



Stefan Beringer, BSc

Elektrisches Katalysatorheizen am Wasserstoff-Verbrennungsmotor

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichseder
Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme

Zweitbetreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Eberhard Schutting
Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme

Dipl.-Ing. Sebastian Roiser, BSc
Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme

Graz, Februar 2023

Vorwort

Diese Arbeit entstand am ITnA (Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme) im Fachbereich Antriebssysteme. Im Verlauf früherer Forschungen am Institut bezüglich der Wasserstoff-Verbrennungskraftmaschine, zeigte sich die Notwendigkeit eines raschen Anspringens der Abgaskatalysatoren. Aus diesem Hintergrund entwickelte sich die Idee, den elektrischen Heizkatalysator als Thermomanagement-Maßnahme an der Wasserstoff-VKM zu untersuchen.

Zuallererst möchte ich mich beim Vorstand des ITnA, Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder, für die Möglichkeit, dieses spannende Thema im Rahmen meiner Masterarbeit untersuchen zu dürfen, herzlich bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meinen beiden Betreuern Sebastian Roiser und Eberhard Schutting, die mich sowohl zwischenmenschlich, als auch fachlich zu jedem Zeitpunkt in allen Belangen bestmöglich unterstützten. Darüber hinaus möchte ich mich auch für die gute Zusammenarbeit in den Zeiten meiner Anstellung als studentischer Projektmitarbeiter bedanken.

Zusätzlich möchte ich allen Büro- und Prüfstandmitarbeitern für die persönlichen und fachlichen Diskussionen, sowie die Hilfeleistungen bei etwaigen Schwierigkeiten, meinen Dank aussprechen.

An dieser Stelle möchte ich auch die Möglichkeit nutzen, mich bei meinen Eltern herzlich zu bedanken, welche mir das Studium an der TU Graz überhaupt erst ermöglicht haben.

Zuallerletzt möchte ich mich noch bei meiner lieben Freundin für die Unterstützung, insbesondere im Masterstudium, bedanken.

Kurzfassung

Zur Reduktion von Treibhausgasen ist die Entwicklung neuer Antriebstechnologien von großer Bedeutung. Die Wasserstoff-VKM bietet diesbezüglich ein hohes Potential, wenngleich die innermotorische Verbrennung von H_2 mit der Bildung von Schadstoffen, insbesondere Stickoxiden, einhergeht. Herkömmliche Katalysatorsysteme zeigten bei deren Reduktion im Rahmen von Forschungsprojekten vielversprechende Konvertierungsraten, allerdings ist zur Einhaltung zukünftiger Abgasgesetzgebungen ein rasches Anspringen nach Kaltstart notwendig. Ohne dezidierte Maßnahmen ist dies nur schwer zu bewerkstelligen, was ein entsprechendes Thermomanagement erforderlich macht.

Im Rahmen dieser Arbeit soll die elektrische Katalysatorheizung als Thermomanagementmaßnahme untersucht und bewertet werden. Dazu wird zuerst ein thermisches Simulationsmodell erstellt, mit welchem eine Untersuchung und Bewertung geeigneter Betriebsstrategien erfolgt. Diese werden im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse hinsichtlich NO_x -Konvertierung und Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch untersucht und bewertet. Parallel dazu wird eine Untersuchung und Auswahl geeigneter Regelstrategien vorgenommen. Die Erweiterung der Simulation um ein Energiespeichermodell erlaubt eine konzeptionelle Untersuchung der elektrischen Katalysatorheizung am 12-V-Bordnetz, sowie die Ermittlung des Einflusses auf den Kraftstoffmehrverbrauch. Durch die Kombination einer Lithium-Ionen-Batterie mit einem herkömmlichen Generator ist es möglich, die benötigte Heizenergie- und Leistung bei parallelem Betrieb von Nebenverbrauchern aufzubringen.

Ein weiterer Kernpunkt dieser Arbeit ist die Integration des elektrischen Heizkatalysators ins Abgassystem einer Wasserstoff-VKM am transienten Motorprüfstand. Bei unterschiedlichen Fahrzyklen werden ausgewählte Betriebsstrategien vermessen und analysiert. Dabei kann für alle untersuchten Fahrzyklen eine Steigerung der NO_x -Konvertierung im zweistelligen Prozentbereich erzielt werden. Beim WLTC resultiert dies in Konvertierungsraten von $> 92\%$ und einem NO_x -Ausstoß von $< 5\text{ mg/km}$. Der Einfluss auf den Kraftstoffmehrverbrauch ist stark vom Fahrzyklus abhängig, kann beim WLTC aber im Bereich von knapp unter 10% gehalten werden. Neben der raschen Anhebung des Temperaturniveaus der Katalysatoren in deren Betriebsfenster, kann auch die Eignung des EHCs zum Thermomanagement bei Schubphasen anhand eines Hochlast-Fahrzyklus gezeigt werden. Insgesamt wird im Rahmen dieser Arbeit die hohe Effektivität der elektrischen Katalysatorheizung als Thermomanagement-Maßnahme beim Betrieb an der Wasserstoff-VKM verdeutlicht.

Abstract

The development of new drivetrain technologies is of great importance for the reduction of greenhouse gases. In this matter, the hydrogen ICE offers great potential, although the internal combustion of H_2 comes with the formation of pollutants, in particular nitrogen oxides. In several research projects, conventional catalytic converter systems have shown promising conversion rates. Still, a rapid heat-up after cold start is required to comply with future exhaust gas legislation. Without dedicated measures, this is difficult to achieve, making thermal management a necessity.

Within the scope of this work, the electrical catalyst heating is to be evaluated as a thermal management measure. For this purpose, a thermal simulation model is created, which is used to examine and evaluate appropriate operating strategies. As part of a sensitivity analysis, a strong focus is put on nitrogen oxide conversion and the impact on fuel consumption. At the same time, an investigation and selection of suitable control strategies is carried out. The extension of the simulation by an energy storage model allows a conceptual investigation of the electric catalyst heating in the case of a 12 V vehicle electric system. Additionally, based on this model the influence on fuel consumption can be determined. By combining a lithium-ion battery with a conventional generator, it is possible to generate the required heating energy and power during parallel operation of auxiliary consumers.

Another key point of this work is the integration of the EHC into the exhaust system of a hydrogen ICE on the transient engine test bench. Selected operating strategies are tested and analysed for different driving cycles. An increase in the nitrogen oxide conversion rate in the double-digit percentage range can be achieved for all examined driving cycles. With the WLTC, this results in conversion rates $> 92\%$ and emissions of < 5 mg/km. The influence on fuel consumption heavily depends on the driving cycle, but can be kept in the range of $< 10\%$. In addition to the rapid increase in temperature of the catalytic converters after cold start, the suitability of the EHC for thermal management during coasting can also be demonstrated. Overall, in this work the high efficiency of electric catalyst heating as a thermal management measure when operating in a hydrogen ICE is illustrated.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	xiii
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Wasserstoff als Kraftstoff im Verbrennungsmotor	3
2.1.1 Betrieb und Emissionsverhalten des direkteinblasenden Wasserstoff- Verbrennungsmotors	3
2.1.2 Innermotorische Maßnahmen zur Emissionsreduktion	5
2.1.3 Katalytische Abgasnachbehandlung am Verbrennungsmotor	9
2.2 Thermomanagement	13
2.2.1 Passive Heizmaßnahmen	13
2.2.2 Aktive Heizmaßnahmen	14
2.2.3 Aufbau und Funktion des elektrischen Heizkatalysators	14
2.3 Abgasgesetzgebung	17
2.3.1 Europäische Abgasgesetzgebung	17
2.3.2 Kalifornische/US-Amerikanische Abgasgesetzgebung	20
3 Versuchsaufbau und Betrieb am Wasserstoff-Verbrennungsmotor	23
3.1 Versuchsmotor	23
3.2 Abgassystem	24
3.3 Infrastruktur und Messtechnik	28
3.4 Integration des Heizkatalysators am Motorprüfstand	28
3.5 Fahrzyklen und Testbedingungen	31
3.5.1 Fahrzyklen	31
3.5.2 Testbedingungen	33
3.6 Elektrisches Katalysatorheizen beim transienten Wasserstoff- Verbren- nungsmotor	34
4 Simulationsmodell	37
4.1 Thermische Simulation des Abgassystems	38
4.1.1 Beschreibung des modellierten Abgassystems	38
4.1.2 Thermodynamische Modellierung - Literaturstudie	40
4.1.3 Thermodynamische Modellierung - Vereinfachungen	41
4.1.4 Beschreibung der Simulationsumgebung	44

4.1.5	Benötigte Eingangsgrößen für die Simulation	44
4.1.6	Thermodynamische Modellierung des Heizkatalysators	46
4.1.7	Thermodynamische Modellierung von Leercanning und Abgasrohren	55
4.1.8	NO _x -Konvertierungsmodell	57
4.1.9	Kalibrierung und Validation der Simulation mit Messungen . . .	58
4.2	Energiespeicher-Simulation	61
4.2.1	Bedarfsermittlung	63
4.2.2	Vergleich möglicher Energiespeichersysteme	63
4.2.3	Auslegung der elektrischen Komponenten	65
4.2.4	Literaturstudie Batteriemodellierung	68
4.2.5	Beschreibung des Batteriemodells	70
4.2.6	Generatormodell und Berechnungsblock für die EHC- und Nebenverbraucherleistung	75
4.2.7	Bordnetz- und Leistungsregelung	76
4.2.8	Modell zur Abschätzung des Kraftstoffmehrverbrauchs	77
5	Diskussion der Ergebnisse	79
5.1	Ausgangssituation	79
5.2	Strategiefindung und Auslegung der Heizungsregelung	80
5.2.1	Analyse und Auswahl einer günstigen Heizstrategie	80
5.2.2	Reglerauswahl und Optimierung	83
5.3	Auswirkung der elektrischen Katalysatorheizung auf Temperaturverhalten und Emissionsausstoß	86
5.3.1	Analyse von Temperaturverhalten und NO _x -Konvertierung am transienten Motorprüfstand	86
5.3.2	Analyse weiterer Emissionen	93
5.4	Energiemanagement und Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch . . .	96
5.4.1	Analyse des Energiespeichersystems	96
5.4.2	Einfluss der elektrischen Katalysatorheizung auf den Kraftstoffverbrauch	98
5.4.3	Einfluss des Mehrverbrauchs auf Temperaturniveau und Emissionsverhalten	101
5.5	Untersuchung alternativer Heizstrategien	104
6	Zusammenfassung und Ausblick	107
	Literaturverzeichnis	109
	Anhang	119
A	Berechnung der Harnstoff-Eindosiermenge	119
B	Thermische Simulation	120

C	Batteriemodell	124
D	Eingesetzte Software	127

Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

A	m^2	Fläche
b	mm	Breite, Dicke
b_e	$\text{g}/(\text{kW h})$	effektiver spezifischer Kraftstoffverbrauch
c	$\text{J}/(\text{kg K})$	spezifische Wärmekapazität
c_p	$\text{J}/(\text{kg K})$	spezifische Wärmekapazität bei $p = \text{konst.}$
c_{mp}	$\text{J}/(\text{mol K})$	molare Wärmekapazität bei $p = \text{konst.}$
C	F	elektrische Kapazität
d	mm	Durchmesser
E	J	Energie; Exergie
E_a	J	äußere Energie
h	m	Höhe
H	J	Enthalpie
\dot{H}	W	Enthalpiestrom
H_u	kJ/kg	spezifischer Heizwert (veraltet: unterer Heizwert)
I	A	Stromstärke
l	m	Länge
m	kg	Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
M	g/mol	molare Masse
M_d	N m	Drehmoment
$M_{d,\text{soll}}$	N m	Solldrehmoment
M_e	N m	effektives Drehmoment
M_{zusatz}	N m	Zusatzdrehmoment
n	mol	Stoffmenge
\dot{n}	mol/s	Molstrom
n_{motor}	min^{-1}	Motordrehzahl
p	bar, Pa	Druck
p_{22}	bar, Pa	Druck im Ladeluftverteilerrohr
p_e	bar	effektiver Mitteldruck
p_{mi}	bar	indizierter Mitteldruck
p_i	bar, Pa	Partialdruck der Komponente i
P	W	Leistung
P_e	W	effektive Leistung
P_{el}	W	elektrische Leistung
Q	J	Wärme

\dot{Q}	W	Wärmestrom
Q_a	J	äußere Wärme
R	J/(kg K)	spezifische Gaskonstante
R_h	1/h	Raumgeschwindigkeit im Katalysator
R_i	Ohm	Innenwiderstand
s	m	Weg
t	s	Zeit
T	°C	Temperatur
U	V	elektrische Spannung
U	J	innere Energie
U	m	Umfang
v	m/s	Geschwindigkeit
V	m ³	Volumen
W	J	Arbeit
W_t	J	technische Arbeit
x	m	Koordinate
y	m	Koordinate
Z	–	Anzahl

Griechische Formelzeichen

α	W/(m ² K)	Wärmeübergangskoeffizient
ε	–	Emissionsvermögen
η	–	Wirkungsgrad
η_e	–	effektiver Wirkungsgrad
η_i	–	innerer (indizierter) Wirkungsgrad
η_m	–	mechanischer Wirkungsgrad
η_{EHC}	–	H ₂ -Konvertierungsrate des EHCs
η_{SCR}	–	NO _x -Konvertierungsrate des SCR-Katalysators
λ	–	Luftverhältnis
λ	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit
μ_i	–	Masseanteil der Komponente i
ν_i	–	Molanteil der Komponente i
ρ	kg/m ³	Dichte
φ_i	–	Volumenanteil der Komponente i

Konstanten

e	2.7183	–	Eulersche Zahl
g	9.8067	m/s ²	Normalfallbeschleunigung
R_m	8 314.46	J/(kmol K)	allgemeine (molare) Gaskonstante
σ_B	5.67 · 10 ⁻⁸	W/(m ² K ⁴)	Stefan-Boltzmann-Konstante

Indizes und Abkürzungen

1, 2, ...	Zustandspunkte	EO	Engine-Out
0D	nulldimensional	EPA	Environmental Protection Agency
1D	eindimensional	EU	Europäische Union
3D	dreidimensional	Fe	Eisen
a	aus; außen; äußere	FID	Flammenionisationsdetektor
abs	absolut	FTP	Federal Test Procedure
Abg	(im) Abgas	FT:IR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
AGM	Absorbent Glass Mat	GPF	Gasoline Particle Filter (Benzin-Partikelfilter)
ANR	Ammonia to NO _x -Ratio	H ₂	Wasserstoff
ASC	Ammonia Slip Catalyst (Ammoniakschlupf-Katalysator)	H ₂ O	Wasser
ATL	Abgasturbolader	HC	Kohlenwasserstoffe
BHC	Brennerheizung	HNCO	Isocyanensäure
cpsi	cells per square inch	HWFET	Highway Fuel Economy Test
cGPF	catalyzed GPF (katalytisch beschichteter GPF)	i	innen; indiziert
Cr	Chrom	<i>i</i>	Laufvariable (1, 2, ..., <i>k</i>)
Cu	Kupfer	ICE	Internal Combustion Engine
CAN	Controller Area Network	ISO	International Organization for Standardization
CARB	California Air Resources-Board	ITnA	Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme
CH ₂ O	Formaldehyd	<i>k</i>	Anzahl der Komponenten
CH ₄	Methan	kum.	kumuliert
CLD	Chemilumineszenzdetektor	KW	Kurbelwelle; Kurbelwinkel
CNG	Compressed Natural Gas (Komprimiertes Erdgas)	Li	Lithium
CO	Kohlenstoffmonoxid	LAN	Local Area Network
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	LEV	Low Emission Vehicle
DoD	Depth of Discharge (Entladungstiefe)	LFP	Lithium-Eisenphosphat (LiFePO ₄)
DCU	Dosing Control Unit (Einspritzsteuergerät)	LL	Leerlauf
DI	Direct Injection (Direkteinspritzung bzw. Direkteinblasung)	LNG	Liquified Natural Gas (Flüssigerdgas)
DIN	Deutsches Institut für Normung	max	maximal
e	ein; Eintritt; effektiv	min	minimal
EGI	Exhaust Gas Ignition (Abgasentzündung)	MFB	Mass Fraction Burnt
EHC	Electrically Heated Catalyst (Elektrischer Heizkatalysator)	n	nach
EI-MS	Electron Ionization Mass Spectrometer	n.a.	not available (nicht verfügbar)
		nEHC	nach dem EHC
		nOT	nach dem OT
		nSCR	nach dem SCR

Formelzeichen und Abkürzungen

N ₂	Stickstoff	RDE	Real Driving Emissions
N ₂ O	Distickstoffmonoxid	sim	Simulation; simuliert
N ₂ O ₃	Distickstofftrioxid	SiC	Siliziumcarbid
N ₂ O ₅	Distickstoffpentoxid	SoC	State of Charge (Ladezustand-Batterie)
Ni	Nickel		
NDIR	Nichtdispersiver Infrarotsensor	SoF	State of Function (Funktionszustand-Batterie)
NEDC	New European Driving Cycle		
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus	SoH	State of Health (Gesundheitszustand-Batterie)
(NH ₂) ₂ CO	Harnstoff		
NH ₃	Ammoniak	SCR	Selective Catalytic Reduction (Selektive katalytische Reduktion)
NMHC	Non-Methane Hydro-Carbons (Organische Gase ohne Methan)		
NMOG	Non-Methane Organic Gases (Nichtmethankohlenwasserstoffe)	SFTP	Supplemental Federal Test Procedure
NO	Stickstoffmonoxid	SO ₂	Schwefeldioxid
NO ₂	Stickstoffdioxid	SST	Solid State
NO _x	Stickoxide	SSZ	Social Silicium Zeolith
NSC	NO _x -Storage Catalyst (NO _x -Speicherkatalysator)	SULEV	Super Ultra Low Emission Vehicle
NV	Nebenverbraucher	THC	Total Hydro Carbons
o	obere	TLEV	Transitional Low Emission Vehicle
O ₂	Sauerstoff		
OBD	On-Board-Diagnose	TP	Tailpipe (Auspuff)-Endrohr
OC	Oxidation Catalyst (Oxidationskatalysator)	TTW	Tank-to-Wheel
OCV	Open Circuit Voltage (Leerlaufspannung)	TWC	Three-Way Catalyst (Dreiwegekatalysator)
OEM	Original Equipment Manufacturer	u	untere; Umgebung
OT	oberer Totpunkt	ULEV	Ultra Low Emission Vehicle
ppm	parts per million	UN	United Nations
Pd	Palladium	USA	United States of America
Pt	Platin	vEHC	vor dem EHC
PEMS	Portable Emission Measurement System	vSCR	vor dem SCR
PF	Partikelfilter	vZOT	vor dem Zünd-OT
PID	Proportional-Integral-Differential	VKM	Verbrennungskraftmaschine
PKW	Personenkraftwagen	VTG	Variable Turbinengeometrie
PM	Particulate Matter (Partikelmasse)	WLTC	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle
PN	Particulate Number (Partikelanzahl)	WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure
PZEV	Partial Zero-Emission Vehicle	zu	zugeführt(e) (Wärme)
RCD	Rapid Cooldown	zul	zulässig
		ZEV	Zero-Emission Vehicle
		ZOT	Zünd-OT
		ZZP	Zündzeitpunkt

Operatoren

d	vollständiges Differential	∂	partielles Differential
δ	unvollständiges Differential	\sum	Summe

SI-Präfixe

T	10^{12}	Tera	d	10^{-1}	Dezi
G	10^9	Giga	c	10^{-2}	Zenti
M	10^6	Mega	m	10^{-3}	Milli
k	10^3	Kilo	μ	10^{-6}	Mikro
h	10^2	Hekto	n	10^{-9}	Nano
da	10^1	Deka	p	10^{-12}	Piko

1 Einleitung

Die immer deutlicher werdenden Auswirkungen von Umweltbelastung und Klimawandel veranlassen die Politik zur kontinuierlichen Entwicklung neuer, strengerer Abgasgesetzgebungen. Da diese Emissionsgrenzwerte mit den herkömmlichen Antriebssystemen zunehmend schwieriger einzuhalten sind, erfordert dies die Entwicklung alternativer Antriebstechnologien. Neben dem Batterieauto und der Brennstoffzelle, ist die Wasserstoff-VKM (Verbrennungskraftmaschine) von wichtiger Bedeutung und wird von einer Reihe von Forschungseinrichtungen untersucht. Ein großer Vorteil der Wasserstoff-VKM ist die Verfügbarkeit von über Jahrzehnte ausgereifter Technologie. Demzufolge können Diesel-, oder Ottomotoren mit verhältnismäßig geringem Aufwand auf den Betrieb mit Wasserstoff umgerüstet werden [50]. Darüber hinaus kann bei der VKM im Gegensatz zu batteriebetriebenen Fahrzeugen, oder jenen mit Brennstoffzellenantrieb, auf vorhandene Produktionsstätten und Lieferketten zurückgegriffen werden [79]. Bei der Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser mit Strom aus erneuerbarer Energie, könnte mit der H₂-VKM somit im kurz- bis mittelfristigen Zeithorizont eine nicht-fossile Antriebstechnologie zur Senkung der anthropogenen Treibhausmissionen realisiert werden [40, 50]. Die Elektrolyse von Wasserstoff könnte außerdem zur Pufferung eines fluktuierenden Stromangebots genutzt werden. Der damit erzeugte Wasserstoff lässt sich in Druckbehältern, unterirdischen Speichern, sowie dem Erdgasnetz einspeichern und verteilen [40]. Durch eine Adaption der Tankstelleninfrastruktur wäre damit eine flächendeckende Versorgung realisierbar.

Motivation

Mit der VKM als Energiewandler von H₂ kann grundsätzlich ein CO₂-neutraler Fahrzeugbetrieb realisiert werden, allerdings treten durch die Verbrennungsvorgänge Schadstoffe auf. Im Vergleich zu Benzin- oder Dieselfahrzeugen liegen sie bei magerem Betrieb zwar deutlich darunter, zur Einhaltung zukünftiger Abgasgesetzgebungen sind diese durch geeignete innermotorische- und/oder außermotorische Maßnahmen aber zu reduzieren [97]. Insbesondere Stickoxide (NO_x) sind bei der Wasserstoff-VKM in Abhängigkeit des Lastpunktes von großer Bedeutung und erfordern eine entsprechende Nachbehandlung [40]. Wie sich bei Untersuchungen am Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme gezeigt hat, kann bei der Wasserstoff-VKM mit bereits etablierten Katalysatorsystem eine hohe Konvertierung dieser Schadstoffe erzielt werden. Ein entscheidendes Kriterium dabei ist auch für diese Antriebstechnologie, die Katalysatorsysteme umgehend nach Motorstart in ein günstiges Temperaturfenster zu

heben [69, 74]. Dazu können unterschiedlichste Maßnahmen aus dem breiten Spektrum des Thermomanagements eingesetzt werden [25]. In Anbetracht der drastischen Auswirkungen der anthropogenen CO₂-Emissionen auf das Weltklima, ist der Einfluss des Thermomanagements auf den Kraftstoffverbrauch ein wesentlicher Aspekt. Da derzeit ein großer Teil des Wasserstoffes aus fossilen Rohstoffen gewonnen wird, ist dies auch bei diesem Kraftstoff von besonderer Relevanz [40].

Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit soll die elektrische Katalysatorheizung als Thermomanagement-Maßnahme beim Betrieb einer Wasserstoff-VKM untersucht werden. Dazu ist zunächst ein thermisches Modell des relevanten Abgassystems zur Entwicklung und Optimierung von Heizstrategien zu erstellen. Darüber hinaus soll durch Kopplung des thermischen Modells mit einem Energiespeichermodell der Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch abgeschätzt werden und eine konzeptionelle Untersuchung des Einsatzes am 12-V-Bordnetz erfolgen. In weiterer Folge ist der elektrische Heizkatalysator am Motorprüfstand aufzubauen und in das bestehende Abgassystem zu integrieren. Im letzten Schritt soll der Einfluss der elektrischen Katalysatorheizung auf das Emissionsverhalten bei ausgesuchten Fahrzyklen am transienten Motorprüfstand untersucht und durch geeignete Maßnahmen optimiert werden.

Gliederung der Arbeit

- In Kapitel zwei erfolgt die Erklärung der theoretischen Grundlagen zu Betrieb und Emissionsverhalten der H₂-VKM. Dazu werden innermotorische- und katalytische Maßnahmen zur Abgasnachbehandlung vorgestellt. Im letzten Abschnitt erfolgt die Erläuterung der Themen Thermomanagement und Abgasgesetzgebung.
- In Kapitel drei wird auf den Versuchsaufbau und den Einsatz eines elektrischen Heizkatalysators (EHC) am transienten Motorprüfstand eingegangen. Außerdem werden die durchgeführten Prüfzyklen vorgestellt und erste Versuche mit dem EHC gezeigt.
- In Kapitel vier erfolgt die Beschreibung des Simulationsmodells, welches den Messaufwand durch Simulationen reduzieren und zur Ergebnisfindung beitragen soll. Eine Gliederung erfolgt in eine thermische Simulation des relevanten Abgassystems, eine Energiespeichersimulation und ein Modell zur Untersuchung des Kraftstoffverbrauchs.
- In Kapitel fünf erfolgt die Diskussion der Ergebnisse. Dafür wird zuerst eine Strategiefindung zur elektrischen Beheizung vorgenommen, bevor auf die Ergebnisse der Fahrzyklen eingegangen wird.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel soll zuerst auf den Betrieb einer Wasserstoff-VKM und deren Emissionsverhalten eingegangen werden. Im nächsten Schritt werden sowohl innermotorische, als auch außermotorische Maßnahmen zur Emissionsreduktion vorgestellt. Da für eine hohe Konvertierung unmittelbar nach dem Kaltstart ein entsprechendes Thermomanagement unabdingbar ist, erfolgt im weiteren Verlauf dieses Kapitels eine kurze Gegenüberstellung passiver und aktiver Thermomanagement-Maßnahmen. Dabei wird auf den elektrischen Heizkatalysator bezüglich dessen Aufbaus und Funktion näher eingegangen. Im letzten Abschnitt erfolgt eine Einführung in die Thematik der Abgasgesetzgebung, wobei eine kurze Beschreibung unterschiedlicher Normen und Prüfverfahren erfolgt.

2.1 Wasserstoff als Kraftstoff im Verbrennungsmotor

Wasserstoff als Kraftstoff zum Betrieb einer Verbrennungskraftmaschine wurde gemäß [73] bereits von einer Reihe von Institutionen untersucht und dessen hohes Potential aufgezeigt. Nicht zuletzt aufgrund der immer deutlicher spürbaren Auswirkungen der Erderwärmung, kann mit der Wasserstoff-VKM ein wichtiger Beitrag zur weltweiten Reduktion der Treibhausgase geleistet werden. Aus diesem Grund erscheint neben dem Elektroantrieb, oder der Brennstoffzelle, eine Forschung und Weiterentwicklung dieser Antriebsform als unerlässlich. In diesem Abschnitt soll deshalb eine kurze Beschreibung der Wasserstoff-VKM, mit starkem Fokus auf deren Emissionsverhalten, erfolgen.

2.1.1 Betrieb und Emissionsverhalten des direkteinblasenden Wasserstoff- Verbrennungsmotors

Der Einsatz von Wasserstoff als Brennstoff bringt gegenüber anderen Kraftstoffen prinzipbedingt einige Besonderheiten mit sich [40]. Als wesentlicher Unterschied gegenüber herkömmlichen Kraftstoffen wie Diesel, Benzin oder Erdgas (CNG und LNG) besteht er nicht aus Kohlenwasserstoffketten, wodurch bei dessen Verbrennung Kohlenstoffbasierte Emissionen theoretisch nicht auftreten können. Lediglich durch die Verbrennung von Schmieröl sind Spuren fossiler Verbrennungsrückstände wie Partikel, Kohlenstoffmonoxid (CO) und Kohlenstoffdioxid (CO₂) im Abgas messbar. Deren Konzentration

nen sind gegenüber Diesel- oder Benzinbetriebenen Fahrzeugen in der Regel aber vernachlässigbar. Eine vollständige und theoretisch ideale Verbrennung würde in einem Wasserstoff-Verbrennungsmotor gemäß Gleichung 2.1 ablaufen [40].



Die Ansaugluft enthält aber neben O_2 auch noch andere Komponenten wie Stickstoff (N_2). Aufgrund realer Verbrennungsmechanismen, sowie einem typischerweise überstöchiometrischen Luftverhältnis, kommt es beim Wasserstoffmotor zur Bildung von Schadstoffen. Als einzig relevante Schadstoffkomponente sind dabei Stickoxide (NO_x) von Bedeutung [40, 63]. Unter dem Begriff Stickoxide ist grundsätzlich eine Gruppe von Verbindungen mit Sauerstoff und Stickstoff zu verstehen, als wesentliche Komponenten sind Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2) zu nennen. Darüber hinaus treten bei Verbrennungsvorgängen aber auch Distickstoffmonoxid (N_2O), allgemein bekannt unter dem Begriff Lachgas, sowie geringe Mengen an Distickstofftrioxid (N_2O_3) und Distickstoffpentoxid (N_2O_5) auf [38].

Als Einführung in die Abgasthematik soll an dieser Stelle eine Abgasanalyse vorgenommen werden. In nachfolgender Tabelle 2.1 ist eine Abgaszusammensetzung der Rohabgase bei stationärem Motorbetrieb mit einer Motordrehzahl $n_{motor} = 2000 \text{ min}^{-1}$, einem effektiven Mitteldruck $p_e = 7 \text{ bar}$ und einem Luftverhältnis $\lambda = 2,5$ dargestellt. Tabelle 2.2 daneben zeigt die Schadstoffemissionen im Detail. Für eine detaillierte Erläuterung der Eigenschaften dieser Schadstoffe wird an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen [33, 71]. Bezüglich dem CO_2 -Anteil wurde in [69] gezeigt, dass mit 420-440 ppm ein Großteil dieser Spezies aus der angesaugten Umgebungsluft stammt und deswegen nur geringe Mengen der innermotorischen Verbrennung zuzuschreiben sind. Sämtliche Werte stammen dabei von dem im 3.Kapitel erläuterten Versuchsmotor und wurden vom Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme (ITnA) im Rahmen früherer Untersuchungen gemessen.

Tabelle 2.1: Zusammensetzung der Rohabgase bei $\lambda=2,5$

Spezies	Volumsanteil in %
N_2	72,10
H_2O	15,61
O_2	12,16
H_2	0,0775
CO_2	0,0460
Schadstoffe	0,0063

Tabelle 2.2: Schadstoffemissionen der Rohabgase bei $\lambda=2,5$ im Detail

Spezies	Volumsanteil in ppm
NO_x	60,04
SO_2	1,51
THC	0,95
N_2O	0,49
CO	0,42

Die Stickoxidbildung erfolgt bei innermotorischen Verbrennungen in Abhängigkeit des Brennverfahrens großteils in Form von NO, NO₂ entsteht nur in viel geringeren Mengen. Gemäß [38] kann je nach Brennverfahren von einem NO-Anteil von etwa 80-90 % ausgegangen werden. Da aber bei atmosphärischen Bedingungen und unter Einwirkung von UV-Strahlung eine rasche Umwandlung des Großteils von NO durch eine Reaktion mit Sauerstoff in NO₂ erfolgt, gehen sämtliche Berechnungsmethoden bezüglich der Stickoxidemissionen von NO₂ aus. Auch die Abgasgesetzgebung reglementiert meist die NO₂-Konzentrationen [38, 71].

Bei der Verbrennung von Wasserstoff läuft die Stickoxidbildung gemäß [46] und [85] prinzipiell anhand von drei Mechanismen ab. Für den Verbrennungsmotor am bedeutendsten ist die Bildung von thermischen-NO (Zeldovich-NO) aus dem Luftstickstoff und damit unabhängig vom Kraftstoff. Die entsprechenden Reaktionen laufen bei hohen Temperaturen von über 1800 - 2000 K in einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre bei ausreichender Verweilzeit in dieser Umgebung ab. Der in der Frischluft enthaltene Stickstoff dissoziiert bei diesen hohen Temperaturen im Brennraum und bildet mit dem Sauerstoff durch Oxidation NO und NO₂ [71, 87]. Daneben kommt es speziell bei hohen Drücken und niedrigeren Temperaturen zur Bildung nach dem N₂O-Mechanismus. Dieser ist auch bei magerer Verbrennung von Relevanz [85]. Als letzter wesentlicher, ist noch der NNH-Mechanismus speziell im Bereich der Flammenfront und in solchen mit hoher H- und O-Konzentration von Bedeutung [85]. Aufgrund der hohen Komplexität dieser Reaktionen wird hier nicht mehr näher eingegangen und auf die Literatur verwiesen [46, 63, 71, 85, 87].

2.1.2 Innermotorische Maßnahmen zur Emissionsreduktion

Um künftige Abgasnormen einhalten zu können, ist gemäß Literatur die Reduktion der Rohemissionen von hoher Bedeutung. Dies ist insbesondere im Hinblick auf den Schadstoffausstoß vor dem Anspringen der Katalysatoren wichtig. Darüber hinaus ist durch innermotorische Maßnahmen die Schaffung günstiger Ausgangsbedingungen für eine effektive katalytische Abgasnachbehandlung notwendig. Nach [33] zählen dazu die Sicherstellung hoher Temperaturen und Abgasenergien für ein rasches Aufwärmen der Katalysatoren, sowie je nach deren eingesetzter Technologie ein günstiges Luftverhältnis. In diesem Abschnitt sollen kurz Maßnahmen zur innermotorischen Emissionsabsenkung aufgezeigt werden. Detailliertere Informationen sind der Literatur zu entnehmen [5, 33, 40, 73].

Wie sich bereits bei früheren Forschungsprojekten zum Thema Wasserstoff-VKM gezeigt hat, sowie unter Anbetracht der erläuterten Entstehungsmechanismen, erfolgt die NO_x-Bildung in Abhängigkeit vom Luftverhältnis λ und der Verbrennungstempe-

ratur. Das rechte Diagramm in Abbildung 2.1 zeigt diesen Zusammenhang. Im linken Diagramm sind zum Vergleich die Abgasemissionen über dem λ für den Dieselmotor dargestellt. Bei der Wasserstoff-VKM kann in einem Bereich von $\lambda = 1,0$ bis etwa $\lambda = 2,2$ ein starker NO_x -Ausstoß beobachtet werden. Oberhalb dieses Fensters treten durch die mit der Abmagerung einhergehenden Temperaturabnahme praktisch keine NO_x -Emissionen mehr auf. Bei einer Gemischanfettung kommt es durch einen Anstieg der maximalen Verbrennungstemperatur auf über 2000 K zu einer erheblichen Zunahme der Stickoxidemissionen auf ein Maximum bei etwa $\lambda = 1,3$. Durch eine weitere Anfettung in Richtung eines stöchiometrischen Gemischs sinkt, aufgrund der Abnahme des für die Reaktion erforderlichen Luftüberschusses, deren Bildung wieder ab [40, 73].

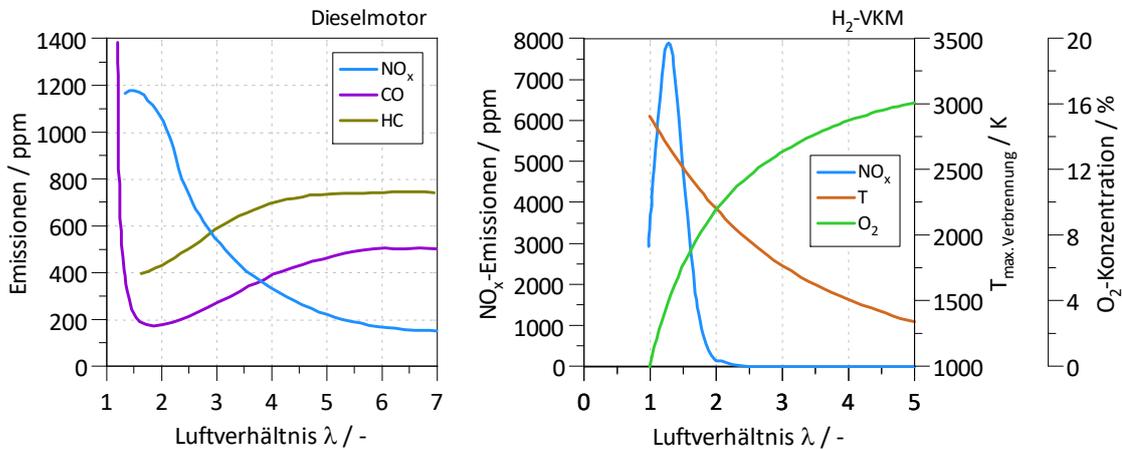


Abbildung 2.1: Emissionsverhalten über dem Verbrennungsluftverhältnis λ am Dieselmotor [63] und der H_2 -VKM [40]

Als sehr günstig erweisen sich diesbezüglich die weiten Zündgrenzen von Wasserstoff, wonach ein Motorbetrieb bei homogener Gemischbildung theoretisch mit einem Luftverhältnis von $\lambda = 0,13$ -10 möglich ist und eine Qualitätsregelung im gesamten Kennfeldbereich erlaubt. Durch eine geeignete Betriebspunktwahl können also die NO_x -Rohemissionen stark reduziert, oder praktisch vermieden werden [40]. Daraus lässt sich ableiten, dass die Gemischbildung einen erheblichen Einfluss auf die Stickoxidemissionen hat und insbesondere dem Turbolader eine wichtige Rolle bezüglich deren Reduktion zugeordnet werden kann. Wie in [69] erforscht und detailliert beschrieben, kann speziell im unteren- und Teillastbetrieb, für welchen der Turbolader ausreichend Frischluft verdichten kann, von einem nahezu NO_x -freien Betrieb gesprochen werden. Dagegen steigen im höheren Lastbereich aufgrund eines Ladedrucklimits die Emissionen stark an. In Abbildung 2.2 ist dieser Vorgang verdeutlicht. Neben dem Hochlastbereich, führen insbesondere rasche Lastwechsel zu einem erhöhten NO_x -Ausstoß. Demzufolge kann es bei den Fahrzyklen, also bei transientem Betrieb nahe der Realität, zu durchaus

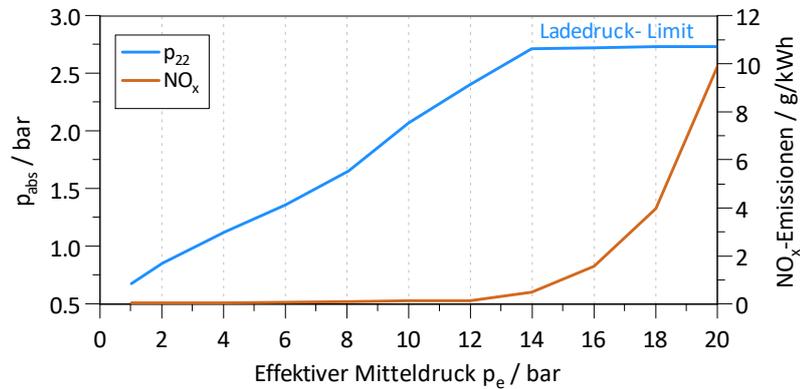


Abbildung 2.2: Absolutdruck im Ladeluftverteiler (p₂₂) und NO_x-Emissionen über dem effektiven Mitteldruck (p_e) einer H₂-VKM mit DI. In Anlehnung an [69]

erheblichen Stickoxidemissionen kommen. Entscheidend dafür ist auch hier das Luftverhältnis, was eine entsprechende Motorregelung bei Beschleunigungsvorgängen erforderlich macht. Bei Lastwechseln erfolgt für eine höhere Fahrdynamik eine kurzzeitige Gemischanfettung auf ein Luftverhältnis $\lambda < 2$. Da der Ladedruck durch gasdynamische Vorgänge aber vergleichsweise nur langsam steigt, kommt es zu mitunter erheblichen NO_x-Emissionen. Abbildung 2.3 zeigt einen Lastsprung mit unterschiedlichen, von der Motorsteuerung zugelassenen Minimalwerten bezüglich dem Luftverhältnis und verdeutlicht damit diese Problematik [69].

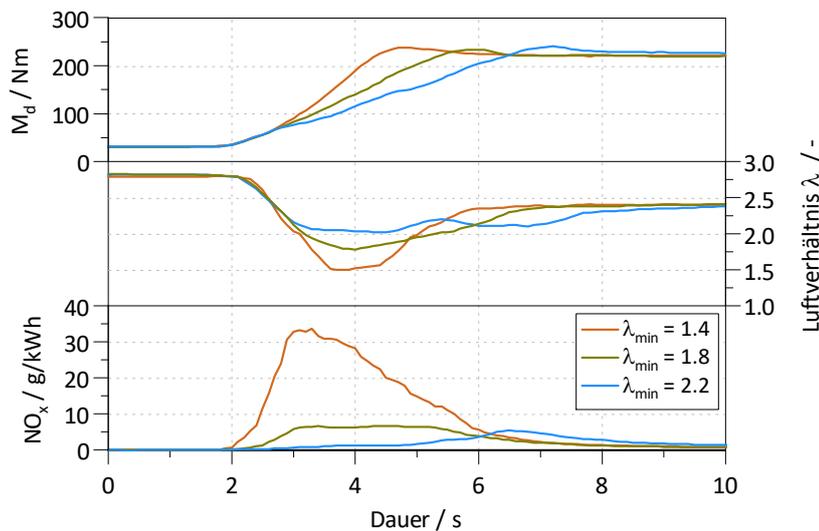


Abbildung 2.3: Drehmoment (Md)-, Luftverhältnis λ - und NO_x-Emissionen bei einem Lastsprung einer Wasserstoff- VKM mit DI. Unter Anlehnung an [69]

Im Rahmen der Literaturrecherche zeigten neben dem Luftverhältnis noch weitere Motorsteuerungsparameter einen erheblichen Einfluss auf die Emissionsbildung. Auf einige dieser Regelgrößen soll hier kurz eingegangen werden.

In Abhängigkeit des Lastpunktes, zeigt gemäß Literatur der Einblasezeitpunkt einen starken Einfluss. Bei Niedrig- und Teillast kann demnach durch frühes Einblasen eine hohe Homogenisierung erreicht werden, die NO_x -Emissionen sind sehr gering. Bei zunehmender Last steigen diese in Abhängigkeit des globalen Luftverhältnisses, wie bereits erläutert, durch steigende Temperaturen weiter an. Bei hoher Last lässt sich mit einer gezielten Ladungsschichtung durch späte H_2 -Einblasung ein übermäßiges Ansteigen der Emissionen umgehen. Eine gleichzeitige Bildung überfetteter und magerer Zonen im Brennraum führt dabei gezielt zur Abnahme des Bereichs mit für die NO_x -Bildung kritischen Luftverhältnissen. Für diese Arbeit ist mit dem applizierten Motorkonzept keine Ladungsschichtung möglich und wird entsprechend auch nicht untersucht. Nähere Details dazu sind der Literatur zu entnehmen [40].

Als weiterer einflussreicher Parameter zeigte sich gemäß Literatur der Zündzeitpunkt. Dieser ist ein wichtiger Steuerparameter für den Verbrennungsschwerpunkt und muss für einen verbrauchsoptimierten Motorbetrieb früh genug gewählt werden. Die wirkungsgradgünstigste Lage des Verbrennungsschwerpunktes befindet sich beim Wasserstoffmotor bei etwa $6-8^\circ\text{nOT}$ (nach dem oberen Totpunkt) [50]. Eine Spätverstellung führt unabhängig vom Luftverhältnis zu einer mitunter beträchtlichen Senkung der NO_x -Emissionen, was unweigerlich in einem Zielkonflikt zwischen Kraftstoffverbrauch und NO_x -Emissionen resultiert. Zur Verdeutlichung sind dazu in Abbildung 2.4 schematisch die Stickoxidemissionen und der indizierte Mitteldruck als Verbrauchsparameter über einer Zündzeitpunktvariation aufgetragen. Diese Charakteristik verdeutlicht die

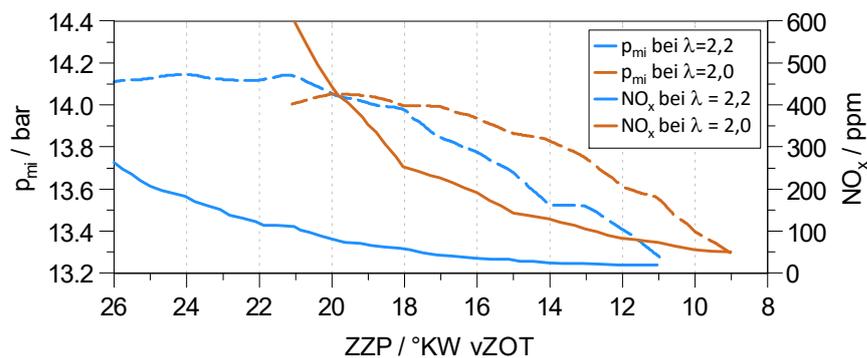


Abbildung 2.4: NO_x -Emissionen und Indizierter Mitteldruck (p_{mi}) bei einer ZZP-Variation (Zündzeitpunkt) für unterschiedliche Luftverhältnisse. Luft- und Kraftstoffmassenstrom sind dabei konstant. In Anlehnung an [50]

Wichtigkeit einer effizienten Abgasnachbehandlung [5, 50, 69].

Trotz der genannten innermotorischen Maßnahmen, lassen sich insbesondere bei raschen Lastwechseln gemäß [69] die NO_x -Rohemissionen nicht gänzlich vermeiden. Zur Einhaltung aktueller und zukünftiger Abgasnormen, wird deshalb im transienten Motorbetrieb ein effizientes Abgasnachbehandlungssystem notwendig sein. Darauf wird im nachfolgenden Abschnitt näher eingegangen. Neben den Regelungstechnischen Maßnahmen können auch noch solche wie Abgasrückführung, Wassereinspritzung, Wasserstoff-Verbrennungssteuerung durch Mehrfacheinblasung, sowie konstruktive Ansätze wie eine Brennraumoptimierung als Maßnahmen zur Emissionsminderung am Wasserstoff-Verbrennungsmotor genannt werden. Für nähere Details wird aber auf die Literatur verwiesen [5, 40, 69, 73].

2.1.3 Katalytische Abgasnachbehandlung am Verbrennungsmotor

In diesem Abschnitt erfolgt eine kurze Analyse ausgewählter Katalysatortechnologien, welche für die Wasserstoff-VKM bereits eingesetzt werden, oder grundsätzlich in Frage kommen könnten. Auf deren spezifisches Verhalten bei der Wasserstoff-VKM wird in Kapitel drei eingegangen.

Oxidationskatalysator (OC)

Der Oxidationskatalysator ähnelt sehr stark dem Aufbau eines Dreiwegekatalysators (TWC) und besteht aus einem wabenförmigen, meist keramischen Trägermaterial aus Cordierit. Die Zwischenschicht besteht wie beim TWC in der Regel aus Aluminiumoxid mit Ceroxid und Zirkoniumdioxid und wird als Washcoat bezeichnet. Die oberflächliche Oxidschicht enthält beim OC im Gegensatz zum TWC aber nur oxidierend wirksame Edelmetalle wie Platin oder Palladium, Cerium als Sauerstoffspeicher kann aufgrund des Luftüberschusses beim Diesel- oder Wasserstoffmotor ebenfalls entfallen. Neben der Oxidation von CO und HC zu H_2O und CO_2 , erfolgt beim OC unter anderem auch jene von NO zu NO_2 . Zwar gilt NO_2 als gefährlicher wie NO, allerdings begünstigt es die NO_x -Konvertierung in NSC- und SCR-Katalysatoren [8, 33].

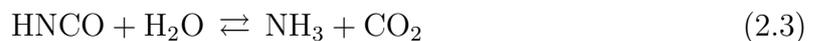
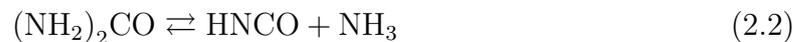
NO_x -Speicherkatalysator (NSC)

Der NO_x -Speicherkatalysator ähnelt im Aufbau stark einem TWC, enthält aber auch basische NO_x -Speicherkomponenten wie Barium. Bei Luftüberschuss erfolgt die Oxidation von CO und HC zu H_2O und CO_2 beziehungsweise von NO zu NO_2 , welches

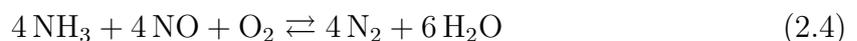
in weiterer Folge mit der Speicherkomponente Nitrate bilden kann und im Katalysator eingelagert wird. Voraussetzung für die Einspeicherung ist eine Mindesttemperatur im NSC von etwa 200 °C, darunter kommt es zu keiner ausreichenden Oxidation von NO zu NO₂. Je nach Speichermaterial nimmt oberhalb von 400-600 °C die thermodynamische Stabilität der Nitrate wieder ab und die Konvertierungsrate sinkt. Bei steigendem Speicherstand nimmt die Effizienz ab und der Katalysator muss während einer Luftmangelphase im fetten Motorbetrieb regeneriert werden. Dabei kommt es in einer mehrstufigen Umwandlung der Nitrate in NO und O₂ zu deren Auslagerung. Mit den restlichen, bei der fetten Verbrennung entstehenden Emissionsspezies, laufen dann eine Reihe von Reaktionen ab, aus welchen idealerweise nur N₂, CO₂ und H₂O hervorgehen. Beim NSC-Katalysator können zwar Konvertierungsraten von bis zu über 90 % erzielt werden, gegenüber der selektiven katalytischen Reaktion liegen sie aber in der Regel darunter. Nachteilig ist außerdem der erhöhte Kraftstoffverbrauch bei der Regeneration [8, 33, 38]. Im Rahmen dieser Arbeit wird der NSC nicht näher untersucht, weshalb für eine Beschreibung beim Wasserstoffmotor auf die Literatur verwiesen wird [97].

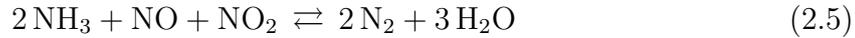
Selektive katalytische Reduktion (SCR)

Die selektive katalytische Reduktion dient der Konvertierung von Stickoxiden mithilfe eines Reduktionsmittels. Hierfür kommen meist Kupfer-/Eisen-Zeolithe, oder Vanadium-/Titandioxid-Katalysatoren zum Einsatz [8, 33]. Als Reduktionsmittel dient meist Ammoniak(NH₃). Da dieses als giftiges Gas einzuordnen ist, stellt sich dessen gasförmige Speicherung im Fahrzeug als unvorteilhaft dar. Aus diesem Grund erfolgt die flüssige Betankung einer wässrigen Harnstofflösung, auch bekannt unter der Marktbezeichnung AdBlue[®]. Ab einer Abgastemperatur von etwa 180 °C erfolgt durch eine Dosiereinrichtung die Einspritzung in die Mischstrecke stromaufwärts des SCR-Katalysators. Dort verdampft es und reagiert in einer zweistufigen Reaktion durch Thermolyse gemäß Reaktion 2.2 zu Isocyanensäure (HNCO) und Ammoniak, bevor in der anschließenden Hydrolyse nach Reaktion 2.3 die gebildete Isocyanensäure mit Wasserdampf zu Ammoniak und Kohlendioxid weiterreagiert [8, 50].



Im SCR-Katalysator erfolgt dann die NO_x-Konvertierung hauptsächlich anhand der Standard-SCR aus Gleichung 2.4 ab einer Temperatur von 250 °C, sowie der Fast-SCR nach Gleichung 2.5 bei einer Temperatur von 170-300 °C [51, 66].





Neben den beiden primär ablaufenden Reaktionen kommt es gemäß [51] noch zur NO₂-SCR wie in Gleichung 2.6, der unerwünschten Oxidation von NH₃ mit NO, NO₂ oder O₂ zu N₂O, sowie weiteren parallel dazu ablaufenden Reaktionen. Diesen wird aber eine untergeordnete Rolle zugeteilt, weshalb dafür auf die Literatur verwiesen sei. Die Bildung von N₂O tritt vor allem bei hohen NH₃-Konzentrationen in Cu-Zeolithen auf und ist aufgrund dessen hoher CO₂-Äquivalenz von 310 zu vermeiden [40]. Für einen hohen NO_x-Umsatz ist es dagegen vorteilhaft, die NH₃-Speicherfähigkeit von SCR-Katalysatoren auszunutzen und durch eine überstöchiometrische Harnstoffeindosierung in Abhängigkeit des Laspunktes diesen zu beladen. Um eine hohe NO_x-Konvertierung bei gleichzeitig geringen N₂O-Emissionen und niedrigem NH₃-Schlupf zu gewährleisten, ist eine optimierte Harnstoff-Dosierstrategie notwendig. In der Praxis erfolgt dies meist durch Verwendung eines NH₃-Speichermodells [33, 51].

Ausschlaggebend dafür, welche der beiden primär ablaufenden Reaktion dominiert, ist vorrangig das NO:NO₂-Verhältnis. Bei der motorischen Verbrennung entsteht, wie bereits erläutert, großteils NO, weshalb für das Rohabgas vor allem die Standard-SCR-Konvertierung überwiegt. Bei der Fast-SCR lassen sich aber bei geringeren Temperaturen höhere Umsatzraten erzielen. Da bei Fahrzyklen das Temperaturniveau als verhältnismäßig niedrig einzustufen ist, kann durch die beschriebene Oxidation von NO zu NO₂ in einem vorgelagerten OC die Fast-SCR begünstigt und damit eine insgesamt effektivere NO_x-Konvertierung erzielt werden. Insgesamt können bei der NO_x-Konvertierung mittels NH₃-SCR Umsatzraten von bis zu 99 % erzielt werden. Für detailliertere Informationen bezüglich der selektiven katalytischen Reduktion, sowohl beim herkömmlichen Verfahren mit AdBlue[®] als Reduktionsmittel, als auch alternativen Technologien wie der H₂-SCR, sei aber auf die Literatur verwiesen [8, 33, 38, 50, 51].

Ammoniakschlupf-Katalysator (ASC)

Da es einerseits aufgrund der überstöchiometrischen Harnstoffeindosierung, andererseits zufolge einer Auslagerung von NH₃ bei Lastwechseln, zu einem NH₃-Schlupf im SCR-Katalysator kommen kann, wird heutzutage bereits auf einem breiten Spektrum der ASC zu dessen Konvertierung eingesetzt. Zwar sind die NH₃-Emissionen gesetzlich derzeit noch nicht begrenzt, für zukünftige Abgasnormen wie der Euro-7 wird dies aber voraussichtlich der Fall sein und den ASC vermutlich erfordern. Die Konvertierung erfolgt im ASC je nach Edelmetallbeladung vorrangig durch Oxidation von NH₃ mit dem überschüssigen Sauerstoff gemäß Reaktion 2.7 zu Stickstoff und Wasser. Daneben

kann es gemäß den Reaktionen 2.8 und 2.9 aber auch zu einer unerwünschten Bildung von NO, NO₂ und N₂O kommen. Weitere ablaufende Reaktionen sind von geringerer Bedeutung und demnach der Literatur zu entnehmen [51, 83].



Partikelfilter (PF)

Gemäß [8] werden nach heutigem Stand der Technik unterschiedliche Filtertechnologien verwendet, aufgrund des hohen Filterwirkungsgrades von bis zu 90 % kommen für Dieselmotoren aber meist sogenannte Wandstromfilter zum Einsatz. Diese werden aus porösen Keramiken wie Cordierit oder Siliziumcarbid (SiC) hergestellt und bestehen in der häufigsten Bauform gemäß Abbildung 2.5 aus wechselweise verschlossenen Zellen. Die Partikel werden dabei aus dem Abgas gefiltert und lagern sich durch Bildung einer Rußschicht ab. Mit zunehmender Beladung steigt der Abgasgedruck und der Filter muss von Zeit zu Zeit regeneriert werden. Die zur Regeneration erforderlichen hohen Abgastemperaturen von etwa 600 °C werden bei modernen Dieselmotoren meist nur durch Nacheinspritzung in den Brennraum erreicht, alternativ kann die notwendige Temperatur durch eine entsprechende katalytische Filterbeschichtung, der Zugabe von katalytisch wirkenden Additiven, oder einem erhöhten NO₂/NO-Verhältnis herabgesetzt werden [5, 8].

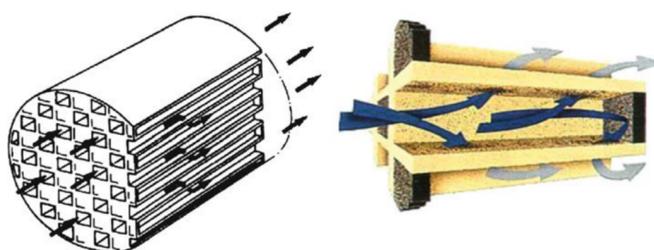


Abbildung 2.5: Aufbau und Funktion eines keramischen Filtermonolithen [5]

Als problematisches Schlüsselkriterium der vorgestellten Katalysatorsysteme stellt sich die Dauer für deren Anspringen dar. In aktuellen und zukünftigen Abgasgesetzgebungen wird ein umgehendes Erreichen des Katalysator-Light-Offs eine Grundvor-

aussetzung für deren Einhaltung werden. Dies lässt sich im normalen Motorbetrieb nur sehr schwer bewerkstelligen, weshalb im nächsten Abschnitt einige Thermomanagementlösungen kurz vorgestellt werden [25, 35, 96].

2.2 Thermomanagement

Um für ein rasches Anspringen sämtlicher Abgaskatalysatoren zu sorgen, wurden im Laufe der Zeit unterschiedliche Thermomanagement-Strategien erforscht und eingesetzt. In diesem Abschnitt soll eine kurze Vorstellung einiger in [25] und [35] beschriebener Strategien erfolgen. Demzufolge kann dabei eine Unterteilung wie folgt vorgenommen werden.

2.2.1 Passive Heizmaßnahmen

Als passive Heizmaßnahmen werden eine Konstruktion und Auslegung verstanden, welche ein rasches Aufheizen des Abgassystems ermöglichen sollen. Als sehr effizient hat sich dabei neben der Bauteiloptimierung die Optimierung der Gesamtsystem-Architektur gezeigt. Diesbezüglich kann eine Einteilung in Unterboden, Vor- und motornahe Katalysatoren erfolgen. Bei Vorkatalysatorsystemen erfolgt die Aufteilung des gesamten Katvolumens in meist zwei Teilvolumina. Während ein Teilvolumen unmittelbar nach dem Austritt aus der VKM oder dem Abgasturbolader möglichst motornah platziert wird und die Konvertierung im Kaltstart begünstigen soll, erfolgt die Platzierung des Katalysator-Hauptvolumens weiter stromabwärts am Fahrzeugunterboden. Diese Konfiguration vereint die Vorteile von raschem Anspringen der Emissionskonvertierung und dem Packaging. Alternativ dazu kann das gesamte Katalysatorvolumen sehr motornah angebracht werden. Diese Konfiguration begünstigt zwar einerseits die katalytische Abgasnachbehandlung, andererseits führt sie aber oftmals zu Packagingproblemen im Motorraum. Außerdem kann ein solches Abgassystem zu einer Anforderung nach Hochtemperatur-beständigen Legierungen- oder Beschichtungen der Katalysatoren führen [25].

Bezüglich Maßnahmen der Bauteiloptimierung kann gemäß [25] noch der Einsatz luftspaltisolierter Rohre, die Fertigung der Katalysatoren aus Legierungen mit reduzierter spezifischer Wärmekapazität, der Einsatz von Bypasssystemen oder Wärmespeichern bis hin zur Wärmeisolierung des Abgassystems mit Dämmmatten genannt werden. Für nähere Details wird aber auf die Literatur verwiesen [25, 35].

Als weitere Maßnahme bietet sich die Möglichkeit, zwei oder mehrere Abgaskatalysatoren in ein gemeinsames Canning zu integrieren und damit die Wärmeabfuhr

in die Umgebung zu reduzieren. Beispielhaft wäre hierfür ein Partikelfilter mit SCR-Beschichtung, eine Kombination aus Oxidationskatalysator und Partikelfilter, oder die Kombination aus einem SCR mit direkt nachgeschaltetem ASC [9, 33].

2.2.2 Aktive Heizmaßnahmen

Beim aktiven Thermomanagement wird durch gezielte innermotorische oder äußere Eingriffe versucht, das Abgassystem unter dem Aspekt des minimalen Zusatzverbrauches zu erwärmen. Dazu zählen im einfachsten Fall die Nacheinspritzung speziell bei Dieselmotoren, oder etwa eine spätere Gemischzündung bei Ottomotoren [25].

Einen Schritt weiter gehen Systeme wie die Abgasentzündung(EGI), die Brennerheizung(BHC), oder HC-Adsorbersysteme. Bei ersterem wird Kraftstoff unmittelbar vor dem OC-, oder TWC ins Abgasrohr eindosiert und mithilfe eines Sekundärluftsystems eine Nachverbrennung zur Aufheizung induziert. Daneben erfolgt bei der Brennerheizung durch Kraftstoffzufuhr und Sekundärluftversorgung die exotherme Oxidation in einer Brennkammer. Vorteilig dabei ist, dass diese an nahezu beliebiger Stelle im Abgassystem angebracht und unmittelbar für die Erwärmung eines bestimmten Katalysators genutzt werden kann. Bei HC-Adsorbersystemen werden die unverbrannten Kohlenwasserstoffe bei Motorkaltstart in Aktivkohlefiltern aufgefangen. Nach dem Anspringen der Katalysatoren erfolgt je nach Bauart durch Umschalten von Ventilen die Desorption dieser Filter ins Ansaugsystem des Motors. Nachteilig all dieser Systeme ist, dass die zur Aufwärmung notwendige Energie unmittelbar aus dem Kraftstoff stammt und somit zu einem Mehrverbrauch führt [25].

Zu guter Letzt bietet sich noch die Möglichkeit der elektrischen Katalysatorheizung. Neben der Abwärme des Abgases und der exothermen Reaktion des unverbrannten Kraftstoffes, soll bei dieser Technologie eine elektrische Widerstandsheizung zur Erwärmung des Abgassystems beitragen [25]. Ein solches System wurde im Rahmen dieser Arbeit untersucht und wird in den nachfolgenden Kapiteln detailliert erläutert.

2.2.3 Aufbau und Funktion des elektrischen Heizkatalysators

Der Aufbau des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Heizkatalysators ist jenem in Abbildung 2.6 ersichtlich sehr ähnlich und besteht im wesentlichen aus einer Heizescheibe mit wabenförmigem Querschnitt, sowie einem im selben Gehäuse unmittelbar darauffolgenden metallischen Oxidationskatalysator. Die Heizescheibe arbeitet beim EHC nach dem Prinzip einer elektrischen Widerstandsheizung. Deren Innenwiderstand bestimmt bei einer definierten Systemspannung nach dem Ohmschen Gesetz die Heizleis-

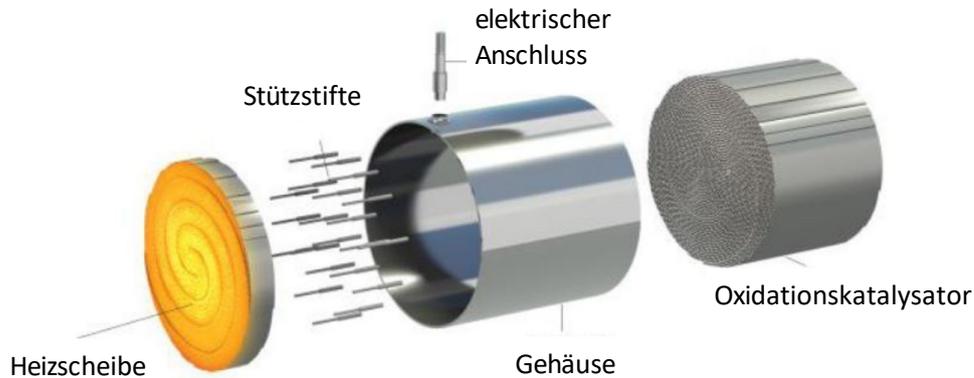


Abbildung 2.6: Schematischer Aufbau des Heizkatalysators. Aus [35] entnommen und überarbeitet

tung und kann vom Hersteller durch die Art und Weise der Wicklung des Folienpaketes, sowie durch die Materialwahl abgestimmt werden. Stromzufuhr und Lagerung der Heizscheibe erfolgt einerseits über Stromkontakte im Canning, andererseits durch elektrisch hochisolierte Stützstifte zum Oxidationskatalysator. Dieser wird zur Reduktion der mechanischen Belastung durch eine wärmeisolierende Lackschicht in das Canning eingebettet. Die Montage des Oxidationskatalysators stromabwärts zur Wärmequelle führt zu dessen raschem Anspringen kurz nach Heizbeginn. Die dadurch früher ablaufenden Oxidationsreaktionen begünstigen also zusätzlich ein rasches Aufwärmen des Abgassystems [35, 96]. Aufgrund der benötigten elektrischen Leistungen von einigen Kilowatt eignet sich dieses System insbesondere für den Betrieb am 48-V-Hybridantriebsstrang [72]. Abbildung 2.7 zeigt schematisch die Integration eines Heizkatalysators in ein 48-V-Hybrid-Bordnetz. Wie in der Literatur gezeigt wurde, lässt sich in ähnlicher Weise der Heizkatalysator aber auch auf 12-V-Basis realisieren, wenngleich durch die prinzipbedingt hohen Ströme eine starke Belastung des Bordnetzes zu beachten ist [52].

Der elektrische Heizkatalysator wurde primär mit dem Ziel entwickelt, bei einem Kaltstart für ein rasches Aufheizen des Abgassystems zu sorgen und das Anspringen der verbauten Katalysatoren zu beschleunigen. Darüber hinaus ist er in der Lage, ein zu starkes Auskühlen bei Schubphasen zu verhindern. Bei der durchgeführten Literaturrecherche konnten einige Anwendungsfälle identifiziert werden, in welchen bei diesel- oder benzinbetriebenen Fahrzeugen dieses System mit durchaus zufriedenstellenden Ergebnissen getestet wurde [31, 35, 52, 53, 72, 96].

Ein großer Vorteil des elektrischen Heizkatalysators ist dessen Wärmeeintrag unmittelbar in den Katalysator. Die integrierte Heizvorrichtung sorgt an erforderlicher Stelle durch effiziente Zufuhr der Heizenergie zu einer raschen Aufwärmung von Substrat und

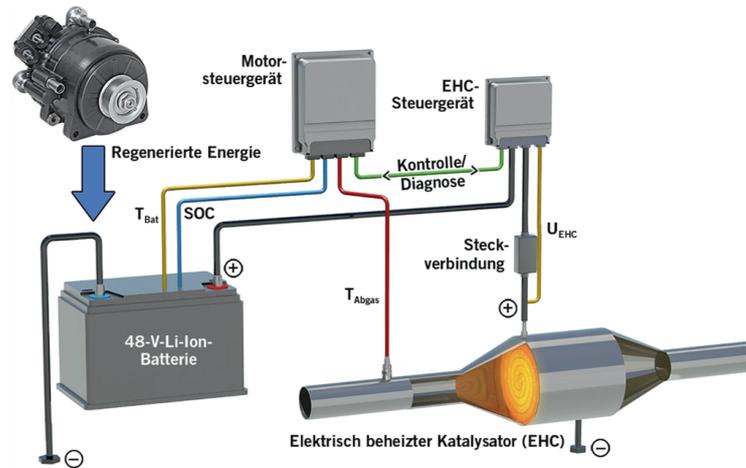


Abbildung 2.7: Schematische Integration eines Heizkatalysators in das 48V-Bordnetz eines Hybrid-Antriebsstranges [72]

Abgas. Demgegenüber kann bei innermotorischen Maßnahmen nur ein Teil der aufbrachten Wärmeenergie effektiv zur Beheizung der Katalysatoren genutzt werden, der Großteil geht durch Wärmeverluste in Motor oder Abgasrohren verloren. Der EHC ist dabei sowohl motornah, als auch weiter stromabwärts am Fahrzeugunterboden nahezu ohne Einschränkungen positionierbar. Die zur Erwärmung benötigte Heizenergie muss außerdem nicht unmittelbar durch den Kraftstoff aufgebracht werden. Durch eine intelligente Betriebsstrategie kann sie insbesondere am 48-V-Hybridsystem aus der Rekuperation im Schleppebetrieb oder bei Bremsvorgängen gewonnen werden. Derartige Maßnahmen bieten ein hohes Potential für einen möglichst verbrauchsneutralen Betrieb des EHCs [52, 96].

Als Nachteil des elektrischen Heizkatalysators im Vergleich mit anderen Methoden des aktiven Thermomanagements zeigt sich meist dessen hoher Systemaufwand. Neben höheren Bauteilkosten des EHC gegenüber einem konventionellen OC, muss die gesamte Architektur von Abgassystem und Bordnetz überarbeitet werden. Mit Systemleistungen von bis zu 7kW zählt der EHC zu den leistungsstärksten elektrischen Nebenverbrauchern und erfordert somit eine intelligente Leistungsregelung. Demgegenüber wurde in [52] aber gezeigt, dass durch die gesteigerte Effektivität im Vergleich zu anderen Maßnahmen des Thermomanagements Potentiale zur Kostenreduktion entstehen. Als Beispiele sind die Reduktion von Katalysatorvolumen oder Edelmetallbeladung angeführt, außerdem lässt sich mit dieser Technologie ein geringerer Mehrverbrauch erzielen.

Als Erweiterung dieser Technologie kann speziell beim 48-V-Bordnetz ein Sekundärluftsystem eingesetzt werden. Dieses erhöht zwar Systemaufwand und Energiebedarf, erlaubt dafür aber bereits vor dem Motorstart ein Beheizen des Abgassystems. In [52]

konnte dabei unmittelbar nach dem Betriebsstart ein Anspringen der Katalysatoren erreicht werden. Für nähere Details dazu, sowie dem elektrischen Katalysatorheizen insgesamt, sei aber auf die Literatur verwiesen [3, 35, 52, 53, 72, 96].

2.3 Abgasgesetzgebung

Sowohl Abgasnormen, als auch die Prüfverfahren, können länderspezifisch mitunter stark variieren. Weltweit als am wichtigsten sind die EU-Gesetzgebung, sowie jene der CARB (California Air Resources-Board) in Kalifornien und der US-amerikanischen EPA (Environmental Protection Agency) zu verstehen. Daneben ist noch die japanische Abgasgesetzgebung mit ihren Prüfverfahren von Bedeutung, jene der anderen Länder basieren im wesentlichen auf einer der drei genannten [33, 67, 91]. Nicht zuletzt diese Normen veranlassten sowohl die Automobilbauer, als auch deren Zulieferer, zu ständigen Forschungen und Neuentwicklungen im Bereich der Inner- und Außermotorischen Emissionsreduktion. Im folgenden soll kurz auf die Abgasgesetzgebungen der EU, den USA und Kalifornien mit den jeweiligen Prüfverfahren eingegangen werden. Für alle gleich ist deren Unterteilung in eine Typprüfung zur Erlangung der allgemeinen Betriebserlaubnis, eine Serienprüfung zur Kontrolle der laufenden Fertigung und die Feldüberwachung im Fahrbetrieb [67].

2.3.1 Europäische Abgasgesetzgebung

Seit 1992 die EURO-1 Abgasnorm eingeführt wurde, reglementieren in der EU die EURO-Normen die Abgasgesetzgebung. Durch stufenweise Einführung neuer Klassen wurden getrennt für Diesel- und Benzinfahrzeuge die Abgasgrenzwerte sowohl für Nutzfahrzeuge, als auch PKW kontinuierlich gesenkt. Tabelle 2.3 zeigt die Entwicklung der PKW-Euronormen für Dieselfahrzeuge, Tabelle 2.4 jene für Benzinfahrzeuge. Als Be-

Tabelle 2.3: Euro-Normen für Diesel-PKW [91]

Stufe	Einführung Datum	CO g/km	HC g/km	NMHC g/km	HC+NO _x g/km	NO _x g/km	PM g/km	PN _{23nm} #/km
Euro-1	Jul. 1992	2,72	-	-	0,97	-	0,14	-
Euro-2	Jän. 1996	1,0	-	-	0,7	-	0,08	-
Euro-3	Jän. 2000	0,64	-	-	0,56	0,5	0,05	-
Euro-4	Jän. 2005	0,5	-	-	0,3	0,25	0,025	-
Euro-5	Sep. 2009	0,5	-	-	0,23	0,18	0,005	6E11
Euro-6	Sep. 2014	0,5	-	-	0,17	0,08	0,005	6E11

Tabelle 2.4: Euro- Normen für Benzin-PKW [5, 24]

Stufe	Einführung	CO	HC	NMHC	HC+NO _x	NO _x	PM	PN _{23nm}
-	Datum	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	#/km
Euro-1	Jul. 1992	2,72	-	-	0,97	-	-	-
Euro-2	Jän. 1996	2,2	-	-	0,5	-	-	-
Euro-3	Jän. 2000	2,3	0,2	-	-	0,15	-	-
Euro-4	Jän. 2005	1,0	0,1	-	-	0,08	-	-
Euro-5	Sep. 2009	1,0	0,1	0,068	-	0,06	0,005	-
Euro-6	Sep. 2014	1,0	0,1	0,068	-	0,06	0,005	6E11

sonderheit ist die Euro-6 Norm zu verstehen, welche in Unterstufen eingeführt wurde. Mit der Euro-6b kam 2014 eine neue Abgasnorm mit gegenüber der Euro-5 reduzierten Grenzwerten. Diese sind für die restlichen Euro-6 Normen gleich. Gegenüber der Euro-1 Abgasnorm wurden die Grenzwerte mit Euro-6 damit um 70- 97 % reduziert [33]. Nicht zuletzt aufgrund der immer lauter werdenden Kritik am NEDC-Testverfahren (New European Drive Cycle), erfolgte 2017 die Einführung von Euro-6c mit dem WLTC-Testverfahren [20]. Durch ein anspruchsvolleres Last-und Geschwindigkeitsprofil, wurde damit gegenüber dem alten NEFZ ein Fahrzyklus mit besserem Bezug zur Realität vorgeschrieben [33, 67]. Abbildung 2.8 zeigt eine Gegenüberstellung des früheren NEDC-Fahrzyklus gegenüber dem derzeit gültigen WLTC-Fahrzyklus, in Tabelle 2.5 ist gemäß [92] ein Vergleich der beiden Testverfahren dargestellt.

Die momentan gültige Norm ist die Euro-6d, welche im Jänner 2020 eingeführt wurde und als Testvorschrift das WLTP-Verfahren vorschreibt [22, 91]. Dieses enthält einerseits als Prüfstandtest den WLTC-Zyklus, zusätzlich aber noch das RDE-Prüfverfahren (Real-Drive-Emissions) [19], welches unter strengen Vorschriften im Realverkehr mit On-Board Messtechnik (PEMS) durchzuführen ist. Die Grenzwerte dürfen beim RDE gemäß vorgeschriebener Skalierungsfaktoren überschritten werden, bei den

Tabelle 2.5: Vergleich von NEDC und WLTC/Klasse 3-2 [92]

Testparameter	NEDC	WLTC/Klasse 3
Dauer in s	1180	1800
Distanz in km	11,023	23,266
Durchschnittsgeschwindigkeit in km/h	33,6	46,5
Höchstgeschwindigkeit in km/h	120	131,3
Maximale Beschleunigung in m/s ²	1,06	1,67
Stand-/Leerlaufdauer in s	280	235

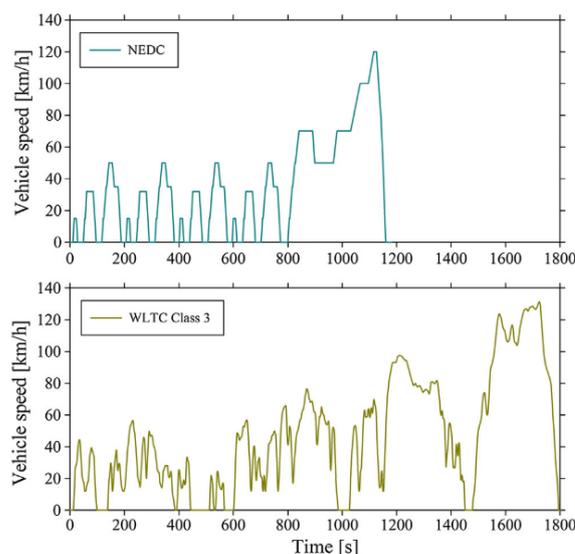


Abbildung 2.8: Geschwindigkeitsverlauf von NEDC und WLTC/Klasse3-2 über der Zeit [92]

NO_x -Emissionen derzeit um den Faktor 1,43. Nähere Details dazu sind der Literatur zu entnehmen [21, 67].

Als zukünftige europäische Norm wird die Euro-7 voraussichtlich 2025 eingeführt und sieht nicht nur eine weitere Reduktion der Grenzwerte, sondern auch die Erweiterung des Gültigkeitsbereichs der RDE-Fahrten, sowie eine Verschärfung der Kaltstartbedingungen vor. Für Diesel- und Benzinfahrzeuge werden die gleichen Grenzwerte gelten. Darüber hinaus ist die Reglementierung bisher nicht limitierter Grenzwerte wie Ammoniak, Formaldehyd (CH_2O), Kohlenwasserstoffe außer Methan (NMOG) und weiterer geplant. Bezüglich den Partikelemissionen werden voraussichtlich auch Bremsenverschleiß und Reifenabrieb berücksichtigt. Dazu wird die Reduktion von Partikelanzahl, deren Mindestgröße, sowie der Partikelmasse angestrebt. Bezüglich der Lebensdauer emissionsrelevanter Bauteile, innerhalb welcher die Grenzwerte einzuhalten sind, wird eine Erhöhung von derzeit 160.000 km und 5 Jahre auf 240.000 km und 10 Jahre vorgenommen werden. Die Tabellen 2.6 und 2.7 zeigen drei potentielle Szenarien von Grenzwerten, ein EU-Beschluss wird in naher Zukunft erwartet [9, 26, 33].

Tabelle 2.6: Euro-7 Grenzwerte für zwei mögliche Szenarien nach [9]

CO	NMOG	NO_x	NH_3	CH_4	N_2O	CH_2O	PM	$\text{PN}_{10\text{nm}}$
mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	#/km
400	45	30	10	20	20	5	2	1E11
400	25	20	10	10	10	5	2	1E11

Tabelle 2.7: Euro-7 Grenzwerte für ein mögliches Szenario nach [26]

CO	NMHC	NO _x	NH ₃	THC	PM	PN _{10nm}
mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	#/km
500	68	60	20	100	4,5	6E11

In den Euro-Normen nicht enthalten sind die Grenzwerte für CO₂-Emissionen. Diese werden durch EU-Richtlinien begrenzt. Seit 2021 gilt bei einer Tank-to-Wheel-Betrachtung (TTW) ein Zielwert von 95 g/km bezüglich der gesamten Flotte eines Automobilherstellers. Bis zum Jahr 2025 wird dieser Grenzwert um 15 % und bis 2030 um 37 % reduziert werden [24].

2.3.2 Kalifornische/US-Amerikanische Abgasgesetzgebung

Innerhalb der USA sind Unterschiede in der Abgasgesetzgebung zu beachten. Auf nationaler Ebene gültig ist die EPA-Gesetzgebung, in Kalifornien und einigen anderen Bundesstaaten jene der CARB. Durch die klimatisch-bedingt hohen Immissionswerte, wurde in Kalifornien bereits im Jahr 1968 im Rahmen des „Clean Air Act“ eine eigene Gesetzgebung geschaffen, in deren Zuge ein Programm zur stufenweisen Entwicklung eigener Abgasgesetzgebungen gestartet wurde. Seither spielt Kalifornien eine wichtige Vorreiterrolle in der US-Abgasgesetzgebung, aus der Entwicklungen wie die On-Board-Diagnose (OBD) hervorgingen [5]. Eine große Bedeutung hat die kalifornische Regelung nicht nur durch die allgemein strengeren Abgasgrenzwerte, sondern auch aufgrund der Tatsache, dass immer mehr US-Bundesstaaten sich dieser Abgasgesetzgebung anstelle der allgemein gültigen anschließen. Für beide Gesetzgebungen gelten die Grenzwerte sowohl für Benzin-, als auch für Dieselfahrzeuge. Daneben werden die selben Prüfverfahren herangezogen [5, 67].

USA

Die allgemein gültige US-Abgasgesetzgebung wurde mit der Einführung der nationalen Abgasnorm Tier-1 im Jahr 1994 ins Leben gerufen, gefolgt von der Einführung der nachfolgenden Norm Tier-2 im Zeitraum von 2000 - 2009. Die derzeit gültige Abgasnorm Tier-3 wird seit 2017 bis 2025 eingeführt. Der über mehrerer Jahre vollzogene Übergangsprozess wird Phase-In/Phase-Out Verfahren genannt. In diesem muss ein jährlich steigender Prozentsatz aller neuen Modelle die zukünftige Abgasnorm einhalten, jener Anteil an Neumodellen, welche die alte Abgasnorm einhalten, sinkt in umgekehrter Reihenfolge. Dieses Verfahren gilt für beide Abgasgesetzgebungen [5, 67, 91].

In der derzeitigen Tier-3 Norm sind die Hersteller verpflichtet, die Fahrzeuge anhand vorgegebener Kriterien individuell in Zertifizierungskriterien (Bin's) einzuteilen. Die Kriterien enthalten für die unterschiedlichen Kategorien gestaffelte Grenzwerte für NMOG + NO_x, CO, CH₂O, sowie PM und sind über eine Fahrzeuglebensdauer von 150.000 Meilen einzuhalten. Tabelle 2.8 zeigt beispielhaft die Grenzwerte der Kategorie „Bin 30“. Parallel dazu ist von den Herstellern ab 2025 ein Flottengrenzwert in Form eines Summengrenzwerts von NMOG + NO_x einzuhalten, als Limit gilt jener der Kategorie „Bin 30“ in nachfolgender Tabelle [67, 91].

Tabelle 2.8: Flottengrenzwerte ab 2025 nach Tier-3 US-Norm [91]

Standard Einheit	NMOG+NO _x mg/mi	CO mg/mi	CH ₂ O mg/mi	PM mg/mi
„Bin 30“	30	1000	4	3

Kalifornien

Nach der Einführung der nationalen Tier-1 Abgasnorm erfolgte 1995 im Zuge des LEV₁-Programms (Low Emission Vehicle) die Implementierung einer eigenen Abgasgesetzgebung. Dieses Programm wurde in den darauffolgenden Jahren schrittweise durch die Einführung von Unterstufen gemäß [67] zufolge nachfolgender Aufzählung erweitert:

- TLEV (Transational Low Emission Vehicle)
- LEV (Low Emission Vehicle)
- ULEV (Ultra Low Emission Vehicle)
- SULEV (Super Ultra Low Emission Vehicle)

Diese Unterkategorien enthalten jeweils eigene Grenzwerte. Über die Jahre 2004 - 2007 beziehungsweise 2015 - 2020 folgte die Umstellung auf LEV₂, sowie die derzeit gültige LEV₃-Abgasnorm gemäß dem bereits erläuterten Phase-In/Phase-Out Verfahren. Die Unterstufe TLEV entfiel dabei, für jede andere der genannten Untergruppen wurden dabei neue Grenzwerte definiert. Neben den LEV-Kategorien existieren noch die Kategorien ZEV (Zero-Emission Vehicle) für Fahrzeuge ohne Abgasemissionen und PZEV (Partial ZEV), für welche noch strengere Vorschriften als nach SULEV gelten. Die Vorschriften der derzeitigen LEV₃-Stufe sind sehr ähnlich der US-Tier-3-Abgasnorm. Demzufolge ist ebenfalls ein Summenlimit von NMOG + NO_x als Flottengrenzwert festgelegt, zudem sind auch hier die Fahrzeuge individuell in Kategorien einzuteilen. Dafür gelten jeweilige Grenzwerte für NMOG + NO_x, CO, PM und CH₂O, welche während

einer Fahrzeuglebensdauer von 150.000 Meilen einzuhalten sind. Insgesamt sind speziell die NO_x-Emissionen strenger reglementiert als bei den EURO-Normen, wonach beispielsweise für die niedrigste Kategorie „SULEV 20“ ein Summengrenzwert von umgerechnet nur 12,43 mg/km gilt [5, 67, 91].

Prüfverfahren

Sowohl für die US-Amerikanische, als auch die kalifornische Abgasgesetzgebung, werden die selben Prüfzyklen herangezogen, wobei derzeit noch ausschließlich auf die Vermessung am Rollenprüfstand zurückgegriffen wird. Als wichtigster Zyklus ist dabei der FTP-75, auch als US-City-Zyklus bekannt, zu nennen. Im Vergleich zum europäischen WLTC, wird beim FTP-75 ein weiterer Kennfeldbereich abgedeckt, Anteile von Leerlauf- und Stationärfahrt sind geringer und Beschleunigungen häufiger. Daneben sind im Rahmen des SFTP-Standards (Supplemental Federal Test Procedure) noch der HWFET (Highway Fuel Economy Test) zur Berücksichtigung der Überlandfahrt, der US06 als Repräsentation eines aggressiveren Fahrverhaltens, sowie der SC03 für das Fahren mit Klimaanlage vorgeschrieben. Im Rahmen des SFTP-Standards werden die Emissionsgrenzwerte durch Gewichtung berechnet. Der Kraftstoffverbrauch errechnet sich anhand kombinierter Werte von FTP-75 und HWFET. In nachfolgender Tabelle 2.9 sind die Testparameter dieser Zyklen dargestellt, deren Geschwindigkeitsverläufe und Testvorschriften sind [5] und [91] zu entnehmen.

Tabelle 2.9: Kenndaten der US-Fahrzyklen [91]

Zyklus	FTP-75	US06	SC03	HWFET
Länge in km	17,81	12,9	5,42	16,45
Dauer in s	1875+600	600	594	765
Durchschnittsgeschwindigkeit in km/h	34,2	78,1	34,8	78,4
Max. Geschwindigkeit in km/h	91,5	129,3	88,4	96,8

3 Versuchsaufbau und Betrieb am Wasserstoff-Verbrennungsmotor

Der elektrische Heizkatalysator soll im Rahmen dieser Arbeit am transienten Wasserstoffmotor untersucht werden. Dazu erfolgt die Messung größtenteils anhand von genormten Prüfzyklen unter konstanten Rahmenbedingungen. In diesem Kapitel sollen an erster Stelle der Aufbau von Motor- und Prüfstandsinfrastruktur erläutert werden. Danach wird auf die Integration des Heizkatalysators in der Abgasanlage des Wasserstoff-Verbrennungsmotors eingegangen. Im nächsten Abschnitt werden zum besseren Verständnis die Testzyklen, sowie die Rahmenbedingungen erläutert, bevor im letzten Abschnitt erste Versuche und Erkenntnisse des elektrischen Katalysatorheizens vorgestellt werden. Die ausführliche Diskussion der Ergebnisse erfolgt im fünften Kapitel dieser Arbeit.

3.1 Versuchsmotor

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgen sämtliche Prüfstandmessungen an einem 2.0l-4-Zylinder-Reihenmotor mit Kraftstoff-Direkteinblasung (DI) und Turboaufladung. Serienmäßig als Benzinbetriebener Ottomotor entwickelt, wurden vom ITnA eine Reihe von Adaptionen zum Einsatz von Wasserstoff als Brennstoff daran vorgenommen. Demzufolge kommt eine eigens entwickelte Motorsteuerung zum Einsatz. Deren Kalibrierung und Kennfelderstellung erfolgte unter Berücksichtigung des Trade-Off's zwischen minimalem Verbrauch und geringem NO_x -Emissionsausstoß, sowohl im Stationärbetrieb, als auch bei Lastwechseln [17]. Sämtliche Bauteile auf der Ansaugseite, sowie das Einspritzsystem sind nahezu unverändert. Auf der Auslassseite wurden aber nach dem Abgaskrümmen wesentliche Änderungen vorgenommen. Demzufolge kommt als Turbolader ein VTG-Lader eines Dieselmotors zum Einsatz. Die Gemischregelung erfolgt durch Ansteuerung von Drosselklappe und VTG-Steller. Der Kraftstoff wird in einer Einfacheinblasung des serienmäßigen Einspritzsystems eingebracht, der Einblasdruck kann dabei kennfeldabhängig zwischen 50 und 125 bar variiert werden. Das Zündsystem hat gemäß Literatur einen wesentlichen Einfluss auf das Betriebsverhalten und ist entsprechend adaptiert. Motor- und Ladeluftkühlung erfolgen nicht serienmäßig, sondern werden durch die Prüfstands-Haustechnik gesteuert, die Motorschmierung bleibt aber unverändert. Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, wird auf weitere Details bezüglich Serienmotor und den vorgenommenen Adaptionen auf die Literatur

verwiesen [61, 79]. Im nachfolgenden Abschnitt erfolgt die genauere Beschreibung der Umbauten im Abgassystem.

3.2 Abgassystem

Das Abgassystem ist in modularer Form aufgebaut, wodurch unterschiedlichste Katalysatorsysteme getestet und binnen kurzer Zeit getauscht werden können. Unter Anbetracht der im 2.Kapitel aufgelisteten Emissionen des stationär betriebenen Prüfmotors, wurde ein Abgassystem gemäß Abbildung 3.1 basierend auf früheren Erfahrungen des ITnA aufgebaut und für sämtliche Abgasuntersuchungen dieser Arbeit herangezogen. Der EHC wurde im ungealterten Zustand verbaut, alle weiteren Katalysatoren stammen von der Umicore AG&Co.KG und wurden hydrothermal vor deren Einsatz bei einer Temperatur von 700- 850 °C in einer Umgebung mit 10-%-Volumsanteil H₂O für 10 h gealtert [74].

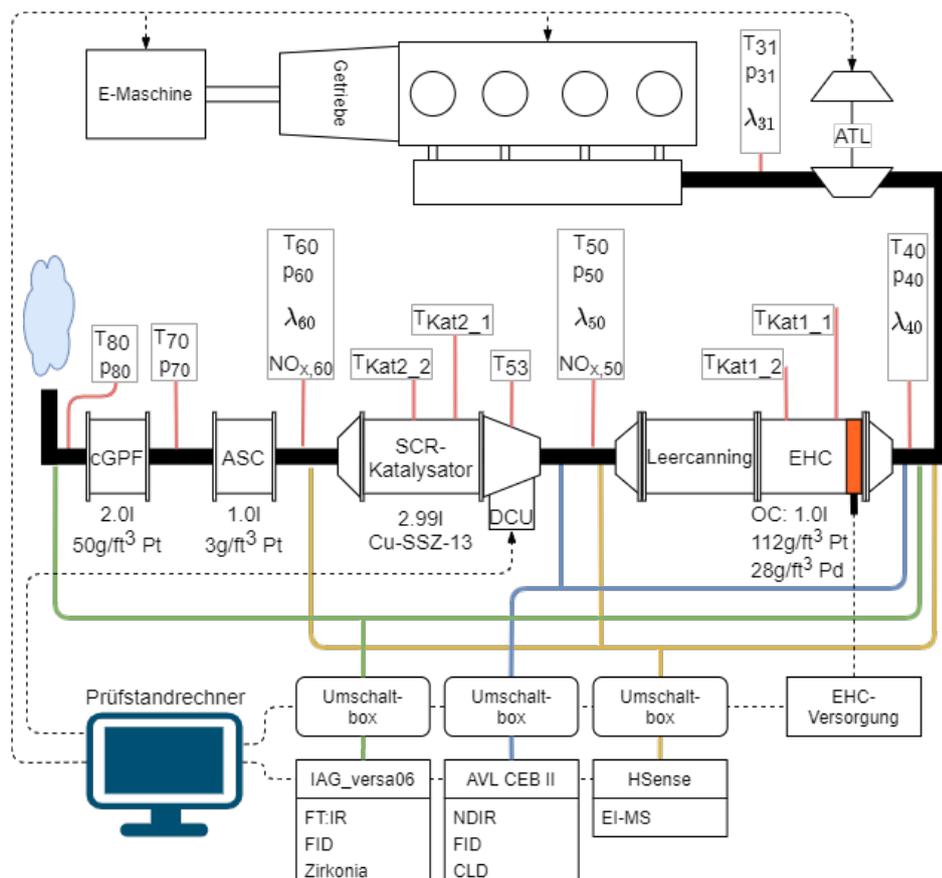


Abbildung 3.1: Abgassystem am Motorprüfstand

Heizkatalysator mit OC

Wie bereits in Kapitel zwei beschrieben, besteht der Heizkatalysator aus einer Heizscheibe und dem darauffolgenden Metaliten zur Oxidation von Schadstoffen. Die Abmessungen des Katalysators betragen $\text{Ø}143 \text{ mm} \times (9 + 55) \text{ mm}$, der integrierte Oxidationskatalysator verfügt über eine Zelldichte von 600 cpsi und einer Beladung von $140 \text{ g/ft}^3 \text{ Pt:Pd/4:1}$. Bei der Wasserstoff-VKM kommen dem OC nach [74] vier wesentliche Aufgaben zu. An erster Stelle soll der unverbrannte Wasserstoff oxidiert werden, mit dem Ziel, dessen inhibierende Wirkung auf nachfolgende SCR-Katalysatoren zu reduzieren. Jene durch die exotherme Oxidation auftretende Wärmemenge dient in weiterer Folge dazu, das stromabwärts liegende Abgassystem zu erwärmen und für ein schnelleres Anspringen der weiteren Katalysatorsysteme zu sorgen. Als weitere Kernaufgabe ist speziell im Niedertemperaturbereich für eine effektivere Stickoxid-Konvertierung im NSC- oder SCR-Katalysator die Oxidation des vom Motor emittierten NO zu NO₂ anzusehen. Zu guter Letzt ist noch die Konvertierung der aus dem Schmieröl stammenden CO- und HC-Emissionen zu nennen.

Gemäß [74] konnte gezeigt werden, dass sich herkömmliche Oxidationskatalysatoren, wie sie beispielsweise für Dieselmotoren eingesetzt werden, sehr gut für das Abgas vom Wasserstoff-Verbrennungsmotor eignen und bei der H₂-Oxidation Konvertierungsraten von über 95 % erzielt wurden. Auch bei der Konvertierung von Verbrennungsrückständen aus dem Schmieröl zeigten sich hohe Umsatzraten, sodass deren Tailpipe-Emissionen sich im Bereich der Nachweisgrenze bewegten. Beim metallischen Oxidationskatalysator im EHC wurde im Rahmen dieser Arbeit kein Konvertierungskennfeld für das Stationärverhalten erstellt. Um aber eine Aussage über dessen Konvertierungsverhalten treffen zu können, erfolgt gemäß Abbildung 3.2 eine Gegenüberstellung von Kaltstartversuchen beim EHC und dem OC aus der Literatur. Zwar ist die Raumgeschwindigkeit bei beiden etwa gleich, aufgrund der unterschiedlichen Lastpunkte kann aber kein direkter Vergleich gezogen werden. Außerdem verfügt der OC über ein Volumen von 0,81 mit einer Beladung von $50 \text{ g/ft}^3 \text{ Pt}$ und der EHC über 1,01 bei einer $112 \text{ g/ft}^3 \text{ Pt-28 g/ft}^3 \text{ Pd}$ -Beladung. Insgesamt zeigt sich aber ein ähnliches, wenn gleich etwas niedrigeres Konvertierungsverhalten des Heizkatalysators. Die Ursache dafür liegt vermutlich an Unterschieden des Konvertierungsverhaltens zwischen der keramischen und metallischen Matrix, dies wurde aber im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht. Außerdem waren bezüglich der katalytisch aktiven Oberfläche beziehungsweise den Aufbau des Washcoats der beiden Katalysatoren keine detaillierten Informationen verfügbar, weshalb die Abweichung auch darin begründet liegen könnte. Charakteristisch ist der bei niedrigeren Temperaturen einsetzende Konvertierungsbeginn durch eine raschere Erwärmung der metallischen Matrix des Oxidationskatalysators im EHC [33].

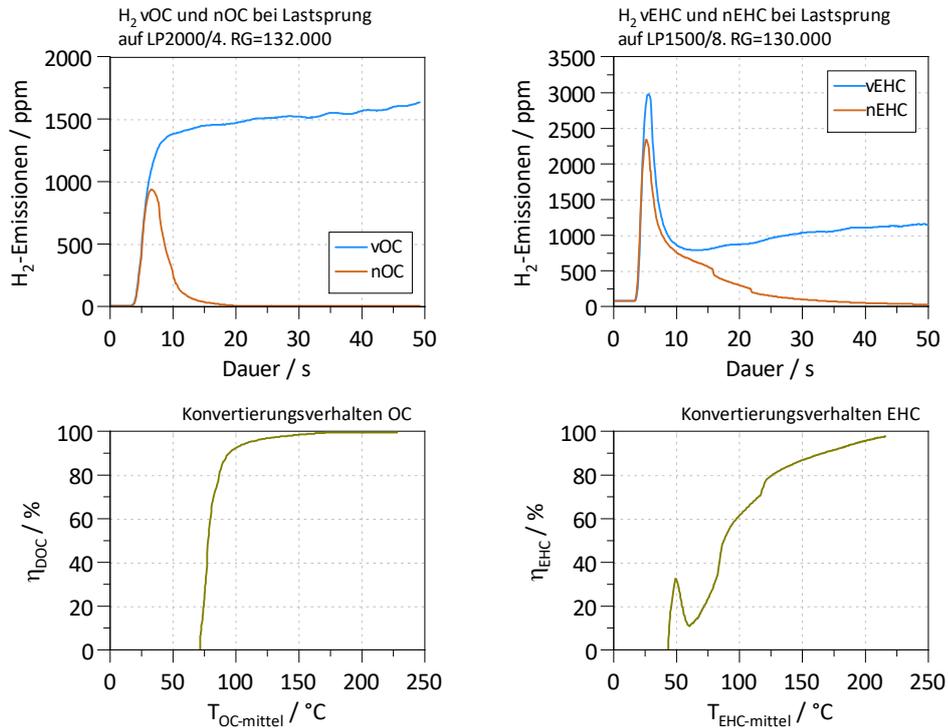


Abbildung 3.2: H₂-Emissionen und Konvertierungsverhalten für OC und EHC beim Kaltstart

Leercanning

Aus platztechnischen Gründen muss stromabwärts des EHCs ein Leercanning verbaut werden. Dieses verfügt über keine katalytische Beschichtung, führt aber aufgrund der großen wärmeabstrahlenden Fläche zu einer ungewollten Wärmeabfuhr. An dieser Stelle sei erwähnt, dass durch eine entsprechende Isolierung mit großer Wahrscheinlichkeit eine Reduktion der Wärmeverluste möglich wäre, dies aber nicht im Fokus dieser Arbeit stand und nicht zuletzt zum besseren Vergleich mit früheren Messungen darauf verzichtet wurde.

SCR-Katalysator

Aufgrund der gemäß [33] höheren Konvertierungsrate gegenüber Fe-Katalysatoren bei verhältnismäßig niedrigeren Temperaturen, kommt ein Kupfer-basierter SCR-Katalysator zum Einsatz. Der verwendete Cu-SSZ-13-Katalysator mit einer Zelldichte von 400cp-si ist dabei baugleich mit jenem in [69] und [74]. Als Reduktionsmittel wird auch in diesen Untersuchungen NH₃ eingesetzt. Bei dessen Vermessung am Wasserstoffmotor wurde in [74] gezeigt, dass bei Einsatz eines Oxidationskatalysators ein ähnliches NO_x-Konvertierungsverhalten wie bei Dieselmotoren auftritt. Im Stationärbetrieb konnte

über das gesamte Motorkennfeld eine Konvertierungsrate von über 98 % erzielt werden. Bei einem kalt gestarteten WLTC lag sie bei bis zu 90 %. Beim Einsatz ohne OC zeigte sich hingegen insbesondere bei hohen Temperaturen- und Raumgeschwindigkeiten eine deutlich abnehmende Konvertierungsfähigkeit. Die Bildung von N_2O ist gemäß [74] auf sehr ähnlichem Niveau wie beim Dieselmotor, beim Betrieb ohne OC konnte jedoch eine merklich geringere Bildung dieser Spezies festgestellt werden. Der Grund hierfür ist gemäß dieser Quelle aber wissenschaftlich noch nicht eindeutig geklärt. Insgesamt ist beim Cu-SCR die NO_x -Konvertierung ohne Oxidationskatalysator als geringer einzustufen, eine permanente Schädigung des SCR-Katalysators konnte aber nicht nachgewiesen werden. Nähere Details zum SCR-Katalysator beim Wasserstoff-Verbrennungsmotor sind der Literatur zu entnehmen [69, 74].

ASC-Katalysator

Für eine effiziente NO_x -Konvertierung ist nach [51] eine hohe NH_3 -Konzentration im SCR-Katalysator notwendig, was unweigerlich zu einem Ammoniakschlupf führt. Für sämtliche Messungen im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb ein ASC-Katalysator mit einem Katalysatorvolumen von 1,0l und einer 3 g/ft^3 -Pt-Beladung verwendet. Bei Forschungen von [69] und [74] am ITnA kam der gleiche Katalysator zum Einsatz. In deren Untersuchungen konnten damit die Tailpipe N_2O - und NH_3 -Emissionen in sämtlichen Fahrzyklen unterhalb von 5 mg/km gehalten werden. Die Harnstoffeindosierung im SCR-Katalysator erfolgte dabei überstöchiometrisch mit einem ANR=1,2 (Ammonia- NO_x -Verhältnis). Ein in Kapitel zwei beschriebenes NH_3 -beladungsbasiertes Speichermodell für den SCR-Katalysator stand für diese Untersuchungen nicht zur Verfügung. Selbiges gilt auch für sämtliche Messungen im Rahmen dieser Arbeit. Zur Einhaltung der derzeitigen Abgasgesetzgebung ist ein ASC-Katalysator nicht zwingend notwendig. In zukünftigen Abgasnormen wird der NH_3 -Ausstoß aber begrenzt werden, weshalb der ASC auch für die Untersuchungen bei der elektrischen Katalysatorheizung an der H_2 -VKM zum Einsatz kommen soll.

Partikelfilter

Im Rahmen der EHC-Untersuchungen erfolgt keine explizite Analyse des Partikelfilters. Dies stand nicht im Fokus dieser Arbeit und hätte zusätzliche Messtechnik erfordert. Da sämtliche Motorkennfelder aber beim Betrieb mit einem Partikelfilter eines benzinbetriebenen Ottomotors (cGPF) kalibriert sind, kommt er auch hier zum Einsatz und soll kurz erläutert werden. Bei der Wasserstoff-VKM entstehen Partikelemissionen nach [74] und [84] durch Verbrennung des Schmieröls. Im Vergleich zu einem Dieselmotor können die Partikelemissionen als weitaus geringer, nahezu vernachlässigbar, eingestuft werden. Nach [74] ist aus diesem Grund derzeit keine klare Aussage bezüglich der Erfordernis nach einem Partikelfilter möglich. Da aber für zukünftige Abgasgesetzgebungen

wie der Euro-7 von einer Verschärfung der Partikel-Emissionsgrenzwerte auszugehen ist, könnte auch für die H₂-VKM eine entsprechende Filterung erforderlich werden.

3.3 Infrastruktur und Messtechnik

Sämtliche Prüfstandfunktionen und Messgeräte werden von einem zentralen Prüfstandrechner aus über das Prüfprogramm „Tornado“ von KS-Engineers gesteuert. Dazu zählen das Aufzeichnen von Sensordaten, das Ansteuern von Prüfstandinfrastruktur und Teile der Motorsteuerung. Die Kommunikation zwischen den Steuergeräten, der Haustechnik, diversen Messgeräten und sonstigen Systemen erfolgt über einen CAN-Bus, Ethernet-LAN, oder serielle Schnittstellen. Das Kühlwasser der Motor- und Ladeluftkühlung kann von der Haustechnik durch den Einsatz von Wärmetauschern konditioniert werden, außerdem sorgt diese für eine Absaugung der motorischen Abgase aus dem Auspuffsystem. Wie bereits in Abbildung 3.1 gezeigt, stehen mehrere Messgeräte mit unterschiedlichen Analysatoren zur Verfügung. Dazu zählen ein FT:IR-Spektrometer (Fourier-Transformations-Massenspektrometer), ein Massenspektrometer zur H₂-Detektion, sowie zwei Messgeräte zur Messung von Kohlenwasserstoffemissionen wie HC, CO und CO₂. Mit dieser Infrastruktur können gleichzeitig die Engine-Out- und Tailpipe-Emissionen gemessen werden. Der Einsatz von Umschaltboxen ermöglicht für jedes Messgerät zudem das Switchen auf verschiedene Messpositionen im gesamten Abgassystem. Zur Vermeidung der Kondensation des Produktwassers im Abgas, erfolgt eine Beheizung aller Messleitungen dieser Geräte. Neben Emissionsmessgeräten sind gemäß Abbildung 3.1 zwischen den Katalysatoren außerdem Temperatur- und Drucksensoren, sowie serienmäßige Lambda- und NO_x-Sensoren verbaut. Speziell die Temperatursensoren T₄₀ vor dem EHC, sowie T₅₀ vor- und T_{Kat2_2} im SCR-Katalysator sind für Simulation und Auswertung besonders wichtig. Die Temperatursensoren sind dabei als NiCr/Ni-Thermoelemente ausgeführt. Als Lambdasonden kommen aufgrund des Verbrennungsluftverhältnisses Breitbandsonden, wie sie auch beim Dieselmotor verwendet werden, zum Einsatz. Die Messung des Motordrehmoments erfolgt mithilfe eines Drehmoment-Messflansches zwischen E-Maschine und Getriebe, der H₂-Verbrauch wird durch einen Coriolis-Massendurchflussmesser in der Gaszuleitung aufgezeichnet.

3.4 Integration des Heizkatalysators am Motorprüfstand

Aufbau und Funktion des Heizkatalysators wurden bereits in den Abschnitten 2.2 und 3.2 erläutert. Grundsätzlich soll in dieser Arbeit der Einsatz des Heizkatalysators am 12-V-Bordnetz einer H₂-VKM gezeigt werden. Aus Verfügbarkeitsgründen erfolgt die

Messung am Motorprüfstand aber an einem für das 48-V-Bordnetz optimierten EHC mit einer maximalen Heizleistung von 3 kW. Da für die Auswertung primär der Temperaturverlauf, die Emissionskonvertierung, die Heizleistung und die Heizenergie von Relevanz sind, wurde das 48-V-Bordnetz für die Messungen als zulässig erachtet. Als Energiequelle dient ein externes Schaltnetzteil. Die Leistungsregelung des EHCs erfolgt über den Prüfstandrechner durch das Einstellen eines Spannungsniveaus am Netzteil. Nach dem Ohm'schen Gesetz ergibt sich zufolge des Innenwiderstandes der Heizescheibe die elektrische Heizleistung gemäß Formel 3.1.

$$P_{\text{el,EHC}} = \frac{U^2}{R_i} \quad (3.1)$$

Der Innenwiderstand R_i wurde in einem Temperaturbereich von 100-400 °C mit 659-691 mΩ gemessen. Für einen 12-V-Heizkatalysator bei gleicher Heizleistung müsste dieser entsprechend kleiner ausgelegt werden. Um das Netzteil keinen raschen Ein-/ Ausschaltvorgängen bei bereits hohen Stromwerten von etwa 70 A im Konstantbetrieb auszusetzen, erfolgt dies über ein SST-Relais (Solid-State). Deren Ansteuerung wird ebenfalls vom Prüfstandrechner vorgenommen, was das Einstellen einer Soll-Heizleistung erlaubt, noch bevor der EHC die Beheizung aufnimmt. In Abbildung 3.3 ist die Integration des EHCs am Prüfstand dargestellt.

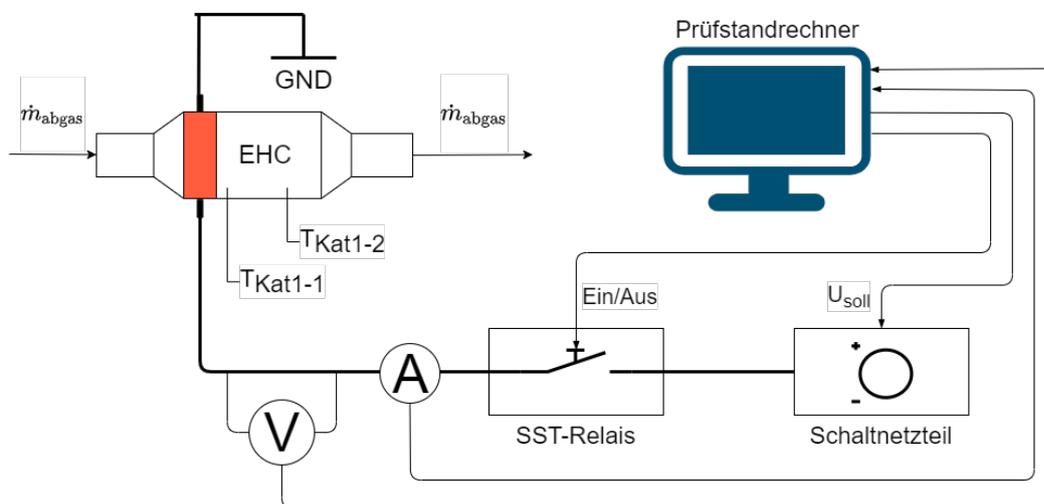


Abbildung 3.3: Integration und Aufbau des Heizkatalysators am Motorprüfstand

Wie in der Abbildung ersichtlich, kommt im Rahmen dieser Arbeit kein Sekundärluftsystem zum Einsatz. Dies liegt einerseits daran, dass für den untersuchten Antriebstrang kein serienmäßiges Sekundärluftsystem zur Verfügung stand. Andererseits wurde

versucht, aufgrund des hohen Konstruktions- und Kostenaufwands dieses Systems, darauf zu verzichten. Mithilfe einer günstigen Heizstrategie sollte versucht werden, bei der elektrischen Katalysatorheizung an der Wasserstoff-VKM ohne eingebrachter Sekundärluft eine hohe Schadstoffkonvertierung zu erzielen.

Als Messtechnik zur Überwachung der Heizleistung kommt einerseits eine Strommesszange zum Einsatz, andererseits kann die Spannungsmessung durch zwischenschalten eines Spannungsteilers über einen analogen Eingang des Prüfsystems gemessen werden. Daraus lassen sich bei der Auswertung Heizleistung, Heizenergie und Kraftstoff-Mehrverbrauch bestimmen. Wie in Abbildung 3.3 angedeutet, kann außerdem an den Messstellen T_{Kat1_1} und T_{Kat1_2} im Inneren des Heizkatalysators eine Temperaturmessung sowohl in der Randschicht, als auch mittig vorgenommen werden. Die Messstelle T_{Kat1_1} ist zur Temperaturüberwachung der Heizscheibe so nah, wie fertigungstechnisch möglich, verbaut.

In nachfolgender Abbildung 3.4 sind die Erwärmung der Heizscheibe bis hin zum Glühen, sowie der entsprechende Temperaturverlauf bei einem Aufheizversuch dargestellt. Bei diesem Aufheizvorgang kommt es zu keiner Durchströmung des EHCs. Das NiCr/Ni-Thermoelement ist, wie in der Abbildung ersichtlich, im Zentrum der Heizscheibe angebracht. Der hohe Temperaturgradient verdeutlicht die Notwendigkeit der Temperaturüberwachung in unmittelbarer Nähe stromabwärts der Heizscheibe. Bei Überschreiten der Grenztemperatur $T_{\text{Kat1}_1} = 700\text{ °C}$, erfolgt deshalb für alle weiteren Vermessungen im Rahmen dieser Arbeit das sofortige Abschalten der Heizleistung. Für

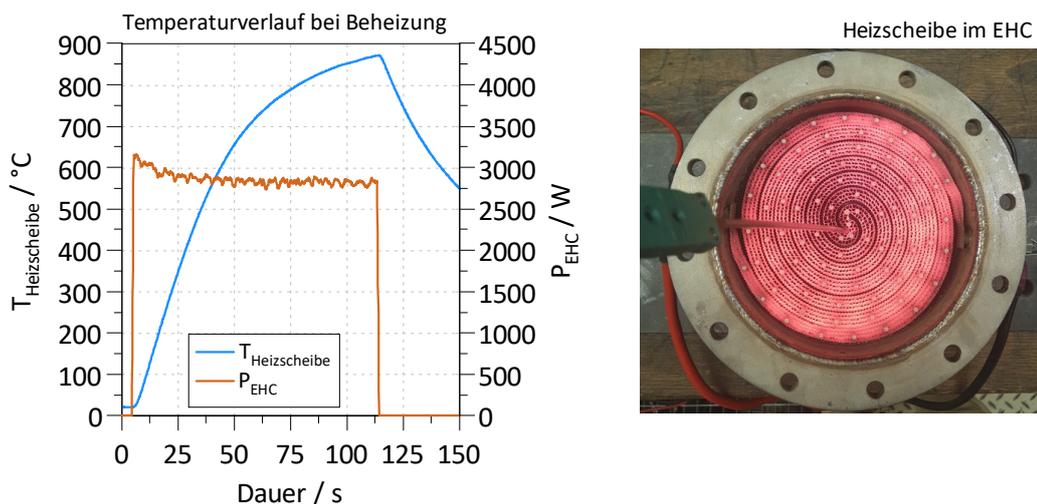


Abbildung 3.4: Temperaturverlauf und Darstellung der Heizscheibe bei einem Aufheizversuch

einen ausreichenden Wärmetransport durch den Abgasmassenstrom wird zudem die Beheizung erst ab einer Motordrehzahl $n_{\text{motor}} = 500 \text{ min}^{-1}$ freigeschaltet. Dies soll eine Schädigung des Katalysators verhindern.

In Abbildung 3.4 gut erkennbar ist der leichte Abfall der Heizleistung nach dem Einschalten. Dieses Phänomen konnte bei sämtlichen Messungen beobachtet werden und ist bei vorgegebener Spannung auf den thermisch bedingten Anstieg des elektrischen Widerstandes der Heizwicklung zurückzuführen.

Die Auswertung des Heizenergieverbrauchs erfolgt im Rahmen dieser Arbeit auf zwei Arten. Einerseits wird die Nettoenergie durch Integration der Heizleistung ermittelt. Andererseits muss zur Berechnung des Kraftstoff-Mehrverbrauchs untersucht werden, wie die Energie zur Verfügung gestellt wird. Dies kann im günstigsten Fall verbrauchsneutral im Schleppbetrieb oder beim Bremsen durch den Generator erfolgen. Andererseits aber auch im gefeuerten Motorbetrieb, was zu einer höheren Drehmomentforderung führt und einen Mehrverbrauch verursacht. Damit einhergehend kommt es aber auch zu einem Anstieg der Abgastemperaturen, was die benötigte Heizenergie wiederum in geringem Maße reduzieren kann. Diese Untersuchungen erforderten die Erstellung eines Berechnungsmodells, weshalb darauf im Zuge der Simulation beziehungsweise bei der Ergebnisdiskussion eingegangen wird.

3.5 Fahrzyklen und Testbedingungen

Um eine möglichst aussagekräftige Beurteilung des elektrischen Heizkatalysators vornehmen zu können, wird dieser an verschiedenen Prüfzyklen getestet und Messungen bei gleicher Abgassystemkonfiguration ohne zusätzlichen Heizmaßnahmen gegenübergestellt. Zuerst soll auf die Fahrzyklen eingegangen werden, an zweiter Stelle erfolgt die Erläuterung der Testbedingungen.

3.5.1 Fahrzyklen

Im Rahmen dieser Arbeit werden grundsätzlich drei Prüfzyklen zur Untersuchung herangezogen. Dazu zählen der WLTC, sowie ein Low-load RDE-Zyklus und ein High-load RDE-Zyklus. In Tabelle 3.1 sind die Eckdaten der Zyklen aufgezählt. Abbildung 3.5 zeigt deren Geschwindigkeitsverläufe über der Zeit. Durchschnittliches und maximales Drehmoment werden unter der Annahme eines C-Segment-Fahrzeuges anhand einer am ITnA durchgeführten Längsdynamik-Simulation ermittelt. Die Fahrzeugmasse beträgt dabei 1675 kg. Als Getriebe wird ein 7-Gang Automatikgetriebe verwendet [69].

Tabelle 3.1: Vergleich von WLTC [20, 92], High-load RDE-Zyklus und Low-load RDE-Zyklus

Testparameter	WLTC	Low-load RDE	High-load RDE
Dauer in s	1800	2313	885
Distanz in km	23,66	9,05	12,89
Durchschnittsgeschwindigkeit in km/h	46,5	26,4	52,6
Höchstgeschwindigkeit in km/h	131,3	51,5	133,3
Stillstandszeit in %	13,1	31,5	1,6
Mittleres Motordrehmoment in Nm	41,5	14,7	58,7
Maximales Motordrehmoment in Nm	297	177	317

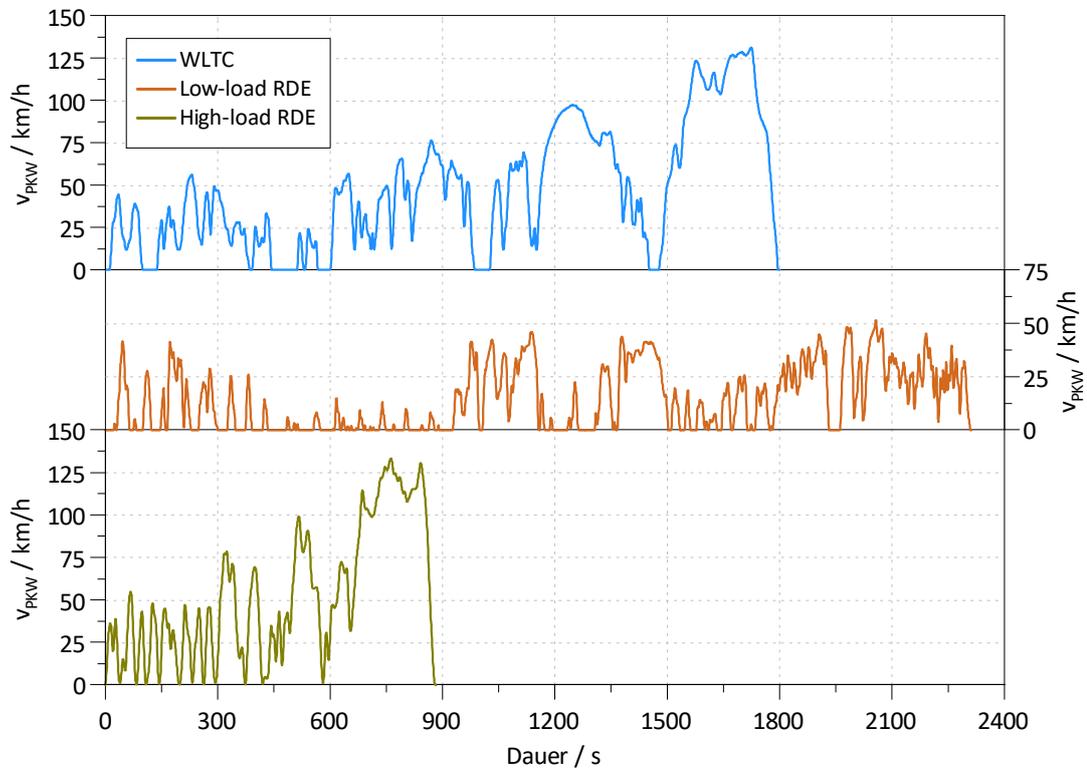


Abbildung 3.5: Vergleich der untersuchten Fahrzyklen

Der genormte WLTC-Prüfzyklus wurde bereits im 2.Kapitel erläutert und wird in zwei Varianten eingesetzt. Neben dem WLTC-Start/Stop, erfolgt die Untersuchung am WLTC-Idle. Bei letzterem wird, als Maßnahme des Thermomanagements, in den ersten 600 Sekunden nach Zyklusstart im Falle eines Fahrzeugstillstandes der Motor zur Aufwärmung des Abgassystems bei gefeuertem Leerlauf betrieben. Nach dieser Warmlaufphase erfolgt der Wechsel auf Motor-Start/Stop. Diese Maßnahme findet auch in der

Praxis eine häufige Verwendung. Für die Reglerauslegung im fünften Kapitel kommt noch der WLTC-City-Idle Zyklus zum Einsatz. Dieser entspricht den ersten 445 Sekunden dem WLTC-Idle und fokussiert die unmittelbare Kaltstartphase.

Der Low-load RDE-Zyklus ist repräsentativ für einen Stadtzyklus und enthält ausgedehnte Stop-and-go-Phasen. Daran soll das Anspringen der Katalysatoren bei elektrischer Katalysatorheizung nach Kaltstart untersucht werden. Wie beim WLTC-Idle erfolgt in den ersten 1300 Sekunden nach Motorstart bei Fahrzeugstillstand der Betrieb im gefeuerten Leerlauf, danach wird die Start/Stop-Funktion aktiviert.

Der High-load RDE-Zyklus kommt als Repräsentation eines sportlichen Fahrverhaltens bei Stadt-, Überland- und Autobahnfahrten zum Einsatz. Trotz des frühen Light-Off's, kommt es in den ausgedehnten Schubphasen mit hohem Abgasmassenstrom zu einem raschen Auskühlen des Abgassystems. An dieser Stelle soll die elektrische Katalysatorheizung als Thermomanagementmaßnahme zur Verbesserung des Abkühlverhaltens untersucht werden.

3.5.2 Testbedingungen

Sämtliche Fahrzyklen werden mit kaltem Motor gestartet. Um einen aussagekräftigen Vergleich vornehmen zu können, erfolgt eine Vorkonditionierung von Motor und Abgassystem. Das Motorkühlmittel wird dabei auf 30 °C konditioniert und durch den Motorkühlkreislauf gepumpt, für das Abgassystem kommt das RCD⁺-Verfahren (Rapid-Cooldown-Plus) nach [75, 98] zum Einsatz. Dabei wird das gesamte Abgassystem zur Abkühlung mit trockener Luft durchströmt. Zusätzlich sorgen Gebläse für die Kühlung von Motorblock, Ölwanne und Abgassystem bis auf eine Temperatur von unter 30 °C. Die Umgebungsluft im Prüfraum wird von der Haustechnik während der gesamten Messung auf 23 °C geregelt [20, 69]. Neben der Einstellung einer Starttemperatur des Abgassystems, wird auch der Speicherzustand des SCR-Katalysators konditioniert. Da im Rahmen dieser Arbeit kein beladungsbasiertes NH₃-Speichermodell für den SCR-Katalysator zur Verfügung stand, erfolgt eine Anfangsbeladung auf 30 % bei einer Abgastemperatur $T_{\text{Kat}2_2} = 315 \text{ °C}$. Dazu wird in einem ersten Schritt der SCR-Speicher bei einem entsprechenden Lastpunkt solange entleert, bis vSCR und nSCR die gleichen NO_x-Emissionen messbar sind. Im zweiten Schritt erfolgt dann bei einem stationären Lastpunkt mit konstanter Harnstoffeindosierung die entsprechende NH₃-Beladung. Danach wird der Motor umgehend abgestellt und der Rapid-Cooldown eingeleitet.

Während der Zyklen startet ab einer Abgastemperatur T_{50} von 180 °C und einer in Echtzeit gemessenen NO_x-Rohemission von mehr als 4,153 mg/s die Harnstoffeindosierung. Dieser Grenzwert ist den technischen Spezifikationen der Eindosiervorrich-

tung geschuldet, wonach eine Mindestmenge von 10 mg/s AdBlue[®] eindosiert werden kann. Die Berechnung der Einspritzmenge erfolgt unter Berücksichtigung des in Kapitel zwei erläuterten Zielkonflikts zwischen hoher NO_x-Konvertierung und geringem NH₃-Schlupf für alle Zyklen mit einem ANR = 1,2. Die entsprechende Berechnungsmethodik für Harnstoffeindosiermenge- und Stickoxidgehalt im Abgas stammt aus [86] und ist dem Anhang zu entnehmen. Die Motorsteuerung erfolgt für alle Zyklen gleich durch im Steuergerät hinterlegte Motorkennfelder, sowie definierte Lastwechselfparameter. Für die elektrische Beheizung des EHCs kommen unterschiedliche Regelstrategien zum Einsatz. Mehr dazu in Kapitel fünf.

3.6 Elektrisches Katalysatorheizen beim transienten Wasserstoff- Verbrennungsmotor

In diesem Abschnitt soll der Einfluss des elektrischen Heizkatalysators beim Betrieb an der Wasserstoff-VKM vorgestellt werden. Bei dieser Antriebsart sind gemäß Kapitel zwei insbesondere die NO_x-Emissionen von hoher Bedeutung, weshalb der EHC auch unmittelbar vor dem SCR-Katalysator zum Einsatz kommt. Gegenüber einem Dieselmotor aus [3], zeigt sich bei der H₂-VKM nach Abbildung 3.6 das vor allem zu Beginn charakteristische, niedrigere Temperaturniveau beim WLTC-Start/Stop. In diesem Bereich soll der EHC durch gezielte Heizeingriffe zur rascheren Erwärmung des Abgases führen und die NO_x-Konvertierung steigern. Die Daten des 2.0l-Dieselmotors stammen aus [3] und wurden bei einem Fahrzeuggewicht von 2.040 kg mit einem 6-Gang Schaltgetriebe ermittelt. Angemerkt sei, dass im Gegensatz zur H₂-VKM beim Dieselmotor

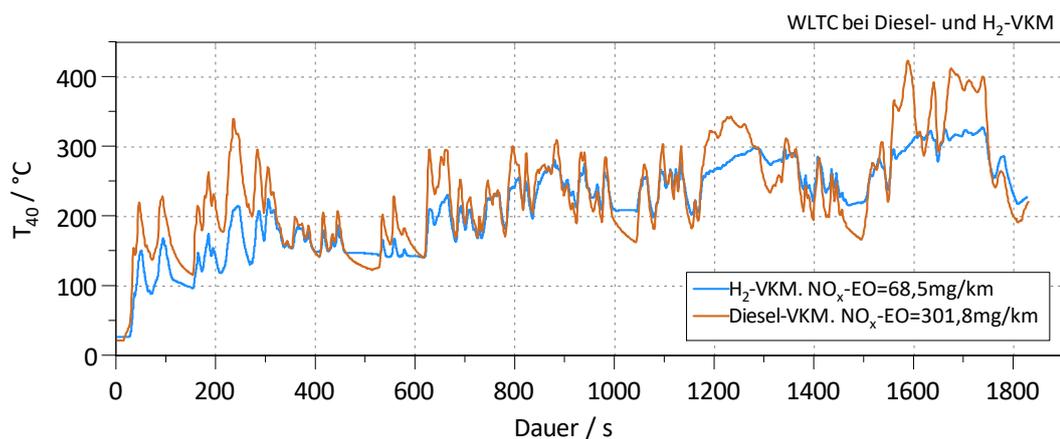


Abbildung 3.6: Abgastemperaturverlauf nATL beim WLTC-Start/Stop einer Wasserstoff-VKM im Vergleich mit einem Dieselmotor [3]

3.6 Elektrisches Katalysatorheizen beim transienten Wasserstoff- Verbrennungsmotor

zum rascheren Aufwärmen des Abgassystems Eingriffe in die Motorsteuerung vorgenommen wurden. Nähere Details dazu sind der Literaturquelle zu entnehmen.

Als sehr wichtige Erkenntnis vorab kann gesagt werden, dass die geringe Zündenergie des Wasserstoffes zu keinen unkontrollierten oder explosionsartigen Entzündungen von unverbranntem Wasserstoff im EHC führte. Selbst bei aufgetretenen Zündaussetzern mit hohen H_2 -Rohemissionen im Bereich der Zündbarkeit traten keinerlei Probleme auf, was zeigt, dass sich dieses System bei Wasserstoff als Brennstoff problemlos anwenden lässt. Da der EHC primär zur Aufheizung des Abgassystems nach einem Motor-Kaltstart eingesetzt werden soll, ist in nachfolgender Abbildung 3.7 ein solcher Versuch dargestellt. Die elektrische Beheizung erfolgte mit der maximalen Heizleistung von 3 kW und einer Ein-/Aus-Regelung bei einer Schwelltemperatur von $T_{50} = 300\text{ °C}$. Der SCR wurde vor den Messungen mit NH_3 auf einen Speicherstand von 30 % beladen, ab einer Temperatur $T_{50} = 180\text{ °C}$ erfolgte dann eine Harnstoffeindosierung mit einem ANR = 1,2. In der Abbildung ersichtlich sind der rasche Temperaturanstieg der Abgastemperatur T_{50} vSCR, sowie deren starke Schwingung durch die Beheizung. Dies liegt an der verhältnismäßig hohen thermischen Trägheit des Abgassystems, durch den Einsatz eines PID-Reglers lässt sich aber eine Reduktion der Überschwingungen erzielen. Mehr dazu im 5. Kapitel. Bezüglich der Temperatur T_{SCR} ist in den ersten 25 - 40 Sekunden nach

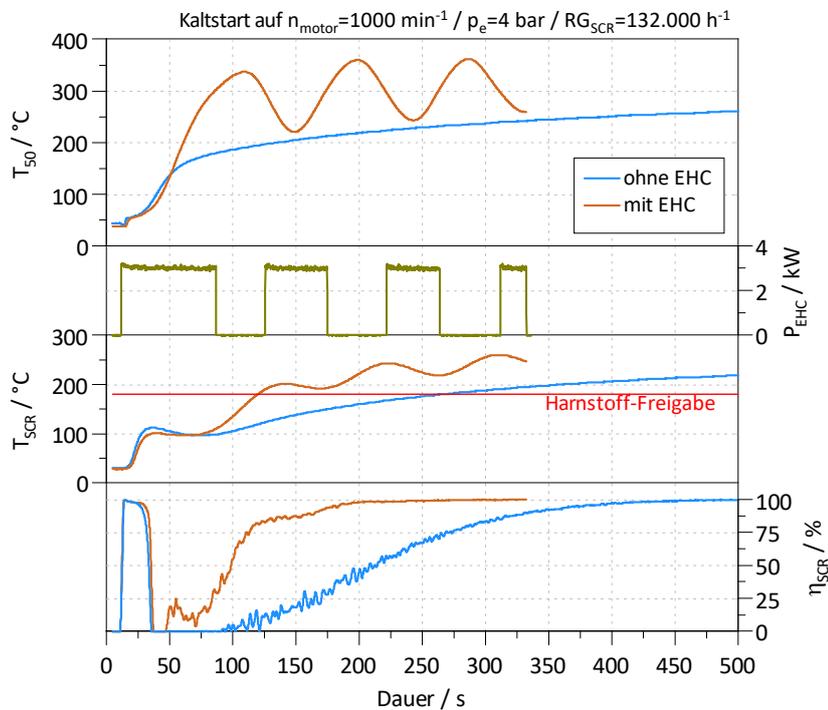


Abbildung 3.7: Kaltstartversuch mit und ohne EHC-Beheizung

Kaltstart mit und ohne Heizmaßnahmen ein starker Temperaturanstieg zu verzeichnen. Dies liegt [18] und [23] zufolge an der exothermen Adsorption von H_2O im Zeolithen. Danach kann bei elektrischer Katalysatorheizung ein schnellerer Temperaturanstieg verzeichnet werden. Der SCR-Light-Off trat demzufolge bereits nach etwa 100 Sekunden und damit um 110 Sekunden früher im Vergleich zur Messung ohne Beheizung ein. Insgesamt wurde die Zeit bis zum Erreichen einer 99%-igen NO_x -Konvertierungsrate etwa halbiert. Zusätzlich konnte die Freigabe der Harnstoffdosierung um etwa 28 Sekunden vorverlegt werden, was einen hohen NO_x -Umsatz weiter beschleunigt. Die hohe NO_x -Konvertierung zu Beginn des Lastsprungs ist auf die Kalteinspeicherung gemäß [23] zurückzuführen. Selbiges Phänomen kann auch bei sämtlichen Fahrzyklen beobachtet werden. Aus diesen Erkenntnissen lässt sich das hohe Potential der elektrischen Katalysatorheizung bereits erahnen.

4 Simulationsmodell

Um die Abgasmessungen durch Berechnungen zu überprüfen, sowie den Messaufwand zu reduzieren, wurde im Zuge dieser Masterarbeit ein Simulationsmodell entwickelt. Eine Gliederung des Modells erfolgt in ein Temperaturmodell zur Simulation der Abgastemperatur, sowie einem Energiespeichermodell zur Ermittlung der Bordnetzbelastung durch die EHC-Heizleistung. Für die Gesamtsimulation werden diese beiden Teilmodelle gekoppelt, womit einerseits eine geeignete Heizstrategie für das möglichst rasche Erreichen der Light-Off Temperatur des SCR-Katalysators ermittelt werden kann. Andererseits erlaubt die Gesamtsimulation durch Annahme eines Motorwirkungsgrades die Abschätzung des Kraftstoffmehrverbrauches, sowie die Zustandsüberwachung der Batterie. Das Simulationsmodell wurde mit Messdaten parametrisiert und in der Simulationsumgebung Matlab-Simulink/Simscape erstellt. Abbildung 4.1 zeigt den schematischen Aufbau des Simulationsmodells.

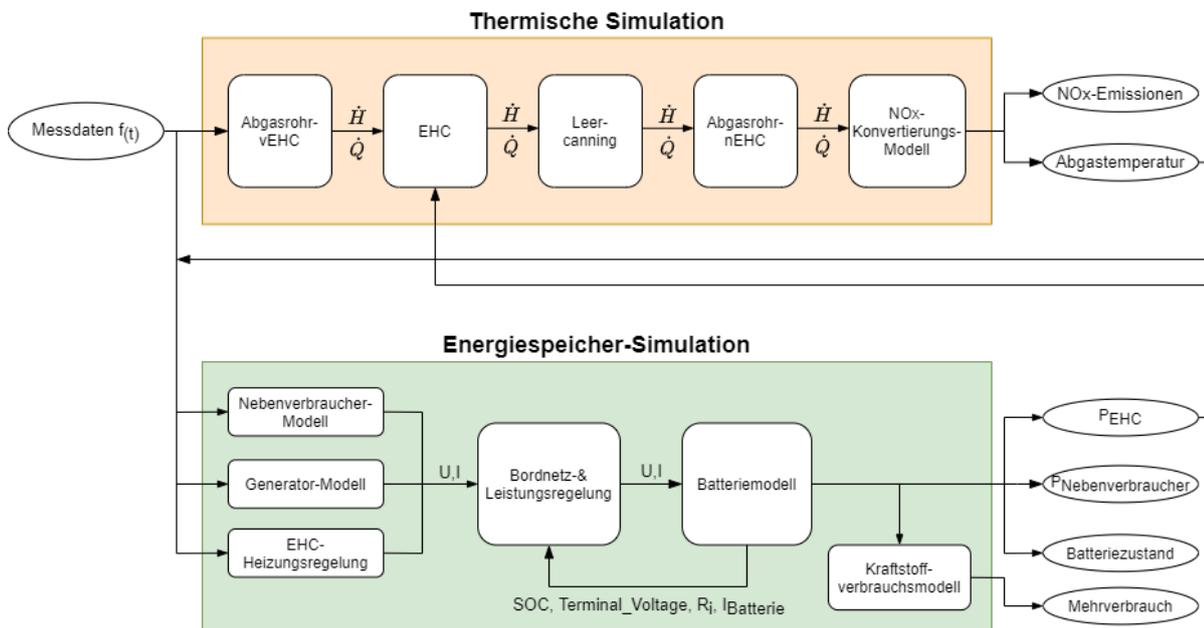


Abbildung 4.1: Schematischer Aufbau des Simulationsmodells

4.1 Thermische Simulation des Abgassystems

Das im Zuge dieser Masterarbeit erstellte Temperaturmodell soll in erster Folge dafür genutzt werden, eine günstige Heizstrategie für ein rasches Anspringen des SCR-Katalysators zu generieren. Durch die Simulation der Abgastemperatur konnte der Einfluss der elektrischen Katalysatorheizung anhand ausgewählter Fahrzyklen bei unterschiedlichen Heizstrategien identifiziert und für die Erstellung eines Messplans herangezogen werden. Nur durch eine rasche Erwärmung des gesamten Abgassystems und damit dem Anspringen der Katalysatoren bereits kurz nach dem Motorstart wird es möglich sein, zukünftige gesetzliche Abgasgrenzwerte einzuhalten. Im Verlauf der Modellierung wurde zunächst ein vereinfachtes Rohmodell erstellt, welches stückweise erweitert und dahingehend optimiert wurde, die in Messungen aufgezeichneten Abgastemperaturen möglichst genau reproduzieren zu können. Dafür war eine Kalibrierung mit Messdaten zur Bestimmung unbekannter Modellparameter notwendig. Im nächsten Schritt erfolgten die Implementierung der elektrischen Beheizung durch die Heizscheibe im EHC, sowie eines NO_x -Konvertierungsmodells, bevor die Entwicklung einer effizienten Regelstrategie vorgenommen werden konnte. Diesbezüglich wurden zwei unterschiedliche Reglersysteme untersucht und optimiert, welche in Kapitel fünf diskutiert werden. Im letzten Schritt folgte die Ergänzung des Temperaturmodells mit einem Batteriemodell, was eine Analyse des gesamten Heizsystems ermöglicht. Damit lässt sich eine Abschätzung des aus der Beheizung resultierenden Kraftstoffmehrverbrauches durchführen. Außerdem kann dadurch eine konzeptionelle Hardwareauslegung des Energiespeichersystems beim Betrieb eines elektrischen Heizkatalysators an einer Wasserstoff-VKM vorgenommen werden.

4.1.1 Beschreibung des modellierten Abgassystems

In Abbildung 4.2 ist das motornahe Abgassystem des Prüfstandmotors dargestellt und der für die thermische Simulation herangezogene Teil, vom Austritt aus dem Turbolader bis zur Harnstoff-Eindosierstrecke, hervorgehoben. Weitere Komponenten stromabwärts des modellierten Systems können aufgrund der damit einhergehenden beträchtlichen Steigerung der Komplexität nicht simuliert werden. Ausgehend vom Realsystem sind für die Modellierung einige Abstrahierungen notwendig. Dazu wird eine Unterteilung in vier Systemkomponenten vorgenommen, wodurch sich die Möglichkeit bietet, für jede dieser Komponenten die thermischen Zustandsgleichungen getrennt voneinander zu lösen und durch geeignete Wärmeübertragungsmechanismen miteinander zu koppeln. Abbildung 4.3 zeigt das abstrahierte Abgassystem mit der erläuterten Unterteilung in Systemkomponenten. Eine detaillierte Beschreibung des Abgassystems erfolgte bereits in Kapitel drei, weshalb hier nur kurz auf die Bauteile eingegangen wird. An erster Stelle, also zwischen dem Turboladerausstritt und dem EHC ist das Abgasrohr-vEHC

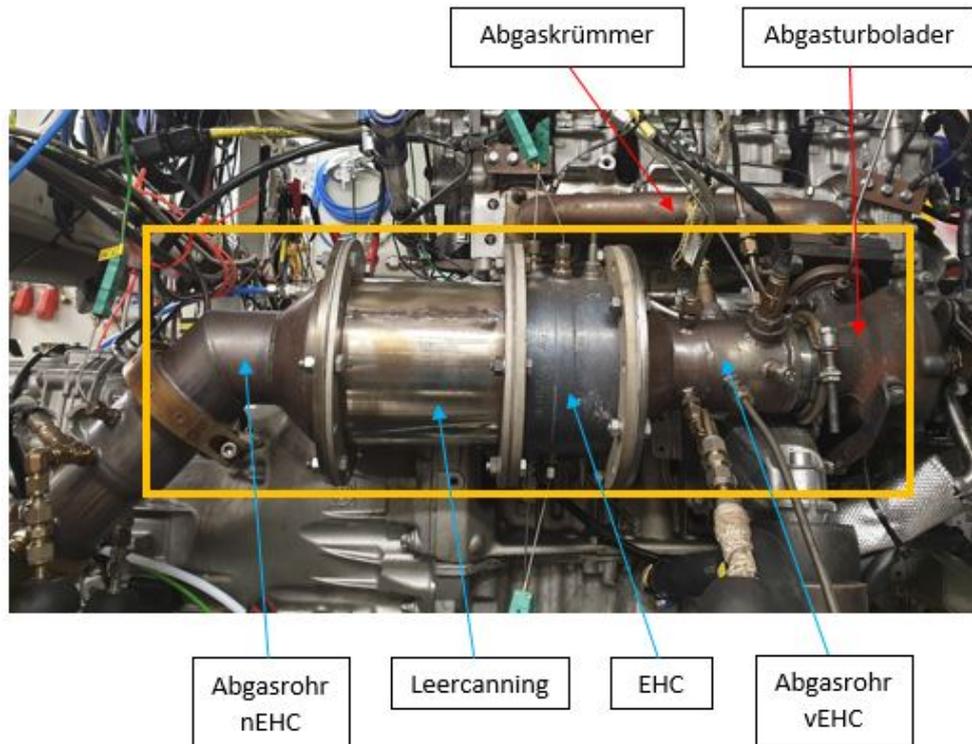


Abbildung 4.2: Motornahes Abgassystem am Motorprüfstand

montiert, welches sämtliche Anschlüsse für die verwendeten Abgasmessgeräte enthält. Stromabwärts sind der EHC, das Leercanning und das Abgasrohr-nEHC verbaut, bevor die Verbrennungsgase in die Harnstoff-Eindosierstrecke des SCR-Katalysators eintreten. In Abbildung 4.3 sind außerdem sämtliche Messstellen dargestellt. EM_{40} steht dabei für jene der Emissionmessgeräte zur Messung der Rohabgase. Neben den vier genannten Komponenten werden außerdem noch die Massen der Verschraubungen für

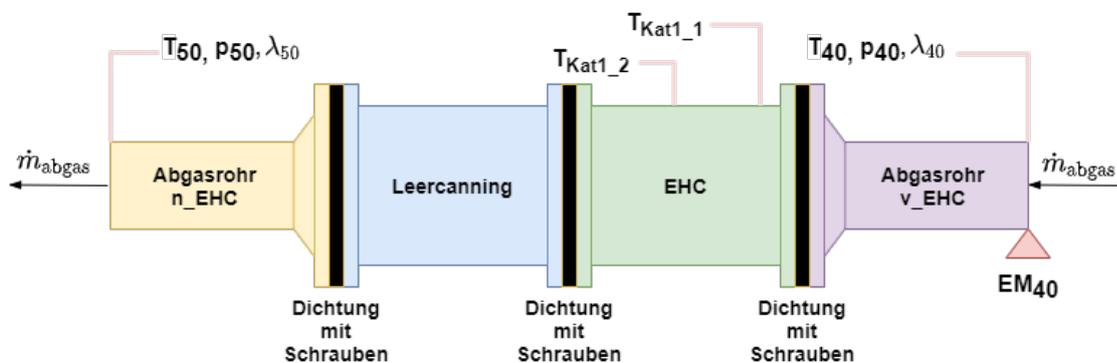


Abbildung 4.3: Abstrahiertes Abgassystem mit Unterteilung in Komponenten

die Befestigung der Flansche, sowie die Dichtungen zwischen den Flanschen zur Berücksichtigung der axialen Wärmeleitung in die Simulation integriert.

4.1.2 Thermodynamische Modellierung - Literaturstudie

Für die Erstellung des Temperaturmodells wurde vorab eine Literaturrecherche durchgeführt, wobei der nachfolgende Abschnitt einen Überblick über die verbreiteten Modellierungsverfahren für PKW-Abgassysteme auf Basis eines Dreiwegekatalysators bieten soll. Nach [81] können Katalysator-Temperaturmodelle in eine der drei folgenden Kategorien eingeteilt werden:

Detaillierte Physikalische Modelle

Diese Modelle basieren auf bekannten chemischen, thermodynamischen, sowie strömungsmechanischen Grundsätzen der Strömung reaktiver Medien und berücksichtigen dreidimensionale Energie- und Massenerhaltungssätze. Außerdem wird die Änderung der Abgaszusammensetzung durch chemische Reaktionen innerhalb von Katalysatoren, im Speziellen Dreiwege-Katalysatoren, berücksichtigt [81, 95].

Vereinfachte kinetische Modelle

Derartige Modelle basieren auf den Reaktionen der einzelnen Gaskomponenten, sowie der Modellierung des Einflusses der Oberfläche auf die Geschwindigkeit und Häufigkeit der ablaufenden Reaktionen. Außerdem werden chemische Vorgänge wie die Sauerstoffspeicherung im Metaliten des Dreiwegekatalysators berücksichtigt, welche einen nicht unbedeutenden Einfluss auf das Oxidationsverhalten des Katalysators haben [81].

Vereinfachte dynamische Modelle

Diese Temperaturmodelle gehen im Wesentlichen davon aus, dass die dynamischen Vorgänge der Gasspeicherung gegenüber anderen chemischen Reaktionen überwiegen und demnach das Katalysatorverhalten maßgebend beeinflussen. Die Modelle enthalten in der Regel stationäre Konvertierungskennfelder, ein Sauerstoffspeichermodell zur Charakterisierung der Änderung des Kraftstoff-Luftverhältnisses während dem Durchströmen des Abgases durch den Katalysator, sowie lineare/nichtlineare Regressionsmodelle zur Beschreibung des Aufwärmverhaltens bei Motorstart. Der Vorteil derartiger Modelle gegenüber der detaillierten Beschreibung chemischer und thermodynamischer Vorgänge liegt in der einfacheren Parameterfindung [10, 81].

Im Zuge dieser Masterarbeit wurde unter Anbetracht der Eigenschaften der vorgestellten Modelle ein physikalisches Modell entwickelt. Unter Anlehnung an die Literatur wurden dazu einige Vereinfachungen und Annahmen getroffen.

4.1.3 Thermodynamische Modellierung - Vereinfachungen

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Vereinfachungen und Annahmen zur Erstellung des thermischen Simulationsmodells erläutert. Damit soll der Simulationsaufwand bei möglichst nahem Bezug zur Realität auf ein vertretbares Maß gesenkt werden.

Zur genauen mathematischen Beschreibung der thermischen Vorgänge innerhalb eines PKW-Abgaskatalysators wäre aufgrund des stark instationären Strömungsverhaltens eine dreidimensionale Abbildung der Vorgänge notwendig, was allerdings einen sehr hohen Simulationsaufwand mit entsprechend hoher Rechenleistung implizieren würde. Um einerseits den Gesamtaufwand in Grenzen zu halten, andererseits aber eine akzeptable Genauigkeit zu erreichen, wurde unter Anlehnung an die Literatur ein eindimensionales Modell mit der vereinfachenden Annahme einer homogenen radialen Temperaturverteilung über dem Katalysatorquerschnitt entwickelt [3, 7, 39, 60, 81]. In Abbildung 4.4 ist demgegenüber ein realer Temperaturverlauf über dem Querschnitt eines zylindrischen Katalysators abgebildet, woraus sich die Komplexität der Modellierung eines heterogenen Temperaturverlaufs über dem Querschnitt bereits erahnen lässt. Angemerkt sei, dass sowohl die Werte, als auch die Temperaturverteilung in der Abbildung nicht den untersuchten Katalysator charakterisieren und lediglich als beispielhafte Darstellung für ein besseres Verständnis zu betrachten sind. Diese Vereinfachung führt zwar zu Beginn der simulierten Fahrzyklen bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen zu einer Abweichung des Modells von den Messergebnissen, im restlichen Zyklusverlauf nähern sie sich diesen aber rasch an, wodurch die erzielte Genauigkeit jedenfalls als zufriedenstellend bewertet werden kann. Wie in analysierten Modellen aber gezeigt wurde, kann zur Verbesserung der Modellgenauigkeit eine axiale Temperaturverteilung durch Berücksichtigung axialer Wärmeleitung in Substrat und Canning mit vertretbarem Aufwand dargestellt werden [7, 39, 60].

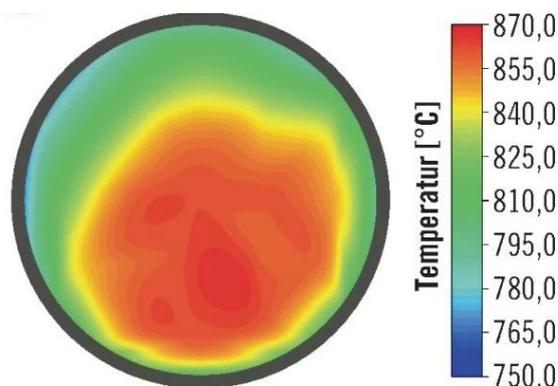


Abbildung 4.4: Beispielhafte radiale Temperaturverteilung eines Abgaskatalysators [11]

Eine weitere Vereinfachung stellt die Unterteilung des Heizkatalysators in eine Menge axialer Scheiben, wie in Abbildung 4.5 ersichtlich, dar. Dadurch kann der Einfluss der sich unterscheidenden Zeitkonstanten sämtlicher berücksichtigter Wärmeübergangsmechanismen, insbesondere der Wärmeleitung, vermindert werden. Demzufolge reicht zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Zeitkonstanten bei zufriedenstellender Genauigkeit bereits die Annahme einer Verzugszeit für den Enthalpiestrom zwischen den Scheiben aus, mehr dazu in den Sektionen 3.1.6 und 3.1.9 [3, 7, 64].

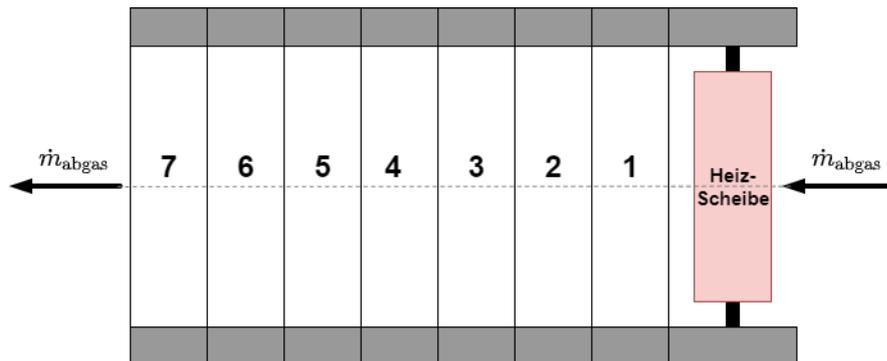


Abbildung 4.5: Axiale Unterteilung des EHC in Scheiben

Unter Anlehnung an die Literatur werden für das Modell zur Verbesserung der Genauigkeit die feste und gasförmige Phase getrennt voneinander modelliert. Demzufolge werden für den Heizkatalysator Abgas, Substrat und Canning als separate Massen betrachtet und die entsprechenden Gleichungen für die jeweilige Phase aufgestellt. Die Modellierung für die Abgasrohre und das Leercanning erfolgt analog dazu. Im Detail wird darauf in Sektion 3.1.6 und 3.1.7 eingegangen [7, 10, 28, 81].

Zur weiteren Komplexitätsreduktion erfolgt eine Reduktion der Massen von Abgas, Substrat und Canning zu Punktmassen mit den dazugehörigen Systemgrenzen. Der Vorteil darin besteht vor allem in der vereinfachten Modellierung der Wärmeübergangsmechanismen zwischen den Punktmassen in der Simulationsumgebung [68]. In Abbildung 4.6 sind die Modellierung anhand von axialen Scheiben, sowie die Reduktion der Phasen zu punktförmigen Massen mit den entsprechenden Systemgrenzen erkennbar. Außerdem ist der axiale Transport von Wärme zwischen diesen Scheiben, unter Anwendung der erwähnten Transportzeit t_{delay} , abstrahiert. An dieser Stelle sei auf die Symmetrie hingewiesen, wonach sämtliche Vorgänge zwischen- beziehungsweise innerhalb der axialen Scheiben gleichermaßen auftreten.

Weitere Vereinfachungen erfolgen hinsichtlich der Berücksichtigung von ablaufenden chemischen Reaktionen innerhalb des EHCs. Demnach werden mit Ausnahme der exothermen Oxidation des unverbrannten Wasserstoffes im Oxidationskatalysator in-

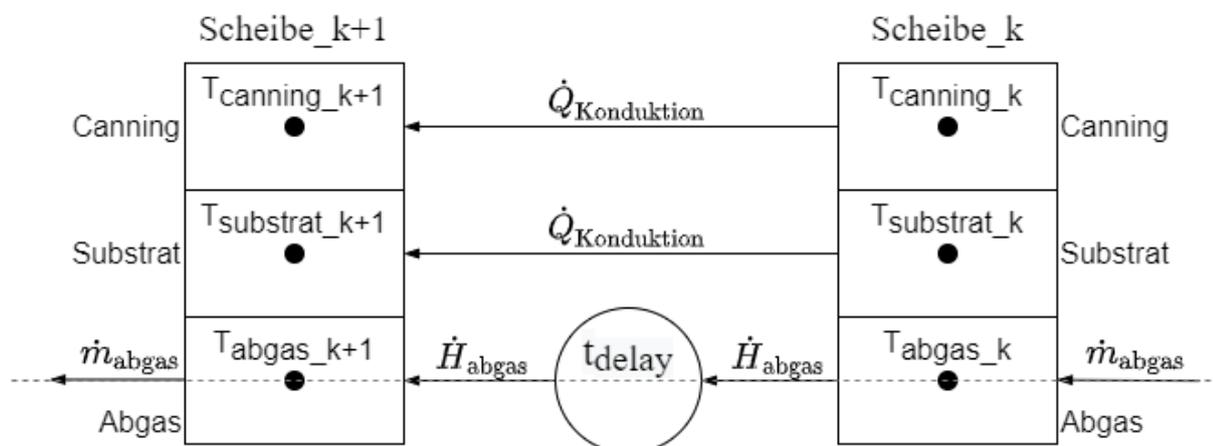


Abbildung 4.6: Vereinfachte 1D-Darstellung des Katalysators mit axialer Scheibeneinteilung

nerhalb des EHCs keine weiteren chemischen Reaktionen berücksichtigt. Neben der Vernachlässigung der Reaktionskinetik bei dieser Oxidation, bedeutet dies einen Verzicht auf die Modellierung sämtlicher weiterer ablaufenden chemischen Reaktionen, insbesondere der Sauerstoffspeicherung des Metaliten. Für eine detailliertere Berechnung kann auf die Literatur verwiesen werden [57, 58, 60].

Bevor auf die thermodynamische Modellierung im Detail eingegangen wird, sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Modellierung hinsichtlich der Berechnungsmethodik unter Anlehnung an die recherchierte Literatur erfolgte. Insbesondere ist an dieser Stelle das in [7] vorgestellte Modell zu nennen. Demnach wurde daran angelehnt ein 1D-Modell unter Vernachlässigung der radialen Temperaturverteilung, der Unterteilung in mehrere Scheiben, sowie dem Aufstellen der Energie-Erhaltungsgleichungen für die Punktmassen der festen und gasförmigen Phase, erstellt. Dabei zeigte sich aber die Erfordernis einer Reihe von Adaptionen, insbesondere im Bereich der zu berücksichtigenden Wärmeübergangsmechanismen. Beispielsweise muss, im Gegensatz zur genannten Quelle, die Wärmezufuhr zufolge exothermer Oxidation des unverbrannten Kraftstoffes im EHC berücksichtigt werden. Im Laufe der Simulation zeigte sich deren nicht-vernachlässigbarer Einfluss. Weitere wichtige Adaptionen sind die Berücksichtigung der Wärmeleitfähigkeit der Isolierschicht zwischen Substrat und Canning, sowie die Wärmestrahlung zwischen Canning und Umgebung. Auf weitere Unterschiede wird an dieser Stelle nicht mehr eingegangen. Darüber hinaus zeigten die Abgasrohre und das Leercanning ebenfalls einen erheblichen thermischen Einfluss, was deren Modellierung unabdingbar machte.

4.1.4 Beschreibung der Simulationsumgebung

Die Modellierung im Zuge dieser Arbeit erfolgte innerhalb der Matlab-Simulink/Simscape Umgebung. Der Vorteil dieser Simulationsumgebung liegt insbesondere im einfachen Aufbau der Modellierung, basierend auf thermischen Blöcken mit den entsprechenden hinterlegten mathematischen Gleichungen. Sowohl für die thermischen Massen, als auch deren Kopplung durch Wärmeübergangsmechanismen, können demnach vordefinierte Blöcke zur Modellierung herangezogen werden. Die Kopplung der sich daraus ergebenden Differentialgleichungen erfolgt dabei systemseitig. Als Solver für die Simulation wird aufgrund der praktischen Erfahrung innerhalb der Abteilung ein Fixed-Step-Solver mit einer Schrittweite 10 Hz gewählt. Aus Diskussionen mit Kollegen hervorgehend, ist ein großer Vorteil dieses Solvertyps gegenüber den genaueren Variable-Step-Solvern, die reduzierte Rechenleistung. Demnach können schneller Ergebnisse bei gleichzeitig ausreichender Genauigkeit erzielt werden. Außerdem liegen die Messergebnisse mit einer Auflösung von 10 Hz vor, wodurch sich ein Solver mit konstanter Schrittweite als sehr günstig darstellt. Ein weiterer Vorteil von Matlab-Simulink ist die einfache Kopplung von Simscape mit der standardmäßigen Simulink-Umgebung zur Integration des Energiemodells in das Temperaturmodell, was eine gesamtheitliche Simulation des EHC-relevanten Fahrzeugbereichs erlaubt. Dies ermöglicht auch die Anwendung vordefinierter Regelungssysteme zur Regelung des Heizkatalysators, welche direkt in das Simulationsmodell integrierbar sind.

4.1.5 Benötigte Eingangsgrößen für die Simulation

Um das Simulationsmodell erstellen zu können, werden am Prüfstand aufgezeichnete Messdaten aus WLTC-Zyklen in Form von zeitlich aufgelösten Vektoren der Simulation übergeben und dort als Eingangsparameter implementiert. Die aufgezeichneten Messdaten umfassen dabei die folgenden physikalischen Größen:

- Abgastemperatur T_{40} in °C
- Abgastemperatur T_{50} in °C
- Abgasmassenstrom \dot{m}_{abgas} in kg/h
- Abgas-Volumensanteil des Wasserstoffs $\varphi_{H_2,40}$ in ppm
- Motordrehzahl n_{motor} in min^{-1}
- Motordrehmoment M_d in Nm
- Kraftstoff-Einblasesignal in Form von True/False

- NO_x-Engine-Out-Emissionen in ppm
- NO_x-Tailpipe-Emissionen in ppm

Die Ermittlung des Wärmestroms aus der Oxidation des unverbrannten Wasserstoffs erfolgt auf Basis der in Sektion 3.2 erklärten Konvertierungskurve des Heizkatalysators. Dazu erwähnt sei, dass aufgrund fehlender Messdaten weitere Einflussfaktoren auf das Konvertierungsverhalten, wie der O₂-Speicherstand und die momentane Raumschwindigkeit, vernachlässigt werden müssen. Wie sich aber bei weiteren Vermessungen gezeigt hat, verfügt letztere in einem sehr weiten Kennfeldbereich nur über einen geringen Einfluss, weshalb die mit der erstellten Konvertierungskurve erzielte Genauigkeit jedenfalls ausreichend sein sollte.

Für die thermodynamische Modellierung werden in weiterer Folge noch stoffabhängige Eingangsgrößen benötigt:

- molare Masse des Abgases M_{abgas} in kg/kmol
- ideale Gaskonstante des Abgases R_{abgas} in J/(kg K)
- spezifische Wärmekapazität des Abgases $c_{p,\text{abgas}}$ in J/(kg K)

Dazu erfolgte eine Abgasanalyse der Rohemissionen eines WLTC-Fahrzyklus, woraus die entsprechende Abgaszusammensetzung, wie in Tabelle 4.1 dargestellt, als Mittelwert über den gesamten Zyklus ermittelt werden konnte. Die Berechnung der Abgaszusammensetzung für jeden Zeitschritt würde zwar die Genauigkeit erhöhen, aufgrund der schwierigen exakten zeitlichen Zuordnung der Messdaten wurde aber darauf verzichtet und anstelle für sämtliche Simulationen dieser Mittelwert herangezogen.

Tabelle 4.1: Mittlere Abgaszusammensetzung

chem. Formel	Abgaskomponente	Volumsanteil in %
N ₂	Stickstoff	70,88
O ₂	Sauerstoff	19,83
H ₂ O	Wasser	9,00
H ₂	Wasserstoff	0,25
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	0,04

Die Zusammensetzung der Abgase enthält dabei noch eine Reihe weiterer Komponenten wie beispielsweise Stickoxide, Distickstoffmonoxid, Ammoniak, sowie aus dem Schmieröl stammendes Kohlenmonoxid und Partikel, wobei diese Abgaskomponenten aufgrund ihrer geringen Konzentration nicht in die Berechnung einfließen und die Zahlenwerte

aus Tabelle 4.1 entsprechend gerundet wurden. Anhand der Abgaszusammensetzung werden unter der Annahme von idealem Gasverhalten die benötigten Stoffwerte für den besonders interessierenden Bereich von 0 - 200 °C den Stoffwerttabellen entnommen und damit die molare Masse, sowie die beiden kalorischen Zustandsgrößen bestimmt [48].

4.1.6 Thermodynamische Modellierung des Heizkatalysators

Aufgrund der komplexeren Vorgänge, sowie der Tatsache, dass der EHC das Herzstück dieser Masterarbeit bildet, erfolgte hierfür eine Modellierung mit erhöhter Genauigkeit gegenüber den drei restlichen Abgassystemkomponenten. Abbildung 4.7 zeigt dabei die Abstraktion des Heizkatalysators unter Anwendung sämtlicher vorgenommenen Vereinfachungen und Annahmen. Der EHC wird dazu in acht Scheiben eingeteilt, wobei die erste das Heizelement und die sieben weiteren den Oxidationskatalysator darstellen. Sämtliche Abmessungen für die Modellierung sind dem Anhang zu entnehmen. Die Scheibenanzahl wurde iterativ unter den Aspekten Genauigkeit und Rechenaufwand angepasst.

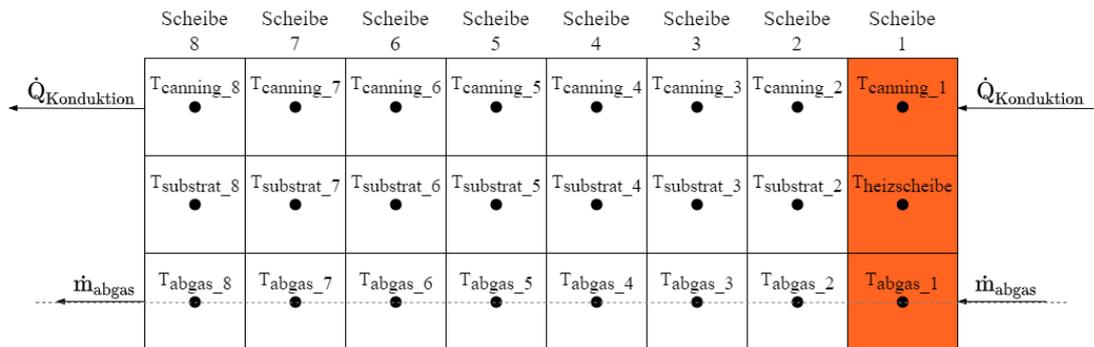


Abbildung 4.7: Abstraktion des Heizkatalysators

Die thermodynamische Modellierung des Heizkatalysators basiert im Allgemeinen auf den Grundsätzen der Thermodynamik, wobei für die Berechnung der jeweiligen Phase folgende Annahmen bezüglich des Systemverhaltens getroffen werden können:

- Instationär
- Nicht adiabat
- Offen

Diese Annahme besitzt für alle vier Abgassystemkomponenten Gültigkeit. Für die gesamte Simulation wird zudem von idealem Gasverhalten ausgegangen.

Gemäß den bisherigen Erläuterungen ist in Abbildung 4.8 eine Scheibe des Heizkatalysators mit den auftretenden Wärmeübergangsmechanismen dargestellt. In der Scheibe des Heizelements wird angenommen, dass keine Wasserstoffoxidation aufgrund fehlender Beladung mit katalytisch aktivem Material stattfindet. Diese erfolgt unter Annahme einer gleichmäßigen Oxidation in den sieben Substratscheiben. Die axiale Wärmeleitung in das erste- beziehungsweise aus dem letzten Canning erfolgt über die Verbindungsschrauben und die Dichtscheibe zwischen den Flanschen.

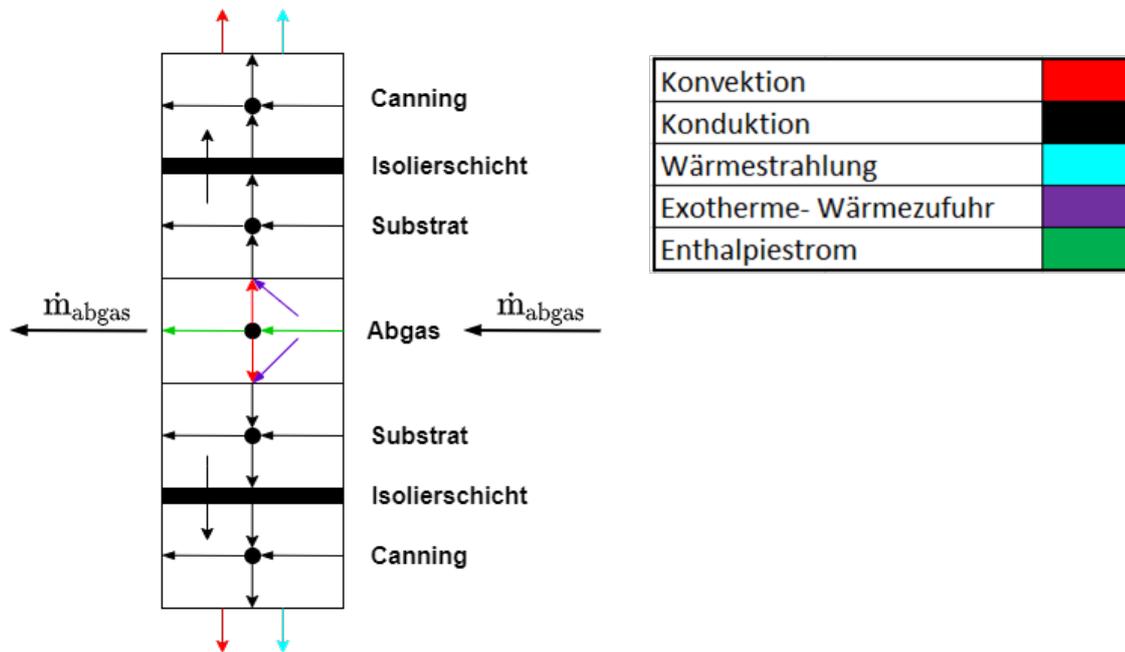


Abbildung 4.8: Wärmetransport zwischen den Phasen innerhalb einer abstrahierten Scheibe

Wie sich aus der Abbildung erahnen lässt, ist die Wärmeleitung durch eine Phase immer geteilt. Demnach erfolgt die Wärmeleitung von der Systemgrenze hin zur reduzierten Punktmasse, für welche die Berechnung der Änderung der inneren Energie erfolgt, bevor eine weitere Wärmeleitung von der Punktmasse zur gegenüberliegenden Systemgrenze erfolgt. Dort wiederholt sich der Vorgang für die anschließende Phase. Abbildung 4.9 veranschaulicht diesen Vorgang innerhalb der Simulationsumgebung am Beispiel einer Wärmeleitung zwischen Punktmassen. Damit, sowie der getroffenen Annahme bezüglich des Systemverhaltens, kann der 1. Hauptsatz der Thermodynamik ganz allgemein für jede der dargestellten Punktmassen gemäß Gleichung 4.1 aufgestellt werden. Näher wird darauf bei der Beschreibung der jeweiligen Phasen eingegangen. Durch die Wahl der Systemgrenzen entfallen sowohl die technische Arbeit δW_t , als auch die Änderung der äußeren Energie dE_a aus der Gleichung und werden entsprechend nicht berücksichtigt. Der Enthalpiestrom wird im gesamten Modell der Abgaspunktmasse

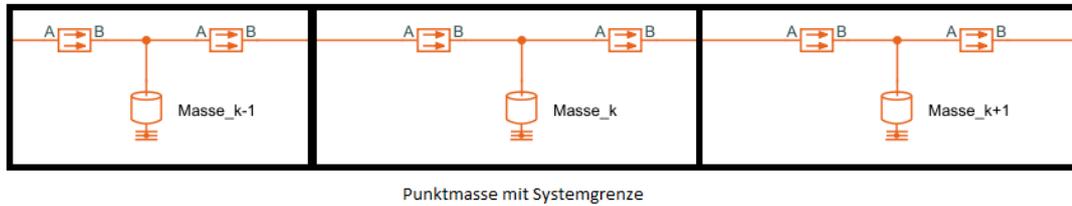


Abbildung 4.9: Wärmetransport zwischen Punktmassen im Simulationsmodell

zugeordnet, soll aber aus Gründen der Vollständigkeit in Gleichung 4.1 abgebildet werden.

$$\dot{Q}_a + \dot{H}_{\text{abgas}} = \frac{dU}{dt} = m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} \quad (4.1)$$

- Gesamter Wärmestrom \dot{Q}_a über die Systemgrenze in W
- Abgasenthalpiestrom \dot{H}_{abgas} über die Systemgrenze in W
- Änderung der inneren Energie dU der Punktmasse in J
- Masse m der Phase in kg
- spezifische Wärmekapazität c der Phase in J/(kg K)
- Temperaturänderung dT der Phase in K

Im Folgenden wird die Berechnung der einzelnen Phasen von innen, beginnend beim Abgas, nach außen bis zum Canning näher erläutert.

Abgas-Punktmasse

Der erste Hauptsatz für die Abgaspunktmasse ergibt sich gemäß den Wärmeübergangsmechanismen aus Abbildung 4.8 zu Formel 4.2.

$$\dot{Q}_{\text{exotherme}} - \dot{Q}_{\text{konvektion}} + \dot{H}_{\text{abgas}} = m_{\text{abgasmasse}} \cdot c_{p,\text{abgas}} \cdot \frac{dT_{\text{abgasmasse}}}{dt} \quad (4.2)$$

Die Wärmezufuhr durch die exotherme Wasserstoffoxidation $\dot{Q}_{\text{exotherme}}$ an der katalytisch aktiven Oberfläche des Methaliten wird der Abgaspunktmasse in den Scheiben des Oxidationskatalysators zugeordnet und kann für ideales Gasverhalten nach Gleichung 4.3 berechnet werden. Deren Implementierung in der Matlab-Simscape-Umgebung erfolgt mithilfe eines Wärmestromquellenblocks.

$$\dot{Q}_{\text{exotherme}} = \frac{M_{\text{H}_2}}{M_{\text{abgas}}} \cdot \varphi_{\text{H}_2} \cdot \dot{m}_{\text{abgas}} \cdot H_{\text{u,H}_2} \cdot \eta_{\text{EHC}} \quad (4.3)$$

Werte für die molare Masse des Wasserstoffs M_{H_2} und dessen unterer Heizwert $H_{\text{u,H}_2}$ stammen dabei aus Stoffwerttabellen [48, 77]. Der Abgasmassenstrom \dot{m}_{abgas} , sowie der Volumsanteil unverbrannten Wasserstoffes φ_{H_2} stammen aus Messungen am Motorprüfstand, die Ermittlung der Konvertierungsrate η_{EHC} des EHCs, sowie der Molaren Abgasmasse M_{abgas} wurde bereits näher erläutert.

Zur Berechnung des Wärmetransports durch Konvektion $\dot{Q}_{\text{konvektion}}$ zwischen Abgas und Substrat, kann der Konvektionsblock aus Matlab-Simulink/Simscape mit hinterlegter Berechnungsmethodik laut Gleichung 4.4 herangezogen werden.

$$\dot{Q}_{\text{konvektion}} = \alpha_{\text{substrat_abgas}} \cdot A_{\text{aktive_Substratoberflaeche}} \cdot (T_{\text{abgas}} - T_{\text{substrat}}) \quad (4.4)$$

Aufgrund der schwierig zu berechnenden Strömungsverhältnisse im Abgassystem, konnte der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{\text{substrat_abgas}}$ nicht analytisch, sondern nur durch Iteration bestimmt werden und stellt somit eine in Sektion 4.1.9 näher erläuterte Kalibriergröße dieser Simulation dar. Die beiden Temperaturen T_{abgas} und T_{substrat} werden im Rahmen der Simulation für jeden Zeitschritt berechnet und sind als Simulationsoutput zu betrachten. Die Berechnung der aktiven Substratoberfläche $A_{\text{substrat_abgas}}$ erfolgt anhand der gesamten Querschnittsfläche des EHC und der Zelldichte, woraus sich die Zellenanzahl Z_{anzahl} mit dem entsprechenden Querschnitt einer Zelle ermitteln lässt. Daraus kann durch Vereinfachung der Geometrie der für die Oxidation katalytisch aktive Umfang $U_{\text{aktiv_Zelle}}$ einer Zelle ermittelt werden. Abbildung 4.10 zeigt den tatsächlichen Querschnitt des Metaliten. Daneben, in Abbildung 4.11, ist die vereinfachte Geometrie einer Zelle dargestellt. Gemäß Gleichung 4.5 lässt sich bei gegebener Scheibenlänge somit die gesamte katalytisch aktive Oberfläche einer Substratscheibe berechnen.

$$A_{\text{aktive_Substratoberflaeche}} = U_{\text{aktiv_Zelle}} \cdot Z_{\text{anzahl}} \cdot l_{\text{Scheibe}} \quad (4.5)$$

Die Wärmezufuhr durch den Abgasenthalpiestrom wird aufgrund stabilerer Simulation im gesamten Modell der Abgaspunktmasse zugeordnet und kann gemäß Gleichung 4.6 berechnet werden.

$$\dot{H}_{\text{abgas}} = \dot{m}_{\text{abgas}} \cdot c_{\text{p,abgas}} \cdot (T_{\text{ein}} - T_{\text{substrat}}) \quad (4.6)$$

Für dessen Modellierung erfolgt die Annahme eines konstanten Abgasmassentromes je Zeitschritt über das gesamte modellierte Abgassystem, was sich aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeiten bei Iterationen als hinreichend genau herausgestellt



Abbildung 4.10: Substratquerschnitt

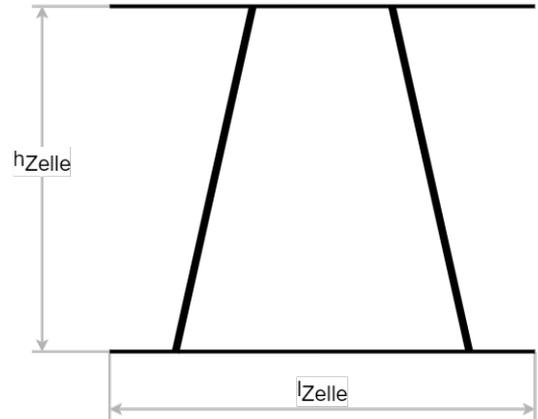


Abbildung 4.11: Vereinfachte Zellengeometrie

hat. Der Abgasmassenstrom \dot{m}_{abgas} und die spezifische Wärmekapazität c_{abgas} sind Eingangsgrößen und wurden bereits erklärt. Die den Enthalpiestrom indizierende Temperaturdifferenz wird aus der Differenz der Eintrittstemperatur T_{ein} des Substrates der Scheibe stromaufwärts und der aktuellen Substrattemperatur T_{substrat} der betrachteten Scheibe errechnet. Die Substrattemperatur anstelle der Abgastemperaturen zu verwenden, führt zwar zu einem geringen Fehler, verbessert aber die Stabilität der Simulation und verhindert Simulationsabbrüche aufgrund zu starker Temperaturschwankungen der Abgaspunktmasse [64]. An dieser Stelle wichtig zu erwähnen ist, dass bei der Übergabe der Substrattemperatur aus der stromaufwärts-liegenden Scheibe die Berücksichtigung einer Verzugszeit angewendet wurde, bezüglich deren Kalibrierung wird auf die Sektion 4.1.9 verwiesen.

Um die Änderung der inneren Energie dU und damit die Temperaturänderung dT_{abgas} der Abgaspunktmasse berechnen zu können, ist eine Kenntnis der momentanen Abgasmasse je Zeitschritt innerhalb des Kontrollvolumens notwendig. Aufgrund der Messchwankungen, sowie der relativ geringen Abgasmasse, führte eine zu Beginn der Simulationsentwicklung vorgenommene Bestimmung anhand einer Massenbilanz zu keiner zufriedenstellenden Lösung. Aus diesem Grund erfolgt deren Berechnung anhand der in Gleichung 4.7 dargestellten idealen Gasgleichung.

$$p_{40} \cdot V_{\text{EHC}} = m_{\text{abgasmasse}} \cdot R_{\text{abgas}} \cdot T_{\text{abgasmasse}} \quad (4.7)$$

Der Druck p_{40} entspricht dabei dem gemessenen Druck vEHC, wobei aufgrund dessen geringer Schwankung im Verlauf eines WLTC ein Konstantwert für den gesamten Zyklus zur Berechnung herangezogen wird. Auf die Bestimmung der idealen Gaskonstante R_{abgas} wurde in diesem Kapitel bereits eingegangen. Das Volumen ergibt sich aus den geometrischen Gegebenheiten des Heizkatalysators, welche dem Anhang zu entnehmen

sind. Die momentane Temperatur $T_{\text{abgasmasse}}$ der Abgaspunktmasse ist eine Simulationsgröße, als Startwert zu Beginn des Zyklus wird die Abgastemperatur T_{40} herangezogen. Gleichung 4.7 ist im Block der thermischen Masse von Matlab-Simulink/Simscape nicht implementiert, weshalb für die Abgasmasse eine sogenannte „Custom-Mass“ erstellt und in die Simulation integriert wurde.

Substrat-Punktmasse

Zur Modellierung der Substratpunktmasse wird zwischen der Heizscheibe und den restlichen sieben Scheiben des Oxidationskatalysators unterschieden. Die Heizscheibe ist dabei entsprechend Abbildung 4.12 ausschließlich über die beiden Stromkontakte mit dem Canning verbunden. Die in der Abbildung ebenfalls erkennbaren, über den gesamten Heizscheibenquerschnitt verteilten, hochisolierten Stützstifte zwischen Heizscheibe und Oxidationskatalysator werden in der Temperatursimulation nicht berücksichtigt. Zwischen der Heizscheibe und der ersten Scheibe des Oxidationskatalysators tritt demnach keine axiale Wärmeleitung auf. Die Wärmezufuhr durch die elektrische Beheizung erfolgt durch eine Simscape- Wärmestromquelle innerhalb der Heizscheibe. Aufgrund nicht zugänglicher Dokumentation bezüglich dem Katalysatormaterial, wurde eine Literaturrecherche durchgeführt und für Metalit und Canning ein für Katalysatoren geeigneter Stahl ausgewählt. Sämtliche Stoffeigenschaften werden entsprechend für Substrat und Canning für den Stahl X3CrTi17 entnommen. Zahlenwerte sind dem Anhang zu entnehmen.

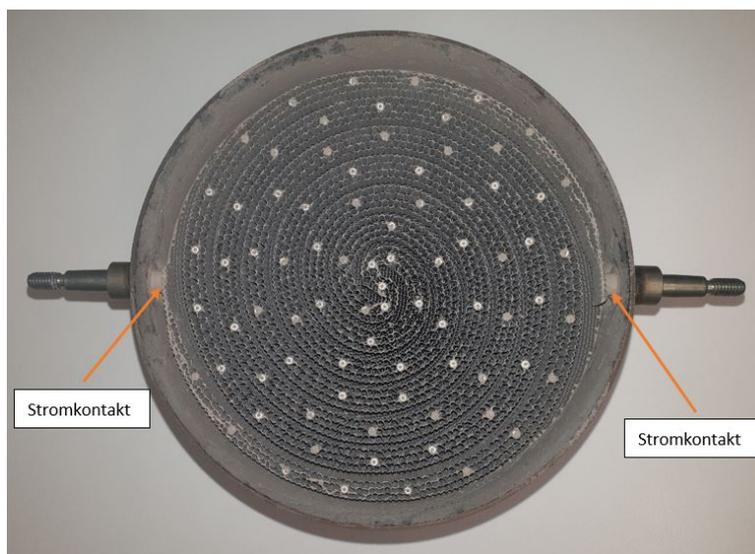


Abbildung 4.12: Heizscheibe des EHC mit Stromkontakten

Gemäß den auftretenden Wärmetransportvorgängen in Abbildung 4.8, kann der erste Hauptsatz für die Substratpunktmasse laut Gleichung 4.8 angeschrieben werden.

$$\dot{Q}_{\text{konduktion_abgas_substrat}} + \dot{Q}_{\text{konduktion_axial_auf}} - \dot{Q}_{\text{konduktion_substrat_isolierung}} - \dot{Q}_{\text{konduktion_axial_ab}} = m_{\text{substrat}} \cdot c_{\text{EHC}} \cdot \frac{dT_{\text{substrat}}}{dt} \quad (4.8)$$

Die Wärmezufuhr durch axiale Konduktion $\dot{Q}_{\text{konduktion_axial_auf}}$ aus der Scheibe stromaufwärts wird gemäß dem in Matlab-Simscape vordefinierten Konduktionsblock mit hinterlegter Berechnungsmethodik wie in Gleichung 4.9 berechnet.

$$\dot{Q}_{\text{konduktion_axial_auf}} = \frac{\lambda_{\text{EHC}} \cdot A_{\text{Querschnitt}}}{0,5 \cdot l_{\text{Scheibe}}} \cdot dT_{\text{Substrat}} \quad (4.9)$$

Der Faktor von 0,5 im Nenner dient der Berücksichtigung der Strecke von der jeweiligen Systemgrenze bis zum Mittelpunkt der Punktmasse und wurde in diesem Kapitel bereits erklärt. Die Querschnittsfläche $A_{\text{Querschnitt}}$ errechnet sich gemäß dem im vorigen Kapitel bestimmten Umfang einer Substratzelle multipliziert mit der angenommenen Wandstärke des Metaliten von 40 μm , sowie der Zellenanzahl.

Eine weitere Wärmezufuhr erfolgt durch die radiale Wärmeleitung $\dot{Q}_{\text{konduktion_abgas-substrat}}$ zwischen der Systemgrenze der Abgaspunktmasse und dem Substratmassenpunkt. Für die Berechnung der radialen Wärmeleitung im Substrat erfolgt eine Vereinfachung dessen Querschnitts zur Reduktion des Modellierungsaufwandes, wonach der Metalit als Hohlzylinder abstrahiert werden kann. Dies ermöglicht die Anwendung der in Gleichung 4.10 dargestellten, für Rohrwandungen optimierten Formel [48].

$$\dot{Q}_{\text{konduktion_radial}} = \frac{\lambda_{\text{EHC}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot (0,5 \cdot l_{\text{Scheibe}})}{\ln \left| \frac{d_{\text{außen}}}{d_{\text{innen}}} \right|} \cdot (T_{\text{substrat}} - T_{\text{isolierung}}) \quad (4.10)$$

Der Außendurchmesser $d_{\text{außen}}$ entspricht dem realen Außendurchmesser des Substrats, für den Innendurchmesser d_{innen} des fiktiven Rohres erfolgt die Berechnung unter der Bedingung gleicher Masse. Der Faktor 0,5 der Scheibenlänge dient, wie bei der axialen Wärmeleitung, der Berücksichtigung der Strecke von der Systemgrenze bis zur Punktmasse. Der Wärmetransport zwischen dem Heizelement und dem Canning in der ersten Scheibe wird ausschließlich durch axiale Wärmeleitung in den Stromkontakten, wie in Formel 4.9 beschrieben, modelliert. Querschnitt und Länge der Anschlusszapfen wurden vermessen und sind dem Anhang zu entnehmen.

An Stelle der Wärmeabfuhr tritt einerseits die axiale Wärmeleitung stromabwärts auf, andererseits kommt es zu radialer Wärmeleitung zwischen der Substratpunktmasse

und der Systemgrenze zur Isolierschicht. Beide berechnen sich analog zur jeweiligen Wärmezufuhr und werden deshalb nicht mehr näher behandelt.

Isolierschicht zwischen Substrat und Canning

Für die Modellierung der radialen Wärmeleitung ist die Trennung von Substrat und Canning durch eine Isolierschicht zu berücksichtigen. Aufgrund fehlender Dokumentation, wurde die Dicke dieser Isolierschicht auf $300\ \mu\text{m}$ abgeschätzt. Informationen über deren Wärmeleitfähigkeit waren ebenfalls nicht verfügbar, weshalb sie nur innerhalb der in Kapitel 4.1.9 erläuterten Simulationskalibrierung bestimmt werden konnte. Zuzugle deren geringer Dicke wurde die Isolierschicht als thermische Masse nicht modelliert, sehr wohl aber deren Einfluss auf die radiale Wärmeleitung. Wie sich in Simulationsdurchläufen zeigte, hat die Isolierung einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis des Temperaturmodells. Bei deren Vernachlässigung konnte ein sehr rascher und unrealistisch ausgeprägter Temperatenausgleich zwischen Substrat und Canning beobachtet werden, was eine Berücksichtigung zwingend erforderlich machte. Abbildung 4.13 zeigt die Implementierung der Isolierschicht zwischen Substrat und Canning in der Simulationsumgebung.



Abbildung 4.13: Wärmeleitung zwischen Substrat, Isolierschicht und Canning in der Simulationsumgebung

Canning-Punktmasse

Unter Berücksichtigung der in Abbildung 4.8 dargestellten Wärmeübergangsmechanismen, kann für die Canning-Punktmasse der erste Hauptsatz gemäß Gleichung 4.11 aufgestellt werden.

$$\begin{aligned} & \dot{Q}_{\text{konduktion_isolierung-canning}} + \dot{Q}_{\text{konduktion_axial_auf}} - \dot{Q}_{\text{konduktion_canning-umgebung}} \\ & - \dot{Q}_{\text{konduktion_axial_auf}} - \dot{Q}_{\text{strahlung}} - \dot{Q}_{\text{konvektion_umgebung}} = m_{\text{canning}} \cdot c_{\text{EHC}} \cdot \frac{dT_{\text{canning}}}{dt} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Sowohl die Wärmezufuhr, als auch die Wärmeabfuhr durch radiale und axiale Konvektion, erfolgt analog zur Berechnung bei der Substratpunktmasse, weshalb hier nicht mehr näher darauf eingegangen wird.

Die Wärmeabfuhr durch Konvektion zwischen Canning und Umgebung $\dot{Q}_{\text{konvektion_umgebung}}$ berechnet sich gemäß Gleichung 4.12 und kann durch einen thermischen Konvektionsblock aus Matlab-Simscape modelliert werden.

$$\dot{Q}_{\text{konvektion_umgebung}} = \alpha_{\text{canning_umgebung}} \cdot A_{\text{oberflaeche_canning}} \cdot (T_{\text{canning}} - T_{\text{umgebung}}) \quad (4.12)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{\text{canning_umgebung}}$ war nicht exakt bestimmbar, weshalb er durch Iteration unter Berücksichtigung der verhältnismäßig geringen Umgebungsluftbewegung im Bereich des EHCs abgestimmt wurde. Mehr Informationen zu dessen Kalibrierung finden sich im Kapitel 4.1.9. Die Umgebungsmodellierung erfolgt im Simulationsmodell durch einen Source-Block unter Annahme einer konstanten Umgebungstemperatur von 23 °C.

Für die Wärmeabfuhr durch Strahlung $\dot{Q}_{\text{strahlung}}$ gegenüber der Umgebung wird die Temperaturabhängigkeit des Emissionsvermögens von Stahl gemäß Gleichung 4.13 berücksichtigt [37].

$$\varepsilon_{\text{canning}} = 0,5 + \frac{T_{\text{canning}} - 273}{2860} \quad (4.13)$$

Im Vergleich zur Simulation bei Verwendung eines Konstantwertes des Emissionsvermögens, führte diese Berücksichtigung zu einer erheblichen Verbesserung der Simulationsergebnisse. Aufgrund fehlender Werkstoffdaten müssen die Konstanten der Berechnungsmethodik von gealtertem Roheisen bei 600 °C entnommen werden. Eine probeweise Iteration dieser Werte bedeutete zwar eine weitere Verbesserung, dies stand jedoch nicht im Fokus dieser Arbeit, weshalb auf die genannten Werte zurückgegriffen wird. Damit ergibt sich die Gleichung zur Berechnung der Wärmestrahlung $\dot{Q}_{\text{strahlung}}$ gemäß Formel 4.14.

$$\dot{Q}_{\text{strahlung}} = \sigma_{\text{B}} \cdot \varepsilon_{\text{canning}} \cdot A_{\text{oberflaeche_canning}} \cdot (T_{\text{canning}}^4 - T_{\text{u}}^4) \quad (4.14)$$

Zur Modellierung dieser Gleichung stand kein Matlab-Simscape-Block zur Verfügung, weshalb ein weiterer „Custom-Block“ in der Simulationsumgebung erstellt wurde.

Zwischen dem Canning des Heizkatalysators und der stromaufwärts- beziehungsweise stromabwärts montierten Abgassystemkomponente erfolgt eine Wärmeleitung einerseits über die Schraubenverbindung, andererseits über die Isolierscheibe zwischen den Flanschen. Die unterschiedlichen geometrischen Abmessungen der Verbindungsflansche gegenüber dem Canningdurchmesser der jeweiligen Abgassystemkomponente werden dabei berücksichtigt. Abbildung 4.14 zeigt die Verschraubung zweier Abgassystemkomponenten, Abbildung 4.15 die Wärmeleitungsvorgänge im Simulationsmodell. Die Wärmeleitung teilt sich dabei in paralleler Form auf die Schrauben inklusive Muttern einerseits und die Dichtscheibe zwischen den Flanschen der Abgassystemkomponente andererseits auf.

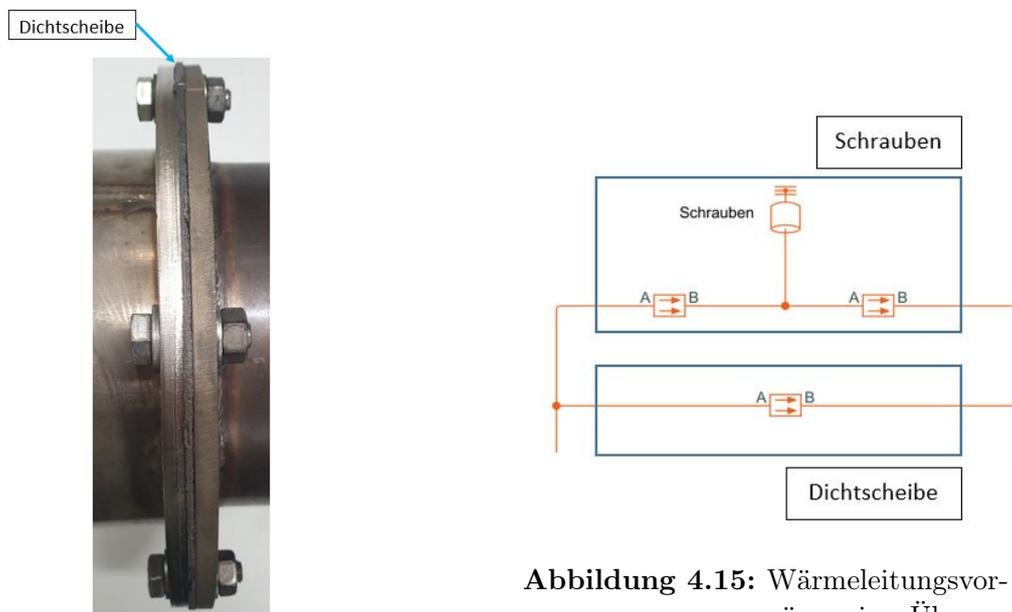


Abbildung 4.14: Übergangsbereich zwischen zwei Abgassystemkomponenten

Abbildung 4.15: Wärmeleitungsvorgänge im Übergangsbereich

4.1.7 Thermodynamische Modellierung von Leercanning und Abgasrohren

Im Allgemeinen erfolgt die Modellierung der beiden Abgasrohre vEHC- und nEHC, sowie des Leercannings, auf gleiche Art und Weise wie beim EHC. Für Abgas und Canning werden ebenfalls Punktmassen definiert. Auf eine Unterteilung in Scheiben

wird aufgrund geringerer Komplexität, sowie zur Reduktion des Simulationsaufwandes für diese Komponenten jedoch verzichtet und die gesamte Abgassystemkomponente zu einer Punktmasse je Phase reduziert. Sämtliche Wärmeübergänge berechnen sich analog der Modellierung des Heizkatalysators, weshalb hier nicht mehr im Detail auf die Berechnungsmethodik eingegangen wird. Bezüglich der Stoffeigenschaften wurden für das Abgassystem Werte von legiertem Stahl verwendet. Diese sind dem Anhang zu entnehmen. Abbildung 4.16 zeigt die Abstraktion einer der drei verbleibenden Abgassystemkomponenten, bestehend aus Punktmassen mitsamt den dazugehörigen Systemgrenzen.

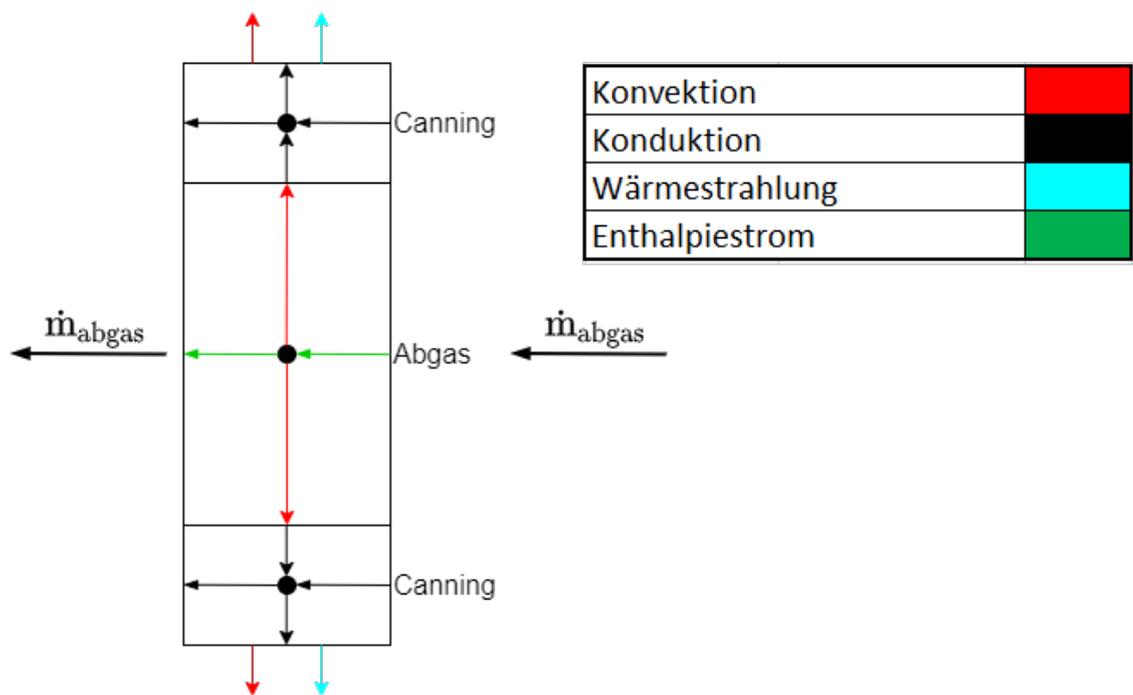


Abbildung 4.16: Schematische Abstraktion für Abgasrohre und Canning

Für die Berechnung des Enthalpiestroms zwischen den Abgassystemkomponenten wird zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Zeitkonstanten der Wärmetransportvorgänge eine Verzugszeit t_{vz_komp} modelliert. Diese unterscheidet sich gegenüber jener zwischen den Scheiben beim Heizkatalysator. Selbiges gilt auch für sämtliche Wärmeübergangskoeffizienten. Näher wird auf deren Bestimmung in Kapitel 4.1.9 bei der Simulationskalibrierung eingegangen.

4.1.8 NO_x-Konvertierungsmodell

Um den Einfluss der Beheizung auf die NO_x-Konvertierungsrate im Modell vorherzusagen und damit die Entwicklung einer günstigen Heizstrategie vornehmen zu können, wurde im Rahmen der Simulation ein vereinfachtes SCR-Katalysatormodell zur Abschätzung des NO_x-Umsatzes bei EHC-Betrieb erstellt. Abbildung 4.17 zeigt das erstellte Modell in der Simulationsumgebung, die NO_x-Rohemissionen entsprechen dabei den am Prüfstand gemessenen Stickoxidemissionen vEHC. Die Modellierung der NO_x-Konvertierung im SCR-Katalysator erfolgt dabei auf Basis einer hinterlegten Kennlinie. Aufgrund des bei den untersuchten Zyklen sehr geringen Temperaturniveaus im Abgassystem, kann nicht auf stationäre Messdaten zurückgegriffen werden. Die Kennlinienerstellung wird deshalb anhand von Messungen von Temperatursprüngen durchgeführt. Aufgrund ebenfalls stark begrenzter Verfügbarkeit derartiger Untersuchungen müssen folgende, gemäß Literatur aufgelistete, Abhängigkeiten der NO_x-Konvertierung im SCR-Katalysator außer Acht gelassen werden [3, 41]:

- Abgas-Raumgeschwindigkeit im SCR-Katalysator
- NH₃-Speicherbeladung des SCR-Katalysators
- NO_x-Konzentration im Abgas
- Harnstoff-Eindosierung

Die in Abbildung 4.18 dargestellte Konvertierungskennlinie ist demnach lediglich temperaturlaufgelöst und zeigt die NO_x-Konvertierungsrate η_{SCR} bei einer Raumgeschwindigkeit von $R_h = 34.000 \text{ l/h}$ und einem initialen NH₃-Speicherstand von 50 %. Ab einer Abgastemperatur $T_{50} = 180 \text{ °C}$ wurde, wie bei sämtlichen durchgeführten Messungen, die Harnstoffeindosierung aktiviert.

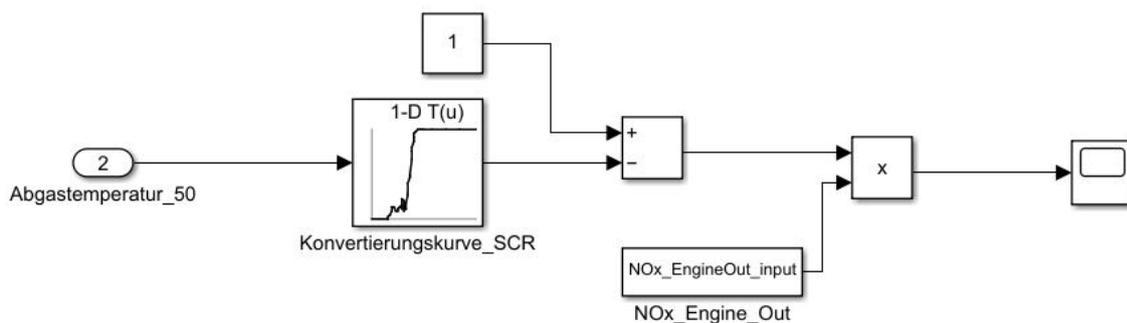


Abbildung 4.17: NO_x-Konvertierungsmodell

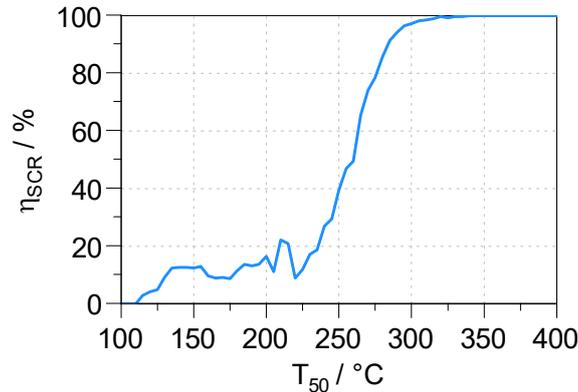


Abbildung 4.18: NO_x-Konvertierungskurve für den SCR-Katalysator

Wie sich beim Vergleich mit Messungen gezeigt hat, kann mit diesem Modell trotz der erheblichen Einschränkungen eine Untersuchung und Auswahl geeigneter Heizstrategien bei hinreichender Genauigkeit durchgeführt werden. Diese könnte durch die Vermessung des SCR-Katalysators an einem Synthesegasprüfstand und der Erstellung eines NH₃-Speichermodells unter Berücksichtigung von NO_x-Abgaskonzentration und Harnstoff-Eindosierung mit großer Wahrscheinlichkeit erhöht werden.

4.1.9 Kalibrierung und Validation der Simulation mit Messungen

Im Rahmen des schrittweise erstellten Simulationsmodells war es im Fall einiger Parameter nicht möglich, deren Werte der Literatur zu entnehmen oder analytisch zu bestimmen. Dies machte eine Simulationskalibrierung erforderlich. Nachfolgende Auflistung zeigt die kalibrierten Parameter:

- Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{substrat_abgas}$ zwischen Abgas und Substrat
- Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{leercanning_abgas}$ zwischen Abgas und Leercanning
- Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{abgasrohr_abgas}$ zwischen Abgas und Abgsrohren
- Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{canning_umgebung}$ zwischen Canning und Umgebung
- Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{isolierschicht}$ der Isolierschicht zwischen Substrat und Canning
- Verzugszeit $t_{vz_scheibe}$ zwischen den Scheiben des EHC
- Verzugszeit t_{vz_komp} zwischen den Abgassystemkomponenten

Die Kalibrierung wurde in einem ersten Schritt durch die Simulation einfacher Lastsprünge vorgenommen. Im weiteren Verlauf der Kalibrierung erfolgte die Feinabstimmung anhand simulierter WLTC-Prüfzyklen, wobei sich insbesondere ausgeprägte Lastwechsel als sehr aussagekräftig zeigten. Der Abgleich von Simulation und Messung erfolgte dabei im wesentlichen anhand gemessener Abgastemperaturen sowohl im Inneren des EHCs, als auch im Abgasrohr nEHC.

Für die Kalibrierung sämtlicher Wärmeübergangszahlen und Wärmeleitfähigkeiten wurde ausgehend von Werten der Literatur versucht, mittels Parametervariation schrittweise eine Kalibrierung vorzunehmen. In Tabelle 4.2 sind einerseits die Startwerte [77], andererseits die final kalibrierten Parameter der Wärmetransportkoeffizienten aufgelistet. Speziell beim Temperatenausgleich zwischen fester und gasförmiger Phase konnte durch die Kalibrierung eine merkliche Verbesserung, insbesondere bei Motorstillstand und im Schleppbetrieb, erzielt werden.

Tabelle 4.2: Übersicht der kalibrierten Wärmetransportparameter [77]

Parameter	Startwert	Kalibrierter Wert
$\alpha_{\text{substrat_abgas}}$ in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$	200	150
$\alpha_{\text{leercanning_abgas}}$ in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$	145	35
$\alpha_{\text{abgasrohr_abgas}}$ in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$	145	80
$\alpha_{\text{canning_umgebung}}$ in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$	5	3,3
$\lambda_{\text{isolierschicht}}$ in $\text{W}/(\text{m K})$	0,09	0,065

Bezüglich der Wärmeübergangskoeffizienten ist ein erheblicher Unterschied zwischen den Abgassystemkomponenten zu beobachten. Der Grund dafür sind möglicherweise die unterschiedlichen Strömungsverhältnisse der Abgasrohre beziehungsweise des Leercannings gegenüber dem EHC. Während beim EHC im Oxidationskatalysator eine Menge schlanker Kanäle für einen günstigen Wärmeübergang des Abgases sorgt, kann bei den Abgasrohren und dem Leercanning nur an den Rohrwandungen in der äußeren Grenzschicht des Abgas-Strömungsfeldes ein Wärmeaustausch erfolgen. Speziell beim Leercanning ist aufgrund des hohen Durchmesser-Längenverhältnisses deshalb ein geringerer Wärmeübergangskoeffizient anzunehmen. Die Isolierschicht besteht aus einem isolierenden Lack, durch welchen das Substrat in das Canning eingebettet wird. Aufgrund einer großen Bandbreite von Zahlenwerten in der Literatur, wurde ausgehend von einem Mittelwert versucht, deren Wärmeleitfähigkeit zu kalibrieren.

Für die Kalibrierung der Verzugszeiten stellten insbesondere ausgeprägte Lastwechselfunkte im Zyklus einen effizienten Ansatzpunkt in der Kalibrierung dar. Dabei wurde nicht nur zu Beginn, sondern vielmehr im gesamten Zyklusverlauf darauf geachtet, eine zeitliche Zuordnung der Temperaturspitzen zwischen Simulation und Messung zu

realisieren. Die Verzugszeiten zwischen den Scheiben im EHC und jener zwischen den Abgassystemkomponenten unterscheiden sich dabei. Dies liegt darin begründet, dass die Abstände für die Wärmeleitung zwischen den Scheiben viel kürzer sind, womit die Wärmeleitung durch eine Scheibe in einer viel kürzeren Zeit als zwischen den Abgassystemkomponenten abläuft. Demnach kommt für die EHC- Scheiben ein Unit-Delay zur Abbildung der Verzugszeit $t_{vz_scheibe}$ zum Einsatz, welcher einem Integrations-hold von einem Zeitschritt in der Simulation entspricht. Für die Verzugszeit zwischen den Komponenten t_{vz_komp} wird auf Basis von Iterationen eine Dauer von 0,3 Sekunden angenommen.

Zum Abschluss dieses Kapitels sind in Abbildung 4.19 die simulierten Abgastemperaturverläufe T_{50} gegenüber den gemessenen für die beiden WLTC-Fahrzyklen dargestellt. Die Ergebnisse der Startwerte sind dabei jenen mit den final kalibrierten Parametern gegenübergestellt. Gut erkennbar ist, dass durch die Kalibrierung speziell im für den EHC besonders interessierenden Bereich von der Startphase bis zu einer Temperatur von etwa 250 °C eine merkliche Verbesserung erzielt werden konnte und zwischen Simu-

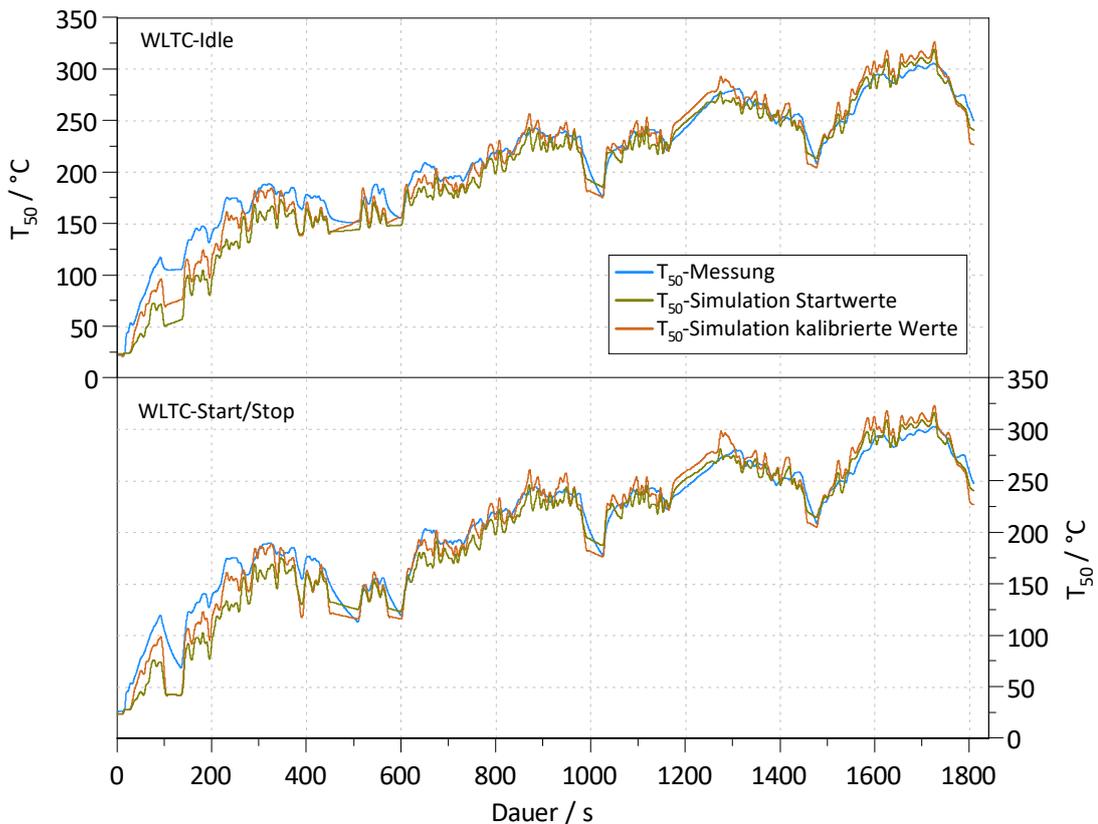


Abbildung 4.19: Vergleich von Simulation und Messung der beiden WLTC-Zyklen

lation und Messung eine hohe Übereinstimmung vorliegt. Als Trade-Off steht demgegenüber eine höhere Temperatur am Ende des Zyklus bei hohen Temperaturen. Diese Abweichung wird aber als nicht kritisch angenommen, da für diesen Bereich ohnehin keine EHC-Beheizung zum Einsatz kommt. Über den gesamten Zyklus kann beim simulierten Temperaturverlauf gegenüber dem gemessenen ein Unter- und Überschwingen erkannt werden. Dieser Effekt wird durch die beiden Abgasrohre und das Leercanning aufgrund des Verzichtes auf die Einteilung in Scheiben verursacht. Demnach stellt sich mit großer Wahrscheinlichkeit das hohe Verhältnis zwischen Canning- und Abgasmasse in den betrachteten Komponenten als Ursache für dieses betrachtete Phänomen dar. Da trotz dieser Schwankungen das Ergebnis als zufriedenstellend betrachtet wurde und um den Simulationsaufwand in Grenzen zu halten, wurde auf eine weitere Einteilung in Scheiben verzichtet.

Die Ursache für die hohe Abweichung bei Zyklusbeginn, also bei sehr kaltem Abgassystem, konnte nicht eindeutig identifiziert werden. Nach einer Literaturanalyse ist diese Abweichung aber mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die in Sektion 4.1.3 erläuterte vereinfachende Annahme einer homogenen radialen Temperaturverteilung im Heizkatalysator zurückzuführen. Die bei verhältnismäßig hohen Temperaturen beobachtete Abweichung kann höchstwahrscheinlich durch Vorgänge der Wärmestrahlung erklärt werden. Wie in Sektion 4.1.6 beschrieben, führte eine probeweise Parametervariation bei der Berechnung des Emissionsverhaltens zu einer starken Reduktion der Abweichung.

Zusammenfassend zur thermischen Modellierung kann gesagt werden, dass sich der simulierte Temperaturverlauf für den Zweck der Strategiefindung als vorhersagekräftig gezeigt hat und der Messaufwand zur Strategiefindung damit stark reduziert werden konnte. Bevor auf diese näher eingegangen werden kann, erfolgt als Erweiterung des eben erläuterten thermischen Modells im nächsten Schritt die Erstellung eines Energiespeichermodells zur Simulation des Einflusses der elektrischen Katalysatorheizung auf das Bordnetz.

4.2 Energiespeicher-Simulation

Um die Belastung des Bordnetzes durch die elektrische Beheizung des EHCs abzubilden und daraus eine Kraftstoff-Mehrverbrauchsabschätzung vornehmen zu können, wurde im Zuge dieser Masterarbeit eine Energiespeichersimulation implementiert. Dessen schematischer Aufbau ist in Abbildung 4.20 dargestellt. Das Energiespeichermodell ist für eine gesamtheitliche Betrachtung in mehrere Teilmodelle strukturiert, welche

wie folgt aufgezählt werden können:

- Generatormodell
- Berechnungsblöcke der EHC- und Nebenverbraucher-Sollleistung
- Bordnetz- und Leistungsregelungsblock
- Batteriemodell
- Beheizungsreglerblock
- Kraftstoff-Verbrauchsmodell

Bevor im Detail auf die Teilmodelle eingegangen wird, erfolgt die Beschreibung möglicher Energiespeichersysteme, eine Bedarfsermittlung, sowie die Auslegung der elektrischen Komponenten. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden die Teilmodelle näher beleuchtet. Auf die Beheizungsregelung wird bei der Ergebnisdiskussion eingegangen.

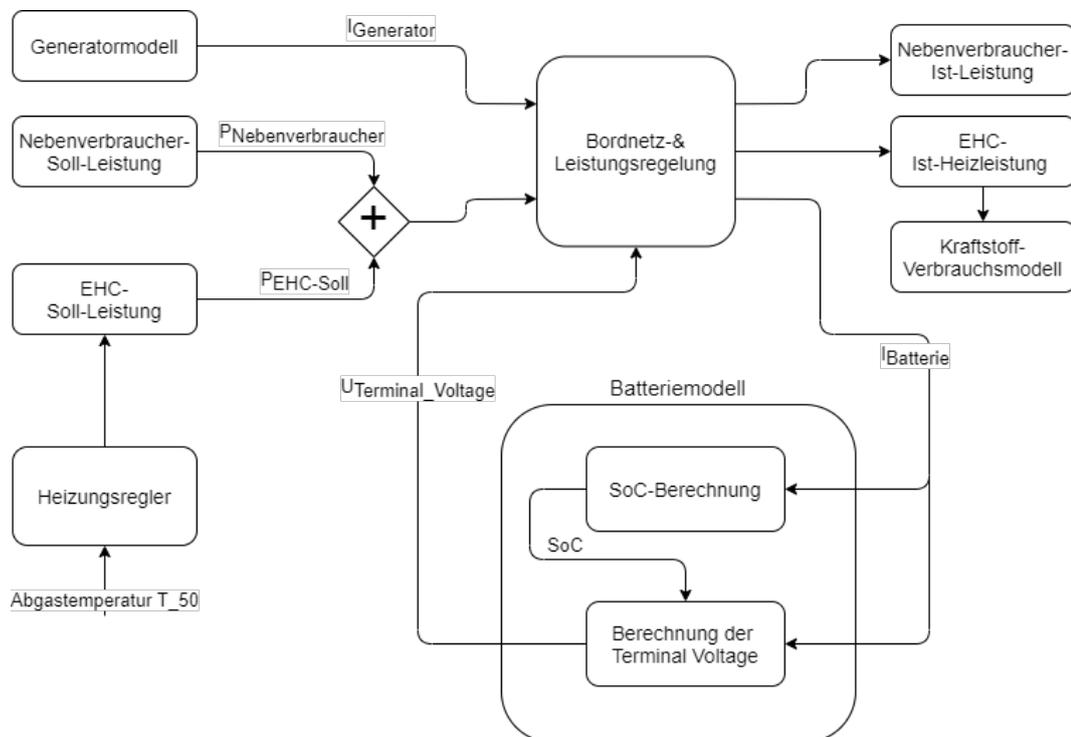


Abbildung 4.20: Schematischer Aufbau des Energiespeichermodells

4.2.1 Bedarfsermittlung

Um eine gesamtheitliche Modellierung des Energiespeichers zu erlauben, müssen im Simulationsmodell auch sämtliche Nebenverbraucher berücksichtigt werden. Für deren Modellierung bei verhältnismäßigem Aufwand, erfolgte zunächst eine Literaturrecherche zur Ermittlung deren durchschnittlicher elektrischer Leistungen [14, 43, 44, 88].

Anhand der analysierten Literaturwerte wurde für das Energiespeichermodell folgende Aufschlüsselung der elektrischen Leistung eines Mittelklasse-PKWs zur Auslegung des Batteriesystems vorgenommen:

- Startphase: Um die Kaltstartphase eines Fahrzeuges bei starker Nutzung sämtlicher Zusatzheizungen zu reproduzieren, wird von einer gesamten Nebenverbraucherleistung der ersten 300 Sekunden nach Start von 2,2 kW ausgegangen. Damit soll gezeigt werden, dass parallel zum elektrischen Heizkatalysator auch sämtliche leistungsstarke Nebenverbraucher betrieben werden können.
- Normalbetrieb: Nach der Startphase wird während der Fahrt von einer Konstantleistung aller elektrischen Verbraucher von 1 kW ausgegangen.
- Motorstillstand: Um bei Motorstillstand sämtliche weiterlaufende Nebenverbraucher wie Radio,... berücksichtigen zu können, wird für diesen Betriebszustand eine Konstantleistung von 500 W angenommen.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass die aufgelisteten Leistungen als sehr konservativ zu betrachten sind. Im Realbetrieb eines Mittelklasse-PKWs werden sie zwar mit großer Wahrscheinlichkeit darunter liegen, im Rahmen dieser Arbeit soll aber die grundsätzliche Machbarkeit der elektrischen Katalysatorheizung auf 12-V-Basis gezeigt werden.

4.2.2 Vergleich möglicher Energiespeichersysteme

Um einen Bezug zum Prüfstandmotor herzustellen, wurde entschieden, den elektrischen Heizkatalysator am 12-V-Bordnetz anstelle des 48-V-mild-Hybridsystems zu untersuchen. Dies geht aber mit einigen Herausforderungen einher. Aufgrund der hohen Heizleistung von bis zu 3 kW, führen die daraus resultierenden hohen Ströme zu einer starken Belastung des Bordnetzes. Nach überschlägiger Auslegung konnte dadurch eine herkömmliche 12-V-Autobatterie als Energiespeicher rasch ausgeschlossen werden. Basierend auf einer Literaturrecherche, beziehungsweise informativen Diskussionen mit Kollegen, konnten nachfolgende alternative Energiespeicherausführungen identifiziert und weiter untersucht werden:

- Serielle Kombination zweier 12-V-Bleiakkumulatoren zur Erhöhung der Heizspannung auf 24 V

- Verwendung einer 12-V-AGM-Batterie (Absorbent Glass Mat) mit erhöhter Akkukapazität und einem leistungsstärkeren Generator
- Verwendung einer 12-V-Li-Ionen-Batterie mit herkömmlichem Generator

Aufgrund von erhöhtem Platzbedarf, Gewichtszunahme und der Erfordernis einer komplexeren Spannungsregelung mit integriertem Cell-Balancing, konnte die Variante mit zwei seriell angeordneten 12-V-Bleiakkumulatoren rasch ausgeschlossen werden. Ebenso zeigte sich die Verwendung einer leistungsfähigeren 12-V-AGM-Batterie als nicht zielführend. Die Batterie wäre trotz einer Kapazität von mehr als 120 Ah wiederholt hohen C-Raten und niedrigen Ladezuständen ausgesetzt. Für ein derartig dynamisches Verhalten im mittleren SoC-Bereich (State of Charge) ist dieser Batterietyp gemäß [47] nur bedingt geeignet. Nach [78] führen insbesondere niedrige Ladezustände zu einer beschleunigten Alterung der Batterie. Weitere Probleme sind der rasche Kapazitätsverlust der AGM-Batterie bei Alterung, sowie der starke Spannungseinbruch bei abnehmendem SoC [45]. Abbildung 4.21 zeigt für letzteres Problem schematisch die Batterieklemmspannung V_{terminal} über dem DoD (Depth of Discharge) einer AGM-Batterie gegenüber einer LFP-Batterie (Lithium-Eisenphosphat) bei einer C/20-Entladung. Die C-Rate beschreibt die Geschwindigkeit von Lade- und Entladevorgängen der Batterie durch Bezug des Lade/Entladestromes auf die nominelle Batteriekapazität. Sie hat einen beträchtlichen Einfluss auf die ablaufenden elektrochemischen Reaktionen und damit der Wärmeentwicklung innerhalb der Batterie [36]. Basierend auf diesen Erkenntnissen, zeigt sich die AGM-Batterie für den Einsatz im Rahmen dieser Arbeit als nicht zufriedenstellend. Eine mögliche Lösung für deren Verwendung wäre die Entlastung durch den Einsatz eines leistungsfähigen Riemenstartergenerators. Nach derzeitigem Stand der Technik können damit elektrische Leistungen von bis zu 5 kW erzielt werden. Problematisch wäre für diese Lösung aber der Bezug zum realen Motor, da dafür ein

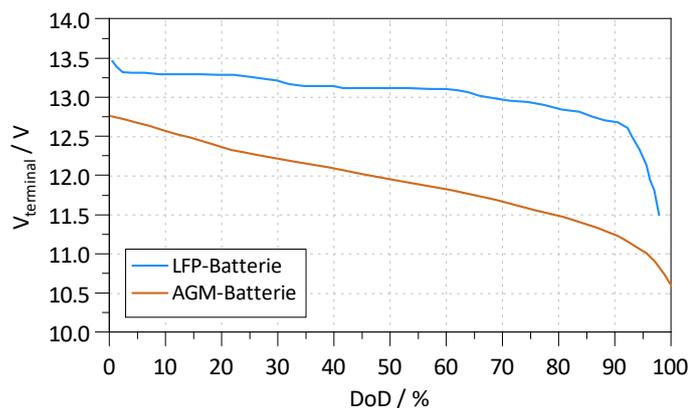


Abbildung 4.21: Batterieklemmspannung über dem DoD einer LFP-Batterie und einer AGM-Batterie bei C/20-Entladung, in Anlehnung an [45]

derartiger Generator nicht zur Verfügung steht. Deswegen wurde dieser Lösungsansatz nicht weiterverfolgt.

Unter Anbetracht des Ausscheidens sämtlicher Alternativen, wurde somit die Variante mit 12-V-Li-Ionen-Akkumulator als Energiespeicher weiterverfolgt. Nicht zuletzt aufgrund des Trends einer Reihe von OEM's (Original Equipment Manufacturer), von Bleiakkumulatoren auf Li-Ionen-Batterien umzustellen, stellt sich diese Variante als sehr vielversprechend dar. Vorteile von Li-Ionen-Batterien gegenüber Bleiakkumulatoren sind insbesondere höhere Energie- und Leistungsdichten, höhere Zyklenzahlen und dauerhaft verträgliche C-Raten, sowie der in Abbildung 4.21 dargestellte geringere Einbruch der Batterieklemmspannung V_{terminal} über dem DoD. Nachteilig ist deren merklich höherer Preis, aufgrund steigender Produktionszahlen dürfte dieser in naher Zukunft aber auf ein akzeptables Niveau absinken [94].

4.2.3 Auslegung der elektrischen Komponenten

Zur Auswahl einer geeigneten Zelltechnologie wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, wobei Abbildung 4.22 eine Übersicht untersuchter Zelltypen zeigt. Als Resultat dieser Literaturrecherche, sowie unter Berücksichtigung von am Markt verfügbaren Zellen, wird für diese Arbeit als Zelltyp eine 26650-Rundzelle mit einer LFP-Zellchemie ausgewählt. Die nominelle Kapazität der eingesetzten Batteriezelle beträgt 2,3 Ah bei einer nominellen Spannung von 3,3 V. Für sämtliche technische Spezifikationen sei auf

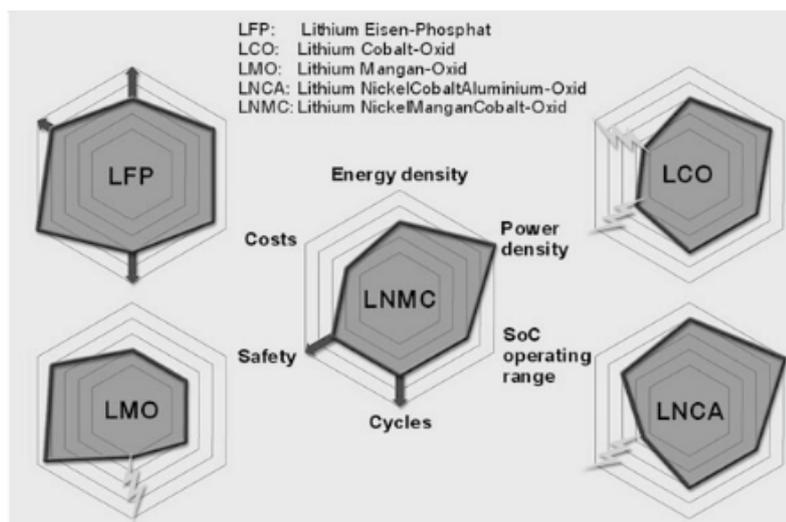


Abbildung 4.22: Vergleich unterschiedlicher Zelltechnologien [42]

das Datenblatt verwiesen [2]. Die LFP-Zelltechnologie zeichnet sich unter anderem durch Vorteile wie hoher Energie- und Leistungsdichte, geringer Selbstentladung, hoher Zyklenzahl und kalendarischer Lebensdauer, sowie hoher Lade/Entladeraten aus und gewinnt im Automobilbereich zunehmend an Bedeutung. Gegenüber anderen Li-Ionen-Batterien besteht zudem eine geringere Gefahr eines Thermal-Runaway. Für einen detaillierten Vergleich unterschiedlicher Zelltypen sei an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen [36, 42, 59, 94]. Bevor auf die Komponentenauslegung eingegangen wird, ist in Abbildung 4.23 der Aufbau einer LFP-Batterie zelle dargestellt. Abbildung 4.24 zeigt die ablaufenden Reaktionen beim Lade/Entladevorgang.

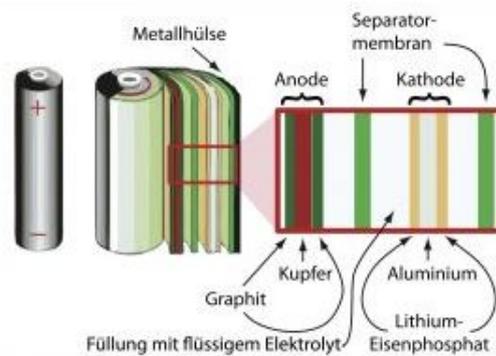


Abbildung 4.23: Aufbau einer LFP-Rundzelle. Ohne Änderungen entnommen aus [100]

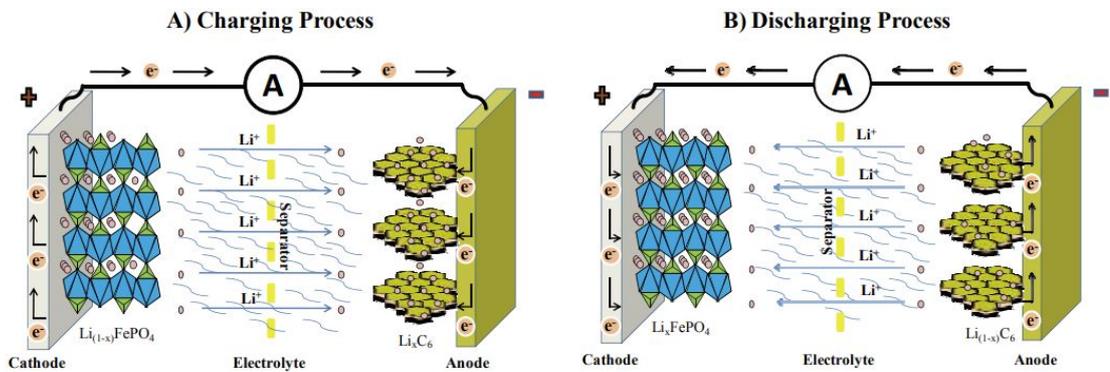


Abbildung 4.24: Ablaufende Vorgänge einer LiFePO₄-Zelle beim Laden/Entladen[89]

Auf Basis der im vorigen Abschnitt erläuterten Bedarfsabschätzung, kann eine Komponentenauslegung von Batterie und Generator vorgenommen werden. Wie eingangs dieses Kapitels bereits kurz erwähnt, soll ein Bezug des Energiespeichermodells zum realen Motor hergestellt werden können. Aus diesem Grund wurde als Generator der stärkste, für diesen Motortyp verfügbare, gewählt. Bei der 12-V-Nennspannung kann damit ein maximaler Effektivstrom von 200 A aufgebracht werden. Die Berechnung der

Bordnetzspannung folgt in Sektion 4.2.5. Resultierend aus der Maximalleistung des Heizkatalysators und der Nebenverbraucher, ergibt sich in der Startphase eine maximale elektrische Leistung von 5,2 kW. Unter Berücksichtigung von Generatorleistung und Bordnetzspannung, wird für eine Batterieauslegung von einem maximalen Dauer-Batteriestrom von 235 A ausgegangen. Aufgrund dessen kurzen Zeitdauer, wird der Startvorgang des Verbrennungsmotors zur Vereinfachung bei der Batteriemodellierung nicht berücksichtigt und ist in den genannten Werten folglich nicht enthalten. Die erforderliche Batteriekapazität wird unter Berücksichtigung des Energiebedarfs und der zugelassenen C-Rate bestimmt.

Bevor auf die Batterieauslegung näher eingegangen wird, sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Modellierung nicht anhand einer am Markt verfügbaren Batterie, sondern auf Zellbasis durch serielle und parallele Verschaltung einzelner Zellen durchgeführt wurde. Abbildung 4.25 zeigt das Prinzip der Verschaltung. Diese Vorgehensweise liegt darin begründet, dass sämtliche Modellierungen in der Literatur auf Zellbasis beruhen und demnach eine einfachere Parameterfindung möglich war. Die Batteriespannung berechnet sich dabei durch Addition der Zellspannung aller seriell geschalteten Zellen, die Batteriekapazität durch Addition deren Kapazitäten in Parallelschaltung [42]. In Sektion 4.2.5 wird näher auf die Modellierung eingegangen.

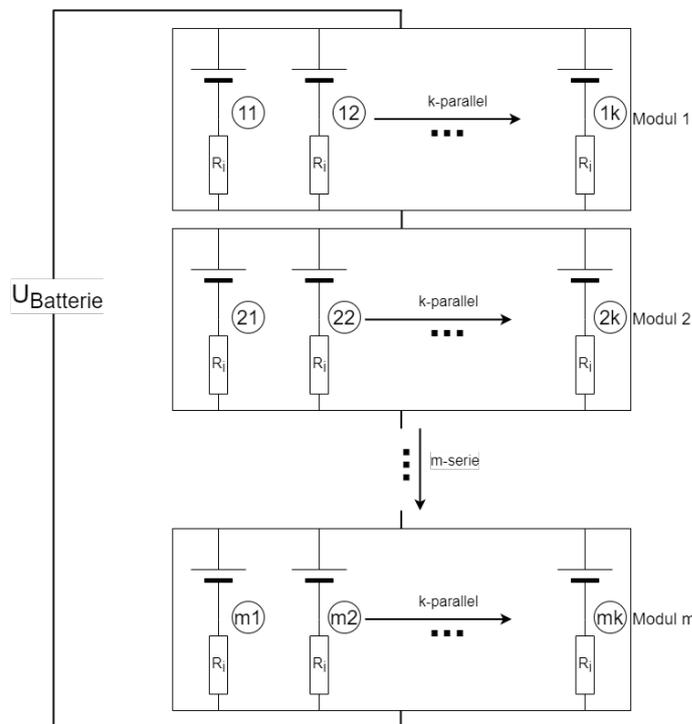


Abbildung 4.25: Aufbau der Batterie: Parallele und serielle Verschaltung von Einzelzellen

Für die Batterieauslegung können gemäß Literatur für die LFP-Zellchemie dauerhafte Entladeraten von über 15 zugelassen werden, kurzzeitig bis zu 30 [2]. Aus Gründen der gegenseitigen Wärmebeeinflussung, sowie der begrenzten Wärmeabfuhr der Zellen im Batteriegehäuse, kann für das Gesamtsystem nur von einer geringeren C-Rate ausgegangen werden. Unter Berücksichtigung von zulässigen Lade/Entladeraten einerseits auf Zellebene, andererseits von verfügbaren Batterien, sowie der Tatsache, dass die maximale C-Rate in den untersuchten Fahrzyklen nur für sehr kurze Dauer erreicht wird, wird für die Dauerbelastung ein Maximalwert von 2,25 angenommen. Dieser Wert ist eher als konservativ zu betrachten. Damit, sowie dem vorausberechneten Energiebedarf, ergibt sich gemäß 45p4s-Zellanordnung eine Batteriekapazität von 103,5 Ah bei einer nominellen Spannung von 13,2 V. Die Bezeichnung 45p4s-Zellanordnung bedeutet die serielle Verschaltung von vier Zellpacks, welche jeweils 45 Zellen in paralleler Verbindung enthalten. Diese Kapazität entspricht bereits eingesetzten Batteriekapazitäten von Mittel- bis Oberklasse-PKW, welche im Durchschnitt 90 - 110 Ah betragen.

Abschließend zur Batterieauslegung kann gesagt werden, dass im Rahmen dieses Modells nicht die Energie, sondern die maximale Lade/Entladerate der limitierende Faktor ist. Durch Maßnahmen zur Reduktion der thermischen Belastung könnte die C-Rate erhöht und damit die benötigte Kapazität noch etwas verringert werden. Für automotive Batteriesysteme wäre diesbezüglich ein Batteriemanagementsystem, oder beispielsweise eine aktive Batteriekühlung notwendig. Gemäß [42] wird dieses System im Batteriegehäuse integriert und ermöglicht die Überwachung von Batteriestrom-, Spannungs- und Temperatur. Dessen primäre Aufgabe besteht neben dem Thermomanagement in der Überwachung und dem Schutz der Einzelzellen um Lebenszeit und Zyklenzahl zu erhöhen und für einen sicheren Betrieb zu sorgen. Da im Zuge dieser Arbeit eine konzeptionelle Betrachtung im Vordergrund stand, wird aber aufgrund der hohen Komplexität darauf verzichtet und für weitere Informationen auf [42] verwiesen.

4.2.4 Literaturstudie Batteriemodellierung

Bevor näher auf die Batteriemodellierung eingegangen wird, erfolgt in diesem Kapitel eine kurze Gegenüberstellung in der Literatur verbreiteter Modellierungsmöglichkeiten für Li-Ionen-Batterien. Nach [15, 34, 80] kann zwischen den folgenden Modellen unterschieden werden.

Elektrochemische Modelle

Derartige Modelle beruhen auf gekoppelten nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen und beschreiben grundlegende elektrochemische Vorgänge in den Zellen. Sie dienen vorrangig der Designoptimierung durch Charakterisierung und Verknüpfung von

makroskopischen (Spannung und Strom) und mikroskopischen (Konzentrationsverteilung, Elektrodenreaktionen, Ladungstransfer,...) Einflussfaktoren auf das Zelldesign. Ein Vorteil ist die sehr hohe erzielbare Genauigkeit dieser Modelle, nachteilig sind die hohe Komplexität der Parameterbestimmung, sowie der hohe erforderliche Rechenaufwand der numerischen Lösungsverfahren [30, 56].

Mathematische Modelle

Mathematische Modelle verwenden empirische Gleichungen oder mathematische Methoden wie stochastische Ansätze, um das Zellverhalten auf Systemlevel zu charakterisieren. Diese Modelle stellen sich allgemein als sehr abstrakt dar und erlauben keine Vorhersage des Strom-Spannungsverhaltens. Derartige Modelle werden, wie die elektrochemischen Modelle, vorrangig für die Designoptimierung herangezogen und dienen der Simulation von Batterie-Lebensdauer-, Wirkungsgrad- oder Kapazität. Nachteilig ist neben dem hohen Grad der Abstraktion die höhere Ergebnisabweichung im Vergleich mit den anderen hier vorgestellten Modellen [16, 70].

Computational-Intelligence basierte Modelle

Diese Modelle basieren auf der Beschreibung nichtlinearer Zusammenhänge von SoC, Batteriespannung, Strom und Temperatur. Eingeteilt werden können diese Modelle in künstliche-neurale-Netzwerkmodelle [13], rekurrente neurale Netzwerkmodelle [99], sowie Support-Vector-Regressionsmodelle [82] und werden vorrangig für die Berechnung der Batterie-Klemmspannung in Abhängigkeit des SoCs bei Berücksichtigung der genannten, nichtlinearen Zusammenhänge eingesetzt. Nachteilig dieser Modellierungsverfahren ist der sehr hohe Bedarf an Rechenleistung [80].

Elektrische Modelle basierend auf Ersatzschaltungen

Elektrische Modelle basieren auf Ersatzschaltungen bestehend aus Spannungsquellen, Kapazitäten und Widerständen in Serien/Parallelschaltung. Sie sind verhältnismäßig einfach und intuitiv aufgebaut. Eingesetzt werden diese Modelle vorrangig für die Simulation von Spannungs- und Stromcharakteristiken unter Berücksichtigung des momentanen Ladezustands bei hinreichender Genauigkeit [15, 34, 80]. In der Literatur konnten folgende Modelle identifiziert werden:

- Thevenin-Modell [32, 62]
- Impedanzmodell [12, 76]
- Runtime-Modell [6, 29]
- Shepherd's-Modell [65, 90]

- Rint-Modell [34]

An dieser Stelle wird nicht näher auf die unterschiedlichen Modelle eingegangen, sondern auf die Literatur verwiesen. Basierend auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche, wurde aufgrund der zufriedenstellenden Genauigkeit einerseits, der vereinfachten Parameterfindung andererseits, ein elektrisches Ersatzschaltmodell implementiert. Eine detaillierte Erklärung erfolgt im nachfolgenden Kapitel.

4.2.5 Beschreibung des Batteriemodells

Im Zuge dieser Arbeit wurde das Thevenin-Modell zur Batteriemodellierung herangezogen. Um das dynamische Verhalten mit hinreichender Genauigkeit modellieren zu können, wird dabei ein Modell 2.Ordnung verwendet. Nachfolgende Abbildung 4.26 zeigt die Ersatzschaltung. Das aus der Literatur herangezogene Modell besteht gemäß Abbildung 4.26 aus der Spannungsquelle V_{OCV} , dem Serienwiderstand R_s zur Modellierung des Batterie-Innenwiderstands, sowie den beiden Parallelkreisen $R_1 \parallel C_1$ und $R_2 \parallel C_2$ zur Modellierung des Kurzzeit- beziehungsweise des Langzeit-Transientverhaltens der Zelle. Die daraus resultierenden Spannungsabfälle V_1 und V_2 liegen dabei in der Lithium-Diffusion in der festen Phase und dem Elektrolyten begründet [34, 62].

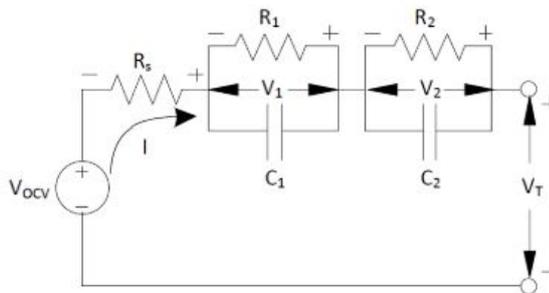


Abbildung 4.26: Ersatzschaltbild eines Thevenin-Modells 2.Ordnung [62]

Angesichts einer fehlenden Messinfrastruktur für Batteriezellen, ist die Verwendung einer bereits parametrisierten Berechnungsmethodik aus der Literatur erforderlich. Aufgrund einer identen Zellkonfiguration hat sich dabei die Modellierung in [62] als am geeignetsten erwiesen. Sämtliche Parameter und Gleichungen der in diesem Kapitel erläuterten Berechnungen entstammen deshalb dieser Literaturquelle. Das gesamte Batteriemodell wurde in Matlab-Simulink erstellt. Es gliedert sich in die Bestimmung des Ladezustandes der Batterie, der Berechnung der OCV (Open Circuit Voltage) und im letzten Schritt der Berechnung der Batterieklemmspannung $V_{terminal}$. Im nachfol-

genden Abschnitt wird näher auf die drei Schritte und deren Implementierung in der Simulationsumgebung eingegangen.

SoC-Bestimmung

Der SoC ist ein Maß für den Ladezustand einer Batterie und beeinflusst die Open Circuit Voltage, sämtliche Modellparameter und damit das gesamte Batterieverhalten [15, 32, 49, 62]. Anhand der Formel 4.15 kann der SoC dynamisch berechnet werden [62].

$$SoC = SoC_{\text{start}} - \frac{\int I dt}{3600 \cdot C_{\text{gesamt}}} \quad (4.15)$$

Der Ladezustand einer Batterie hat außerdem einen erheblichen Einfluss auf deren Alterungsverhalten. Demnach können sowohl sehr niedrige Ladezustände, als auch vollständiges Laden die Alterung stark beschleunigen, was eine entsprechende Regelung erforderlich macht. In der Literatur gibt es verschiedene Laderegelungsstrategien, für dieses Modell kommt die 25/85-Regel zum Einsatz. Dabei wird bei einem Ladezustand von weniger als 25 % eine weitere Entladung verhindert, bei mehr als 85 %-iger Ladung wird vom Generator kein weiterer Strom mehr in die Batterie gespeist. Diese Strategie wird aufgrund eines günstigen Kompromisses zwischen nutzbarer Batteriekapazität und zu erwartender Zyklen-Lebensdauer gewählt [101].

Berechnung der Open Circuit Voltage

Die Open Circuit Voltage beschreibt die Batterieklemmspannung über dem SoC, wenn keine Verbraucher angeschlossen sind und sich die Batterie demnach im Ruhezustand befindet. Beim verwendeten Zelltyp ist zwischen dem Laden und Entladen eine charakteristische Hysteresekurve zu beobachten, zur Vereinfachung wird dieser Effekt im Modell aber vernachlässigt. Für die Modellierung wird diese Kurve der Literatur entnommen und durch einen Polynomfit mit Excel eine Polynomfunktion 6. Ordnung gemäß Gleichung 4.16 abgeleitet [32].

$$OCV = -8,7489 \cdot SoC^6 + 25,347 \cdot SoC^5 - 29,772 \cdot SoC^4 + 18,74 \cdot SoC^3 - 7,0117 \cdot SoC^2 + 1,6517 \cdot SoC + 3,0817 \quad (4.16)$$

Damit kann im Modell die Zellspannung als Funktion des SoCs dynamisch berechnet werden. In Abbildung 4.27 ist im linken Diagramm die OCV über dem SoC beim Laden und Entladen mit 0,1 C einer ähnlichen LFP-Zelle mit der beschriebenen Hystereseschematisch dargestellt. Im rechten Diagramm der im Modell herangezogene, vereinfachte OCV-Verlauf aus [32] und die daraus abgeleitete Polynomfunktion.

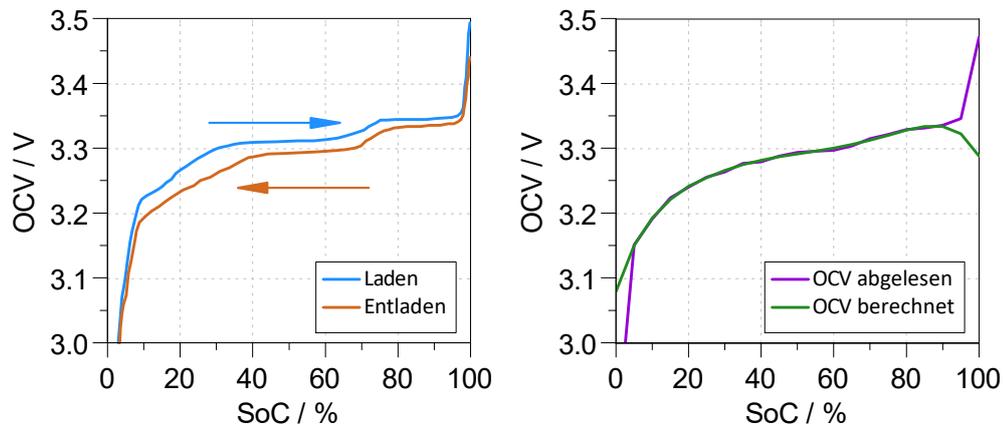


Abbildung 4.27: Darstellung der Beziehung zwischen OCV und SoC. Links: OCV über dem SoC beim 0,1C-Laden/Entladen in Anlehnung an [1]. Rechts: Abgelesene und berechnete OCV über dem SoC, in Anlehnung an [32]

Berechnung der Terminal Voltage

Die Terminal Voltage berechnet sich nach [62] gemäß Formel 4.17 und entspricht der Klemmspannung der Batterie während dem Laden/Entladen.

$$V_T = V_{OCV} - I \cdot R_s - V_1 - V_2 \quad (4.17)$$

Im verwendeten Modell bedeutet ein positives Vorzeichen beim Strom ein Entladen, ein negatives einen Ladevorgang. Diese Konvention gilt im gesamten Batteriemodell. Die Berechnung der Terminal Voltage erfolgt auf Basis der OCV, welche im verwendeten Modell vereinfacht als SoC-abhängige Spannungsquelle abzüglich des Innenwiderstands der Batterie modelliert wird. Dieser ist gemäß der Literatur von folgenden Einflussgrößen abhängig [15, 49]:

- Temperatur
- Alterungszustand
- SoC
- C-Rate und Richtung des Stromflusses

Wie bereits erläutert, setzt sich der gesamte Innenwiderstand aus einem Serienwiderstand R_s , sowie den beiden $R||C$ -Schaltkreisen zur Berücksichtigung des Transientverhaltens zusammen. Die Spannungsabfälle V_1 und V_2 dieser beiden Parallelkreise berechnen sich nach [62] gemäß der Differentialgleichung in Formel 4.18. Diese werden in der Matlab-Simulink-Umgebung für jeden Zeitschritt gelöst.

$$\dot{V} = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot V + \frac{1}{C} \cdot I \quad (4.18)$$

Um den Modellierungsaufwand in Grenzen zu halten, werden hinsichtlich der Berücksichtigung der Abhängigkeiten des Innenwiderstandes einige Vereinfachungen getroffen. Da einerseits die maximal zugelassene C-Rate von 2,25 bereits konservativ ausgelegt ist, andererseits sich bei Simulationen gezeigt hat, dass der reale Wert bei den Tests meist auf einem merklich niedrigerem Niveau liegt, kann der Einfluss mit hinreichender Genauigkeit vernachlässigt werden. Die Richtung des Stromflusses wird im Modell aber sehr wohl berücksichtigt. Gemäß Literatur wurde anhand von Modellen zwar ein Einfluss des Stromes auf den Innenwiderstand nachgewiesen, allerdings zeigt sich dort der geringe Einfluss bei niedrigen C-Raten, was die vorgenommene Vernachlässigung untermauert [49, 102]. In Abbildung 4.28 sind der Einfluss von C-Rate und Temperatur auf den Innenwiderstand und damit die Batterieklemmspannung dargestellt. Das linke Diagramm zeigt eine Temperaturvariation bei konstantem Entladestrom von 2,3 A, was einer C-Rate von eins entspricht. Im rechten Diagramm ist eine Entladestromvariation bei einer konstanten Temperatur von 25 °C abgebildet.

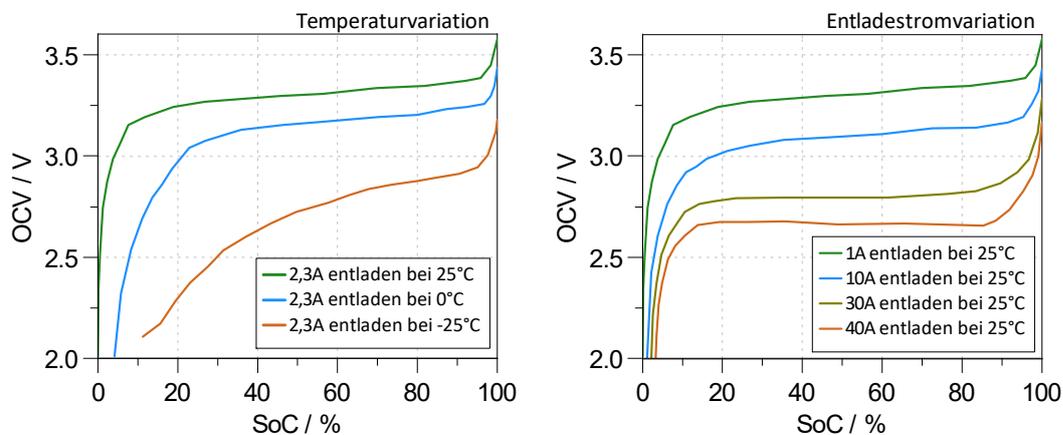


Abbildung 4.28: Einfluss von Temperatur und C-Rate auf die OCV. Links: V_{terminal} über dem SoC bei einer Temperaturvariation, in Anlehnung an [1]. Rechts: V_{terminal} über dem SoC bei einer Stromvariation, in Anlehnung an [1]

Wie eingangs dieses Kapitels erwähnt, wird kein thermisches Modell zur Simulation der Batterieerwärmung erstellt. Um den Temperatureinfluss dennoch abbilden zu können, erfolgt vor einem Simulationsdurchlauf die Festlegung einer Batterietemperatur, welche dann im Zuge der Berechnung der Terminal Voltage Einfluss findet.

Als weitere Vereinfachung wird der Einfluss der Batteriealterung reduziert. In Abbildung 4.29 sind schematisch anhand einer sehr ähnlichen Zelle der Einfluss von Temperatur und DoD auf die Alterung dargestellt. Daraus ersichtlich ist die Wichtigkeit einerseits einer ausreichenden Wärmeabfuhr aus der Batterie, andererseits einer SoC-Regelung zur Vermeidung schädigender Ladezustände. Neben den beiden Mechanismen, verfügt auch die C-Rate über einen Einfluss auf die Batteriealterung. Details dazu sind der Literatur zu entnehmen [42]. Aufgrund des hohen Simulationsaufwandes, wird der Alterungszustand im Rahmen dieser Arbeit aber nicht modelliert. Zur Abschätzung dessen Einflusses kann im Modell aber durch Veränderung eines Prozentwertes die alterungsbedingte Kapazitätsabnahme variiert werden.

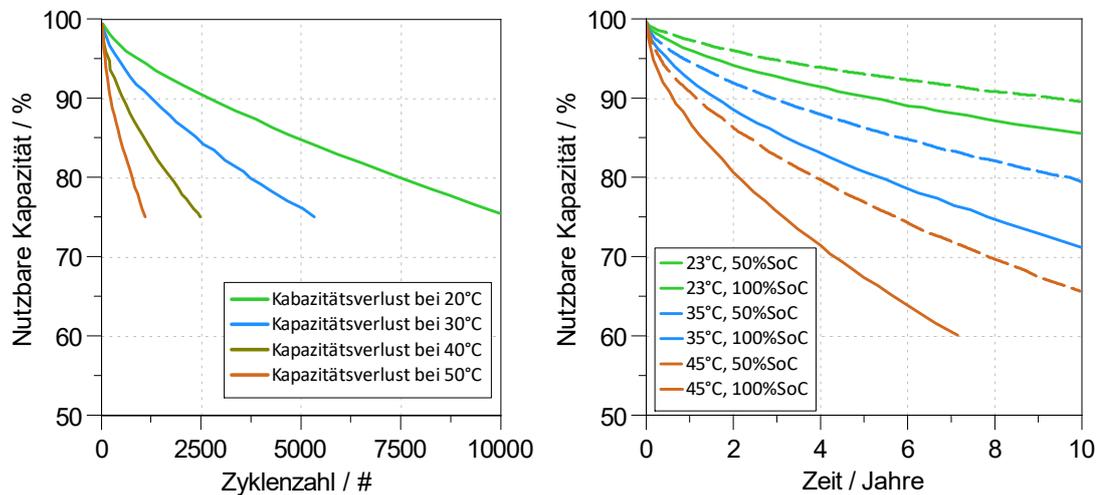


Abbildung 4.29: Auswirkung der Batteriealterung auf deren Kapazität. Links: Kapazitätsverlust über der Zyklenzahl in Abhängigkeit der Temperatur, in Anlehnung an [1]. Rechts: Kapazitätsverlust über der kalendarischen Lebensdauer einer Batteriezelle in Abhängigkeit von Temperatur und SoC, in Anlehnung an [1]

Zusammenfassend zur Batteriemodellierung kann festgestellt werden, dass im Modell zur Berechnung des Batteriewiderstandes die Abhängigkeiten von Temperatur, Richtung des Stromflusses und der SoC berücksichtigt werden. Die Berechnungsmethodik zur Bestimmung der Widerstände und Kapazitäten, sowie die dazu erforderlichen Parameter, entstammen aus der Literatur und sind dem Anhang zu entnehmen [62].

4.2.6 Generatormodell und Berechnungsblock für die EHC- und Nebenverbraucherleistung

In diesem Abschnitt soll zuerst die Abstraktion des Generators erläutert werden, bevor auf die Berechnung und Regelung der EHC-Heizleistung und der Nebenverbraucher eingegangen wird.

Generatormodell

Der Generator wird in dieser Simulation als vereinfachtes, kennlinienbasiertes Modell abstrahiert. Aufgrund fehlender Dokumentation des modellierten Generators, wird eine in Anlehnung an die Literatur erstellte, Motordrehzahl-basierte Kennlinie gemäß Abbildung 4.30 herangezogen. Der effektive Maximalstrom des modellierten Generators beträgt 200 A. Für dessen Gesamtverluste ist dabei ein Wirkungsgrad von $\eta_{\text{Generator}} = 0,8$ bereits berücksichtigt [54].

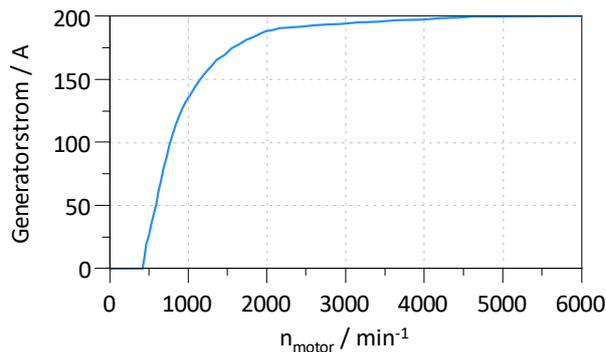


Abbildung 4.30: Effektiver Generatorstrom über der Motordrehzahl, in Anlehnung an [54]

Berechnungsblock zur Ermittlung der elektrischen Leistung für den Heizkatalysator und die Nebenverbraucher

In diesem Teilmodell wird für jeden Zeitschritt ermittelt, welche Leistung die Nebenverbraucher entsprechend der bereits erläuterten Betriebszustände erfordern und deren Sollwert der Leistungsregelung übermittelt. Die Berechnung der Soll-Heizleistung erfolgt durch Kopplung mit dem thermischen Modell und den darin implementierten Reglersystemen unter Einhaltung der in Kapitel drei erläuterten Sicherheitsvorkehrungen. Mehr zu den Reglern später.

4.2.7 Bordnetz- und Leistungsregelung

Die Leistungsregelung berechnet prioritätsgesteuert, welche Leistungen EHC und Nebenverbraucher erfordern und bis zu welchem Grad diese für jeden Zeitschritt von der Batterie und dem Generator bereitgestellt werden können. Aufgrund dessen hohen Einflusses auf das Emissionsverhalten, wird dem EHC die oberste Priorität zugeteilt. Kann die gesamte geforderte Leistung von Generator und Batterie nicht aufgebracht werden, erfolgt zuerst die Bedienung des elektrischen Heizkatalysators. Die Nebenverbraucher werden dabei auf minimal 1 kW elektrischer Leistung gedrosselt. Erst danach kommt es zu einer Senkung der Heizleistung. In der Praxis erfolgt die Verbraucherdrösselung beispielsweise durch eine getaktete Betriebsweise, deren Leistungsreduktion oder dem vorübergehenden Deaktivieren. Diese Maßnahmen werden von den Automobilbauern unter dem Aspekt der geringsten Wahrnehmbarkeit auf den Kunden gesteuert. Alternativ dazu ließe sich auch die Leerlaufdrehzahl anheben, wodurch vom Generator mehr Strom geliefert werden kann [27, 93].

Für die Bordnetzregelung wird davon ausgegangen, dass die geforderte Leistung grundsätzlich vom Generator aufgebracht wird. Gemäß [54] kann dazu vereinfachend angenommen werden, dass in diesem Fall die Bordnetzspannung konstant bei 14,3V gehalten wird. Wenn der Leistungsbedarf die maximale Ladeleistung des Generators übersteigt, wird zur Unterstützung die Batterie entladen und die Bordnetzspannung entspricht der Klemmspannung der Batterie. Die Generatorspannung muss dabei entsprechend nachgeregelt werden. Die Leistungen von Batterie und Generator berechnen sich anhand der Effektivströme und der momentanen Bordnetzspannung. Abbildung 4.31 zeigt die beiden Fälle. Die Nummerierung symbolisiert die Priorität der Elemente im Bordnetz. Die Ladung der Batterie erfolgt unter dem Aspekt der SoC-Neutralität über den gesamten Zyklus. Als Aufladestrategie wird, aufgrund fehlender technischer Möglichkeiten am Motorprüfstand, eine stark vereinfachte Methode einge-

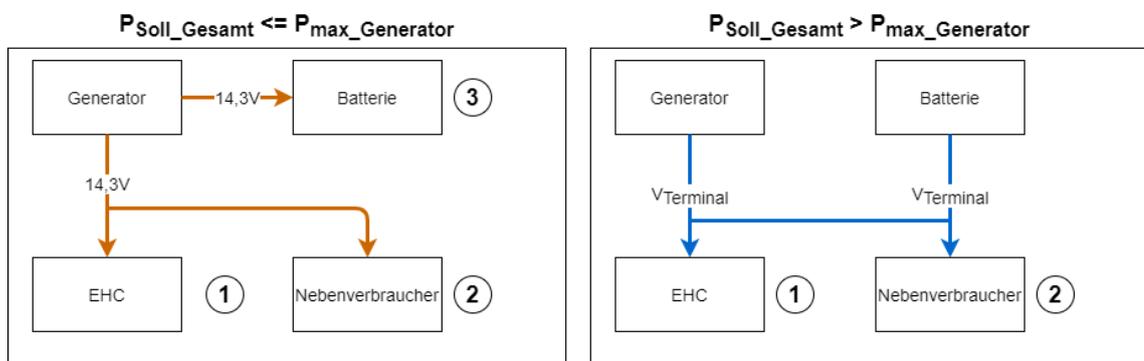


Abbildung 4.31: Stromfluss und Bordnetzspannung - Fallunterscheidung

setzt. In [93] genannte,- beziehungsweise aus Diskussionen mit Kollegen hervorgegangene, intelligente Ladestrategien wie:

- Bevorzugte Ladung im Motor-Schleppbetrieb
- Batterieladung erst nach Erreichen des Katalysator-Light-Offs, um zusätzliche Emissionen durch die Generatorlast zu vermeiden
- Intelligente, bedarfsorientierte Ladung mit angepasster Ladeleistung zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs

können demzufolge nicht eingesetzt werden. Um einen aussagekräftigen Bezug zu den Messungen herstellen zu können, erfolgt dies auch im Rahmen der Simulation. Bei Ladebedarf wird demzufolge die Batterie zu jedem Zeitpunkt bereits unmittelbar nach Motorstart mit der maximal möglichen Ladeleistung versorgt und danach der Generator deaktiviert. Abschließend sei noch erwähnt, dass zur Vermeidung ungünstiger Ladezustände der Batterie noch eine gemäß in Abschnitt 4.2.5 erläuterte SoC-Überwachung und Regelung implementiert wurde. Sämtliche Regelvorgänge erfolgen also unter Berücksichtigung des Batterie-Ladezustands [54].

4.2.8 Modell zur Abschätzung des Kraftstoffmehrverbrauchs

Der aus der Beheizung des elektrischen Heizkatalysators resultierende Kraftstoffmehrverbrauch ist ein entscheidender Faktor für den Einsatz dieses Systems und demnach ein wichtiges Kriterium bei der Entwicklung einer geeigneten Heizstrategie. Die Berechnung erfolgt im Rahmen dieser Arbeit auf zwei Varianten, welche nachfolgend kurz vorgestellt werden. Für beide Verfahren sind die Nebenverbraucher gemäß [20] am Motorprüfstand deaktiviert. Diese sollen im Rahmen dieser Arbeit nur für die Konzeptuntersuchung des Energiespeichersystems berücksichtigt werden.

Variante-1

Diese Variante entspricht einem Worst-Case Szenario, in welchem die Heizenergie gemäß Formel 4.19 durch die Wirkungsgrade von Motor und Generator zu einer Zusatzenergie umgerechnet wird.

$$E_{\text{Zusatzenergie}_1} = \frac{E_{\text{EHC}}}{\eta_{\text{Generator}} \cdot \eta_e} \quad (4.19)$$

Dabei kann basierend auf Erfahrungen des ITnA von einem mittleren effektiven Motorwirkungsgrad $\eta_e = 25\%$ (effektiver Wirkungsgrad) für alle Zyklen ausgegangen werden. Diese Berechnungsform legt also zugrunde, dass die gesamte Energie durch den gefeuerten Motorbetrieb aufgebracht werden muss. Um eine realistischere Betrachtung

zu ermöglichen, erfolgte die Entwicklung von Variante-2.

Variante-2

Als Weiterentwicklung wird bei dieser detaillierteren Betrachtung unterschieden, ob die Energie in den Schubphasen ohne Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch, oder im gefeuerten Betrieb aufgebracht wird. Dazu erfolgt die Auswertung mithilfe des Energiespeichermodells, wofür die am Prüfstand gemessene Heizleistung P_{EHC} als Eingangsgröße dient. Die Heizleistung wird dabei von Generator und Batterie aufgebracht und letztere bis zum Erreichen eines SoC-neutralen Zustands danach wieder aufgeladen. Dies erfolgt nach der im vorigen Abschnitt erläuterten Ladestrategie. Im Modell wird dazu anhand der effektiven Generatorleistung im gefeuerten Betrieb $P_{\text{generator_gefeuert,e}}$, sowie dem Drehzahlverlauf und dem Generatorwirkungsgrad $\eta_{\text{Generator}}$, ein zeitlich aufgelöstes effektives Zusatzdrehmoment gemäß Formel 4.20 errechnet. Im Realbetrieb ist dieses Zusatzmoment zum Motordrehmoment zu addieren. Eine Aufzeichnung des Wasserstoff-Einblsignals ermöglicht eine Unterscheidung zwischen gefeuertem, oder geschlepptem Motorbetrieb. Gemäß Formel 4.21 kann aus diesem Zusatzdrehmoment unter Berücksichtigung des effektiven Motorwirkungsgrades η_e die Zusatzenergie berechnet werden. Nach Gleichung 4.22 ist mit dem unteren Heizwert von Wasserstoff die Umrechnung in einen Kraftstoffverbrauch möglich.

$$M_{\text{Zusatz}} = \frac{P_{\text{generator_gefeuert,e}}}{\eta_{\text{Generator}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_{\text{Motor}}} \quad (4.20)$$

$$E_{\text{Zusatzenergie}_2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \int M_{\text{Zusatz}} n_{\text{motor}} dt}{\eta_e} \quad (4.21)$$

$$m_{\text{H}_2} = \frac{E_{\text{Zusatzenergie}}}{H_{\text{u,H}_2}} \quad (4.22)$$

Abschließend sei erwähnt, dass aufgrund der technischen Gegebenheiten am Prüfstand keine Berechnung in Echtzeit möglich ist und diese Auswertung erst im Nachhinein erlaubt, womit der Einfluss des Motorzusatzdrehmoments auf den Abgastemperaturverlauf und die Emissionskonvertierung im erstellten Modell nicht abgebildet werden kann.

5 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel soll zunächst die Untersuchung potentieller Heizstrategien erläutert werden. Bevor auf die Ergebnisse der ausgewählten Strategie eingegangen wird, erfolgt vorab noch die Auswahl und Optimierung von Reglersystemen für die EHC-Beheizung. Die am Prüfstand aufgezeichneten Ergebnisse werden anschließend für die im 3.Kapitel aufgelisteten Fahrzyklen hinsichtlich der Emissionen und des Einflusses der elektrischen Katalysatorheizung auf den Kraftstoffverbrauch verglichen und bewertet.

5.1 Ausgangssituation

Um den Einfluss der elektrischen Katalysatorheizung zeigen zu können, wurden die Fahrzyklen vorab bei gleicher Abgassystemkonfiguration vermessen und als Ausgangsbasis für die Entwicklung einer geeigneten Heizstrategie herangezogen. Abbildung 5.1 zeigt die dabei ermittelten Temperaturverläufe und NO_x-Emissionen bei den WLTC-Zyklen, Abbildung 5.2 jene der beiden RDE-Zyklen.

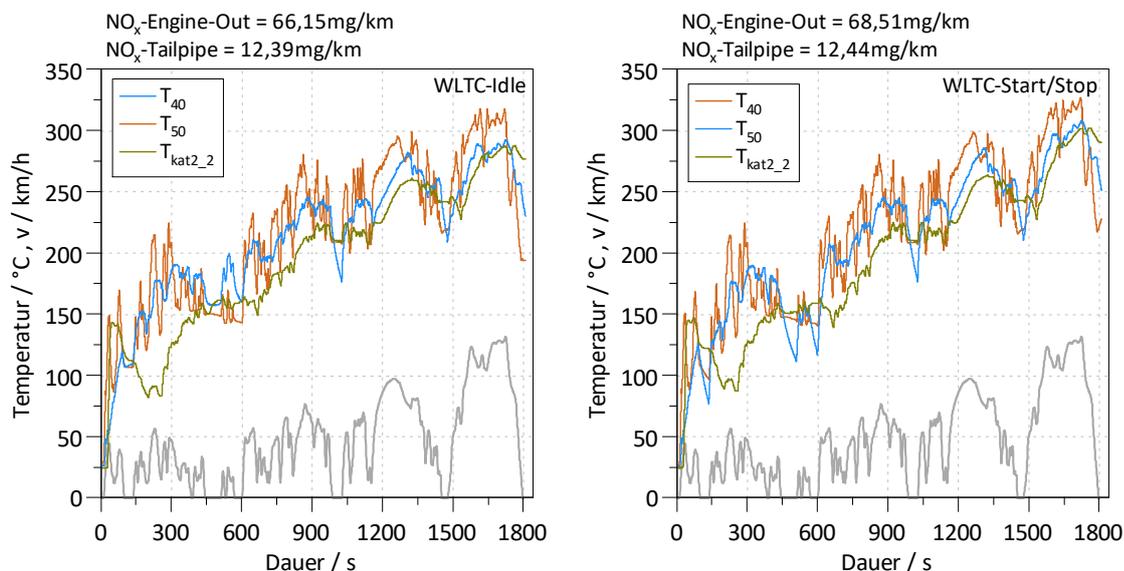


Abbildung 5.1: Temperaturen und NO_x-Emissionen von WLTC-Idle- und Start/Stop

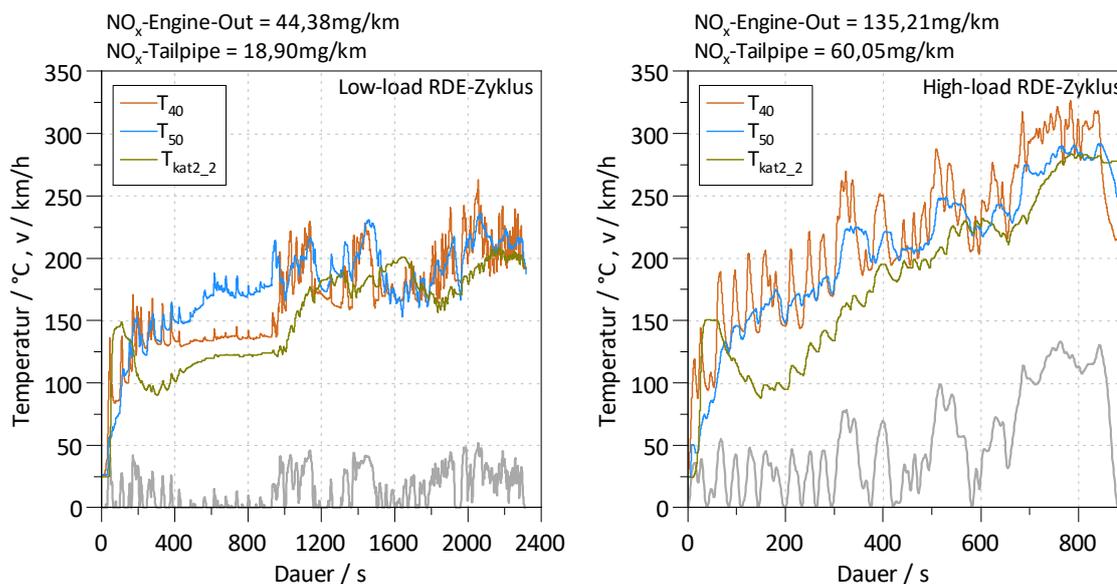


Abbildung 5.2: Temperaturen und NO_x -Emissionen im Low-load- und High-load RDE-Zyklus RDE-Zyklus

5.2 Strategiefindung und Auslegung der Heizungsregelung

In diesem Abschnitt sollen auf Simulationsbasis unterschiedliche Heizstrategien für die Untersuchung herangezogen und bewertet werden. Anhand dieser Voruntersuchung wird eine Heizstrategie ausgewählt und mittels Prüfstandmessungen bei unterschiedlichen Reglersystemen untersucht.

5.2.1 Analyse und Auswahl einer günstigen Heizstrategie

Ziel der Strategiefindung war es einerseits, den SCR-Light-Off-Punkt umgehend nach Motor-Kaltstart zu erreichen, diese Temperatur nach Möglichkeit aber nicht mehr zu unterschreiten und dabei ein unnötiges Aufheizen weit darüber zu vermeiden. Andererseits sollte eine Strategie mit möglichst geringer Heizenergie gefunden werden. Diese Anforderungen führten unweigerlich zu einem Zielkonflikt. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Arbeit unterschiedliche Heizstrategien mittels einer Voranalyse anhand des im 4. Kapitel erstellten Temperaturmodells analysiert und bewertet. Aufgrund der in Kapitel drei erwähnten hohen praktischen Relevanz, erfolgt die Strategieentwicklung beim WLTC-Idle. Da sowohl die Freigabe der Harnstoff-Eindosierung, als auch die NO_x -Konvertierungskennlinie der Simulation auf der Abgasatemperatur T_{50} vSCR

basiert, wird für einen Vergleich sämtlicher Ergebnisse in diesem Abschnitt von der Temperatur T_{50} ausgegangen. Die Strategiewahl erfolgte dabei unter Anlehnung an die Literatur von elektrischem Katalysatorheizen beim Dieselmotor [3, 96]. Nachfolgende Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über einige ausgewählte Strategien. Auf weitere untersuchte Strategien wird nicht näher eingegangen. In Abbildung 5.3 sind die Ergebnisse von Temperatur, NO_x -Konvertierung und EHC-Beheizung dargestellt. An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass aufgrund der beschriebenen Einschränkungen des NO_x -Konvertierungsmodells die Absolutwerte dieser Umsatzraten keinen direkten Vergleich von Simulations- und Messergebnissen erlauben. Eine grundsätzliche Tendenz kann aber abgeleitet und zur Strategieentwicklung herangezogen werden.

Tabelle 5.1: Auswahl einiger Heizstrategien

Strategie	Beschreibung
1	Immer, wenn $T_{50} \leq 250^\circ\text{C}$
2	Für die ersten 500 Sekunden im Zyklus nach Motorstart
3	Bei Motorstillstand oder im Leerlauf
4	Immer im Schleppebetrieb
5	Ab $n_{\text{motor}} \geq 850 \text{ min}^{-1}$
6	Ab $n_{\text{motor}} \geq 850 \text{ min}^{-1}$ und $T_{50} \leq 230^\circ\text{C}$

Strategie-1 führt zu einem hohen Temperaturniveau bereits kurz nach Motorstart, allerdings ist dabei ein beträchtlicher Energiebedarf von 410 Wh aufzubringen. Die Konvertierungsrate ist in Anbetracht dessen nicht zufriedenstellend, weshalb diese Heizstrategie nicht weiterverfolgt wird. Wie sich im weiteren Verlauf der Strategieanalyse gezeigt hat, liegt der hohe Energiebedarf mit großer Wahrscheinlichkeit an der ungünstigen Beheizung bei Fahrzeugstillstand. Mehr dazu später.

Strategie-2 wurde zur Untersuchung mit Fokus auf die unmittelbare Kaltstartphase entwickelt. Im restlichen Zyklusverlauf wird keine Beheizung mehr vorgenommen. Dementsprechend ist zwar ein umgehender SCR-Light-Off realisierbar, danach sinkt die Temperatur im Abgassystem aber wieder rasch auf das Niveau ohne EHC-Heizung ab. Die eingesetzte Energiemenge von 407 Wh führt insgesamt zu keinem zufriedenstellenden Abgastemperaturniveau, was sich auch an der NO_x -Konvertierung niederschlägt.

Strategie-3 wurde unter dem Aspekt der Vorheizung des Abgassystems bei Fahrzeugstillstand untersucht. Außerdem sollte damit das in Strategie-2 beobachtete Auskühlen im betreffenden Betriebszustand unterbunden werden. Diese Strategie führte bei näherer Untersuchung aber zu keiner nachhaltigen Erwärmung des Abgassystems. Außerdem ist die Beheizung sehr stark vom Leerlaufanteil des Zyklus und damit auch vom Fahrverhalten abhängig, was in dieser Arbeit für die Konzeptuntersuchung vermieden

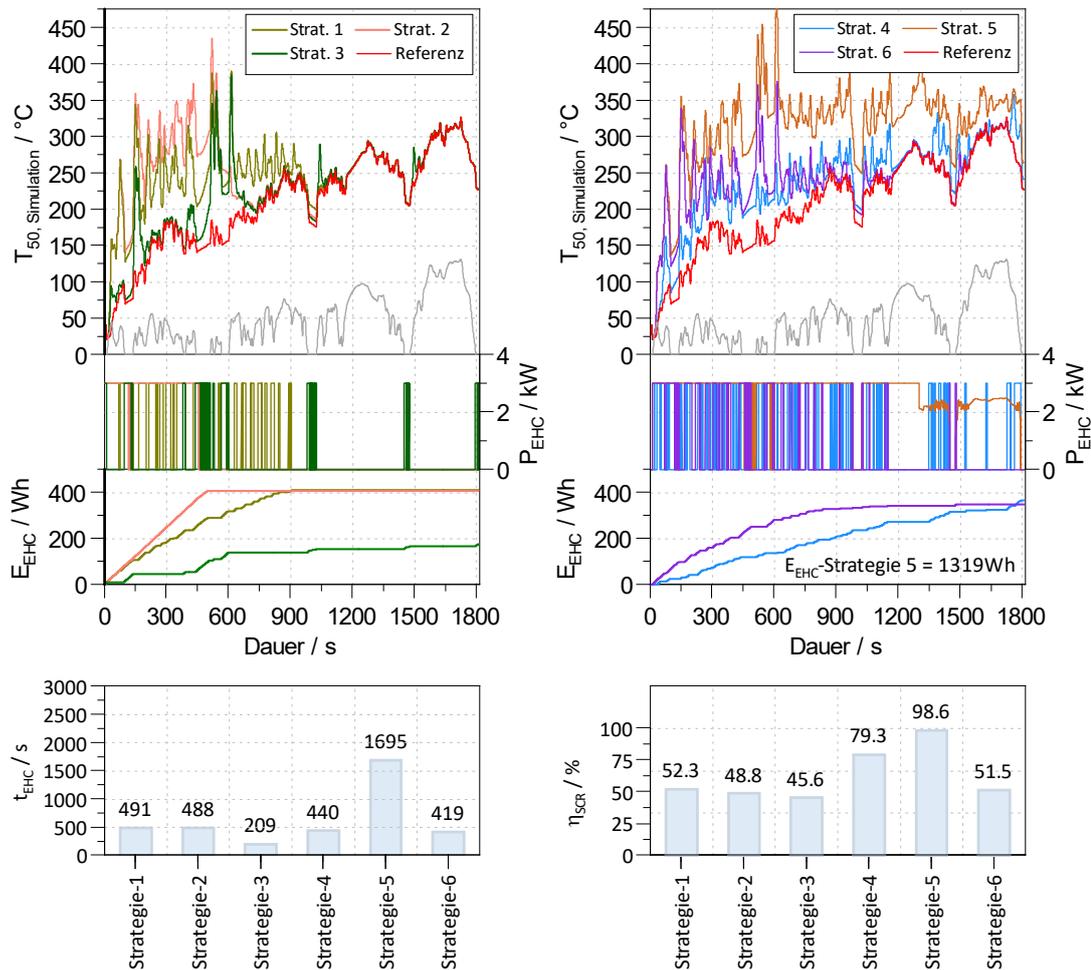


Abbildung 5.3: Abgastemperatur T_{50} , Heizenergie E_{EHC} , Heizdauer t_{EHC} und Heizleistung P_{EHC} bei der Simulation unterschiedlicher Heizstrategien am WLTC-Idle

werden sollte. Als problematisch zeigt sich im Stillstand der rasche Temperaturanstieg im EHC, weshalb die Beheizung aus Sicherheitsgründen mehrmals abubrechen ist. Wie sich bei späteren Untersuchungen am Motorprüfstand herausgestellt hat, kommt es im Fahrzeugstillstand sowohl bei abgestelltem Motor, als auch im Leerlauf, zu keinem ausreichenden Wärmetransport im Abgassystem. Ein großer Teil der zugeführten Heizwärme wird durch Wärmeaustausch in die Umgebung abgeführt, weshalb die Heizenergie nur sehr ineffizient genutzt werden kann. Dies erklärte die nicht zufriedenstellenden Ergebnisse dieser Strategie bei der Simulation.

Strategie-4 zeigt insgesamt ein günstiges Temperaturniveau, was bei akzeptablem Energiebedarf in einer hohen NO_x -Konvertierung resultiert. Der SCR-Light-Off tritt

zwar gegenüber anderen Strategien merklich später nach Kaltstart ein, dagegen stellt sich aber über den gesamten Zyklus ein durchgängig hohes Temperaturniveau ein. Bei dieser Strategie könnte ein großer Teil der Heizenergie direkt durch den Generator im Schleppbetrieb verbrauchsneutral aufgebracht werden. Speziell in Hybrid-Antriebssträngen könnte mittels Rekuperation ein hoher Teil der Heizenergie aufgebracht werden. Zur genaueren Untersuchung dieser Strategie wäre aber eine Gesamtfahrzeugbetrachtung notwendig, welche im Rahmen dieser Arbeit am Prüfstand nicht möglich war. Nachteilig sind außerdem der spätere Light-Off, sowie die starke Abhängigkeit vom Fahrzyklus und damit dem Fahrverhalten. Nach [96] zeigt sich diese Strategie beispielsweise beim NEDC mit wenigen Schubphasen als weniger vorteilhaft. Um eine günstige Strategie möglichst unabhängig vom eingesetzten Fahrzyklus zu entwickeln, wurde sie deshalb trotz der guten Ergebnisse im WLTC letztlich nicht weiterverfolgt. Bei einer gesamtheitlichen Betrachtung im Realverkehr, insbesondere im Fall von Hybridfahrzeugen, wäre sie aber unbedingt zu berücksichtigen und auszutesten.

Strategie-5 zeigt schematisch noch das Potential der Temperaturerhöhung im Abgas bei längerem Einsatz der elektrischen Katalysatorheizung. Aufgrund des hohen Energiebedarfs von 1319 Wh hat diese Strategie aber keine praktische Bedeutung.

Strategie-6 wurde basierend auf den Erkenntnissen bei den vorausgegangenen Untersuchungen entwickelt. Mithilfe einer günstigen Regelung soll damit eine gute Balance zwischen hoher NO_x -Konvertierung und geringem Heizenergiebedarf für ein breites Fahrspektrum realisiert werden. Auf die Reglerentwicklung und die Ermittlung der T_{50} -Heizschwelle wird in Sektion 5.2.2 eingegangen. Bei Betrachtung der Simulationsergebnisse zeigt sich, dass bei akzeptabler Heizenergie ein guter Mittelwert aus raschem Temperaturanstieg und durchgängig hohem Temperaturniveau gefunden werden konnte. Dies spiegelt sich auch an einer hohen NO_x -Konvertierungsrate wieder. Diese Strategie wurde im Rahmen der Simulation auch bei anderen Zyklen mit zufriedenstellendem Ergebnis getestet und wird nicht zuletzt aufgrund deren guter Regelbarkeit bei den Messungen am Motorprüfstand für weitere Untersuchungen herangezogen.

5.2.2 Reglerauswahl und Optimierung

Für die ausgewählte Heizstrategie werden im Zuge dieser Arbeit zwei Regelungsmethoden untersucht und bewertet. Im ersten Schritt erfolgte die Entwicklung einer einfacheren Ein/Aus-Regelung. Trotz der durchaus zufriedenstellenden Ergebnisse, wurde in weiterer Folge versucht, mit einer PID-Regelung eine Optimierung der Beheizung zu finden. Um ein hochfrequentes Ein- beziehungsweise Ausschalten zu verhindern, ist für beide Regelungssysteme eine definierte Wartedauer von einer Sekunde nach dem Ausschalten implementiert. Erst danach kann die Beheizung erneut aufgenommen wer-

den. Bevor auf die Reglerauslegung im Detail eingegangen wird, sind in Abbildung 5.4 schematisch noch Variationen von Heizenergie- und Heizleistung bei der einfacheren Ein/Aus-Strategie gezeigt. Die Beheizung erfolgt ab einer festgelegten Temperaturschwelle, nach dem Erreichen der maximalen Heizenergie wird sie gestoppt. Interessanterweise zeigt sich bei der niedrigsten Heizleistung aufgrund der längeren Heizdauer über dem gesamten Zyklus die günstigste Konvertierungsrate. Dafür wird der Light-Off aber etwas später erreicht. Dieser Zielkonflikt aus hoher NO_x -Konvertierung und raschem Light-Off verdeutlicht den großen Vorteil der bedarfsorientierten, variablen Einstellung der Heizleistung mithilfe der PID-Regelung. Bei Variation der Heizenergie ist, wie zu erwarten, ein stetiger Anstieg der Konvertierungsrate beobachtbar.

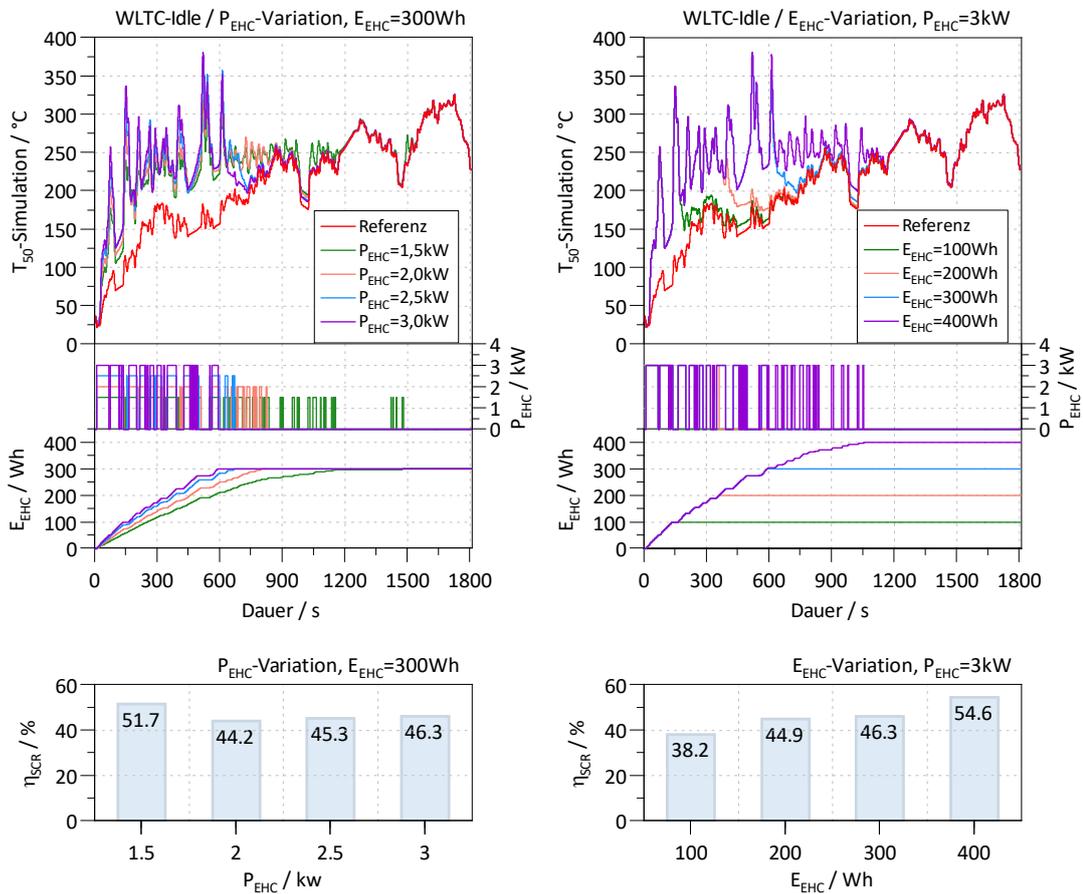


Abbildung 5.4: Variation von E_{EHC} und P_{EHC} bei der Simulation am WLTC-Idle

Ein/Aus-Regelung

Bei der einfacheren Ein/Aus-Regelung wird ein Temperaturschwellwert für die Abgas­temperatur T_{50} festgelegt und im Falle des Unterschreitens der Heizkatalysator mit der Maximalleistung von 3 kW betrieben. Danach wird die Beheizung vollständig gestoppt. Wie bereits beschrieben, soll mit dieser Regelung die Untersuchung eines raschen Anspringens der Katalysatoren erfolgen. Für eine unabhängigere Betrachtung wird auf die Begrenzung der Heizenergie verzichtet und diese durch die Anpassung der Temperaturschwelle eingestellt, was eine vom Fahrzyklus möglichst unabhängige Beheizung sicherstellen soll. Deren Auslegung geschah anhand einer Sensitivitätsanalyse zunächst bei der Simulation, bevor die günstigsten Varianten am Prüfstand nachgemessen wurden. Abbildung 5.5 verdeutlicht den Zielkonflikt zwischen hoher NO_x -Konvertierung und geringer Heizenergie bei Messungen der beiden WLTC-Varianten. Zur Reduktion des Messaufwandes erfolgte keine initiale NH_3 -Beladung, alle Zyklen wurden mit leerem Speicher gestartet. Die Harnstoffeindosierung erfolgte aber wie bei allen anderen Zyklen gemäß Beschreibung in Kapitel drei. Bei Betrachtung der Abbildung fällt auf, dass die Konvertierungsrate bei höherer Temperaturschwelle nur geringfügig steigt, bei der Heizenergie aber ein überproportionaler Anstieg verzeichnet wird. Unter Anbe­tracht von parallel dazu ausgeführten Energiespeichersimulationen wurde deshalb die Heizschwelle bei 230°C festgelegt und für die Vermessungen appliziert.

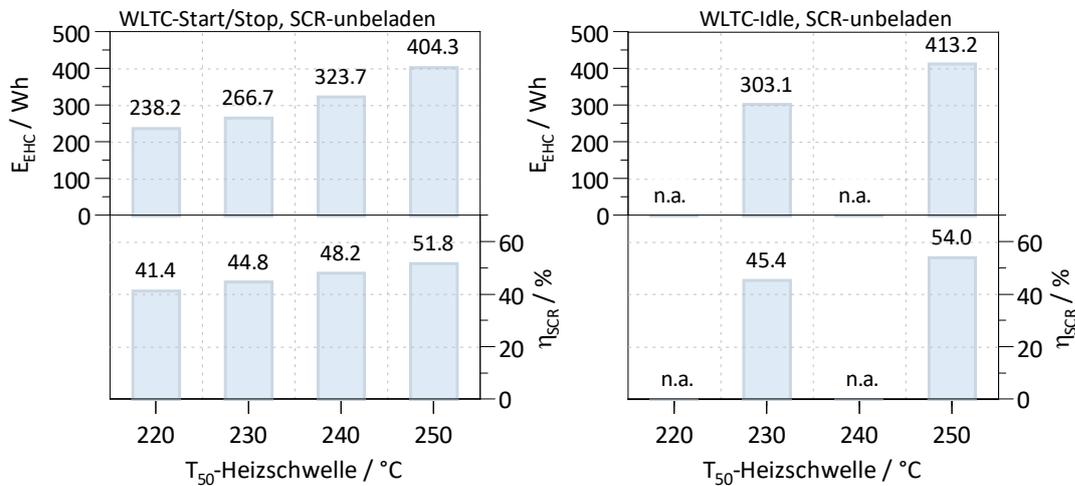


Abbildung 5.5: Vergleich von SCR-Konvertierungsrate η_{SCR} und Heizenergie E_{EHC} mit 3kW-Heizleistung beim unbeladenen WLTC-Idle- und WLTC-Start/Stop bei Messungen

PID-Regelung

Bei der Ein/Aus-Regelung wird zwar der SCR-Light-Off rasch erreicht, die kurzzeitige Beheizung mit hoher Leistung führt nachteilig aber aufgrund der hohen thermischen Trägheit des Abgassystems zu ausgeprägten Temperaturschwankungen. Die PID-Regelung soll dies verhindern und durch Variation der Heizleistung die Temperaturen von Substrat und Abgas rasch und dauerhaft über dem SCR-Light-Off halten. Gegenüber der Ein/Aus-Regelung wird versucht, bei möglichst gleichem Energiebedarf die NO_x -Emissionen zu senken. Eine umgekehrte Priorisierung wäre ebenfalls denkbar, wurde aber nicht analysiert. Der Sollwert der einzuregelnden Abgastemperatur T_{50} wurde in einer Sensitivitätsanalyse am WLTC-Idle mit 240°C festgelegt, was zu einem sehr ähnlichen Energiebedarf gegenüber der Ein/Aus-Regelung führte. Die Heizleistung kann aufgrund technischer Gegebenheiten am Prüfstand zwischen 0,55 und 3 kW vom Regler vorgegeben werden. Unterhalb dieses Fensters ist keine Regelung möglich, weshalb der EHC deaktiviert und eine Beheizung erst bei erneutem Überschreiten des unteren Grenzwertes vorgenommen werden kann. Aufgrund der hohen thermischen Trägheit des Abgassystems konnte mittels Simulation keine zufriedenstellende Reglerabstimmung vorgenommen werden, weshalb dafür auf Temperatursprünge am Motorprüfstand zurückgegriffen wurde.

5.3 Auswirkung der elektrischen Katalysatorheizung auf Temperaturverhalten und Emissionsausstoß

In diesem Abschnitt soll der Einfluss der elektrischen Katalysatorheizung anhand von Messergebnissen am transienten Motorprüfstand, unter Anwendung der beiden Regelstrategien, bei den vorgestellten Fahrzyklen gezeigt werden. Dazu wird zuerst eine Analyse der Abhängigkeit von Abgastemperaturverhalten und NO_x -Konvertierung vorgenommen. Für einen Vergleich sind die Heizenergien mit angeführt. Deren detaillierte Auswertung erfolgt später. Zum Abschluss dieser Sektion wird der Einfluss der elektrischen Katalysatorheizung auf weitere Emissionsspezies diskutiert.

5.3.1 Analyse von Temperaturverhalten und NO_x -Konvertierung am transienten Motorprüfstand

Im zweiten und dritten Kapitel wurde die Temperaturabhängigkeit der NO_x -Konvertierung im SCR-Katalysator detailliert erläutert. In diesem Abschnitt soll die Anhebung des Temperaturniveaus im Abgassystem als Folge der elektrischen Katalysatorheizung den Referenzmessungen der Fahrzyklen gegenübergestellt und bewertet werden.

WLTC-Idle

Beim WLTC-Idle wird, wie bereits erläutert, in der ersten Zyklusphase der Motor bei Fahrzeugstillstand nicht abgestellt. In dieser Phase ist also ebenfalls ein EHC-Betrieb möglich. Abbildung 5.6 und Tabelle 5.2 zeigen die wichtigsten Messgrößen. Auf eine Analyse von weiteren Emissionen und der Heizenergie wird später eingegangen.

Gegenüber der Referenzmessung steigt die Abgastemperatur T_{50} zu Beginn rasch an, im letzten Drittel nähert sie sich aber aufgrund geringer Anzahl an Heizeingriffen dem ohnehin hohen Temperaturniveau ohne elektrischer Katalysatorheizung wieder an. Bei der PID-Regelung konnte zwar eine deutliche Reduktion der Überschwingungen erzielt werden, aufgrund der hohen thermischen Trägheit lassen sich diese aber nicht gänzlich vermeiden. Noch deutlicher zeigt sich der Temperaturanstieg von T_{Kat2-2} im inneren des Katalysators. Nach der bereits beschriebenen Erwärmung durch die exotherme H_2O -Adsorption, kann mit der elektrischen Katalysatorheizung rasch und nachhaltig das Temperaturniveau in einen günstigeren Bereich verschoben werden. Dies zeigt

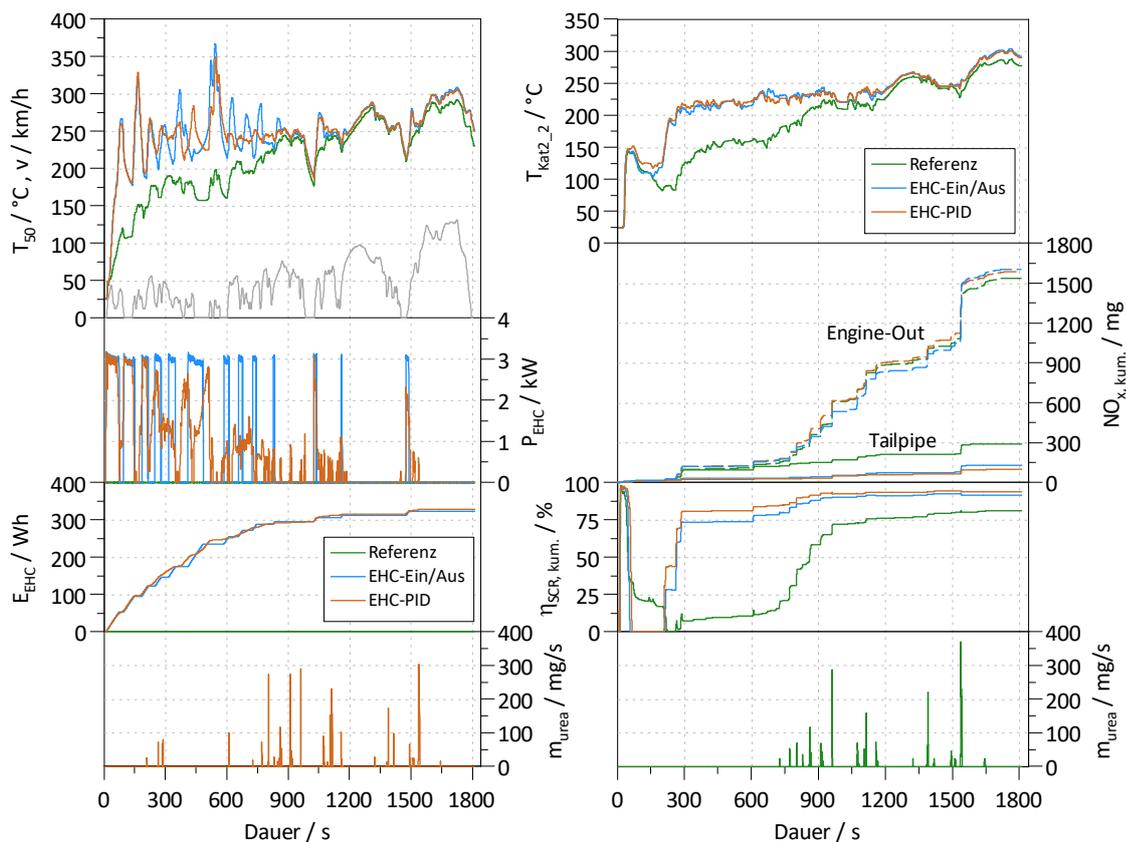


Abbildung 5.6: Vergleich von Messergebnissen beim WLTC-Idle

Tabelle 5.2: Übersicht der Messergebnisse beim WLTC-Idle

WLTC-Idle Beschreibung	$\text{NO}_{x,\text{Engine-Out}}$ mg/km	$\text{NO}_{x,\text{Tailpipe}}$ mg/km	$\eta_{\text{SCR,kum.}}$ %	E_{EHC} Wh	t_{EHC} s
Referenz	66,15	12,39	81,27	-	-
EHC-Ein/Aus	68,97	5,68	91,76	321,9	387,6
EHC-PID	68,18	4,26	93,75	327,4	779,1

sich in sehr deutlicher Form an den dargestellten Verläufen der kumulierten $\text{NO}_{x,\text{kum.}}$ -Emissionen und deren Konvertierung $\eta_{\text{SCR,kum.}}$. Die Rohemissionen sind dabei natürlichen Schwankungen am Motorprüfstand unterworfen, die Abweichung liegt aber unterhalb von zehn Prozent und wird deswegen akzeptiert. Selbiges gilt auch für die anderen Zyklen. Insgesamt können mit der PID-Regelung die höchsten Umsatzraten erzielt werden. Das Konvertierungsverhalten in den ersten 200 Sekunden wird dabei für alle Kurven durch die bereits beschriebene Kalteinspeicherung charakterisiert, worauf aber an dieser Stelle nicht mehr näher eingegangen wird. Speziell in den ersten 300-900 Sekunden zeigt die PID-Regelung eine höhere NO_x -Konvertierung. Danach gleichen sich die Kurven zwischen den beiden Regelstrategien aufgrund des durchgängig hohen Temperaturniveaus wieder an.

Die Heizenergie der beiden Regelungsarten ist sehr ähnlich, dazu zeigt sich bei der PID-Regelung ein deutlich geringerer Heizanteil mit der Maximalleistung, was hinsichtlich der Bordnetzbelastung als großer Vorteil zu werten ist. Die Heizdauer t_{EHC} ist dagegen signifikant länger. Ein im Hinblick auf die Praxis wesentlicher Vorteil ist die früher mögliche Harnstoffeindosierung, wodurch rasch nach Motorstart ein hoher NH_3 -Speicherstand im SCR-Katalysator realisierbar ist. Bei Vergleich der Einspritzung \dot{m}_{urea} in den beiden unteren Diagrammen ist eindeutig ersichtlich, dass die elektrische Katalysatorheizung eine frühere und häufigere Eindosierung erlaubt. Demzufolge kann bei beiden Regelungsarten erstmalig nach 210 Sekunden eine Eindosierung verzeichnet werden, was gegenüber der Referenzmessung einer Vorverlegung um 517 Sekunden entspricht.

WLTC-Start/Stop

Um den Einfluss der elektrischen Katalysatorheizung beim gefeuerten Leerlauf besser bewerten zu können, erfolgte dazu als Vergleich die Vermessung an einem WLTC mit durchgängigem Start/Stop-Betrieb im Fahrzeugstillstand. Abbildung 5.7 und Tabelle 5.3 zeigen die Messergebnisse.

Bei Betrachtung der Abgastemperatur T_{50} zeigt sich bei beiden Regelungsarten gegenüber dem WLTC-Idle ein deutlicher Temperatureinbruch in den Stillstandszeiten

5.3 Auswirkung der elektrischen Katalysatorheizung auf Temperaturverhalten und Emissionsausstoß

Tabelle 5.3: Übersicht der Messergebnisse beim WLTC-Start/Stop

WLTC-Start/Stop Beschreibung	NO _{x,Engine-Out} mg/km	NO _{x,Tailpipe} mg/km	η _{SCR,kum.} %	E _{EHC} Wh	t _{EHC} s
Referenz	68,41	12,44	81,84	-	-
EHC-Ein/Aus	62,98	6,22	90,12	297,7	355,0
EHC-PID	59,17	4,16	92,70	323,3	743,0

der ersten 600 Sekunden. Dieses Verhalten legt nahe, dass trotz einer vorausgegangenen elektrischen Katalysatorheizung beim Abstellen des Motors ein Auskühlen des Abgassystems auf ein ähnliches Niveau wie bei der Referenzmessung eintritt. Bei der Katalysatortemperatur $T_{\text{kat}2_2}$ kann hingegen kein wesentlicher Unterschied beobachtet werden. Daraus ist die Vermutung ableitbar, dass ein elektrisches Katalysatorheizen im Leerlauf zu keinem wesentlichen Temperaturanstieg führt, sondern der Betrieb im

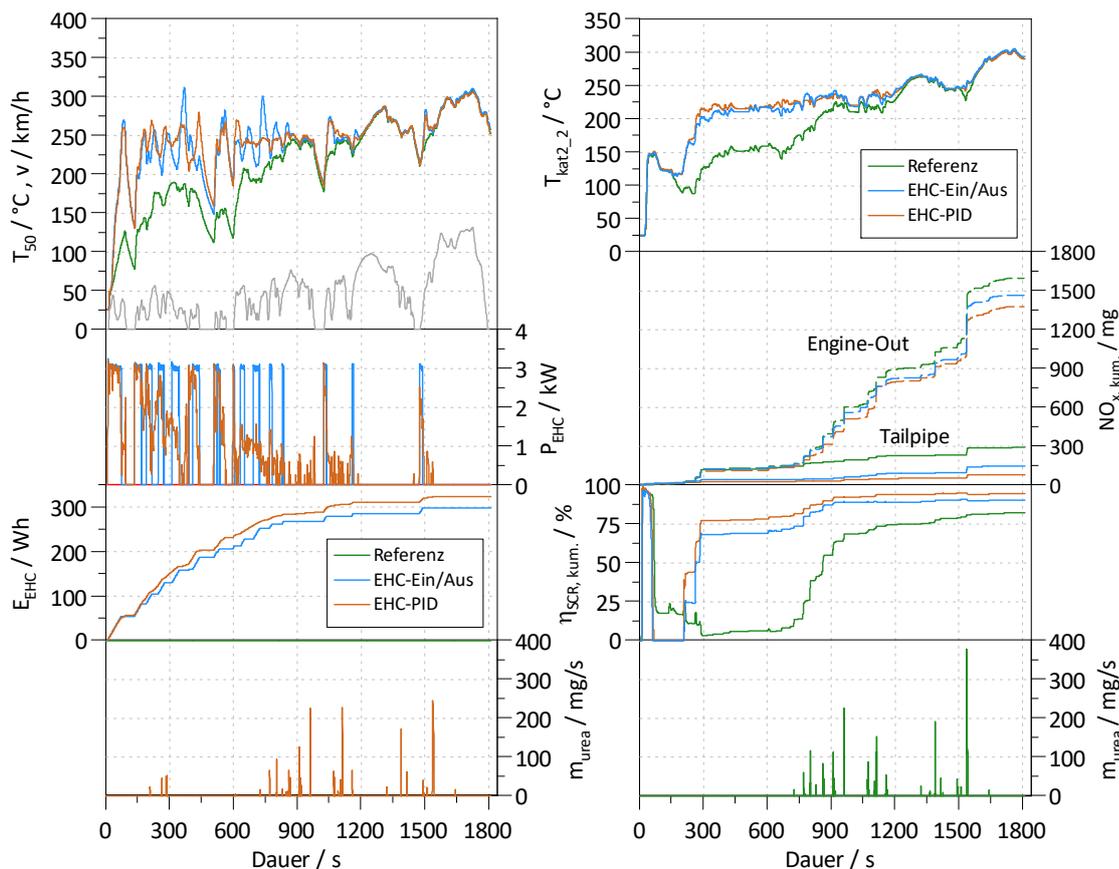


Abbildung 5.7: Vergleich von Messergebnissen beim WLTC-Start/Stop

Leerlauf ohne EHC die insgesamt günstigste Variante darstellen könnte. Dies wurde in einem weiteren Versuch getestet, mehr dazu aber später. Auch beim WLTC-Start/Stop mit PID-Regelung zeigt sich ein stabileres Temperaturniveau im Abgassystem, wenngleich die Schwankungen speziell durch das Abstellen des Motors nicht vollständig unterdrückbar sind. Insgesamt führt die Beheizung beim WLTC-Start/Stop zu einem grundsätzlich ähnlichen, wenngleich etwas geringeren Energiebedarf. Die NO_x -Engine-Out-Emissionen schwanken zwar zwischen den Ergebnissen, eine Toleranz von 10 % um den Mittelwert von 64,77 mg/km sämtlicher Messungen konnte aber eingehalten werden. Deren Konvertierung kann beim Start-Stop-Betrieb bereits in den ersten 300 Sekunden im Zyklus auf ein Niveau von über 50 % gehoben werden. Bei der Referenzmessung geschieht dies erst nach etwa 850-900 Sekunden. Insgesamt wurde zwar beim WLTC-Idle eine minimal höhere NO_x -Konvertierungsrate erzielt, jedoch sind die Tailpipe-Emissionen von unter 7 mg/km als sehr positiv zu bewerten. Die Harnstoffeindosierung erfolgt auch beim Motor-Start/Stop-Betrieb häufiger und kann um rund 400 Sekunden früher im Vergleich zur Referenz eingeleitet werden.

Low-load RDE-Zyklus

Beim Low-load RDE-Zyklus wurde im Rahmen dieser Arbeit der Einfluss der elektrischen Katalysatorheizung im Stadtfahrbetrieb untersucht. In Tabelle 5.4 und Abbildung 5.8 sind die Messergebnisse dargestellt. Bei den Untersuchungen der PID-Strategie kam es Motorregelungstechnisch zu einem ungünstigen Drehmomentverlauf, weshalb die NO_x -Emissionen zu niedrig sind. Zwar können die Absolutwerte dieser PID-Messung nicht bewertet werden, für einen quantitativen Vergleich sind die Messergebnisse aber trotzdem enthalten.

Durch die zyklusbedingt häufig auftretenden Fahrzeugstillstände, kann bei der Abgastemperatur T_{50} eine stark instationäres Verhalten beobachtet werden. Auch mit PID-Regelung ist nur eine geringfügige Verbesserung möglich. Trotz dieser Schwankungen zeigt sich als Resultat der elektrischen Katalysatorheizung im SCR-Katalysator aber von Beginn an ein deutlich höheres Temperaturniveau. Dies führt für beide Reglerarten bereits innerhalb der ersten 600 Sekunden zu einem erstmaligen SCR-Light-Off. Eine Bestimmung des genauen Zeitpunktes ist aufgrund der niedrigen NO_x -Emissionen in diesem Bereich nicht möglich. Im Vergleich dazu, kann dieser bei der Referenzmessung

Tabelle 5.4: Übersicht der Messergebnisse beim Low-load RDE-Zyklus

Low-load RDE-Zyklus Beschreibung	$\text{NO}_{x,\text{Engine-Out}}$ mg/km	$\text{NO}_{x,\text{Tailpipe}}$ mg/km	$\eta_{\text{SCR,kum.}}$ %	E_{EHC} Wh	t_{EHC} s
Referenz	44,38	18,9	57,41	-	-
EHC-Ein/Aus	42,75	8,63	79,81	574	695,4

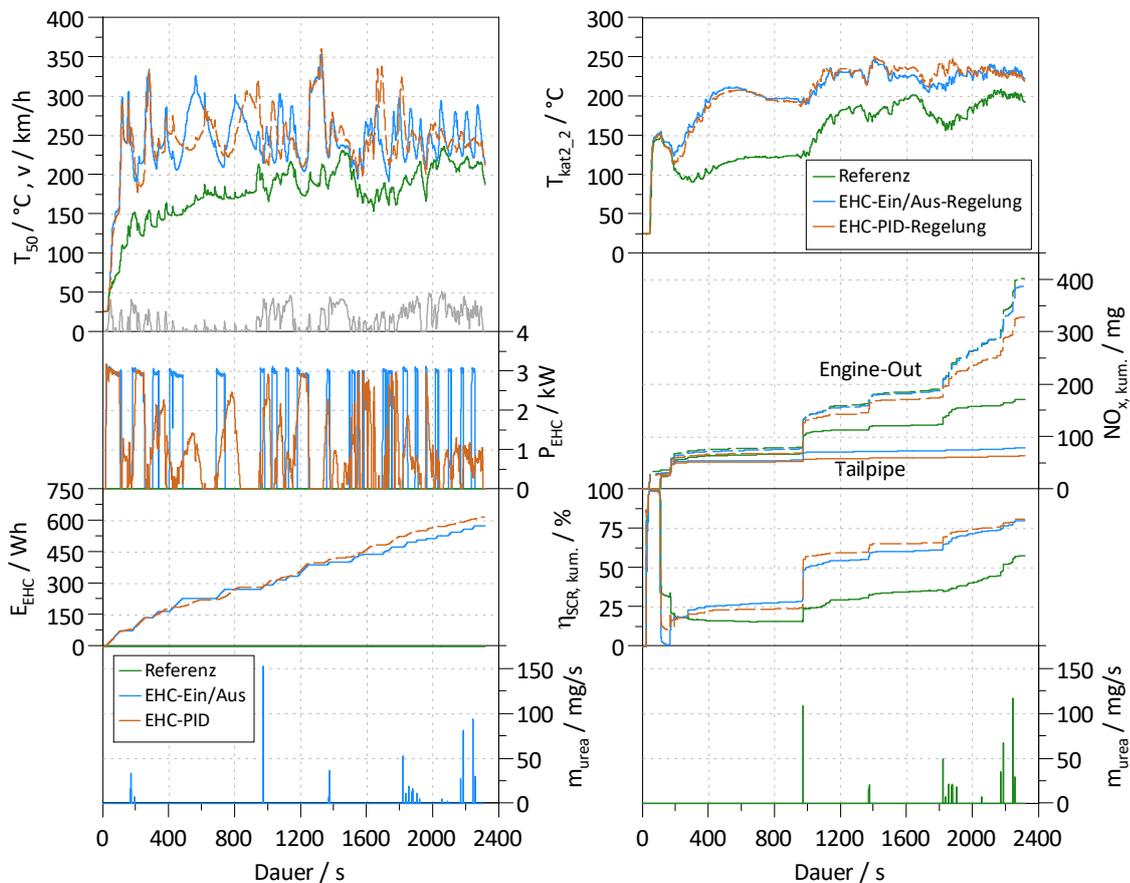


Abbildung 5.8: Vergleich von Messergebnissen beim Low-load RDE-Zyklus

erst gegen Ende des Zyklus festgestellt werden. Insgesamt ist die Konvertierungsrate im Stadtbetrieb mit etwa 80 % als verhältnismäßig gering einzustufen. Dies liegt vor allem an der geringen geforderten Antriebsleistung, was zu einer niedrigen Abgasenergie führt und das Abgassystem damit nur unzureichend erwärmt. Daraus resultiert der hohe Heizenergiebedarf von 574 Wh. Im Vergleich zum WLTC bedeutet dies bei einer gleichwertigen Zyklusdauer eine Verdopplung der Heizenergie. Dagegen liegt die Konvertierungsrate um 10 % darunter.

Ein weiteres Problem der geringen geforderten Antriebsleistung sind die selten auftretenden NO_x -Ausstöße von über 4,153 mg/s. Diese wären, wie in Kapitel drei beschrieben, für die Freigabe der Harnstoffeindosierung aber notwendig, weshalb es im Zyklusverlauf trotz dem raschen Erreichen der Freigabeschwelle von $T_{50} = 180^\circ C$ nur zu sehr wenigen Eindosierungen kommt. An dieser Stelle könnte im Realfahrzeug ein NH_3 -Speichermodell die Harnstoffeindosierung steigern und für eine günstigere NO_x -Konvertierung bei niedrigem NH_3 -Schlupf sorgen. Unter Anbetracht der geringen NO_x -

Konvertierung kann abschließend gesagt werden, dass speziell im Stadtbetrieb ein Sekundärluftsystem die EHC-Beheizung unterstützen und die Konvertierungsrate steigern könnte. Außerdem würde damit eine effizientere Nutzung der Heizenergie einhergehen. Alternativ könnte auch hier im Leerlauf die Deaktivierung der Beheizung implementiert werden, was aber im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr vorgenommen wurde.

High-load RDE-Zyklus

Beim High-load RDE-Zyklus sollte das elektrische Katalysatorheizen als Thermomanagement -Maßnahme speziell zur Vermeidung der Auskühlung des Abgassystems bei häufigen Schubphasen nach Beschleunigungen untersucht werden. Abbildung 5.9 und Tabelle 5.5 zeigen die Ergebnisse.

Wie in der Abbildung ersichtlich, ist die Abgastemperatur T_{50} durch dieses Betriebsverhalten starken Schwankungen unterworfen. Dagegen zeigt sich ein kontinuierlicher

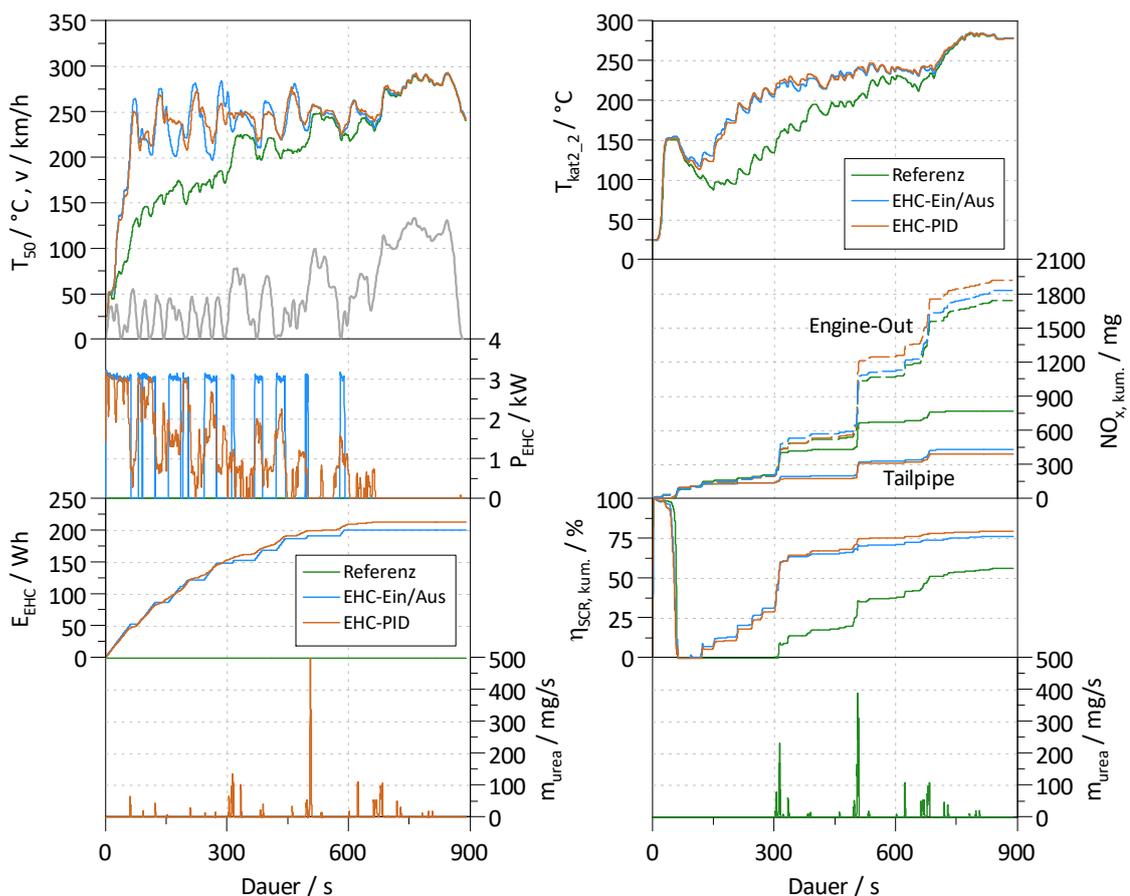


Abbildung 5.9: Vergleich von Messergebnissen beim High-load RDE-Zyklus

Tabelle 5.5: Übersicht der Messergebnisse beim High-load RDE-Zyklus

High-load RDE-Zyklus Beschreibung	NO _{x,Engine-Out} mg/km	NO _{x,Tailpipe} mg/km	$\eta_{SCR,kum.}$ %	E _{EHC} Wh	t _{EHC} s
Referenz	135,21	59,55	55,96	-	-
EHC-Ein/Aus	140,54	36,31	74,14	200,9	238,0
EHC-PID	148,96	30,59	79,46	213,5	510,8

Anstieg der SCR-Temperatur T_{Kat2_2} auf ein Niveau von 200-250 °C nach etwa 280 Sekunden. Trotz wiederholter Schubphasen kann dieses auch im weiteren Zyklusverlauf gehalten werden. Daraus lässt sich ableiten, dass die elektrische Katalysatorheizung sehr gut in der Lage ist, bei sportlicher Fahrweise ein zu starkes Auskühlen zu unterbinden. Trotz dem raschen SCR-Light-Off innerhalb der ersten 300 Sekunden, kommt es zu einem deutlichen NO_x-Ausstoß, was an den starken Beschleunigungsvorgängen in diesem Zyklus unmittelbar nach Motorstart liegt. Mehr als die Hälfte der kumulierten NO_x-Tailpipe-Emissionen entstehen im High-load RDE-Zyklus in dieser Phase. Eine Ursache für diese erheblichen Emissionen könnte dabei das geringe SCR-Katalysatorvolumen sein. Daraus resultieren bei den hohen Abgasmassenströmen entsprechend hohe Raumeschwindigkeiten im Katalysator, was zu einer schlechten NO_x-Konvertierungsrate führt und den Emissionsausstoß erhöht [74]. Insgesamt kann die NO_x-Konvertierung aber nach Tabelle 5.5 bei beiden EHC-Regelungsstrategien deutlich gesteigert werden. Der Light-Off wird dabei gegenüber der Referenzmessung um rund 150 Sekunden früher erreicht. Die erstmalige Harnstoffeindosierung tritt bereits nach 60- und damit um 242 Sekunden früher ein. Wie in den beiden unteren Diagrammen abgelesen werden kann, erfolgt sie bei der elektrischen Katalysatorheizung auch häufiger.

5.3.2 Analyse weiterer Emissionen

Neben den NO_x-Emissionen liegen noch eine Reihe weiterer Spezies in messbaren Konzentrationen vor. In Abbildung 5.10 sind sämtliche Schadstoffkomponenten der untersuchten Zyklen mit und ohne elektrischer Katalysatorheizung dargestellt.

Die NO_x-Konvertierung ist dabei am deutlichsten ersichtlich, darauf wurde bereits eingegangen. An dieser Stelle erwähnt sei, dass für jene Spezies mit dem Verweis „n.a.“ keine Messdaten vorliegen. Beim Low-load RDE-Zyklus werden aus genannten Gründen die Werte mit EHC-Beheizung bei der Ein/Aus-Strategie präsentiert. Wie zu erwarten, kann im SCR- und ASC-Katalysator zufolge den im 2.Kapitel erläuterten Mechanismen eine Bildung von N₂O beobachtet werden. Mit maximal 5,3 mg/km beim High-load

5 Diskussion der Ergebnisse

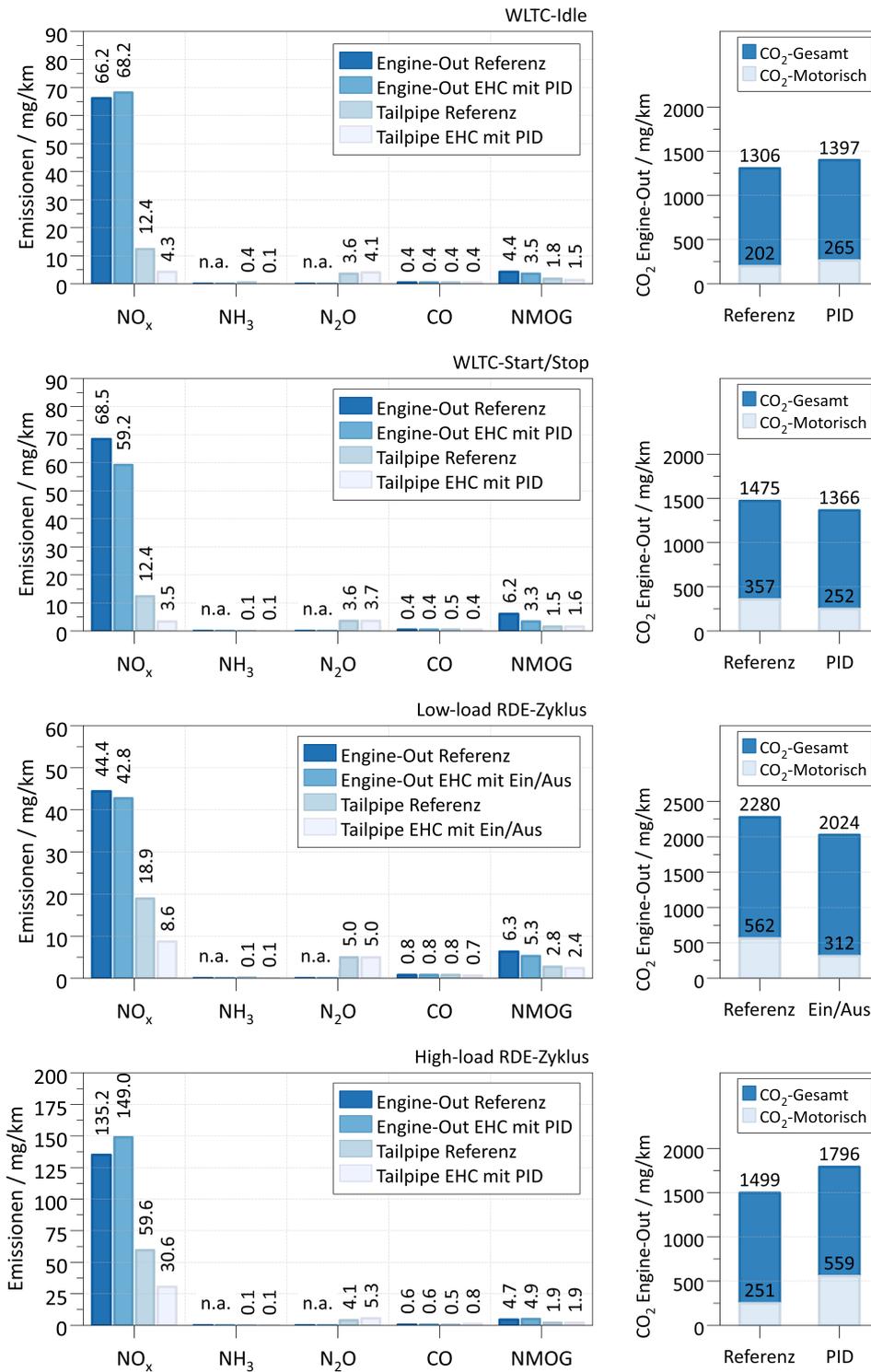


Abbildung 5.10: Einfluss der elektrischen Katalysatorheizung auf das Emissionsverhalten

RDE-Zyklus sind diese Emissionen aber, wie der NH_3 -Schlupf im ASC-Katalysator, sehr gering und als nicht problematisch einzustufen. Die EHC-indizierte höhere SCR-Aktivität hat dabei keinen wesentlichen Einfluss auf die Bildung dieser beiden Spezies. Ein Anstieg ist lediglich im Bereich der Messauflösung nachweisbar. Die CO- und HC-Rohemissionen sind ebenfalls als sehr gering einzustufen. Beide Spezies werden mit und ohne Beheizung im Oxidationskatalysator des EHCs oxidiert, eine Aussage über deren Einfluss ist auch hier aufgrund der bereits sehr niedrigen Werte nicht eindeutig möglich. Die CO_2 -Emissionen unterliegen einigen Schwankungen, was auf die unkontrollierte Verbrennung des Schmieröls und die Konzentrationsschwankungen der angesaugten Umgebungsluft zurückzuführen ist. Die dargestellten CO_2 -Ergebnisse zeigen die Engine-Out-Gesamtemissionen, welche den innermotorisch-gebildeten gegenübergestellt sind. Dies verdeutlicht den hohen Anteil an Umgebungsemissionen, bei der Verbrennung entsteht nur ein geringer Teil. Die Tailpipe- CO_2 -Emissionen stehen aus messtechnischen Gründen leider nicht zur Verfügung. Aufgrund der geringen Mengen an oxidiertem CO und HC dürften diese aber nur marginal darüber liegen. Die Partikelemissionen wurden im Rahmen dieser Arbeit aus genannten Gründen nicht untersucht.

Abschließend zur Untersuchung der Abgasemissionen ist in nachfolgender Tabelle 5.6 ein Vergleich der erzielten Werte und dem strengeren EURO-7 Szenario aus [9] dargestellt. Bei Betrachtung dieser Ergebnisse zeigt sich, dass die Emissionsgrenzwerte mit Ausnahme des NO_x -Ausstoßes beim High-load RDE sehr gut eingehalten werden können. Eine mögliche Lösung, um auch für diesen Zyklus den NO_x -Grenzwert zu erfüllen, wäre beispielsweise eine modellgestützte Harnstoffeindosierung, oder eine Erhöhung des SCR-Katalysatorvolumens. Insgesamt konnte im Rahmen dieser Arbeit aber das hohe Potential der elektrischen Katalysatorheizung zur Emissionsreduktion an der Wasserstoff-VKM eindeutig gezeigt werden.

Tabelle 5.6: Vergleich der Tailpipe-Emissionen mit möglichen EURO-7 Grenzwerten [9]

Zyklus	CO mg/km	NMOG mg/km	NO_x mg/km	NH_3 mg/km	N_2O mg/km
EURO-7	400	25	20	10	10
WLTC-Idle	0,4	1,5	4,3	0,1	4,1
WLTC-Start/Stop	0,4	1,6	3,5	0,1	3,7
Low-load RDE	0,7	2,4	8,6	0,1	5,0
High-load RDE	0,8	1,9	30,6	0,1	5,3

5.4 Energiemanagement und Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch

Die elektrische Katalysatorheizung zeigt, wie andere Maßnahmen des aktiven Thermomanagements auch, einen negativen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. Da im Rahmen dieser Arbeit am Motorprüfstand sämtliche Nebenverbraucher abgebaut sind, ist bei den Messungen keine gesamtheitliche Betrachtung möglich. Für eine konzeptionelle Untersuchung wird aus diesem Grund aber auf das Matlab-gestützte Energiespeichermodell aus Kapitel vier zurückgegriffen. In diesem Kapitel soll zuerst die Bordnetz- und Energiespeicherbelastung analysiert werden, danach erfolgt die Auswertung des Mehrverbrauchs. Zuletzt wird noch eine Untersuchung gezeigt, wodurch der Einfluss des zusätzlichen Drehmoments auf den Motorbetrieb abgebildet werden soll.

5.4.1 Analyse des Energiespeichersystems

Zur Batterieanalyse wird das Energiespeichermodell aus Kapitel vier mit den Messdaten parametrisiert und ausgewertet. In nachfolgender Abbildung 5.11 sind die wichtigsten Kennzahlen dieser Analyse dargestellt. Als SoC-Startwert wurde für alle Untersuchungen von 50 % ausgegangen. Die Batterietemperatur ist für die nachfolgenden Vergleiche ebenfalls auf 23 °C festgelegt. Für die Untersuchungen des Energiespeichersystems sind die Nebenverbraucher gemäß den drei Betriebsphasen aktiviert. Da die Energiespeicheranalyse nicht im Fokus dieser Arbeit stand, wird an dieser Stelle nur die gleichermaßen günstigere, wie Praxis-relevantere PID-Regelung erläutert. Beim Low-load RDE-Zyklus kann aus genannten Gründen nur das Verhalten bei der Ein/Aus-Regelung gezeigt werden. Insgesamt ist die Bordnetzbelastung bei der Ein/Aus-Regelung aufgrund der höheren EHC-Leistungen zwar etwas höher, der Betrieb ist aber dennoch in gleichem Maße möglich.

Die oberen beiden Verläufe der jeweiligen Diagramme aus Abbildung 5.11 zeigen die Leistungen von Batterie- und Generator. Deren Berechnung wurde in Kapitel vier bereits beschrieben. Ein negatives Vorzeichen bei der Batterie bedeutet deren Laden. Darunter sind die am Prüfstand gemessene Heizleistung, sowie die simulierte Nebenverbraucherleistung abgebildet. Wie in den Diagrammen ersichtlich, führt die Kombination aus hoher Nebenverbraucherleistung in der beschriebenen Warmlaufphase und elektrischer Katalysatorheizung zu einem Leistungsbedarf, der vom Bordnetz nicht vollständig abgedeckt werden kann. In diesen Phasen ist die in Kapitel vier beschriebene Drosselung um die Leistung $P_{\text{Differenz}}$ der Nebenverbraucher anzuwenden. Da dieses Problem insbesondere im Motor-Leerlauf aufgrund der geringen Generator Drehzahl auftritt, könnte alternativ zur Verbraucher drosselung auch eine Erhöhung der Leerlaufdrehzahl erfolgen, was eine höhere Generatorleistung zur Folge hätte. Insgesamt zeigt sich aber, dass mit Ausnahme des Low-load RDE-Zyklus ein SoC-neutraler Betrieb möglich ist.

5.4 Energiemanagement und Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch

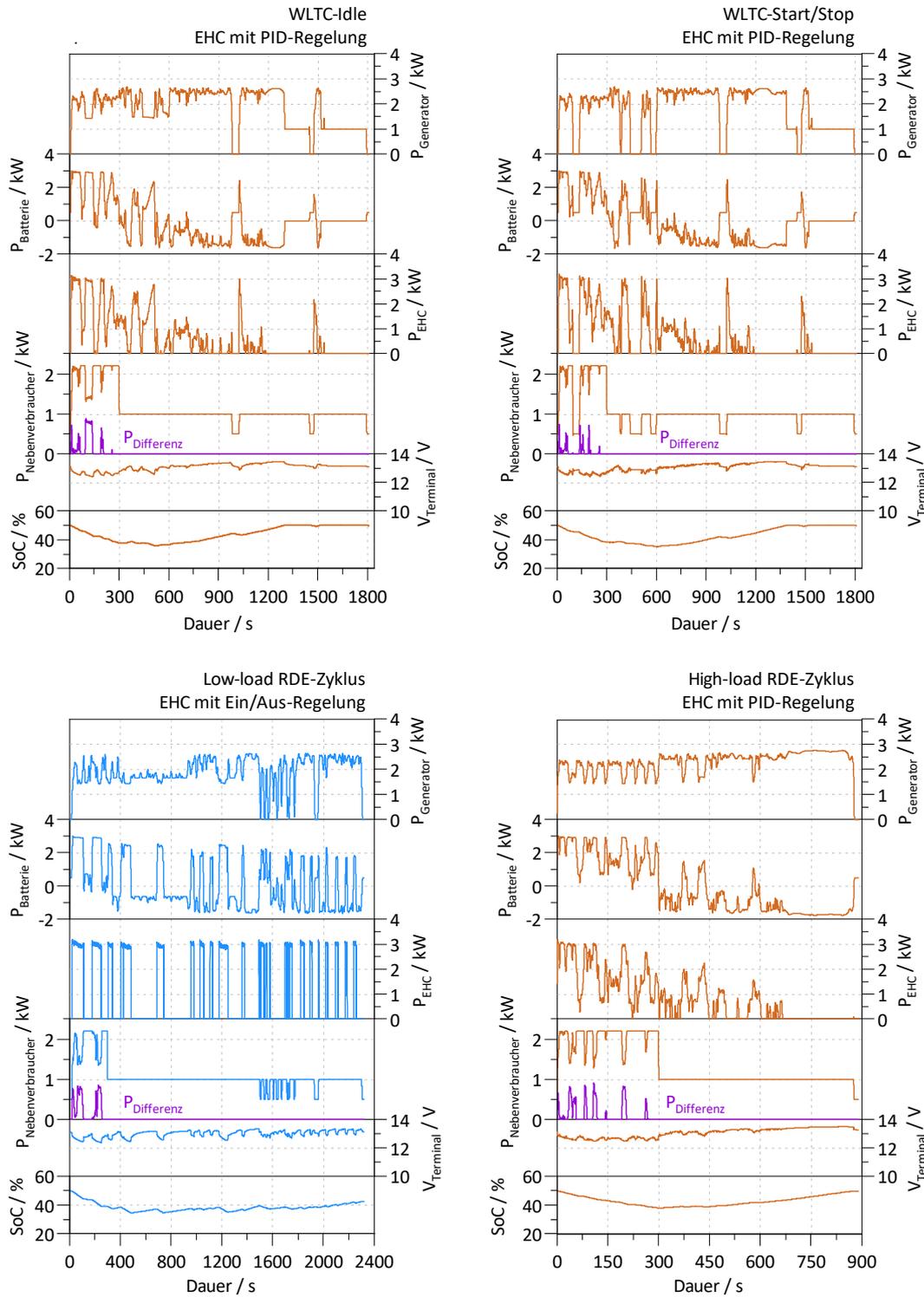


Abbildung 5.11: Auswertung des modellierten Energiespeichersystems

Die Klemmspannung V_{Terminal} entspricht der momentanen Batteriespannung und ist gemäß den Erläuterungen in Kapitel vier nicht mit der Bordnetzspannung zu verwechseln. Gemeinsam mit dem SoC können damit wichtige Rückschlüsse auf funktionsrelevante Batterie-Zustandsgrößen wie SoH (State of Health) und SoF (State of Function) gemacht werden [42]. Bei Betrachtung von Abbildung 5.11 zeigt sich, dass die Spannung bei allen Zyklen sehr nahe am Nominalwert von etwa 13,2 V dieses Zelltyps liegt [2]. Auf eine Variation der Batterietemperatur wird an dieser Stelle nicht mehr näher eingegangen, bei Auswertungen zeigte sich aber die höhere Batteriebelastung bei abnehmender Temperatur. Die Batteriespannung V_{Terminal} sinkt dabei auf ein Niveau von minimal etwa 10 V ab, die Entladeschlussspannung von 8 V wird aber zu keinem Zeitpunkt erreicht [2]. Unter Anwendung der erläuterten Maßnahmen ist somit eine uneingeschränkte EHC-Beheizung auch weiter außerhalb des für Batterien optimalen Temperaturbereichs von etwa 25 - 35 °C möglich [42].

Abschließend kann gesagt werden, dass bei den durchgeführten Untersuchungen als begrenzender Faktor bei der elektrischen Katalysatorheizung nicht der Energiebedarf, sondern der Leistungsbedarf anzusehen war. Aus dieser Erkenntnis lässt sich ableiten, dass aufgrund der einfacheren Versorgung leistungsstarker Verbraucher, welchen der EHC zuzuordnen ist, ein 48-V-Bordnetz wahrscheinlich besser geeignet wäre. Insgesamt konnte im Rahmen dieser Arbeit aber die Machbarkeit der elektrischen Katalysatorheizung am 12-V-Bordnetz festgestellt werden.

5.4.2 Einfluss der elektrischen Katalysatorheizung auf den Kraftstoffverbrauch

Die Auswertung des Kraftstoffmehrverbrauchs erfolgt gemäß der beiden in Kapitel vier erläuterten Varianten bei deaktivierten Nebenverbrauchern. Die Zahlenwerte von Variante-1 stellen ein Worst-Case Szenario dar, in welchem die gesamte Heizenergie unmittelbar durch Anhebung des Motordrehmoments aufgebracht werden muss. Eine Herangehensweise näher an der Realität erlaubt die Variante-2. Die Berechnung des Zusatzdrehmomentes wurde bereits ausführlich erläutert. In Abbildung 5.12 sind deren ermittelte Verläufe bei den Fahrzyklen dem effektiven Motordrehmoment gegenübergestellt. Darin sind die Verläufe mit Ausnahme des Low-load RDE-Zyklus bei der PID-Heizungsregelung ermittelt. Die Bestimmung des Zusatzdrehmoments erfolgt für die Ein/Aus-Regelung aber analog.

Wie in der Abbildung an den Zusatzdrehmomenten ersichtlich, startet die Leistungsversorgung durch den Generator unmittelbar nach dem Motorstart bei aktivierter

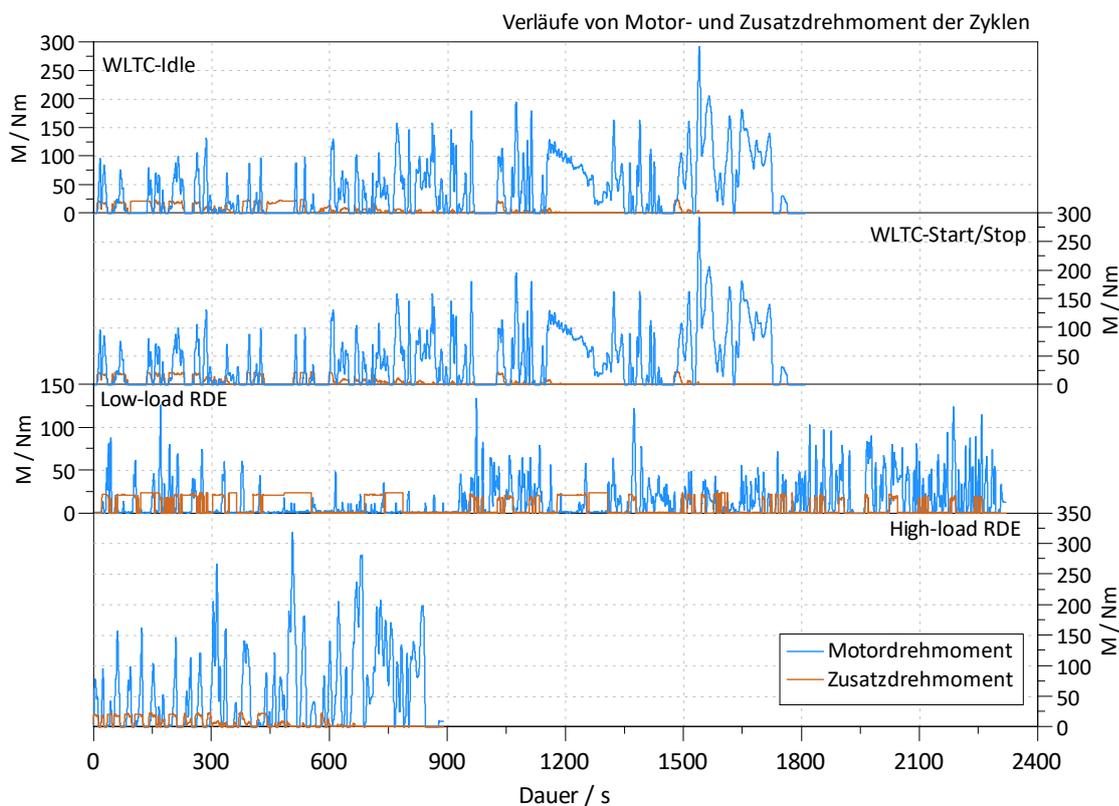


Abbildung 5.12: Gegenüberstellung von Motor- und Zusatzdrehmoment

Kraftstoffeinblasung. Diese Lastanhebung hat aber speziell bei Kaltstart einen erhöhten Anstieg der Tailpipe-Emissionen bis zum Anspringen des SCR-Katalysators zur Folge. Als Alternative wäre denkbar, in der ersten Warmlaufphase den EHC primär durch die Batterie zu betreiben und den Generator nur unterstützend zu aktivieren. Dieser könnte erst nach dem Light-Off als Hauptenergiequelle für Beheizung und Batterieladung genutzt werden und die Kaltstartemissionen reduzieren. Diese Strategie würde aber die Untersuchung am Fahrzeug-Gesamtsystem erfordern und war für einen neutralen Vergleich der Zyklen im Rahmen dieser Arbeit wenig zielführend.

Bei der Analyse der Drehmomentverläufe zeigt sich, dass oftmals ein höheres Zusatzdrehmoment im Vergleich zum Motordrehmoment zu verzeichnen ist. Dies tritt im Leerlauf und bei niedrigsten Motorlasten auf. Im Realbetrieb kann in diesen Phasen aus der Lastpunktanhebung ein geringerer spezifischer Kraftstoffverbrauch resultieren, welcher den Mehrverbrauch durch die elektrische Katalysatorheizung reduziert. Dieser Effekt konnte in [96] beim Dieselmotor nachgewiesen werden und erscheint auch bei der Wasserstoff-VKM als naheliegend. Eine weitere Möglichkeit, den Einfluss auf den Mehrverbrauch am Gesamtfahrzeug zu reduzieren, wäre eine priorisierte Ladung in den

Schubphasen. Zum besseren Vergleich der Zyklen wurde aber darauf verzichtet. In Abbildung 5.13 sind deshalb die Ergebnisse der Untersuchung bei der im Abschnitt 4.2.7 erläuterten Energiemanagement-Strategie gegenüber der erzielten NO_x -Konvertierung dargestellt. Die Zusatzenergie enthält dabei die Wirkungsgrade von Motor- und Generator. Der prozentuale Anstieg ist auf die Antriebsenergie, ebenfalls unter Berücksichtigung des effektiven Wirkungsgrades, bezogen. Bei Betrachtung zeigt sich der sehr hohe Energiebedarf im Low-load RDE-Zyklus. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass fast die gesamte Heizenergie im gefeuerten Leerlauf anstatt in den Schubphasen aufgebracht werden muss. Hier verdeutlicht sich die bereits beschriebene ineffiziente Beheizung im Leerlauf in sehr drastischer Form, weshalb für diesen Zyklus die Anwendung einer alternativen Heizstrategie als unumgänglich erscheint. Mehr dazu später.

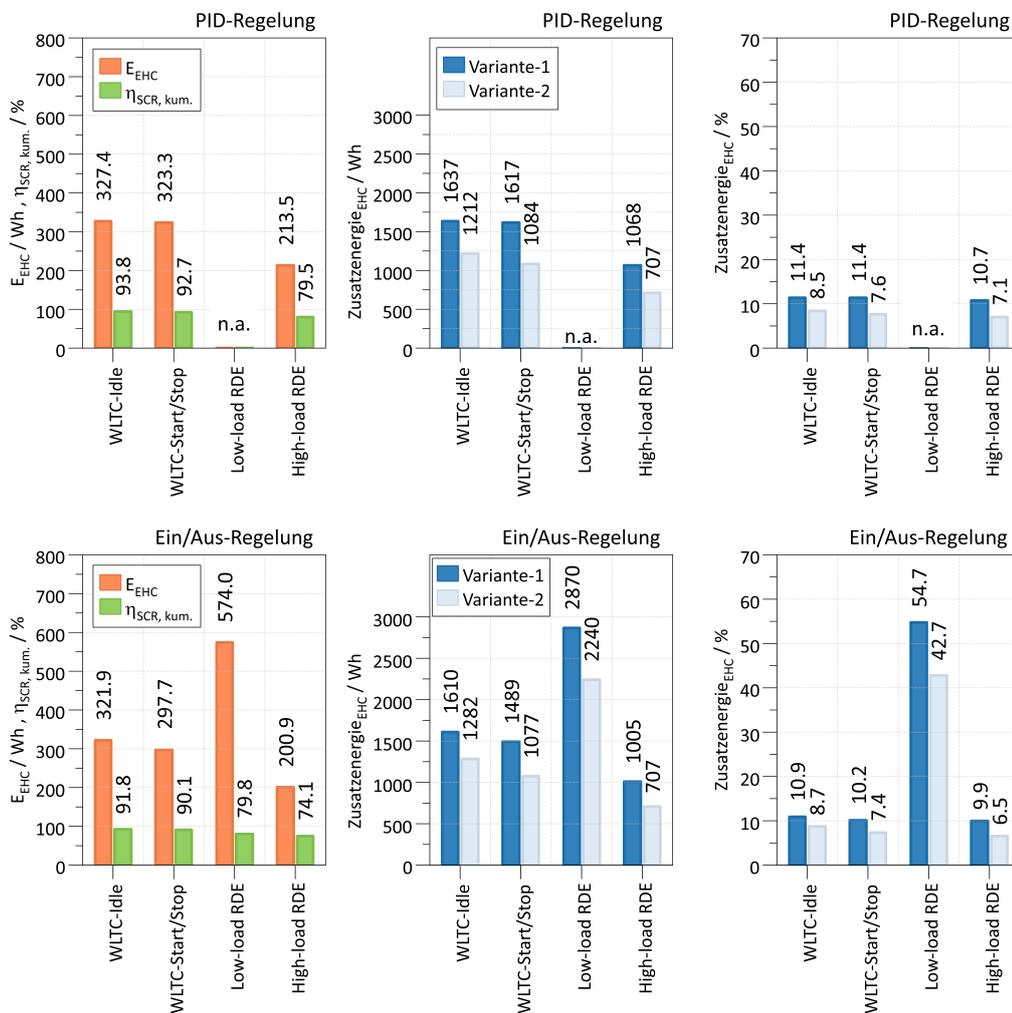


Abbildung 5.13: Einfluss der elektrischen Katalysatorheizung auf den Verbrauch

Insgesamt kann bei den restlichen Zyklen für Variante-2 der Mehrverbrauch im Bereich von 10 % gehalten werden. Unter Anbetracht der deutlichen Steigerung der NO_x -Konvertierung, sowie dem erklärten Potential der Verbesserung bei Optimierung der Ladestrategie am Gesamtfahrzeug, ist dieses Ergebnis als positiv zu bewerten.

5.4.3 Einfluss des Mehrverbrauchs auf Temperaturniveau und Emissionsverhalten

Wie bereits erläutert, hat die Anhebung des Motordrehmoments einen Einfluss auf Temperaturniveau und Emissionsverhalten. Um diesen abschätzen zu können, erfolgte nach der Vermessung bei der elektrischen Katalysatorheizung die Berechnung und Addition des Zusatzdrehmomentes zum Motordrehmoment. Mit dieser erweiterten Soll-Drehmomentvorgabe wurden die Zyklen bei elektrischer Katalysatorheizung unter Anwendung der gleichen Heizstrategie wiederholt. Dazu kam die einfachere Ein/Aus-Regelung zum Einsatz, die PID-Regelung hätte zu einer deutlich unterschiedlichen Beheizung geführt und die Aussagekraft dieser Analyse reduziert. In Abbildung 5.14 sind die Ergebnisse dieser Untersuchung für die Fahrzyklen dargestellt.

Bei Betrachtung der Abbildung zeigt sich für beide WLTC-Zyklen im Bereich des addierten Zusatzdrehmoments eine leicht erhöhte Abgastemperatur T_{40} vEHC. Im weiteren Zyklusverlauf gleichen sich diese aber wieder an. Die Abgastemperatur T_{50} zeigt aufgrund der prinzipbedingt unterschiedlichen Heizeingriffe einen abweichenden Verlauf, ein eindeutiger Einfluss der Lastpunktanhebung kann nicht beobachtet werden. Anders bei der Temperatur $T_{\text{Kat}2_2}$ im SCR-Katalysator. Hier ist eine Erhöhung um mehrere Grad Celsius messbar, was aufgrund des hohen Gradienten der NO_x -Konvertierungsrate im SCR-Katalysator in diesem Temperaturbereich von Bedeutung ist. Die NO_x -Rohemissionen steigen bei Zyklusbeginn geringfügig an, aufgrund der bereits beschriebenen Messabweichung ist eine eindeutige Aussage aber nur schwer abzuleiten. Faktisch ist deshalb keine gravierende Erhöhung nachweisbar. Aufgrund der höheren Abgastemperatur- und Raumgeschwindigkeit im SCR-Katalysator, kann insbesondere zu Beginn eine geringfügig höhere Konvertierungsrate verzeichnet werden.

Ein Vergleich der RDE-Zyklen in Abbildung 5.14 verdeutlicht ein grundsätzlich sehr ähnliches Verhalten. Durch die häufigeren Heizeingriffe treten die Effekte aber insbesondere beim Low-load RDE-Zyklus in einer viel deutlicheren Form auf.

Die wesentlichsten Ergebnisse der Untersuchungen in diesem Abschnitt sind in Abbildung 5.15 dargestellt. Bei Vergleich zeigt sich der in geringem Maße erhöhte Anstieg der NO_x -Rohemissionen. Die demgegenüber gesenkten Tailpipe-Emissionen sind durch

5 Diskussion der Ergebnisse

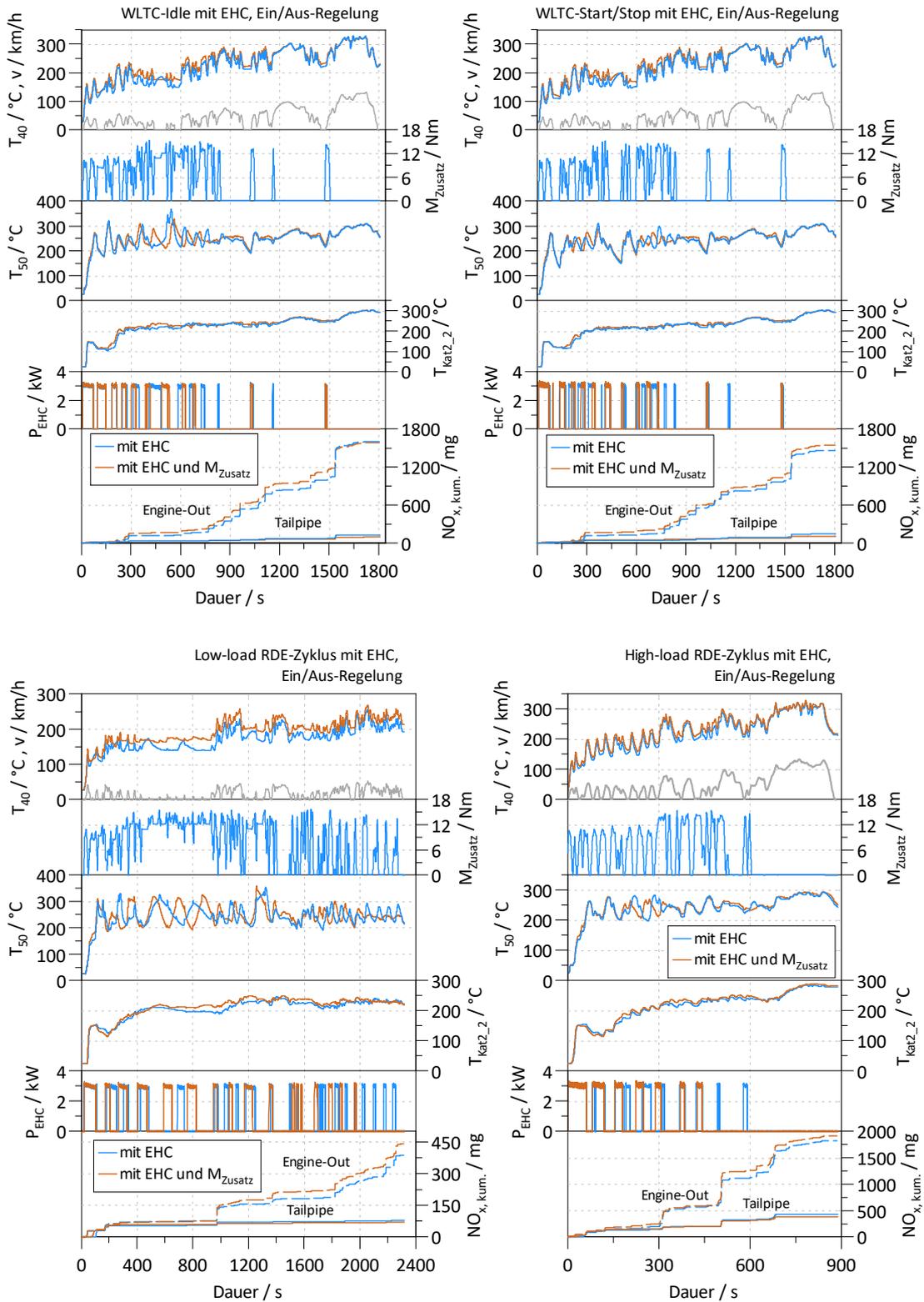


Abbildung 5.14: Auswirkungen des Mehrverbrauches bei den Fahrzyklen

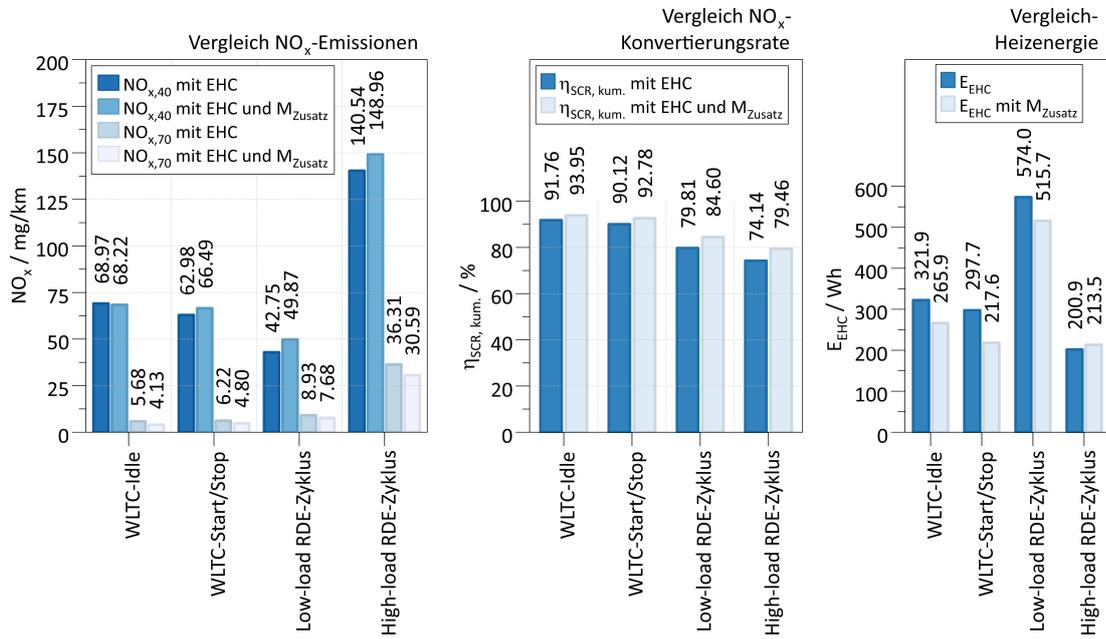


Abbildung 5.15: Auswirkung der Lastanhebung auf NO_x-Emissionen, Konvertierungsverhalten und Heizenergie

die im mittleren Diagramm gezeigten höheren Konvertierungsraten zu erklären. Ein direkter Vergleich der Heizenergien sollte nicht gezogen werden, da jenen der Messungen mit Zusatzdrehmoment die Heizenergie der Basismessungen bereits zugrunde liegt. Es kann aber abgeleitet werden, dass bei Berücksichtigung der Lastanhebung von einem Energiebedarf im Bereich zwischen den beiden gezeigten Werten auszugehen ist. Beim High-load RDE-Zyklus ist die Erhöhung der Heizenergie auf die hohen Schwankungen der Abgastemperatur T_{50} zurückzuführen. Diese führen zu unterschiedlichen Heizeingriffen, was aufgrund der insgesamt geringen Heizenergie einen augenscheinlichen Einfluss auf deren Bedarf hat. Die Auswertung der anderen Emissionen ergab vergleichbar niedrige Werte. Ein Einfluss der Lastanhebung ist aufgrund deren geringen Konzentrationen nicht eindeutig nachweisbar, weshalb darauf nicht mehr näher eingegangen wird. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass diese Messungen einen Einfluss der Lastanhebung auf Abgastemperaturniveau und Emissionsverhalten zeigen konnten. Die Lastanhebung führt demzufolge zu einer Erhöhung der Rohemissionen, welche aber mit einem Anstieg des Temperaturniveaus einhergehen. Dadurch können die NO_x-Konvertierungsraten gesteigert und die Tailpipe-Emissionen im Vergleich sogar reduziert werden. Das Ausmaß dieser Effekte ist dabei stark von der Beheizung abhängig, weshalb naturgemäß beim Low-load RDE-Zyklus mit häufigen Heizeingriffen der deutlichste Einfluss der Lastanhebung zu beobachten ist.

5.5 Untersuchung alternativer Heizstrategien

Bei den bisher erläuterten Ergebnissen kann beobachtet werden, dass die elektrische Katalysatorheizung im Leerlauf zu keiner effizienten Beheizung von Abgas und Substrat führt. Aus diesem Grund erfolgte zum Abschluss der Untersuchungen die Vermessung alternativer Strategien am WLTC-Idle mit PID-Regelung der Beheizung. Die Untersuchung dieses Zyklus mit deaktiviertem EHC im Leerlauf wird als Alternative-1 bezeichnet. Andererseits wurde versucht, in diesen Phasen bei elektrischer Katalysatorheizung mithilfe der Einbringung eines Luftmassenstroms vEHC, den Wärmetransport zu verbessern und für eine effizientere Nutzung der Heizenergie zu sorgen. Dazu kann am Motorprüfstand die Luftenblasung des RCD⁺-Verfahrens mit einem konstanten Luftmassenstrom von 10,5 kg/h und einer Temperatur von 21 °C eingesetzt werden. Diese Variante wird in weiterer Folge als Alternative-2 bezeichnet. Aufgrund des relativ niedrigen Massenstroms führten Versuche mit Motor-Start/Stop und Sekundärluftenblasung an dieser Stelle zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis. In Abbildung 5.16 und Abbildung 5.17 sind die Ergebnisse dieser Untersuchung dargestellt.

Wie nach dem Vergleich von WLTC-Idle und WLTC-Start/Stop mit PID-Regelung in Abschnitt 5.3 bereits abzuschätzen war, zeigt sich Variante-1 als sehr günstig. Die NO_x-Konvertierung ist auf gleichem Niveau wie beim WLTC-Idle mit PID-Regelung anzusiedeln. Die Abgastemperatur $T_{\text{Kat}2_2}$ steigt in den ersten 150 Sekunden zwar deutlich langsamer an, der relevante Temperaturbereich für das Anspringen der Katalysatoren wird aber nahezu gleichzeitig erreicht. Deutlich erkennbar sind die hohen Temperaturspitzen der Abgastemperatur T_{50} im Bereich von 150- beziehungsweise 500

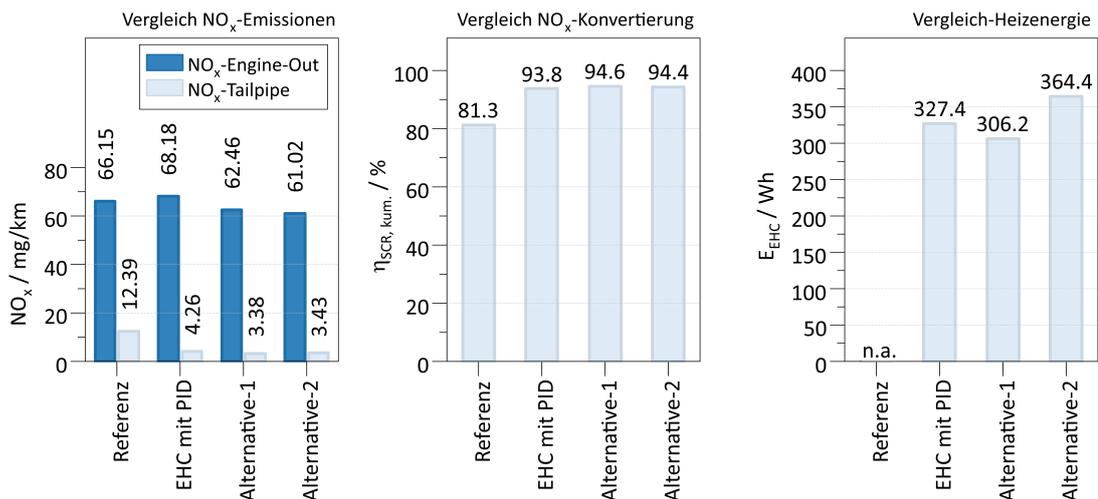


Abbildung 5.16: Ergebnisse der alternativen Strategien

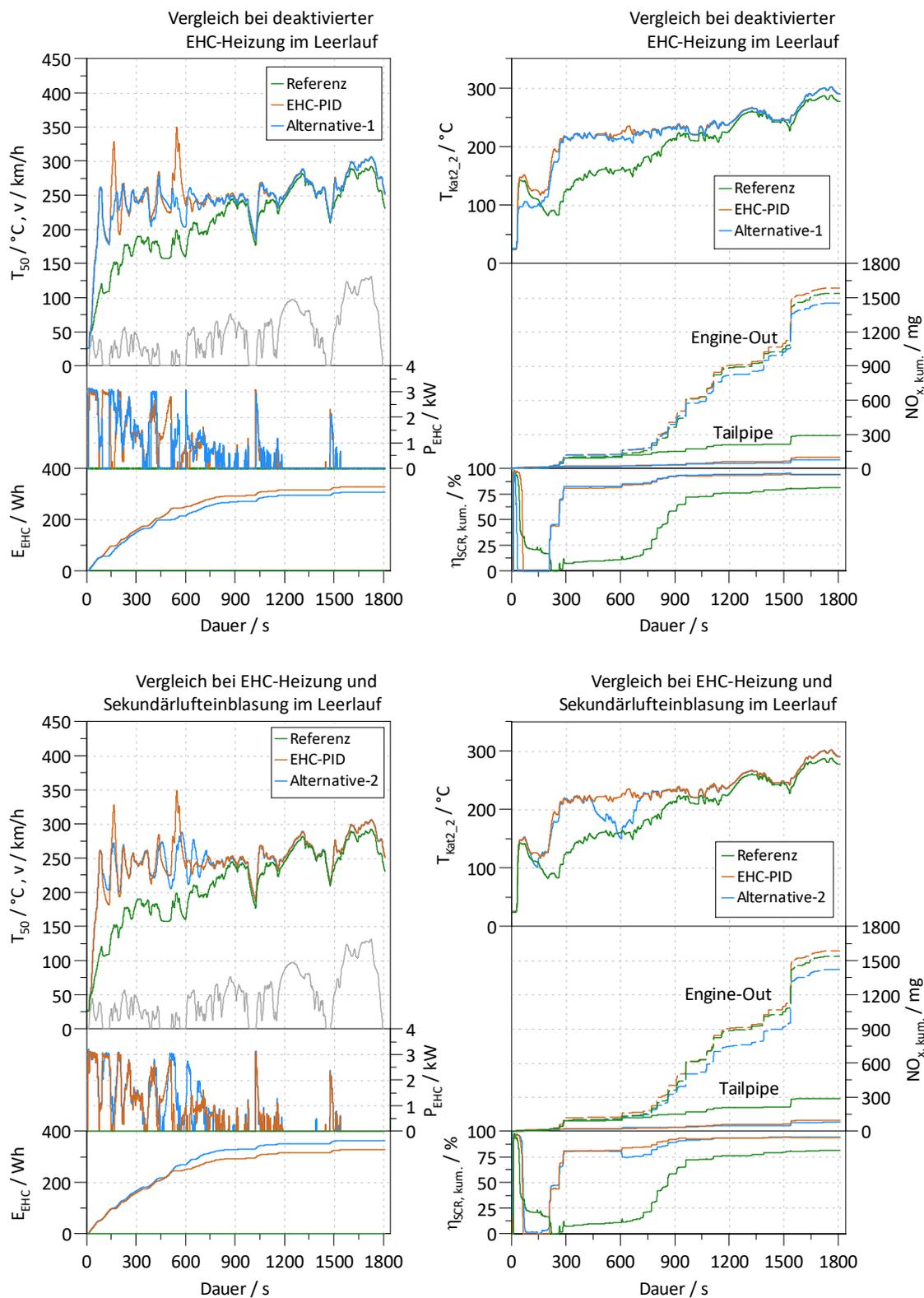


Abbildung 5.17: Analyse und Vergleich der alternativen Strategien beim WLTC-Idle

Sekunden beim WLTC-Idle. Dies ist auf den Weitertransport der stark erhitzten Abgase im Bereich der Heizescheibe bei Anstieg des Abgasmassenstroms zufolge Beschleunigungsvorgängen unmittelbar nach dem Leerlauf zurückzuführen. Dieses Verhalten zeigt sehr deutlich die ineffiziente Katalysatorheizung beim Motor-Leerlauf. Insgesamt kann die benötigte Heizenergie um etwa 6,5 % gesenkt werden. An dieser Stelle erwähnt sei, dass beim WLTC-Idle die Leerlaufanteile sehr gering sind. Bei höherem Anteil, wie dies beim Low-load RDE-Zyklus der Fall ist, kann davon ausgegangen werden, dass diese Reduktion wesentlich deutlicher ausgeprägt ist. Eine Untersuchung konnte aus Zeitgründen nicht mehr erfolgen.

Bei Alternative-2 führt die Einblasung von Sekundärluft zwar zu einer ähnlichen NO_x -Konvertierung, allerdings ist ein Anstieg der Heizenergie zu verzeichnen. Bei Betrachtung der Temperaturverläufe zeigt sich, dass die mit 21 °C eingebrachte Sekundärluft vom EHC nicht ausreichend erwärmt werden kann und gegenläufig zu einer Abkühlung des Systems führt. In der Praxis wäre deswegen unbedingt vorgewärmte Luft einzuleiten. Angemerkt sei, dass die Sekundärlufteinblasung nicht durch eine Sekundärluftpumpe, sondern einem Druckbehälter stammt und deswegen die Verdichtungsarbeit keinen Eintrag in die Heizenergie findet.

Zusammenfassend sei gesagt, dass durch die Alternative-1 ein hohes Potential zur Reduktion der Heizenergie bei gleichbleibender NO_x -Konvertierung besteht. Bei Einblasung vorgewärmter Sekundärluft könnte mit hoher Wahrscheinlichkeit auch durch Alternative-2 eine Verbesserung erzielt werden, diese Untersuchung war im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der fehlenden Komponenten aber nicht mehr möglich.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss der elektrischen Katalysatorheizung auf das Emissionsverhalten des transienten Wasserstoffmotors untersucht. Auf Basis einer Simulation wurde eine Strategieentwicklung vorgenommen und der Einsatz des elektrischen Heizkatalysators am 12-V-Bordnetz im Zuge einer konzeptionellen Untersuchung bewertet. Anhand unterschiedlicher Fahrzyklen wurden, basierend auf den Erkenntnissen aus der Simulation, Messungen durchgeführt und die Ergebnisse analysiert.

Die thermische Simulation des Abgassystems zeigte eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen und ermöglichte die Untersuchung und Bewertung von Heizstrategien. Zur Regelung wurden zwei Systeme getestet und sämtliche Zyklen damit gemessen. Dabei zeigte die PID-Regelung bei gleichwertiger Heizenergie höhere Konvertierungsraten bei einem gleichmäßigeren Heizverlauf. Anhand einer konzeptionellen, simulationsgestützten Untersuchung, konnte eine grundsätzliche Eignung des 12-V-Bordnetzes für den Betrieb eines elektrischen Heizkatalysators gezeigt werden. Durch den Einsatz eines herkömmlichen Generators und einer Li-Ionen-Batterie als Energiespeicher ist es möglich, Heizenergie- und Leistung bei gleichzeitigem Betrieb von elektrischen Nebenverbrauchern aufzubringen. Insgesamt kann aber abgeleitet werden, dass die Applikation eines EHCs an einem 48-V-Hybrid-Bordnetz vermutlich besser geeignet wäre.

Die Messergebnisse zeigen eine deutlich gesteigerte SCR-Aktivität. Die NO_x -Konvertierungsrate konnte bei der PID-Regelung für alle Zyklen im zweistelligen Prozentbereich angehoben werden. Bei den WLTC-Zyklen wurden damit Konvertierungsraten oberhalb von 92 % erzielt, was in NO_x -Tailpipe-Emissionen von weniger als 4,5 mg/km resultierte. Für die beiden RDE-Zyklen konnte die Konvertierungsrate ebenfalls deutlich auf etwa 80 % gesteigert werden. Beim Low-load RDE-Zyklus verdeutlichte sich aber die Problematik eines längeren Stadtfahrbetriebes, was zur Untersuchung alternativer Strategien führte. Beim High-load RDE-Zyklus konnte gezeigt werden, dass der EHC nicht nur zur raschen Erwärmung des Abgassystems, sondern vielmehr auch zum Thermomanagement im Schubbetrieb einsetzbar ist. Der Ausstoß weiterer Emissionsspezies wurde aufgrund deren geringer Rohabgas-Konzentrationen von weit unter 10 mg/km durch die elektrische Katalysatorheizung nicht mehr wesentlich beeinflusst.

Der Einfluss der elektrischen Katalysatorheizung auf den Kraftstoffverbrauch ergab für die beiden vorgestellten WLTC-Zyklen ein Plus im Bereich von knapp unterhalb

zehn Prozent. Dazu erfolgte eine Unterscheidung in motorisch- und im Schleppbetrieb aufgebrauchte Heizenergie. Beim High-load RDE-Zyklus zeigt sich ein sehr ähnliches Ergebnis, wohingegen beim Low-load RDE-Zyklus ein starker Anstieg von über 40% verzeichnet werden muss. Dies liegt einerseits an der geringen geforderten Antriebsleistung im Stadtfahrbetrieb, andererseits an den wenigen Phasen mit Schubbetrieb zur Generierung von verbrauchsneutraler Heizenergie. Angemerkt sei, dass das generierte Zusatzmoment das Temperaturniveau im Abgassystem minimal steigern konnte, was sich auch an einem Anstieg der NO_x -Konvertierungsrate um weitere 2% niederschlug.

Zum Abschluss der Messungen wurden noch alternative Heizstrategien zur effizienteren Nutzung der Heizenergie am WLTC-Idle getestet. Unter Anbetracht des unzureichenden Wärmetransports im Leerlauf, wurde in diesen Phasen der EHC deaktiviert. Damit ließ sich im Vergleich bei konformer NO_x -Konvertierungsrate eine Ersparnis der Heizenergie von etwa 7% erzielen. Im Hinblick auf den Low-load RDE-Zyklus könnte somit aufgrund des deutlich höheren Leerlaufanteils eine drastische Senkung des Mehrverbrauchs realisiert werden. Eine weitere Untersuchung mit einer Sekundärlufteinblausung von Umgebungsluft im Leerlauf, führte aufgrund deren geringer Temperatur zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis.

Verbesserungen im Bereich der NO_x -Konvertierung könnte beispielsweise der Einsatz einer modellgestützten AdBlue[®]-Eindosierung hervorrufen. Durch die frühere Eindosierfreigabe wäre eine höhere NH_3 -Beladung des SCR-Katalysators, bei geringem NH_3 -Schlupf, zur gesteigerten NO_x -Konvertierung realisierbar. Weiters könnte das SCR-Katalysatorvolumen zur Reduktion der Raumgeschwindigkeit erhöht und damit die NO_x -Konvertierung begünstigt werden. Durch den Einsatz von vorgewärmter Sekundärluft wäre darüber hinaus eine Beheizung des Abgassystems noch vor der Inbetriebnahme des Fahrzeugs denkbar, wodurch die Kaltstartemissionen wesentlich reduziert würden. Ein Optimierungsansatz zur Senkung des Kraftstoff-Mehrverbrauchs wäre eine bevorzugte Katalysatorheizung bei Schleppphasen, wodurch die Heizenergie speziell bei Rekuperation in Hybridantrieben verbrauchsneutral aufzubringen wäre. Alternativ dazu würde eine thermische Isolierung der Abgasrohre zu einem geringeren Wärmeaustausch mit der Umgebung führen und den Heizenergiebedarf minimieren.

Unter Anbetracht der erzielten Erkenntnisse kann zusammenfassend gefolgert werden, dass der elektrische Heizkatalysator ein wirksames Mittel zur Emissionssenkung bei der Wasserstoff-VKM darstellt. Bei den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass trotz der geringen Zündenergie von H_2 keine unkontrollierten, explosionsartigen Verbrennungen im Bereich der Heizscheibe auftreten und ein uneingeschränkter Betrieb an der Wasserstoff-VKM realisierbar ist. Der Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch ist dabei als verhältnismäßig einzustufen. Somit wäre durch die Verwendung von grünem Wasserstoff die VKM mithilfe dieser Technologie in der Lage, unter Einhaltung zukünftiger Abgasgesetzgebungen einen wichtigen Beitrag zum Weltklima zu leisten.

Literaturverzeichnis

- [1] A123 Energy Solutions: „*Battery Pack Design, Validation, and Assembly Guide using A123 Systems Nanophosphate Cells*“, Benutzerhandbuch, <https://www.manualslib.com/manual/1311874/A123-Systems-Apr18650m1-A.html#manual>, Abgerufen am 23.01.2023.
- [2] A123 Systems Inc.: „*High Power Lithium Ion ANR26650m1*“, Technisches Datenblatt, 2006.
- [3] Aschauer, T. F.: „*Simulation eines 48V Hybrid-Antriebsstrangs in Interaktion mit der Abgasnachbehandlung*“, Masterarbeit, 2020.
- [4] Auvray, X., Mihai, B., Lundberg, B., Olsson, L.: „*Deactivation of Cu/SSZ-13 NH₃-SCR Catalyst by Exposure to CO, H₂, and C₃H₆*“, Catalysts, Band 9, Ausgabe 929, 2019, doi:10.3390/catal9110929.
- [5] van Basshuysen, R.: „*Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direkteinblasung*“, Springer Vieweg, 4. Auflage, 2017, ISBN 978-3-658-12214-0.
- [6] Benini, L., Castelli, G., Macii, E., Poncino, M., Scarsi, R.: „*Discrete-time battery models for system-level low-power design*“, IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, Band 9, Ausgabe 5, 2001, doi:10.1109/92.953497, S. 630 – 640.
- [7] Bezaire, B. A.: „*Modeling and Control of an Electrically-Heated Catalyst*“, Masterarbeit, 2011.
- [8] Birkhold, F.: „*Selektive katalytische Reduktion von Stickoxiden in Kraftfahrzeugen: Untersuchung der Einspritzung von Harnstoffwasserlösung*“, Dissertation, 2007.
- [9] Boger, T., Rose, D., He, S., Joshi, A.: „*Developments for future EU7 regulations and the path to zero impact emissions-A catalyst substrate and filter supplier’s perspective*“, Transportation Engineering, Ausgabe 10, 2022, doi:10.1016/j.treng.2022.100129.
- [10] Brandt, E. P., Wang, Y., Grizzle, J. W.: „*A Simplified Three-Way Catalyst Model for Use in On-Board SI Engine Control and Diagnostics*“, Proceedings for the ASME 1997 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Dynamic Systems and Control, 1997, doi:10.1115/IMECE1997-0453, S. 653 – 659.

- [11] Brück, R., Härig, T.: „*Der Ringkatalysator als ultrakompakte Lösung für Euro 7*“, MTZ – Motortechnische Zeitschrift 81, 2020, S. 46 – 51
- [12] Buller, S., Thele, M., De Doncker, R.W.A.A., Karden, E.: „*Impedance-based simulation models of supercapacitors and Li-ion batteries for power electronic applications*“, IEEE Transactions on Industry Applications, Band 41, Ausgabe 3, 2005, doi:10.1109/TIA.2005.847280, S. 742 – 747
- [13] Capizzi, G., Bonanno, F., Tina, G.M.: „*Recurrent neural network-based modeling and simulation of lead-acid batteries charge-discharge*“, IEEE Transactions on Energy Conversion, Band 26, Ausgabe 2, 2011, doi:10.1109/TEC.2010.2095015, S. 435 – 443.
- [14] Carlson, B., Stutenberg, K., Wishart, J.: „*On-road and Dynamometer Evaluation of Vehicle Auxiliary Loads*“, SAE International Journal of Fuels and Lubricants, Band 9, 2016, doi:10.4271/2016-01-0901, S. 260 – 268.
- [15] Chen, M., Rincon-Mora, G.A.: „*Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance*“, IEEE Transactions on Energy Conversion, Band 21, Ausgabe 2, 2006, doi:10.1109/TEC.2006.874229, S. 504 – 511.
- [16] Chiasserini, C.F., Rao, R.R.: „*Energy efficient battery management*“, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Band 19, Ausgabe 7, 2001, doi:10.1109/49.932692, S. 1235 – 1245.
- [17] Christoforetti, P.: „*Transienter Betrieb von Wasserstoffmotoren*“, Masterarbeit, 2022.
- [18] Colombo, M., Nova, I., Tronconi, E., Schmeißer, V., Weibel, M.: „*Mathematical Modelling of cold start effects over zeolite SCR catalysts for exhaust gas after-treatment*“, Catalysis Today, Band 231, 2014, doi:10.1016/j.cattod.2014.01.044, S. 99 – 104.
- [19] Commission Regulation (EU) 2016/427: „*Official Journal of the European Union*“, L82, 2016.
- [20] Commission Regulation (EU) 2016/1151: „*Official Journal of the European Union*“, L175, 2017.
- [21] Commission Regulation (EU) 2018/1832: „*Official Journal of the European Union*“, L301, 2018.
- [22] Commission Regulation (EU) 2018/2042: „*Official Journal of the European Union*“, L327, 2018.

-
- [23] Deinhofer, L., Maurer, M., Barnstedt, G., Keber, A.: „*Analysis of the NO_x storage behaviour during cold start of modern SCR flow-through substrates and SCR on-filter substrates*“, Automot. Engine Technol., Band 7, 2021, doi:10.1007/s41104-021-00099-w, S. 260 – 268.
- [24] Diaz, S., Bernard, M.R., Bieker, G., Lee, K., Mock, P., Mulholland, E., Ragon, P.L., Rodriguez, F., Tietge, U., Wappelhorst, S.: „*Report, European vehicle market statistics 2021/2022*“, The International Council on Clean Transportation (ICCT), 2021.
- [25] Eichlseder, H.: „*Antriebssysteme mit Verbrennungskraftmaschinen*“, Vorlesungsskriptum, 2016.
- [26] European Commission: „*ANNEXES to the Proposal for a Regulation of the European Parliament and the Council on type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7) and repealing Regulations (EC) NO 715/2007 and (EC) NO 595/2009*“, COM(2022) 586 final, 2022.
- [27] Fabis, M.R.: „*Beitrag zum Energiemanagement in Kfz-Bordnetzen*“, Dissertation, 2006.
- [28] Garcia, A., Monsalve-Serrano, J., Sari, R. L., Martinez-Boggio, S.: „*Energy assessment of an electrically heated catalyst in a hybrid RCCI truck*“, Energy, Ausgabe 238, Teil A, 2022, doi:10.1016/j.energy.2021.121681.
- [29] Gold, S.: „*A pspice macromodel for lithium-ion batteries*“, Proc. 12th Annu. Battery Conf. Applications and Advances, 1997, doi:10.1109/BCAA.1997.574106, S. 215 – 222.
- [30] Gomadam, P.M., Weidner, J.W., Dougal, R.A., White, E.R.: „*Mathematical modeling of lithium-ion and nickel battery systems*“, Journal of Power Sources, Band 110, Ausgabe 2, 2002, doi:10.1016/S0378-7753(02)00190-8, S. 267 – 284.
- [31] Hanel, F.J., Otto, E., Brück, R., Nagel, T., Bergau, N.: „*Practical Experience with the EHC System in the BMW Alpina B12*“, SAE Technical Paper, Band 970263, 1997, doi:10.4271/970263.
- [32] Hasan, A., Skriver, M., Johansen, T.A.: „*Exogenous Kalman Filter for State-of-Charge Estimation in Lithium-Ion Batteries*“, 2018 IEEE Conference on Control and Applications (CCTA), 2018, doi:10.1109/CCTA.2018.8511577, S. 1403 – 1408
- [33] Hausberger, S.: „*Antriebssysteme mit Verbrennungskraftmaschinen, Teil: Schadstoffbildung, Abgasnachbehandlung, Elektrifizierung*“, Vorlesungsskriptum, 2021.

- [34] Hinz, H.: „*Compariscon of Lithium-Ion Battery Modles for Simulating Storage Systems in Distributed Power Generation*“, *Inventions* 4(3):41, 2019, doi:10.3390/inventions4030041
- [35] Holz, O., Presti, M., Mosch, T., Dachsel, J., Rodatz, P., Fink, F., Nienhoff, M.: „*Heavy Duty Exhaust Systems for Low NO_x Application: Thermal Management and Control*“, in: Liebl, J. (eds) *Heavy Duty-, On- und Off-Highway-Motoren 2020. Proceedings*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2021, doi: 10.1007/978-3-658-34362-0_7.
- [36] Huang, Y., Lai, H.: „*Effects of discharge rate on electrochemical and thermal characteristics of LiFePO₄/graphite battery*“, *Applied Thermal Engineering*, Ausgabe 157, 2019, doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.113744.
- [37] Kandylas, I., Stamatelos, A.: „*Berechnung des Wärmeübergangs in Motorabgassystemen*“, *MTZ – Motortechnische Zeitschrift* 59, Ausgabe 7-8, 1998, S. 442 – 450.
- [38] Käfer, S.: „*Trockenharnstoff-SCR-System und Betriebsstrategie für Fahrzeuge mit Dieselmotor*“, Dissertation, 2014.
- [39] Kirchner, T., Eigenberger, G.: „*Optimization of the Cold-Start Behaviour of Automotive Catalysts Using an Electrically Heated Pre-Catalyst*“, *Chemical Engineering Science*, Band 51, Ausgabe 10, 1996, doi:10.1016/0009-2509(96)00097-8, S. 653 – 659.
- [40] Klell, M., Eichlseder, H., Trattner, A.: „*Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung*“, Springer Vieweg, 4. Auflage, 2012, ISBN 978-3-658-20446-4.
- [41] Kobald, J.: „*Möglichkeiten zur Wirkungsgradsteigerung moderner SCR-Systeme*“, Masterarbeit, 2014.
- [42] Korthauer, R.: „*Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*“, Springer Vieweg Berlin, Heidelberg, 2013, ISBN 978-3-642-30652-5.
- [43] Kruppok, K., Jäger, B., Kriesten, R.: „*Auswirkung der Elektrifizierung von Nebenverbrauchern auf das Energiemanagement im Kraftfahrzeug*“, *Forschung aktuell/Hochschule Karlsruhe, Technik und Wirtschaft*, 2016, S. 47 – 49.
- [44] Küng, L., Bütler, T., Georges, G., Boulouchos, K.: „*How much energy does a car need on the road?*“, *Applied Energy*, Ausgabe 256, 2019, doi:10.1016/j.apenergy.2019.113948.
- [45] Kollmeyer, P.J., Jahns, T.M.: „*Aging and performance comparison of absorbed glass mat, enhanced flooded, PbC, NiZn, and LiFePO₄ 12V*“

- start stop vehicle batteries*“, Journal of Power Sources, Band 441, 2019, doi:10.1016/j.jpowsour.2019.227139.
- [46] Konnov, A.A., Colson, G., De Ruyck, J.: „*NO formation rates for hydrogen combustion in stirred reactors*“, Fuel, Band 80, Ausgabe 1, 2001, doi:10.1016/S0016-2361(00)00060-0, S. 49 – 65.
- [47] Kwiecien, M., Schröder, P., Kuipers, M., Sauer, D.U.: „*4-Current research topics for lead-acid batteries*“, In: Lead-Acid Batteries for Future Automobiles, 2017, doi:10.1016/B978-0-44-63700-0.00004-0, S. 133 – 146.
- [48] Langeheinecke, Kl., Jany, P., Thieleke, G., Langeheinecke, Ka., Kaufmann, A.: „*Thermodynamik für Ingenieure*“, Springer Vieweg-Wiesbaden, 9. Auflage, 2013, ISBN 978-3-658-03168-8.
- [49] Li, Y., Zhang, B., Chen, M., Yang, D., Liu, J.: „*Investigation of the Internal Resistance in LiFePO₄ Cells for Battery Energy Storage System*“, 2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2014, doi:10.1109/ICIEA.2014.6931423, S. 1596 – 1600.
- [50] Lott, P., Wagner, U., Koch, T., Deutschmann, O.: „*Der Wasserstoffmotor - Chancen und Herausforderungen auf dem Weg zu einer dekarbonisierten Mobilität*“, Chemie Ingenieur Technik, Ausgabe 94, 2022, doi:10.1002/cite.202100155.
- [51] Maunula, T., Tuikka, M., Wolff, T.: „*The Reactions and Role of Ammonia Slip Catalysts in Modern Urea-SCR Systems*“, Emission Control Science and Technology, Band 6, 2020, doi:10.1007/s40825-020-00171-1.
- [52] Maus, W., Brück, R., Konieczny, R., Scheeder, A.: „*Der E-Kat als Thermomanagementlösung in modernen Fahrzeuganwendungen*“, MTZ – Motortechnische Zeitschrift 71, Ausgabe 5, 2010, S. 340 – 346.
- [53] Maus, W., Brück, R., Konieczny, R., Hirth, P.: „*Die Zukunft der Katalysortechnik für elektrifizierte Antriebsstränge*“, MTZ – Motortechnische Zeitschrift 73, Ausgabe 1, 2012, S. 32 – 38.
- [54] Mazlan, K.R., Dan, R.M., Zakaria, M.Z., Hamid, A.H.A.: „*Experimental study on the effect of alternator speed to the car charging system*“, MATEC Web of Conferences, Band 90, 2017, doi:10.1051/mateconf/20179001076.
- [55] Metalcor GmbH: „*Master distribution - Die Welt der Sondermetalle*“, Technisches Datenblatt, <http://www.metalcor.de/datenblatt/26/>, Abgerufen am: 22.01.2023.
- [56] Newman, J., Thomas, K.E., Hafezi, H., Wheeler, D.R.: „*Modeling of lithium-ion batteries*“, Journal of Power Sources, Band 119-121, 2003, doi:10.1016/S0378-7753(03)00282-9, S. 838 – 843.

- [57] Ning, J., Yan, F.: „*Temperature Control of Electrically Heated Catalyst for Cold-start Emission Improvement*“, IFAC-PapersOnLine, Band 49, Ausgabe 11, 2016, doi:10.1016/j.ifacol.2016.08.003.
- [58] Oshawa, K., Baba, N., Kojima, S., Matsunaga, S., Ito, T.: „*Numerical Prediction of Transient Conversion Characteristics in a Three-Way Catalytic Converter*“, SAE Transactions, Band 107, 1998, doi:10.4271/982556, S. 1359 – 1368.
- [59] Panchal, S., Mathew, M., Fraser, R., Fowler, M.: „*Electrochemical thermal modeling and experimental measurements of 18650 cylindrical lithium-ion battery during discharge cycle for an EV*“, Applied Thermal Engineering, Ausgabe 135, 2018, doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.02.046, S. 123 – 132.
- [60] Pattas, K. N., Stamatelos, A. M., Pistikopoulos, P.K., Koltsakis, G. C., Konstantinidis, P. A., Volpi, E., Leveroni, E.: „*Transient Modeling of 3-Way Catalytic Converters*“, SAE Technical Paper 940934, 1994, doi:10.4271/940934.
- [61] Pauer, T., Weller, H., Schünemann, E., Eichseder, H., Grabner, P., Schaffer, K.: „*TH₂ ICE für zukünftige PKW's und leichte Nutzfahrzeuge*“, in Fortschritt-Berichte VDI: 41. Internationales Wiener Motorensymposium 22.-24-April 2020, Band 813, 2020, S. 246 – 263.
- [62] Perez, H.E., Siegel, J.B., Lin, X., Stefanopoulou, A.G., Yi, D., Castanier, M.P.: „*Parameterization and Validation of an Integrated Electro-Thermal Cylindrical LFP Battery Model*“, Dynamic Systems and Control Conference, Band 45318, 2012, doi:10.1115/DSCC2012-MOVIC2012-8782, S. 41 – 50.
- [63] Pischinger, R., Klell, M., Sams, T.: „*Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine*“, Springer-Verlag Wien New York, 3. Auflage, 2009, ISBN 978-3211-99276-0.
- [64] Pramhas, J.: „*Evaluation of Valve Train Variability in Passenger Car Diesel Engines*“, Dissertation, 2015.
- [65] Raszman, E., Baker, K., Shi, Y., Christensen, D.: „*Modeling stationary lithium-ion batteries for optimization and predictive control*“, IEEE Power and Energy Conference at Illinios (PECI), 2017, doi:10.1109/PECI.2017.7935755, S. 1 – 7.
- [66] Reif, K.: „*Dieselmotor-Management. Systeme, Komponenten, Steuerung und Regelung*“, Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden, 5. Auflage, 2012, ISBN 978-3-8348-2179-9.
- [67] Reif, K.: „*Dieselmotor-Management. Systeme, Komponenten, Steuerung und Regelung*“, Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden, 6. Auflage, 2020, ISBN 978-3-658-25071-3.

-
- [68] Roiser, S.: „*Thermomanagement eines Lastkraftwagens mit Brennstoffzellenantrieb*“, Masterarbeit, 2021.
- [69] Roiser, S., Christoforetti, P., Schutting, E., Eichlseder, H.: „*Emission Behavior and Aftertreatment of Stationary and Transient Operated Hydrogen Engines.*“, In Proceedings-Thiesel 2022 Conference on Thermo- and Fluid Dynamics of Clean Propulsion Powerplants, 2022, ISBN 978-84-1396-055-5, S. 178 – 194.
- [70] Rong, P., Pedram, M.: „*An analytical model for predicting the remaining battery capacity of lithium-ion batteries*“, IEEE Transaction on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, Band 14, Ausgabe 5, 2006, doi:10.1109/TVLSI.2006.876094, S. 441 – 451.
- [71] Sams, T.: „*Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei KFZ Teil 1*“, Vorlesungsskriptum, 2016.
- [72] Schatz, A., Knorr, A., Ellmer, D.: „*Elektrischer Heizkatalysator zur Optimierung der Emissionen von Mildhybridsystemen*“, MTZ – Motortechnische Zeitschrift 77, Ausgabe 2, 2016, S. 46 – 53.
- [73] Schrank, M., Langer, V., Jacobsen, B., von Unwerth, T., Götze, U.: „*Wasserstoff-Verbrennungsmotor als alternativer Antrieb-Metastudie*“, NOW GmbH- Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, 2021.
- [74] Schutting, E., Roiser, S., Eichlseder, H., Lux, S., Kleiber, S.: „*Hydrogen Engine Exhaust Aftertreatment*“, in 43rd International Vienna Motor Symposium. Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik, Ausgabe 2, 2022, ISBN 978-3-9504969-1-8.
- [75] Schutting, E.: „*RCD⁺ Method for Accelerated EAS Cold Start Cycle Measurements: FFG Success Story*“, RC-LowCAP Research Center for Low Carbon Special Powertrain, 2021, https://www.ffg.at/sites/default/files/allgemeine_downloads/strukturprogramme/COMET/Success_Stories_Projekte_DE/20210311_RC-LowCAP_SuccessStory_DE_RCDplus_de.pdf, Abgerufen am 06.12.2022.
- [76] Schweighofer, B., Wegleiter, H., Recheis, M., Fulmek, P.: „*Fast and Accurate Battery Model applicable for EV and HEV Simulation*“, IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2012, doi:10.1109/I2MTC.2012.6229525, S. 565 – 570.
- [77] Schweitzer, A.: „*Formelsammlung und Berechnungsprogramme Maschinen- und Anlagenbau*“, https://www.schweizer-fn.de/stoff/start_stoff.php, Abgerufen am 20.10.2022.

- [78] Schwimmbeck, S., Schröder, P., Buchner, Q., Herzog, H.G.: „*Modeling the Dynamic Behavior of 12V AGM Batteries and its Degradation*“, 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2019, doi:10.1109/VPPC46532.2019.8952242, S. 1 – 6.
- [79] Seboldt, D., Mansbart, M., Grabner, P., Eichlseder, H.: „*Wasserstoffmotoren für zukünftige PKW und leichte Nutzfahrzeuge*“, MTZ – Motortechnische Zeitschrift 82, Ausgabe 2, 2016, S. 46 – 51.
- [80] Sepasi, S.: „*Adaptive state of charge estimation for battery packs*“, Dissertation, 2014.
- [81] Shaw, B. T.: „*A simplified coldstart catalyst thermal model to reduce hydrocarbon emissions*“, IFAC Proceedings Volumes, Band 35, Ausgabe 1, 2002, doi:10.3182/20020721-6-ES-1901.01519.
- [82] Shen, W., Lo, E.W., Chau, K.T.: „*Adaptive neuro-fuzzy modeling of battery residual capacity for electric vehicles*“, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Band 49, Ausgabe 3, 2002, doi:10.1109/TIE.2002.1005395, S. 677 – 684.
- [83] Shrestha, S., Harold, M.P., Kamasamudram, K., Kumar, A., Olsson, L., Leister, K.: „*Selective oxidation of ammonia to nitrogen on bi-functional Cu-SSZ-13 and Pt/Al₂O₃ monolith catalyst*“, Catalyst Today, Ausgabe 267, 2016, doi:10.1016/j.cattod.2015.11.035, S. 130 – 144.
- [84] Singh, A.P., Pal, A., Agarwal, A.K.: „*Comparative particulate characteristics of hydrogen, CNG, HCNG, gasoline and diesel fueled engines.*“, Fuel, Band 185, 2016, doi:10.1016/j.fuel.2016.08.018, S. 491 – 499.
- [85] Skottene, M., Rian, K.E.: „*A study of NO_x formation in hydrogen flames*“, Internal Journal of Hydrogen Energy, Band 32, Ausgabe 15, 2007, doi:10.1016/j.ijhydene.2007.02.038, S. 3572 – 3585.
- [86] Stadlhofer, W.: „*Aufbau eines SCR-Prüfstandes am Transientenprüfstand der TU-Graz*“, Diplomarbeit, 2007.
- [87] Stiesch, G., Eiglmeier, C., Merker, G., Wirbeleit, F.: „*Möglichkeiten und Anwendung der phänomenologischen Modellbildung im Dieselmotor*“, MTZ – Motortechnische Zeitschrift 60, Ausgabe 4, 1999, S. 274 – 283.
- [88] Tietge, U., Dornoff, J., Diaz, S., Mock, P., Allekotte, M., Heidt, C., Knörr, W., Althaus, H.J., Notter, B., Oberpriller, Q., Läderach, A., Hausberger, S., Matzer, C., Eisenmann, C., Kuhnimhof, T.: „*Erarbeitung einer Methode zur Ermittlung der CO₂-Emissionen des Kfz-Verkehrs: Abschlussbericht(UBAFB000242)*“, Umweltbundesamt: Texte 2020-231, 2020.

-
- [89] Toprakci, O., Toprakci, H.A.K., Ji, L., Zhand, X.: „*Fabrication and Electrochemical Characteristics of LiFePO₄ Powders for Lithium-Ion Batteries*“, KONA Powder and Particle Journal, Ausgabe 28, 2010, doi:10.1002/chin.201143199, S. 123 – 132.
- [90] Trembley, O., Dessaint, L.A.: „*Experimental Validation of Battery Dynamic Model for EV Applications*“, World Electric Vehicle Journal, Band 9, Ausgabe 3, 2009, doi:10.3390/wevj3020289, S. 289 – 298.
- [91] Tschöke, H., Mollenhauer, K., Maier, R.: „*Handbuch Dieselmotoren*“, Springer Vieweg Wiesbaden, 4.Auflage, 2018, ISBN 978-3-658-07696-2.
- [92] Tsokolis, D., Tsiakmakis, S., Dimaratos, A., Fontaras, G., Pistikopoulos, P., Ciuffo, B., Samaras, Z.: „*Fuel Consumption and CO₂ emissions of passenger cars over the New Worldwide Harmonized Test Protocol*“, Applied Energy, Band 179, 2016, doi:10.1016/j.apenergy.2016.07.091, S. 1152 – 1165.
- [93] Theuerkauf, H., Schmidt, M.: „*Ein neues Energiemanagement-Konzept für das elektrische Bordnetz*“, ATZ-Autotechnische Zeitschrift, Band 109, Ausgabe 1, 2007, doi:10.1007/BF03221854, S. 10 – 15.
- [94] Vishnumurthy, K. A., Girish, K.H.: „*A comprehensive review of battery technology for E-mobility*“, Journal of the Indian Chemical Society, Band 98, Ausgabe 10, 2021, doi:10.1016/j.jics.2021.100173.
- [95] Vonkeman, K. A., Jonkers, G., Van Santen, R.A.: „*Studies to the functioning of automotive exhaust catalysts using in-situ positron emission tomography*“, SAE Technical Paper 910843, 1991, doi:10.4271/910843.
- [96] Waldhelm, A., Beidl, C., Spurk, P., Noack, H.-D., Brück, R., Konieczny, R., Brugger, M.: „*Aktives Temperaturmanagement in SCR-Systemen - Anwendungsmöglichkeiten und Betriebsstrategien des elektrisch beheizbaren Katalysators EmiCat.*“, Emission Control Dresden, 2010.
- [97] Walter, S., Hagen, G., Koch, D., Geißelmann, A., Moos, R.: „*On the Suitability of NO_x-Storage-Catalysts for Hydrogen Internal Combustion Engines and a Radio Frequency-Based NO_x Loading Monitoring*“, Topics in Catalysis, 2022, doi:10.1007/s11244-022-01727-x.
- [98] Wancura, H., Kühberger, G., Gamper, B.: „*Verfahren zur beschleunigten Konditionierung eines Verbrennungsmotorsystems vor Durchführung eines Kaltstartemissionstests*“, Österreichisches Patentamt, 2021, A 50650/2021.
- [99] Wang, J., Chen, Q., Cao, B.: „*Support vector machine based battery model for electric vehicles.*“, Energy Conversion and Management, Band 47, Ausgabe 7-8, 2006, doi:10.1016/j.enconman.2005.06.013, S. 858 – 864.

- [100] Wengenmeyer, R., Fendt, T.: *„Eine volle Ladung Energie - Elektrisierende Ideen für leistungsfähigere Akkus“*, Techmax, Ausgabe 13, 2022.
- [101] Xu, B., Oudalov, A., Ulbig, A., Andersson, G., Kirschen, D.S.: *„Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment“*, IEEE Transactions on Smart Grid, Band 9, Ausgabe 2, 2018, doi:10.1109/TSG.2016.2578950.
- [102] Zhou, X., Zhang, B., Zhao, H., Shen, W., Kapoor, A.: *„State of Charge Estimation Based On Improved Li-ion Battery Model Using Extended Kalman Filter“*, 2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013, doi:10.1109/ICIEA.2013.6566440, S. 607 – 612.

Anhang

A Berechnung der Harnstoff-Eindosiermenge

Die Berechnung basiert auf [86]. Durch Summierung von Gleichung 2.2 (Thermolyse) und 2.3 (Hydrolyse) aus Abschnitt 2.1.3, ergibt sich die Gesamtreaktion der Ammoniakbereitstellung durch AdBlue[®]-Eindosierung nach Gleichung 6.1 [86].



Aus 1 mol Harnstoff $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ entstehen also bei vollständiger Reaktion 2 mol NH_3 . Durch einen 32,5 %-igen $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ -Massenanteil der wässrigen Harnstofflösung, ergibt sich bei einer Mindest-Eindosiermenge von 10 mg/s AdBlue[®] ein NH_3 -Volumenstrom von 1,843 mg/s.

Die Berechnung des NO_x -Massenstromes erfolgt auf Basis des molaren ANR-Verhältnisses nach Gleichung 6.2 [86]. Durch einsetzen der molaren Massen, sowie durch Umformung, kann der NO_x -Massenstrom berechnet werden. Für die molare Masse der Stickoxide ist jene von Stickstoffdioxid NO_2 einzusetzen [71].

$$\text{ANR} = \frac{\dot{m}_{\text{NH}_3}}{\dot{m}_{\text{NO}_x}} = \frac{\overline{M}_{\text{NH}_3}}{\overline{M}_{\text{NO}_x}} \quad (6.2)$$

B Thermische Simulation

Geometrische Angaben

Tabelle A.1: Geometrische Abmessungen des Heizkatalysators

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Gehäuse-Außendurchmesser	$d_{\text{aussen_EHC}}$	146	mm
Gehäuse-Innendurchmesser	$d_{\text{innen_EHC}}$	143	mm
Gesamtlänge des EHC's	l_{EHC}	82	mm
Gesamte Substratlänge des EHC's	$l_{\text{EHC_substrat}}$	55	mm
Länge des Anschlusszapfens	$l_{\text{zapfen_EHC}}$	3,5	mm
Durchmesser des Anschlusszapfens	$d_{\text{zapfen_EHC}}$	8	mm
Länge des Cannings der ersten Scheibe	$l_{\text{canning_1}}$	27	mm
Länge des Substrates der ersten Scheibe	$l_{\text{substrat_1}}$	9	mm
Länge der Scheiben für das Substrat	l_{Scheibe}	7,9	mm
Länge einer Substratzelle	l_{Zelle}	1,08	mm
Höhe einer Substratzelle	h_{Zelle}	1,08	mm
Foliendicke des Substrats	b_{EHC}	40	μm
Dicke der Isolierschicht	$b_{\text{EHC_isolierung}}$	300	μm
Zellendichte	-	600	cpsi
Zellenanzahl	Z_{anzahl}	14.937	#
Masse des EHC's	m_{EHC}	1,329	kg

Tabelle A.2: Geometrische Abmessungen des Leercannings

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Länge	$l_{\text{leercanning}}$	130	mm
Aussendurchmesser	$d_{\text{a_leercanning}}$	139	mm
Innendurchmesser	$d_{\text{i_leercanning}}$	132	mm
Masse	$m_{\text{leercanning}}$	1,695	kg

Tabelle A.3: Geometrische Abmessungen des Abgasrohrs vEHC

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Länge	$l_{\text{abgasrohrvEHC}}$	110	mm
Aussendurchmesser	$d_{\text{a_abgasrohr_vEHC}}$	76	mm

Fortsetzung nächste Seite ...

Tabelle A.3: Geometrische Abmessungen des Abgasrohrs vEHC (... *Fortsetzung*)

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Innendurchmesser	$d_{i_abgasrohr_vEHC}$	73	mm
Masse	$m_{abgasrohr_vEHC}$	1,645	kg

Tabelle A.4: Geometrische Abmessungen des Abgasrohrs nEHC

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Länge	$l_{abgasrohrnEHC}$	185	mm
Aussendurchmesser	$d_{a_abgasrohr_nEHC}$	76	mm
Innendurchmesser	$d_{i_abgasrohr_nEHC}$	73	mm
Masse	$m_{abgasrohr_nEHC}$	1,309	kg

Tabelle A.5: Geometrische Daten von Flanschen, Isolierscheiben und Verschraubung

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Aussendurchmesser Flansch	$d_{a_flansch}$	200	mm
Innendurchmesser Flansch-EHC	$d_{i_flansch_EHC}$	143	mm
Innendurchmesser Flansch-Abgassystem	$d_{i_flansch_agsys}$	139	mm
Flanschdicke	$b_{flansch}$	8	mm
Flanschmasse-EHC	$m_{flansch_EHC}$	0,086	kg
Flanschmasse-Abgassystem	$m_{flansch_agsys}$	0,095	kg
Aussendurchmesser Isolierscheibe	$d_{i_isolierscheibe}$	200	mm
Innendurchmesser Isolierscheibe	$d_{a_isolierscheibe}$	160	mm
Dicke Isolierscheibe	$b_{isolierscheibe}$	2	mm
Verschraubung	$d_{schraube} \times l_{schraube}$	M6 x 25	mm
Masse der Verschraubung	$m_{verschraubung}$	0,19	kg
Anzahl der Verschraubungen je Flansch	$Z_{schrauben}$	6	#

Thermodynamische Größen und Stoffwerte

Tabelle A.6: Stoffwerte [48, 77]

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Spezifische Wärmekapazität Luft	$c_{p,luft}$	1004,6	J/(kg K)
Spezifischer Heizwert von H ₂	H_{u,H_2}	119,96	MJ/kg
Molare Masse Luft	M_{Luft}	28,964	kg/kmol
Molare Masse H ₂	M_{H_2}	2,016	kg/kmol
Molare Masse NO ₂	M_{NO_2}	46,010	kg/kmol
Molare Masse NH ₃	M_{NH_3}	17,031	kg/kmol
Spezifische Wärmekapazität Abgas	$c_{p,abgas}$	1070,6	J/(kg K)
Spezifische ideale Gaskonstante Abgas	R_{abgas}	298,6	J/(kg K)
Molare Masse Abgas	M_{abgas}	27,845	kg/kmol

Die Bestimmung der Stoffwerte für das Abgas wurde in Kapitel 4.1.5 erläutert.

Tabelle A.7: Kennzahlen des Wärmeübergangs

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Wärmeübergangskoeffizient Abgas-Substrat	$\alpha_{substrat_abgas}$	200	W/(m ² K)
Wärmeübergangskoeffizient Abgas-Leercanning	$\alpha_{leercanning_abgas}$	35	W/(m ² K)
Wärmeübergangskoeffizient Abgas-Abgasrohr	$\alpha_{abgasrohr_abgas}$	80	W/(m ² K)
Wärmeübergangskoeffizient Canning-Umgebung	$\alpha_{canning_umgebung}$	3,3	W/(m ² K)
Wärmeleitfähigkeit Isolierschicht bei 20 °C	$\lambda_{isolierschicht}$	0,065	W/(m K)
Verzugszeit EHC-Scheiben	$t_{vz_scheiben}$	1	Sim.-Hold
Verzugszeit Abgasystemkomponenten	t_{vz_komp}	0,3	s

Die in Tabelle A.7 dargestellten Werte sind aus der Literatur abgeleitet. Deren Bestimmung, beziehungsweise die Literaturstellen, sind Kapitel 4.1.9 zu entnehmen.

Werkstoffdaten

Tabelle A.8: Werkstoffdaten von legiertem Stahl für Abgasrohre und Leercanning [48, 77]

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
spezifische Wärmekapazität bei 20 °C	c_{stahl}	502	J/(kg K)
Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C	λ_{stahl}	15	W/(m K)
Dichte	ρ_{stahl}	7700	kg/dm ³

Die Werte entsprechen aufgrund fehlender Dokumentation bezüglich des Abgassystems gemittelten Werten aus der Literatur.

Tabelle A.9: Werkstoffdaten von X3CrTi17 für den Heizkatalysator [55]

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
spezifische Wärmekapazität bei 20 °C	c_{EHC}	460	J/(kg K)
Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C	λ_{EHC}	25	W/(m K)
Dichte	ρ_{EHC}	7700	kg/dm ³

C Batteriemodell

Berechnungsmethodik aus [62]

Berechnung des Serienwiderstandes R_s

$$R_s = \begin{cases} R_{s,\text{entladen}} & I \geq 0 \text{ für entladen} \\ R_{s,\text{laden}} & I < 0 \text{ für laden} \end{cases} \quad (6.3)$$

$$R_{s,\#} = R_{s0,\#} \cdot e^{\frac{T_{\text{ref},R_s,\#}}{T_m - T_{\text{shift},R_s,\#}}} \quad (6.4)$$

Berechnung des Widerstandes R_1

$$R_1 = \begin{cases} R_{1,\text{entladen}} & I \geq 0 \text{ für entladen} \\ R_{1,\text{laden}} & I < 0 \text{ für laden} \end{cases} \quad (6.5)$$

$$R_{1,\#} = (R_{10,\#} + R_{11,\#} \cdot (SoC) + R_{12,\#} \cdot (SoC)^2) \cdot e^{\frac{T_{\text{ref},R_1,\#}}{T_m - T_{\text{shift},R_1,\#}}} \quad (6.6)$$

Berechnung des Widerstandes R_2

$$R_2 = \begin{cases} R_{2,\text{entladen}} & I \geq 0 \text{ für entladen} \\ R_{2,\text{laden}} & I < 0 \text{ für laden} \end{cases} \quad (6.7)$$

$$R_{2,\#} = (R_{20,\#} + R_{21,\#} \cdot (SoC) + R_{22,\#} \cdot (SoC)^2) \cdot e^{\frac{T_{\text{ref},R_2,\#}}{T_m}} \quad (6.8)$$

Berechnung der Kapazität C_1

$$C_1 = \begin{cases} C_{1,\text{entladen}} & I \geq 0 \text{ für entladen} \\ C_{1,\text{laden}} & I < 0 \text{ für laden} \end{cases} \quad (6.9)$$

$$C_{1,\#} = C_{10,\#} + C_{11,\#} \cdot (SoC) + C_{12,\#} \cdot (SoC)^2 + T_m \cdot (C_{13,\#} + C_{14,\#} \cdot (SoC) + C_{15,\#} \cdot (SoC)^2) \quad (6.10)$$

Berechnung der Kapazität C_2

$$C_2 = \begin{cases} C_{2,\text{entladen}} & I \geq 0 \text{ für entladen} \\ C_{2,\text{laden}} & I < 0 \text{ für laden} \end{cases} \quad (6.11)$$

$$C_{2,\#} = C_{20,\#} + C_{21,\#} \cdot (SoC) + C_{22,\#} \cdot (SoC)^2 + T_m \cdot (C_{23,\#} + C_{24,\#} \cdot (SoC) + C_{25,\#} \cdot (SoC)^2) \quad (6.12)$$

Parametertabellen aus [62]

Tabelle A.10: Parametertabelle für R_s aus [62]

$R_{s0,entladen}$ 0,0048	$T_{ref,R_s,entladen}$ 31,0494	$T_{shift,R_s,entladen}$ -15,3253
$R_{s0,laden}$ 0,0055	$T_{ref,R_s,laden}$ 22,2477	$T_{shift,R_s,laden}$ -11,5943

Tabelle A.11: Parametertabelle für R_1 aus [62]

$R_{10,entladen}$ 7,1135E-04	$R_{11,entladen}$ -4,3865E-04	$R_{12,entladen}$ 2,3788E-04	$T_{ref,R_1,entladen}$ 347,4707	$T_{shift,R_1,entladen}$ -79,5816
$R_{10,laden}$ 0,0016	$R_{11,laden}$ -0,0032	$R_{12,laden}$ 0,0045	$T_{ref,R_1,laden}$ 159,2819	$T_{shift,R_1,laden}$ -41,4548

Tabelle A.12: Parametertabelle für R_2 aus [62]

$R_{20,entladen}$ 0,0288	$R_{21,entladen}$ -0,073	$R_{22,entladen}$ 0,0605	$T_{ref,R_2,entladen}$ 16,6712
$R_{20,laden}$ 0,0113	$R_{21,laden}$ -0,027	$R_{22,laden}$ 0,0339	$T_{ref,R_2,laden}$ 17,0224

Tabelle A.13: Parametertabelle für C_1 aus [62]

$C_{10,entladen}$ 335,4518	$C_{11,entladen}$ 3,1712E03	$C_{12,entladen}$ -1,3214E03	$C_{13,entladen}$ 53,2138	$C_{14,entladen}$ -65,4786	$C_{15,entladen}$ 44,3761
$C_{10,laden}$ 523,215	$C_{11,laden}$ 6,4171E03	$C_{12,laden}$ -7,5555E03	$C_{13,laden}$ 50,7107	$C_{14,laden}$ -131,2298	$C_{15,laden}$ 162,4688

Tabelle A.14: Parametertabelle für C_2 aus [62]

$C_{20,entladen}$ 3,1887E04	$C_{21,entladen}$ -1,1593E05	$C_{22,entladen}$ 1,0493E05	$C_{23,entladen}$ 60,3114	$C_{24,entladen}$ 1,0175E04	$C_{25,entladen}$ -9,5924E03
$C_{20,laden}$ 6,2449E04	$C_{21,laden}$ -1,055E05	$C_{22,laden}$ 4,4432E04	$C_{23,laden}$ 198,9753	$C_{24,laden}$ 7,5621E03	$C_{25,laden}$ -6,9365E03

Konstanten-Batteriemodell

Tabelle A.15: Konstanten des Batteriemodells

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Batteriezellen parallel (= 1 pack)	Z_{parallel}	45	#
Batteriezellenpacks seriell	Z_{seriell}	4	#
Nominale Kapazität einer Zelle	C_{Zelle}	2,3	Ah
Gesamtkapazität der Batterie	C_{gesamt}	103,5	Ah
Nominale Spannung einer Zelle	V_{nominal}	3,3	V
Ladespannung	V_{laden}	14,3	V
Entladeschlussspannung einer Zelle	$V_{\text{cutoffzelle}}$	2	V
Mindest-SoC	SoC_{min}	0,25	-
Maximaler-SoC	SoC_{max}	0,85	-
Zulässige C-Rate	$\text{CRate}_{\text{max,zul}}$	2,25	1/h
Maximaler Generatorstrom	$I_{\text{max_generator}}$	200	A
Maximal zulässige EHC-Temperatur	$T_{\text{max,EHC}}$	700	°C
EHC-Wartezeit nach dem Ausschalten	$t_{\text{hold,EHC}}$	1	s
Effektiver Generatorwirkungsgrad	$\eta_{\text{generator}}$	0,8	-
Effektiver Motorwirkungsgrad	η_e	0,25	-
Maximale EHC-Heizleistung	$P_{\text{EHC,max}}$	3000	W
Nebenverbraucherleistung-Start	$P_{\text{NV_start}}$	2200	W
Nebenverbraucherleistung-Normalbetrieb	$P_{\text{NV_betrieb}}$	1000	W
Nebenverbraucherleistung-Stillstand	$P_{\text{NV_stillstand}}$	500	W
Startbetriebsdauer nach Motorstart	$t_{\text{start_motor}}$	300	s

D Eingesetzte Software

- Matlab R2022a von MathWorks zur Simulation und Aufbereitung der Messdaten
- Excel 2016 von Microsoft zur Datenauswertung
- UniPlot R2021.1 zur Erstellung von Diagrammen
- Citavi 6 zum Literaturmanagement
- LaTeX in TeXstudio 4.3.1 zur Erstellung der schriftlichen Fassung