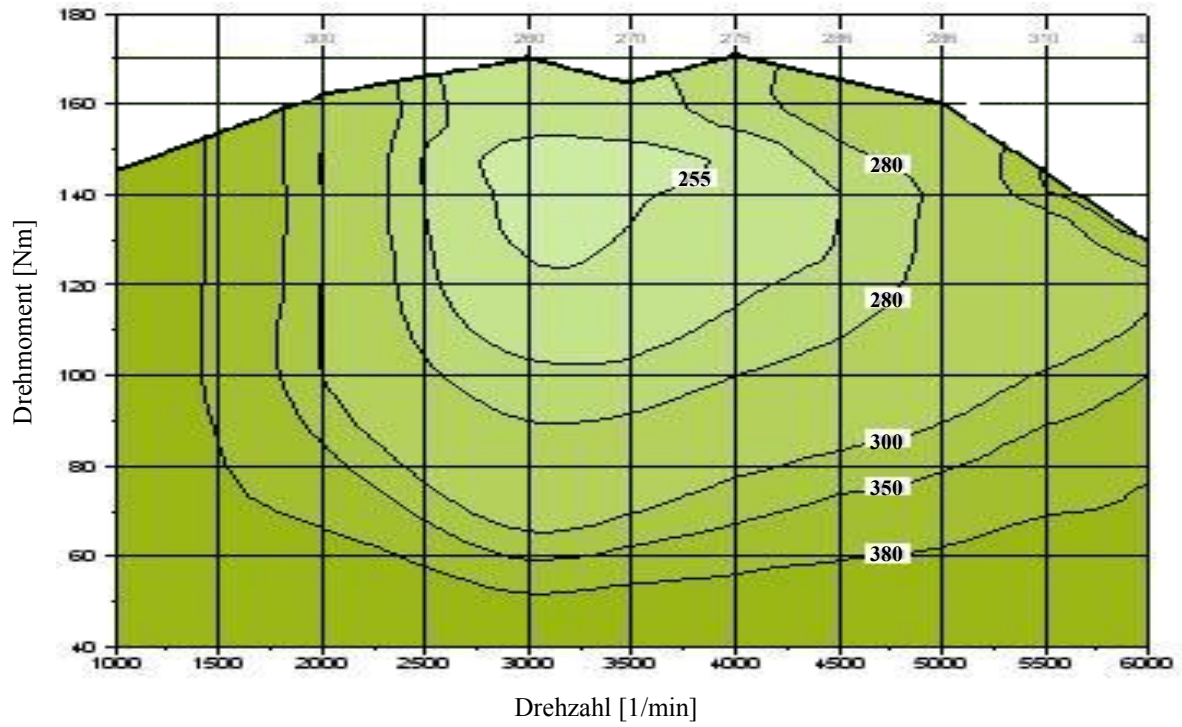


$$P_{e \max} = 84 \text{ kW bei } 5000 \text{ min}^{-1}$$

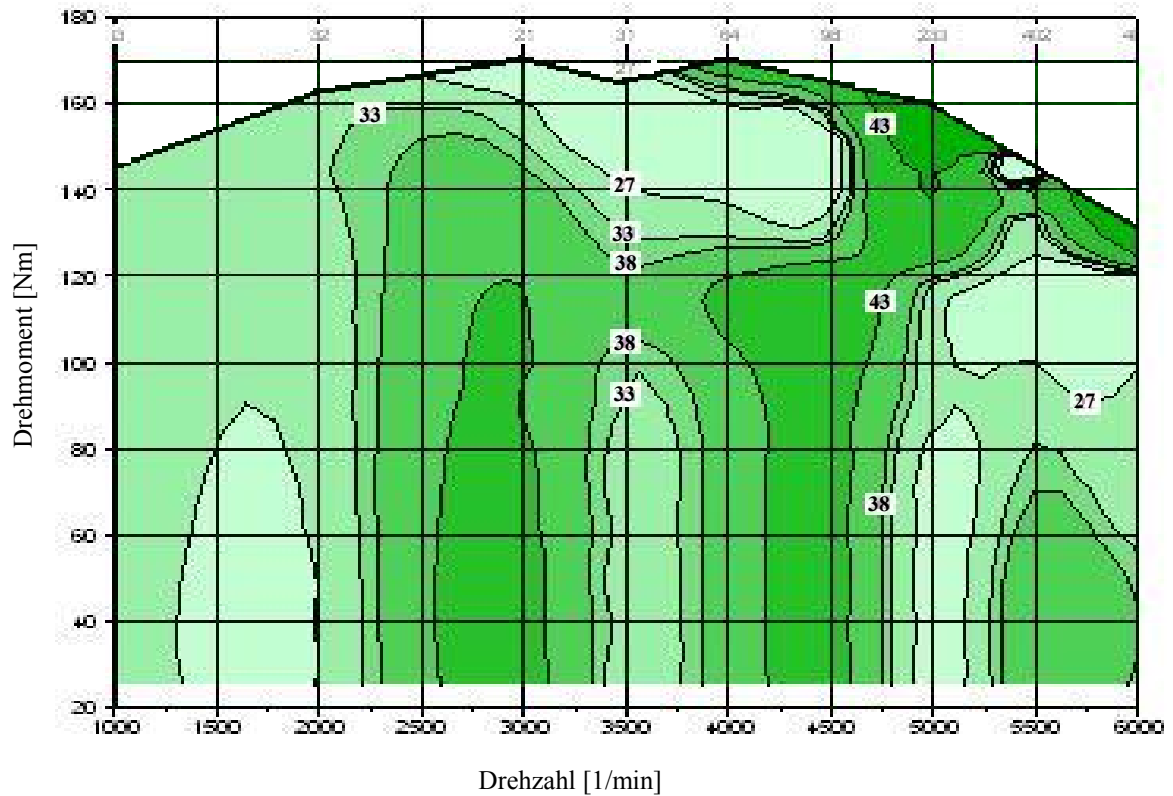
$$M_{d \max} = 170 \text{ Nm bei } 2700 \text{ min}^{-1}$$

Motorenkennfelder des Motors 2.0-I-DOHC /76/

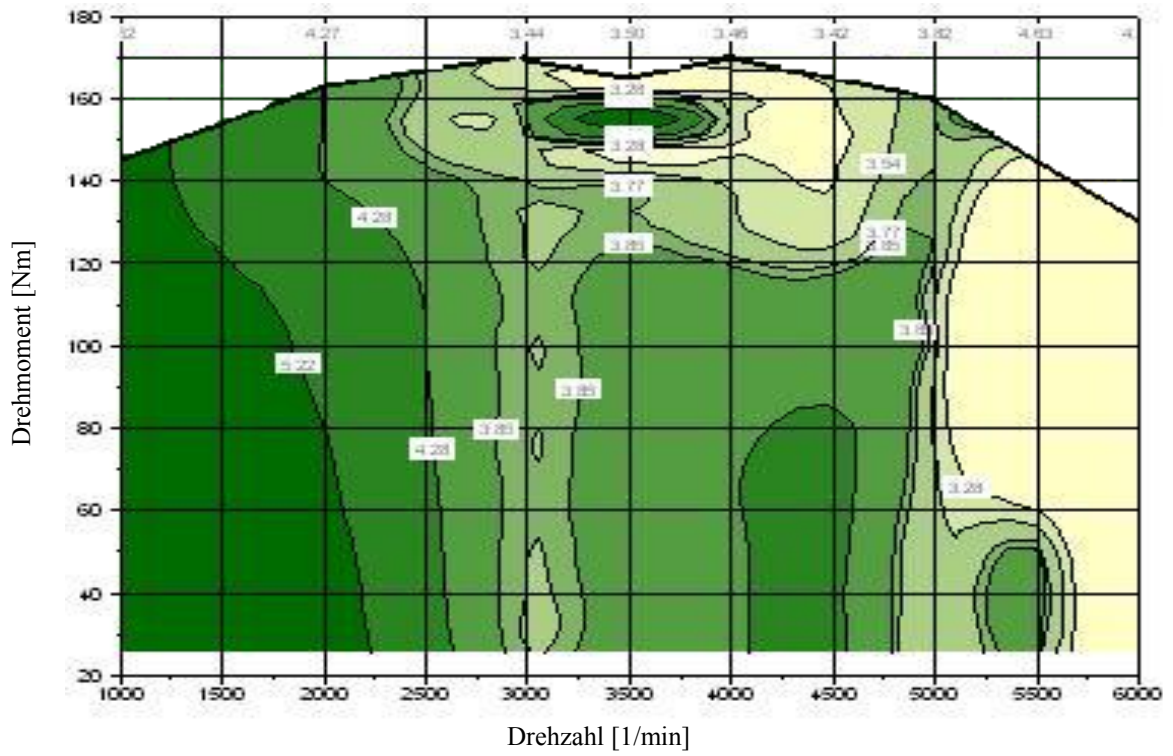
- **Kraftstoffverbrauchskennfeld b_e [g/kWh]**



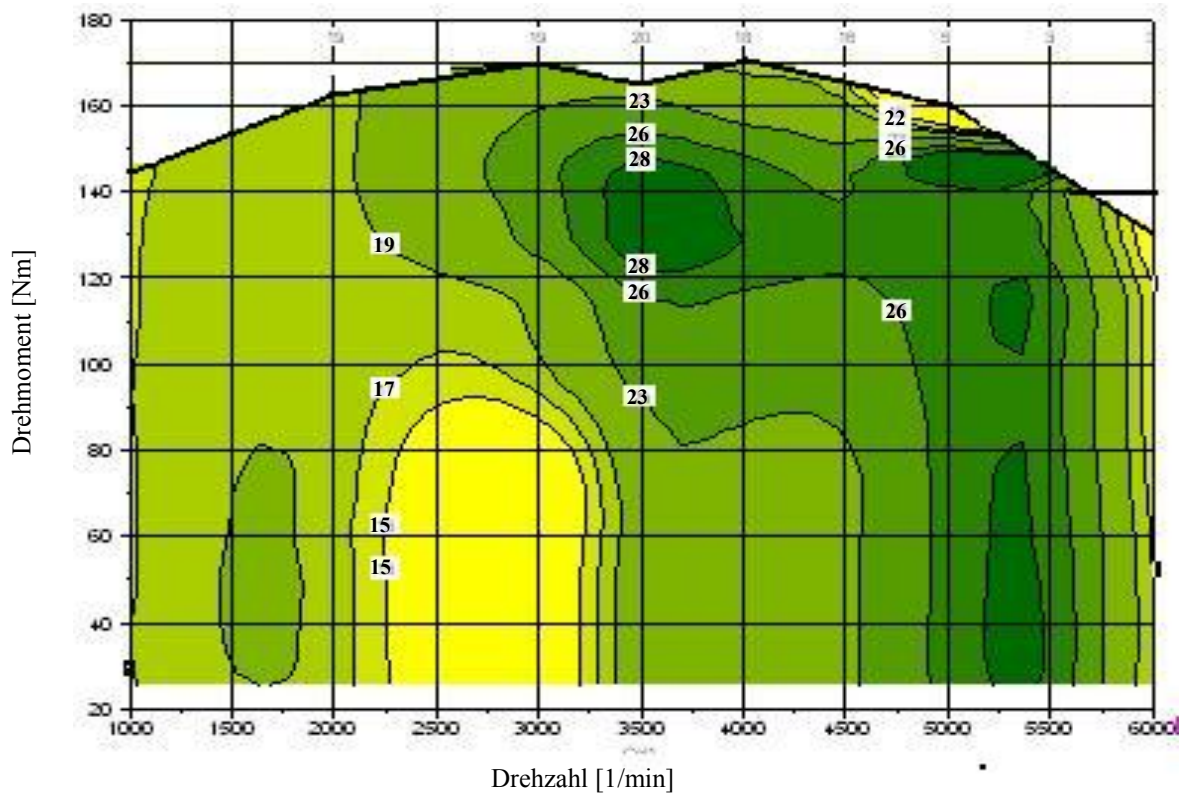
- **CO-Kennfeld [g/kWh]**



- HC-Kennfeld [g/kWh]



- NO_x-Kennfeld [g/kWh]



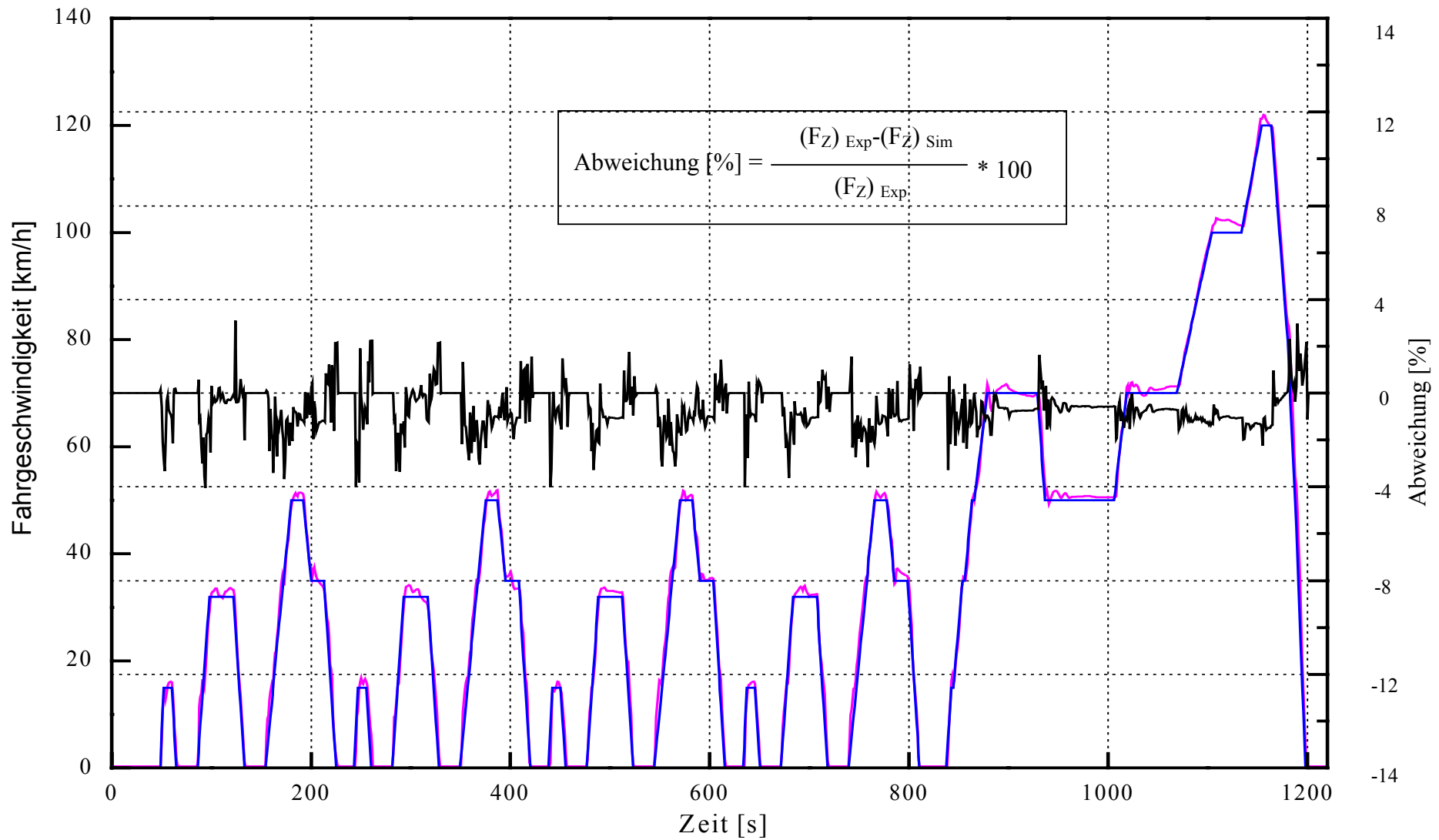


Abb. A3.1: Analyse der Zugkraft während des NEFZ Zyklus

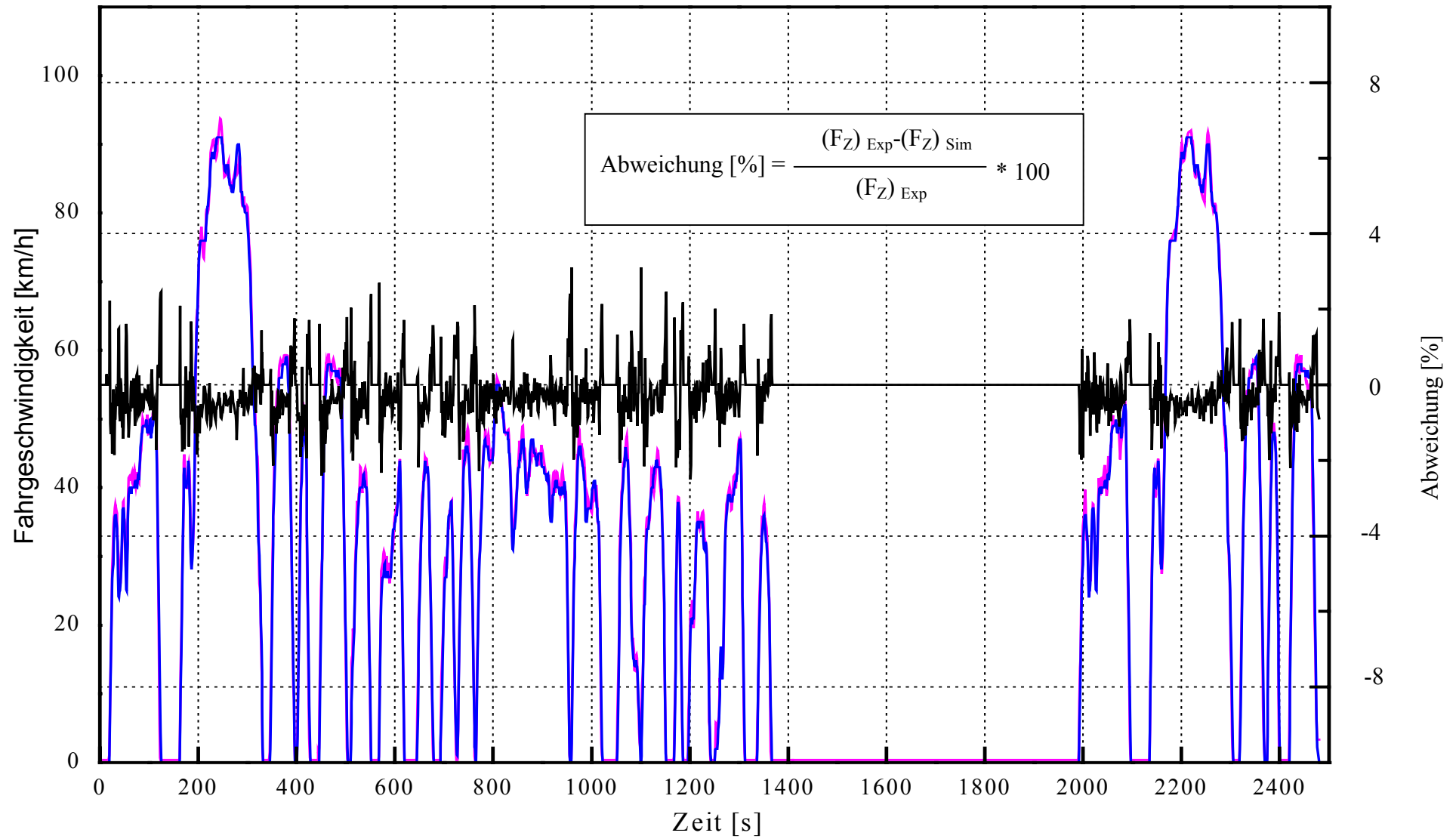


Abb. A3.2: Analyse der Zugkraft während des FTP-75 Zyklus

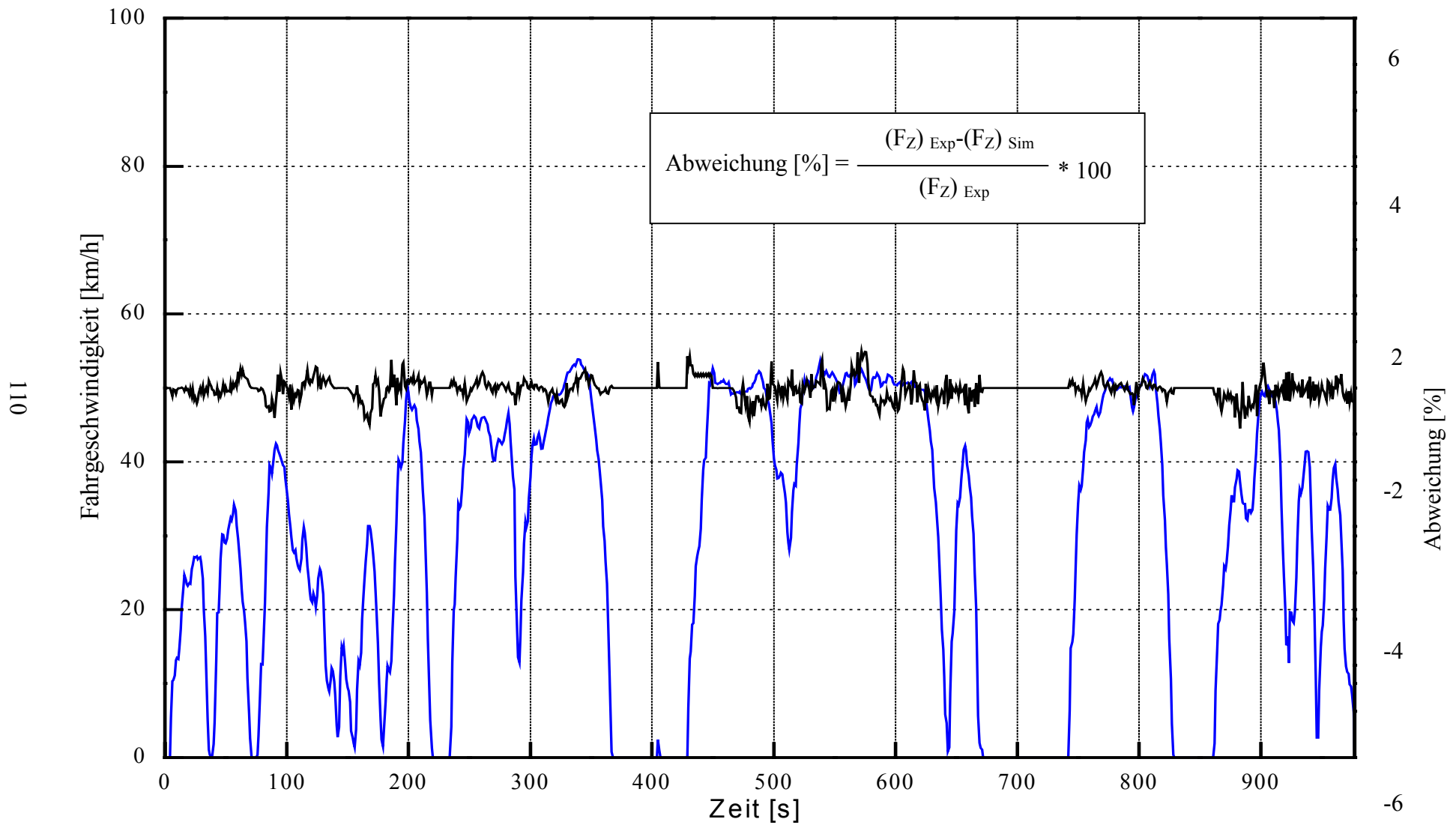


Abb. A3.3: Analyse der Zugkraft während des Dresden Zyklus

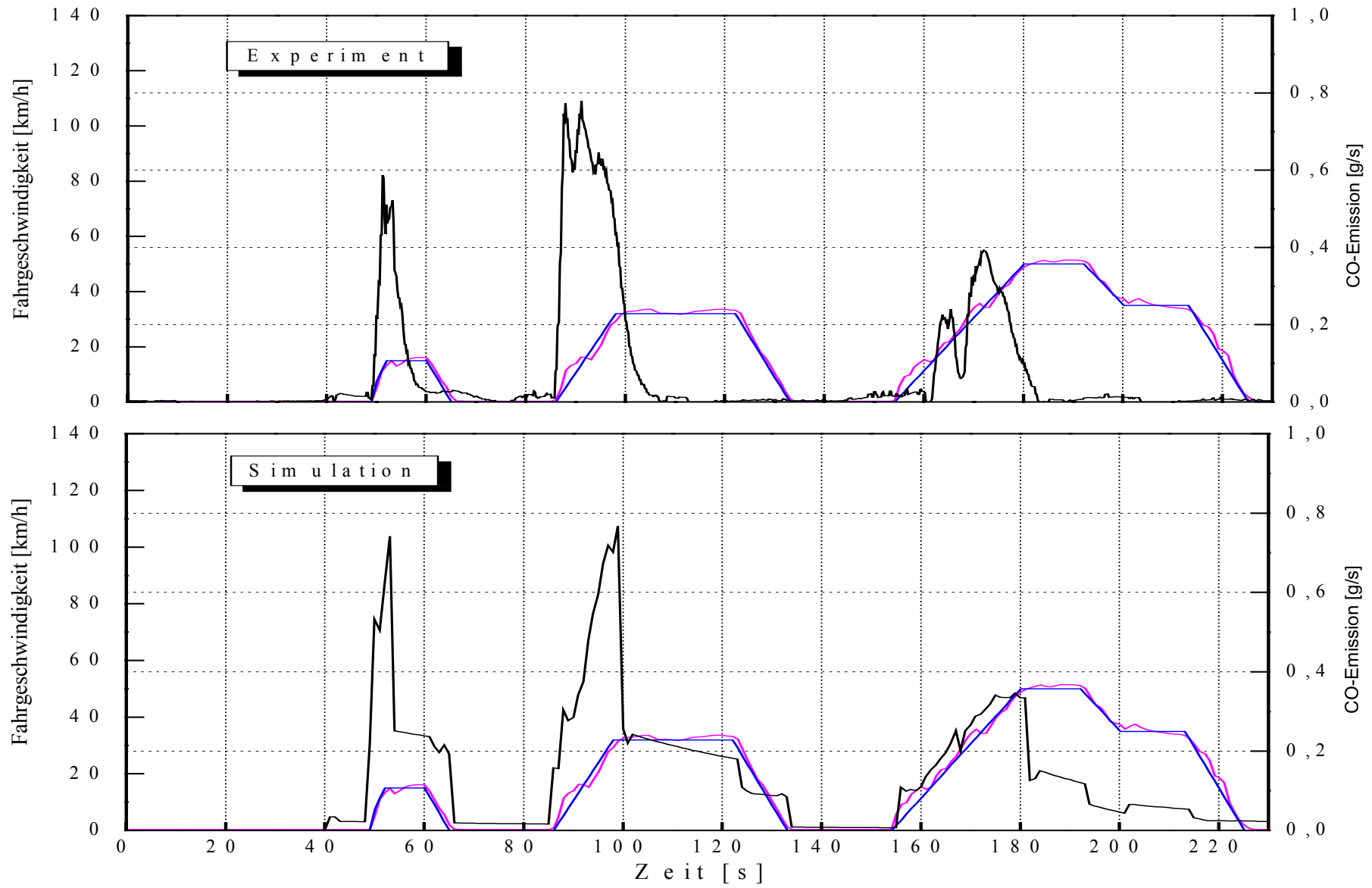


Abb. A3.4: Analyse der Abgasemission während des NEFZ Zyklus

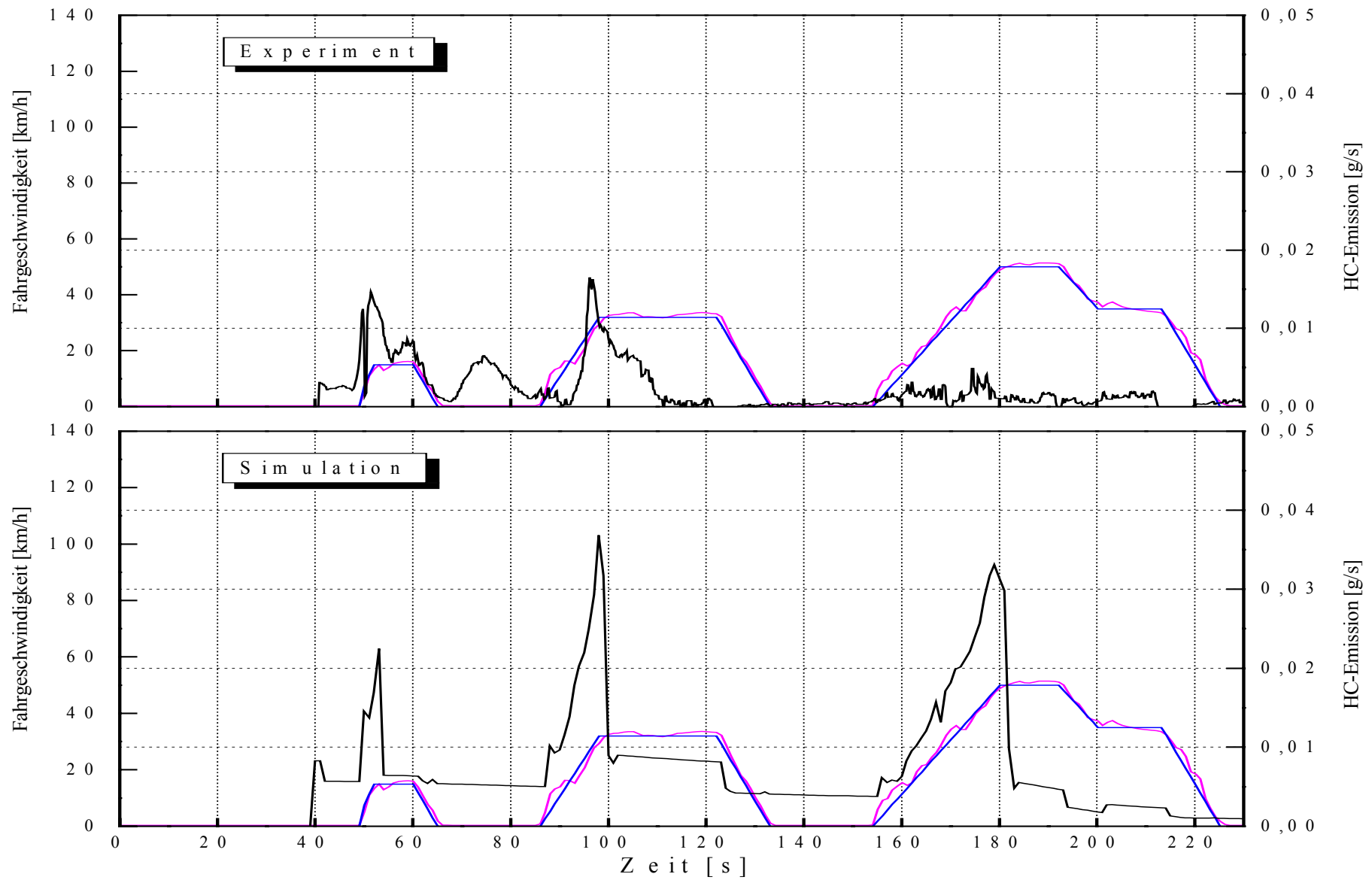


Abb. A3.5: Analyse der Abgasemission während des NEFZ Zyklus

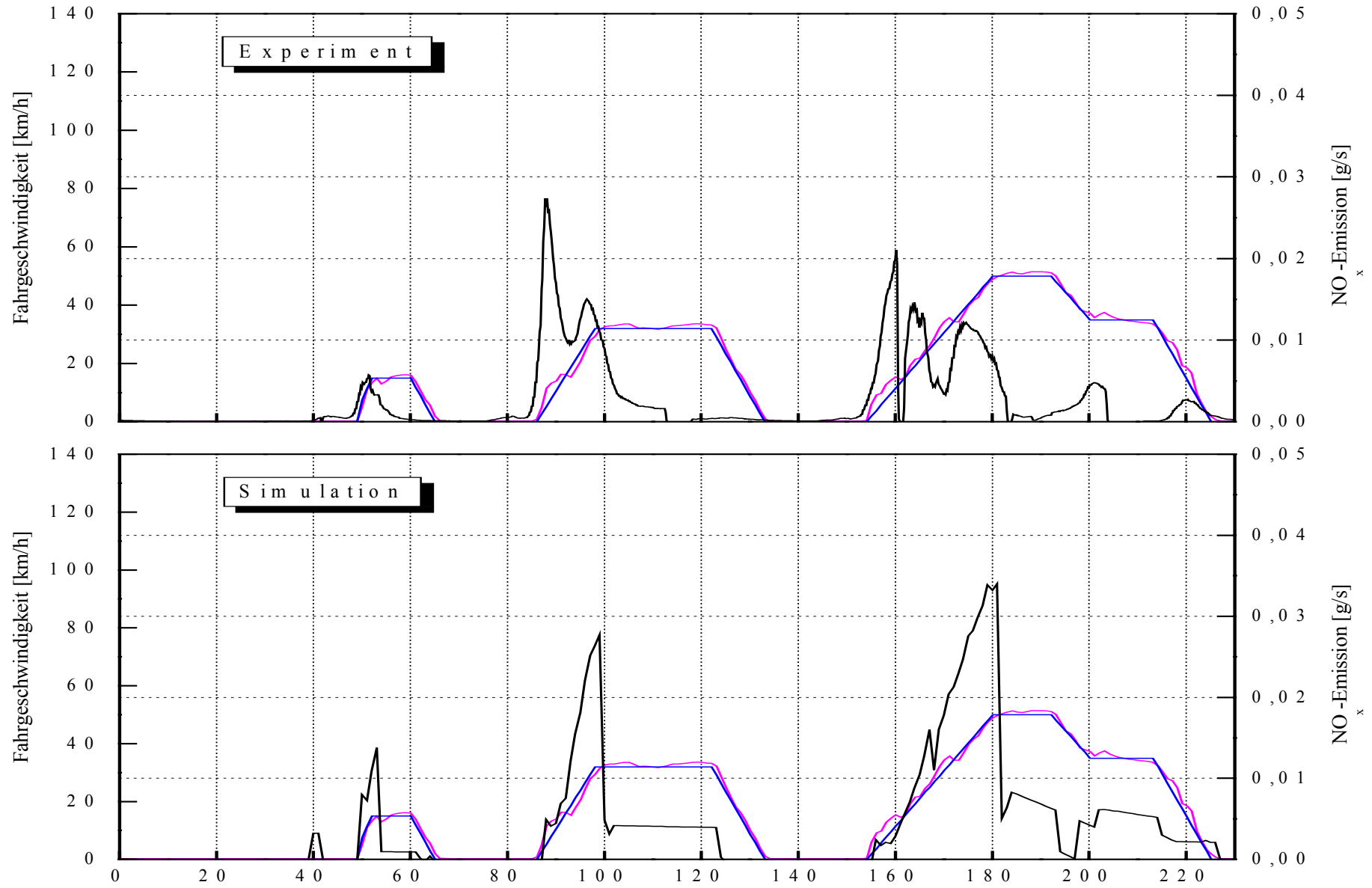


Abb. A3.6: Analyse der Abgasemission während des NEFZ Zyklus

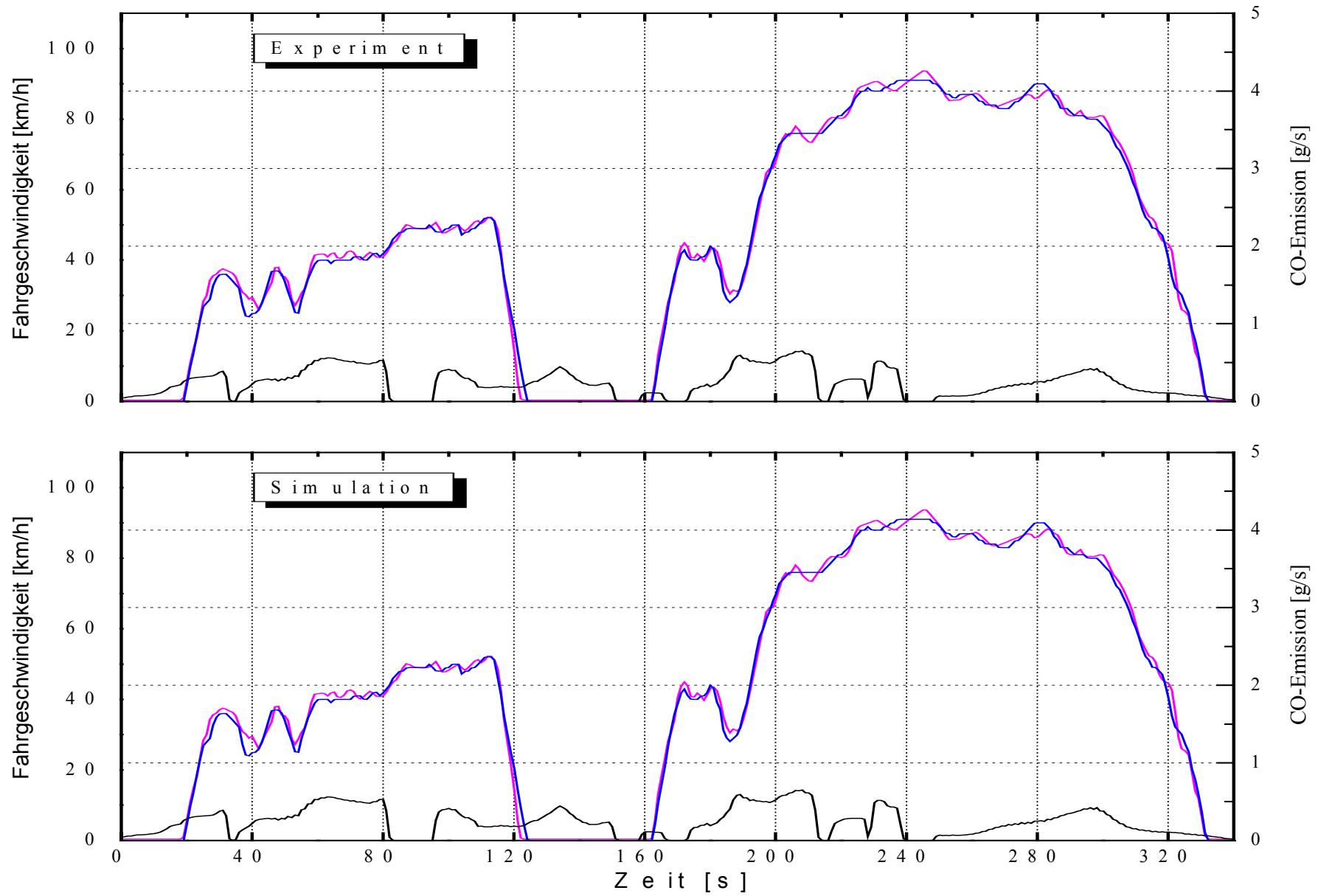


Abb. A3.7: Analyse der Abgasemission während des FTP 75 Zyklus

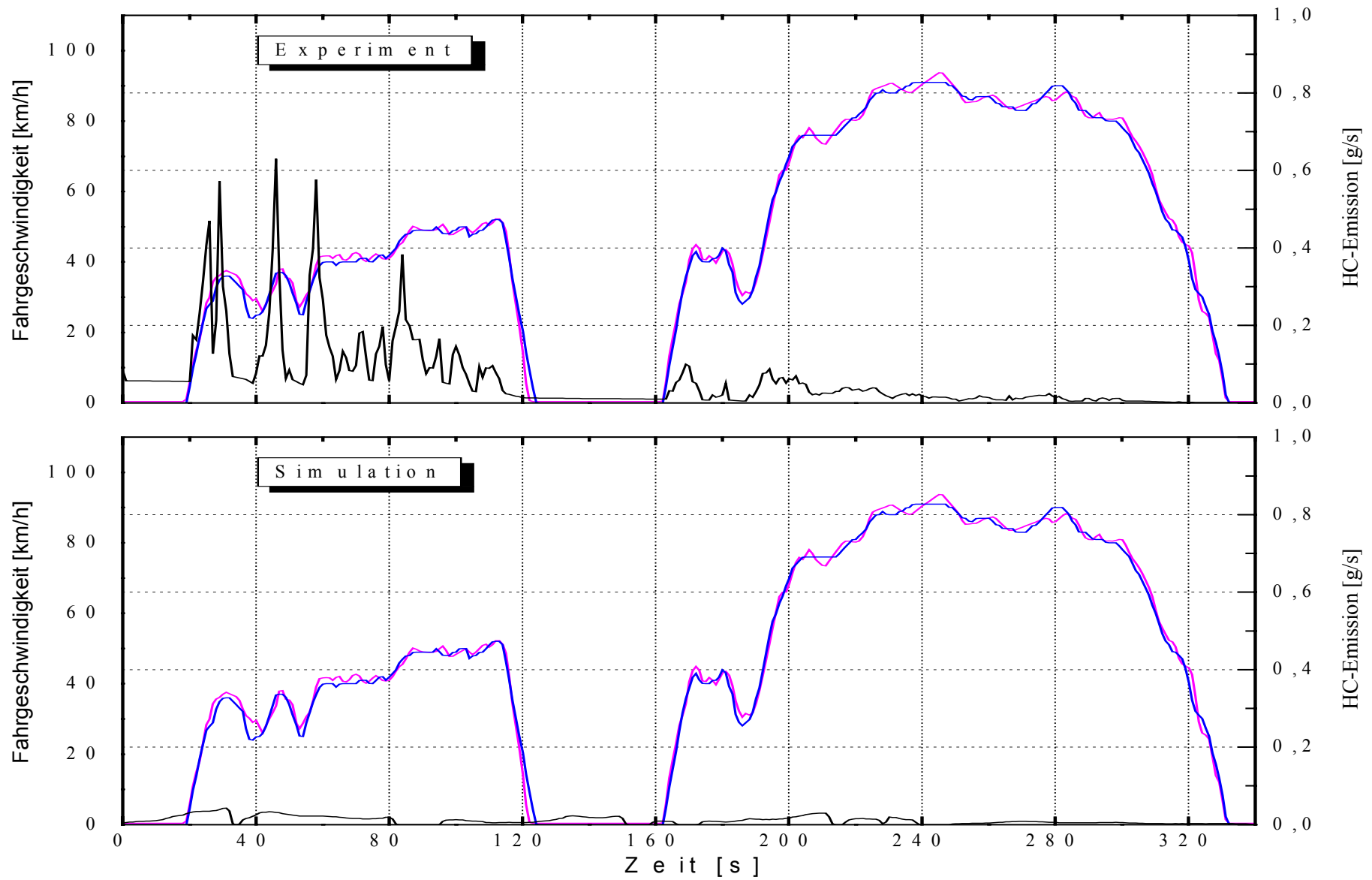


Abb. A3.8: Analyse der Abgasemission während des FTP 75 Zyklus

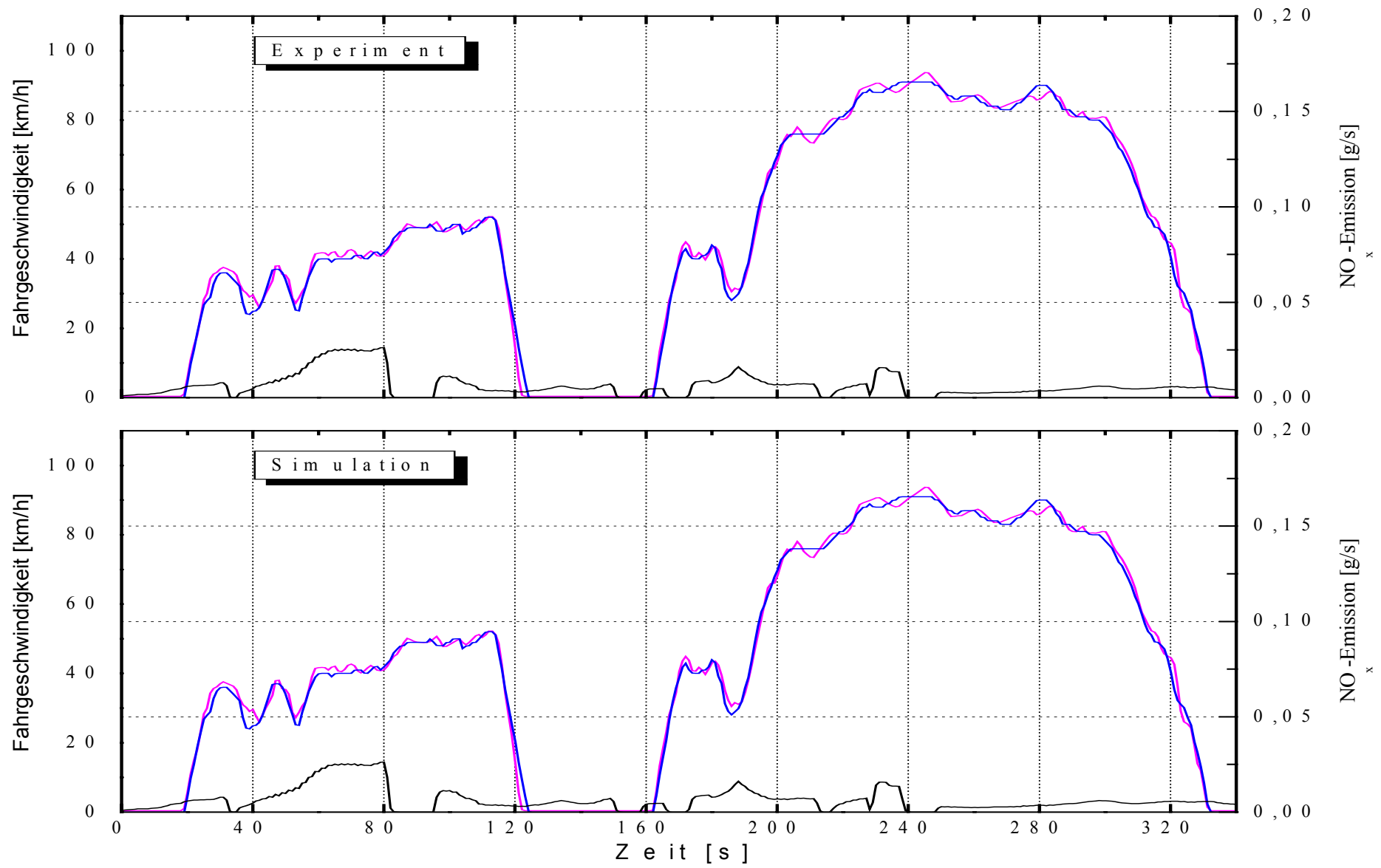


Abb. A3.9: Analyse der Abgasemission während des FTP 75 Zyklus

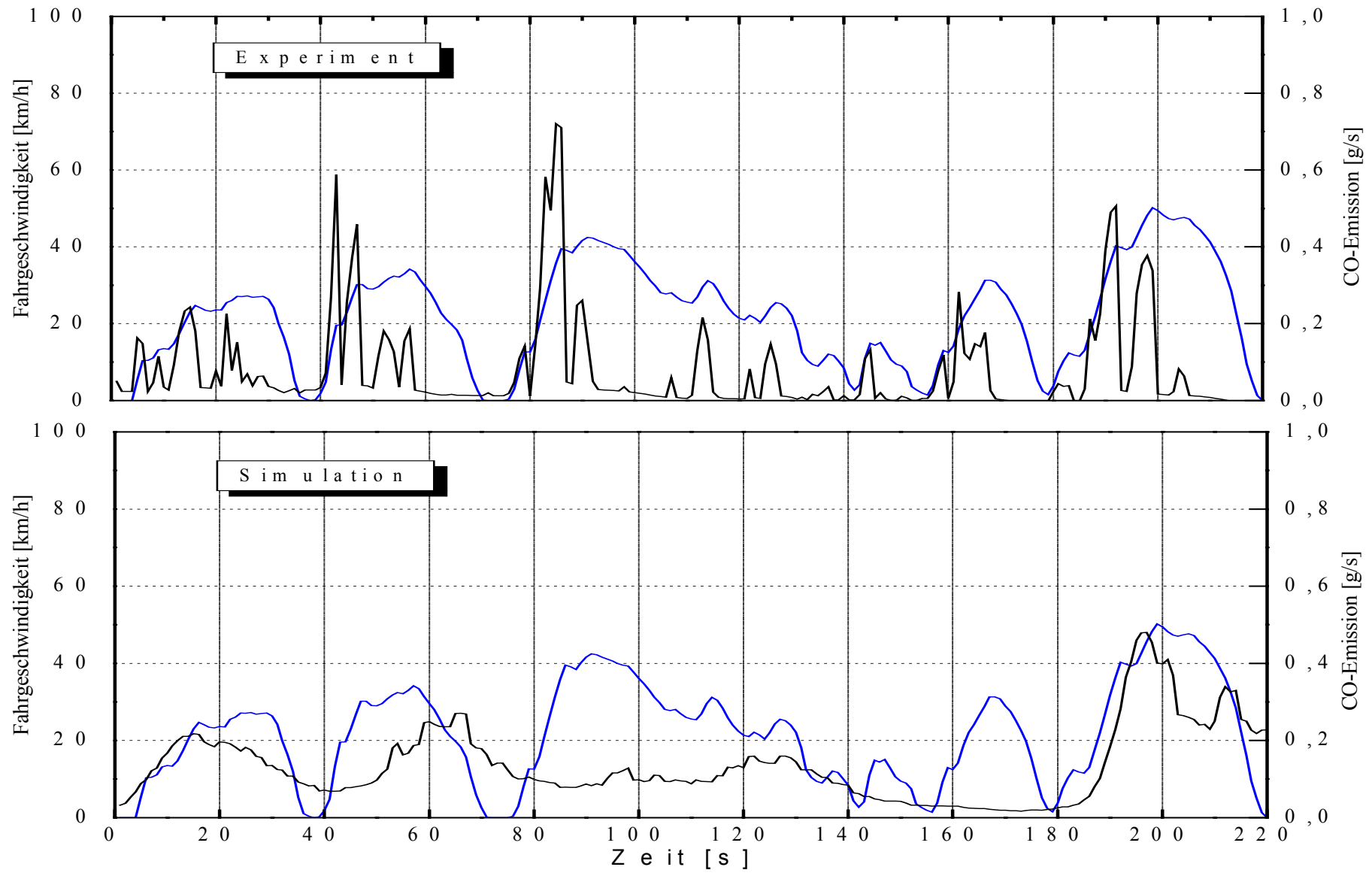


Abb. A3.10: Analyse der Abgasemission während des Dresden Zyklus

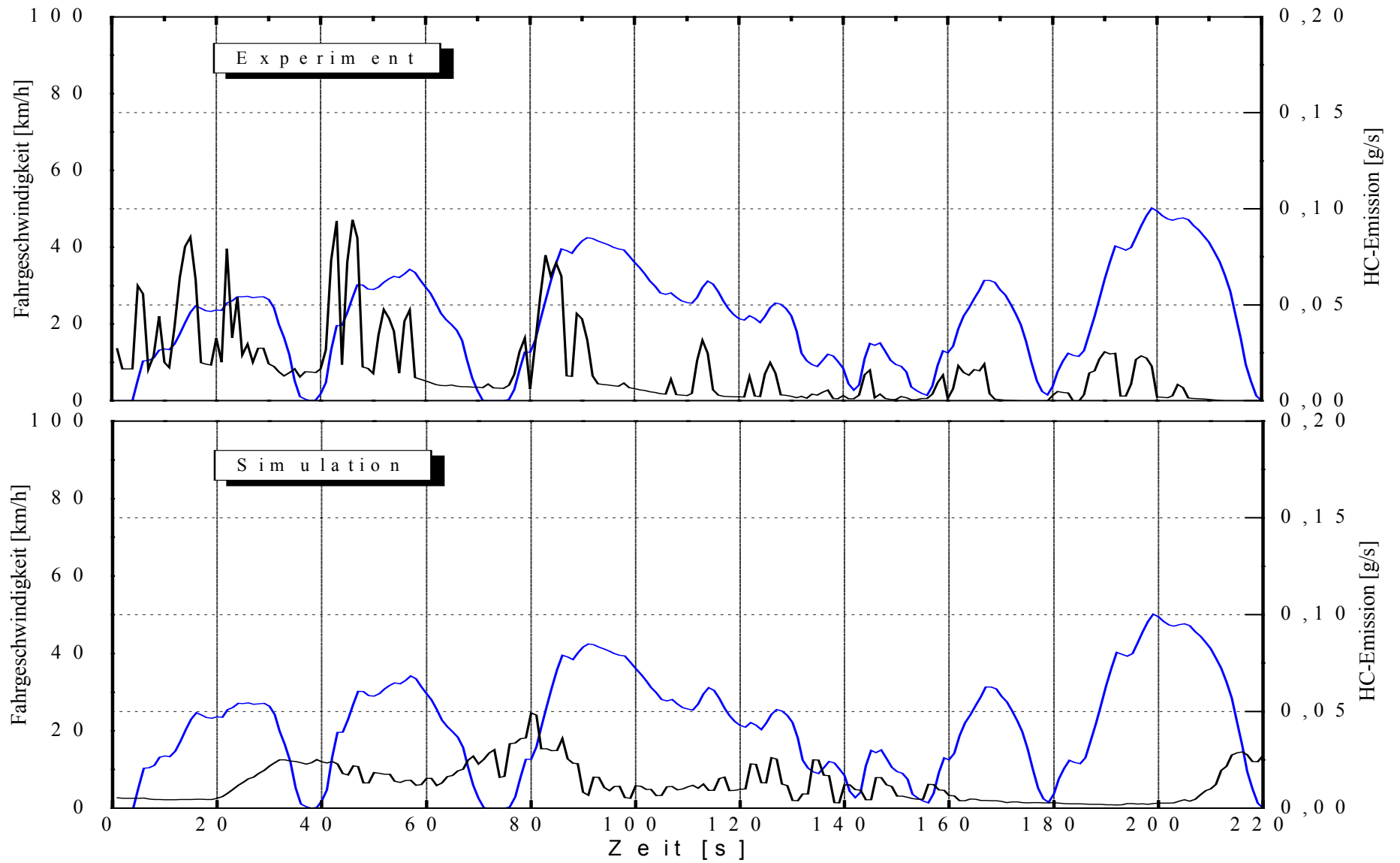


Abb. A3.11: Analyse der Abgasemission während des Dresden Zyklus

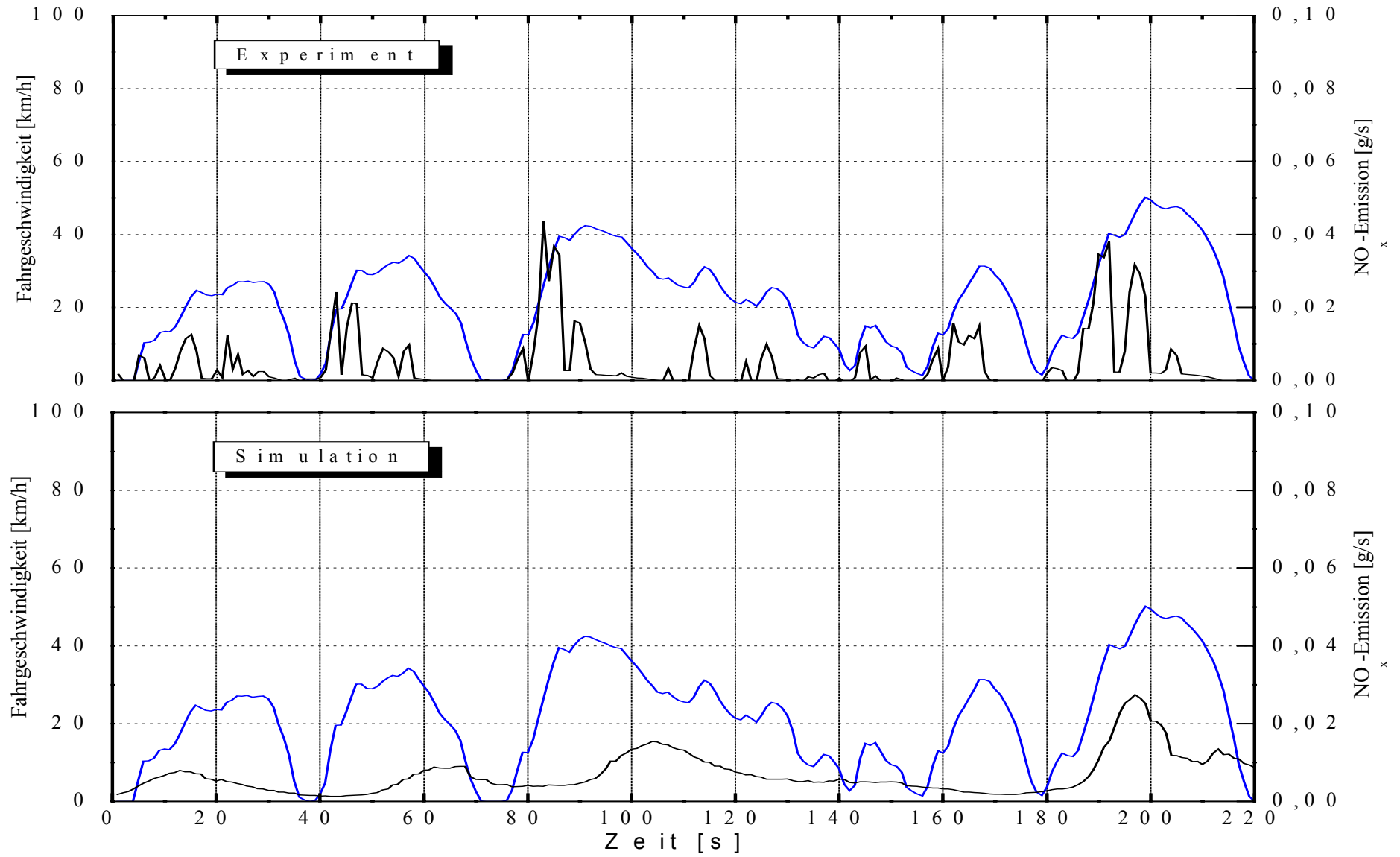
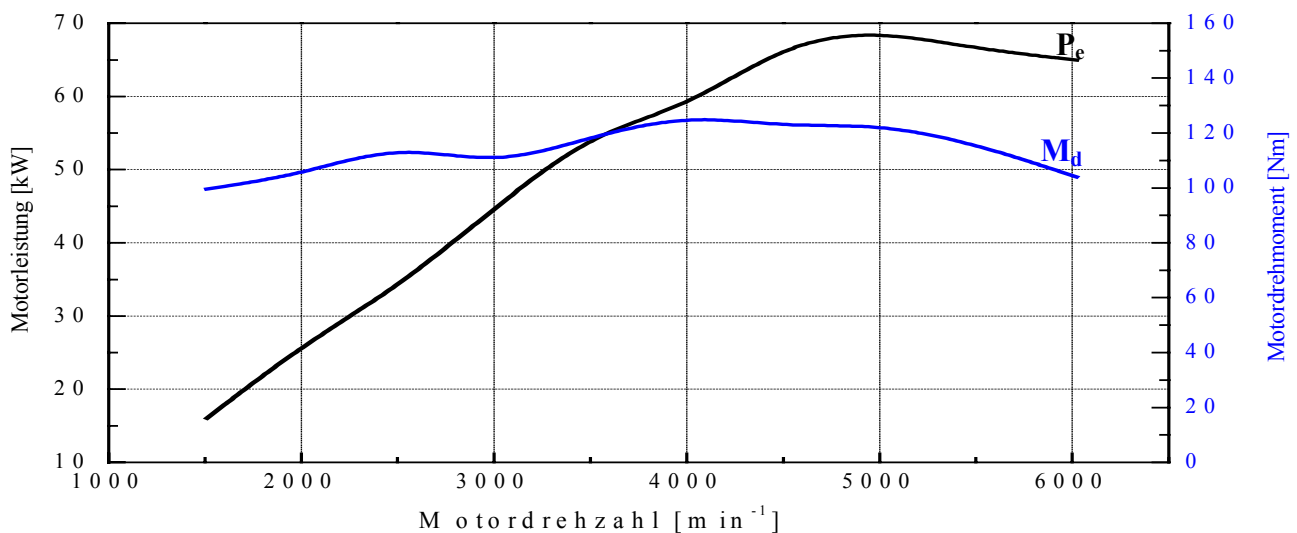


Abb. A3.12: Analyse der Abgasemission während des Dresden Zyklus

Tabelle A3.2: Technische Spezifikationen des Fahrzeuges „Fiat Multipla“
(Erdgas) /77/

Beschreibung	Wert	Beschreibung	Wert
Achsstand, m	2660	Verbrennungsmotortyp	186.A3.000
Schwerpunkthöhe, m	0.560	Verbrennungsverfahren	4 Takt, Otto
r_{dyn} , m	185/65R15	Zylinderzahl/Anordnung	4 in Reihe
Getriebeübersetzung, i_g -I	3.909	Leistung, kW @ rpm	70@5750
Getriebeübersetzung, i_g -II	2.238	Drehmoment, Nm @ rpm	133 @ 4000
Getriebeübersetzung, i_g -III	1.520	Hubvolumen, l	1,581
Getriebeübersetzung, i_g -IV	0.971	Leerlaufdrehzahl, min^{-1}	800 ± 50
Übersetzung der Hinterachse	4.067	Kraftstoff	Erdgas
Oberfläche, m^2	2.48	Zündfolge	1-3-4-2
Luftwiderstandsbeiwert (c_w), -	0.35	Kühlungsmittel	Wasser
Zulässiges Gesamtgewicht, kg	2050	Zündsystem	Elektronisch
Zuladung, kg	560	Heizwert, MJ/kg	47,2
Leergewicht, kg	1490		
Rollwiderstandsbeiwert	0,016		
Leistung der Nebenaggregate, W	700		

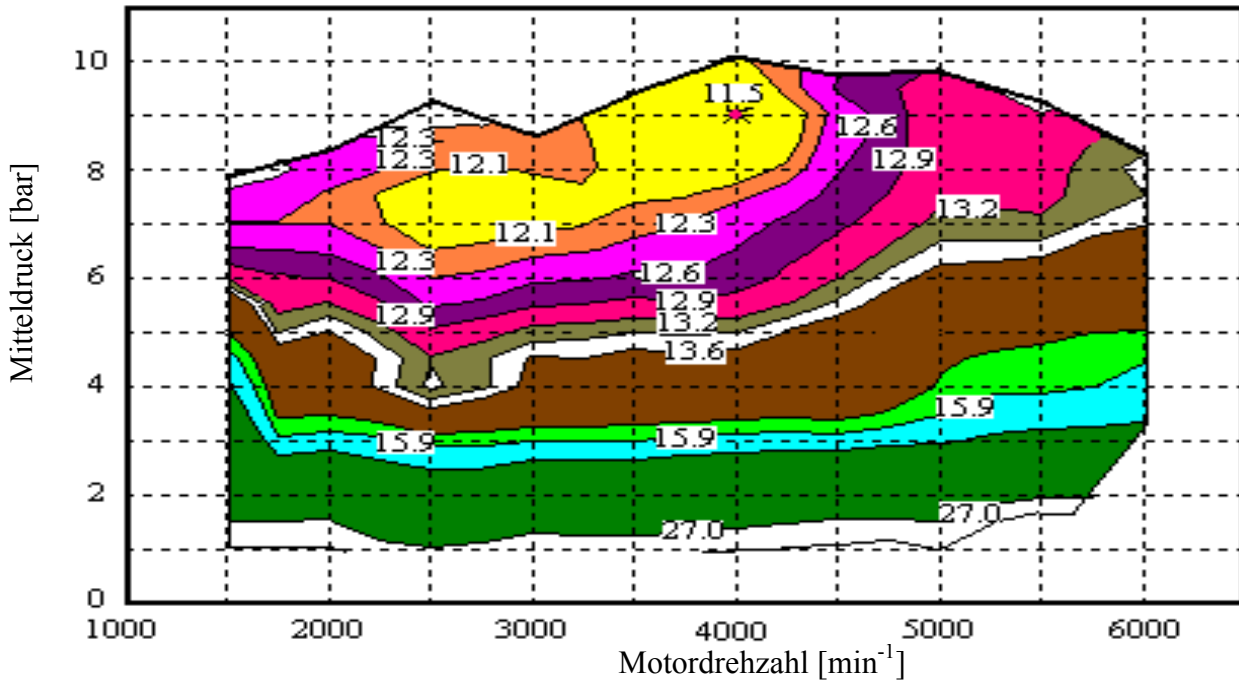
- Volllastkennlinien des Verbrennungsmotors 186.A3.000 (Erdgas)**



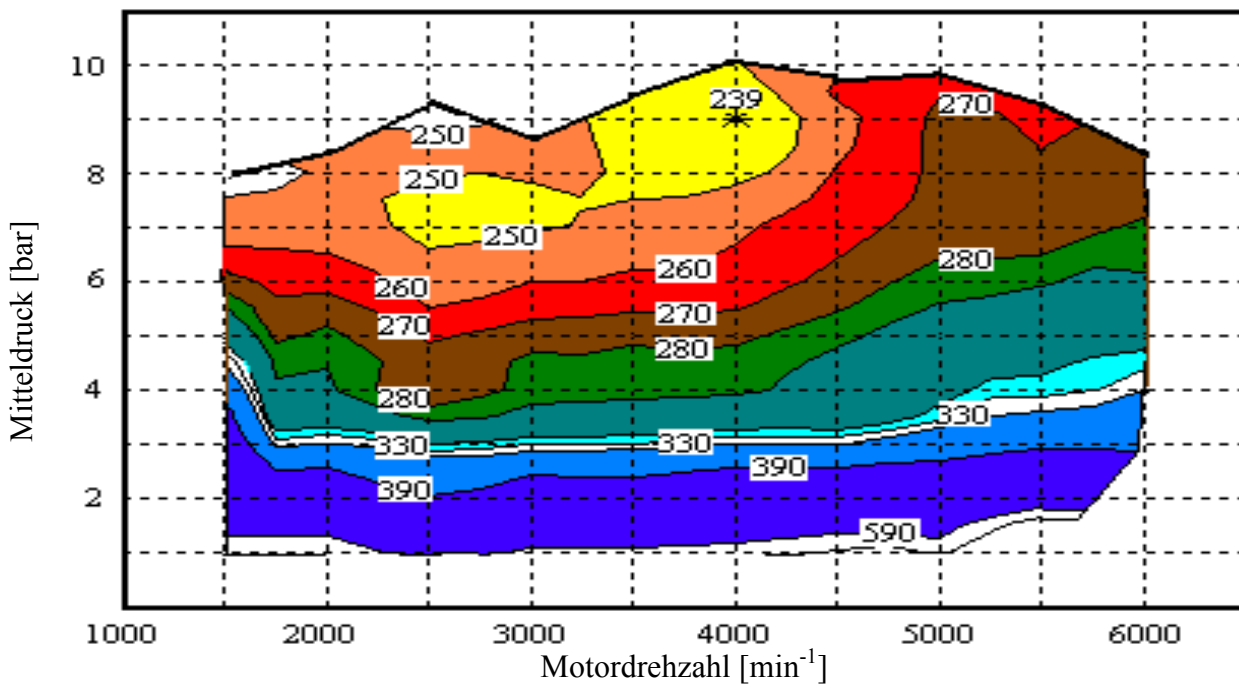
$$P_{e \max} = 70 \text{ kW bei } 5750 \text{ min}^{-1}$$

$$M_{d \max} = 133 \text{ Nm bei } 4000 \text{ min}^{-1}$$

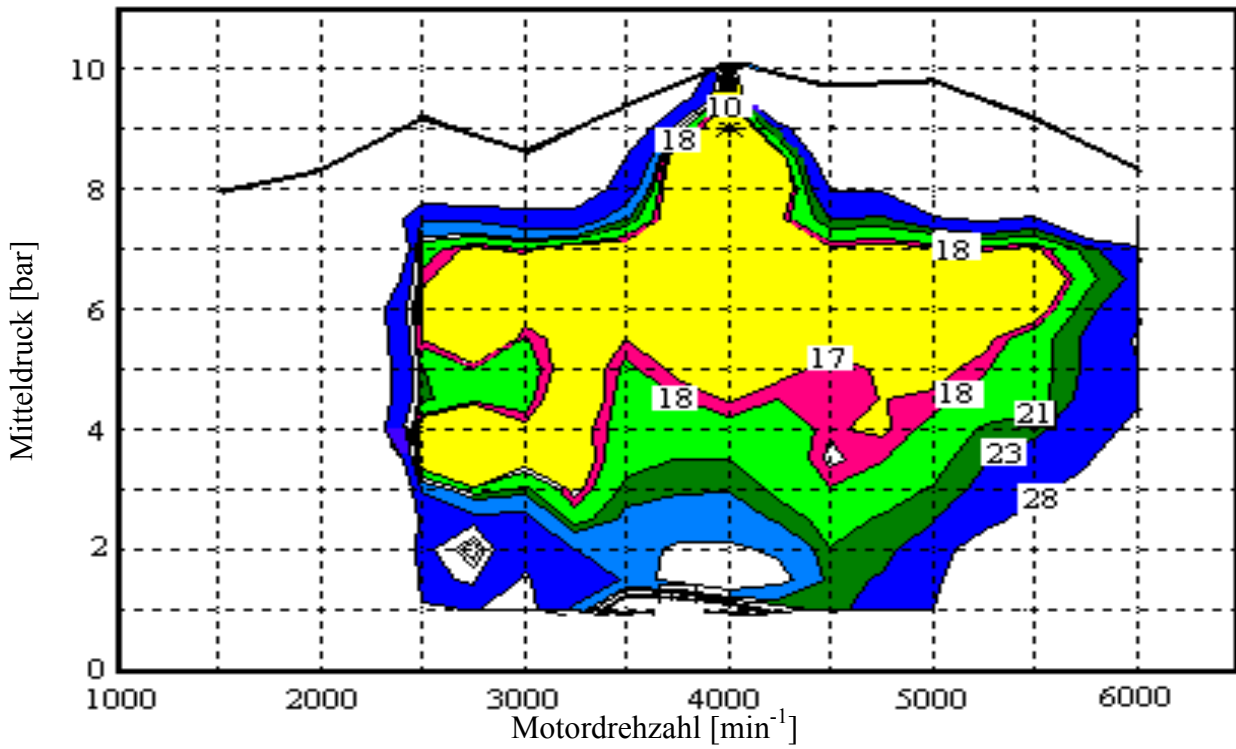
- Motorenkennfelder des Motors 186.A3.000 /78/
- Kraftstoffverbrauchskennfeld b_e [g/kWh]



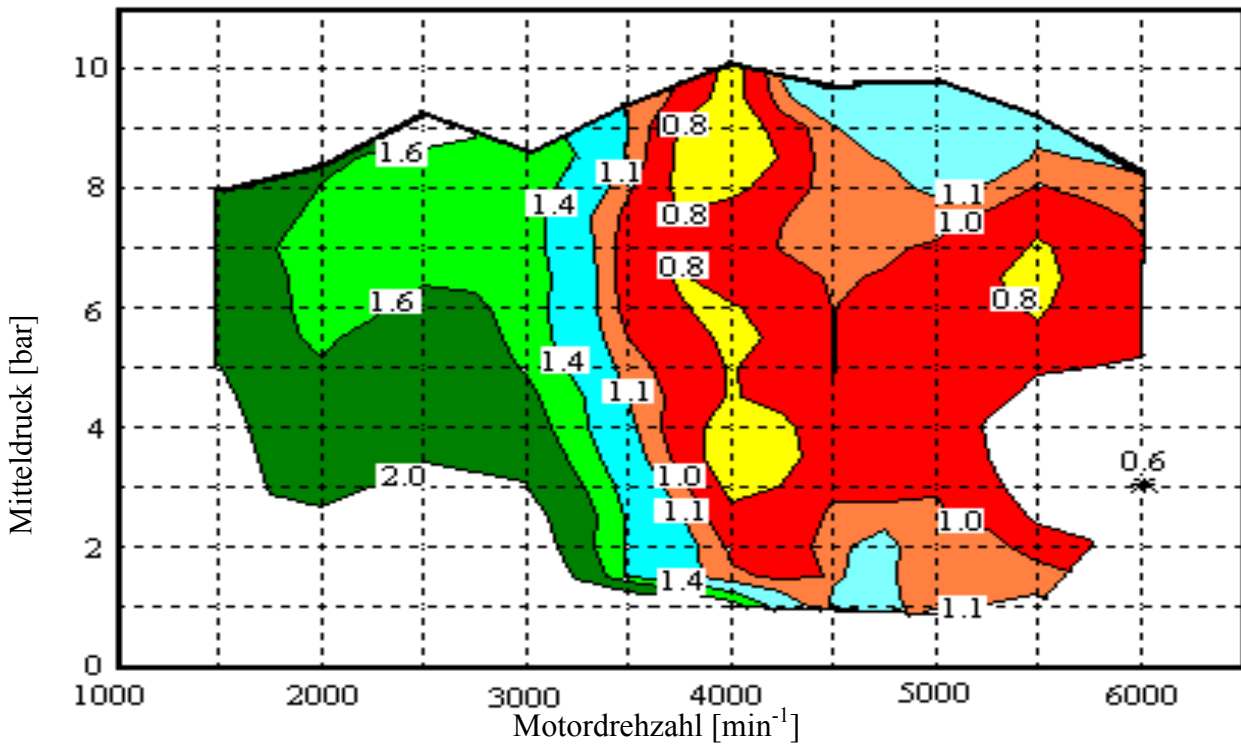
- Umgerechnetes Energieverbrauchskennfeld b_e [MJ/kWh]



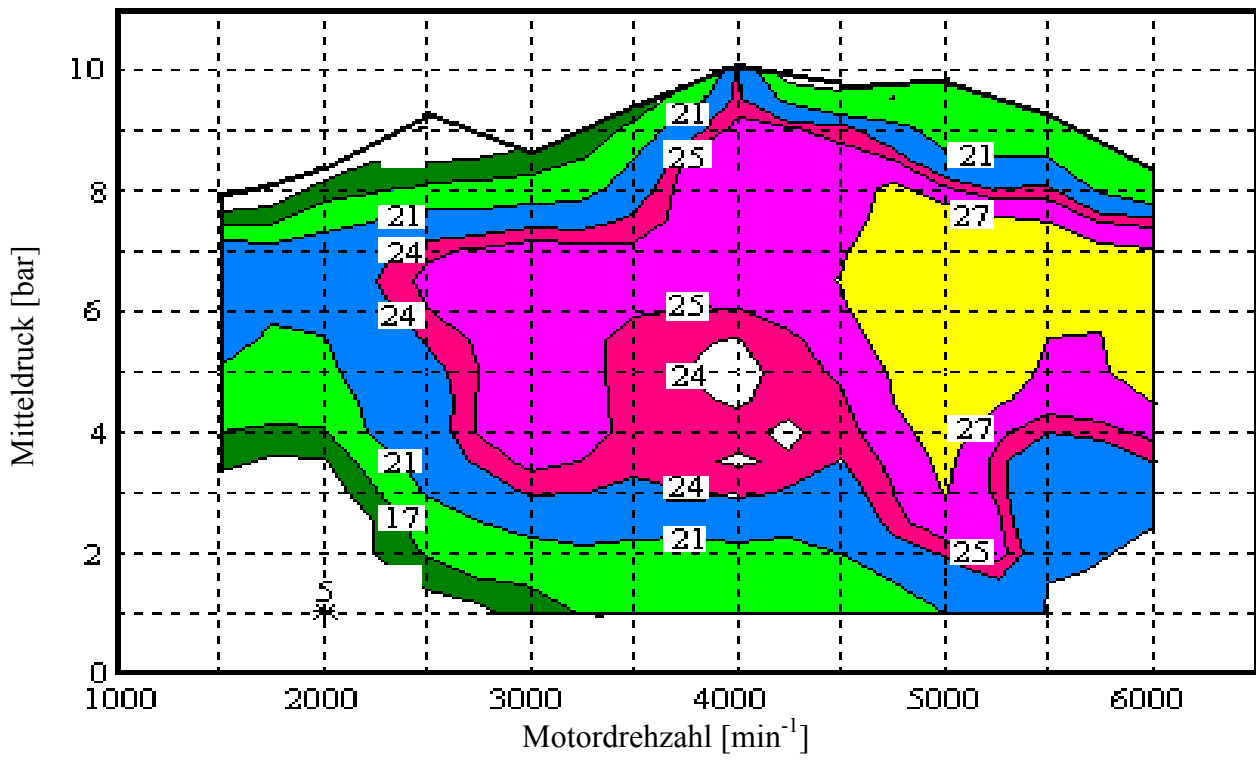
- CO – Kennfeld [g/kWh]



- HC – Kennfeld [g/kWh]



- NO_x – Kennfeld [g/kWh]



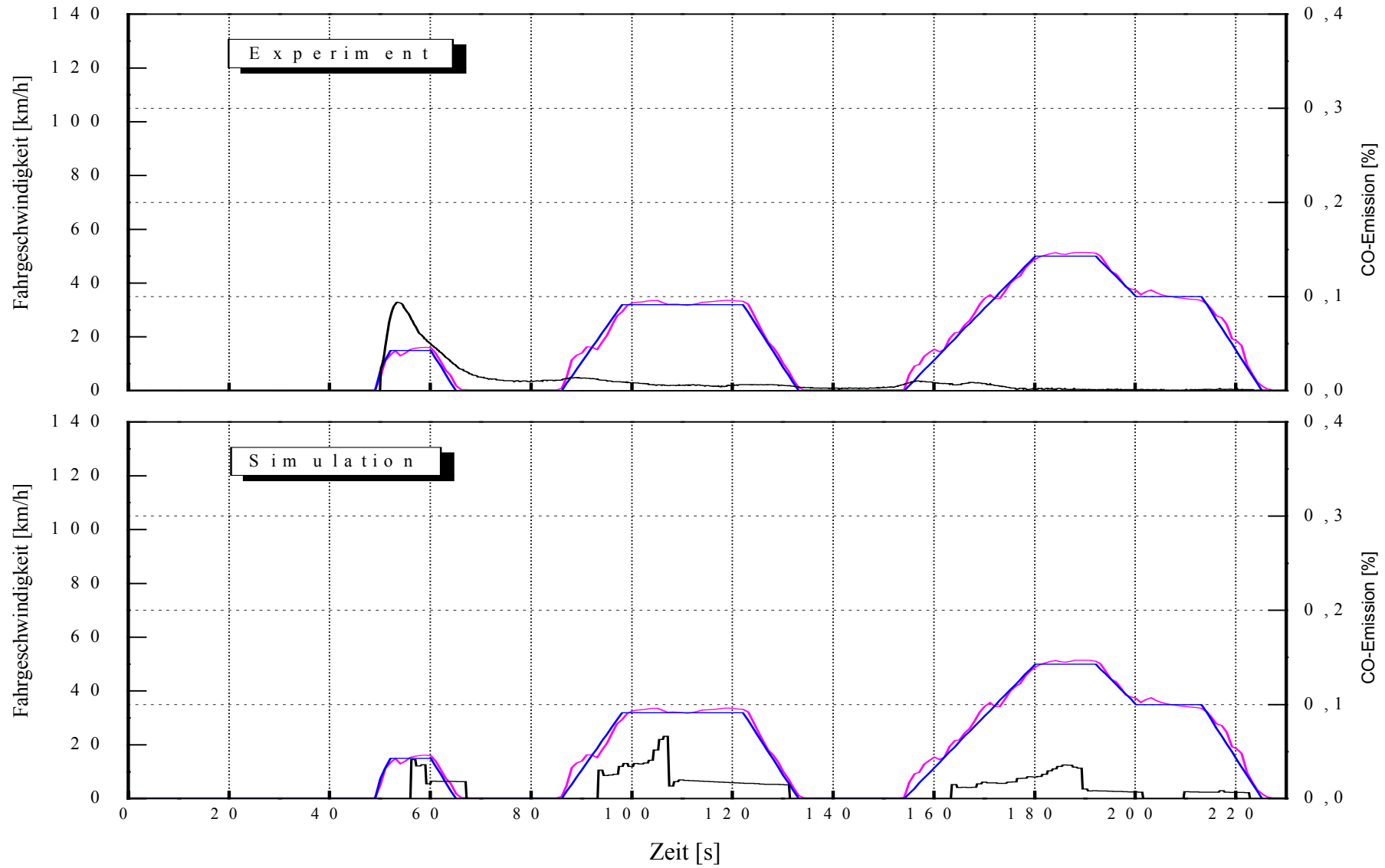


Abb. A3.13: Analyse der Abgasemission während des NEFZ Zyklus

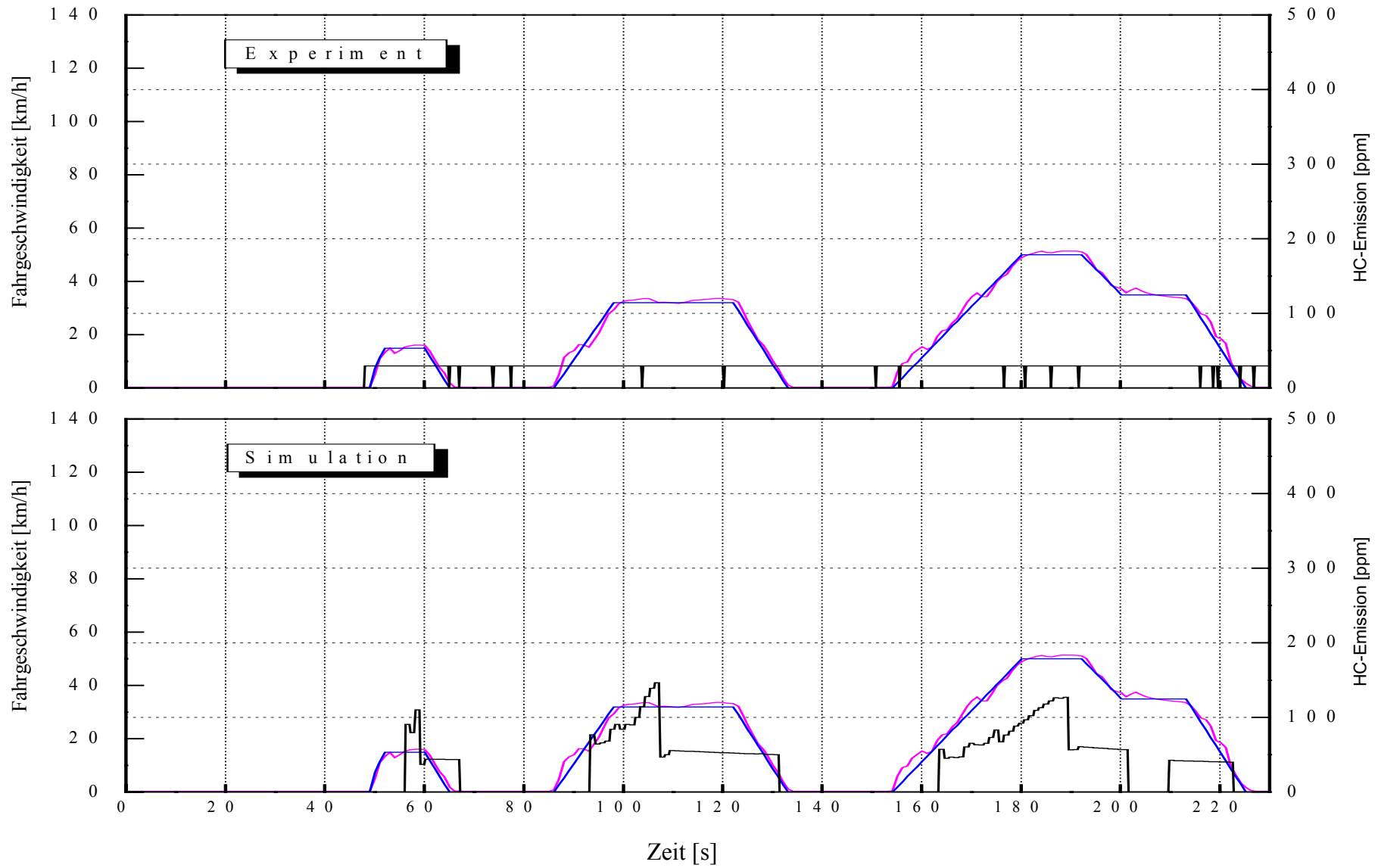


Abb. A3.14: Analyse der Abgasemission während des NEFZ Zyklus

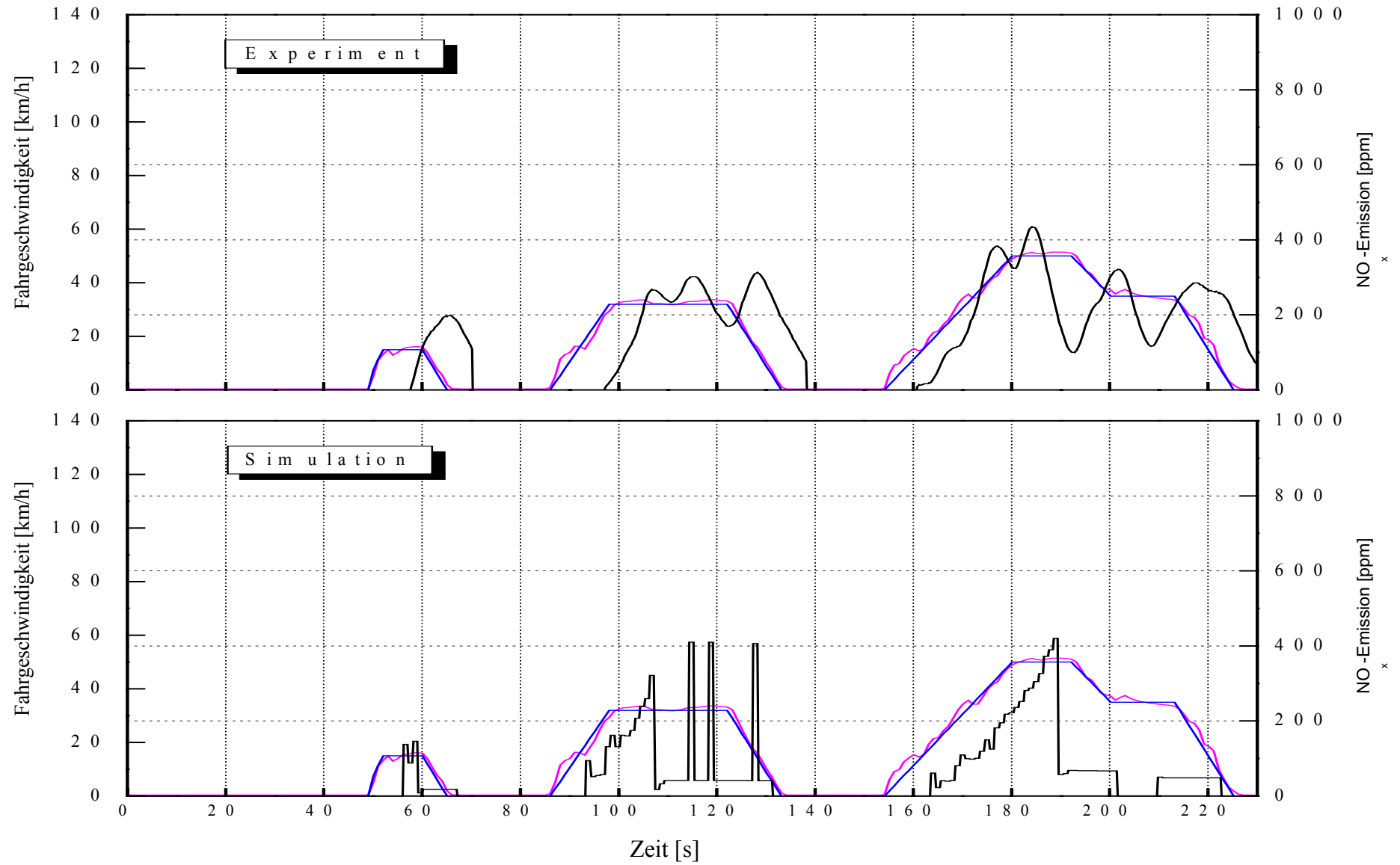
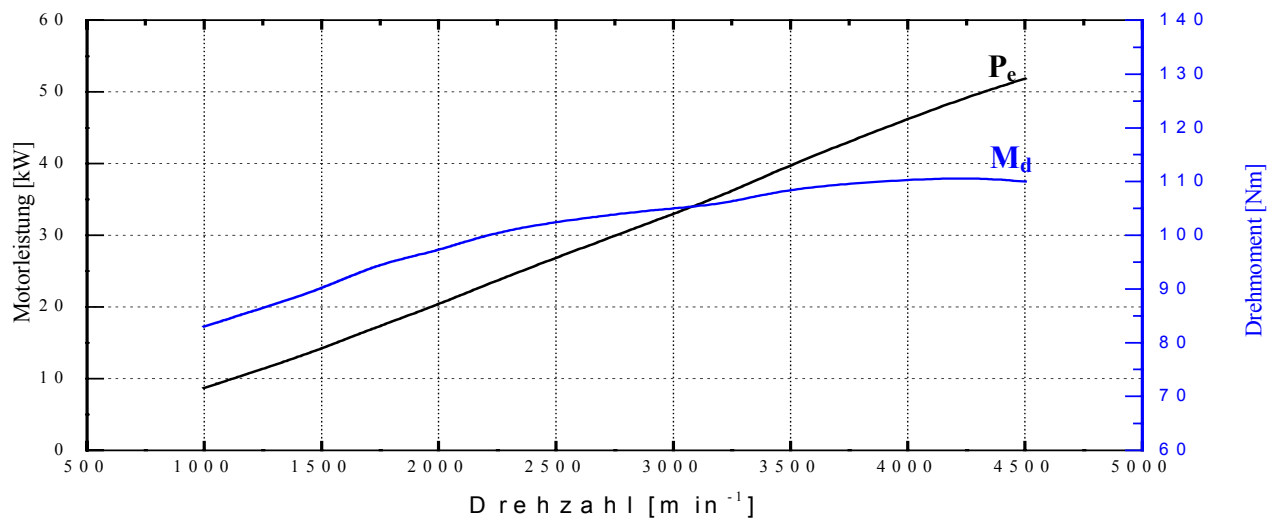


Abb. A3.15: Analyse der Abgasemission während des NEFZ Zyklus

Tabelle A3.3: Die technische Spezifikation des Hybridfahrzeuges (Toyota-Prius) /47/

Parameter	Wert	Parameter	Wert
Achsstand, m	2,55	Verbrennungsmotortyp	FA-Modell
Schwerpunkthöhe, m	0,565	Verbrennungsverfahren	4 Takt, Otto
r_{dyn} , m	0.287	Zylinderzahl	4 in Reihe
Getriebe	Planetengetriebe	Leistung, kW @ min^{-1}	53 @ 4500
Hinterachseübersetzung	3,93	Drehmoment, Nm @ min^{-1}	111 @ 4200
Oberfläche, m^2	1,746	Hubvolumen, l	1,500
Luftwiderstandsbeiwert (c_w), -	0,29	Leerlaufdrehzahl, min^{-1}	850 ± 50
Zulässiges Gesamtgewicht, kg	1254	Kraftstoff	Superbenzin Bleifrei
Leergewicht, kg	934	Zündfolge	1-3-4-2
Zuladung, kg	320	Kühlungsmittel	Wasser
Rollwiderstandsbeiwert	0,016	Zündsystem	Elektronisch
Leistung der Nebenaggregate, W	700	Traktionsbatterien	NiMH, 273 v
Kraftstoffdichte, kg/m^3	749	Elektrischer Motor $P_{e\text{-ele}}$	33 kW
Heizwert, MJ/kg	42,6	Drehmoment Nm @ min^{-1}	300 @ 0 - 1000 min^{-1}
Luftdichte, kg/m^3 bei NT	1,20		

- **Volllastkennlinien des Verbrennungsmotors FA-Modell /47/**

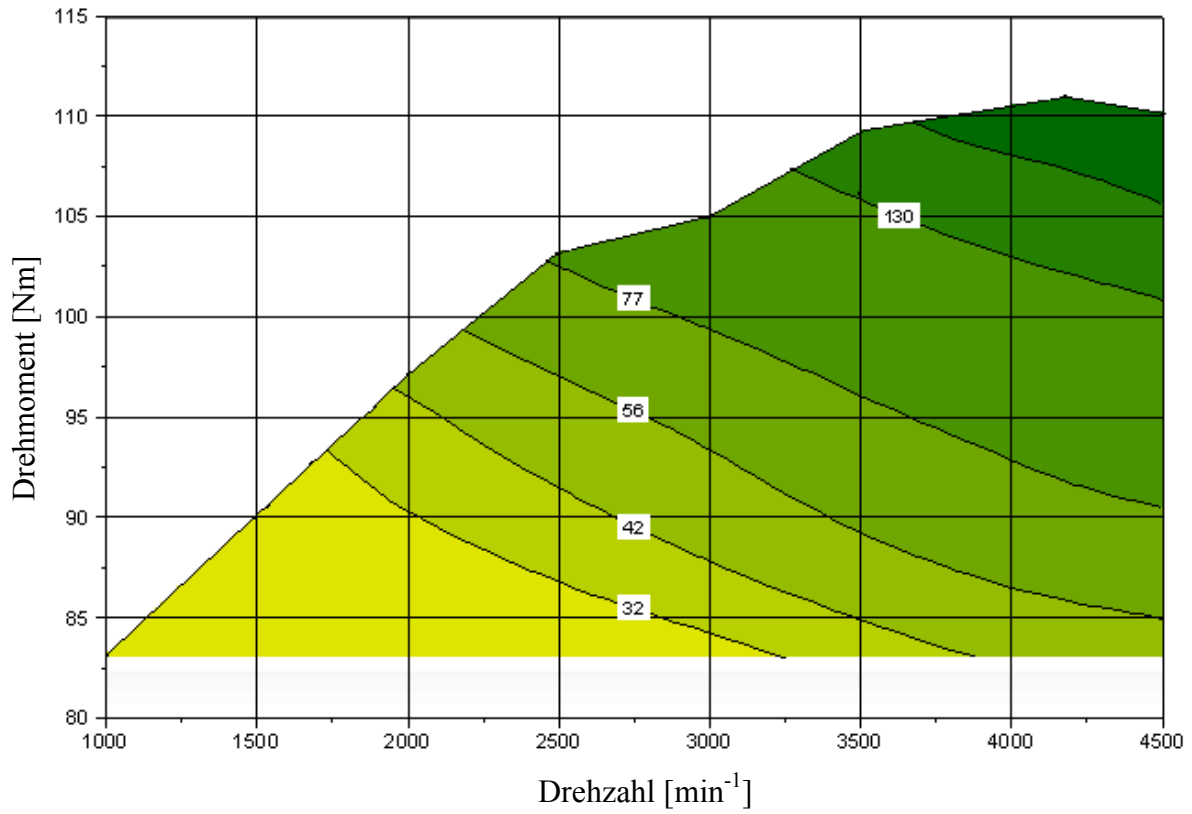


$$P_{e\text{max}} = 53 \text{ kW bei } 4500 \text{ min}^{-1}$$

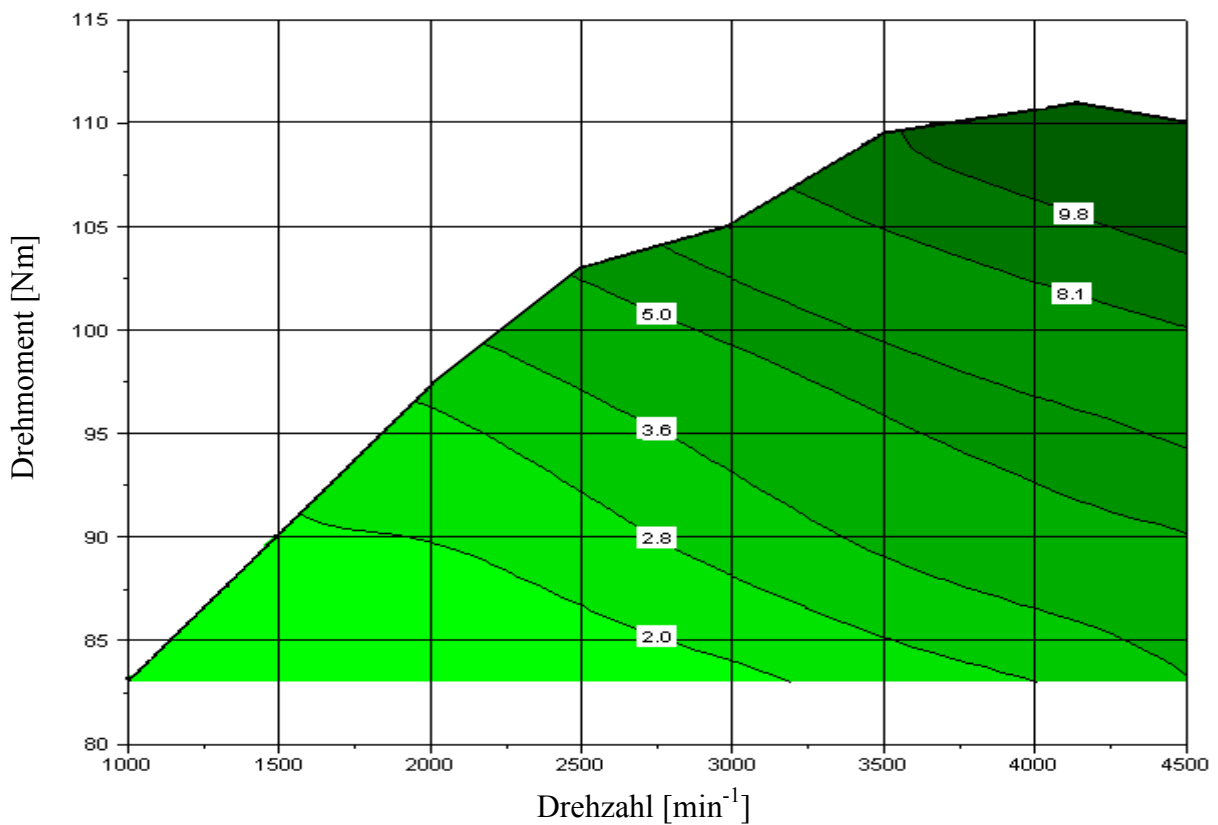
$$M_{d\text{max}} = 111 \text{ Nm bei } 4200 \text{ min}^{-1}$$

Motorenkennfelder des Motors FA-Modell /47/

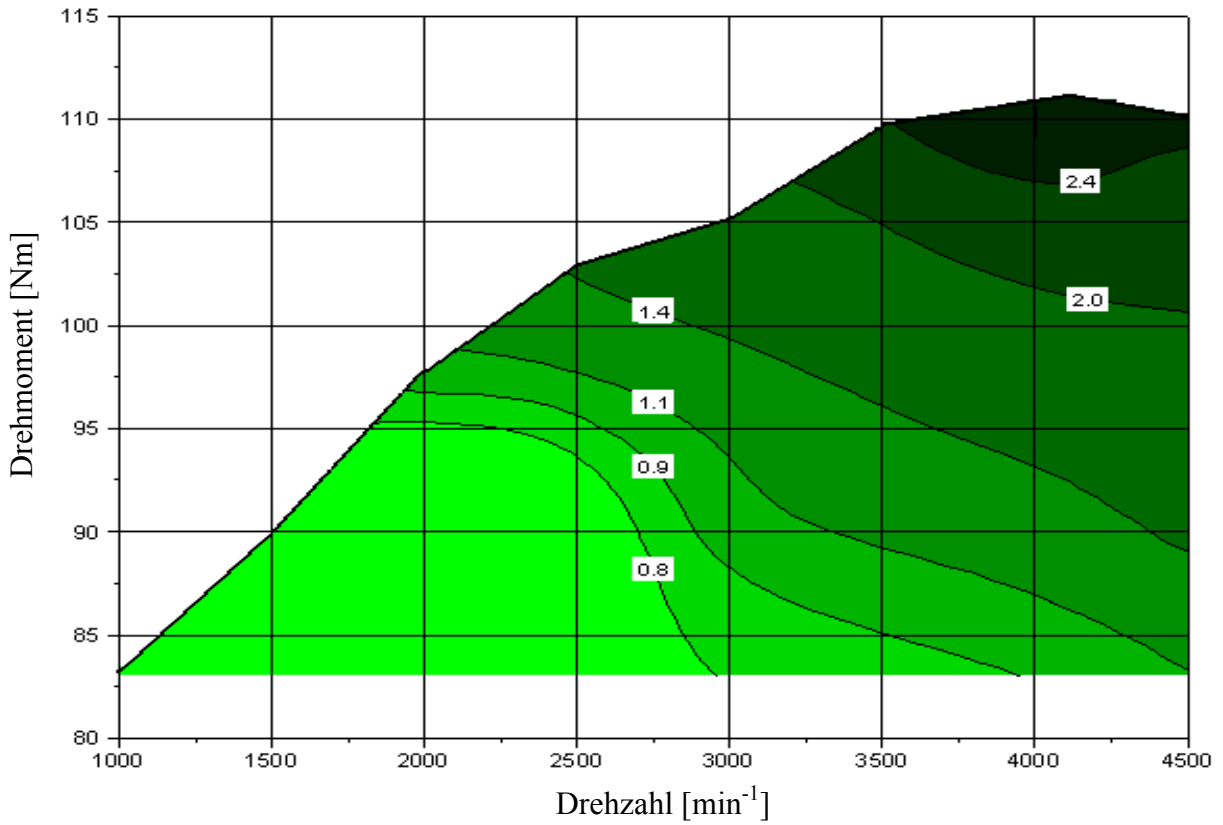
- **Kraftstoffverbrauchskennfeld b_e [g/kWh]**



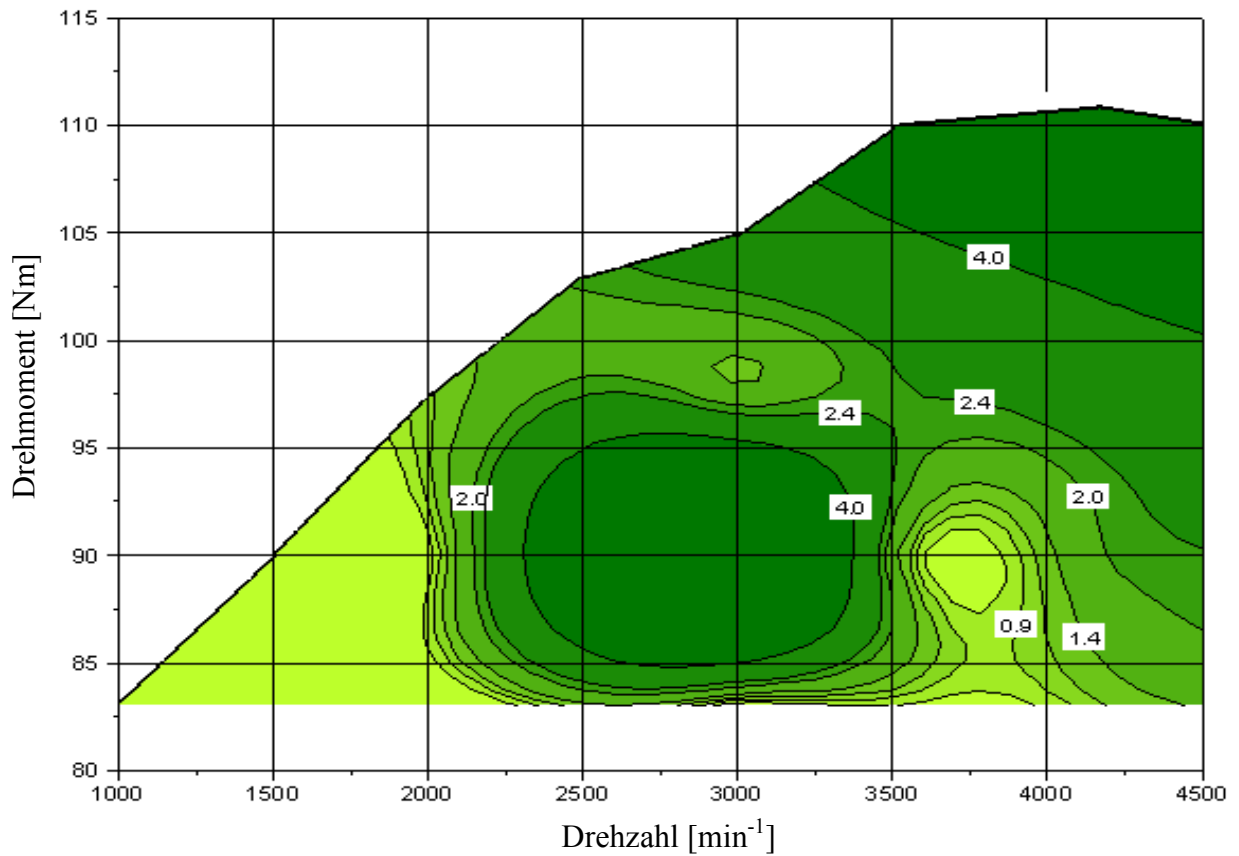
- **CO-Kennfeld [g/kWh]**



• **HC-Kennfeld [g/kWh]**



• **NO_x-Kennfeld [g/kWh]**



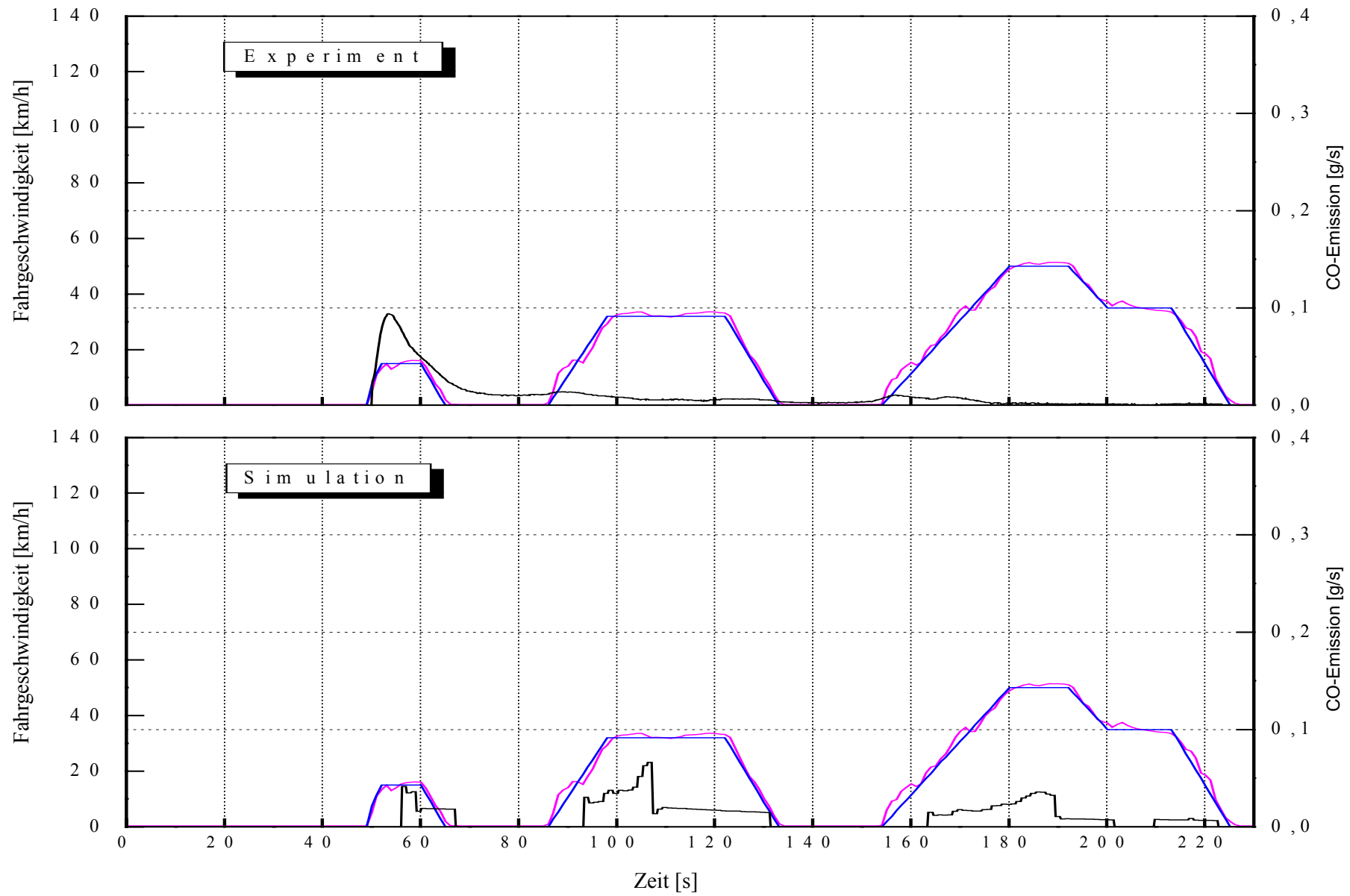


Abb. A3.16: Analyse der Zugkraft während des NEFZ Zyklus

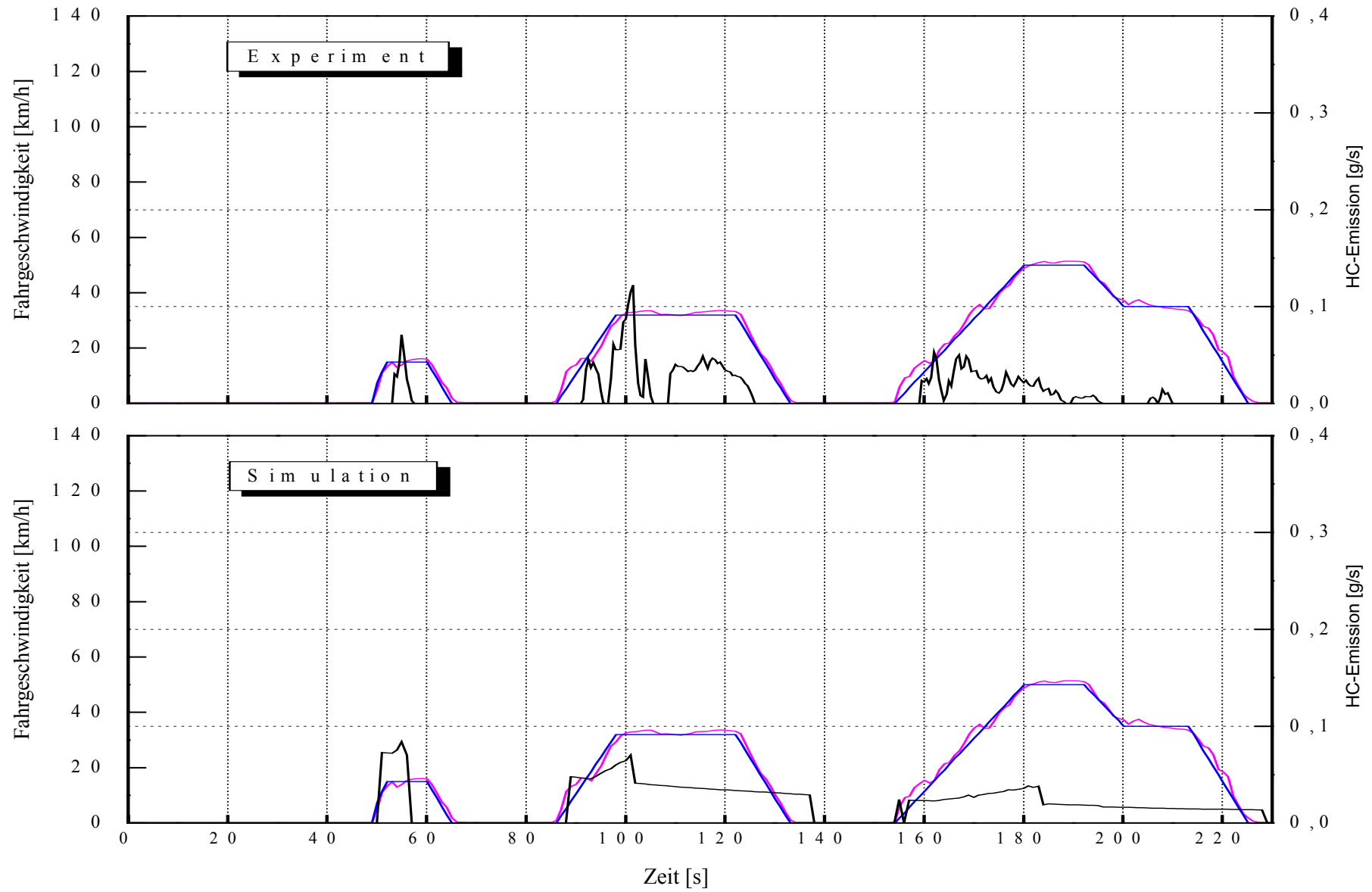


Abb. A3.17: Analyse der Zugkraft während des NEFZ Zyklus

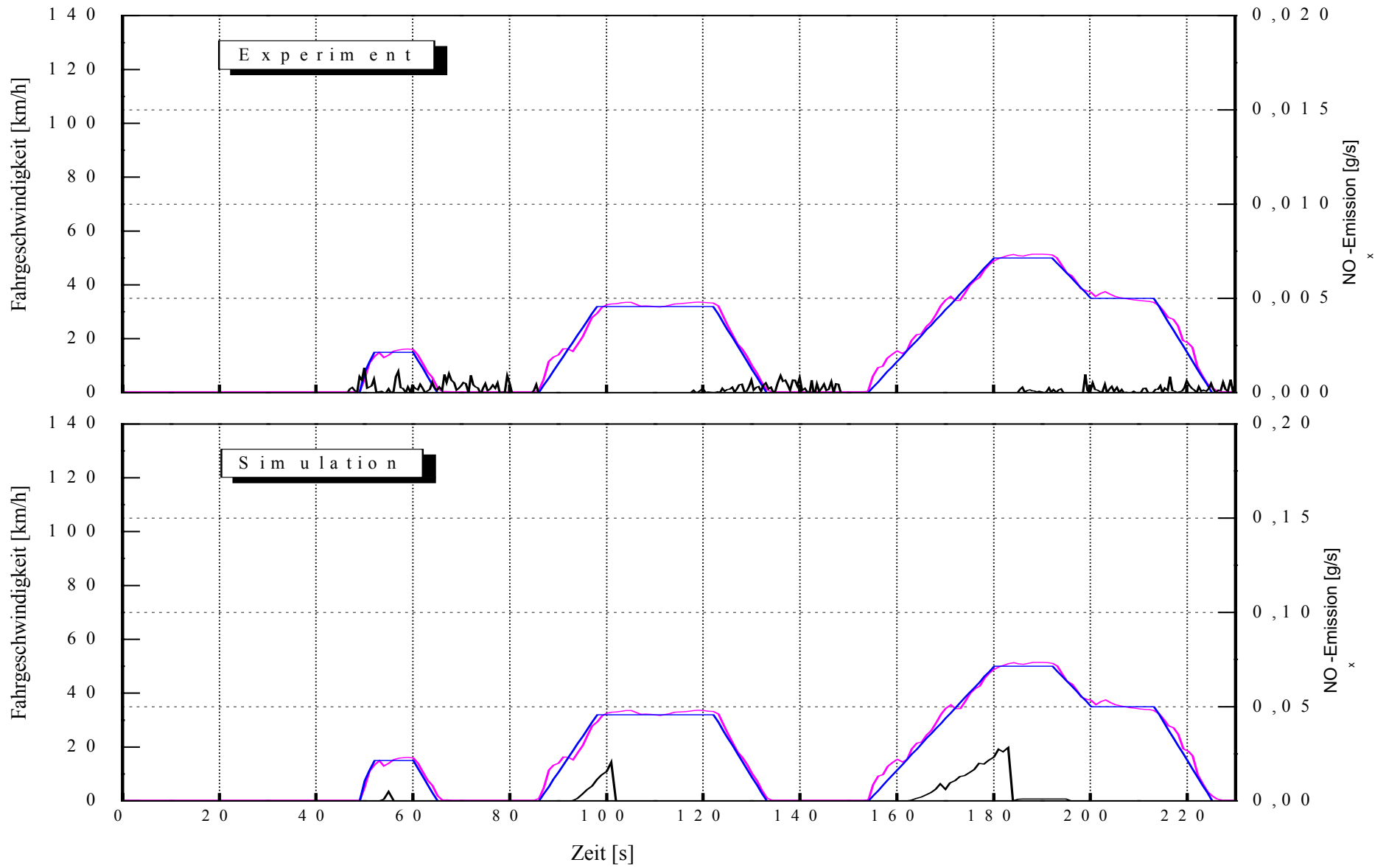


Abb. A3.18: Analyse der Zugkraft während des NEFZ Zyklus

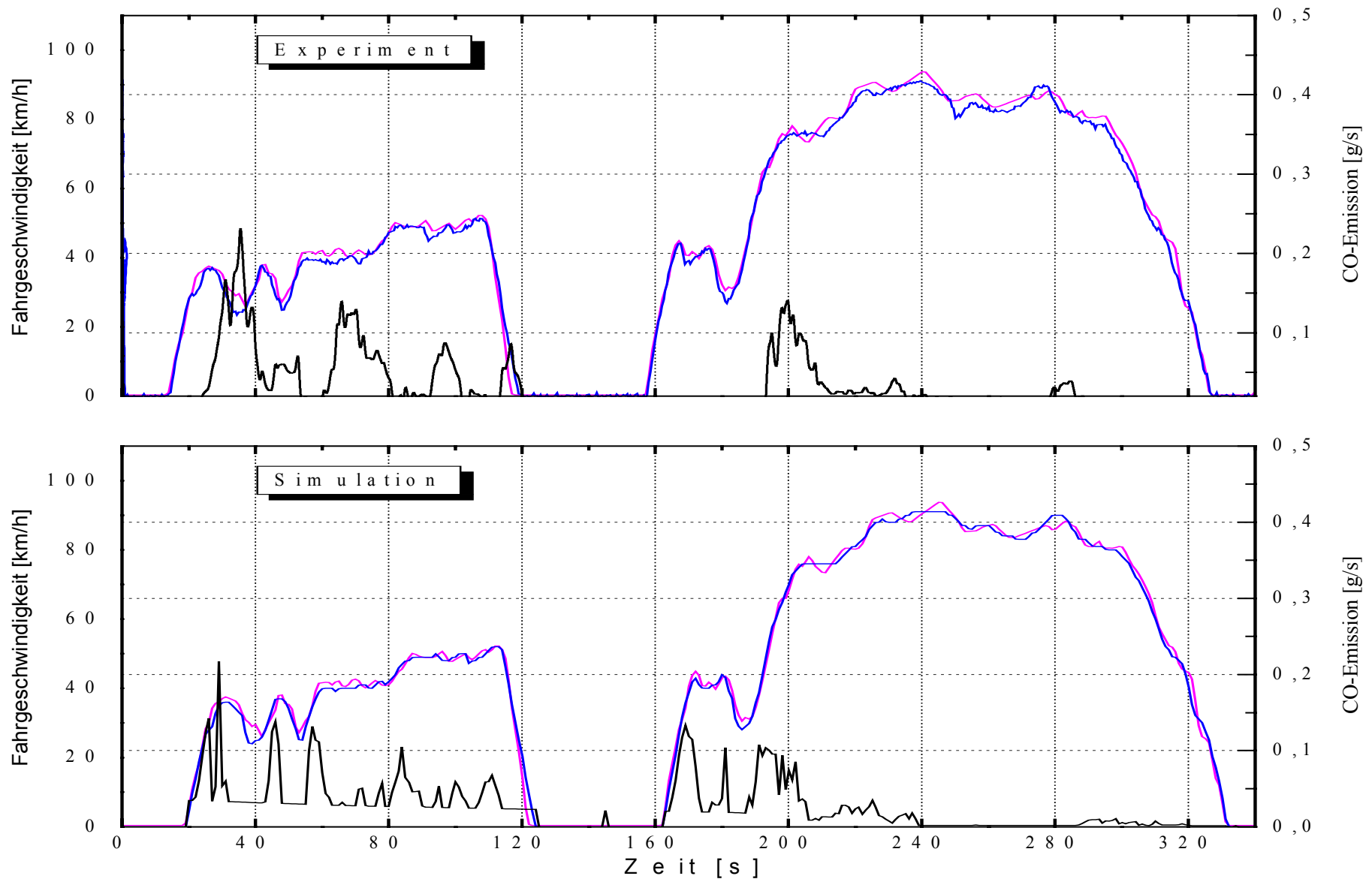


Abb. A3.19: Analyse der Zugkraft während des FTP 75 Zyklus

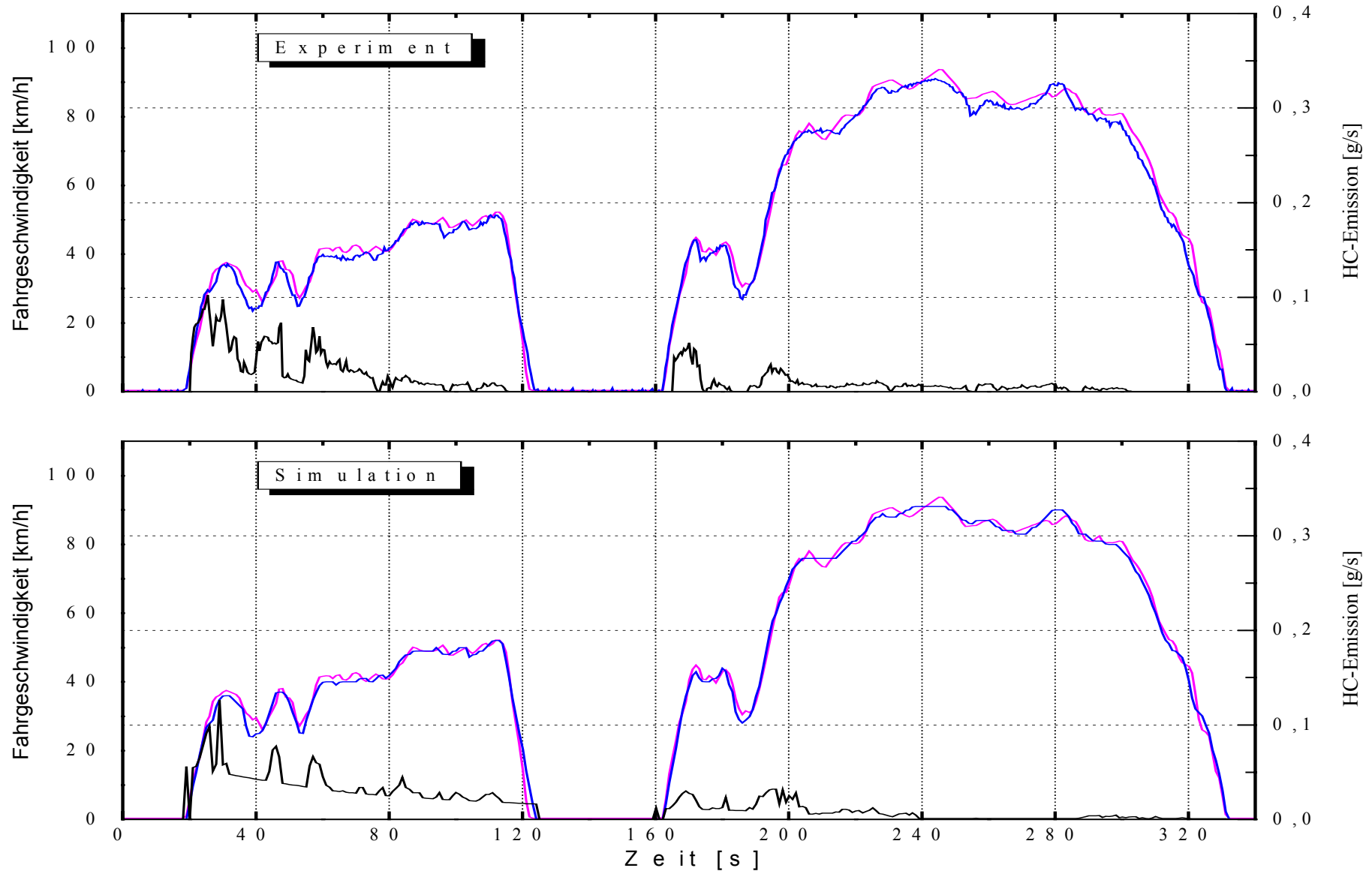


Abb. A3.20: Analyse der Zugkraft während des FTP 75 Zyklus

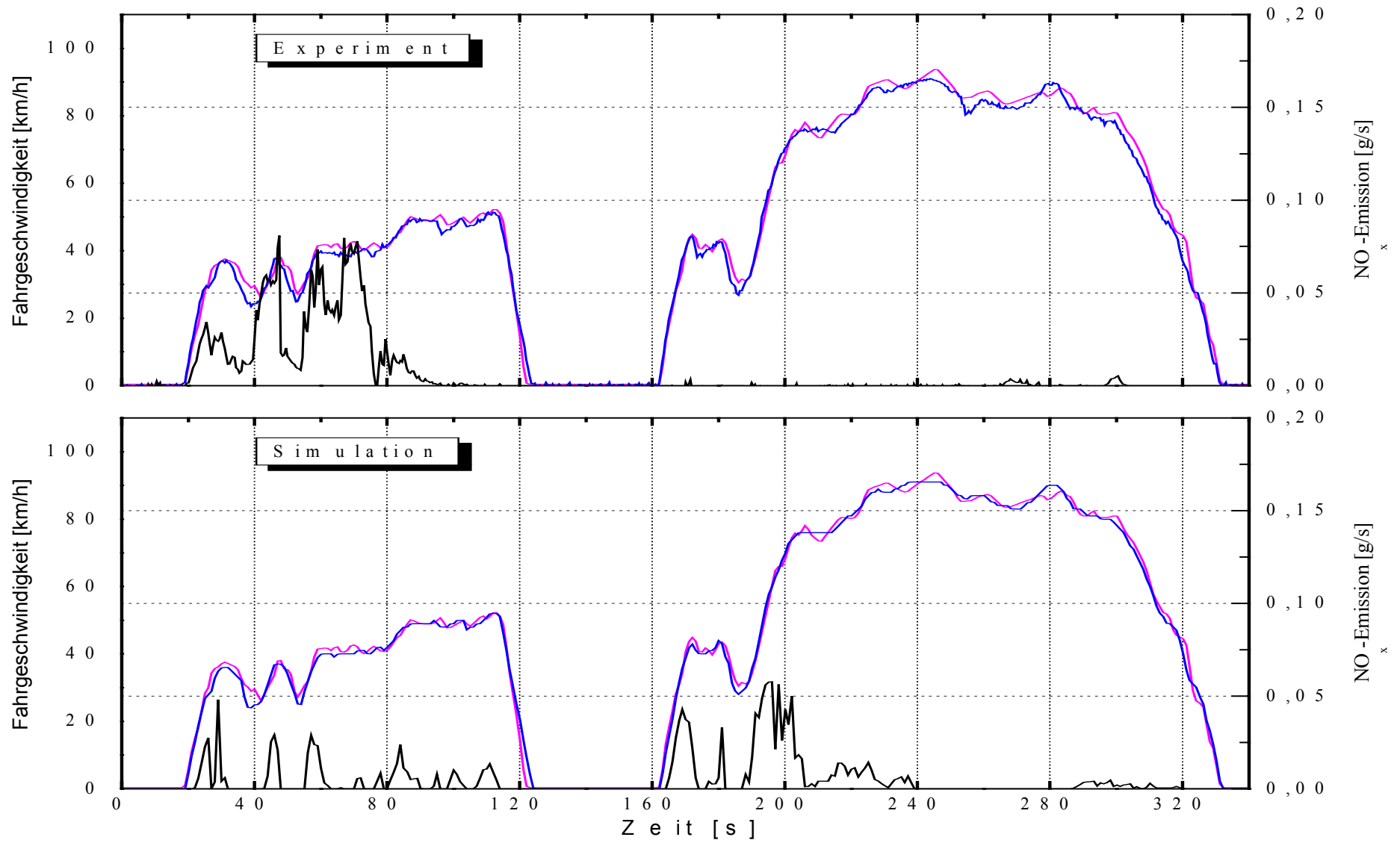


Abb. A3.21: Analyse der Zugkraft während des FTP 75 Zyklus

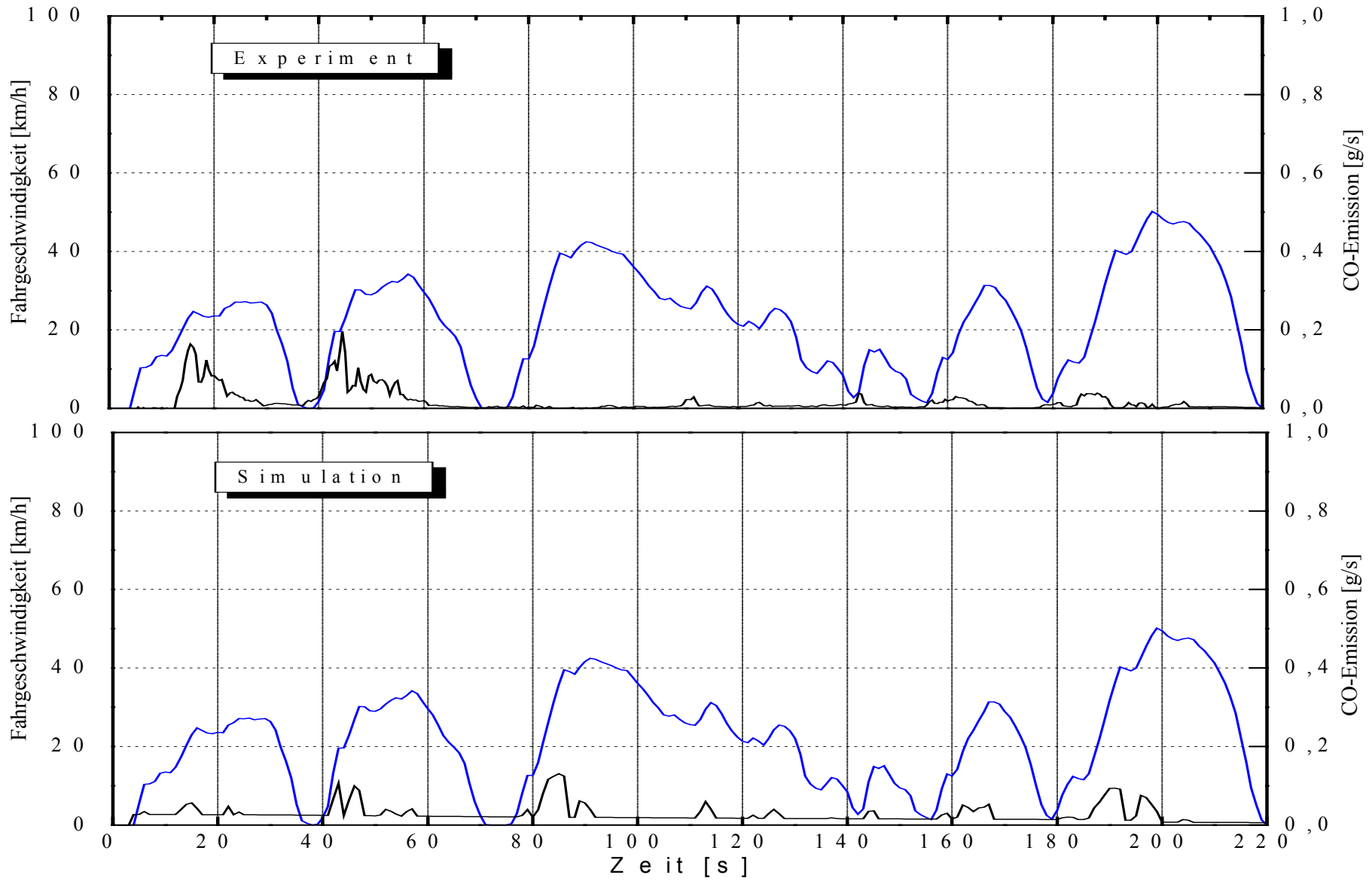


Abb. A3.22: Analyse der Zugkraft während des Dresden Zyklus

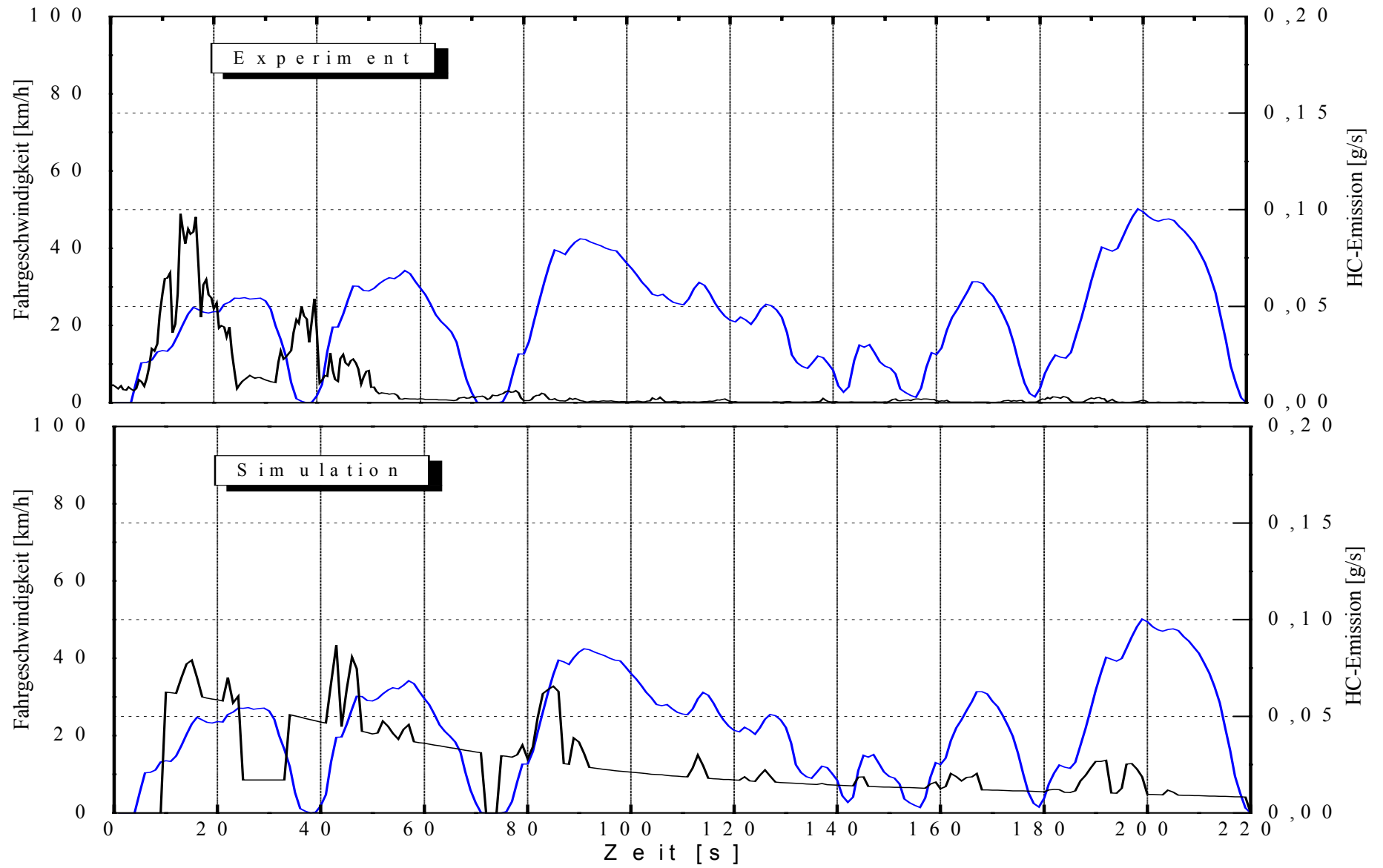


Abb. A3.23: Analyse der Zugkraft während des Dresden Zyklus

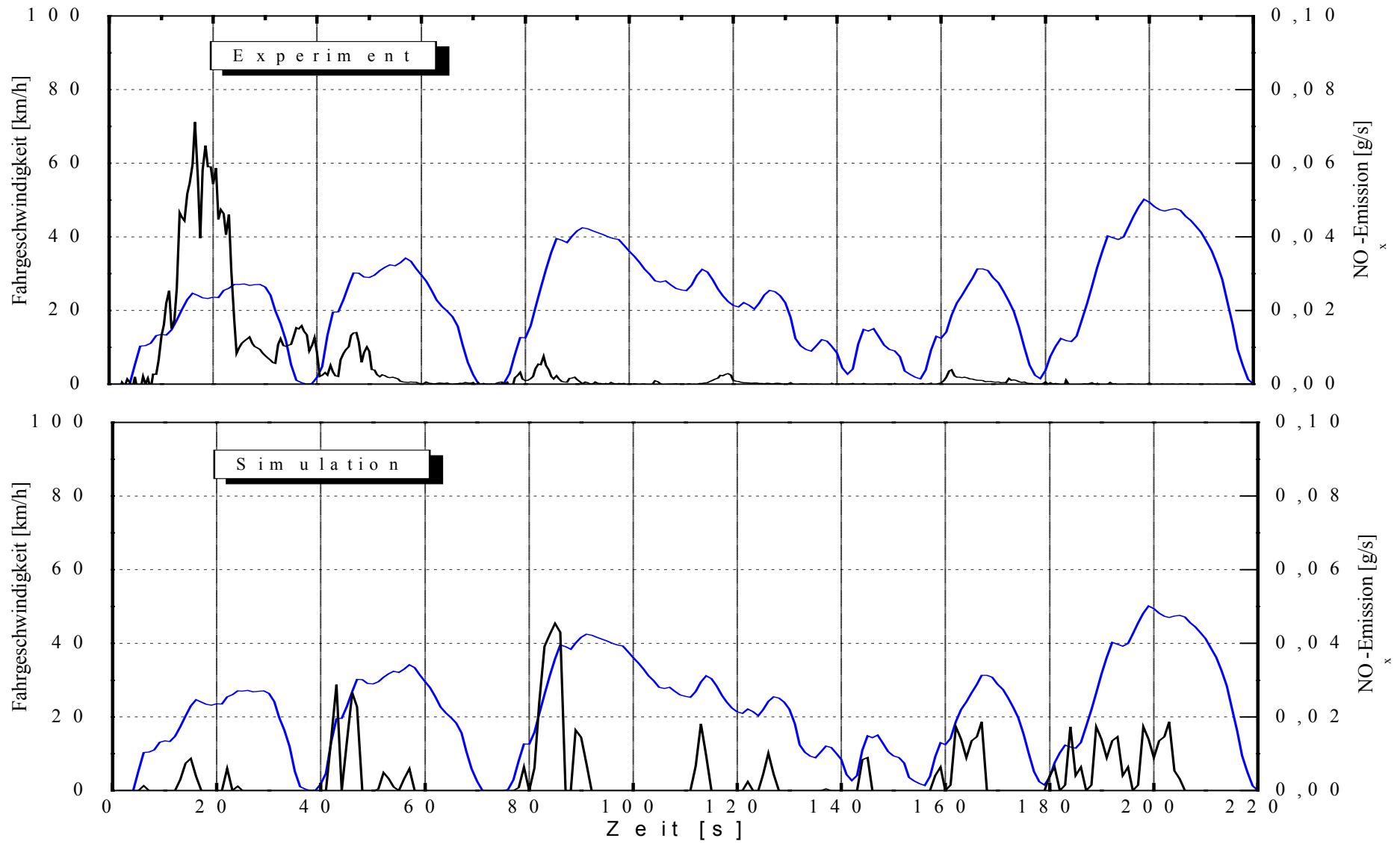


Abb. A3.25: Analyse der Zugkraft während des Dresden Zyklus

ANLAGE A4
Simulationsprogramm

A4 Simulationsprogramm

A4.1 Beschreibung des Simulationsprogramms

Das Simulationsprogramm des Spezialfahrzeuges wurde aus Modellen von „MATLAB“ und „SIMULINK“ erstellt (siehe Abb. A4.1). Es ist für die schnelle Analyse des Verhaltens des Fahrzeuges und des Kraftstoffverbrauchs von selbstfahrenden Anhänger entworfen worden. Das Simulationsprogramm liefert auch eine Grundlage für die detaillierte Simulation und die Analyse des selbstfahrenden



Abb. A4.1: Eingangsmaske des Simulationsprogramms des selbstfahrenden Anhängers

Anhängers (Reifenschlupf). Mithilfe des Simulationsprogramms kann die Untersuchung der Auswirkungen von Regelstrategie auf die Abgasemissionen und den Kraftstoffverbrauch sowie anderer Parameter durchgeführt werden. Das vorliegende Simulationsprogramm ermöglicht die Betrachtung einer beliebigen Simulationsfahrt eines landwirtschaftlichen Anhängers. Dabei lässt sich die Anhängerkonfiguration je nach Einsatzzweck neu zusammenstellen. Dieses ist durch eine Auswahl vorhandener Baugruppen, wie den Verbrennungsmotor, das Schaltgetriebe, Hinterachse und Reifen aus den Datenbanken möglich.

In Abb. A4.2 sind alle Eingangsparameter zur Beschreibung des Anhängers in einer MATLAB - Datei übersichtlich dargestellt. Hier werden über die Menüpunkte die einzelnen MATLAB - Dateien der Anhängererelemente aufgerufen (z. B. Anhängerdaten, Verbrennungsmotor). Über den Menüpunkt „Blockdiagramm“ besteht die Möglichkeit alle verwendeten MATLAB – SIMULINK - Blockdiagramme für alle Anhängererelemente einzusehen. Im Menüpunkt „veränderte Geschwindigkeit“ besteht die Auswahl, mit konstanter oder veränderlicher Geschwindigkeit zu simulieren. Im Weiteren besteht die Möglichkeit verschiedene Fahrzyklen zu definieren. Über ein zusätzliches Fenster können die vorgegebenen Steigungen des Streckenprofils bei konstanter Geschwindigkeit ausgewählt werden.



Abb. A4.2: Hauptmaske des Simulationsprogramms

Die Abb.A4.3 zeigt beispielhaft wesentliche Eingangsparameter der Anhängersimulation für den Simulationsablauf im zu definierenden Fahrzyklus. Weitere Informationen zur Simulation liegen in MATLAB-Dateien vor. Nach Abschluss der Simulationsrechnung des selbstfahrenden Anhängers werden alle wichtigen Ergebnisse wie Reifenschlupf, Zugkraft am Rad, Kraftstoffverbrauch, CO-Emission, HC-Emission, NO_x-Emission und Partikel grafisch oder tabellarisch angezeigt.



Abb. A4. 3: Fenster der Randbedingungen zur Anhängersimulation

Die Simulationsschrittweite beträgt konstant eine Sekunde. Dabei können die Grafiken als digitale Datei vom „MATLAB COMMAND WINDOWS“ abgespeichert werden. Die wesentlichen Ergebnisse der Simulation werden in Abb. A4.4 angezeigt.

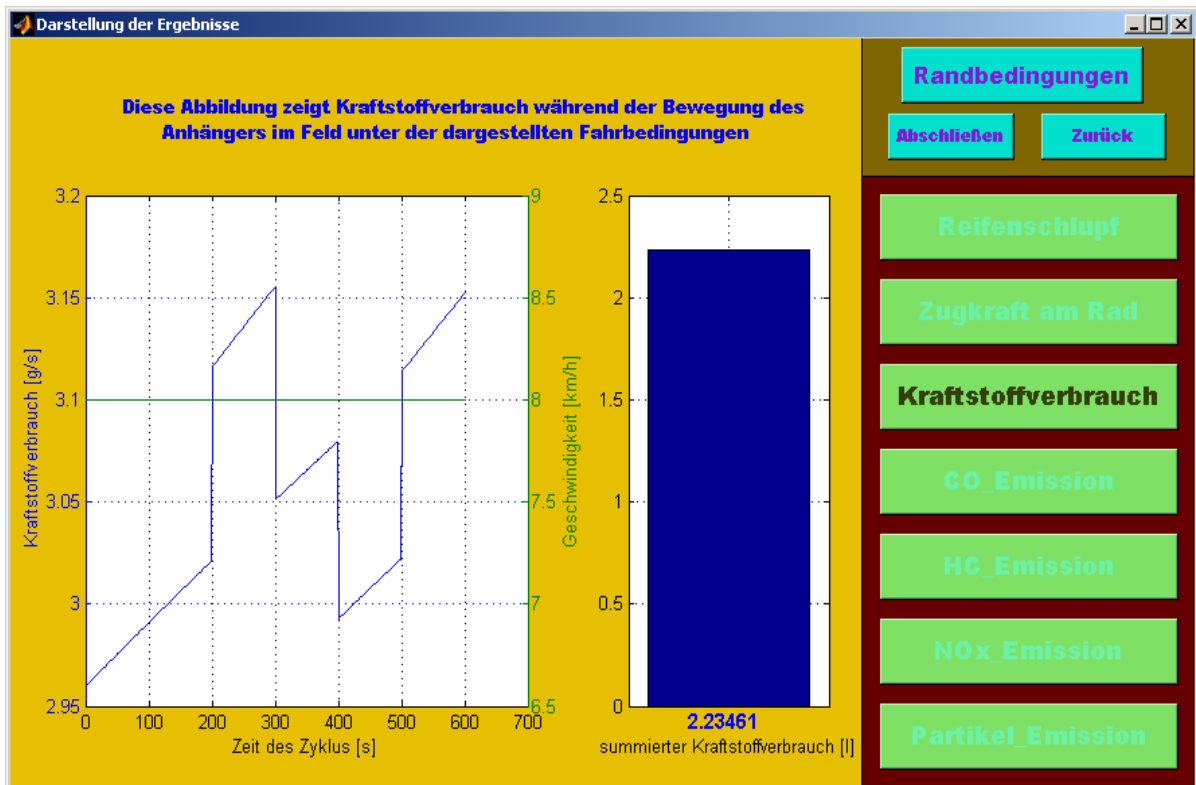


Abb. A4.4: Darstellung der Ergebnisse des Simulationsprogramms

A4.2 MATLAB - Dateien des Simulationsprogramms

Die folgenden MATLAB - Dateien sind für ein Exemplar Versuchsfahrzeug (Selbstfahrender Traktoranhänger) erstellt. Die MATLAB - Dateien stellen die Gleichungen und die Werte der verschiedenen Variablen des selbstfahrenden Traktoranhängers dar. Die Dateien zeigen die Beschreibung von Antriebskonzepte (Allgemeiner Anhänger, Fahrzyklus, Verbrennungsmotor, Antriebsstrang und Antriebsräder).

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function Anhaenger(action)
%addpath('c:\MATLAB\Haenger')
%addpath('C:\MATLABR12\work\Anhaenger')
%which Haenger;
global Hinf
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if nargin==0
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
dir2add={'\Anh_speichern';...
        '\Reifen';...
        '\Antriebsstrang';...
        '\Verbrennungsmotor';...
        '\Bilder';...
        '\Anhaengermodell'};
dir2add=lower(dir2add);
    Anhaenger_dir=lower(strrep(which('Anhaenger'),' \Anhaenger.m',''));
    p=lower(path);
    % end
    %checking and adding paths as necessary.
    path_added=0;
    for i=1:length(dir2add)
        temp=findstr([Anhaenger_dir dir2add{i}],p);
        if isempty(temp)
            addpath([Anhaenger_dir dir2add{i}])
            path_added=1;
        end
    end

    end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
temp=findstr(Anhaenger_dir,p);

    if isempty(temp)
        addpath(Anhaenger_dir)

% add the main directory if it isn't already in there

        path_added=1;
    end
        p=lower(path);

    end
%checking and adding paths as necessary.
% path_added=0;
% for i=1:length(Anhaenger_path)
% temp=findstr([Anhaenger_dir Anhaenger_path{i}],T);
% if isempty(temp)
% addpath([Anhaenger_dir Anhaenger_path{i}])
% path_added=1;
% figure_tags={'Anhaenger_figure'};
for i=1:size(figure_tags)
    if ~isempty(findobj('tag',figure_tags{i}))
        figure(findobj('tag',figure_tags{i}));
        return
    end
end
end

```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%555
% hwait=waitbar(0,'Please wait ----> Mohamed Ahmed');
%try
% waitbar(10)
%end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%55
AnhFig
%end
%end
%temp=findstr(Anhaenger_dir,T);
f=[1:1:600]';
%if isempty(temp)
% addpath(Anhaenger_dir) % add the main directory if it isn't already
% in there
% path_added=1;
%end
function fig = AnhFig()
%load AnhFig

if get(0,'screensize')==[1 1 1024 768]
posfig=[350 150 581 465];
else
posfig=[100 50 581 465];
end

h0 = figure('Color',[1 1 1], ...
'FileName','C:\MATLABR12\work\Anhaenger\Anhaenger.m', ...
'MenuBar','none', ...
'NumberTitle','off', ...
'Position',posfig,...
'PaperUnits','points', ...
'Renderer','zbuffer', ...
'RendererMode','manual', ...
'Tag','Anh_figure', ...
'ToolBar','none');
% 'Colormap',mat0, ...
%h0 = figure('Color',[1 1 1], ...
% 'Name',' Advisor ', ...
% 'Position',posfig,...
% 'MenuBar','none',...
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
AnhFigHandle=gcf;
set(AnhFigHandle,'Name',['
des Anhänger ])]); %((( Simulationsmodell
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
h1 = axes('Parent',h0, ...
'Units','pixels', ...
'Position',[0 0 581 485]);
picture=imread('Anh1.bmp'); %read in picture
image(picture);
set(h1,'Visible','off');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[1 1 1], ...
'FontName','Time new roman', ...
'FontSize',10, ...
'FontWeight','bold',...
'ForegroundColor',[0.0 0 1], ...
'ListboxTop',0, ...
'Position',[ 252 302 130 22], ...
'String',' Selbstfahrender Anhänger ', ...
'Style','text', ...
'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[1 1 1], ...
'FontName','Time new roman', ...
'FontSize',10, ...
'FontWeight','bold',...
'ForegroundColor',[0.0 0 1], ...
'ListboxTop',0, ...
'Position',[ 252 277 130 22], ...
'String',' Traktor mit Anhänger ', ...
'Style','text', ...

```

```

    'Tag','StaticText1');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Units','points', ...
    'Callback','close(gcf);AnhFigZ;TW', ...
    'FontName','Arial Black', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[ 400 285 12 10], ...
    'Style','Checkbox', ...
    'Tag','554', ...
    'Value',0);
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Units','points', ...
    'Callback','Nantrieb1', ...
    'FontName','Arial Black', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[ 400 313 12 10], ...
    'Style','Checkbox', ...
    'Tag','554', ...
    'Value',0);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[ 0 0.696254 0.79725], ...
    'Callback','close(gcf);BD', ...
    'FontName','Time New Roman', ...
    'FontSize',12.5, ...
    'FontWeight','bold',...
    'ForegroundColor',[1 0 0.58], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[ 337 190 92 27 ], ...
    'String','Eingang', ...
    'Tooltipstring','Hallo, kommt bitte rein',...
    'Tag','Pushbutton2');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 0], ...
    'FontName','Arial Black', ...
    'FontSize',11, ...
    'ForegroundColor',[0 0 0], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[ 270 35 90 25 ], ...
    'String','HTW Dresden', ...
    'Tooltipstring',' Es wurde durch >>>> Mohamed Ahmed <<<< aufgebaut',...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 0], ...
    'FontName','Arial Black', ...
    'FontSize',9, ...
    'ForegroundColor',[0 0 0], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[ 220 15 200 25 ],...
    'String','Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik', ...
    'Tooltipstring',' Es wurde durch >>>> Mohamed Ahmed <<<< aufgebaut',...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 0], ...
    'FontName','Arial Black', ...
    'FontSize',11, ...
    'ForegroundColor',[0 0 0], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[ 70 35 90 25 ], ...
    'String','TU Dresden', ...
    'Tooltipstring',' Es wurde durch >>>> Mohamed Ahmed <<<< aufgebaut',...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');

h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 0], ...
    'FontName','Arial Black', ...

```

```

        'FontSize',9, ...
        'ForegroundColor',[0 0 0], ...
        'ListboxTop',0, ...
        'Position',[ 50 15 150 25 ], ...
        'String','Fakultät Maschinenwesen', ...
'Tooltipstring',' Es wurde durch >>>> Mohamed Ahmed <<<< aufgebaut',...
'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 0], ...
    'FontName','Arial Black', ...
    'FontSize',14, ...
    'ForegroundColor',[0 0 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[ 40 0 350 25 ], ...
    'String','Simulationsmodell des Anhängers', ...
'Tooltipstring',' Es wurde durch >>>> Mohamed Ahmed <<<< aufgebaut',...
'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');
h2 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.82 0.0696254 0.79725], ...
    'Callback','close(gcf);', ...
    'FontSize',10, ...
    'ForegroundColor',[1 1 0.58], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[ 337 129.4 68 25], ...
    'String','Abschließen', ...
    'Tag','Pushbutton2');

%Mohamed Ahmed
%h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
%    'BackgroundColor',[1 1 0.5], ...
%    'FontName','arial black', ...
%    'FontSize',20, ...
%    'ForegroundColor',[0 0.5 0.125], ...
%    'HorizontalAlignment','left', ...
%    'ListboxTop',0, ...
%    'Position',[107 53.4 20 44], ...
%    'String','', ...
%    'Style','text', ...
%    'Tag','StaticText1');
%Mohamed Ahmed
%h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
%    'BackgroundColor',[1 1 0.5], ...
%    'FontName','arial black', ...
%    'FontSize',45, ...
%    'ForegroundColor',[0 0.5 0.125], ...
%    'HorizontalAlignment','left', ...
%    'ListboxTop',0, ...
%    'Position',[30 386 140 70], ...
%    'String','', ...
%    'Style','text', ...
%    'TooltipString','Simulation Vehicle Program', ...
%    'Tag','StaticText1');

%Mohamed Ahmed
%h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
%    'BackgroundColor',[1 1 0.5 ], ...
%    'FontName','arial black', ...
%    'FontSize',22, ...
%    'ForegroundColor',[0 0.5 0.125], ...
%    'HorizontalAlignment','left', ...
%    'ListboxTop',0, ...
%    'Position',[243.9 54.9 16 44], ...
%    'String','', ...
%    'Style','text', ...
%    'Tag','StaticText1');
%Mohamed Ahmed
%h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
%    'BackgroundColor',[1 1 0.5], ...
%    'FontName','arial black', ...
%    'FontSize',22, ...
%    'ForegroundColor',[0 0.5 0.125], ...
%    'HorizontalAlignment','left', ...
%    'ListboxTop',0, ...
%    'Position',[356.45 54.6 20 44], ...

```


A4.3 Kennfelder des im Spezialfahrzeug eingesetzten Dieselmotors

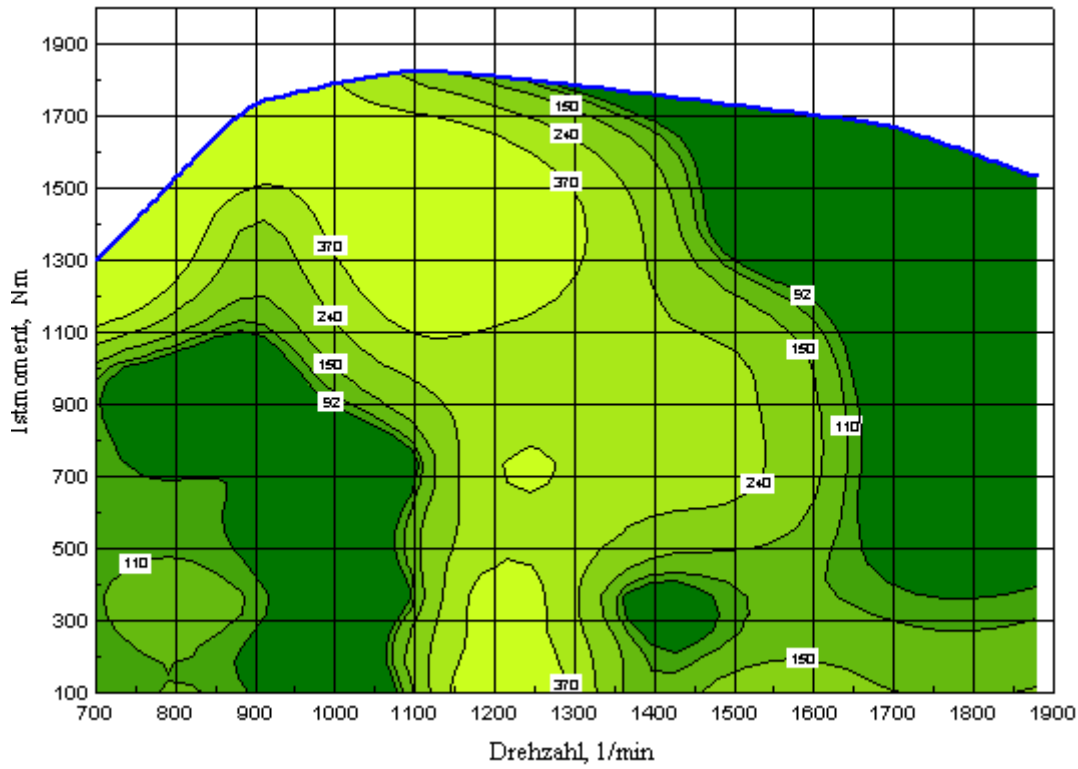


Abb. A4.5: Kohlenmonoxid-Emission (ppm)

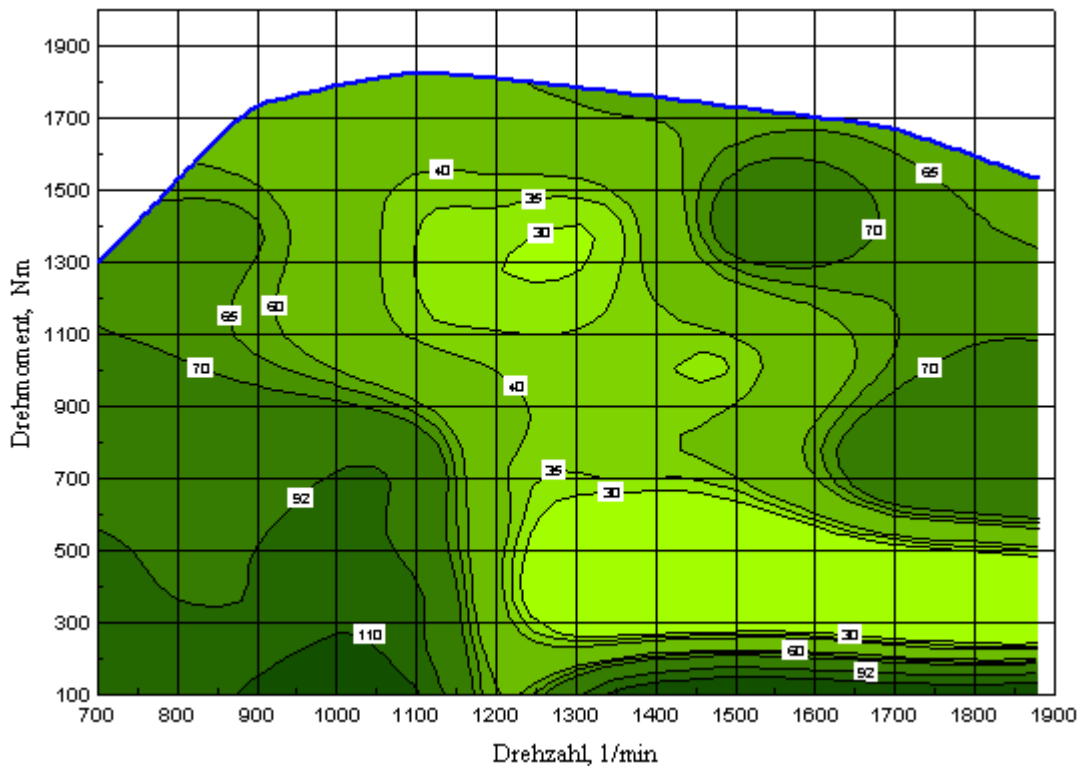


Abb. A4.6: Kohlenwasserstoff-Emission (ppm)

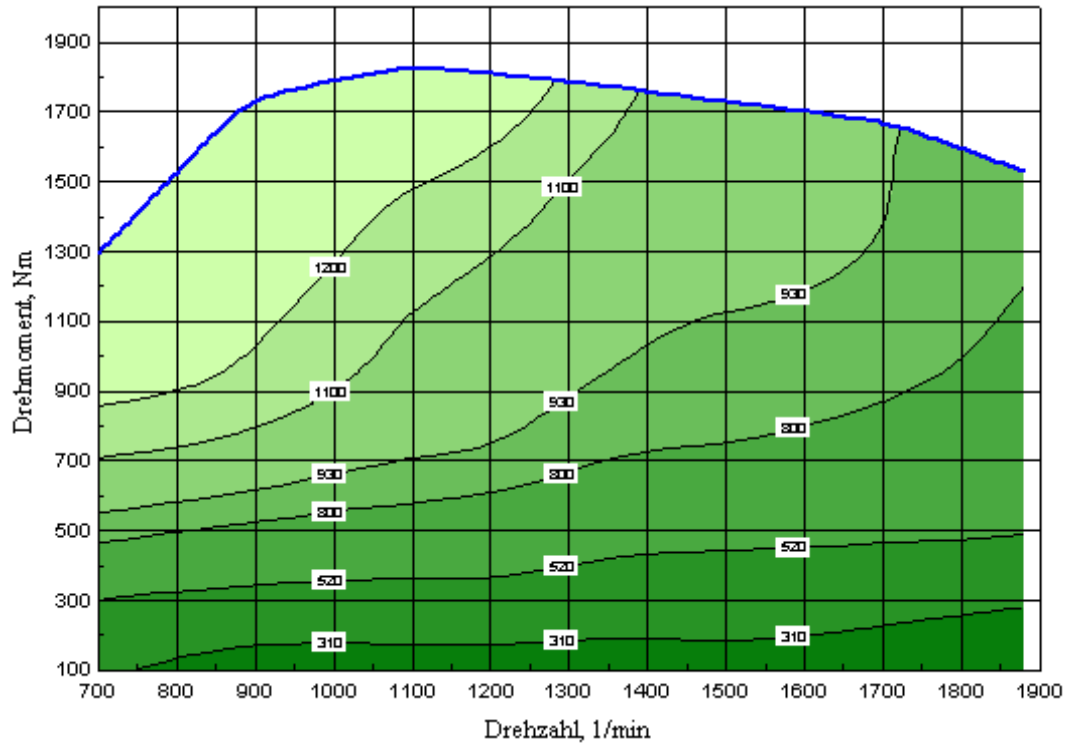


Abb. A4.7: Stickoxid-Emission (ppm)

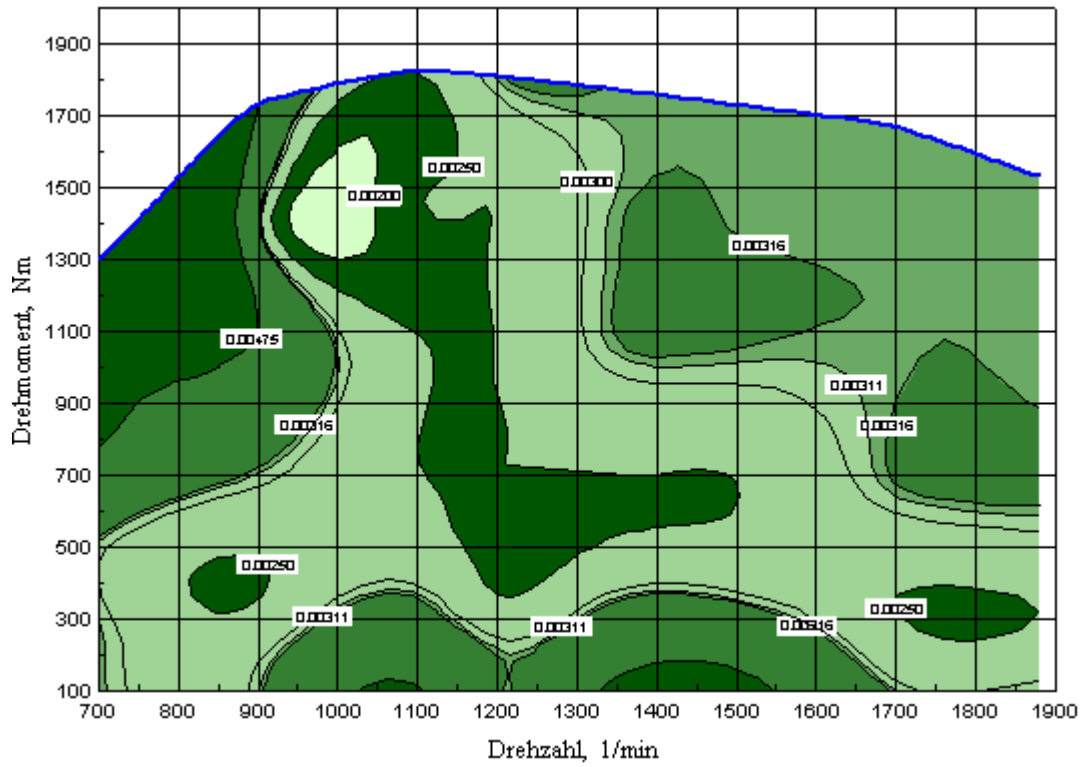


Abb. A4.8: Partikel-Emission (g/m^3)

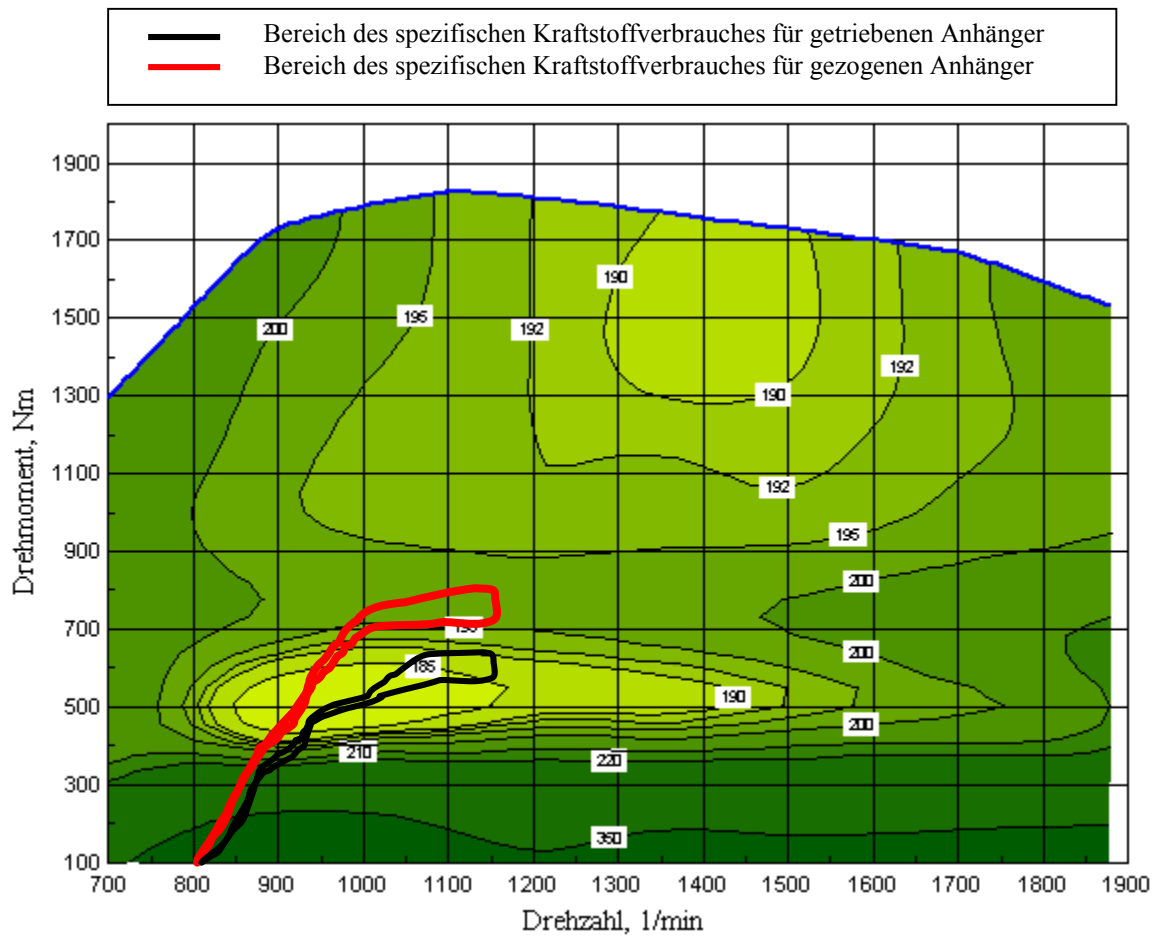


Abb. A4.9: Spezifischer Kraftstoffverbrauch (g/kWh)

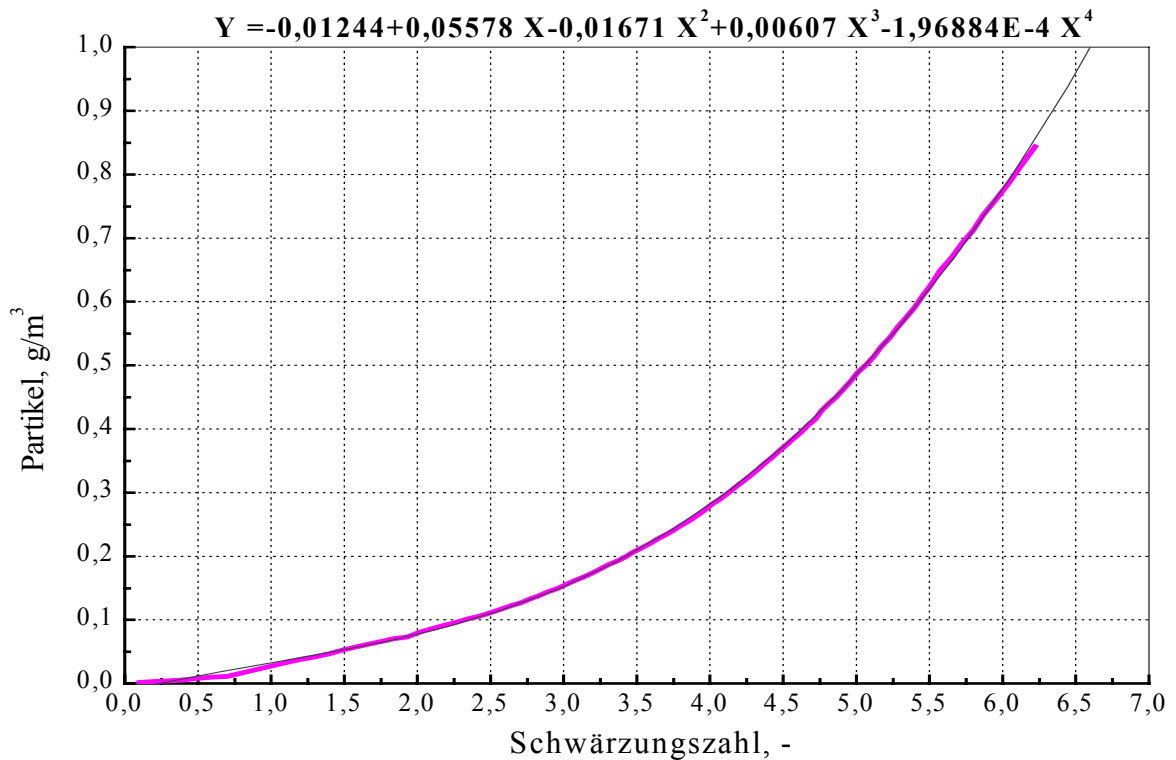


Abb. A4.10: Partikel-Emission gegen Schwärzungszahl /79/