

**Simulationsgestützte Potentialabschätzung eines variablen Ventiltriebs für
die Regeneration von Diesel NO_x-Speicherkatalysatoren unter
RDE-Bedingungen**

**Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung**

Vorgelegt von

**Markus Maul
aus Ludwigsburg**

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. M. Bargende

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. F. Atzler

Tag der mündlichen Prüfung: 17.05.2023

Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart
der Universität Stuttgart

2023

Vorwort

Die hier vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) der Universität Stuttgart. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende für die Unterstützung und die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit sowie für die Übernahme des Hauptreferates. Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Atzler danke ich herzlich für das entgegengebrachte Interesse an dieser Arbeit und für die Übernahme des Koreferates.

Außerdem bedanke ich mich beim Kollegium des Institutes für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) sowie des Forschungsinstitutes für Kraftfahrzeuge und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS) für das gute und anregende Arbeitsklima. Insbesondere bei meinem Vorgesetzten Herrn Dr.-Ing. Michael Grill bedanke ich mich für seine fachliche Unterstützung und Betreuung.

Des Weiteren möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Christine Burkhardt für die Übernahme der Leitung des begleitenden FVV-Projekts bedanken.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Projektpartner Michael Brotz, M. Sc. für die hervorragende Zusammenarbeit und die anregenden Diskussionen.

Ich möchte mich auch für die Zusammenarbeit mit meinen Studierenden und dadurch die Unterstützung in diesem Forschungsprojekt bedanken.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie, meinen Freunden und allen, die mich in den letzten Jahren bei diesem Projekt unterstützt haben, bedanken. Mein besonderer Dank gilt auch allen Teilnehmern des Korrekturlesewettbewerbs und ich gratuliere dem Gewinner, meinem Opa Bernd Müller.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	V
Inhaltsverzeichnis.....	VI
Abbildungsverzeichnis.....	XI
Tabellenverzeichnis.....	XV
Abkürzungsverzeichnis.....	XVII
Symbolverzeichnis.....	XIX
Abstract.....	XXIII
Kurzfassung.....	XXIX
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen und Stand der Technik.....	5
2.1 Dieselmotorische Verbrennung und Abgase.....	5
2.1.1 Stickoxide (NO _x).....	7
2.1.2 Kohlenstoffmonoxid (CO).....	8
2.1.3 Kohlenwasserstoffe (HC).....	9
2.1.4 Kohlenstoffdioxid (CO ₂).....	9
2.2 Maßnahmen zur Emissionsminderung.....	10
2.3 Variabler Ventiltrieb am Dieselmotor.....	12
2.4 NO _x -Speicherkatalysator.....	13
2.4.1 Verwendung von NO _x -Speicherkatalysatoren.....	15
2.4.2 Funktionsweise NO _x -Speicherkatalysator.....	17
2.4.3 Regenerationsstrategie.....	20
3 Modellbeschreibung.....	25
3.1 Versuchsträger.....	25
3.2 Strömungsmodell.....	28
3.3 Brennverlauf.....	29
3.3.1 Modellbeschreibung.....	29
3.3.2 Validierung Brennverlauf.....	32

3.4	Rohemissionsmodellierung	34
3.4.1	Magerbetrieb	35
3.4.2	Regenerationsbetrieb	40
3.5	Speicherkatalysator	42
3.5.1	Modellbeschreibung	42
3.5.2	Validierung	44
3.6	Real Driving Emissions - RDE	45
3.6.1	Motivation und Gesetzliche Rahmenbedingungen	45
3.6.2	Streckenfindung	48
3.6.3	Messtechnik für Fahrzyklenaufzeichnung	51
3.6.4	Verwendete Messtechnik	54
3.6.5	Messkampagne und Fahrprofile	56
3.6.6	Routengenerierung aus Datenpool	59
4	Untersuchung von Randbedingungen für den NSK-Betrieb	61
4.1	Einfluss von VVT auf den NSK-Regenerationsbetrieb	61
4.1.1	Applikation thermodynamisches Motormodell	61
4.1.2	Kraftstoffverbrauch	66
4.1.3	Temperatur	68
4.1.4	Emissionen	69
4.1.5	AGR-Art Zusammenfassung	70
4.2	Einflüsse von Schaltstrategie und Strecke auf NSK-Temperatur... ..	71
4.2.1	Ableitung des kennfeldbasierten Motormodell während des Magerbetriebs	71
4.2.2	Route	73
4.2.3	Schaltstrategie	76
5	Untersuchungen zum NSK-Umsatzverhalten	81
5.1	Konstanter Betriebspunkt	81
5.1.1	Variation Temperatur während Regenerationsbetrieb	83
5.1.2	Variation Temperatur während Magerbetrieb	85
5.1.3	Variation Dauer des Regenerationsbetriebs	86
5.1.4	Variation Periodendauer	88
5.1.5	Parameterstudie Ergebnis	89

5.2	Dynamischer RDE-Betrieb.....	89
5.2.1	Ableitung des kennfeldbasierten Motormodell während des Regenerationsbetriebs	91
5.2.2	Konstantes Regenerationsintervall.....	92
5.2.3	Hohe Motorlast	94
5.2.4	Hohe Temperatur und hohe Motorlast	95
5.2.5	Maximale Temperaturen	97
5.2.6	Regenerationszeitpunkte Ergebnis	99
6	Regenerationsstrategie und VVT-Potentialanalyse	103
6.1	Sensitivitätsanalyse Regenerationsstrategie	103
6.1.1	Regenerationsdauer.....	105
6.1.2	Stickoxid-Beladung des Speicherkatalysators	107
6.1.3	Heizen	109
6.1.4	Sauerstoffkonzentration während der Regeneration	111
6.1.5	Freigabetemperatur	113
6.1.6	Freigabelast.....	115
6.2	Zusammenfassung Sensitivitätsanalyse	117
6.3	Validierung Regenerationsstrategie	118
6.4	Potentialanalyse VVT während RDE-Fahrt.....	121
7	Zusammenfassung	129
	Literaturverzeichnis	133
	Anhang	147
A.1	Streckenverläufe	147
A.2	RDE-Fahrprofile	150
A.3	Kennfeldbasiertes Motormodell während des Regenerationsbetriebs	151

Abbildungsverzeichnis

2.1	Entstehungsbereich von Schadstoffen in einem heterogenen Gemisch [91]	6
2.2	Aufbau eines typischen Abgaskatalysators [66]	14
2.3	NO _x -Reduzierungsleistung über Temperatur [17].....	16
2.4	Mechanismus NO _x -Speicherung und Regeneration nach [100].....	20
2.5	Schematische Möglichkeiten zur Reduktion des Kraftstoffmehrerbrauchs im Regenerationsbetrieb nach [74]	21
2.6	Beispielhafte chemische Gleichgewichtszusammensetzung (p = 20 bar, T = 2 000 K, C _{13,5} H _{23,6}) nach [36].....	23
3.1	Schematische Motordarstellung	26
3.2	Darstellung der Schaltzeitpunkte in Abhängigkeit von Fahrzeuggeschwindigkeit und Gaspedalstellung verschiedener Schaltstrategien ..	28
3.3	Das thermodynamische System Brennraum	30
3.4	Validierung des Brennverlaufs bei Magerbetrieb	33
3.5	Validierung des Brennmodells bei Magerbetrieb	34
3.6	Schema des Zweizonen-NO-Modells [54]	37
3.7	Schema der Erweiterung nach Kaal [48]	37
3.8	Validierung NO- und NO ₂ -Modell	39
3.9	Validierung CO-, H ₂ - und HC-Modell	41
3.10	Schematische Darstellung des NO _x -Speichermodells (NSK-Modells) nach Rafigh [77]	43
3.11	Validierung des NSK-Modells	44
3.12	Emissionsgrenzwerte EU 1 bis 6 [91]	45
3.13	Schematische Darstellung Routenplanung	50
3.14	Prinzip von differentiellem GPS nach [86].....	52
3.15	Geschwindigkeits- und Höhenverlauf der RDE-Fahrprofile	57
3.16	Dynamikkriterien RDE-Fahrprofile und Testzyklen	58
4.1	Ergebnis Applikation Magerbetrieb, NO _x -Konzentration und NO ₂ /NO _x -Verhältnis über Motorlast und -drehzahl.....	63
4.2	Brennverlauf bei Regenerationsbetrieb	65

4.3	Effektiver Mitteldruck, indizierter Hochdruck- und Ladungswech- selmitteldruck sowie eingespritzte Kraftstoffmasse über der Zeit bei Betriebsartenwechsel, Variation der AGR-Art	67
4.4	Lambda, Frischluft und Abgasmassenstrom über der Zeit bei Be- triebsartenwechsel, Variation der AGR-Art	68
4.5	Temperatur bei Zyklusbeginn, Zyklusende und vor NSK über der Zeit bei Betriebsartenwechsel, Variation der AGR-Art	69
4.6	Abgasmassenstrom, CO-, H ₂ - und C ₃ H ₆ -Konzentration bei Be- triebsartenwechsel, Variation der AGR-Art	70
4.7	Schematische Darstellung der verwendeten Simulationsmodelle und deren Interaktion	72
4.8	Betriebspunkt-Histogramm einer kompletten RDE-Fahrt bei ver- schiedenen RDE-Routen.....	74
4.9	Zeitlicher Verlauf von Temperatur, NO _x -Emissionen und Kraft- stoffverbrauch bei verschiedenen RDE-Fahrten	75
4.10	Betriebspunkt-Histogramm des Stadtabschnitts von verschiedenen RDE-Routen	76
4.11	Betriebspunkt-Histogramm einer kompletten RDE-Fahrt mit ver- schiedenen Schaltstrategien.....	77
4.12	Zeitlicher Verlauf von Temperatur, NO _x -Emissionen und Kraft- stoffverbrauch mit verschiedenen Schaltstrategien.....	78
5.1	Randbedingungen: Temperatur Regeneration und Mager, Dauer Regeneration und Periode	82
5.2	NO _x -, H ₂ -, CO- und C ₃ H ₆ -Konvertierungsraten mit NSK-Modell; Variation Temperatur während Regenerationsbetrieb	83
5.3	NO _x -, H ₂ -, CO- und C ₃ H ₆ -Konvertierungsraten mit NSK-Modell; Variation Temperatur während Magerbetrieb.....	85
5.4	NO _x -, H ₂ -, CO- und C ₃ H ₆ -Konvertierungsraten mit NSK-Modell; Variation Dauer Regenerationsbetrieb.....	87
5.5	NO _x -, H ₂ -, CO- und C ₃ H ₆ -Konvertierungsraten mit NSK-Modell; Variation Periodendauer	88
5.6	Regenerationszeitpunkte konstantes Zeitintervall	92
5.7	NO _x -, CO-, H ₂ -, C ₃ H ₆ -Konvertierung und Kraftstoffverbrauch; konstantes Regenerationsintervall, variierte Anzahl an Regenera- tionen und variierte Regenerationsdauer	93
5.8	Regenerationszeitpunkte hohe Last	94

5.9	NO _x -, CO-, H ₂ -, C ₃ H ₆ -Konvertierung und Kraftstoffverbrauch; Regeneration unter hoher Motorlast, variierte Anzahl an Regenerationen und variierte Regenerationsdauer	95
5.10	Regenerationszeitpunkte hohe Temperatur und hohe Motorlast	96
5.11	NO _x -, CO-, H ₂ -, C ₃ H ₆ -Konvertierung und Kraftstoffverbrauch; Regeneration unter hoher Temperatur und hoher Motorlast, variierte Anzahl an Regenerationen und variierte Regenerationsdauer	97
5.12	Regenerationszeitpunkte maximale Temperaturen	98
5.13	NO _x -, CO-, H ₂ -, C ₃ H ₆ -Konvertierung und Kraftstoffverbrauch; Regeneration bei maximaler Temperatur, variierte Anzahl an Regenerationen und variierte Regenerationsdauer	99
5.14	NO _x -, CO-, H ₂ -, C ₃ H ₆ -Konvertierung und Kraftstoffverbrauch; variierte Regenerationszeitpunkte, variierte Regenerationsdauer	100
5.15	Spezifische NO _x -, CO-, H ₂ -, C ₃ H ₆ -Emissionen und spezifischer Kraftstoffverbrauch; variierte Regenerationszeitpunkte, variierte Regenerationsdauer	101
6.1	Zeitlicher Verlauf; Variation der Regenerationsdauer	107
6.2	Zeitlicher Verlauf; Variation der Stickoxidbelastung	108
6.3	Zeitlicher Verlauf; Variation der Heizleistung	111
6.4	Zeitlicher Verlauf; Variation der O ₂ -Konzentration	113
6.5	Zeitlicher Verlauf; Variation der Freigabetemperatur	114
6.6	Zeitlicher Verlauf; Variation der Freigabelast	116
6.7	Zusammenfassung RDE-Regenerationsstrategie	117
6.8	Zeitlicher Verlauf, optimierte RDE-Regenerationsstrategie	119
6.9	Ergebnis RDE-Regenerationsstrategie	120
6.10	Zeitlicher Verlauf; Basis und VVT	122
6.11	Ergebnis RDE-Regenerationsstrategie	123
6.12	Zeitlicher Verlauf; ohne und mit VVT, Detailansicht	124
6.13	Zeitlicher Verlauf; Basis und VVT, Detailansicht	125
A1.1	Streckenverlauf Tübingen, Darstellung von [92], Kartenmaterial von [71]	147
A1.2	Streckenverlauf Renningen, Darstellung von [92], Kartenmaterial von [71]	148
A1.3	Streckenverlauf Nordroute, Darstellung von [92], Kartenmaterial von [71]	149

A3.1 Lambda und Temperatur vor NSK über Motorlast und -drehzahl für Mager- und Regenerationsbetrieb	152
A3.2 Konzentration von CO und H ₂ über Motorlast und -drehzahl für Mager- und Regenerationsbetrieb	153
A3.3 Konzentration von NO _x und C ₃ H ₆ über Motorlast und -drehzahl für Mager- und Regenerationsbetrieb	154
A3.4 Kraftstoff- und Luftmasse pro Arbeitsspiel und Abgasmassenstrom über Motorlast und -drehzahl für Mager- und Regenerationsbetrieb ..	155

Tabellenverzeichnis

3.1	Kenndaten des Motors	25
3.2	Kenndaten des Fahrzeugs	27
3.3	Messdaten Bereich	32
3.4	Parametersatz Brennmodell.....	33
3.5	Parametersatz NO-Modell.....	39
3.6	Anforderung an gültige RDE-Fahrt [23, 24, 25, 26, 27]	46
3.7	Kriterien Streckenfindung	48
3.8	Vergleich Höhenmeter verschiedener Kartendienste.....	49
3.9	Vor- und Nachteile verschiedener Messsysteme	54
3.10	Sortierung Messdatenqualität.....	55
4.1	Applikation Regenerationsbetrieb.....	64
5.1	Randbedingungen Parameterstudie Speicherkatalysator.....	81
5.2	Randbedingungen Variation Temperatur während Regenerations- betrieb	83
5.3	Randbedingungen Variation Temperatur während Magerbetrieb	85
5.4	Randbedingungen Variation Dauer des Regenerationsbetriebs	86
5.5	Randbedingungen Variation Periodendauer.....	88
5.6	Randbedingungen dynamischer RDE-Betrieb.....	90
5.7	Aktivierte Regenerationen hohe Temperatur und hohe Motorlast	96
5.8	Aktivierte Regenerationen maximale Temperaturen	98
6.1	Regenerationsstrategie	104
6.2	Sensitivitätsanalyse: beeinflusste Parameter und variierte Größen	105
6.3	Randbedingungen RDE-Sensitivitätsanalyse	105
6.4	Regenerationsstrategie Variation Regenerationsdauer	106
6.5	Regenerationsstrategie Variation Stickoxidbelastung	108
6.6	Regenerationsstrategie Variation Heizleistung	110
6.7	Regenerationsstrategie Variation O ₂ -Konzentration	112
6.8	Regenerationsstrategie Variation Freigabetemperatur	114
6.9	Regenerationsstrategie Variation Freigabelast.....	115
6.10	Regenerationsstrategie Ergebnis	118
6.11	Regenerationsstrategie ohne und mit VVT.....	121

A2.1 RDE-Fahrtkriterien Stadtfokus und Tübingen	150
A2.2 RDE-Fahrtkriterien Nordroute und Renningen	151

Abkürzungsverzeichnis

AGR	Abgasrückführung
BMW	Bayerische Motoren Werke
C ₃ H ₆	Propen
C ₃ H ₈	Propan
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DGPS	Differential GPS
DOC	Diesel Oxidationskatalysator
DPF	Diesel-Partikelfilter
DVA	Druckverlaufsanalyse
EU	Europäische Union
FVV	Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V.
gem.	gemessen
GPS	Global Positioning System
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
HC	Kohlenwasserstoffe
Konv.	Konvertierungsrate
Krst.-verb.	Kraftstoffverbrauch
N ₂	Stickstoff
N ₂ O	Lachgas
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus

NH ₃	Ammoniak
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickoxide
NSK	NO _x -Speicherkatalysator
O ₂	Sauerstoff
OBD	On-Board-Diagnose
OT	oberer Totpunkt
PKW	Personenkraftwagen
PM	Partikelmasse
RDE	Real Driving Emissions
Reg.	Regeneration
RPA	relative positive Beschleunigung
SCR	selektive katalytische Reduktion
sim.	simuliert
Temp.	Temperatur
TWC	Dreiwegekatalysator (eng. three way catalytic converter)
VVT	variabler Ventiltrieb
VW	Volkswagen
WG	Wastegate
WGS	Wassergas Shift Reaktion
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle
°KW	Grad Kurbelwinkel

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

d	Differentialoperator	
g	Schwerebeschleunigung	$\frac{m}{s^2}$
h	Höhe	m
H_a	Enthalpie Auslass	J
H_e	Enthalpie Einlass	J
H_l	Enthalpie Leckage	J
L_{st}	stöchiometrischer Luftbedarf	-
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	$\frac{g}{s}$
m_{DK}	Masse an Drosselklappe	kg
m_{Krst}	Kraftstoffmasse	kg
$m_{vor\ NSK}$	Masse vor Speicherkatalysator	kg
m_z	Zylindermasse	kg
M	Molare Masse	$\frac{kg}{mol}$
n	Motordrehzahl	$\frac{1}{min}$
n_{aus}	Stoffmenge Austritt	mol
n_{ein}	Stoffmenge Eintritt	mol
p	Druck	bar
p_0	Bodendruck	bar
p_{me}	effektiver Mitteldruck	bar
p_{mi}	indizierter Mitteldruck	bar
$p_{mi,HD}$	indizierter Mitteldruck, Hochdruckteil	bar
$p_{mi,LW}$	indizierter Mitteldruck, Ladungswechsel	bar
p_{mr}	Reibmitteldruck	bar
Q_b	Brennwärme	J
Q_w	Wandwärme	J
R	spezifische Gaskonstante	$\frac{J}{kg \cdot K}$
R_{uni}	universelle Gaskonstante	$\frac{J}{mol \cdot K}$
t	Zeit	s

T	Temperatur	K
$T_{nach\ NSK}$	Temperatur nach Speicherkatalysator	$^{\circ}C$
$T_{Mittel, max}$	maximale mittlere Temperatur im Brennraum	$^{\circ}C$
$T_{vor\ NSK}$	Temperatur vor Speicherkatalysator	$^{\circ}C$
$T_{Zyl,ASP\ Ende}$	Temperatur beim Ende eines Arbeitsspiels	$^{\circ}C$
$T_{Zyl,ASP\ Start}$	Temperatur zu Beginn eines Arbeitsspiels	$^{\circ}C$
u	spezifische innere Energie	$\frac{J}{kg}$
U	innere Energie	J
v	Fahrzeuggeschwindigkeit	$\frac{km}{h}$
$v \cdot a_{pos}\{95\}$	95 % Perzentil des Produktes aus Geschwindigkeit und positiver Beschleunigung	
V	Volumen	m^3
W	Arbeit	J
x_{NO_2}	Stoffmengenkonzentration Stickstoffdioxid	-
x_{O_2}	Stoffmengenkonzentration Sauerstoff	-
z	Höhe	m

Griechische Buchstaben

\varnothing	Durchschnitt	
λ	Luft-Kraftstoffverhältnis	-
φ	Kurbelwinkel	$^{\circ}KW$

Chemische Elementsymbole

Ba^I	NO_x -Speicherstelle Nr. 1
Ba^{II}	NO_x -Speicherstelle Nr. 2
Ba^{III}	NO_x -Speicherstelle Nr. 3
$BaCO_3$	Bariumcarbonat
$Ba(NO_3)_2$	Bariumnitrat
C_3H_6	Propen
C_xH_y	Kohlenwasserstoffe
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CeO_2	Cer(IV)-oxid
Ce_2O_3	Cer(III)-oxid
H	Wasserstoff, Element

H_2	Wasserstoff
H_2O	Wasser
HC	Kohlenwasserstoffe
N	Stickstoff, Element
N_2	Stickstoff
NO	Stickstoffmonoxid
NO_2	Stickstoffdioxid
NO_x	Stickoxid
O	Sauerstoff, Element
O_2	Sauerstoff
OH	Hydroxyl-Radikal

Abstract

The quest for clean “zero-emission“ vehicles with internal combustion engines requires emission-safe operation of the engine throughout the entire engine map and during every operating situation. Regulations that are already stringent will become even more demanding and comprehensive in view of future exhaust emission standards, such as Euro 7. The detailed and comprehensive evaluation of new concepts and ideas is therefore essential and important for an overall view, especially in driving situations with low exhaust gas temperature levels, such as those that can occur at low vehicle speeds in city traffic or when driving downhill.

In addition to carbon dioxide (CO_2) and water, the combustion of diesel fuel in an internal combustion engine also produces substances that are mostly undesirable and harmful to health or the environment. These include nitrogen oxides, which are formed at high temperatures from the oxygen and nitrogen contained in the air. Their formation can only be prevented to a limited extent by internal engine measures, making reduction by means of exhaust gas aftertreatment unavoidable. For the desired reactions to take place, however, they require a certain temperature level, which also limits the nitrogen oxide (NO_x) reduction with exhaust gas aftertreatment, especially during cold starts and low ambient conditions.

A Lean NO_x Trap (LNT) has a low light-off temperature and thus shows advantages at low temperatures compared to NO_x reduction using selective catalytic reduction (SCR). The discontinuous operation of the LNT requires a switch of the combustion process to a rich air-to-fuel ratio for its regeneration.

The auto-ignition of the fuel, which is characteristic of the diesel engine combustion process, requires a certain temperature and pressure level, which is derived from the conditions in the combustion chamber at the start of an operating cycle. To ensure reliable ignition during rich operation, the cylinder charge and thus the engine load cannot be reduced at will. This would result

in misfiring and unstable engine running. To counteract this effect, the temperature in the combustion chamber must be raised, for example. To do this, a variable valve train (VVT) is used. By sucking back hot exhaust gas from the exhaust manifold, it generates internal exhaust gas recirculation (EGR) and thus improves combustion stability. As a result, this VVT system can be used to extend the operating range of NSK regeneration to low engine loads. Test bench investigations preceding this work showed that the VVT system can reduce the necessary engine load for regeneration from 1.5 to 1.0 bar.

The aim of this work is to investigate the potential of this VVT system on a passenger car diesel engine regarding the regeneration operation of the LNT and to evaluate it in real operation in terms of emission reduction.

The modeling used for a representative four-cylinder diesel engine combines a one-dimensional description of the fluid mechanical effects, a quasi-dimensional description of the high-pressure part and a reaction kinetic description of the processes in the LNT.

One-dimensional modeling of the gas path represents a good compromise between fast computation time and sufficient accuracy. Especially in combination with a predictive combustion simulation, influences and effects on the boundary conditions of exhaust gas aftertreatment components can be investigated effectively, quickly and with constant boundary conditions. The emission modeling is based on the two-zone combustion simulation and its temperature calculation. Nitrogen monoxide (NO) is modeled via an Arrhenius approach, the concentration of the regeneration agents carbon monoxide (CO) and hydrogen (H₂) are determined via chemical equilibrium. The processes in the LNT are described via a one-dimensional flow simulation coupled with a reaction kinetic approach.

The model setup of the flow path, turbocharger, exhaust aftertreatment components and combustion was calibrated and validated using experimental measurements on a four-cylinder diesel engine. The phenomenological nitrogen monoxide (NO) model was fitted to measured data. A separate modeling approach was developed for nitrogen dioxide (NO₂) and calibrated to measured data. The modeling of carbon monoxide (CO) and hydrogen (H₂) emissions is based on the consideration of chemical equilibrium in the combustion chamber and was found to be valid for the relevant lambda range. For the modeling of

hydrocarbon (HC) emissions, an empirical approach is chosen and parameterized for the rich operating range. The reaction kinetic LNT model is validated using measured data during dynamic operation.

For the full potential assessment, the work can be divided into three parts. In the first part, the thermodynamic full engine model is used to investigate the changed conditions at the NSK during the dynamic changeover of operation caused by using the VVT-System. In the second part, investigations and measurements are carried out on the real driving behavior and a real driving track is generated, which is particularly demanding for the exhaust gas aftertreatment. In the third part, a regeneration strategy is developed and validated with the help of dynamic simulations and map-based longitudinal dynamics models, and thus the potential of the VVT in real operation is evaluated.

As the hot exhaust gas is returned uncooled to the combustion chamber with an internal EGR, the temperature level at the start of an operating cycle is higher compared with an external, cooled EGR. The temperature at the end of an operating cycle is also higher with internal EGR, but the difference is smaller due to higher wall heat losses. The increased movement of the exhaust gas due to the push-out and suck-back increases the heat transfer coefficient in the exhaust manifold and leads to increased heat losses, so that no temperature differences between internal and external EGR can be observed at the low-load operating point examined upstream of the LNT.

The changed temperature level in the combustion chamber leads to changed conditions during the high-pressure phase and thus influences the chemical equilibrium. This increases the concentration of the CO and H₂ regeneration agents in the exhaust gas.

Due to the shorter flow path and the de-throttling effect of internal EGR, the charge load work decreases with the VVT system. At the same effective engine load, this also reduces the indicated work, resulting in lower fuel consumption. At the operating point investigated, the use of VVT shows a lower fuel consumption of 1.5 % compared to the use of external EGR. At a constant air-to-fuel ratio, this also means a lower air mass in the cylinder and a lower exhaust gas mass flow.

To generate realistic and particularly demanding boundary conditions for exhaust gas aftertreatment in the longitudinal dynamic simulations, the representation of real traffic is essential. Various routes are evaluated for their suitability as RDE drives and several routes are measured with the use of GPS. Meeting all RDE criteria has already proven to be a challenge in real-world driving. For example, the requirement to go to lower limits in dynamics and load increases the complexity to such an extent that a different approach is used here. The real drives are divided into sections and in an iterative process real data is assembled to a new virtual profile. In this way, a driving profile is generated which has a long phase with a negative road gradient at the beginning, resulting in very low temperatures in the exhaust system. The driving profiles generated in this way are examined in longitudinal dynamics simulations, with sensitivity analyses showing that the gradient and thus the engine load have the greatest influence on the temperature of the LNT.

The reaction kinetic LNT model used was also found to be valid for operating mode changes with short period durations. The main influences on the chemical behavior of the LNT are investigated and, together with the findings from test bench investigations, a regeneration strategy is developed. This considers the temperature of the LNT, the concentration of regeneration agents, the engine load, and the loading of the LNT.

This regeneration strategy enables automatic initiation and termination of regenerations in dynamic operation. If all criteria are in a permitted value range, a regeneration is triggered; if a criterion falls outside the permitted value range, the regeneration is terminated.

The amount of reducing agents required for a given amount of stored NO_x is provided by regeneration. A low loading of the LNT leads to a high adsorption of NO_x during lean operation and thus to low NO_x emissions. Low loading of the LNT tends to require many and long regenerations. During each regeneration, a certain amount of regenerant passes through the LNT. Thus, there is a trade-off between low NO_x and low CO emissions.

When the regeneration strategy developed was applied to longitudinal vehicle dynamics simulations, sensitivity analyses of the limit values showed that the number of regenerations performed is most strongly limited by the release

temperature. The engine load is only a secondary limitation. With a suitable selection of the regeneration strategy parameters, a low emission level can already be achieved without VVT. The investigation of the VVT, and thus a combined consideration of the findings from the previous thermodynamic investigation and the extended map range, show no noticeable influence on the emission behavior for the low-load section considered.

The existing but minor differences in fuel consumption and emissions of the regeneration agents are due to different regeneration timing. The timing of a regeneration has an influence on the engine operating point and thus on the mass flow at the LNT. This changes the residence time and the chemical processes as well as the additional fuel consumption due to the regeneration. It also influences the timing of subsequent regenerations.

The low influence of the VVT can also be explained by the fact that at low engine loads, the NO_x raw emission level is low anyway and the LNT therefore only rarely needs to be regenerated. At higher engine loads, the NO_x loading of the LNT increases more quickly, but the temperature is then also higher, so that regenerations can be triggered more frequently.

Kurzfassung

Während dem für die Regeneration eines NO_x -Speicherkatalysators (NSK) notwendigen Regenerationsbetrieb wird ein Dieselmotor mit global fettem Luft-Kraftstoffverhältnis betrieben. Das dieselmotorische Brennverfahren benötigt für die kompressionsinduzierte Selbstzündung des Kraftstoffs ein bestimmtes Temperatur- und Druckniveau. Für die Gewährleistung der sicheren Zündung während des fetten Betriebs, kann die Zylinderfüllung und damit die Motorlast nicht beliebig reduziert werden. Zündaussetzer und unruhiger Motorlauf wären die Folge. Um die Temperatur im Brennraum anzuheben, wird in dieser Arbeit ein variabler Ventiltrieb (VVT) untersucht, der durch Zurücksaugen von heißem Abgas aus dem Auslasskrümmer interne Abgasrückführung (AGR) erzeugt und so die Brennstabilität verbessert.

Im Vergleich zu Systemen, die nach dem Prinzip der selektiven katalytischen Reduktion (SCR) arbeiten, kann der NSK bei geringeren Temperaturen Stickoxide (NO_x) einlagern und damit den Emissionsausstoß reduzieren. Dies verschafft ihm Vorteile bei Fahrsituationen mit niedrigem Abgastemperaturniveau, wie sie bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten im Stadtverkehr oder bei der Fahrt bergab auftreten können.

In dieser Arbeit werden die Auswirkungen des VVT auf die Regeneration von PKW-Dieselmotoren untersucht und das Potential in Realfahrzyklen (RDE) bewertet. Die Untersuchungen werden mittels 0D/1D-Simulation eines repräsentativen Vierzylinder Dieselmotors und Längsdynamiksimulation eines C-Segment Mittelklassefahrzeugs durchgeführt. Für die Verbrennungsmodellierung wird eine zweizonige, thermodynamische Hochdruckprozessrechnung mit quasidimensionaler Brennverlaufsmodellierung verwendet auf der die Emissionsmodellierung aufbaut. Stickstoffmonoxid (NO) wird über einen Arrhenius-Ansatz modelliert, die Konzentration der Regenerationsmittel Kohlenstoffmonoxid (CO) und Wasserstoff (H_2) werden über das chemische Gleichgewicht bestimmt. Die Vorgänge im NSK sind über einen reaktionskinetischen Ansatz beschrieben. Mittels am Prüfstand erzeugten Messdaten werden die Simulationsmodelle

kalibriert und für den Verwendungszweck validiert.

Thermodynamischen Untersuchungen des unterstöchiometrischen Motorbetriebs bei niedrigen Lasten bestätigten die Annahme, dass interne AGR das Temperaturniveau zu Beginn eines Arbeitsspiels anhebt. Beim Öffnen der Auslassventile ist das Temperaturniveau immer noch höher, aufgrund von erhöhten Wandwärmeverlusten die Differenz allerdings geringer. Das Ausschleiben und anschließende Zurücksaugen von Abgasen erhöht im Auslasskrümmer zusätzlich den Wandwärmeübergangskoeffizienten und führt zu zusätzlichen Wandwärmeverlusten im Vergleich zum Betrieb mit externer AGR. Nach der Turbine stellt sich in dem untersuchten Betriebspunkt das gleiche Temperaturniveau ein wie mit externer AGR.

Das gesteigerte Temperaturniveau während der Verbrennung verschiebt das chemische Gleichgewicht und führt zu einer höheren Konzentration der Regenerationsmittel CO und H_2 . Durch den kürzeren Weg, welchen das Abgas zurücklegt, um wieder in den Brennraum zu gelangen, und die entdrosselnde Wirkung sinkt mit dem VVT-System die Ladungswechselerarbeit. In dem untersuchten Betriebspunkt führt dies zu einem um 1,5 % geringeren Kraftstoffverbrauch als mit externer AGR. Bei konstantem Luft-Kraftstoffverhältnis bedeutet dies auch eine geringere Luftmasse im Zylinder und einen niedrigeren Abgasmassenstrom.

Validierungsuntersuchungen des reaktionskinetischen NSK-Modells bestätigen, das aus der Literatur erwartete, chemische Verhalten auch bei Betriebsartenwechsel mit kurzen Periodendauern. Auf Basis dieser Untersuchungen wird für die automatisierte Einleitung und Beendigung der NSK-Regeneration eine Regenerationsstrategie entwickelt, welche verschiedene Kriterien berücksichtigt. Hierzu zählen die NO_x -Beladung des NSK, die Temperatur des NSK, die Motorlast und die Regenerationsmittel-Konzentration nach dem NSK. Sind alle Kriterien in einem erlaubten Wertebereich wird eine Regeneration ausgelöst, fällt ein Kriterium aus dem zugelassenen Wertebereich, wird die Regeneration beendet.

Um Betriebsbereiche mit niedriger statistischer Relevanz in Fahrzyklen darzustellen, werden RDE-konforme Fahrprofile anhand von Realfahrdaten erzeugt und in Längsdynamiksimulationen untersucht. Sensitivitätsanalysen zeigen,

dass der Höhenverlauf und damit die Motorlast den größten Einfluss auf die Temperatur des NSK hat.

Als relevantestes Kriterium für geringe NO_x -Emissionen zeigte sich eine niedrige NO_x -Beladung des NSK. Um diese zu erreichen, muss bei dem betrachteten, 2200 s dauernden Fahrzyklus je nach Temperaturniveau und Regenerationszeitpunkten ca. 15 bis 30 s regeneriert werden. Im diesem niederlastigen Stadt-Abschnitt eines RDE-Fahrzyklus zeigt sich, dass die Abgastemperatur in weiten Bereichen unter 200 °C liegt. Das Regenerieren bei niedrigen Temperaturen führt zu hohen CO- und HC-Emissionen, weil diese während der Regeneration nur unvollständig oxidiert werden können. Ohne zusätzliche Heizmaßnahmen muss ein Kompromiss zwischen niedrigen NO_x - und vertretbaren CO- und HC-Emissionen gefunden werden.

Prüfstanduntersuchungen zeigten, dass mit dem VVT-System die notwendige Motorlast für eine Regeneration von 1,5 auf 1,0 bar gesenkt werden kann. Mit Berücksichtigung der Einflüsse des VVT auf Abgasmassenstrom, Regenerationsmittel-Konzentration, Kraftstoffverbrauch und erweitertem Betriebsbereich zeigt sich allerdings kein eindeutiger Vorteil mit VVT. Es zeigte sich, dass durch die Freigabetemperatur die Zahl der durchgeführten Regenerationen am stärksten eingeschränkt wird, eine gesenkte Freigabe-Motorlast ermöglicht kaum mehr Regenerationen. Die vorhandenen, aber geringen Unterschiede beim Kraftstoffverbrauch und den Emissionen der Regenerationsmittel sind auf andere Regenerationszeitpunkte zurückzuführen. Der Zeitpunkt einer Regeneration hat Einfluss auf den Motorbetriebspunkt und damit auf den Massenstrom am NSK. Dadurch ändert sich die Verweildauer und die chemischen Abläufe sowie der Kraftstoffmehrerverbrauch durch die Regeneration. Ebenfalls werden dadurch die Zeitpunkte der folgenden Regenerationen beeinflusst.

1 Einleitung

Die Nutzung fossiler Energieträger seit Beginn der Industrialisierung ermöglichte den Fortschritt, welchem die Menschheit ihren heutigen Wohlstand zu verdanken hat [73]. Beim natürlichen Kohlenstoffkreislauf auf der Erde wird Kohlenstoffdioxid (CO_2) über biologische Prozesse (Photosynthese) mithilfe von Strahlungsenergie der Sonne in organisches Material (bestehend aus Kohlenwasserstoffen) umgewandelt [68]. Lagert sich dieses im Boden ab, entstehen daraus über einen Zeitraum von vielen Millionen Jahren Öl, Kohle oder Gas. Zwischen 1950 und 2010 nutzte die Menschheit so die über Photosynthese gespeicherte Sonnenenergie von geschätzten 50 bis 150 Mio. Jahren [62].

Der über diesen langen Zeitraum abgelagerte Kohlenstoff gelangte durch dessen Verbrennung hauptsächlich als CO_2 wieder in die Atmosphäre, wirkt dort als Treibhausgas und beeinflusst somit die Temperatur der Erdoberfläche. Die Konzentration von CO_2 in der Erdatmosphäre hat sich gegenüber der vorindustriellen Zeit um ca. 40 % erhöht. Die anthropogenen CO_2 -Emissionen sind für ca. 50 % der Energiebilanzveränderung unserer Erde und damit für den Klimawandel verantwortlich. [45]

Das erklärte Ziel der Vereinten Nationen ist es, den Anstieg der mittleren globalen Temperatur auf unter 2°C , idealerweise auf unter $1,5^\circ\text{C}$, zu begrenzen und somit die Folgen des Klimawandels zu verringern [97]. Zur wahrscheinlichen Erreichung des 2°C Ziels ist noch ein Budget von ca. 700 Gt CO_2 (Stand 2020) verfügbar [32, 45]. Bei einem aktuellen weltweiten jährlichen Ausstoß von ca. 35 Gt [32] ist eine schnelle Absenkung des Ausstoßes unerlässlich. Deutschland hat sich daher zum Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2050 Treibhausgas- und damit auch CO_2 -neutral zu werden [96].

An den CO_2 -Emissionen von Deutschland hat der Verkehrssektor im Jahr 2020 einen Anteil von ca. 20 % [96]. Für die Umstellung auf einen CO_2 -neutralen Transportsektor müssen die volkswirtschaftlichen Mobilitätskosten inklusive Kraftstoffherstellung, Aufbau der Verteilerinfrastruktur und die Fahrzeugkosten

berücksichtigt werden. Bei einer Well-to-Wheel Betrachtung mit regenerativ erzeugtem Strom zeigt sich, dass die Kosten für Elektromobilität, Brennstoffzellenantrieb und motorischer Betrieb mit E-Kraftstoffen gleichwertig sein können [30]. Die weitere Entwicklung des Verbrennungsmotors und auch des Dieselmotors können so einen erheblichen Beitrag zum Erreichen dieser Ziele leisten.

Der Dieselmotor stößt jedoch nicht nur CO_2 , sondern auch noch andere Schadstoffe aus. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt auf den Stickoxiden (NO_x) und deren Reduktion mithilfe der Abgasnachbehandlung. Die zwei bekanntesten Verfahren hierfür sind die selektive katalytische Reduktion (SCR), welche vor allem bei höheren Temperaturen hohe De- NO_x -Leistungen erreicht, und der NO_x -Speicherkatalysator (NSK), welcher bei niedrigeren Temperaturen Vorteile hat.

Der Gesetzgeber stellt an den Betrieb und die ausgestoßenen Emissionen von Personenkraftwagen (PKW) immer schärfere Anforderungen. Durch die Einführung von Real Driving Emissions (RDE) wurden die abgedeckten Betriebsbereiche größer und selbst statistisch weniger relevante Motorbetriebspunkte müssen emissionsicher betrieben werden. Da die in der Abgasnachbehandlung ablaufenden Reaktionen und Prozesse ein gewisses Temperaturniveau benötigen, stellt gerade der Kaltstart emissionstechnisch eine Herausforderung dar. Der hohe Wirkungsgrad moderner PKW-Dieselmotoren führt zusätzlich zu niedrigen Abgastemperaturen, weshalb der NSK besonders bei kalten Temperaturen eine gute Möglichkeit bietet, Stickoxide zu reduzieren.

Der für den NSK notwendige Regenerationsbetrieb ist für selbstzündende Dieselmotoren anspruchsvoll, da das Brennverfahren auf ein unterstöchiometrisches Luftverhältnis gesenkt werden muss. Hier sind gerade bei niedrigen Lasten im Hinblick auf Brennstabilität und Laufruhe Grenzen gesetzt. Mithilfe eines variablen Ventiltriebs (VVT) mit zweitem Auslassventilhub kann interne Abgasrückführung (AGR) erzeugt werden. Diese hebt das Temperaturniveau im Brennraum an und die Brennstabilität kann verbessert werden. [12]

Brotz [11] untersuchte das dieselmotorische Brennverfahren für einen niederlastigen NSK-Regenerationsbetrieb. Diese Arbeit baut auf seinen Ergebnissen auf und bewertet simulativ das Potential des VVT mit zweitem Auslassventilhub im

Hinblick auf die **NSK**-Regeneration unter real auftretenden Fahrbedingungen. Dazu werden Simulationsmodelle des Motors und eines Fahrzeugs aufgebaut und validiert, die Lastzustände während **RDE**-Fahrten untersucht und eine Regenerationsstrategie entwickelt.

Für die Untersuchung realistischer Lastzustände werden **RDE**-Fahrten geplant und durchgeführt. Bei der Planung des Streckenverlaufs werden neben den vom Gesetzgeber aufgestellten Anforderungen an das Streckenprofil und die Fahrweise auch weitere für diese Arbeit benötigte Anforderungen berücksichtigt. Während der Fahrt werden die Geschwindigkeit und Höhe im realen Verkehr gemessen. Im anschließenden Post-Processing werden mithilfe von Fahrzeuglängsdynamiksimulationen die während der Fahrt herrschenden Lastzustände des Motors abgeleitet. Hierdurch lässt sich die Relevanz von niedrigen Motorlasten für einen emissionsssicheren Betrieb von Diesel-**PKWs** bewerten.

Thermodynamische Untersuchungen mithilfe eines Vollmotormodells zeigen die Einflüsse des **VVT** auf die Abgasnachbehandlung auf. Verschiedene Betriebsgrößen zur Einleitung einer Regeneration werden einzeln und kombiniert bewertet. Hieraus lassen sich Randbedingungen für einen ganzheitlichen Vergleich ableiten sowie eine Regenerationsstrategie für **PKW**-Dieselmotoren entwickeln. Mit Hilfe dieser Regenerationsstrategie wird abschließend das Potential des **VVT** während **RDE**-Fahrten bewertet und somit können Aussagen über Kraftstoffverbrauch und Emissionsausstoß im realen Betrieb getroffen werden.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Dieselmotorische Verbrennung und Abgase

Der Dieselmotor ist eine Wärmekraftmaschine, welcher über einen thermodynamischen Prozess chemisch gebundene Energie in mechanische wandelt [63]. Die Prozessführung wird in vier Takte eingeteilt [79]. Während des Ansaugtaktes wird Frischgas, bestehend aus Luft und Restgas, angesaugt (erster Takt). Dieses wird im zweiten Takt verdichtet, wodurch sich Druck und Temperatur im Brennraum erhöhen. Bei modernen Dieselmotoren wird durch Direktspritzung der Kraftstoff in das heiße, verdichtete Gas eingebracht [91], welcher durch die hohe Temperatur mit dem in der Luft enthaltenen Sauerstoff zu reagieren beginnt und hierdurch verbrennt. Die dabei entstehende Wärme erhöht die Temperatur und damit den Druck im Brennraum. Dadurch bewegt sich der Kolben im dritten Takt und überträgt die Volumenänderungsarbeit an die Kurbelwelle. Im vierten Takt werden die entstandenen Verbrennungsgase aus dem Brennraum ausgeschoben.

Durch die kurze Zeitspanne zwischen Einspritzung und Verbrennung erfordert diese Prozessführung einen zündwilligen Kraftstoff. Hierfür eignet sich Dieselmotorkraftstoff durch seine hohe Cetanzahl, welche ein Maß für die Zündwilligkeit ist [78]. Der Dieselmotor wird üblicherweise mit Luftüberschuss betrieben. Dies bedeutet, dass im Brennraum mehr Sauerstoff (O_2) zur Verfügung steht, als für die Umsetzung der eingebrachten Kraftstoffmasse notwendig wäre. Dies führt zu Effekten, welche die hohe Effizienz eines modernen Dieselmotors erklären. Zum einen führt der Luftüberschuss zu einer hohen Wärmekapazität der Zylinderfüllung und somit zu einem niedrigen Temperaturniveau, welche geringe Wandwärmeverluste nach sich zieht. Zum anderen sorgen die heutigen hohen erreichbaren Verdichtungsverhältnisse für hohe thermodynamische Wirkungsgrade.

Bei der vollständigen Reaktion (Verbrennung) des aus Kohlenwasserstoffen

(C_xH_y) bestehenden Kraftstoffs mit O_2 entstehen nach Gleichung 2.1 die Produkte Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) [79].



In der Realität läuft diese Reaktion allerdings unvollständig ab, da neben dieser noch weitere Reaktionen stattfinden. Die Gründe hierfür sind u.a.:

- Vorhandensein von weiteren Spezies z.B. Stickstoff (N_2)
- Reaktionen laufen nur bis zum chemischen Gleichgewicht ab [14]
- Inhomogenitäten durch direkte Einspritzung [91]
- zu kurze Zeit für vollkommene Oxidation [91]

Die neben CO_2 und H_2O entstehenden Produkte sind meist unerwünscht und wirken gesundheitsschädlich oder umweltbelastend. Daher spricht man von Schadstoffen oder Emissionen. Beim Dieselmotor sind die hauptsächlich entstehenden Emissionen Stickoxide (NO_x), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) und Partikel. Die Entstehungsbereiche der einzelnen Schadstoffe in der Verbrennungszone sind in Abb. 2.1 dargestellt. In dieser Arbeit werden Partikelemissionen nicht weiter betrachtet.

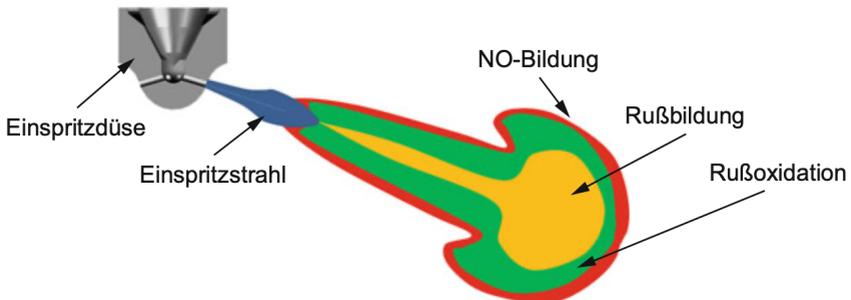


Abbildung 2.1: Entstehungsbereich von Schadstoffen in einem heterogenen Gemisch [91]

2.1.1 Stickoxide (NO_x)

Allgemein werden chemische Verbindungen aus N_2 und O_2 unter dem Begriff NO_x zusammengefasst. Die zwei wichtigsten Stoffe, welche im Verbrennungsmotor eine Rolle spielen, sind hierbei Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2). [79]

Wirkung

„ NO_2 ist ein braunrotes, charakteristisch riechendes und stark giftiges Gas“ [102, S. 237]. Es reizt die Atemwege und bildet in Zusammenhang mit Feuchtigkeit Salpetersäure [37, 43]. Es führt somit zu saurem Regen [79] und zur Übersäuerung von Böden [95] und trägt zur Bildung von bodennahem Ozon bei, welches ebenfalls ein starkes Reizgas ist [9]. Weiterhin wirkt es auf die Atemwege durch die Verschlimmerung von Asthma-Symptomen bei Kurzzeitexposition, bei Langzeitexpositionen sind die Daten nicht eindeutig [103]. NO_2 lässt sich als Indikator für verkehrsabhängige Schadstoffe verstehen [103].

Entstehung

Die globale Entstehung von NO_x lässt sich auf ca. 40 % natürliche Quellen und zu ca. 60 % auf anthropogene Quellen zurückführen [37]. Auf natürliche Weise entsteht NO_x hauptsächlich bei Gewitter und Blitzschlag (32 %), durch mikrobiologische und chemische Prozesse in Böden (39 %) sowie durch Verbrennung von Biomasse (19 %) [37]. Anthropogen entsteht NO_x größtenteils durch Verbrennungsprozesse in Kraftwerken, im Verkehr oder Industrieanlagen [37]. In Deutschland hat der Verkehr mit 60 % den größten Anteil an den anthropogenen NO_x -Emissionen [93].

NO_x entstehen durch die Reaktion von molekularem N_2 mit O_2 . Im Verbrennungsmotor bildet sich hauptsächlich NO , welches unter atmosphärischen Bedingungen mit einer Halbwertszeit von 30 min zu NO_2 oxidiert. Der dominierende Entstehungsmechanismus wird als thermisches NO bezeichnet, welches sich „hinter“ der Flammenfront in verbrannten Bereichen mit hohen Temperaturen und Luftüberschuss bildet, vgl. Abb. 2.1. [37, 48, 63]

2.1.2 Kohlenstoffmonoxid (CO)

Wirkung

Kohlenstoffmonoxid ist ein farb-, geruch- und geschmackloses Gas, welches nicht reizend ist [33]. Die bekannteste und wichtigste toxische Wirkung von CO ist, dass die Sauerstoffnutzung von Zellen außer Kraft gesetzt wird. CO bindet stärker an Hämoglobin als O₂ und unterbindet somit den Haupttransportweg von O₂ im Blut. Dies führt zu Hypoxie, dem Sauerstoffmangel auf Gewebeebene, und somit zur Erstickung. Schon eine Konzentration von 35 ppm kann in 6 bis 8 Stunden zu Kopfschmerzen und Schwindel führen [33]. Die mittlere Konzentration von CO in der Luft in Deutschland beträgt ca. 0,23 ppm [94].

Entstehung

Die Hauptquellen von natürlichen CO-Emissionen sind Fäulnisprozesse, Verdörrung oder natürlich Brände von Wäldern oder Büschen sowie durch Algen im Meer. Der menschengemachte Anteil stammt zum Großteil aus der Verbrennung von Biomasse (Waldrodung), aus dem Straßenverkehr sowie von Hausbrand und Kleingewerbe [37, 91]. Der anthropogene Anteil an den gesamten globalen CO-Emissionen liegt wahrscheinlich bei ca. 60 % [37].

CO entsteht im Verbrennungsmotor durch unvollständige Oxidation des Kraftstoffs [63]. In Bereichen mit lokal fetten Luft-Kraftstoff-Gemischen herrscht ein Mangel an O₂, weshalb sich das chemische Gleichgewicht von CO₂ hin zu CO verschiebt. Auch bei hohen Temperaturen liegt das Gleichgewicht vermehrt bei CO und wird durch die rasche Abkühlung bei der Expansion „eingefroren“ oder durch die zeitliche Begrenzung das chemische Gleichgewicht nicht erreicht. [37, 63]

2.1.3 Kohlenwasserstoffe (HC)

Wirkung

Kohlenwasserstoffe können krebserregend sein. Teiloxidierte Kohlenwasserstoffe wie z.B. Aldehyde riechen unangenehm [79]. Carbonylverbindungen können dem menschlichen Organismus schaden, indem sie direkt oder durch die in der Atmosphäre gebildeten Folgeprodukte auf ihn einwirken. So tragen sie z. B. zusammen mit NO_2 zur Bildung von bodennahem Ozon und dem fotochemischen Smog bei [63].

Entstehung

Unter dem Begriff Kohlenwasserstoffe sind chemische Verbindungen aus Kohlenstoff und Wasserstoff zusammengefasst [79]. Zu den HC-Emissionen zählen unverbrannte oder teiloxidierte Kohlenwasserstoffe [63]. Sie entstehen durch eine unvollkommene Verbrennung des Kraftstoffs. Dies geschieht unter anderem aufgrund von lokal zu niedriger Temperatur, welche die Reaktion/Oxidation verlangsamen [36], bspw. an den kalten Wänden [37, S.127] oder durch lokal fette Bereiche im Brennraum [63].

2.1.4 Kohlenstoffdioxid (CO_2)

Wirkung

CO_2 ist ein farb- und geruchsloses, ungiftiges Gas und kommt natürlich in der Atmosphäre vor. Dadurch ist es kein Schadstoff im eigentlichen Sinne. Durch seine Eigenschaft Infrarotstrahlung zu absorbieren, trägt es zum Treibhauseffekt bei [37]. Da sich der CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre seit Beginn der Industrialisierung um ca. 30 % erhöht hat, gilt es als hauptverantwortlich für den menschengemachten Klimawandel [79].

Entstehung

CO₂ entsteht durch Oxidation von im Kraftstoff chemisch gebundenem Kohlenstoff, siehe [Gleichung 2.1](#). Es ist ein zwingend notwendiges Produkt bei der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Stoffen.

2.2 Maßnahmen zur Emissionsminderung

Der Emissionsausstoß eines Verbrennungsmotors lässt sich auf zwei Arten beeinflussen. Zum einen kann die Bildung von Schadstoffen im Brennraum verhindert, zum anderen können die entstandenen Schadstoffe im Abgastrakt in unschädliche Stoffe umgewandelt werden. Im Brennraum unterliegt die Entstehung von Schadstoffen vielen Einflüssen. Für die Bildung der Schadstoffkomponenten NO_x, CO und HC sind maßgeblich die lokale Temperatur, die lokale Sauerstoffkonzentration und das lokale Luft-Kraftstoffverhältnis verantwortlich [63, S. 945].

Mit verschiedenen Maßnahmen kann die Gemischzusammensetzung und -aufbereitung beeinflusst und damit die Entstehung von Schadstoffen minimiert werden. Hierzu zählen die Optimierung der Kraftstoffeinspritzung, Variation der Gemischzusammensetzung durch [Abgasrückführung \(AGR\)](#), die Gestaltung der Brennraumgeometrie oder des Aufladesystems. Zu beachten gilt, dass eine Maßnahme, welche zur Reduktion einer Schadstoffkomponente führt, häufig die Erhöhung einer anderen Komponente mit sich bringt [63, S.946].

Einspritzparameter

Ziel der Gemischbildung beim Dieselmotor ist es, eine möglichst schnelle und vollständige Verbrennung des Kraftstoffs zu erreichen und hierbei Temperaturspitzen zu vermeiden [79]. Von zentraler Bedeutung für die Gemischbildung ist neben der Ladungsbewegung der Kraftstoff-Strahlimpuls, welcher maßgeblich durch die Einspritzung beeinflusst wird. [63, S.974] [79].

Ein typisches dieselmotorisches Brennverfahren besteht heutzutage aus mehreren Einspritzungen. Der Zeitpunkt und deren Menge haben unterschiedliche Einflüsse auf den Brennverlauf und die gesamte Prozessführung. So lässt sich durch den Einspritzzeitpunkt der Haupteinspritzung bspw. die Verbrennungsschwerpunktlage variieren und Einfluss auf HC-Emissionen nehmen. Ebenfalls beeinflusst werden hierdurch der thermodynamische Wirkungsgrad und somit auch die Auslasstemperatur. Eine Verwendung von Voreinspritzungen führt zu Vorreaktionen und so zu einer chemischen Vorkonditionierung des Brennraums. Dadurch verringert sich der Zündverzug der darauffolgenden Einspritzungen. So kann die Hauptverbrennung bspw. nahezu komplett diffusiv ablaufen, was Vorteile beim Druckgradienten und dadurch im Verbrennungsgeräusch bringt. Zusätzliche Nacheinspritzungen können die während der Hauptverbrennung entstandene HC oder Partikel oxidieren und somit das Emissionsverhalten beeinflussen. Sogenannte späte Nacheinspritzungen können das Abgastemperaturniveau anheben oder das globale Luft-Kraftstoffverhältnis ohne nennenswerte Drehmomentanhebung absenken, erhöhen jedoch stark den Kraftstoffverbrauch.

Abgasrückführung (AGR)

Abgas enthält im Gegensatz zu Frischluft höhere Konzentrationen von CO₂, Wasser und anderen Verbrennungsprodukten. Durch das Rückführen von Abgas ändert sich die Gaszusammensetzung im Brennraum. Die wesentliche Wirkung von AGR basiert auf der gesenkten Sauerstoffkonzentration und der erhöhten spezifischen Wärmekapazität der Zylinderfüllung [79]. Hierdurch kann das Temperaturniveau während der Verbrennung gesenkt und die thermische NO-Bildung reduziert werden [63, S.974].

Die verwendeten Techniken, Abgas in den Brennraum zurückzuführen, lassen sich in Hochdruck-AGR, Niederdruck-AGR und interne AGR unterscheiden. Bei der Hochdruck-AGR wird das Abgas dem Abgastrakt vor der Turbine entnommen und der Ansaugstrecke nach dem Verdichter zugeführt. Hierbei kann das rückgeführte Abgas gekühlt und so dessen Dichte erhöht werden. Dies ermöglicht eine hohe Zylinderfüllung und eine niedrige Temperatur bei Kompressionsbeginn. Bei der Niederdruck-AGR wird das Abgas nach der Turbine entnommen und vor dem Verdichter wieder zugeführt. Ein Vorteil

dabei ist, dass der Massenstrom über die Turbolader unabhängig von der **AGR**-Rate ist [63].

Durch die Beeinflussung des Ventiltriebs kann die Abgaskonzentration im Brennraum auch ohne zusätzliche Strömungspfade erhöht werden. Dabei spricht man von interner **AGR**. Je nach Ventilsteuerung, ergeben sich mehrere Möglichkeiten die Restgaskonzentration im Brennraum zu erhöhen. Es kann z.B. Abgas im Ansaugkanal vorgelagert werden (frühes Öffnen der Einlassventile), weniger Ladung ausgetauscht werden (frühes Schließen der Auslassventile) oder Abgas aus dem Auslasskrümmer wieder zurück in den Brennraum gesaugt werden (zweites Öffnen des Auslassventils). Diese Arbeit konzentriert sich auf die letztere Variante, welche mit einem zusätzlichen Auslassventilhub während des Ansaugtaktes arbeitet. Im Vergleich zur Hochdruck-**AGR** wird ein kürzerer Strömungsweg zurückgelegt und durch die geringere Kühlung des Abgases ist mit einem höheren Temperaturniveau zu Beginn eines Arbeitsspiels zu rechnen.

2.3 Variabler Ventiltrieb am Dieselmotor

Bei Ottomotoren kommt eine Phasenverstellung schon seit 1983 serienmäßig zum Einsatz um Leistung, Drehmomentverlauf und Abgasverhalten positiv zu beeinflussen [8]. Beim Dieselmotor kam eine Variabilität im Ventiltrieb erstmals 2012 in den mittelschweren Nutzfahrzeugmotoren von Mercedes-Benz in Serie [41]. Eine verstellbare Auslassnockenwelle diente hierbei zur Unterstützung der Partikelfilterregeneration [40]. Bei **Volkswagen (VW)** kommen in den 2,0l und 1,6l Euro 6-TDI-Dieselmotoren Nockenwellensteller zum Einsatz, bei denen sich je ein Ein- und Auslassventil um bis zu 50 °KW verstellen lässt [69]. Durch die so darstellbare Kombination aus Drallanhebung und Verdichtungsabsenkung können die **NO_x**- und Rußemissionen reduziert werden. [91, S.53]

Diezemann et. al [19] untersuchten 2013 verschiedene Ventiltriebvariationen zur Steigerung der Abgastemperatur an einem **PKW**-Diesel-Motor. Im untersuchten Leerlaufbetriebspunkt verglichen sie diese mit konventionellen Heizstrategien, wie einer angelagerten Nacheinspritzung. Am Einzylinderprüfstand konnte gezeigt werden, dass mit einem zweiten Auslassventilhub eine Kraftstoffver-

brauchsersparnis von ca. 18 % im Vergleich zur Referenzheizmaßnahme mit Nacheinspritzung erreichbar ist.

Pohlke et. al. [75] beschäftigten sich 2018 mit einer CO_2 -optimalen Aufheizstrategie für moderne Dieselmotoren. Hierbei wurde die Kombination eines zweiten Auslassventilhubes und einem frühen Einlassventilschließen zur drosselfreien Füllungsreduktion untersucht. Um das nötige Temperaturniveau für eine Aktivierung der Abgasnachbehandlung zu erreichen, ist mit dem variablen Ventiltrieb weniger Nacheinspritzmenge erforderlich. Fahrzyklussimulationen des WLTC-low Zyklus zeigten, dass dadurch bis zu 5,7 % Kraftstoffersparnis gegenüber einer konventionellen Heizstrategie möglich sind.

Deppenkemmer et. al. [18] untersuchten ebenfalls verschiedene Ventiltriebsvariationen und konnten zeigen, dass durch interne AGR das Motorkaltstartverhalten und der Warmlauf verbessert werden können. Somit wurden höhere Umsatzraten im Diesel Oxidationskatalysator (DOC) erreicht.

Das Ventiltriebssystem, welches in dieser Arbeit zum Einsatz kommt, untersuchten auch Methley et. al. [64]. Sie demonstrierten, dass mit einem zweiten Auslassventilhub eine Reduzierung der HC-Rohemissionen und eine Steigerung des Abgastemperaturniveaus möglich ist. Ebenfalls wurde festgestellt, dass der Betriebsbereich für die NO_x -Speicherkatalysator (NSK)-Regeneration mit interner AGR hin zu niedrigen Lasten erweitert werden kann. Brotz [11] bestätigte diese Ergebnisse und zeigt, dass mit zweitem Auslassventilhub eine NSK-Regeneration bei einer Drehzahl von 1500 1/min und einem effektiven Mitteldruck von 1 bar möglich ist.

2.4 NO_x -Speicherkatalysator

Allein durch innermotorische Maßnahmen können aktuelle Emissionsziele nicht eingehalten werden. Unter dem Begriff Abgasnachbehandlung lassen sich die Komponenten im Abgasstrang zusammenfassen, welche die Emissionen nachträglich reduzieren [91, S.881] [79]. Bis auf den Partikelfilter enthalten diese Komponenten Materialien, welche als Katalysator fungieren. In der Chemie

versteht man darunter einen Stoff, welcher die Aktivierungsenergie absenkt und die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht, ohne selbst eine stoffliche Veränderung zu erfahren [66] [63].

Zu den bei Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen heutzutage gebräuchlichsten Abgasmachbehandlungskomponenten gehören [63] [79]:

- der **Dreivegekatalysator (TWC)** zur Reduzierung von NO_x , **HC** und **CO**
- der **Oxidationskatalysator** zur Reduzierung von **HC** und **CO**
- der **Partikelfilter** zur Reduzierung von Partikeln
- der **NSK** zur Reduzierung von NO_x
- der **SCR-Katalysator** zur Reduzierung von NO_x

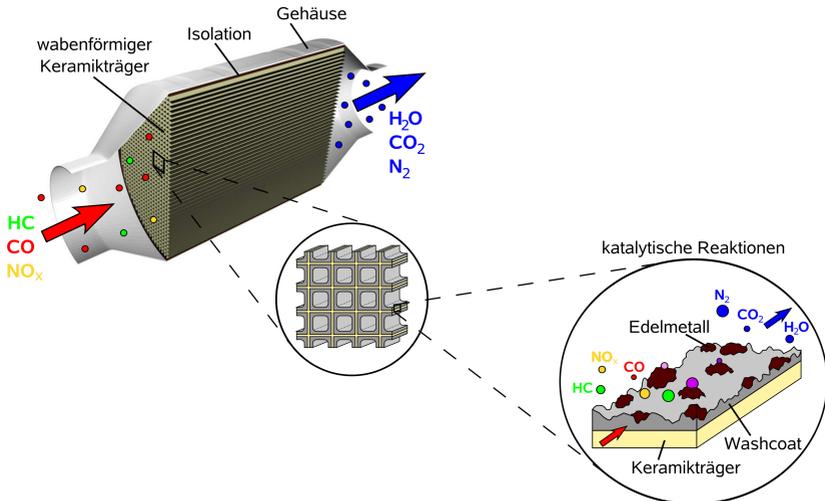


Abbildung 2.2: Aufbau eines typischen Abgaskatalysators [66]

Ein Autoabgaskatalysator besteht prinzipiell aus einem Trägermaterial, meist einem keramischen Monolith, mit durchgängigen Kanälen. Auf dieses Trägermaterial ist eine poröse Struktur, der sogenannte Washcoat, aufgetragen. Er vergrößert die Oberfläche des Monoliths ungefähr um den Faktor 10 000 [99]

und trägt die katalytisch aktiven Komponenten, vgl. [Abb. 2.2](#). Für mehr Details sei u.a. auf [\[66\]](#) oder [\[14\]](#) verwiesen.

2.4.1 Verwendung von NO_x -Speicherkatalysatoren

Im Jahr 1996 führte der Hersteller Toyota unter der Bezeichnung D4 auf dem japanischen Markt einen Ottomotor mit Schichtladung ein. Zur Abgasreinigung kam ein [NSK](#) zum Einsatz, womit dieser den Einzug in die [PKW](#)-Serienanwendung erhielt. Im europäischen Raum waren die Firmen Peugeot und [VW](#) im Jahr 2000 die ersten, welche einen [NSK](#) ebenfalls bei Ottomotoren zur NO_x -Reduzierung nutzten. [\[7\]](#) [\[104\]](#)

Bei Dieselmotoren kam der Durchbruch auf dem Markt mit Einführung der Abgasnorm Euro 6. Die strengen Emissionsgrenzwerte führten im Jahr 2014 dazu, dass bei 55 % der in den 28 Staaten der [Europäische Union \(EU\)](#) zugelassenen Euro 6 Diesel-[PKW](#) ein [NSK](#) verbaut wurde [\[106\]](#).

Bei vielen Herstellern ist der [NSK](#) in den letzten Jahren Teil einer Abgasnachbehandlung gewesen. [BMW](#) setzt bei seiner Dieselmotorenfamilie seit 2017 auf eine Kombination aus [NSK](#), [SCR](#)-Katalysator und [Diesel-Partikelfilter \(DPF\)](#) [\[83\]](#). Audi setzte bei seinen 2014 vorgestellten V6-TDI Motoren in der 160 kW Variante ebenfalls auf ein Abgasnachbehandlungssystem bestehend aus [NSK](#), [SCR](#)-Katalysator und [DPF](#) [\[52\]](#). Bei den 2016 vorgestellten V8-TDI kam diese Kombination ebenso zum Einsatz [\[39\]](#). [VW](#) setzte bei seinem 2012 vorgestellten modularen Dieselbaukasten bei kleinen (leichten) Fahrzeugen auf die Kombination aus [NSK](#) und [SCR](#)-beschichtetem [DPF](#) [\[69\]](#). Seit 2018 entfällt der [NSK](#) jedoch und es kommen bei [VW](#) zwei [SCR](#)-Katalysator zum Einsatz, einer ist motornah verbaut und einer im Unterboden [\[65\]](#) [\[76\]](#).

Der Trend, vermehrt auf [SCR](#)-Katalysatoren zur NO_x -Reduktion zu setzen, zeigt sich bei mehreren Automobilherstellern. In der Analyse einer 2021 veröffentlichten ADAC-Studie zum NO_x -Ausstoß aktueller Dieselmotoren zeigt sich dies [\[4\]](#). Dort wurden die 17 meistverkauften Dieselmotoren unterschiedlicher Marken und in unterschiedlichen Fahrzeugsegmenten im Green NCAP Labortest untersucht und deren Abgasnachbehandlungskonzept dargestellt. Die Auswahl der nach Euro 6d-Temp, bzw. Euro 6d zertifizierten Fahrzeuge sollte

somit repräsentativ für alle (Stand 2021) nach 2018 zugelassenen Fahrzeuge sein. Hier besaßen nur drei der 17 Fahrzeuge einen **NSK** zur Abgasreinigung. Analysiert man die in dieser Studie ebenfalls betrachteten Euro 6d Fahrzeuge aus dem ADAC Ecotest, lässt sich feststellen, dass in der betrachteten Studie [4] fünf von 21 Fahrzeugen mit einem **NSK** ausgestattet sind [3]. Der Anteil scheint daher deutlich geringer zu sein als dies 2014 noch der Fall war.

Wie **Abb. 2.3** zeigt, bietet ein **NSK** aber bei niedrigen Temperaturen Vorteile gegenüber einem **SCR** Katalysator. Nach einem Kaltstart ist die Abgasnachbehandlung noch nicht auf Betriebstemperatur und ein **NSK** kann somit früher beginnen **NO_x** zu reduzieren.

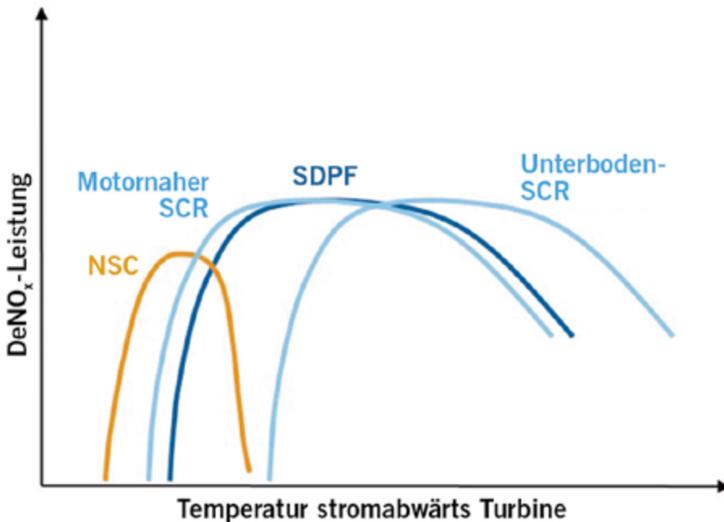


Abbildung 2.3: NO_x-Reduzierungsleistung über Temperatur [17]

Demuyne et. al. setzten in einem 2020 veröffentlichten Artikel [17] zur Abgasnachbehandlung ein System aus **NSK**, **DPF** und zwei **SCR** ein. Hierbei wurden Emissionsmessungen u.a. im realen Betrieb mit einem C-Segment-Fahrzeug durchgeführt. Es zeigte sich, dass gerade im Stadtabschnitt eines **Real Driving Emissions (RDE)**-Tests, dem **NSK** hohe Anteile (über 40 %) an der

NO_x -Reduktion zugeschrieben werden können.

2.4.2 Funktionsweise NO_x -Speicherkatalysator

Der **NSK** ist eine diskontinuierlich arbeitende Abgasnachbehandlungskomponente, welche bei mageren Bedingungen NO_x in Form von Nitraten chemisch speichert [51]. Bei Sauerstoffmangel werden diese wieder freigesetzt und zu Stickstoff umgewandelt. Der Aufbau entspricht weitestgehend dem eines **TWC**, ist aber um eine NO_x -Speicherkomponente in Form eines Erdalkalimetalls erweitert [63, 100]. Wie auch beim **TWC** werden überwiegend Platin und Rhodium als aktive Katalysatormaterialien verwendet, Barium hat sich als NO_x -Speicherkomponente etabliert [53, 63].

Während der NO_x -Einspeicherphase wird das motorisch entstandene **NO** an Platin bei Luftüberschuss zu NO_2 oxidiert (Gleichung 2.2) [10, 85]. Das Erdalkalimetall Barium bildet in CO_2 -haltiger Atmosphäre, wie sie im Abgas herrscht, Bariumcarbonat aus [100]. Bei Vorhandensein von O_2 bildet NO_2 an Bariumcarbonat nach Gleichung 2.3 Bariumnitrat aus [53, 91, 100]. Somit werden NO_x chemisch im **NSK** gebunden.



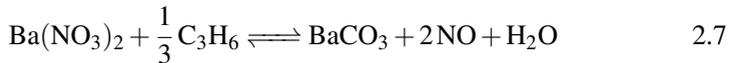
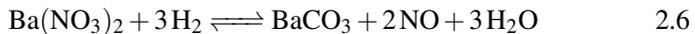
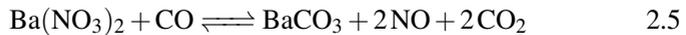
In überstöchiometrischer Atmosphäre werden im **NSK** neben NO_x auch erhebliche Mengen O_2 eingespeichert. Das zu den Metallen der seltenen Erden zählende Cer, oder auch Cerium genannt, dient dabei als Speicherkomponente und erhöht die Konvertierungsraten [14, 63]. In seiner oxidierten Form Ceroxid kommt es im Katalysator zum Einsatz [53]. Durch den Wechsel zwischen den Oxidationsstufen III und IV wird O_2 adsorbiert, also an der Feststoffoberfläche des Ceroxids angelagert, und so gespeichert [89, 100]. Bei überstöchiometrischem Betrieb liegt das Gleichgewicht von Gleichung 2.4 auf der Eduktseite.



Der NO_x -Einspeicherprozess kann nicht ewig fortgeführt werden, da der **NSK** nur eine begrenzte Menge an Barium enthält und somit auch nur eine bestimmte Menge an Speicherplätzen für NO_x besitzt. Um den **NSK** wieder weitestgehend in seinen Ursprungszustand zu versetzen, muss er nach einer gewissen Zeit regeneriert werden. [100]

Hierfür wird der Motor unterstöchiometrisch ($\lambda < 1$) betrieben, wodurch er die notwendige Atmosphäre für die Regeneration des **NSK** ohne zusätzliche Betriebsstoffe erzeugt. Durch den Mangel an Sauerstoff im fetten Abgas und den somit verringerten Sauerstoffpartialdruck verschiebt sich das Gleichgewicht von [Gleichung 2.3](#) auf die Edukte Seite [98, 100]. Gleichzeitig liegen auch hohe Konzentrationen von **CO**, **Wasserstoff** (H_2) und **HC** durch die unvollständige Verbrennung vor, welche als Reduktionsmittel (Regenerationsmittel) dienen. Es herrschen also ähnliche Bedingungen, wie in einem **TWC**. Wie auch dort werden, die während der Regeneration freigesetzten NO_x zu N_2 reduziert und der freigesetzte O_2 reagiert mit den Reduktionsmitteln zu CO_2 und H_2O [100].

In der Literatur [14, 53, 91] wird das chemische Verhalten zusammengefasst über [Gleichung 2.5](#), [2.6](#) und [2.7](#) dargestellt:

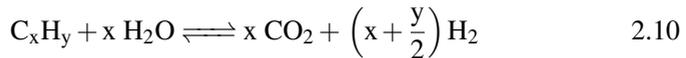
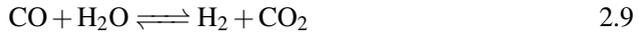


Anschließend wird das dabei freiwerdende **NO** bspw. mit **CO** nach [Gleichung 2.8](#) zu N_2 reduziert [91]:



Mit detaillierteren Analysen des chemischen Verhaltens beschäftigten sich unter anderem [16, 105] (Einspeicherung) und [5, 59, 67, 70] (Regeneration), deren Erkenntnisse in einem detaillierten Modell von Rafigh et al. [77] zusammengefasst sind. Maßgebende Detaillierungen zu den oben genannten Reaktionen sind

beispielsweise, dass CO über die sogenannte **Wassergas Shift Reaktion (WGS)** nach **Gleichung 2.9** mit Wasserdampf zu H_2 umgewandelt wird [5] oder auch **HC** mit Wasserdampf ebenfalls zu H_2 über die sogenannte Dampfreformierung nach **Gleichung 2.10** reagiert.



Bei einer Regeneration werden dem **NSK** mehr Regenerationsmittel zur Verfügung gestellt als für die reine Reduktion der Stickoxide nötig wäre. Ein Großteil der Regenerationsmittel wird mit O_2 oxidiert. Für CO und H_2 läuft dies nach **Gleichung 2.11** und **2.12** ab, für **HC** nach **Gleichung 2.1**.



O_2 für diese Oxidationsvorgänge (**Gleichung 2.1**, **2.11** und **2.12**) stammt dabei aus dem Sauerstoffspeicher Ceroxid. Bei unterstöchiometrischen Bedingungen liegt das Gleichgewicht von **Gleichung 2.4** auf der Eduktseite, weshalb O_2 desorbiert wird [14]. Die umgesetzte O_2 -Menge beträgt ein Vielfaches der gespeicherten NO_x -Menge [100]. Ce_2O_3 unterstützt auch die **WGS** und Dampfreformierung und dient zusätzlich als **NO-Speicher** [47, 89].

Zusammenfassend sind die Speicher- und Regenerationsvorgänge im **NSK** in **Abb. 2.4** graphisch veranschaulicht.

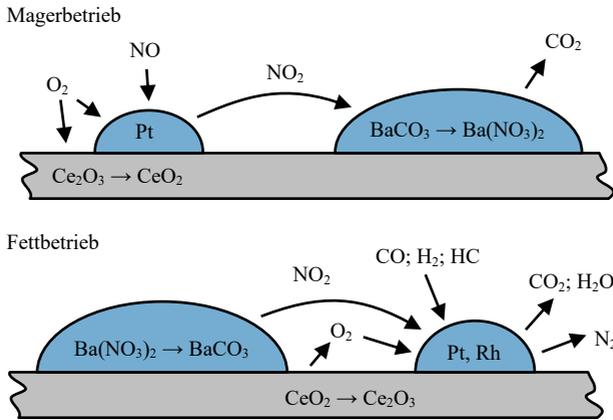


Abbildung 2.4: Mechanismus NO_x-Speicherung und Regeneration nach [100]

2.4.3 Regenerationsstrategie

Das globale Luft-Kraftstoffverhältnis λ ergibt sich aus der dem Brennraum zugeführten Luftmasse m_{Luft} , der zugeführten Kraftstoffmasse $m_{Kraftstoff}$ und dem stöchiometrischen Luftbedarf des Kraftstoffs L_{St} zu:

$$\lambda = \frac{m_{Luft}}{m_{Kraftstoff} \cdot L_{St}} \quad 2.13$$

Der global fette Betrieb eines Dieselmotors lässt sich erreichen, indem ausgehend von einem mageren Betriebspunkt das Luft-Kraftstoffverhältnis abgesenkt wird. Dies kann durch Reduzierung der Luftmasse oder Erhöhung der Kraftstoffmasse erreicht werden. Pischinger et.al. [74] stellten in ihrem Artikel drei Möglichkeiten vor, welche in Abb. 2.5 veranschaulicht sind. Links ist als Referenz ein magerer Betriebspunkt mit einer bestimmten Masse Luft (blau) und Kraftstoff (orange) zu sehen. Im Fall a) wird die Luftmasse konstant gehalten und die Kraftstoffmasse so weit erhöht, dass das Luftverhältnis auf $\lambda_{fett,1}$ absinkt. Die hierfür zusätzliche Kraftstoffmasse wird dabei aufgeteilt in einen

Teil, der zum Erreichen von $\lambda = 1$ nötig ist (hellrot) und einen weiteren Teil, welcher für die Bereitstellung der Regenerationsmittel erforderlich ist (dunkelrot). Die Breite der Balken stellt die Regenerationsdauer dar. Im Fall b) wird die Luftmasse um die Hälfte reduziert. Um $\lambda = 1$ zu erreichen wird weniger Kraftstoffmassenstrom benötigt als im Fall a), und auch um $\lambda_{\text{fett},1}$ zu erreichen ist weniger Kraftstoffmassenstrom notwendig. Um die gleiche Menge Regenerationsmittel bereit zu stellen, muss allerdings die Dauer vergrößert werden. Wird im Fall c) das Luftverhältnis im Vergleich zu b) abgesenkt ($\lambda_{\text{fett},2} > \lambda_{\text{fett},1}$), kann die Dauer der Regeneration wieder auf das Niveau von Fall a) reduziert werden, um die gleiche Menge Regenerationsmittel bereitzustellen (4 dunkelrote Kästchen).

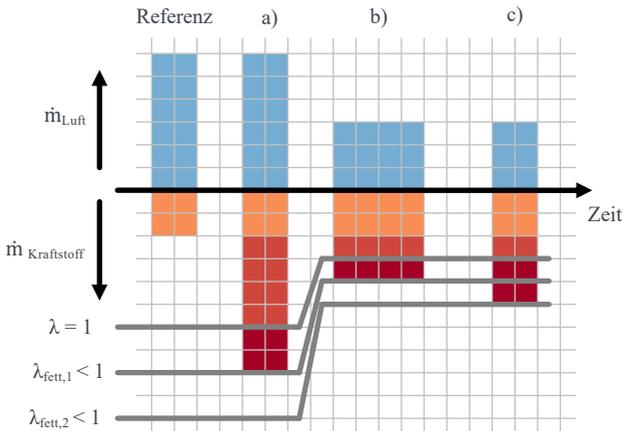


Abbildung 2.5: Schematische Möglichkeiten zur Reduktion des Kraftstoffmehrerverbrauches im Regenerationsbetrieb nach [74]

Betrachtet man den Kraftstoffmehrverbrauch im Vergleich zum Referenzbetrieb (hell- und dunkelrote Mengen), zeigt sich, dass dieser

- bei Fall a) am höchsten (12 Kästchen),
- bei Fall b) am zweithöchsten (8 Kästchen) und
- bei Fall c) am geringsten (6 Kästchen) ist.

Die Betrachtung dieser drei theoretischen Fälle zeigt, dass sich ein kraftstoffverbrauchsoptimierter Regenerationsbetrieb wie folgt darstellen lässt [74]:

- die Frischluftmasse so weit wie möglich absenken
- das Luftverhältnis so fett wie möglich einstellen

Diese vereinfachte Annahme für den dunkelroten Bereich ist dann gültig, wenn der Ausstoß an Regenerationsmittel linear mit dem Luftverhältnis zusammenhängt. H_2 und CO weisen eine schnellere Reaktionskinetik als HC auf [51, 74] und werden daher im Folgenden primär betrachtet. Bei der Betrachtung des chemischen Gleichgewichtszustandes nach [36] zeigt sich, dass diese Annahme für die Reduktionsmittel CO und H_2 gilt. In Abb. 2.6 ist die Gleichgewichtsrechnung für 11 Spezies mit einem Dieselmotorkraftstoff zu sehen.

Im hellroten Teil des Kraftstoffmehrverbrauchs lassen sich Effekte aus der Absenkung des Luftverhältnisses zusammenfassen. Hierzu zählen u.a. größere Wandwärmeverluste durch das erhöhte Temperaturniveau, eine Verschiebung des Verbrennungsschwerpunkts und höhere Abgastemperaturen.

Einer Absenkung des Luftverhältnisses sind in der Realität jedoch motorisch Grenzen gesetzt. Beispielsweise steigen bei zu niedrigen Luftverhältnissen die HC - oder Rußemissionen [74] stark an. Ebenfalls zu beachten ist, dass die Aufbereitung des Kraftstoffs eine gewisse Zeit braucht und somit nicht beliebig viel Kraftstoff eingebracht werden kann, ohne dass die Umsetzung zu gering wird. Es kann auch vorkommen, dass bei sehr späten Einspritzungen Kraftstoff die Brennraumwand benetzt, darüber in das Motorenöl gelangt und sich somit nicht nur negativ auf den Kraftstoffverbrauch auswirkt [13].

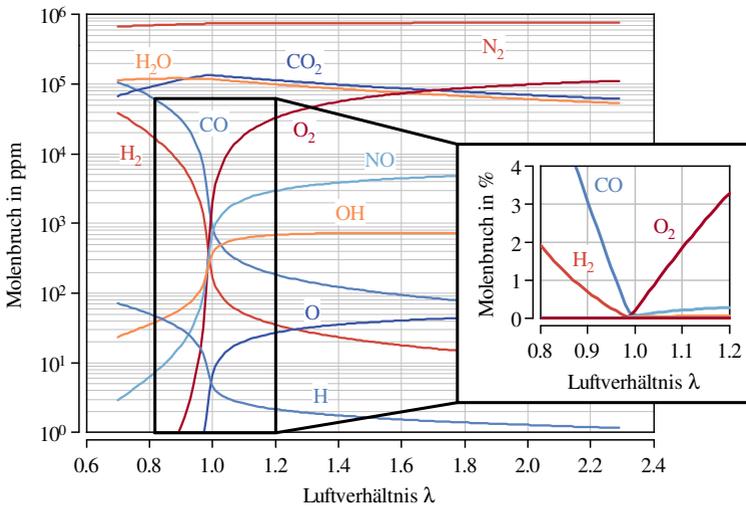


Abbildung 2.6: Beispielhafte chemische Gleichgewichtszusammensetzung ($p = 20 \text{ bar}$, $T = 2000 \text{ K}$, $\text{C}_{13,5}\text{H}_{23,6}$) nach [36]

Die Gleichgewichtsbetrachtung in Abb. 2.6 zeigt ebenfalls, dass sich bereits bei einem Luftverhältnis von 0,8 ein Stoffmengenanteil von ca. 7 Prozent **CO** ergibt. Einen sinnvollen Bereich für die **NSK** Regeneration beschreibt Kemski mit Werten von 0,85 bis 0,98 [51]. Auch andere Literatur zeigt, dass das Luftverhältnis in diesem Bereich sinnvoll scheint [11, 74].

Ein fetter Betrieb des Dieselmotors ist nicht im gesamten Motorenkennfeld möglich. Bei niedrigen Lasten ist eine Reduzierung der Luftmasse nur in gewissem Maße möglich, da bei zu starker Androsselung die Kompressionsendtemperatur so weit absinkt, dass eine Zündung des Kraftstoffs nicht mehr gewährleistet werden kann [12]. Die Verbrennungsstabilität wird somit so schlecht und ein komfortabler Betrieb ist nicht mehr möglich. [51]

Die Menge der für eine Regeneration nötigen Regenerationsmittel richtet sich unter anderem nach der gespeicherten Menge an NO_x im **NSK**. Bei gegebenem Beladungszustand und konstantem Luftverhältnis stellt sich die Menge an Regenerationsmittel somit über die Länge der Regeneration ein.

Insgesamt ist eine „gute“ Regeneration nicht nur durch einen niedrigen Kraftstoffverbrauch gekennzeichnet, sondern auch das „Durchbrechen“ der Regenerationsmittel ist unerwünscht. Wenn eine Regeneration lange genug dauert, wird ein Großteil der NO_x aus dem NSK desorbiert. Bei weiter anhaltendem Regenerationsbetrieb treten die Regenerationsmittel unkonvertiert wieder aus diesem heraus. Das Ende der Regeneration kann somit über eine sich ändernde Gaszusammensetzung nach dem NSK detektiert werden. Diese kann beispielsweise mit einer Lambdasonde erkannt werden [42]. Der Kraftstoffverbrauch und das Emissionsverhalten zielen somit in die gleiche Richtung und deuten auf eine ausreichend lange und dem Beladungszustand angemessene Regenerationsdauer hin.

Eine niedrige O_2 -Konzentration ist während der Regeneration ebenfalls erstrebenswert [51], da dadurch das Gleichgewicht von Gleichung 2.3 stärker auf der Eduktseite liegt und die Regeneration schneller abläuft. Hierbei existieren in der Realität jedoch Grenzen, welche die Gemischbildung begrenzen.

Zu beachten ist ebenfalls die Temperaturabhängigkeit der kompletten Chemie. Für eine Bestimmung der Regenerationszeitpunkte ist Kenntnis über die NSK -Temperatur und dessen Beladung erforderlich sowie darüber, ob der Motor zu dem jeweiligen Zeitpunkt einen fetten Betrieb darstellen kann. Die Betrachtung dieser Größen wird in dieser Arbeit dargestellt und bestimmt die Regenerationsstrategie.

3 Modellbeschreibung

3.1 Versuchsträger

Motor

Diese Arbeit basiert auf dem FVV-Forschungsprojekt *VVT für Diesel NSK-Regeneration*, welches in [60] dokumentiert ist. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden Prüfstandsmessungen von dem hier betrachteten Motor durchgeführt. Bei diesem handelt es sich um einen seriennahen Reihen-Vierzylinder PKW-Dieselmotor mit 2,0l Hubraum. Er besitzt eine Nennleistung von 140 kW bei 4250 1/min, ein maximales Drehmoment von 400 Nm und verfügt pro Zylinder über zwei Einlass- und zwei Auslassventile. Die wichtigsten Kenngrößen sind in [Tabelle 3.1](#) dargestellt. [11, 60]

Tabelle 3.1: Kenndaten des Motors

Eigenschaft	Einheit	Wert
Zylinder	-	Reihe 4
Hubvolumen	cm ³	1969
max. Leistung	kW	140 (bei 4250 1/min)
max. Drehmoment	Nm	400 (bei 1750 - 2500 1/min)
Bohrung	mm	82,0
Hub	mm	93,2
Verdichtungsverhältnis	-	15,8
Einspritzsystem	-	Common Rail
Injektortyp	-	Magnetventil
max. Raildruck	bar	2000

In [Abb. 3.1](#) ist die schematische Darstellung des Strömungspfades zu sehen.

Die Aufladung erfolgt über ein 2-stufiges Abgasturbolader Konzept mit Ladeluftkühlung. Der Ladedruck wird über **Wastegates (WG)** an den Turboladern eingestellt. Der Motor ist mit einem Hochdruck-**AGR-System** mit **AGR-Kühler** ausgestattet. Zur Darstellung von interner **AGR** kommt ein **variabler Ventiltrieb (VVT)** zum Einsatz, welcher mit einem zweiten Auslassventilhub während des Ansaugtaktes arbeitet. Eine detaillierte Beschreibung des Ventiltriebssystems ist in [11] zu finden. Als Abgasnachbehandlung wird in dieser Arbeit neben einem **NO_x-Speicherkatalysator (NSK)** der Druckverlust eines **Diesel-Partikelfilter (DPF)** berücksichtigt.

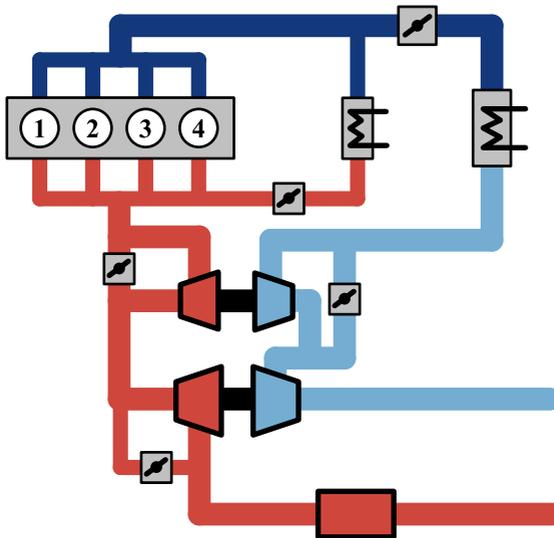


Abbildung 3.1: Schematische Motordarstellung

Fahrzeug

In Längsdynamiksimulationen wird ein Fahrzeug aus dem E-Segment [21] mit 1,7 t Masse betrachtet. Es ist mit Reifen der Energieeffizienzklasse C ausge-

stattet [22] und besitzt ein 9-Gang Getriebe. Weitere Eigenschaften können [Tabelle 3.2](#) entnommen werden.

Tabelle 3.2: Kenndaten des Fahrzeugs

Eigenschaft	Wert
Fahrzeugklasse	E-Segment
Masse	1,7 t
Frontfläche	2,33 m ²
c_w -Wert	0,26
Radstand	2,94 m
Höhe Schwerpunkt	0,61 m
Reifen	205/55/R16
Rollreibungskoeffizient	0,008 (Leichtlaufreifen)
Getriebe	9 Gänge

Das verwendete 9-Gang Getriebe ist als Handschaltgetriebe modelliert, inkl. der Betätigung des Kupplungspedals. Die Schaltzeitpunkte werden durch eine Schaltstrategie bestimmt und sind von der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Gaspedalstellung abhängig. In [Abb. 3.2](#) sind die vier in dieser Arbeit verwendeten Schaltstrategien zu sehen. Die Darstellungsform wird durch folgendes Beispiel erklärt: Man befindet sich bei Schaltstrategie 1 im 8. Gang bei 50 % Gaspedalstellung. Wenn sich die Fahrzeuggeschwindigkeit erhöht, wird die dunkelrote Linie bei ca. 150 km/h geschnitten und es wird in den 9. Gang geschaltet. Wird nun die Gaspedalstellung auf 0 % gesenkt, verringert sich die Fahrzeuggeschwindigkeit und beim Schneiden der gestrichelten dunkelroten Linie bei ca. 130 km/h wird wieder zurück in den 8. Gang geschaltet.

Schaltstrategie 1 hat die Eigenschaft, dass unabhängig von der Gaspedalstellung nur in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit geschaltet wird. Schaltstrategie 4 enthält zusätzlich eine Lastabhängigkeit. Bei Schaltstrategie 6 ist das Hochschalten lastabhängig, das Runterschalten ist jedoch nur geschwindigkeitsabhängig. Schaltstrategie 7 ist eine für den in dieser Arbeit verwendeten

Motor optimierte Schaltstrategie. Sie weist sowohl beim Hoch-, als auch beim Runterschalten eine charakteristische Last- und Drehzahlabhängigkeit auf.

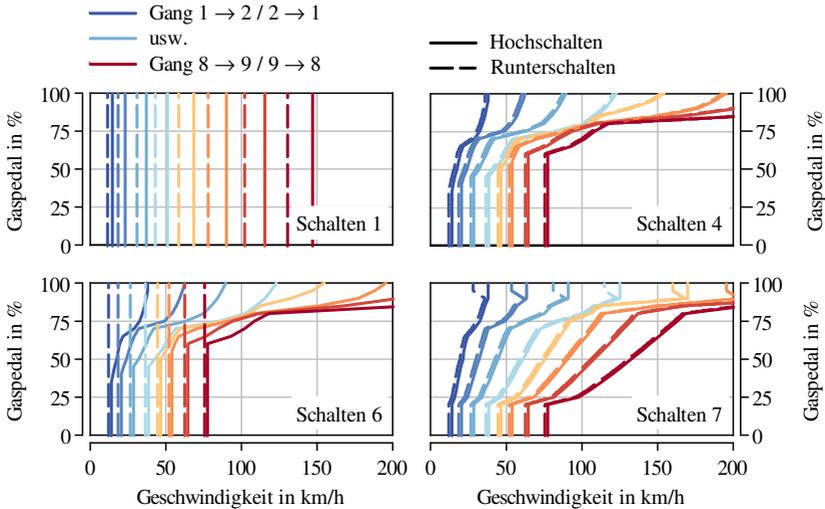


Abbildung 3.2: Darstellung der Schaltzeitpunkte in Abhängigkeit von Fahrzeuggeschwindigkeit und Gaspedalstellung verschiedener Schaltstrategien

3.2 Strömungsmodell

Die Gasströmung im Motor wird eindimensional betrachtet. Für eine mathematische Beschreibung wird das gesamte Volumen von gasführenden Bauteilen in Abschnitte ähnlicher Länge (in dieser Arbeit ca. 40 mm) unterteilt und dadurch diskretisiert. Die Querschnittsfläche dieser Subvolumina ist an die Geometrie des Motors angepasst. Zusammengesetzt spiegeln diese Subvolumina die Geometrie der Ansaug- bzw. Abgasanlage wider. [31]

Skalare Größen (bspw. Druck, Temperatur, Dichte, innere Energie, Gaszusammensetzung etc.) werden über ein Subvolumen als konstant angesehen und vek-

toriellen Größen (bspw. Massenstrom, Geschwindigkeit etc.) an jeder Grenze zwischen zwei Subvolumina berechnet. Die Navier Stokes Gleichungen (Kontinuität, Energieerhaltung und Impulserhaltung) werden für jedes Subvolumen bzw. jede Grenze in einer Dimension gelöst und somit das Strömungsverhalten des Motors beschrieben. Für eine detailliertere Beschreibung der Modellierung sei auf [31] verwiesen.

Ausgehend von der Kenntnis über das Strömungsverhalten in jedem Subvolumen werden weitere Effekte betrachtet und deren Auswirkungen auf den Strömungspfad berücksichtigt [31]. Hierzu zählen:

- Druckverluste durch Wandreibung
- Druckverluste durch Verjüngung, Bögen und Querschnittsänderung
- Wärmeübertragung an die Umgebung inklusive:
 - Konvektion von Gas an Wand
 - Wärmeleitung und Wärmekapazität der Wand
 - Konvektion von Wand an Umgebung
 - Berücksichtigung von Wärmestrahlung

Die Verdichter und Turbinen sind als nulldimensionale Kennfelder modelliert. In Abhängigkeit von Drehzahl, Druckverhältnis und Massenstrom ist der isentrope Wirkungsgrad definiert. Dieser beschreibt die Volumenänderungsarbeit im Vergleich zu einem adiabat reversiblen Prozess. Die Modellierung von Kühlern (Ladeluft und AGR) erfolgt ebenfalls nulldimensional. Die Kühleraustrittstemperatur ist dabei abhängig von der Gas-Eintrittstemperatur, dem Gas-Massenstrom, der Kühlmitteltemperatur und einem Kühlerwirkungsgrad. [31]

3.3 Brennverlauf

3.3.1 Modellbeschreibung

Die Berechnung der Vorgänge während des Hochdruckteils basieren auf einer nulldimensionalen Modellvorstellung. Der Brennraum dabei wird als thermodynamisches System verstanden, in welchem ortsunabhängig der gleiche Druck

herrscht. Es befinden sich nur gasförmige Bestandteile in diesem System und es wird, wie in [Abb. 3.3](#) dargestellt, von der Zylinderwand, dem Kolben, dem Zylinderkopf und den Ventilen begrenzt. [36]

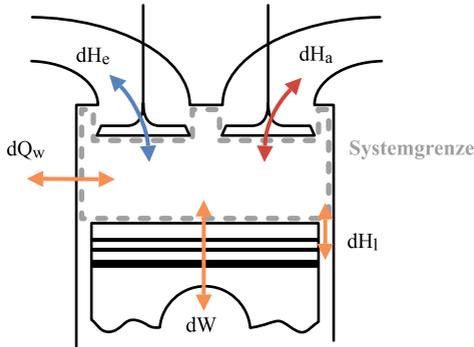


Abbildung 3.3: Das thermodynamische System Brennräum

Dabei gilt der erste Hauptsatz der Thermodynamik, welcher sich in seiner differentiellen Form folgendermaßen darstellen lässt:

$$\frac{dQ_b}{d\varphi} + \frac{dQ_w}{d\varphi} + \frac{H_e}{d\varphi} + \frac{H_a}{d\varphi} + \frac{W}{d\varphi} + \frac{H_l}{d\varphi} = \frac{dU}{d\varphi} \quad 3.1$$

Die Änderung der inneren Energie lässt sich darstellen als

$$\frac{dU}{d\varphi} = m_z \frac{du}{d\varphi} + u \frac{dm_z}{d\varphi} \quad 3.2$$

Außerdem gilt die thermische Zustandsgleichung (hier ebenfalls in der differentiellen Form):

$$p \frac{dV}{d\varphi} + V \frac{dp}{d\varphi} = m_z R \frac{dT}{d\varphi} + m_z T \frac{dR}{d\varphi} + RT \frac{dm_z}{d\varphi} \quad 3.3$$

Die spezifische innere Energie u in [Gleichung 3.2](#) und die spezifische Gaskonstante R in [Gleichung 3.3](#) sind von der Gaszusammensetzung, der Temperatur und dem Druck abhängig und bilden die Kalorik. [88]

Die Einbringung des Kraftstoffs in den Brennraum, also die Einspritzung, wird über einen Polygonzug nach Barba [6] modelliert. Die Eingangsgrößen für dieses Modell sind der Einspritzbeginn und die Einspritzdauer für jede Einspritzung, welche sich aus dem Steuergerät auslesen lassen, als Ausgang erhält man den zeitlichen Verlauf des Kraftstoffmassenstroms. Die Verdampfung des eingebrachten Kraftstoffs ist über einen Ansatz nach Grill [36] modelliert.

Die Wärmefreisetzung der Dieselvebrennung wird für jede Einspritzung separat berechnet und die einzelnen Brennverläufe aufsummiert. Der eingebrachte Kraftstoff jeder Einspritzung wird jeweils in zwei Kategorien aufgeteilt. Der zur ersten Kategorie zählende Kraftstoff wird als eine vorgemischte Verbrennung, auch Premixed genannt, umgesetzt, der zur zweiten Kategorie zählende über eine diffusive Verbrennung.

Sobald Kraftstoff in den Brennraum eingebracht wird, startet die Berechnung des Zündverzugs. Die Reaktionsgeschwindigkeit wird über einen Arrhenius-Ansatz in Abhängigkeit der Sauerstoff (O_2)- und Kraftstoffkonzentration für jeden Zeitschritt bestimmt und der Kehrwert über die Rechenschritte aufsummiert. Die Einspritzerturbulenz wird über einen integralen Magnussen-Ansatz berücksichtigt. Nach Ablauf der Zündverzugszeit wird der Kraftstoff in dem Premixed-Bereich nach einem Ansatz von Barba [6] reaktionskinetisch gesteuert umgesetzt.

Der nach einer Zündung eingebrachte Kraftstoff einer Einspritzung wird dann diffusiv umgesetzt. Hierzu wird der Einspritzstrahl zeitlich und örtlich diskretisiert und sogenannte Scheiben definiert. In eine Scheibe wird Kraftstoff eingebracht und entsprechend mit Luft abgemagert. Die Scheibe wird in drei Bereiche mit unterschiedlichem Lambda unterteilt, ein fetter, ein normaler ($0,3 < \lambda < 1,1$) und ein magerer Bereich. Der Kraftstoff im normalen Bereich wird recht schnell umgesetzt und als Diffusion I bezeichnet. Im mageren Bereich ist die Umsetzung durch eine hohe Ausmagerung langsamer und wird als Diffusion II bezeichnet. [28]

Die Berechnung des Wandwärmeübergangskoeffizienten erfolgt über einen Ansatz nach Woschni [28].

3.3.2 Validierung Brennverlauf

Für die Brennverlaufsmodellierung kommt das kommerzielle Zylinderobjekt *FKFS UserCylinder* [28] zum Einsatz. Bei einer **Druckverlaufsanalyse (DVA)** lässt sich aus dem gemessenen Zylinderdruckverlauf und den Druckverläufen im Ein- und Auslasskanal der Verlauf der Wärmefreisetzung bestimmen. Mit Modellannahmen beispielsweise zum Ladungswechsel, zur Gaskalorik, zur Kraftstoffverdampfung und zum Wandwärmeübergang wird so ein Brennverlauf berechnet. Dieser soll mit dem Brennverlaufsmodell möglichst genau nachgebildet werden.

Tabelle 3.3: Messdaten Bereich

Größe	Wert
Drehzahl	1000 bis 2000 1/min
eff. Mitteldruck	1 bis 5 bar
AGR	0 bis 22 %

Der stationär vermessene Kennfeldbereich für den mageren Betrieb ist auf niedrige Lasten und niedrige Drehzahlen fokussiert. Die Spannweite der verfügbaren Messdaten ist in **Tabelle 3.3** dargestellt. In einem iterativen Prozess werden die Parameter des Brennmodells variiert und so der simulierte Brennverlauf an den in einer **DVA** bestimmten Brennverlauf angepasst. Mit den hier verwendeten Parametern werden die Untermodelle Zündverzug, Premixed- und Diffusionsverbrennung abgestimmt. Durch die physikalische Modellierung hat ein Parametersatz Gültigkeit für den gesamten Motorkennfeldbereich. In **Tabelle 3.4** sind die variierten Parameter mit den entsprechenden Werten dargestellt.

Tabelle 3.4: Parametersatz Brennmodell

Parameter	Wert	Eigenschaft
C_Arr	50,00	Zündverzug
Faktor_ZV_VE	1,08	Zündverzug Voreinspritzung
c_turb_Flammgeschw	1,33	Premixed-Verbrennung
C_Mod_1	4,44	Diffusion I Verbrennung
C_Mod_2	7,12	Diffusion II Verbrennung
Mindestturbulenz	1,57	Diffusion II Verbrennung

In **Abb. 3.4** ist das Ergebnis der Brennverlaufsabstimmung zu sehen. Hier sind vier repräsentative Betriebspunkte dargestellt. Es ist zu erkennen, dass unter Vorgabe des Einspritzverlaufs der zeitliche Verlauf der Verbrennung bei verschiedenen Drehzahlen und Lasten gut abgebildet werden kann.

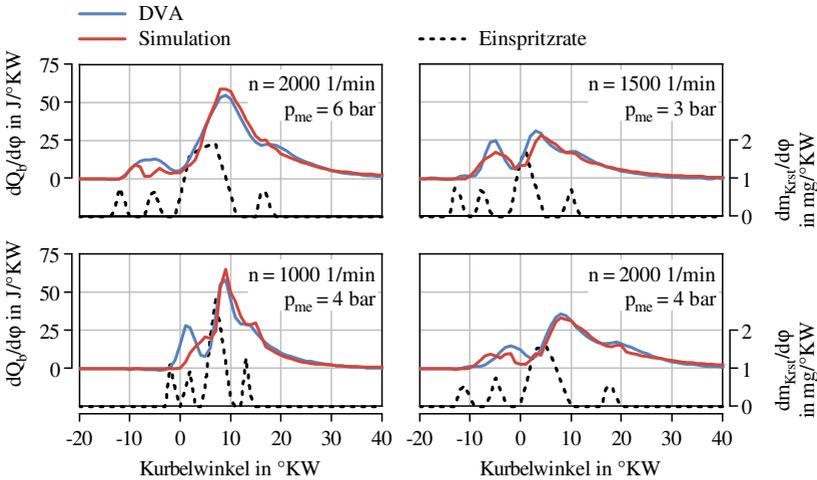


Abbildung 3.4: Validierung des Brennverlaufs bei Magerbetrieb

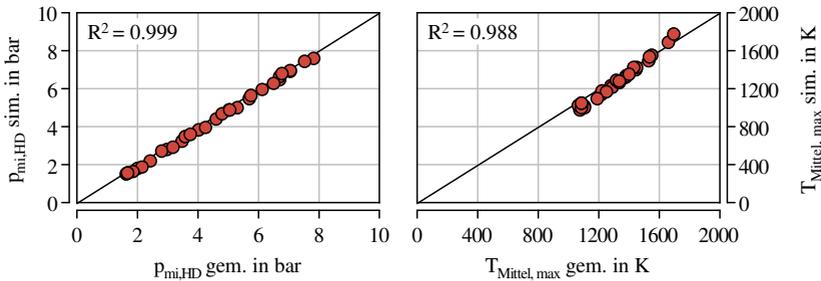
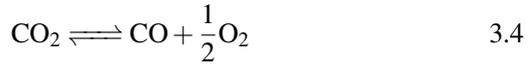


Abbildung 3.5: Validierung des Brennmodells bei Magerbetrieb

In [Abb. 3.5](#) sind die Validierungsergebnisse für alle vorhandenen Messpunkte dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mithilfe des Brennverlaufmodells der indizierte Mitteldruck des Hochdruckteils im gesamten Bereich gut vorhergesagt werden kann. Auch die maximale mittlere Brennraumtemperatur wird mit einer geringen Abweichung gegenüber den Messdaten prognostiziert.

3.4 Rohemissionsmodellierung

Wie in [Abschn. 3.3.1](#) beschrieben ist für eine ausreichend genaue Beschreibung der Gas-Kalorik die Gaszusammensetzung von Interesse. Dazu wird das Arbeitsgas in jedem Zeitschritt im chemischen Gleichgewicht betrachtet. Dieses Gleichgewicht wird nach der Methodik von Grill [\[36\]](#) für 11 Spezies mithilfe von sieben Reaktionsgleichungen ([Gleichung 3.4 - 3.10](#)) berechnet. Bei hohen Temperaturen laufen die Prozesse in der Realität so schnell ab, dass die Gleichgewichtsberechnung für viele Spezies eine ausreichend hohe Genauigkeit bringt. Hin zu tieferen Temperaturen werden die Zeitskalen aber länger und das chemische Gleichgewicht stellt sich in Realität nicht mehr ein. Es wurde daher eine Einfrieretemperatur angenommen, unterhalb derer sich die Konzentrationen nicht mehr ändern. [\[36\]](#)



Dieses thermodynamische System lässt sich in mehrere Zonen unterteilen. Zonen sind dabei homogene Teilbereiche, in denen die Temperatur und Gaszusammensetzung konstant ist. Der Brennraum wird hier in die zwei Zonen *verbrannt* und *unverbrannt* unterteilt. Daher spricht man auch von einer zweizonigen Prozessrechnung.

Durch hohe Temperaturen, Inhomogenitäten und langsame Reaktionskinetiken bietet dieser Modellierungsansatz aber nicht für alle Spezies eine ausreichend hohe Präzision. Beim mageren und fetten Dieselbetrieb werden im Folgenden die wichtigen Spezies betrachtet und zusätzlich nötige Modellierungsansätze beschrieben.

3.4.1 Magerbetrieb

Im mageren Betrieb ist in dieser Arbeit vor allem die Emission von Stickoxiden interessant. Für eine präzise Abbildung des **Stickoxide (NO_x)**-Einspeicherverhaltens im **NSK** sind die Abgaskonzentrationen der Spezies **Stickstoffmonoxid (NO)** und **Stickstoffdioxid (NO₂)** somit von Interesse. Durch Effekte wie z.B. eine langsame Reaktionskinetik oder Inhomogenitäten bei der Temperatur und der Stoffmengenkonzentration sind Abweichungen bei **NO** vom globalen

chemischen Gleichgewicht hier signifikant ausgebildet. NO_2 wird in der Gleichgewichtsrechnung nicht berücksichtigt, weshalb hierfür ein anderer Ansatz gewählt werden muss.

Stickstoffmonoxid (NO)

NO bildet sich bei Dieselmotoren hauptsächlich über den Entstehungsmechanismus thermisches- NO [63]. Dieser Mechanismus ist maßgeblich von der Temperatur abhängig. Die Beschreibung der NO -Bildung aus molekularem Stickstoff (N_2) wird reaktionskinetisch über den Zeldovich-Mechanismus beschrieben, welcher von Lavoie et al. erweitert wurde [57, 107].

Für eine genauere Modellierung der NO -Konzentration werden die thermodynamischen Zonen im Brennraum weiter in sogenannte Pseudo-Zonen unterteilt, in denen "weder die thermische Zustandsgleichung noch der erste Hauptsatz der Thermodynamik erfüllt sein müssen"[36].

Der in [Abb. 3.6](#) dargestellte Ansatz nach Kozuch [54] bestimmt mithilfe der Beschreibung einer Flammenzone die Temperatur in der verbrannten Zone präziser. Hierbei werden drei Massen- bzw. Enthalpieströme verwendet:

- Enthalpiestrom aus der unverbrannten Zone in die Flammenzone
- Enthalpiestrom aus der Flammenzone in die verbrannte Zone
- Enthalpiestrom direkt aus der unverbrannten in die verbrannte Zone.

Der Enthalpiestrom aus der unverbrannten in die verbrannte Zone und somit vorbei an der Flammenzone dient als Abstimmungsgröße und wird über den Zumischmassenstrom g eingestellt ([Abb. 3.6](#)). Dieser wiederum wird über den turbulenzproportionalen Faktor c_g kalibriert. Das Strömungsfeld, und damit die Turbulenz, wird mit Hilfe der spezifischen kinetischen Turbulenzenergie beschrieben. Die so bestimmte Konzentration von NO überschreitet den in [Abschn. 3.3](#) bestimmten Wert aus dem chemischen Gleichgewicht. [28]

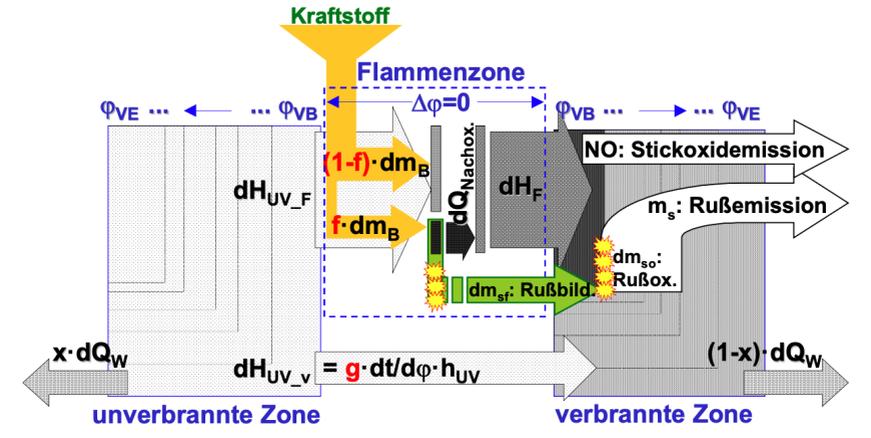


Abbildung 3.6: Schema des Zweizonen-NO-Modells [54]

Kaal [48] erweitert den Ansatz von Kozuch um die Einflüsse von Wandtemperatur und Luftmangel. Durch die Verwendung weiterer Pseudo Zonen (vgl. Abb. 3.7) wird die Vorhersage der Temperatur in der verbrannten Zone und damit die NO-Modellierung weiter verbessert.

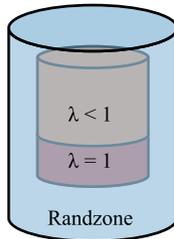


Abbildung 3.7: Schema der Erweiterung nach Kaal [48]

Stickstoffdioxid (NO₂)

Die Spezies NO₂ wird, anders als NO, bisher weder in der Modellierung über das chemische Gleichgewicht (Abschn. 3.3), noch in einer anderen Art und Weise berücksichtigt. Als Eingangsgröße für den NSK ist dessen Betrachtung aber relevant.

Die gängige Vorstellung ist, dass NO₂ im Verbrennungsmotor durch Oxidation von zuvor gebildetem NO entsteht (vgl. Abschn. 2.1.1). Die NO₂-Bildung unter dieselmotorischen Bedingungen ist somit hauptsächlich von der O₂- und NO-Konzentration abhängig [82]. Roessler et. al. [82] beschreiben dabei in ihrem Artikel, dass das Luft-Kraftstoffverhältnis den größten Einfluss auf die NO₂-Bildung hat.

Beim Dieselmotor ist das Luft-Kraftstoffverhältnis maßgeblich von der Last abhängig und nimmt hin zu niedrigen Lasten zu. Dabei steigt auch die O₂-Konzentration im Abgas an. Eine Modellierung der NO₂-Konzentration x_{NO_2} über die O₂-Konzentration x_{O_2} wird daher als ausreichend genau angesehen und beschrieben zu:

$$x_{NO_2} = 0,0022 \cdot (x_{O_2})^2 \quad 3.11$$

Validierung Stickoxid-Emissionen

Die Validierung des NO- und NO₂-Modells erfolgt an den gleichen Betriebspunkten, wie die Validierung des Brennverlaufmodells in Abschn. 3.3.2. Der abgedeckte Betriebsbereich erstreckt sich daher ebenfalls auf niedrige Lasten und niedrige Drehzahlen und ist in Tabelle 3.3 dargestellt.

Das für die NO-Konzentration entwickelte und auf dem Zeldovich-Mechanismus basierende NO-Modell wird in einem iterativen Prozess an gemessenen NO-Konzentrationen abgestimmt. Mithilfe von Abstimmparametern lassen sich motorspezifische Effekte berücksichtigen. Die in Tabelle 3.5 dargestellten Parameter mit den entsprechenden Werten sind das Ergebnis dieses Abstimmvorgangs.

Tabelle 3.5: Parametersatz NO-Modell

Parameter	Wert
c_g	0,046
eps_E	0,035

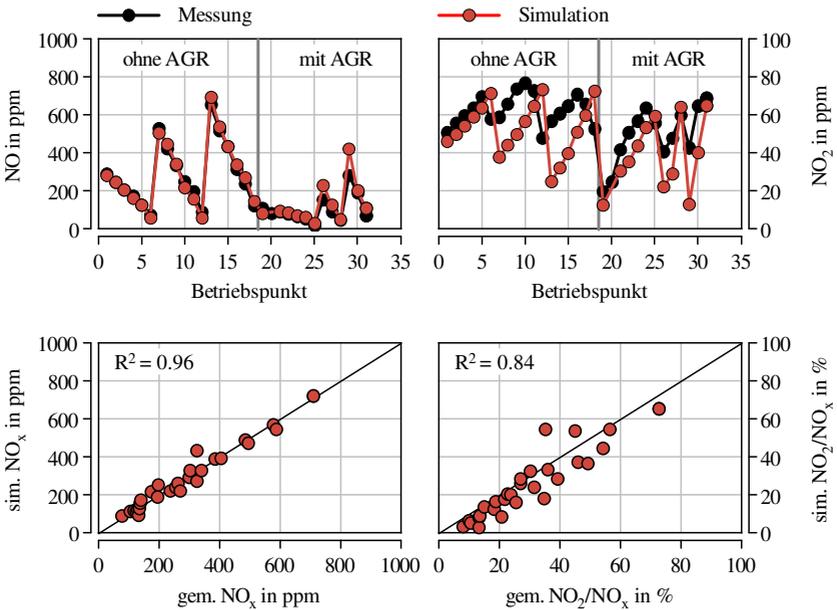


Abbildung 3.8: Validierung NO- und NO₂-Modell

In **Abb. 3.8** sind die Ergebnisse der **NO**- und **NO₂**-Modellierung zu sehen. Das **NO**-Modell liefert über alle betrachteten Betriebspunkte eine gute Vorhersagekraft (oben links). Das **NO₂**-Modell weist zwar eine geringere Güte auf (oben rechts), bildet aber den tendenziellen Verlauf über der Last ab. Dies ist vor allem beim Betrieb mit **AGR** zu erkennen. Die Betriebspunkte 19 bis 25 stellen eine Lastvariation bei einer Drehzahl von 2000 1/min dar, bei der

die NO_2 -Emissionen nur leicht unterschätzt werden. Bei niedrigeren Drehzahlen (Betriebspunkte 26 bis 31) ist die Abweichung gerade bei höheren Lasten (Betriebspunkte 26 und 29) tendenziell größer. Da bei diesen Betriebspunkten aber die NO -Konzentration hoch ist, fällt diese Abweichung bei der aus NO - und NO_2 -Konzentration aufsummierten NO_x -Konzentration weniger stark ins Gewicht. Über alle Kalibrierungspunkte hinweg betrachtet ergibt sich für die modellierte NO_x -Konzentration ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,96$ (unten links), welches eine ausreichend hohe Vorhersagekraft klassifiziert. Der NO_2 -Anteil an der NO_x -Konzentration liefert ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,82$ (unten rechts). Dies wird für die in dieser Arbeit getätigten Untersuchung als ausreichende Genauigkeit angesehen.

3.4.2 Regenerationsbetrieb

In der Berechnung des chemischen Gleichgewichts nach dem Ansatz von Grill [36] aus Abschn. 3.4 ist eine Modellierung der Kohlenstoffmonoxid (CO)- und Wasserstoff (H_2)-Emissionen bereits enthalten. Die Kohlenwasserstoff (HC)-Emissionen werden als Propen (C_3H_6) formuliert. Die HC -Modellierung besteht aus zwei Teilen. Der erste und dominantere Teil ist ein empirischer Ansatz für C_3H_6 , welcher auf Messdaten basiert. Für den zweiten Teil wird zusätzlich der vom Brennverlaufsmodell nicht umgesetzte Kraftstoff berücksichtigt.

Validierung Regenerationsbetrieb

Die Modellierungsergebnisse für CO und HC sind in Abb. 3.9 zu sehen. Die Messungen wurden mit verschiedenen Einspritzstrategien durchgeführt. In den Messungen zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit der CO -Konzentration vom Luft-Kraftstoff-Verhältnis λ . Der Einfluss der Einspritzstrategie bei konstantem λ -Wert ist gering. Den starken Einfluss auf den λ -Wert bildet das CO -Modell gut ab. Die Implementierung der chemischen Gleichgewichts-Modellvorstellung im Software-Code wird nur bei λ -Werten größer als 0,9 korrekt unterstützt. Die ungültigen Werte bei kleinerem λ sind hier nicht dargestellt. Zu beobachten ist ebenfalls, dass bei λ -Werten von ca. 1 die simulierte CO -Konzentration deutlich niedriger ausfällt als in den Messungen. Dies ist auf Inhomogenitäten in der

Gemischbildung zurückzuführen, welche das Modell nicht abbilden kann. Im λ -Wertebereich zwischen 0,9 und 0,95 liegen Simulation und Messung allerdings gut übereinander. Dies ist der für den Regenerationsbetrieb relevante Bereich und bedeutet damit, dass die **CO**-Modellierung eine ausreichende Genauigkeit besitzt.

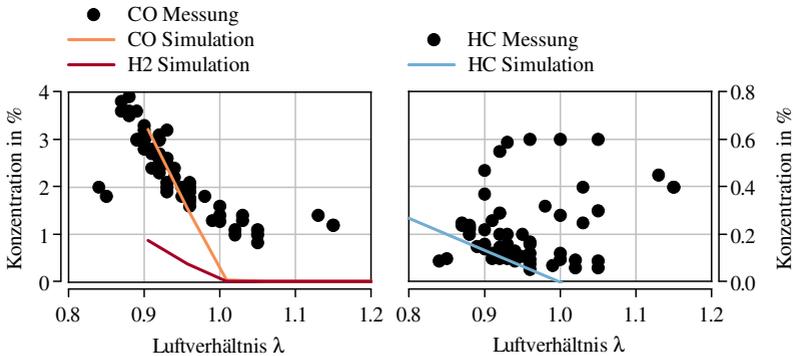


Abbildung 3.9: Validierung CO-, H₂- und HC-Modell

Die Variation der Einspritzung zeigt auf die **HC**-Konzentration einen deutlich größeren Einfluss als bei den **CO**-Konzentrationen. Es ist aber zu erkennen, dass es eine untere Grenze gibt, die hier modelliert wird und die bestmögliche Einspritzstrategie für ein vorgegebenes Lambda darstellt. Am Prüfstand werden die **HC**-Emissionen mithilfe eines Flammenionisationsdetektors gemessen. Die in einer Wasserstoffflamme verbrennenden **HC** werden dabei ionisiert. Dieser Ionenstrom wird gemessen und in dieser Arbeit auf den Ionenstrom vom **Propan (C₃H₈)** bezogen. In der Modellierung wird aber mit der Spezies **C₃H₆** gearbeitet.

Das theoretische molare Reduktionspotential von **C₃H₆** ist um 10 % geringer als das von **C₃H₈** [2]. Das Reduktionspotential von **C₃H₆** ist 9-mal so groß wie das von **CO** und **H₂**. Eine Konzentration von 650 ppm **C₃H₆** ($\lambda = 0,95$) hat also das gleiche Reduktionspotential wie 5850 ppm **CO** und **H₂**. Bei den vorliegenden Konzentrationen fällt somit ca. 25 % des theoretischen Regenerationspotentials auf die **C₃H₆**-Emissionen. Das Modell kann den Einfluss der Einspritzstrategie auf die **C₃H₆**-Emissionen nicht abbilden, diese kann aber die Konzentration mehr als verdoppeln. Der potentielle Fehler durch die Wahl der Spezies ist

somit 10-mal geringer.

Abdulhamid et al. [2] stellten fest, dass C_3H_8 an einen Pt/BaO/Al₂O₃ Katalysator nicht die Fähigkeit besitzt NO_x zu reduzieren. In der Messung werden die Art und Zusammensetzung der HC nicht berücksichtigt, weshalb im Folgenden die gemessenen C_3H_8 -Konzentrationen mit den für das Modell vorgegebener Spezies C_3H_6 gleichgesetzt wird. HC weisen im Vergleich zu CO und H₂ niedrigere kinetische Reaktionsraten auf. [51, 74]

3.5 Speicherkatalysator

3.5.1 Modellbeschreibung

Für die chemische Modellierung des NSK kommt in dieser Arbeit ein reaktionskinetischer Ansatz nach Rafigh [77] zum Einsatz. Dieser modelliert die Speicherung von NO und NO₂ an drei verschiedenen Speicherstellen, enthält eine detaillierte NO_x-Reduktion durch die Spezies CO, H₂ und C₃H₆ inklusive Ammoniak (NH₃)- und Lachgas (N₂O)-Produktion. Außerdem ist die Sauerstoffspeicherung modelliert. An den Edelmetallen werden die für die NO_x-Reduktion nötigen Oxidationsreaktionen der Regenerationsmittel, die Wassergas Shift Reaktion (WGS) sowie die Dampfreformierung berücksichtigt. Ebenfalls werden weitere Reaktionen an den Edelmetallen nach Bisett modelliert [84].

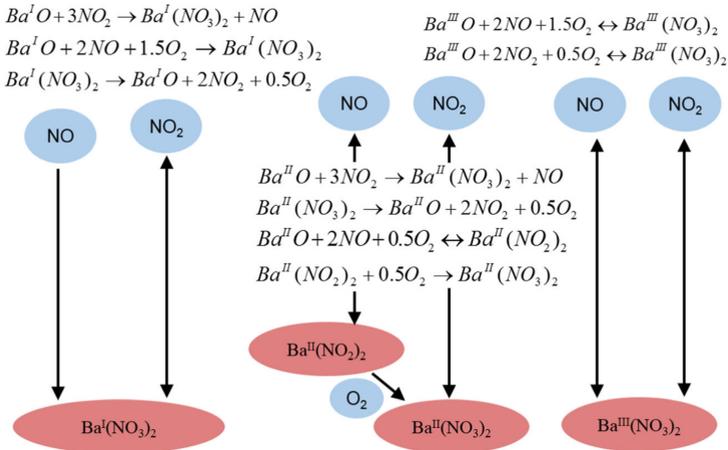


Abbildung 3.10: Schematische Darstellung des NSK-Modells nach Rafigh [77]

Diese Modellierung besitzt die Eigenschaft, dass die Ausgangskonzentrationen der wichtigsten Spezies von Bedeutung sind und deswegen hierfür modelliert werden. Die drei Speicherstellen werden als Ba^I , Ba^{II} und Ba^{III} formuliert. Die Einspeicherung von NO_x wird als Bildung von Nitraten und Nitriten modelliert und bei der Regeneration als Oxid beschrieben. Entgegen [Abschn. 2.4.2](#) wird die Bildung von Carbonaten nicht berücksichtigt. Ob es sich beim Speicher-material um Barium oder Cerium handelt, ist nicht relevant. Ebenfalls ist mit Abweichungen in der [Kohlenstoffdioxid \(\$CO_2\$ \)](#)-Konzentration durch die fehlende Carbonat Modellierung zu rechnen, welche aber vernachlässigt werden kann, weil dies nur eine zeitliche Verschiebung bedeutet.

Die gesamte Modellierung besteht aus 43 Reaktionskinetikkgleichungen mit 20 Spezies und ist in die Einspeicherung und Regeneration aufgeteilt. Die Reaktionen laufen nur in eine Richtung. Eine schematische Darstellung ist in [Abb. 3.10](#) und weitere Details sind in [\[77\]](#) zu finden.

3.5.2 Validierung

Der in dieser Arbeit verwendete **NSK** hat eine Länge von 128 mm und einen Durchmesser von 124 mm. Er entspricht dem Stand der Technik und wird auch in der Serie verwendet. Für die Simulation wird der **NSK** in Abschnitte von 2 mm Länge diskretisiert und die Reaktionskinetik in jedem Subvolumen gelöst. Als Eingangsgrößen werden die am Prüfstand gemessenen Gaskonzentrationen vor dem **NSK** verwendet. Bei dem Betriebspunkt 1500 l/min und 1,5 bar effektiver Mitteldruck sind in **Abb. 3.11** die NO_x -Konzentrationen vor und nach **NSK** zu sehen. Die sich aus dem Modell ergebende Ausgangskonzentration stimmt gut mit den Messwerten überein.

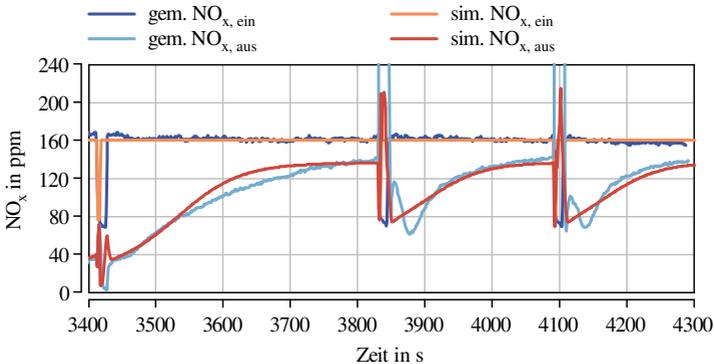


Abbildung 3.11: Validierung des NSK-Modells

Um die gemessene NO_x -Ausgangskonzentrationen nach der Regeneration zu erreichen, musste in der Simulation eine kürzere Regenerationsdauer als in der Messung gewählt werden. Mögliche Gründe hierfür könnten der unbekannte Alterungszustand oder Verschwefelungszustand des vermessenen Speicherkatalysators sein. Durch die Belegung von Speicherplätzen durch Sulfate oder durch die Versinterung der Katalysatorschichten kann die Speicherkapazität und Reaktivität verringert sein. [14]

3.6 Real Driving Emissions - RDE

3.6.1 Motivation und Gesetzliche Rahmenbedingungen

Wie in den bisherigen Abschnitten (Abschn. 2.1 und 3.4) beschrieben, liefert ein Motor nicht nur mechanische Energie, sondern emittiert auch unerwünschte Substanzen. Der Gesetzgeber möchte den Ausstoß von schädlichen Stoffen geringhalten und stellt daher Regeln für den Betrieb von Maschinen auf. Für die in PKW betriebenen Motoren wird zum einen die Menge der ausgestoßenen Stoffe begrenzt. Seit Einführung der Abgasnormen in Europa sinken die erlaubten Grenzwerte stetig und können Abb. 3.12 entnommen werden.

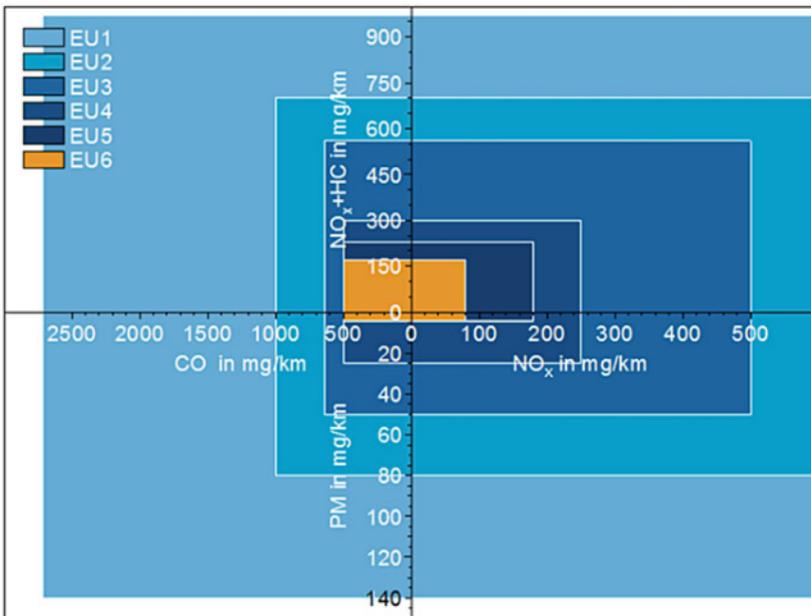


Abbildung 3.12: Emissionsgrenzwerte EU 1 bis 6 [91]

Zum anderen werden auch die Messverfahren und Prüfbedingungen zur Bestimmung dieser Emissionen gesetzlich geregelt. Bei dynamischen Tests gehört

dazu das zu befahrende Lastprofil, an welches ebenfalls stetig größere Anforderungen gestellt werden. Mit Einführung von Euro 6d-Temp müssen Fahrzeuge für die Zulassung nicht nur auf dem Prüfstand vermessen werden, sondern der Emissionsausstoß wird auch im realen Betrieb auf der Straße bestimmt. Diese Emissionsmessung und auch die Vorschriften hierfür werden als **RDE** bezeichnet. Für die Entwicklung von Fahrzeugen ist somit nicht nur der **Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ)** und der **Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC)** als Fahrprofil wichtig, sondern auch die Bedingungen während einer **RDE-Fahrt**.

Tabelle 3.6: Anforderung an gültige RDE-Fahrt [23, 24, 25, 26, 27]

	Kriterium	Wert	
	Ges. Fahrt	Dauer 90 - 120 min	
Geschwindigkeit	Streckenanteile	Stadt ($v \leq 60$ km/h)	29 – 44 %
		Landstraße ($60 < v \leq 90$ km/h)	23 – 43 %
		Autobahn ($v > 90$ km/h)	23 – 43 %
	Mindeststrecke	Stadt	≥ 16 km
		Landstraße	≥ 16 km
		Autobahn	≥ 16 km
	Stadt	Mittlere Geschw.	15 – 40 km/h
		Anteil ges. Haltedauer	6 – 30 %
		Einzelhaltdauer	≤ 300 s
	Autobahn	Zeit > 100 km/h	≥ 5 min
Zeitanteil ¹ > 145 km/h		≤ 3 %	
max. Geschw.		≤ 160 km/h	
Kaltstart ²	max. Geschw.	≤ 60 km/h	
	Mittlere Geschw.	15 – 40 km/h	
	ges. Haltezeit	≤ 90 s	
Höhe	Diff. zw. Start & Ende	≤ 100 m	
	kum. pos. Höhendiff.	≤ 1200 m / 100 km	
	kum. pos. Höhendiff. Stadt	≤ 1200 m / 100 km	

¹ Zeitanteil der Dauer des Autobahnabschnitts

² $t \leq 300$ s, bzw. $T_{\text{Kühlwasser}} \leq 70$ °C

Damit eine RDE-Fahrt gültig ist, müssen neben der Einhaltung der Emissionsgrenzwerte eine Reihe vieler Anforderungen erfüllt sein. Dazu zählen Kriterien u.a. für das Geschwindigkeitsprofil, das Höhenprofil sowie für Randbedingungen wie Temperatur, Vorkonditionierung und Höhenkonditionen. In [Tabelle 3.6](#) sind die wesentlichen Kriterien an das Geschwindigkeits- und Höhenprofil aufgelistet [[25](#), [26](#), [27](#)]. Des Weiteren wird die Dynamik der Fahrt mit Hilfsgrößen bewertet. Dazu dient das Produkt aus Geschwindigkeit und Beschleunigung, dessen 95 % Perzentil als obere Dynamikgrenze gilt, und eine relative positive Beschleunigung (RPA), die als untere Dynamikgrenze gilt. Für eine genauere Auflistung der Kriterien sei auch auf [[55](#), [90](#), [91](#)] verwiesen.

Die Basis dieser Arbeit ist ein frühes Entwicklungsstadium der VVT-Technologie für die NSK-Regeneration. Um in diesem Stadium die Anforderungen während einer RDE-Fahrt bereits betrachten zu können, muss der reale Fahrbetrieb virtuell abgebildet werden. Da niedrige Temperaturen als besonders herausfordernd eingeschätzt werden, genügt für diese Arbeit nicht ein typischer RDE-Fahrzyklus, sondern es sollen Randbereiche und ein Worst-Case-Szenario betrachtet werden. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit lieferten synthetische RDE-Generatoren nur ungenügende Ergebnisse, welche nicht den gewünschten Anforderungen genügen. Daher wird ein eigenes Vorgehen zum Erstellen von Fahrprofilen aufgezeigt, welches die gesetzlichen Rahmenbedingungen berücksichtigt und gleichzeitig realistische Ergebnisse liefert.

Es werden dazu diverse Fahrten im realen Verkehr durchgeführt und dabei die Geschwindigkeit und der Höhenverlauf aufgezeichnet. Die zu befahrenen Strecken werden im Vorfeld sorgfältig bewertet und dabei die Eignung zur Einhaltung der Regularien berücksichtigt. Es wird die nötige Messtechnik ausgesucht und die vermessenen Daten aufbereitet. Im realen Verkehr sind Worst-Case-Szenarien nur sehr schwer und mit hohem zeitlichem Aufwand darstellbar. Durch viele durchgeführte RDE-Fahrten auf verschiedenen Strecken steht ein großer Datenpool zu Verfügung. Aus diesem Datenpool werden weitere Fahrprofile synthetisch aus realen Teil-Abschnitten zusammengestellt. So wird ein Szenario gefunden, welches real auftreten kann, die gesetzlichen Rahmenbedingungen erfüllt und für den Anwendungsfall als besonders anspruchsvoll gilt.

3.6.2 Streckenfindung

Die Wahl der zu befahrenen Strecken hängt von mehreren Aspekten ab. Zuerst müssen die gesetzlichen Rahmenbedingungen, welche in [Abschn. 3.6.1](#) beschrieben sind, eingehalten werden. Die verschiedenen Kriterien lassen sich in der Streckenplanung unterschiedlich gut berücksichtigen. Zu den leichter einzuhaltenden Kriterien zählt z.B. die Abfolge der Abschnitte Stadt, Landstraße und Autobahn. Die Kriterien für eine genauere Beschreibung des Geschwindigkeitsverlaufes lassen sich hingegen schwer im Vorfeld bewerten.

Neben den gesetzlichen Kriterien kommen noch weitere, selbst festgelegte Randbedingungen hinzu. Diese werden aus Gründen der Machbarkeit im Rahmen dieser Arbeit hinzugezogen und sind beispielsweise, dass die Fahrten am Campus Vaihingen der Universität Stuttgart beginnen und enden sollen. Eine Auflistung und Klassifizierung der Kriterien ist in [Tabelle 3.7](#) zu finden.

Tabelle 3.7: Kriterien Streckenfindung

Kriterium	Bewertbarkeit bei Planung
Ort für Start und Ziel	++
Gesamtdistanz	++
Geschwindigkeitsbegrenzung auf Autobahn	++
Gesamtdauer	+
Reihenfolge Streckenanteile	+
Streckenanteile	o
Höhenmeter	o
Dynamikkriterien	–

Für die Planung der Strecken werden Online-Routenplaner verwendet. Der Vergleich von mehreren Online-Anbietern zeigt, dass verschiedene Kriterien unterschiedlich bewertet werden. Die Gesamtdistanz und Gesamtdauer lassen sich bei allen Anbietern gut bewerten und liefern ähnliche Ergebnisse. Auch

die Reihenfolge der Abschnitte einer RDE-Fahrt lässt sich über frei verfügbares Kartenmaterial qualitativ gut bestimmen.

Zu größeren Abweichungen zwischen den Anbietern kommt es allerdings bei einer Betrachtung der kumulierten Höhenmeter. Für einen Vergleich zwischen drei Anbietern wurde ein ca. 2,3 km langer Straßenabschnitt mit monotoner Steigung im Stuttgarter Stadtgebiet ausgewählt. Der Start des Abschnitts liegt auf 330 m Höhe, das Ende bei 460 m. Die Höhendifferenz beträgt somit 130 m. Die ausgegebenen positiven und negativen Höhenmeter verschiedener Routenplaner sind in [Tabelle 3.8](#) zu sehen. Es zeigt sich, dass die drei Anbieter *Kurviger* [92], *GraphHopper* [35] und *GoogleMaps* [34] schon für diesen einfachen Abschnitt sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern. Obwohl *Kurviger* und *GraphHopper* auf dem Kartenmaterial von OpenStreetMap basieren, liefern sie unterschiedliche Werte für die kumulierten Höhenmeter. Die genauen Werte für eine komplette RDE-Fahrt können somit nur grob im Vorfeld abgeschätzt werden. Für eine quantitative Bewertung scheinen die Daten somit nicht geeignet, für einen qualitativen Vergleich von Strecken untereinander scheinen Kartendienste jedoch geeignet zu sein.

Tabelle 3.8: Vergleich Höhenmeter verschiedener Kartendienste

Kartendienst	Höhe Start in m	Höhe Ende in m	positive Höhenmeter in m	negative Höhenmeter in m
Kurviger	330	460	254	124
GraphHopper	330	460	203	73
GoogleMaps	330	460	130	0

In [Abb. 3.13](#) sind verschiedene potentielle Routenverläufe zu erkennen. Als Start und Ziel ist der Campus Vaihingen der Universität Stuttgart gewählt. Aus der Reihenfolge der Streckenanteile ergibt sich, dass der Autobahnabschnitt am Ende einer Fahrt liegt. Dies führt dazu, dass die Planung am Ende der Fahrt beginnt. Durch das in der Nähe der Universität befindliche Autobahnkreuz Stuttgart ergeben sich drei mögliche Autobahnstrecken, auf denen zurück zur Universität gefahren werden kann. Aus der Dauer einer Fahrt von 90 bis 120 min und einer geschätzten Durchschnittsgeschwindigkeit von 50 km/h ergibt sich

eine gesamte Distanz von ca. 100 km. Die Streckenanteile sollen sich dabei gleichmäßig auf die Abschnitte aufteilen, was zu einer Strecke auf der Autobahn von ca. 33 km führt. Diese Autobahnabschnitte sind in Rot in [Abb. 3.13](#) dargestellt. Der Weg von der Universität zu den Autobahnauffahrten soll zuerst ca. 33 km durch die Stadt und anschließend ca. 33 km über Landstraßen zurückgelegt werden. Zu beachten ist dabei, dass bei Kreuzungen und Ortsdurchfahrten auch während geplanten Landstraßenabschnitten Geschwindigkeiten von unter 60 km/h auftreten können und diese dann dem Stadt-Abschnitt zugeordnet werden. Diese Verschiebung hin zu höheren Stadt-Anteilen wird qualitativ in der Planung berücksichtigt.

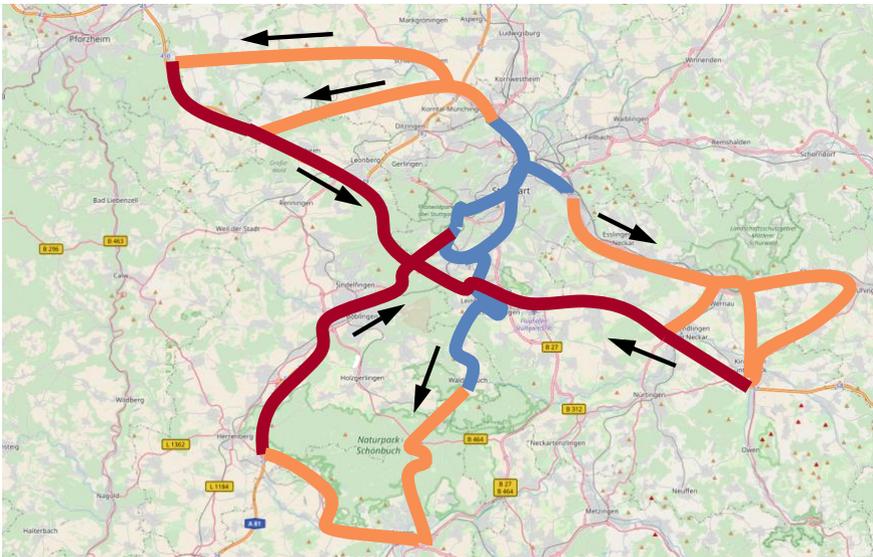


Abbildung 3.13: Schematische Darstellung Routenplanung, Kartenmaterial von [72]

Für die Berechnung der Gesamtdauer einer Route verwenden die Routenplaner lokale Geschwindigkeiten. Beim Export der geplanten Routen lässt sich die Anzahl der gespeicherten Wegpunkte nicht beliebig erhöhen. Das aus den exportierten Punkten bestimmte Geschwindigkeitsprofil über der Zeit ist für eine Kategorisierung in die Abschnitte Stadt, Landstraße und Autobahn zu grob

aufgelöst. Die Zeitanteile der einzelnen Abschnitte lassen sich nicht detailliert in der Routenplanung beurteilen.

Durch die Kenntnis der Strecke und der darauf herrschenden Geschwindigkeitsbeschränkungen lässt sich im Vorfeld auch planen, ob die maximal zulässige Geschwindigkeit auf der Autobahn ausgenutzt werden kann, ohne gegen die Straßenverkehrsordnung zu verstoßen. Zum Zeitpunkt der Erstellung der Routen gilt auf der Autobahn A8 zwischen Karlsruhe und Stuttgart die Richtgeschwindigkeit 130 km/h. Deshalb ist dieser Autobahnabschnitt geeignet um auch mit 160 km/h befahren zu werden.

3.6.3 Messtechnik für Fahrzyklenaufzeichnung

Für die in dieser Arbeit verwendete Messtechnik werden im Folgenden die zugrundeliegenden Messprinzipien beschrieben.

Global Positioning System (GPS)

Es gibt mehrere Anbieter für satellitengestützte Navigationssysteme, welche alle auf demselben Funktionsprinzip basieren. Das vom US-Verteidigungsministerium entwickelte NAVSTAR GPS ist das verbreitetste System und wird auch in dieser Arbeit verwendet. Zurzeit befinden sich 31 Satelliten in der Erdumlaufbahn [38]. Jeder dieser Satelliten besitzt eine präzise Zeitmessung in Form einer Atomuhr und sendet ständig seine aktuelle Uhrzeit sowie seine Kennung aus. Über diese Kennungen lassen sich die Bahndaten und somit die Position der Satelliten ermitteln.

Ein beim Empfänger eintreffendes Signal gibt die Uhrzeit bei dessen Aussendung am Satelliten an und stellt in Differenz zur Empfängerzeit die Laufzeit des Signals dar. Durch Kenntnis der Signalgeschwindigkeit lässt sich die Entfernung zwischen Satellit und Empfänger bestimmen. Für eine dreidimensionale Ortung werden drei Entfernungen zu bekannten Positionen benötigt. Die Zeitmessung im Empfänger ist aber meist nicht präzise genug, weshalb vier Satellitensignale für die vier Unbekannten benötigt werden. Drei Positionsvariablen in X-, Y- und Z-Richtung, sowie die Zeitdifferenz zwischen der GPS- und der

Empfängerzeit. Das Ergebnis ist eine dreidimensionale Ortung und eine präzise Zeitmessung. [20, 86, 87]

Bei der Nutzung des Standard-Ortungsservice SPS liegt die mittlere Genauigkeit der Positionsbestimmung bei ca. 10 m [86]. Die entscheidenden Störungseinflüsse hierbei sind [86]:

- Brechung des Signals in der Erdatmosphäre (hauptsächlich in der Ionosphäre)
- Ungenauigkeiten in der Satellitenpositionsbestimmung (hauptsächlich durch Inhomogenitäten im Erdschwerefeld)
- Ungenauigkeiten in der Zeitbestimmung im Satelliten
- Konstellation der Satelliten (Satellitengeometrie)

Differentielles GPS (DGPS)

Beim **Differential GPS (DGPS)** wird an einer Referenzstation mit bekannter Position eine GPS-Ortung durchgeführt. Die Abweichung zur bekannten Position wird bestimmt und z.B. über Mobilfunk an den Nutzer übertragen. Durch geeignete Rechenalgorithmen kann dieser den zu erwartenden Messfehler ausgleichen. [86]

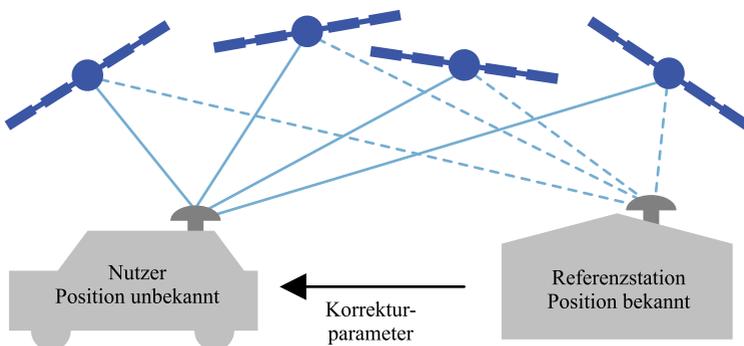


Abbildung 3.14: Prinzip von differentiellem GPS nach [86]

Die Korrekturdaten werden z.B. von behördlich betriebenen DGPS-Stationen generiert. Die Landesvermessungsämter betreiben Deutschlandweit ca. 270 Referenzstationen und stellen die Korrekturdaten über den Dienst SAPOS (Satellitenpositionierungsservice) bereit [86]. Der Hochpräzise Echtzeit-Positionierungsservice (HEPS) ermöglicht Genauigkeiten von 1 bis 2 cm in der Position und 2 bis 3 cm in der Höhe [56].

Barometrische Höhenmessung

Der Luftdruck in der Atmosphäre nimmt mit zunehmender Höhe ab. Die sogenannte Barometrische Höhenformel (Gleichung 3.12) gibt diesen Zusammenhang an [80].

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{M \cdot g}{R_{\text{uni}} \cdot T} \cdot z} \quad 3.12$$

Mit Kenntnis der mittleren Molmasse der Luft (28,79 g/mol für trockene Luft) und der Temperatur kann mithilfe eines Barometers die Höhe bestimmt werden. Eine Druckänderung von 1 mbar entspricht einer Höhenänderung von ca. 8 m. Mögliche Messfehler rühren z.B. vom Wetter, welches einen Einfluss auf den Luftdruck hat. Bei starken Luftdruckschwankungen kann sich der Luftdruck in einer Stunde um 1 bis 2 mbar verändern [49]. Ebenfalls kann der Staudruck durch veränderte Fahrgeschwindigkeit die Messung beeinflussen.

Fahrzeugeigene Geschwindigkeitsbestimmung

Das Fahrzeug selbst besitzt eine Geschwindigkeitsmessung, welche sich über OBD auslesen lässt [108] [101]. Diese wird über einen Drehzahlsensor am Rad und den Abrollumfang bestimmt.

3.6.4 Verwendete Messtechnik

Zur Auswahl der Messtechnik werden folgende Anforderungen gestellt:

- Am Fahrzeug leicht montier- und demontierbar
- Möglichst hohe Genauigkeit
- Möglichst ausfallsicher
- Einsatz redundanter Messsysteme

Tabelle 3.9: Vor- und Nachteile verschiedener Messsysteme

System	Vorteile	Nachteile
GPS	⊕ einfache Installation	⊖ ungenau
	⊕ kein zeitlicher Drift	⊖ störungsanfällig
	⊕ misst Geschw. und Höhe	⊖ kein Signal im Tunnel
DGPS	⊕ sehr hohe Genauigkeit	⊖ aufwändige Installation
	⊕ hohe Abtastfrequenz	⊖ Tunnel
	⊕ misst Geschw. und Höhe	⊖ störungsanfällig
OBD-Geschw.	⊕ sehr zuverlässig	⊖ mäßige Genauigkeit
	⊕ einfache Installation	
Barometer	⊕ zuverlässig	⊖ mäßige Genauigkeit
	⊕ einfache Installation	

Zur Verfügung stehen mehrere Messsysteme, deren Vor- und Nachteile in [Tabelle 3.9](#) aufgeführt sind. Hierbei zeigt sich, dass sich die verschiedenen Messsysteme in ihren Eigenschaften gut ergänzen können und somit die Aufzeichnung mit mehreren Messsystemen gewählt wird.

Die verwendete Messtechnik besteht aus:

- JAVAD Delta GNSS Receiver [46]
- Aaronia GPS Logger [1]
- OBD-Software WG Soft Scan-Master [101]

Das System von Javad arbeitet mit DGPS, der Daten-Logger von Aaronia besitzt einen GPS-Empfänger und ein Barometer. Die OBD-Geschwindigkeitsmessung wird mit dem System von WG-Soft durchgeführt.

Messdatenverarbeitung

Die Rohdaten der verschiedenen Messsysteme werden jeweils in das Geschwindigkeits- und Höhensignal über der Zeit umgerechnet. Anschließend erfolgt gemäß der Qualitätsklassifizierung aus [Tabelle 3.10](#) eine Priorisierung bei der Wahl des entsprechenden Signals. Wenn das höherwertige Signal Abschnitte mit unplausiblen Daten hat, z.B. wenn der [GPS](#)-Empfang gestört ist, wird der Abschnitt mit den Daten aus niedrigeren Qualitäten ersetzt.

Tabelle 3.10: Sortierung Messdatenqualität

Geschwindigkeit	Höhe
1. DGPS (JAVAD)	1. DGPS (JAVAD)
2. OBD (WG-Soft)	2. GPS (Aaronia)
3. GPS (Aaronia)	3. Barometer (Aaronia)

Im Anschluss an die Zusammenführung der Daten aus den unterschiedlichen Messsystemen werden die Signale geglättet. Dies ist insbesondere beim Höhensignal notwendig um hohes Rauschen, Signaldrift und Sprünge bei der Signalzusammenführung herauszufiltern. Das [GPS](#)-Signal besitzt bspw. systembedingt einen Signaldrift über der Zeit. Bei Stillstand des Fahrzeugs, bspw. an einer Ampel, entstehen so Sprünge durch die Umrechnung der x-Achse von Zeit in Distanz. Die Glättung des Signals erfolgt analog zu der Vorgehensweise in den [RDE-Regularien](#) [24]. Um die Qualität noch weiter zu steigern, werden die Höhensignale von mehreren Fahrten auf der gleichen Strecke gemittelt.

3.6.5 Messkampagne und Fahrprofile

Aus den Planungen zum Streckenverlauf in [Abschn. 3.6.2](#) ergeben sich verschiedene Strecken, welche vermessen werden. Die nach Osten verlaufende Strecke (vgl. [Abb. 3.13](#)) erwies sich im Laufe der Messkampagne als ungeeignet, da dort während der Messphase durch Baustellen auf der Autobahn oft Stau war. Dadurch ist die Geschwindigkeit auf diesem Sektor zu gering und kann nicht dem Autobahnabschnitt zugeordnet werden. Die in Richtung Nordwesten und in Richtung Süden verlaufenden Strecken erwiesen sich als geeignet. Aus dem nordwestlichen Verlauf ließen sich zwei Strecken, aus dem südlichen Verlauf eine Strecke ableiten. Im Folgenden werden die auf dem westlichen Abschnitt der Autobahn A8 verlaufenden Strecken als *Nordroute* und *Renningen* sowie die auf der Autobahn A81 in südlicher Richtung verlaufende Strecke als *Tübingen* bezeichnet. In [Anhang A.1](#) sind die genauen Verläufe dieser Routen dargestellt.

Auf diesen Strecken wurden jeweils mehrere Fahrten durchgeführt. Die Verkehrslage lies nicht immer die gewünschte Datenqualität zu und auch die Messtechnik funktionierte nicht immer zuverlässig. Von insgesamt 17 durchgeführten Fahrten lieferten 13 Fahrten Messdaten in ausreichender Qualität. Drei dieser 13 Fahrten erfüllen alle [RDE](#)-Kriterien. Dies zeigt, dass es trotz sorgfältiger Streckenplanung schwierig ist, [RDE](#)-Konformität auf der Straße zu erreichen.

Auf der Strecke *Tübingen* konnten zwei konforme Fahrten aufgezeichnet werden, auf der Strecke *Nordroute* eine. Die Strecke *Renningen* hält nicht die optimale Reihenfolge der Streckenanteile Stadt, Landstraße und Autobahn ein. Sie verläuft bereits nach ca. 2 km auf der Landstraße und enthält damit Geschwindigkeiten bis ca. 80 km/h in den ersten Minuten. Bewertet man als Ende des Kaltstartvorgangs nur die Zeit (erste 300 s [[25](#)]) und nicht die Kühlwassertemperatur, wäre die [RDE](#)-Konformität nicht gegeben. Im Folgenden soll sie trotzdem betrachtet und untersucht werden. In [Abb. 3.15](#) sind der Geschwindigkeits- und Höhenverlauf jeweils einer Fahrt auf jeder Strecke aufgezeigt. Das ebenfalls dargestellte Fahrprofil *Stadtabschnitt* wird in [Abschn. 3.6.6](#) vorgestellt.

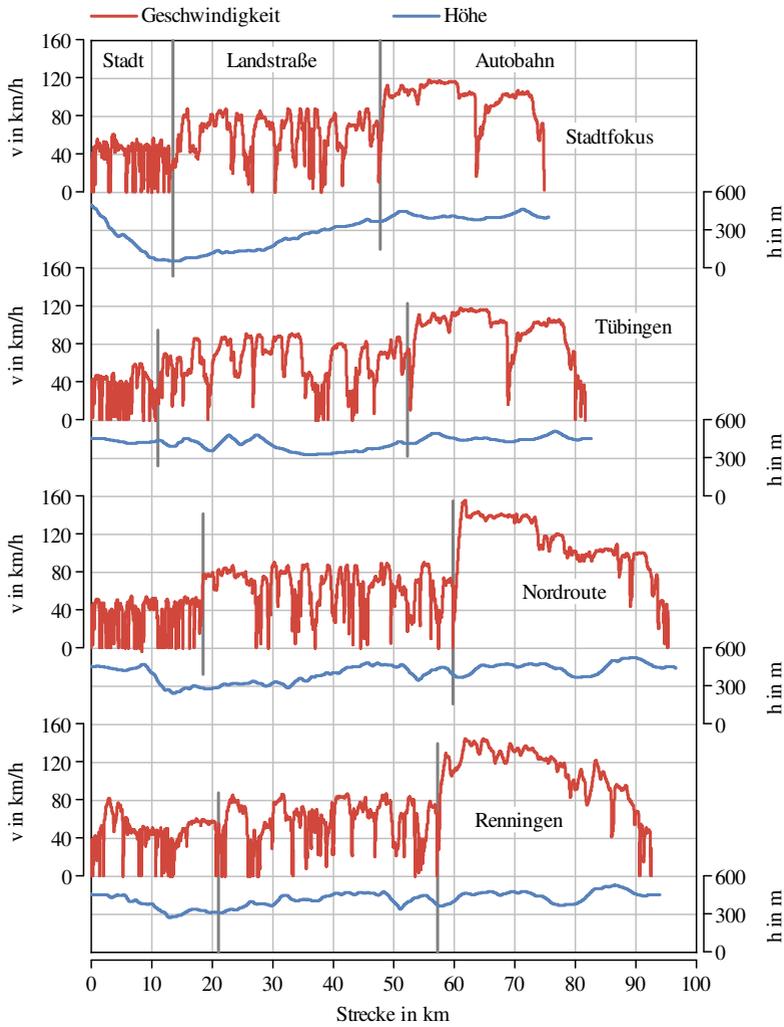


Abbildung 3.15: Geschwindigkeits- und Höhenverlauf der RDE-Fahrprofile

Das dargestellte Fahrprofil *Tübingen* charakterisiert sich durch eine geringe Dynamik. Dies ist an niedrigen Geschwindigkeiten im Stadt-Abschnitt zu sehen und zeigt sich auch in geringen Werten der oberen Dynamikgrenze $v \cdot a_{\text{pos}}\{95\}$

in allen drei Abschnitten in [Abb. 3.16](#). Auch die Werte der unteren Dynamikgrenze RPA sind bei dem Profil *Tübingen* am geringsten. Zum Vergleich sind für beide Größen die Werte von *NEFZ* und *WLTC* mit aufgeführt. Der Autobahnabschnitt besitzt mit maximal 118 km/h eine recht niedrige Geschwindigkeit, welche über lange Phasen ziemlich konstant ist. Die kumulierten Höhenmeter sind mit 731 m pro 100 km Distanz die geringsten von allen Strecken, mit ca. 83 km ist sie auch die kürzeste Strecke. Alle relevanten *RDE*-Kriterien sind in [Anhang A.2](#) zu finden.

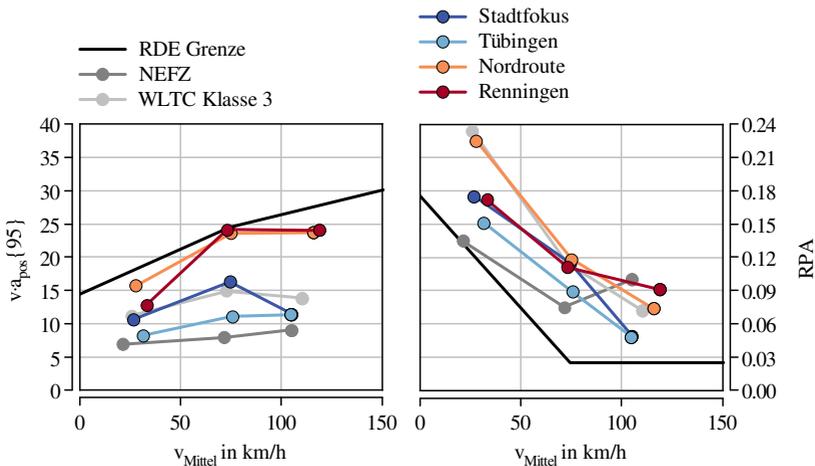


Abbildung 3.16: Dynamikkriterien RDE-Fahrprofile und Testzyklen

Das Profil der Route *Nordroute* charakterisiert sich durch einen hohen Anteil von Geschwindigkeiten über 145 km/h (vgl. [Abb. 3.15](#)), welcher so geplant wurde. Im Landstraßenabschnitt sind mehr Brems- und Beschleunigungsvorgänge als beim Profil *Tübingen* zu sehen, welche sich in einem hohen oberen Dynamikennwert (vgl. [Abb. 3.16](#)) äußern und nahe am noch zulässigen Wert liegen. Eine weitere Besonderheit dieser Route ist, dass der Stadt-Abschnitt viel bergab führt und sich so leicht eine hohe Dynamik erzielen lässt. Dies zeigt sich am höchsten $v \cdot a_{\text{pos}\{95\}}$ -Wert dieser vier Fahrverläufe. Mit 933 m pro 100 km Distanz ist die Topografie anspruchsvoller als bei *Tübingen*, aber noch im Rahmen der erlaubten 1200 m. Mit 34, 34 und 32 % Streckenanteilen ist die

Verteilung auf die Abschnitte am gleichmäßigsten von den hier betrachteten Routen.

Das Profil der Route *Renningen* charakterisiert sich ebenfalls durch hohe Geschwindigkeiten auf der Autobahn und hohe Dynamik, gerade im Landstraßen- und Autobahn-Abschnitt. Dieses Profil besitzt nicht nur im Gesamten die anspruchsvollste Topografie, sondern weist auch nur im Stadt-Abschnitt die meisten kumulierten Höhenmeter auf (vgl. [Anhang A.2](#)).

3.6.6 Routengenerierung aus Datenpool

Die Vermessung verschiedener Routen mit unterschiedlichen Fahrern zu unterschiedlichen Tageszeiten liefert einen großen Pool an Messdaten von realen Fahrten. Jede Fahrt hat leicht unterschiedliche Eigenschaften und Charakteristika. Ein RDE-Fahrprofil nach eigenen Ansprüchen auf der Straße zu fahren stellte sich als sehr anspruchsvoll heraus, weil schon nicht bei jeder Fahrt alle RDE-Regularien eingehalten werden konnten (vgl. [Abschn. 3.6.5](#)). Daher kommt für die individuelle Gestaltung eines RDE-Fahrprofils ein anderes Vorgehen zum Einsatz.

Besonders herausfordernd für die Abgasnachbehandlung sind niedrige Temperaturen. Diese können mit einem Fahrprofil erzwungen werden, welches die folgenden Eigenschaften aufweist:

- niedrige Abgastemperatur
- niedrige Last
- niedrige Dynamik
- zu Beginn bergab
- Einhaltung aller RDE-Kriterien

Die Idee ist, aus den gemessenen Fahrten Abschnitte zu klassifizieren und diese neu zusammzusetzen. Für ein möglichst realistisches Kombinieren verschiedener Teil-Stücke sollte die Geschwindigkeit, die Beschleunigung und die Steigung der aneinanderzureihenden Abschnitte gleich sein. Bei Fahrzeugstillstand ist die Geschwindigkeit und die Beschleunigung gleich null. Diese Zeitpunkte eignen sich also besonders gut, um Abschnitte zu definieren. Eine

gemessene RDE-Fahrt wird bei Fahrzeugstillstand getrennt und so in ca. 30 bis 40 Abschnitte unterteilt. Aus einer Auswahl der 13 vermessenen Fahrten können ca. 300 Abschnitte extrahiert werden. Das Höhsignal wird abgeleitet und so als Steigungsverlauf kombiniert. So entsteht ein stetiger und somit realistischer Verlauf des Höhsignals.

Die einzelnen Abschnitte werden nach verschiedenen Kriterien bewertet. Hierzu zählen die kumulierten positiven und negativen Höhenmeter, die zurückgelegte Distanz in einem Abschnitt, die mittlere Geschwindigkeit, obere und untere Dynamikkennwerte analog zu den RDE-Richtlinien, Standzeiten und ein simulierter Kraftstoffverbrauch. Die so vorsortierten und klassifizierten Abschnitte werden dann in einem iterativen Prozess neu zusammengesetzt. Die RDE-Konformität wird nach jedem Schritt geprüft und einzelne Abschnitte ausgetauscht, bis ein konformer Zyklus entsteht. So wird ein zu Beginn der Fahrt sehr niederlastiger Fahrzyklus erstellt und im Folgenden als *Stadtfokus* bezeichnet.

In [Abb. 3.15](#) ist der Geschwindigkeits- und Höhenverlauf dieses synthetischen RDE-Fahrprofils dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Stadtabschnitt sehr stark bergab verläuft. Der Übergang zum Landstraßen-Abschnitt nach ca. 10 km liegt ca. 400 m tiefer als der Start. In Kombination mit langen Abschnitten ohne Halt zeigt sich hier trotz der Bergabfahrt eine niedrige Dynamik im Stadt-, wie auch in den anderen Abschnitten (vgl. [Abb. 3.16](#)). Die maximal erlaubte Standzeit von 300 s im Stadt-Abschnitt wird auch komplett ausgenutzt (siehe [Anhang A.2](#)), wodurch ein Auskühlen der Abgasanlage verstärkt werden soll. Die zu Beginn bergab gefahrenen Höhenmeter werden im weiteren Verlauf des Fahrprofils wieder bergauf gefahren. Das Ende liegt nur ca. 100 m tiefer als der Start und liegt damit gerade noch innerhalb des zulässigen Bereichs.

4 Untersuchung von Randbedingungen für den NSK-Betrieb

4.1 Einfluss von VVT auf den NSK-Regenerationsbetrieb

Mithilfe eines detaillierten thermodynamischen Vollmotormodells entsprechend der Modellbeschreibung aus [Kapitel 3](#), wird in diesem Abschnitt untersucht, welche Auswirkungen der [variabler Ventiltrieb \(VVT\)](#) auf den Regenerationsbetrieb des Dieselmotors hat. Hierzu wird im ersten Unterabschnitt die Applikation des Motormodells beschrieben. Für den Mager- wie auch den Regenerationsbetrieb müssen verschiedene Parameter eingestellt und geregelt werden, damit alle Modelle im Zusammenspiel ein realitätsnahes Bild eines aktuellen Dieselmotors wiedergeben. Anhand dieses transientfähigen Modells werden die Randbedingungen für den [NO_x-Speicherkatalysator \(NSK\)](#) während des Regenerationsbetriebs betrachtet. Die Einflüsse des [VVT](#), und damit die von interner [Abgasrückführung \(AGR\)](#), werden mit denen von gekühlter externer Hochdruck-[AGR](#) für die Kriterien Kraftstoffverbrauch, Temperatur und Emissionen verglichen.

4.1.1 Applikation thermodynamisches Motormodell

Magerbetrieb

Die phänomenologische Modellierung der Verbrennung kann Einflüsse von Starttemperatur und -druck, Zylindermasse und Gaszusammensetzung im Brennraum auf den Brennverlauf wiedergeben. Für eine belastbare Modellierung des Vollmotors ist daher das realistische Abbilden dieser Größen essentiell. Durch die Modellierung des Strömungspfades, inklusive der Turbolader und Kühler, werden diese Größen über den Ladedruck und die [AGR](#)-Rate eingestellt. Die Feinjustage dieser und weiterer Einstellparameter wird Applikation genannt.

Der Ladedruck wird in dieser Arbeit über die Regelung der **Wastegate (WG)**-Ventile an den beiden Turboladern eingestellt. In Abhängigkeit von Motordrehzahl und -last ist jeweils ein Zielladedruck für die Nieder- wie auch für die Hochdruckstufe vorgegeben, welcher über den Turboladerbypassmassenstrom eingestellt wird. Bei Motordrehzahlen kleiner als 3000 1/min stellt jede Aufladestufe die Hälfte des gewünschten Saugrohrdrucks zur Verfügung. Bei Drehzahlen größer als 3000 1/min ist das **WG** des Hochdruck-Turboladers komplett geöffnet und der Ladedruck wird nur über Variation des Niederdruck-Turbolader-**WG** eingestellt.

Der **AGR**-Massenstrom wird über eine **AGR**-Klappe in der Hochdruck-**AGR**-Strecke eingestellt. Der Zielwert der **AGR**-Rate ist an den Stand der Technik angelehnt [58] und stellt eine "Niedrig-**NO_x**-Strategie" dar.

Zusätzlich hat auch die Einspritzung des Kraftstoffs Einfluss auf alle Motorbetriebspunkte und ist ein wichtiger Applikationsparameter für viele Eigenschaften des Motors. Der Einspritzzeitpunkt der Haupteinspritzung ist so gewählt, dass im kompletten Kennfeld die 50 %-Umsatzlage möglichst bei 8 °KW nach dem oberen Totpunkt liegt. Dies entspricht dem Stand der Technik [58]. Das Einspritzmuster besteht aus einer Haupt- und bis zu zwei Voreinspritzungen bei niedrigen Drehzahlen. Diese Applikation ist an Messdaten angelehnt und entspricht einer typischen dieselmotorischen Einspritzstrategie [63, S. 67].

Die Kombination des modellierten Aufladesystems, der verwendeten Einspritzstrategie und der Brennverlaufsmodellierung in Kombination mit einer Begrenzung des Luft-Kraftstoffverhältnisses auf einen Wert von $\lambda > 1,3$ ergibt im gesamten einen typischen dieselmotorischen Verlauf der Volllastlinie [15, 58]. In Kombination mit dem abgestimmten **NO_x**-Rohemissionsmodell ergibt sich der in **Abb. 4.1** dargestellte Verlauf der Volllast mit den entsprechenden **NO_x**-Emissionen.

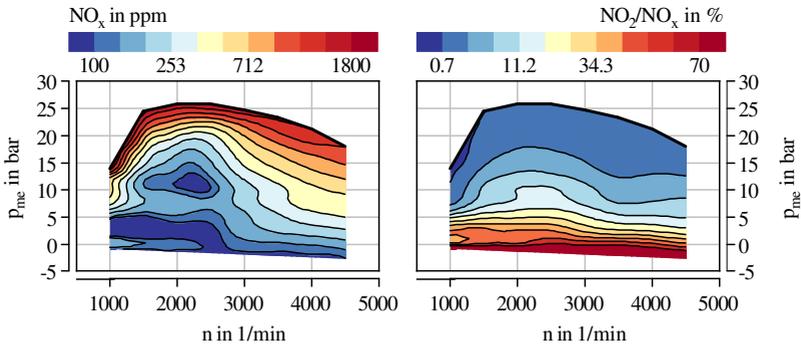


Abbildung 4.1: Ergebnis Applikation Magerbetrieb, NO_x-Konzentration und NO₂/NO_x-Verhältnis über Motorlast und -drehzahl

Das NO₂/NO_x-Verhältnis zeigt eine starke Abhängigkeit der Motorlast und eine geringe Abhängigkeit der Motordrehzahl. Bei hohen Lasten zeigt sich ein geringes, bei niedrigen Lasten ein hohes NO₂/NO_x-Verhältnis. In weiten Kennfeldbereichen liegt der NO₂-Anteil bei weniger als 10 %. Ein ähnliches Verhalten findet sich auch in der Literatur [81] wieder. Rößler et. al. zeigen in ihren Untersuchungen ebenfalls eine starke Lastabhängigkeit des NO₂/NO_x-Verhältnisses auf. Auch zeigen sie, dass die AGR-Rate einen großen Einfluss auf das NO₂/NO_x-Verhältnis hat. Bei einem Betriebspunkt von 1400 1/min und 6,5 bar effektivem Mitteldruck zeigen sie, dass das NO₂/NO_x-Verhältnis von ca. 4 % ohne AGR auf bis zu ca. 20 % mit AGR ansteigen kann. In diesem Betriebspunkt zeigen sich mit der hier verwendeten Modellierung ebenfalls Werte in dieser Größenordnung.

Regenerationsbetrieb

Der Regenerationsbetrieb mit fettem Luft-Kraftstoffverhältnis λ wird an einer repräsentativen Motordrehzahl mit 1500 1/min und externer AGR appliziert. Ausgehend von der Applikation des Magerbetriebs muss hierfür das Luftverhältnis verringert werden. Die Verbrennung sollte unterstöchiometrisch, der λ -Wert demnach kleiner als eins sein [51, 74]. Bei Prüfstandsuntersuchungen

[11] [12] sowie in der Literatur [74] zeigt sich ein Wertebereich von 0,9 bis 0,95 als sinnvoll. Für die hier dargestellten Untersuchungen wird ein globales Luftverhältnis von $\lambda = 0,95$ gewählt.

Ein „guter“ Regenerationsbetrieb zeichnet sich unter anderem dadurch aus, dass der eingebrachte Kraftstoff möglichst vollständig umgesetzt wird. Dies kennzeichnet sich bei einem gegebenen globalen Luftverhältnis von kleiner als eins durch eine hohe Kohlenstoffmonoxid (CO)- und eine niedrige Sauerstoff (O₂)-Konzentration, welche dabei möglichst die Werte des chemischen Gleichgewichts erreichen sollen. Ebenfalls soll in dieser Arbeit die Motorlast niedrig sein und der Abgasmassenstrom hoch.

Tabelle 4.1: Applikation Regenerationsbetrieb

	Parameter	Wert
Parameter	Haupteinspritzung Einspritzzeitpunkt	16 °KW v. OT
	Haupteinspritzung Masse	4,2 mg
	Nacheinspritzung Einspritzzeitpunkt	40 °KW n. OT
	Nacheinspritzung Masse	9,8 mg
	AGR-Rate	30 %
Ergebnis	CO-Konzentration	2,0 %
	O ₂ -Konzentration	0,18 %
	eff. Mitteldruck	1,3 bar
	Luftmasse	190 mg/ASP

Die zu applizierenden Parameter sind die AGR-Rate, die Einspritzzeitpunkte von Haupt- und Nacheinspritzung sowie die Massen der Haupt- und Nacheinspritzung. Es ergibt sich somit ein fünfdimensionales Optimierungsproblem mit 4 Zielgrößen. Um die Zielgrößen auf eine Dimension zu reduzieren, werden diese gewichtet und auf ein einheitliches Bewertungsschema klassifiziert, auf welches dann optimiert wird. Die folgenden Werte sind dabei die Zielgrößen.

- CO-Konzentration: 2 % (Wert bei $\lambda = 0,95$)
- O₂-Konzentration: 0 % (spiegelt in Kombination mit CO-Konzentration eine vollständige Umsetzung des Kraftstoffs wider)
- Motorlast: so niedrig wie möglich
- hoher Abgasmassenstrom

In [Tabelle 4.1](#) ist das Ergebnis des Optimierungsprozesses dargestellt. Es sind die Einstellungsparameter und Ergebnisse der Applikation zu sehen. In [Abb. 4.2](#) ist der sich daraus ergebende Brennverlauf dargestellt.

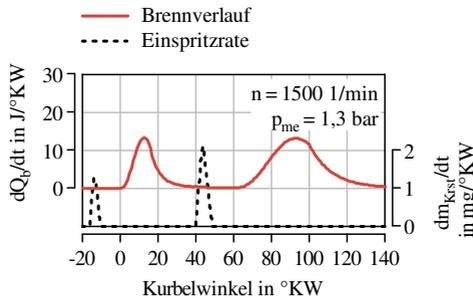


Abbildung 4.2: Brennverlauf bei Regenerationsbetrieb

Betriebsartenwechsel

Für einen dynamischen Wechsel zwischen magerem und fettem Betrieb des thermodynamischen Vollmotormodells müssen die zuvor beschriebenen Größen und Parameter aufeinander abgestimmt variiert werden. Die Schwierigkeit liegt darin, dass ein Wechsel möglichst schnell erfolgen soll, die Verbrennung aber

nicht abbrechen darf. Für eine gute Abstimmung der Größen aufeinander wird zwischen schnell wirkenden und langsam wirkenden Größen unterschieden. Folgende Größen müssen entsprechend aufeinander geregelt werden:

- Drosselklappe (langsam)
- externes AGR-Ventil (langsam)
- variabler Ventiltrieb (langsam)
- WG der Hochdruckturbine (langsam)
- WG der Niederdruckturbine (langsam)
- Einspritzzeitpunkte aller Einspritzungen (schnell)
- Einspritzmengen aller Einspritzungen (schnell)

Für die Regelung werden PID-Regler eingesetzt, der zeitliche Versatz zwischen den schnellen und langsamen Größen wird eingestellt. Mit Vorsteuerkennfeldern für Drosselklappe und den Massen der Haupt- und Nacheinspritzung kann das Einregelverhalten verbessert und die Einregeldauer verringert werden.

4.1.2 Kraftstoffverbrauch

In den folgenden Abschnitten wird bei einem konstanten Betriebspunkt von 3 bar effektivem Mitteldruck und 1500 l/min über einen Zeitraum von 200 s dreimal regeneriert [61]. Während des Magerbetriebs wird der Motor mit externer AGR betrieben. Während des Regenerationsbetriebs wird er einmal mit externer und einmal mit interner AGR betrieben. Es wird stellvertretend einer der drei Wechsel vom mageren zum fetten Betrieb und zurück untersucht und dabei der Zeitpunkt $t = 74$ s betrachtet.

Der effektive Mitteldruck p_{me} ergibt sich aus dem indizierten Mitteldruck p_{mi} und dem Reibmitteldruck p_{mr} zu:

$$p_{me} = p_{mi} - p_{mr} \quad 4.1$$

Der indizierte Mitteldruck p_{mi} setzt sich aus einem Hochdruckanteil $p_{mi,HD}$ und einem Ladungswechselanteil $p_{mi,LW}$ zusammen zu:

$$p_{mi} = p_{mi,HD} + p_{mi,LW} \quad 4.2$$

Somit ergibt sich durch Einsetzen von Gleichung 4.1 in Gleichung 4.2 der Zusammenhang:

$$p_{me} = p_{mi,HD} + p_{mi,LW} - p_{mr} \tag{4.3}$$

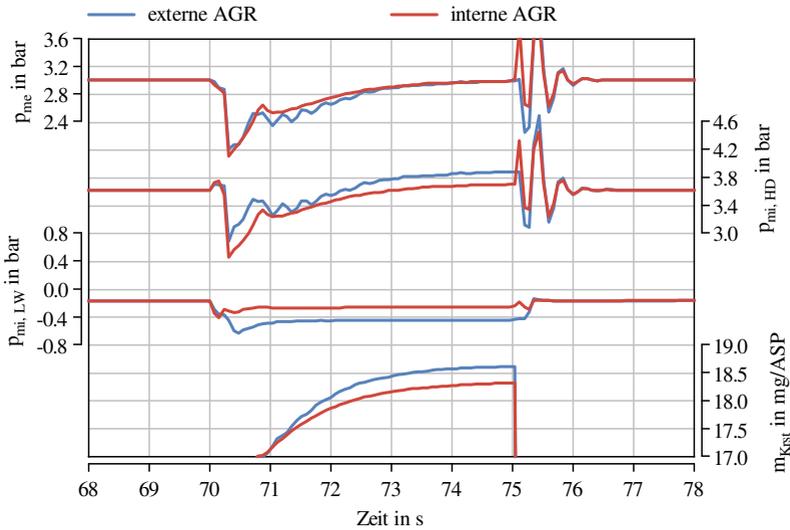


Abbildung 4.3: Effektiver Mitteldruck, indizierter Hochdruck- und Ladungswechselladungsdruck sowie eingespritzte Kraftstoffmasse über der Zeit bei Betriebsartenwechsel, Variation der AGR-Art

In Abb. 4.3 ist zu erkennen, dass mit interner AGR die Ladungswechselarbeit $p_{mi,LW}$ betragsmäßig um 0,18 bar geringer ist als mit externer. Das Restgas wird bei interner AGR über eine kürzere Strecke bewegt (nur in den Auslasskrümmer und zurück in den Brennraum), was zu geringeren Reibungsverlusten mit der Wand im Gaspfad führt. Zum zweiten entfallen die Drosselverluste an der AGR-Klappe und zum dritten sinkt durch die erhöhte Temperatur die Dichte der Füllung. Dadurch herrscht im Ansaugkrümmer ein höherer Druck, welcher zu geringeren Drosselverlusten an der Drosselklappe führt. Bei gleichem effektivem Mitteldruck und gleichem Reibmitteldruck ist somit der indizierte Hochdruckmitteldruck $p_{mi,HD}$ ebenfalls um 0,18 bar geringer. Dies hat zur Folge, dass weniger Kraftstoff eingespritzt werden muss. Die Variante mit interner AGR benötigt somit 1,5 % weniger Kraftstoffmasse.

Anders als im Magerbetrieb hängen beim Regenerationsbetrieb Luft und Kraftstoffmasse über das konstante Luft-Kraftstoffverhältnis zusammen. Abb. 4.4 zeigt, dass bei gleichem Luft-Kraftstoffverhältnis λ der Frischluftmassenstrom an der Drosselklappe ebenfalls um 1,5 % geringer ist. Auch der Abgasmassenstrom am NSK ist mit interner AGR um 1,5 % geringer.

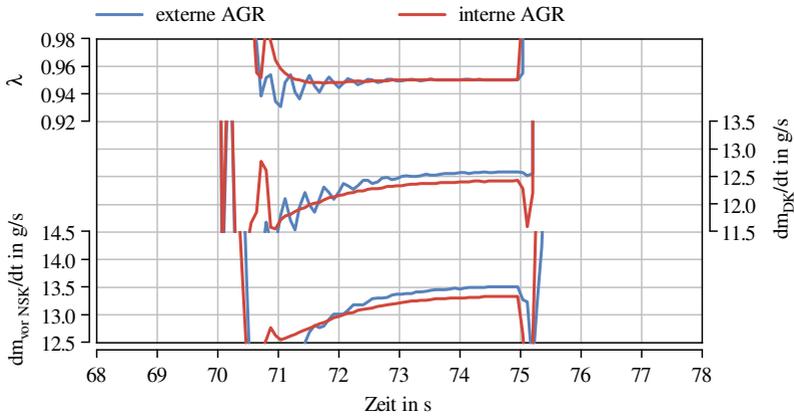


Abbildung 4.4: Lambda, Frischluft und Abgasmassenstrom über der Zeit bei Betriebsartenwechsel, Variation der AGR-Art

4.1.3 Temperatur

Während des Regenerationsbetriebs mit interner AGR ist in Abb. 4.5 zu erkennen, dass die Temperatur zu Beginn der Berechnung des Hochdruckteils ($T_{\text{Zyl, ASP Start}}$ bei 110 °KW vor Zünd-OT) um ca. 100 K höher liegt als mit externer AGR. Dies ist auf die geringere Kühlung des Restgases zurückzuführen. Die Temperatur beim Öffnen der Auslassventile ($T_{\text{Zyl, ASP Ende}}$) ist ebenfalls höher mit interner AGR. Die Temperaturdifferenz ist mit ca. 75 K allerdings geringer als zu Beginn des Arbeitsspiels. Als Grund hierfür lassen sich erhöhte Wandwärmeverluste während des Hochdruckteils durch das höhere Temperaturniveau aufführen.

Das Temperaturniveau vor NSK ist dagegen mit beiden AGR Varianten gleich. Die Erklärung hierfür sind auch höhere Wandwärmeverluste. Durch den va-

riablen Ventiltrieb (VVT) wird das heißere Abgas der Variante mit interner AGR stärker in den Auslasskanälen bewegt. Das Ausschleusen des Abgases und das anschließende Zurücksaugen in den Zylinder führen zu einer erhöhten Bewegung des Abgases und zu höheren Wärmeübergängen mit den Wänden der Auslasskanäle. Dies führt zu einer stärkeren Temperaturabsenkung und zur Kompensation des im Zylinder gewonnenen Temperaturniveaus.

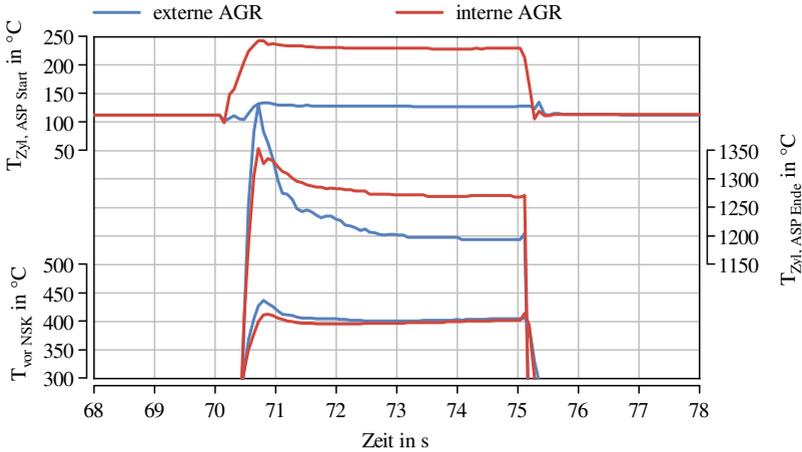


Abbildung 4.5: Temperatur bei Zyklusbeginn, Zyklusende und vor NSK über der Zeit bei Betriebsartenwechsel, Variation der AGR-Art

4.1.4 Emissionen

Die veränderte AGR-Art hat auch einen Einfluss auf die Zusammensetzung des Abgases. In Abb. 4.6 ist zu erkennen, dass die Konzentration von CO, Wasserstoff (H_2) und Propen (C_3H_6) mit interner AGR zunehmen. Die Konzentration von CO erhöht sich relativ um ca. 0,9 %, die von H_2 um ca. 2,3 % und die C_3H_6 -Konzentration um ca. 6 %. Die höheren CO- und H_2 -Konzentrationen sind auf die erhöhte Temperatur im Brennraum und die damit verbundene Verschiebung der Gleichgewichtsbedingungen zurückzuführen.

Zu beachten bleibt allerdings, dass durch den geringeren Abgasmassenstrom auch die jeweiligen Speziesmassenströme um ca. 1,5 % niedriger ausfallen und auf ähnlichem Niveau liegen wie mit externer AGR.

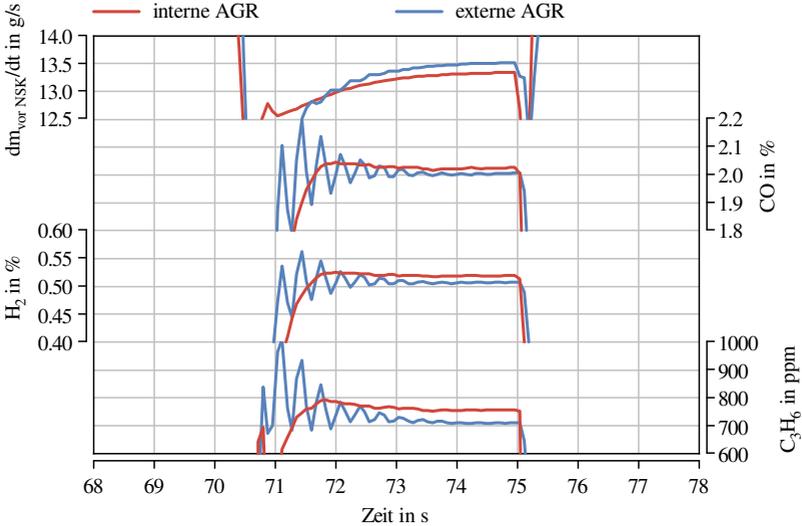


Abbildung 4.6: Abgasmassenstrom, CO-, H₂- und C₃H₆-Konzentration bei Betriebsartenwechsel, Variation der AGR-Art

4.1.5 AGR-Art Zusammenfassung

In diesem Betriebspunkt lässt sich somit zusammenfassend feststellen, dass die AGR-Art folgenden Einfluss auf den NSK zeigt:

- Eine Auswirkung auf die Temperatur vor NSK ist in diesem Betriebspunkt nicht zu erkennen
- Die Ladungswechselarbeit und damit der Kraftstoffverbrauch ist mit interner AGR niedriger
- Der Abgas-Massenstrom ist mit interner AGR niedriger
- Die Regenerationsmittel-Konzentration ist mit interner AGR erhöht

4.2 Einflüsse von Schaltstrategie und Strecke auf NSK-Temperatur

Detaillierte phänomenologische Modelle, wie sie im vorherigen Abschnitt zum Einsatz kommen, besitzen die Eigenschaft, dass sie mit nur wenigen Messdaten kalibriert werden können und extrapolationsfähig sind. Sie liefern eine hohe Genauigkeit und Vorhersagekraft, benötigen aber auch hohe Rechenkapazitäten. Die Rechenzeit einer Simulation wird mit dem Realzeit-Faktor klassifiziert und beschreibt den Quotienten aus Simulationsdauer und gerechneter physikalischer Zeit.

In dieser Arbeit sollen viele [Real Driving Emissions \(RDE\)](#)-Zyklen in annehmbarer Zeit simuliert werden. In Anbetracht der zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten und Bearbeitungszeit wird hierzu ein Realzeit-Faktor von ca. 1 benötigt. Die im vorherigen Kapitel verwendete Modellklasse mit detaillierten phänomenologischen Modellen rechnet auf handelsüblichen Desktop-CPU's mit einem Realzeit-Faktor von ca. 100, weshalb die Modelle vereinfacht werden müssen. In den folgenden Abschnitten wird daher die Ableitung eines schnell rechnenden kennfeldbasierten Motormodells beschrieben sowie Einflüsse von Schaltstrategie und befahrener Strecke auf den [NSK](#) mithilfe dieses Modells untersucht.

4.2.1 Ableitung des kennfeldbasierten Motormodell während des Magerbetriebs

Im Hinblick auf eine kombinierte Betrachtung von Motor und [NSK](#) sind die Abhängigkeiten zwischen beiden Modellen zu betrachten. Die Eingangsgrößen für das in [Abschn. 3.5](#) beschriebene [NSK](#)-Modell sind:

- die Gaszusammensetzung vor dem [NSK](#)
- die Gastemperatur vor dem [NSK](#)
- der Massenstrom am [NSK](#)

Diese drei sind in erster Linie vom herrschenden Motorbetriebspunkt abhängig und legen daher eine kennfeldbasierte Modellierung nahe. Ausgehend von dem im vorherigen Abschnitt entwickelten und im mageren Betrieb applizier-

ten Vollmotormodell werden diese Größen aus stationären Simulationen über Motordrehzahl und -last abgebildet. Für die energetische Einordnung ist zusätzlich zu den oben genannten Größen noch der Kraftstoffmassenstrom von Interesse, welcher ebenfalls über Motordrehzahl und -last abgebildet wird. Eine schematische Darstellung des Vorgehens ist in [Abb. 4.7](#) zu finden.

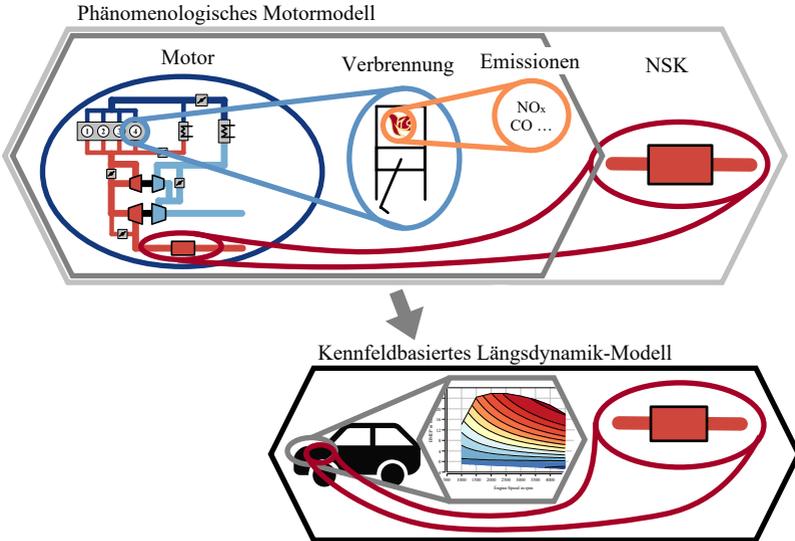


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung der verwendeten Simulationsmodelle und deren Interaktion

Dieses kennfeldbasierte Motormodell wird mit dem Fahrzeuglängsdynamikmodell inklusive Fahrermodell kombiniert. Das Fahrermodell bestimmt aus der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit und der gewünschten Sollgeschwindigkeit eine notwendige Lastanforderung an den Motor. Aus der Fahrzeuggeschwindigkeit, dem aktuellen Gang und der Fahrzeuggeometrie ergeben sich dann Motordrehzahl und -last.

Einflüsse auf den Gaspfad des Motors werden bei dieser kennfeldbasierten Modellierung vernachlässigt, bspw. der dynamische Ladedruckaufbau bei einem

Lastwechsel. Die Modellierung wird aber als ausreichend genau angesehen, da diese Untersuchungen vornehmlich das Gesamtverhalten des NSK über einen langen Zeitraum aufzeigen sollen. Auch Einflüsse der Schwankungen von Massenstrom und Gaszusammensetzung während eines Arbeitsspiels können mit dieser Modellierung nicht berücksichtigt werden, was aber ebenfalls als vernachlässigbar angesehen wird.

Die Effekte der detaillierten Brennverlaufsmodellierung auf das Drehmoment sind im Kraftstoffmassenstrom enthalten. Die Einflüsse der detaillierten Emissionsmodellierung sind in der Gaszusammensetzung abgebildet und die Effekte des Strömungsmodells im Abgasmassenstrom dargestellt. Somit können alle Einflüsse abgebildet werden.

Die Abgasanlage nach dem Turbolader wird, wie in [Abschn. 3.2](#) beschrieben, als eindimensionales Strömungsmodell betrachtet. So ergibt sich ein betriebspunktabhängiges Druckniveau am NSK durch den Druckabfall der Abgasanlage und dem vorgegebenen Massenstrom aus der kennfeldbasierten Motormodellierung.

4.2.2 Route

Die in [Abschn. 3.6.5](#) bzw. in [Abb. 3.15](#) vorgestellten Fahrprofile besitzen sehr unterschiedliche Eigenschaften in Dynamik und Höhenprofil. Deren Einfluss auf die Lage der Betriebspunkte im Motorenkennfeld und damit der Einfluss auf die Randbedingungen für die Abgasnachbehandlung soll hier aufgezeigt werden.

[Abb. 4.8](#) zeigt die Betriebspunkt-Histogramme für die vier verschiedenen Fahrprofile. Es ist dabei zu erkennen, dass die zwei Routen mit höherer Dynamik (*Renningen* und *Nordroute*) mehr Betriebspunkte im Bereich bei höheren Drehzahlen und höheren Lasten aufzeigen. Vor allem Betriebspunkte auf der Vollastlinie sind hierbei auch bei Drehzahlen von größer als 1500 1/min ausgeprägter. Die Route *Tübingen* weist die geringste Streuung von Betriebspunkten auf.

Es ist ebenfalls zu erkennen, dass die horizontale Spreizung der Betriebspunkte größer wird, je höhere Dynamik-Kennwerte (vgl. [Abb. 3.16](#)) das Fahrprofil

aufweist. Bei allen Routen ist der häufigste Betriebspunkt der Leerlaufpunkt bei 800 1/min und 0 bar Mitteldruck, gefolgt von der Schublinie.

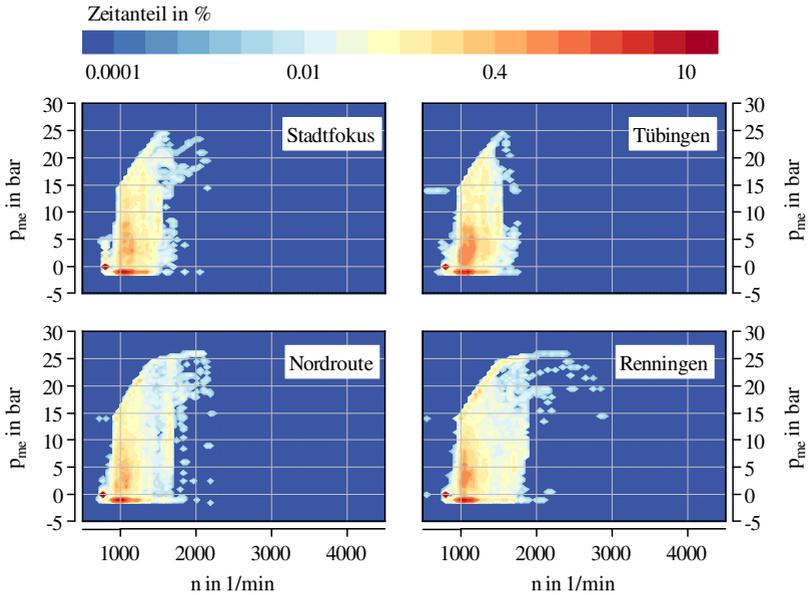


Abbildung 4.8: Betriebspunkt-Histogramm einer kompletten RDE-Fahrt bei verschiedenen RDE-Routen

Abb. 4.9 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperatur nach NSK mit den verschiedenen Fahrprofilen. Hierbei fällt zu Beginn das niedrige Niveau der Route *Stadtfokus* auf, welches sich mit der negativen Steigung dieser Route im Stadt-Abschnitt erklärt (vgl. Abb. 3.15). Bis 2000 s werden hier ca. 500 Höhenmeter bergab gefahren. Die Spreizung der Temperatur liegt zwischen 100 und 400 °C und ist damit bei allen Routen in einem ähnlichen Bereich.

Es ist ebenfalls zu erkennen, dass ein Großteil der NO_x -Rohemissionen während des Landstraßen- und Autobahnabschnitts entstehen. Auf den Stadtabschnitt entfallen nur ca. 4 % (*Tübingen*) bis 8 % (*Renningen*). Ein Großteil der NO_x -Emissionen entstehen während Phasen mit hohen Motorlasten, was an dem

treppenförmigen Verlauf der integrierten NO_x zu erkennen ist. Die besonders großen Sprünge gehen immer einher mit einer starken Erhöhung der Temperatur.

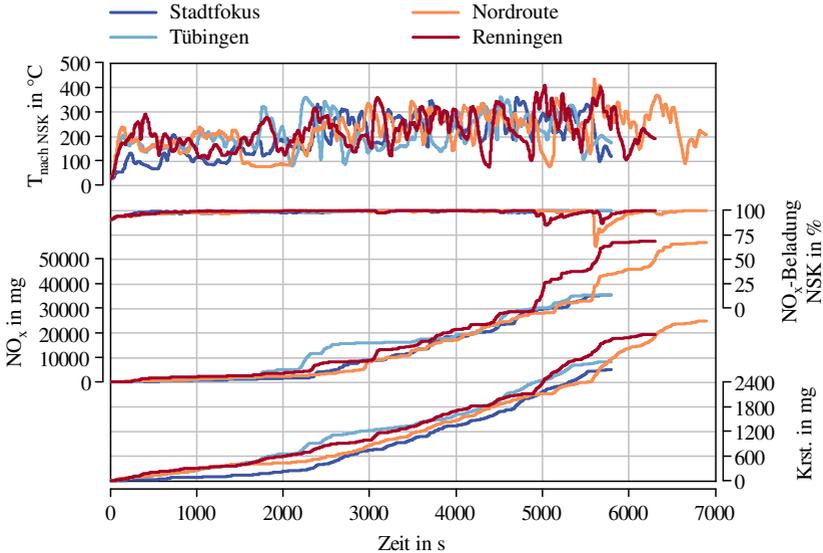


Abbildung 4.9: Zeitlicher Verlauf von Temperatur, NO_x -Emissionen und Kraftstoffverbrauch bei verschiedenen RDE-Fahrten

Bei der Betrachtung der Kraftstoffmasse fällt auf, dass diese während des Stadtteils der Route *Stadtfokus* deutlich niedriger liegt als bei den anderen Routen. Dies ist ebenfalls auf die negative Steigung zurückzuführen. Bei der NO_x -Beladung des NSK, ist zu erkennen, dass beim Zeitpunkt 5000 s bei der Route *Renningen*, bzw. 5600 s bei der Route *Nordroute*, der NSK thermisch regeneriert wird. Hohe Temperaturen sorgen hier für den thermischen Zerfall der gespeicherten NO_x , was unter anderem auch zu den hohen NO_x -Emissionen führt.

In *Abb. 4.10* sind die Betriebspunkthistogramme der verschiedenen Routen jeweils nur vom Stadtabschnitt dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Spreizung der Betriebspunkte deutlich geringer ist als im kompletten Zyklus. Bei allen Fahrzyklen wird im Stadtabschnitt eine maximale Drehzahl von ca. 1600 1/min

erreicht. Bei den dynamischeren Zyklen *Nordroute* und *Renningen* liegen mehr Betriebspunkte bei höheren Lasten als bei den niederdynamischeren Zyklen *Stadtfokus* und *Tübingen*. Der Stadtabschnitt des Zyklus *Stadtfokus* besitzt die geringste Anzahl an Betriebspunkten mit positiver Last, dafür aber einen sehr hohen Anteil an der Schublinie. Dies spiegelt die Erkenntnis aus [Abb. 4.9](#) wider, wo sich schon zeigte, dass der Kraftstoffverbrauch in diesem Abschnitt am geringsten ist und mit dem großen Gefälle des Abschnitts zusammenhängt.

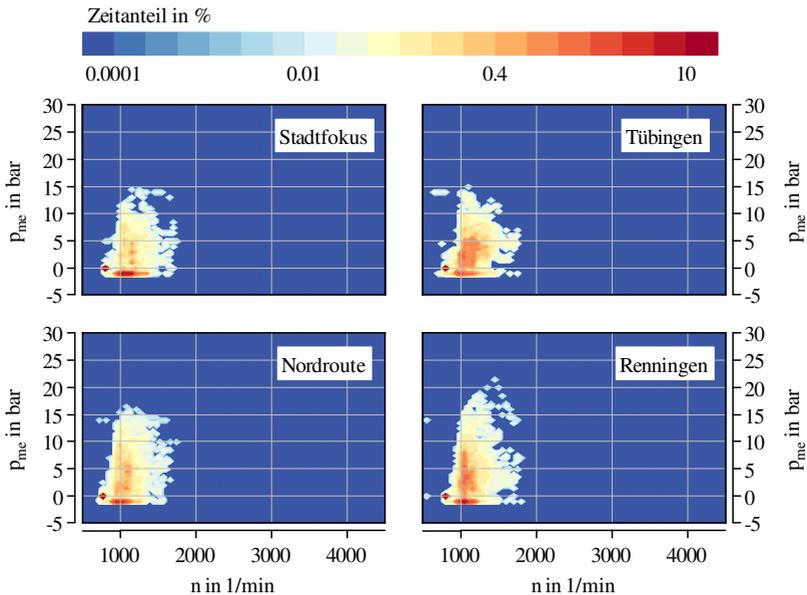


Abbildung 4.10: Betriebspunkt-Histogramm des Stadtabschnitts von verschiedenen RDE-Routen

4.2.3 Schaltstrategie

[Abb. 4.11](#) zeigt die Betriebspunkt-Histogramme mit den vier in [Abb. 3.2](#) vorgestellten Schaltstrategien für die Route *Nordroute*. Es ist zu erkennen, dass bei *Schaltstrategie 4* und *Schaltstrategie 7* ein größerer Drehzahlbereich abgedeckt

wird. Bei den zwei *Schaltstrategien 1* und *6* ist zu erkennen, dass mehr Betriebspunkte auf der Vollastlinie liegen. Dies liegt daran, dass bei diesen beiden Schaltstrategien nur bei Unterschreiten einer gewissen Fahrzeuggeschwindigkeit und somit bei Unterschreiten einer bestimmten Motordrehzahl in einen niedrigeren Gang geschaltet wird. Der Schaltvorgang in einen niedrigeren Gang wird hier nicht wegen einer zu hohen Lastanforderung eingeleitet.

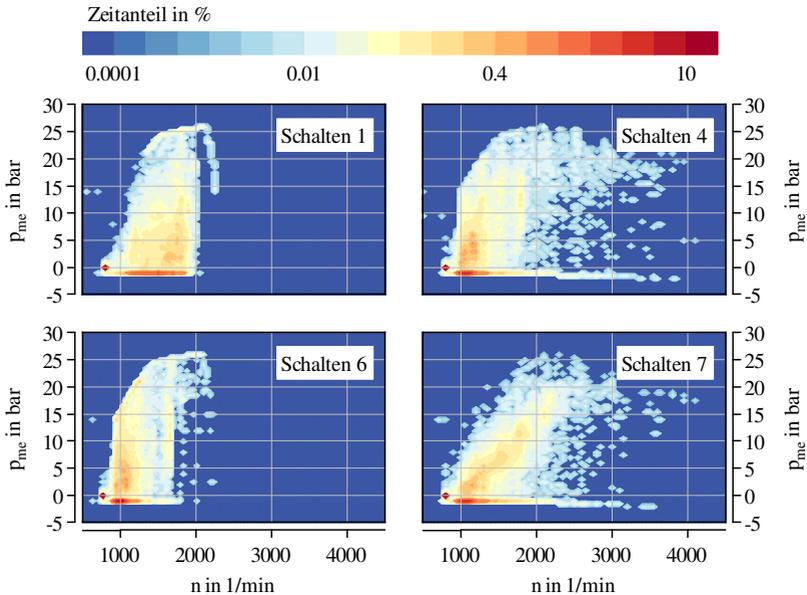


Abbildung 4.11: Betriebspunkt-Histogramm einer kompletten RDE-Fahrt mit verschiedenen Schaltstrategien, Strecke: *Nordroute*

Der Einfluss der Schaltstrategie auf die Temperatur nach *NSK* ist in [Abb. 4.12](#) zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die Unterschiede bei der Temperatur im Stadtabschnitt geringer sind als im Landstraßen- und Autobahnabschnitt. In letzteren beiden, höherlastigen Abschnitten beträgt die Differenz im Mittel ca. 50 K. Im Vergleich zum Einfluss der Strecke (vgl. [Abb. 4.9](#) in [Abschn. 4.2.2](#)) hat die Schaltstrategie einen fast vernachlässigbaren Einfluss auf die Temperatur am *NSK*, gerade im Stadtabschnitt.

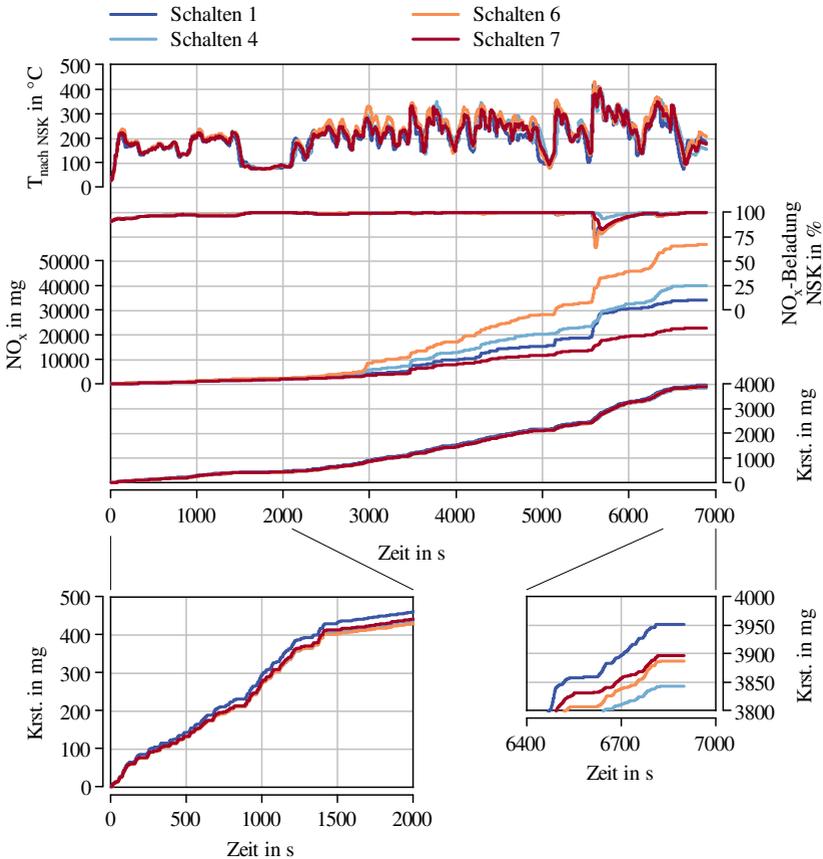


Abbildung 4.12: Zeitlicher Verlauf von Temperatur, NO_x -Emissionen und Kraftstoffverbrauch mit verschiedenen Schaltstrategien, Strecke: Nordroute

Die Schaltstrategie zeigt auch einen geringen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. Die Spreizung zwischen den verschiedenen Schaltstrategien beträgt über den kompletten Fahrtzyklus ca. 2,5 %. Mit *Schaltstrategie 4* lässt sich der geringste Kraftstoffverbrauch erreichen, mit *Schaltstrategie 1* ist dieser am größten. Im Stadtabschnitt zeigt sich der erhöhte Kraftstoffverbrauch von *Schaltstrategie 1* noch deutlicher, hier ist dieser ca. 6 % höher als mit *Schalt-*

strategie 6. Dies ist auf das höhere Drehzahlniveau bei niedrigen Lasten mit *Schaltstrategie 1* im Vergleich zu den anderen Schaltstrategien zurückzuführen.

Deutlich größere Differenzen lassen sich in den NO_x -Emissionen beobachten. Hier liegen die Werte mit der *Schaltstrategie 6* ca. um den Faktor 2,5 höher als mit *Schaltstrategie 7*. Dies erklärt sich durch die Lage der Betriebspunkte im Motorenkennfeld. Bei *Schaltstrategie 7* wird häufig hin- und hergeschaltet, wodurch die Betriebspunkte hauptsächlich auf einer Linie zwischen dem Leerlaufpunkt und dem Betriebspunkt mit dem höchsten Wirkungsgrad (ca. 2200 1/min und 20 bar) liegen. An der Volllast befinden sich kaum Betriebspunkte. In diesem Kennfeldbereich sind auch die NO_x -Emissionen auf einem niedrigen Niveau (vgl. [Abb. 4.1](#)) und dadurch die integralen Rohemissionen ebenfalls gering.

Bei *Schaltstrategie 6* wird das Runterschalten aufgrund von hoher Lastanforderung unterbunden, weshalb die Betriebspunkte mehr bei höheren Lasten liegen. In diesen Kennfeldbereichen, vor allem an der Volllastlinie sind auch die NO_x -Emissionen hoch. Dies spiegelt sich in den integrierten NO_x -Emissionen wider. Während des Stadtabschnitts hat die Schaltstrategie allerdings nur einen sehr geringen Einfluss auf die NO_x -Emissionen.

5 Untersuchungen zum NSK-Umsatzverhalten

5.1 Konstanter Betriebspunkt

Dieser Abschnitt stellt eine Plausibilisierung der **NO_x-Speicherkatalysator (NSK)**-Modellierung dar. Es soll das Verhalten des Modells im dynamischen Betrieb mit realistischen Verhältnissen zwischen Mager- und Regenerationsbetrieb dargestellt werden. Im eindimensionalen Strömungsmodell ist der **NSK** in Abschnitte von 2 mm Länge diskretisiert und in jedem Abschnitt wird die in **Ab-schn. 3.5** beschriebene Reaktionskinetik berechnet. Somit wird der chemische Zustand des **NSK** nicht nur zeitlich, sondern auch örtlich aufgelöst.

Tabelle 5.1: Randbedingungen Parameterstudie Speicherkatalysator

Spezies	Magerbetrieb	Regenerationsbetrieb
O ₂	17.5 %	0,7 %
CO ₂	2.5 %	12 %
H ₂ O	2.5 %	12 %
NO	140 ppm	68 ppm
NO ₂	20 ppm	8 ppm
H ₂	0 %	0,6 %
CO	0 %	2 %
C ₃ H ₆	0 ppm	1000 ppm
Massenstrom	108 kg/h	45 kg/h

Die Eingangsgrößen für die folgende Untersuchung sind der Massenstrom, die Temperatur und die Gaszusammensetzung, welche während des Mager- bzw. Regenerationsbetriebs konstant gehalten sind. Die konkreten Werte für beide Betriebsmodi sind in **Tabelle 5.1** dargestellt. Diese Werte repräsentieren einen Motorbetriebspunkt mit einer Drehzahl von 1500 1/min und 3 bar effek-

tivem Mitteldruck. Sie sind von den Simulationen aus [Abschn. 4.1](#) bzw. von Messdaten abgeleitet.

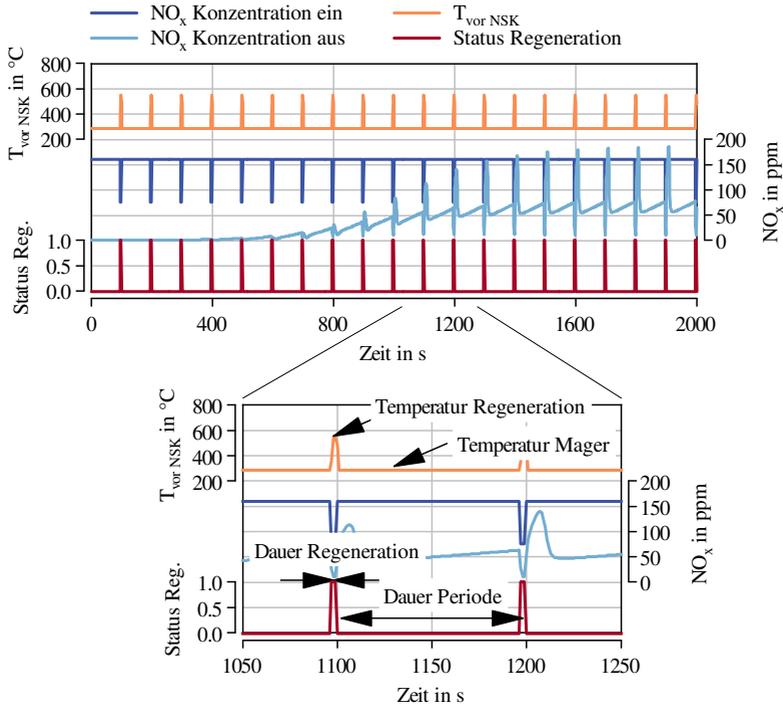


Abbildung 5.1: Randbedingungen: Temperatur Regeneration und Mager, Dauer Regeneration und Periode

Der NSK ist zu Beginn leer, die Simulation hat eine Dauer von 2000 s. In [Abb. 5.1](#) ist beispielhaft der zeitliche Ablauf dieser Untersuchungen zu sehen. Es werden für diese Untersuchung die folgenden Parameter in den dazugehörigen Größenordnungen variiert:

- Die Temperatur während des Regenerationsbetriebs (150 bis 550 °C)
- Die Temperatur während des Magerbetriebs (150 bis 550 °C)
- Die Dauer des Regenerationsbetriebs (0,2 bis 20 s)
- Die Dauer einer Periode (20 bis 200 s)

5.1.1 Variation Temperatur während Regenerationsbetrieb

Als Erstes wird die Variation der Gastemperatur während der Regeneration betrachtet. In [Tabelle 5.2](#) sind die Werte der Eingangsparameter für diese Untersuchung zu sehen.

Tabelle 5.2: Randbedingungen Variation Temperatur während Regenerationsbetrieb

Parameter	Wert
Temperatur Regeneration	150 - 550 °C
Temperatur Mager	286 °C
Dauer Regeneration	1 s
Dauer Periode	100 s

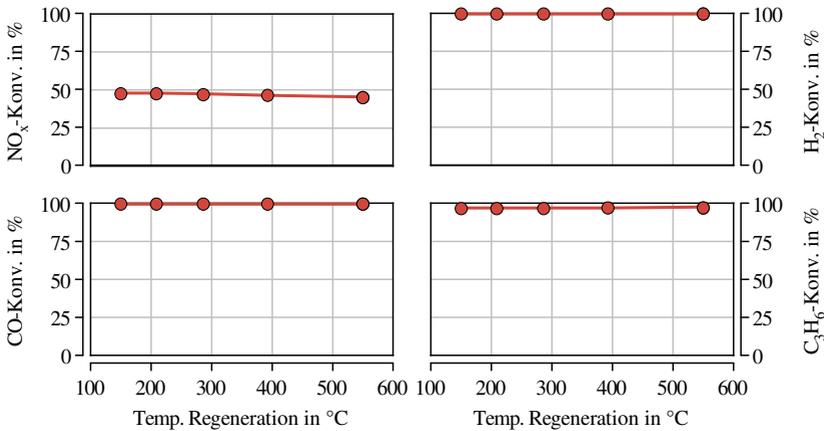


Abbildung 5.2: NO_x-, H₂-, CO- und C₃H₆-Konvertierungsraten mit NSK-Modell; Variation Temperatur während Regenerationsbetrieb

Die Konvertierungsrate wird in dieser Arbeit definiert als das Verhältnis der umgewandelten Stoffmenge, also der Differenz aus ausgeströmter Stoffmenge n_{aus} und hineingeströmter Stoffmenge n_{ein} , zur hineingeströmten Stoffmenge n_{ein} einer Spezies zu:

$$K_{\text{Konv.}} = \frac{n_{\text{ein}} - n_{\text{aus}}}{n_{\text{ein}}} \quad 5.1$$

In [Abb. 5.2](#) sind die Konvertierungsraten der kompletten 2000 s dauernden Simulation für die Spezies [Stickoxide \(NO_x\)](#), [Wasserstoff \(H₂\)](#), [Kohlenstoffmonoxid \(CO\)](#) und [Propen \(C₃H₆\)](#) über der Temperatur während der Regeneration dargestellt. Die Darstellung zeigt, dass die Gaseintrittstemperatur während des Regenerationsbetriebs nur einen geringen Einfluss auf die Konvertierungsraten der verschiedenen Spezies hat. Dieses Verhalten zeigt sich auch in einem sehr weiten Bereich der anderen Eingangsgrößen.

Die Erklärung für dieses Verhalten liegt in der Wärmekapazität des Speicherkatalysators begründet. Diese hat den Einfluss, dass Temperaturschwankungen am Eingang des NSK nur gedämpft am Ausgang ankommen. Die mittlere Temperatur im Katalysator entspricht somit einer massenstromgewichteten mittleren Temperatur aus Mager- und Regenerationsbetrieb. Das Verhältnis von Regenerationsdauer zur Dauer des Magerbetriebs bzw. der Dauer einer Periode, ist hier nur 1 zu 100 und der Massenstrom während der Regeneration ist nur ca. halb so hoch. Eine Anhebung des mittleren Temperaturniveaus von 1/200 der Temperaturdifferenz zwischen Mager- und Regenerationsbetrieb macht sich demnach nicht stark bemerkbar.

Je näher man Positionen am Eintritt des Katalysators betrachtet, desto größer wirkt sich die höhere Temperatur während der Regeneration aus. In Kombination mit niedrigen Temperaturen während des Magerbetriebs macht sich die Temperaturanhebung während der Regeneration bemerkbar. Die Konvertierungen von [C₃H₆](#) und [CO](#) können dadurch erhöht werden (hier nicht dargestellt).

5.1.2 Variation Temperatur während Magerbetrieb

Die Werte der Eingangsparameter für die Variation der Temperatur im Magerbetrieb sind in [Tabelle 5.3](#) dargestellt.

Tabelle 5.3: Randbedingungen Variation Temperatur während Magerbetrieb

Parameter	Wert
Temperatur Regeneration	550 °C
Temperatur Mager	150 - 550 °C
Dauer Regeneration	1 s
Dauer Periode	100 s

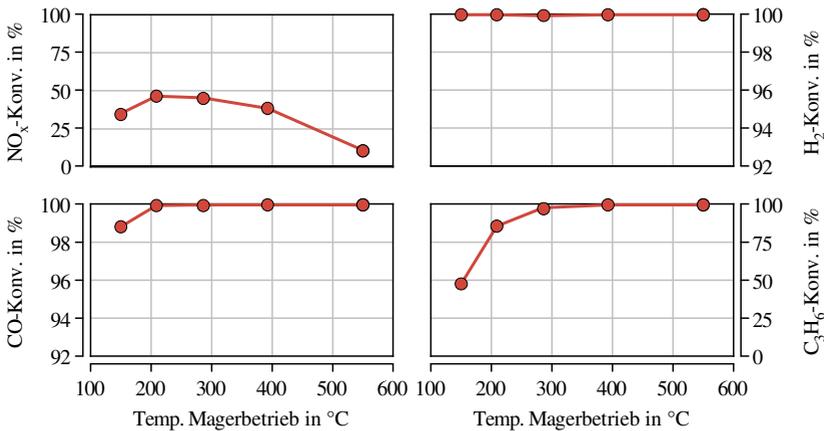


Abbildung 5.3: NO_x-, H₂-, CO- und C₃H₆-Konvertierungsraten mit NSK-Modell; Variation Temperatur während Magerbetrieb

In [Abb. 5.3](#) sind wieder die Konvertierungsraten der verschiedenen Spezies über dem variierten Parameter, hier der Temperatur während des Magerbetriebs, dargestellt. Es zeigt sich, dass die Temperatur während des Magerbetriebs einen deutlich größeren Einfluss als auf die Konvertierungsraten zeigt als die Temperatur während des Regenerationsbetriebs aus dem [vorherigen Abschnitt](#).

Die NO_x -Konvertierung erreicht zwischen 200 und 300 °C ihren Maximalwert. Dies deckt sich mit den Ergebnissen anderer Arbeiten und spiegelt den Stand der Technik wider [77] [51]. Die Konvertierungsrate von CO liegt in einem weiten Temperaturbereich bei 100 % und nimmt nur unterhalb von 200 °C ab. H_2 wird über den gesamten Temperaturbereich zu 100 % umgewandelt.

Die Konvertierungsrate von C_3H_6 liegt bei Temperaturen über 300 °C ebenfalls bei 100 %, nimmt allerdings schon bei höheren Temperaturen deutlich stärker ab als die von CO und liegt bei einer Temperatur von 150 °C nur noch bei 50 %. C_3H_6 oxidiert über Gleichung 2.1 zu einem großen Teil an Platin direkt zu Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasser (H_2O). Bei hohen Temperaturen liegt das Gleichgewicht dieser Reaktion stark auf der Produktseite, was die hohen Konvertierungsraten erklärt. Bei den niedrigeren Temperaturen liegt das Gleichgewicht eher auf der Eduktseite, wodurch die C_3H_6 -Konvertierung gering wird.

5.1.3 Variation Dauer des Regenerationsbetriebs

Tabelle 5.4 zeigt die Werte der Eingangsparameter für die Variation der Regenerationsdauer.

Tabelle 5.4: Randbedingungen Variation Dauer des Regenerationsbetriebs

Parameter	Wert
Temperatur Regeneration	550 °C
Temperatur Mager	286 °C
Dauer Regeneration	0,2 - 20 s
Dauer Periode	100 s

In Abb. 5.4 sind, wie in vorangegangenen Abschnitten, die Konvertierungsraten dargestellt. Es ist dabei zu erkennen, dass die NO_x -Konvertierung mit steigender Regenerationsdauer linear zunimmt und bei einer Dauer von 5 s den Wert von 100 % erreicht. Es werden also alle Stickoxide konvertiert. Mit weiter zunehmender Regenerationsdauer nehmen allerdings die H_2 - und CO -Konver-

tierungsraten ab einer Dauer von größer als 7,5 s ab. Diejenige von H_2 sinkt dabei deutlich stärker (man beachte zusätzlich die Achsenskalierung), als die von CO und nimmt bei einer Dauer von größer als über 12,5 s sogar negative Werte an. Dies ist auf die **Wassergas Shift Reaktion (WGS)** (vgl. **Gleichung 2.9**) zurückzuführen, die dafür sorgt, dass CO bei Vorhandensein von Wasserdampf (H_2O) in H_2 umgewandelt wird.

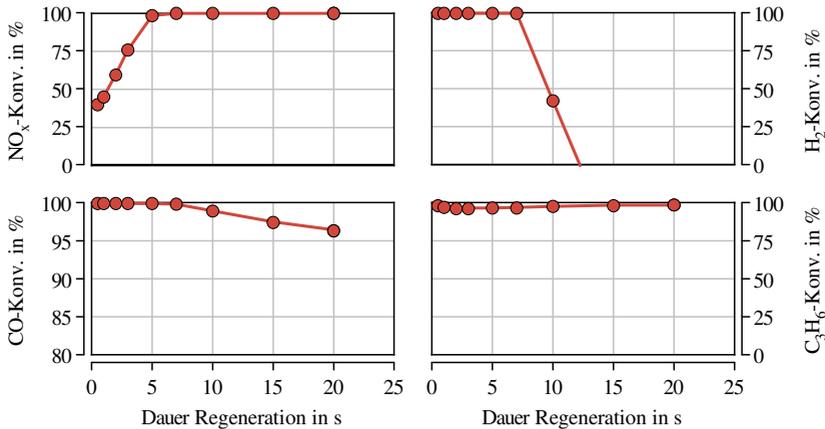


Abbildung 5.4: NO_x -, H_2 -, CO - und C_3H_6 -Konvertierungsraten mit NSK-Modell; Variation Dauer Regenerationsbetrieb

Die C_3H_6 -Konvertierung ist durchgängig auf einem sehr hohen Level, was auf das ausreichend hohe Temperaturniveau zurückzuführen ist. Die dominierenden Reaktionspfade sind hierbei die Oxidation von C_3H_6 (**Gleichung 2.1**) sowie die Umwandlung zu CO und H_2 über die Dampfreformierung (**Gleichung 2.10**).

Diese Variation legt nahe, dass die Dauer einer Regeneration auf die Dauer der Periodenlänge abgestimmt werden muss. Nur eine Dauer von 5 bis 7,5 s erreicht eine hohe Konvertierung aller Spezies.

5.1.4 Variation Periodendauer

In [Tabelle 5.5](#) sind die Werte der Eingangsparameter für die Variation der Periodendauer zu sehen.

Tabelle 5.5: Randbedingungen Variation Periodendauer

Parameter	Wert
Temperatur Regeneration	550 °C
Temperatur Mager	286 °C
Dauer Regeneration	1 s
Dauer Periode	20 - 200 s

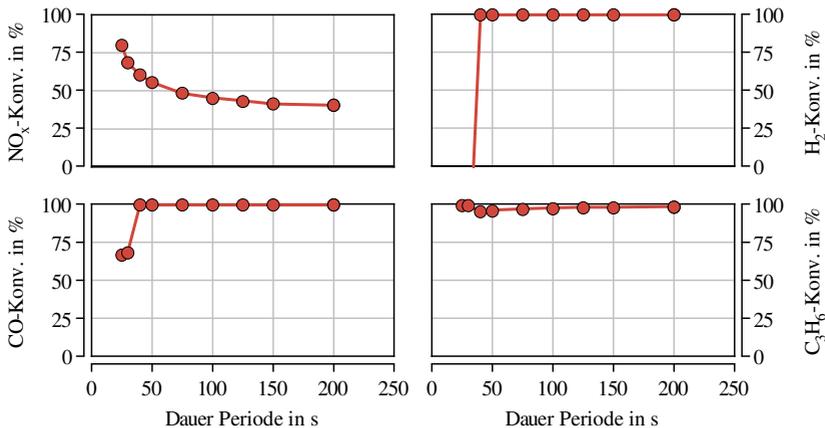


Abbildung 5.5: NO_x-, H₂-, CO- und C₃H₆-Konvertierungsraten mit NSK-Modell; Variation Periodendauer

In [Abb. 5.5](#) ist zu sehen, dass die NO_x-Konvertierung mit sinkender Dauer einer Periode steigt. Die H₂- und CO-Konvertierungsraten brechen bei unter 40 s Periodendauer ein. Auch hier fallen die negativen H₂-Konvertierungsraten auf, welche ebenfalls auf die WGS-Reaktion ([Gleichung 2.9](#)) zurückzuführen sind.

C_3H_6 weist auch hier durchgängig eine sehr hohe Konvertierung auf, was auf das ausreichend hohe Temperaturniveau zurückzuführen ist.

Ausgehend von der Variation aus dem vorherigen Abschnitt lässt sich mit einer Verkürzung der Periodendauer allerdings nicht die hohe Konvertierungsrate von 100 % erreichen. Zuvor brechen die Konvertierungsraten von CO und H_2 ein. Dieses Verhalten legt nahe, dass die Regenerationsdauer nicht zu kurz gewählt werden sollte. Das Temperaturniveau für alle Prozesse scheint im richtigen Bereich zu sein.

5.1.5 Parameterstudie Ergebnis

Zusammenfassend lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Die Temperatur im NSK hat einen großen Einfluss auf die Emissionen nach dem NSK . Bei 200 bis 300 °C ist die NO_x -Konvertierung am höchsten. Unterhalb von 300 °C nimmt die C_3H_6 -Konvertierung stark ab.
- Die Temperatur während des Regenerationsbetriebs spielt eine untergeordnete Rolle, da das Verhältnis von Regenerations- zu Periodendauer in Kombination mit der hohen Wärmekapazität des NSK die mittlere Temperatur nur gering beeinflusst.
- Das Verhältnis von Regenerations- zu Periodendauer hat großen Einfluss auf die NO_x - wie auf die H_2 -Konvertierung. Bei zu langer Regenerationsdauer, bzw. zu kurzer Periodendauer brechen vor allem H_2 und auch CO durch den NSK durch. Bei zu geringer Regenerationsdauer, bzw. zu langer Periodendauer verringert sich die NO_x -Konvertierung.

Diese Erkenntnisse entsprechen den Erwartungen, wodurch die NSK -Modellierung für die folgenden Untersuchungen als valide angesehen wird.

5.2 Dynamischer RDE-Betrieb

Für eine Untersuchung von NSK -Regenerationszeitpunkten während dynamischen **Real Driving Emissions (RDE)**-Fahrzyklen wird zusätzlich zum Kenn-

feldmodell des mageren Betriebs ein Kennfeld des fetten dieselmotorischen Betriebs erstellt. Mithilfe dieses schnell rechnenden Modells beider Betriebsmodi wird der Einfluss verschiedener Parameter unter realistischen dynamischen Bedingungen betrachtet. Die Eingangsgrößen des NSK-Modells (Abgastemperatur, Massenstrom und Konzentration der einzelnen Spezies) sind somit zeitlich variabel und vom Motorbetriebspunkt und dem Betriebsmodus abhängig.

Die Voruntersuchungen zum Einfluss der befahrenen Strecke auf die Temperatur des NSK aus [Abschn. 4.2](#) zeigen, dass diese bei der Route *Stadtfokus* zu Beginn sehr niedrig ist. Im [vorherigen Abschnitt](#) konnte gezeigt werden, dass die Temperatur aber ein wichtiges Kriterium ist, um die Emissionen von CO und C₃H₆ gering zu halten. Um Einflüsse der Regenerationszeitpunkte mit einem dynamischen Temperaturprofil bewerten zu können, wird in den folgenden Untersuchungen der Stadtabschnitt der Route *Stadtfokus* betrachtet.

Die Betriebspunkte im Stadtabschnitt liegen bei niedrigen Drehzahlen und Lasten, gerade bei der Route *Stadtfokus* (vgl. [Abb. 4.10](#)). Daher sind auch die NO_x-Emissionen im Stadtabschnitt auf einem niedrigen Niveau (vgl. [Abb. 4.12](#)). Die Voruntersuchungen zum Einfluss der Schaltstrategie auf die Emissionen aus [Abschn. 4.2.3](#) zeigten, dass die *Schaltstrategie 6* diejenige mit dem höchsten Volllastanteil ist. Diese liefert daher die höchsten NO_x-Emissionen und stellt die anspruchsvollste Schaltstrategie dar und wird für die Untersuchungen verwendet. Alle Randbedingungen für die in diesem Abschnitt beschriebenen Simulationen sind in [Tabelle 5.6](#) beschrieben.

Tabelle 5.6: Randbedingungen dynamischer RDE-Betrieb

Parameter	Wert
Umgebungs- und Starttemperatur	27 °C
Anfangsbeladung NSK	80 %
Dauer	2100 s
Route	<i>Stadtfokus</i>
Abschnitt	Stadtabschnitt
Schalten	<i>Schaltstrategie 6</i>

Eine Regeneration ist mit diesem Modell auch im Leerlauf und im Schubbetrieb möglich. Der Zeitpunkt einer Regeneration wird vorgegeben und nach folgender Vorgehensweise variiert:

- 1.) konstantes Zeitintervall zwischen zwei Regenerationen
- 2.) Regeneration nur bei hohen Motorlasten
- 3.) Regeneration bei hohen Temperaturen und hohen Motorlasten
- 4.) Regeneration nur bei den Temperatur-Maxima

5.2.1 Ableitung des kennfeldbasierten Motormodell während des Regenerationsbetriebs

Die Applikation des Regenerationsbetrieb im thermodynamischen Vollmotormodell erwies sich als sehr aufwändig und zeitintensiv. In dem aufgezeigten Vorgehen in [Abschn. 4.1.1](#) wurde beschrieben, dass die optimale Applikation eine mehrdimensionale Optimierungsaufgabe darstellt. Dies ist verbunden mit vielen Simulationen, welche einen hohen Rechenaufwand widerspiegeln. Eine derartige Optimierung für den gesamten Motorenkennfeldbereich zu machen, übersteigt den Rahmen dieser Arbeit, weshalb die Erkenntnisse aus dem in [Abschn. 4.1.1](#) betrachteten Betriebspunkt auf das gesamte Kennfeld übertragen werden.

Wie in [Abschn. 2.4.2](#) beschrieben, muss für den Regenerationsbetrieb das Luft-Kraftstoffverhältnis abgesenkt werden. In [Abschn. 2.4.3](#) wurde erläutert, dass ausgehend vom mageren Betrieb eine kombinierte Absenkung der Luftmasse und Erhöhung der Kraftstoffmasse die beste Strategie darstellt.

Für die Ableitung eines Regenerationsbetrieb-Kennfeldes wird die Luftmasse in jedem Betriebspunkt so weit abgesenkt, dass die Hälfte der Lambda-Differenz zwischen dem mageren und fetten Betrieb erreicht wird. Die andere Hälfte der Lambda-Differenz wird durch Erhöhung des Kraftstoffmassenstroms erreicht. Diese Aufteilung ist aus dem Vergleich zwischen magerem und fettem Betrieb aus [Abschn. 4.1.1](#) abgeleitet und spiegelt auch die Erkenntnisse aus den Messdaten wider. In dieser Arbeit wird mit einem Luftverhältnis von 0,95 gearbeitet. Ebenfalls ändert sich die Temperatur und Gaszusammensetzung bei einem fetten Betrieb. Anhand der Simulation einzelner Betriebspunkte mit dem

thermodynamischen Vollmotormodell und mit Ergebnissen aus Prüfstandsmessungen werden die Werte für den Regenerationsbetrieb ermittelt und über das gesamte Motorenkennfeld als konstant betrachtet. Eine detaillierte Darstellung der Modellierung des kennfeldbasierten Regenerationsbetriebs ist in [Anhang A.3](#) dargestellt.

5.2.2 Konstantes Regenerationsintervall

In [Abb. 5.6](#) sind die Temperatur nach dem NSK, die Motorlast und die Zeitpunkte der Regenerationen zu sehen. Es sind die Regenerationszeitpunkte mit dem Intervall 100 s dargestellt. Das Regenerationsintervall sowie die Dauer jeder Regeneration werden in den folgenden Untersuchungen variiert. Da die Temperatur nach dem NSK durch die Häufigkeit und Länge der Regenerationen beeinflusst wird, ist in [Abb. 5.6](#) das Temperaturniveau ohne Regeneration dargestellt und ist schematisch zu verstehen. Die Regenerationsdauer wird zwischen 0 und 12 s variiert, das Regenerationsintervall zwischen 100 und 1000 s.

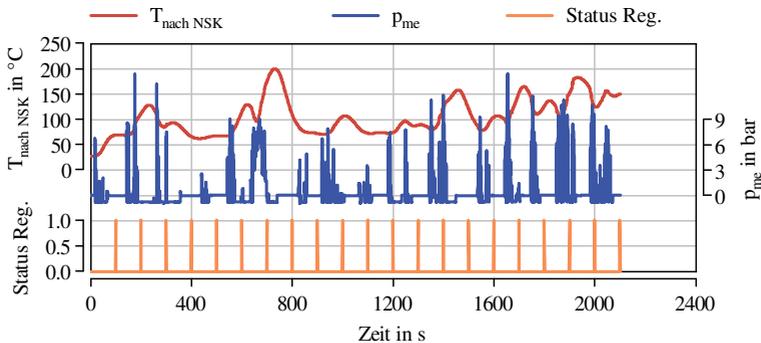


Abbildung 5.6: Regenerationszeitpunkte konstantes Zeitintervall

[Abb. 5.7](#) stellt über der Konvertierungsrate von NO_x die Konvertierungsraten von CO , H_2 und C_3H_6 sowie den Kraftstoffverbrauch während des betrachteten Fahrzyklus mit der Dauer von 2100 s dar. Jeder Punkt spiegelt dabei das Ergebnis eines Fahrtzyklus wider. Es ist zu erkennen, dass die CO - wie auch H_2 -Konvertierung bei kurzen Regenerationsdauern nahezu 100 % beträgt. Mit

steigender Regenerationsdauer nimmt die NO_x -Konvertierung zu. Ab einer gewissen Regenerationsdauer bleibt die NO_x -Konvertierung nahezu konstant, wobei aber die CO - und vor allem die H_2 -Konvertierung stark abnehmen.

Mit 0 s Regenerationsdauer (ohne Regeneration) beträgt die C_3H_6 -Konvertierung 100 %, bei schon kurzen Regenerationsdauern nimmt diese aber stark ab und sinkt über der NO_x -Konvertierung fast linear. Die Abnahme der C_3H_6 -Konvertierung bei gleichbleibender NO_x -Konvertierung ist hier ebenfalls zu erkennen.

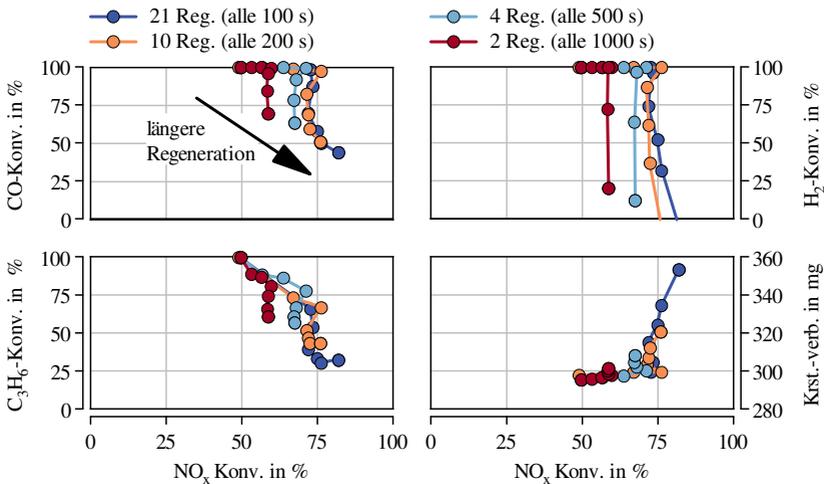


Abbildung 5.7: NO_x -, CO -, H_2 -, C_3H_6 -Konvertierung und Kraftstoffverbrauch; konstantes Regenerationsintervall, variierte Anzahl an Regenerationen und variierte Regenerationsdauer

Mit längeren Regenerationsdauern steigt auch der Kraftstoffverbrauch an. Ebenfalls sind mit häufigeren Regenerationen ein höherer Kraftstoffverbrauch zu beobachten als mit weniger Regenerationen. Dies liegt darin begründet, dass der Kraftstoffverbrauch während des Regenerationsbetriebs höher ist als im mageren Betrieb.

Die Periodendauer des Regenerationszyklus verschiebt den Abfall der hohen Regenerationsmittelkonvertierung horizontal. Mit 1000 s Regenerationsintervall

können maximal ca. 62 % NO_x umgewandelt werden, mit einem Regenerationsintervall von 200 s sind es hingegen über 75 % bei einer CO -Konvertierung von nahezu 100 %.

5.2.3 Hohe Motorlast

Für die Regeneration bei hohen Motorlasten werden die Zeitpunkte gewählt, welche einen effektiven Mitteldruck von mehr als 6 bar aufweisen und mehr als 100 s auseinander liegen (vgl. Abb. 5.8). Für die Varianten mit weniger Regenerationen werden jeweils Regenerationen zu Beginn ausgelassen. Die Temperatur nach NSK ohne Regeneration und die Motorlast dienen wieder zur Orientierung im Zyklus.

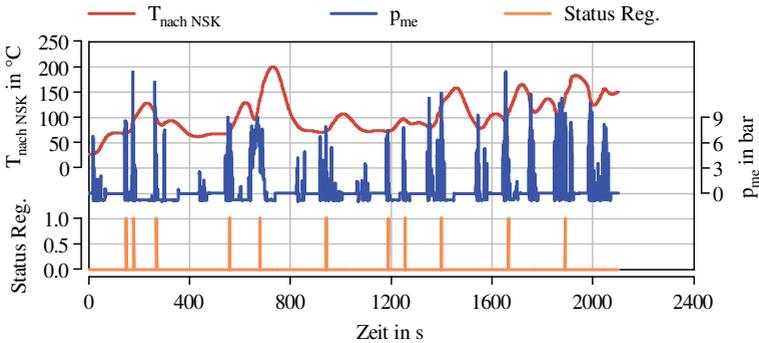


Abbildung 5.8: Regenerationszeitpunkte hohe Motorlast

In Abb. 5.9 sind die Konvertierungsraten der wichtigsten Spezies sowie der Kraftstoffverbrauch dargestellt. Die CO -Konvertierung zeigt ein ähnliches Verhalten wie im vorherigen Abschnitt. Mit steigender Regenerationsdauer steigt die NO_x -Konvertierung bei hoher CO -Konvertierung an, bis es einen starken Abfall der CO -Konvertierungsrate bei fast gleichbleibender NO_x -Konvertierung gibt. Die Konvertierungsraten mit 11 und mit 9 Regenerationen verlaufen ähnlich, bei 7 Regenerationen ist der Einbruch der CO -Konvertierung jedoch geringer. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass mit 7 Regenerationen die erste Regeneration zum Zeitpunkt 680 s stattfindet. Hier herrscht durch eine lange

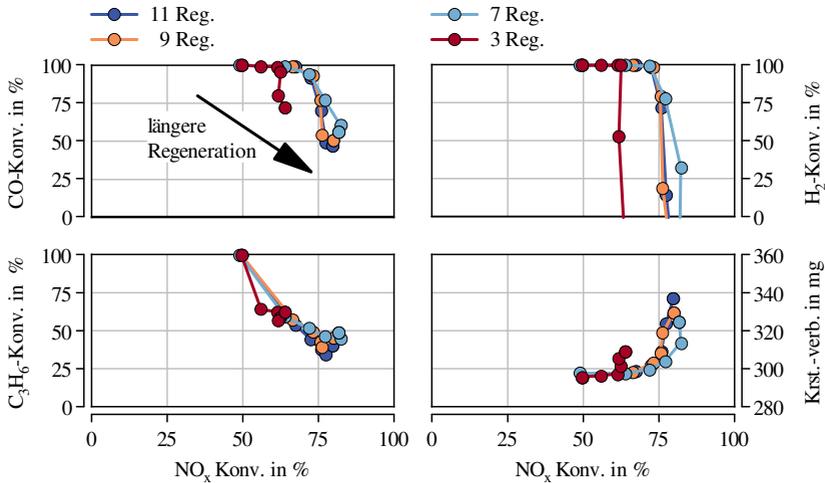


Abbildung 5.9: NO_x-, CO-, H₂-, C₃H₆-Konvertierung und Kraftstoffverbrauch; Regeneration unter hoher Motorlast, variierte Anzahl an Regenerationen und variierte Regenerationsdauer

Lastphase die höchste Temperatur in diesem Abschnitt. Mit nur 3 Regenerationen geschieht der Einbruch bei einer niedrigeren NO_x-Konvertierungsrate. Die Konvertierungsrate von C₃H₆ ist bei allen Varianten geringer als im vorherigen Abschnitt.

5.2.4 Hohe Temperatur und hohe Motorlast

Für die Regeneration bei hohen Temperaturen und hohen Motorlasten sind die vier Zeitpunkte aus Abschn. 5.2.3 mit den höchsten Temperaturen ausgewählt und in Abb. 5.10 mit Nummerierung dargestellt. Bei den in Abb. 5.11 dargestellten Ergebnissen sind die in Tabelle 5.7 aufgezählten Regenerationen aktiv.

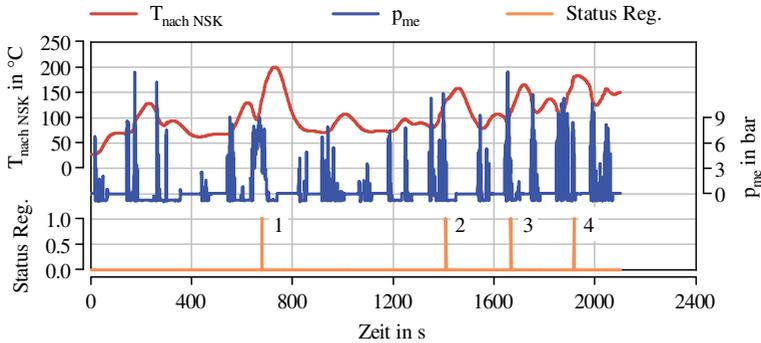


Abbildung 5.10: Regenerationszeitpunkte hohe Temperatur und hohe Motorlast

Tabelle 5.7: Aktivierte Regenerationen hohe Temperatur und hohe Motorlast

Variation	aktive Regenerationen
1 Regeneration	Nr. 1
2 Regeneration	Nr. 1, 4
3 Regeneration	Nr. 1, 3, 4
4 Regeneration	Nr. 1, 2, 3, 4

Der tendenzielle Verlauf der Ergebnisse ähnelt denen aus den vorherigen Abschnitten 5.2.2 und 5.2.3. Mehr Regenerationen ermöglichen eine höhere NO_x -Konvertierung bei nahezu vollständiger CO - bzw. H_2 -Konvertierung. Im Vergleich zu den vorherigen Abschnitten zeigt sich jedoch, dass die maximal erreichbare NO_x -Konvertierung mit nahezu 100 % CO -Umsatz hier auf einem höheren Niveau liegt. Mit vier Regenerationen lässt sich hier ein NO_x -Umsatz von ca. 81 % erreichen. Auch die C_3H_6 -Konvertierung ist im Mittel um ca. 20 Prozentpunkte höher als in Abschn. 5.2.3. Weniger Regenerationen bei höherer Temperatur wirken sich also positiv auf alle vier Konvertierungsraten aus.

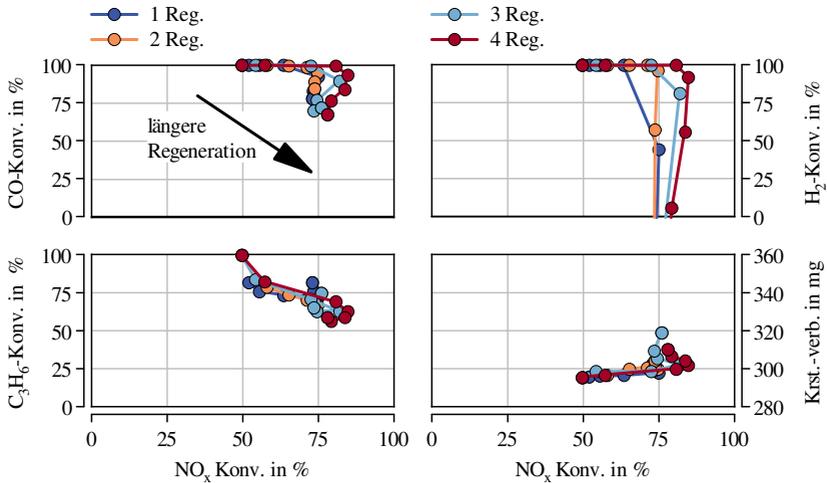


Abbildung 5.11: NO_x-, CO-, H₂-, C₃H₆-Konvertierung und Kraftstoffverbrauch; Regeneration unter hoher Temperatur und hoher Motorlast, variierte Anzahl an Regenerationen und variierte Regenerationsdauer

5.2.5 Maximale Temperaturen

Für die Regeneration bei maximalen Temperaturen werden hier die fünf Zeitpunkte mit den höchsten Temperaturen ausgewählt (vgl. Abb. 5.12). Eine Berücksichtigung der Motorlast besteht im Vergleich zum [vorherigen Abschnitt](#) nicht mehr. Bei den in [Abb. 5.13](#) dargestellten Ergebnissen sind die in [Tabelle 5.8](#) aufgezeigten Regenerationen aktiv.

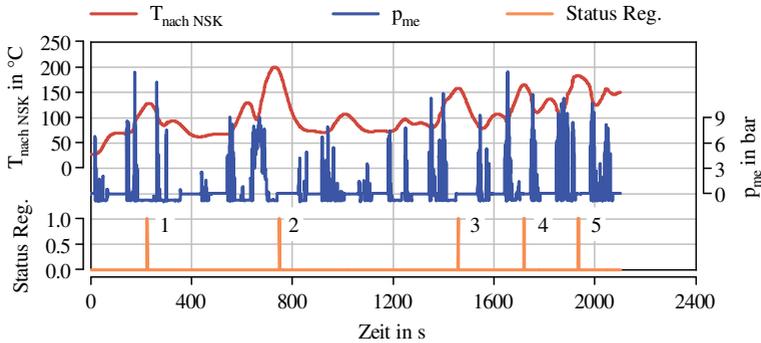


Abbildung 5.12: Regenerationszeitpunkte maximale Temperaturen

Tabelle 5.8: Aktivierte Regenerationen maximale Temperaturen

Variation	aktive Regenerationen
1 Regeneration	Nr. 1
2 Regeneration	Nr. 1, 2
3 Regeneration	Nr. 1, 2, 3
5 Regeneration	Nr. 1, 2, 3, 4, 5

In Abb. 5.13 ist zu erkennen, dass mit mehr Regenerationen der Einbruch in der CO- bzw. H₂-Konvertierung bei höheren NO_x-Konvertierungsraten liegt. Demnach liefert dies wieder ein ähnliches Bild wie in den vorherigen Abschnitten. Die C₃H₆-Konvertierung ist hier noch einmal höher als im vorherigen Kapitel. Mit fünf Regenerationen kann bei 99,8 % CO-Umsatz eine NO_x-Konvertierung von ca. 81 % erreicht werden. Dabei werden die C₃H₆-Emissionen um 86 % reduziert.

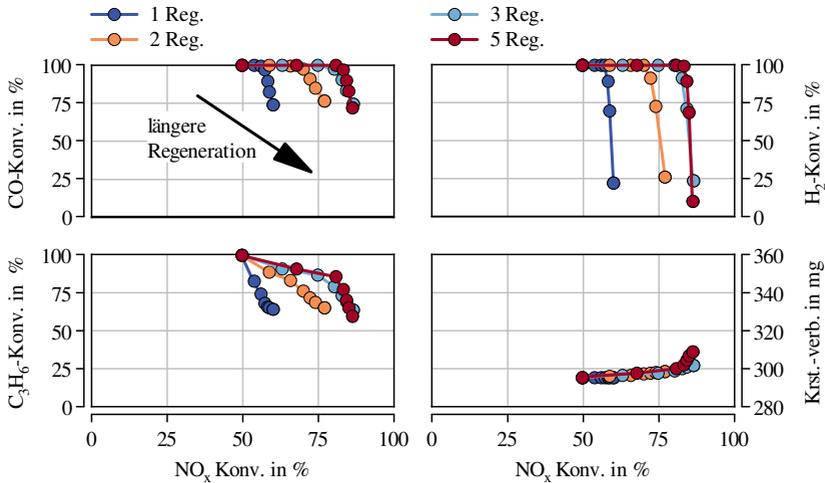


Abbildung 5.13: NO_x-, CO-, H₂-, C₃H₆-Konvertierung und Kraftstoffverbrauch; Regeneration bei maximaler Temperatur, variierte Anzahl an Regenerationen und variierte Regenerationsdauer

5.2.6 Regenerationszeitpunkte Ergebnis

In [Abb. 5.14](#) und [Abb. 5.15](#) sind die Ergebnisse aus den vorherigen Abschnitten zusammengefasst und jeweils die Varianten mit den höchsten NO_x-Konvertierungsraten dargestellt. Wie auch schon in [Abschn. 5.1](#) erkennbar, gibt es für jede Strategie eine charakteristische Regenerationsdauer. Sind die Regenerationen kürzer als diese charakteristische Dauer, werden die CO- und H₂-Emissionen komplett umgesetzt. Sind sie länger, sinken die Konvertierungsraten dieser beider Spezies, wobei die von H₂ stärker einbricht als die von CO. Dieser Effekt beruht auf der WGS und bestätigt die Ergebnisse aus [Abschn. 5.1.3](#) für dynamische Profile.

Bei der Wahl von Regenerationszeitpunkten, welche eine hohe Temperatur aufweisen (*hohe Temp. & hohe Last* sowie *max. Temp.*), erreicht man höhere NO_x-Konvertierungsraten als bei den Varianten, bei denen nicht auf die Temperatur geachtet wird (*konst. Intervall* und *hohe Last*). Diese Temperaturabhängigkeit

bestätigt die Ergebnisse aus [Abschn. 5.1.2](#). Auch die Konvertierungsrate von C_3H_6 zeigt diese Temperaturabhängigkeit. Mit steigender Temperatur während der Regeneration nimmt dessen Konvertierung zu und die emittierte Masse ab.

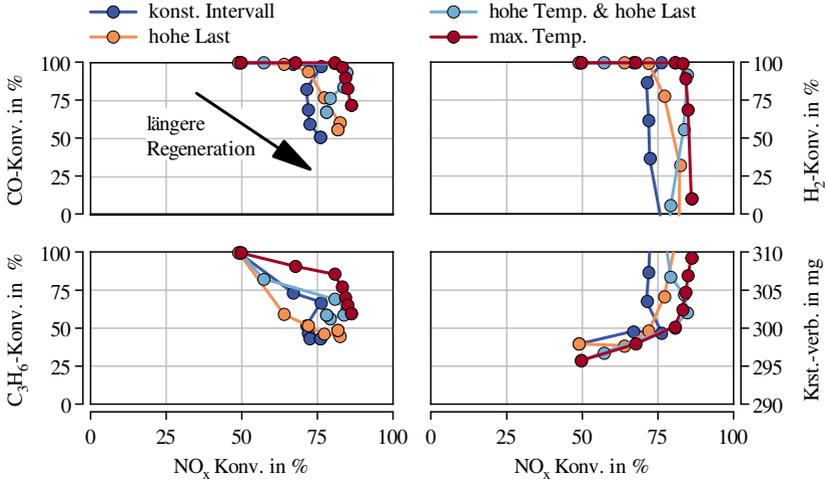


Abbildung 5.14: NO_x -, CO-, H_2 -, C_3H_6 -Konvertierung und Kraftstoffverbrauch; variierte Regenerationszeitpunkte, variierte Regenerationsdauer

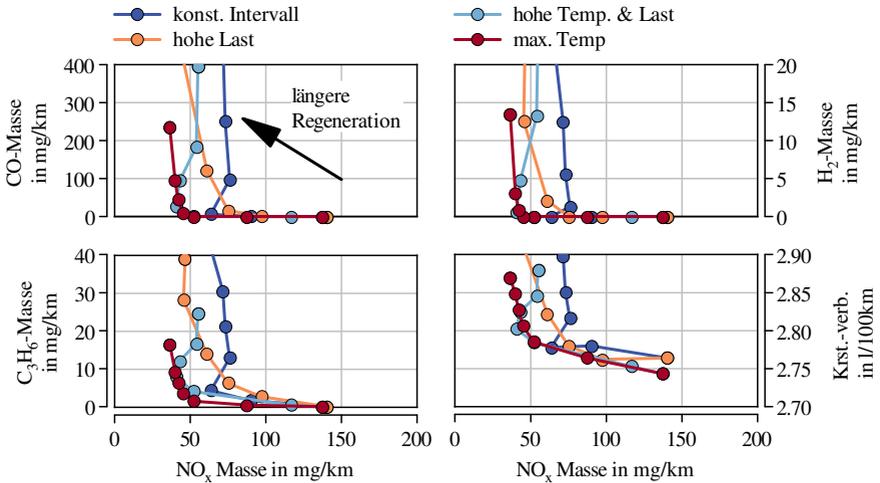


Abbildung 5.15: Spezifische NO_x -, CO -, H_2 -, C_3H_6 -Emissionen und spezifischer Kraftstoffverbrauch; variierte Regenerationszeitpunkte, variierte Regenerationsdauer

Zusammenfassend sind die Erkenntnisse aus [Abschn. 5.2](#) mit denen aus [Abschn. 5.1](#) vergleichbar. Es lassen sich folgende zwei Erkenntnisse ableiten:

- 1.) Die Temperatur des **NSK** zum Zeitpunkt der Regeneration zeigt einen starken Einfluss auf NO_x -Konvertierung und C_3H_6 -Emissionen. Bei einem zeitlich abhängigen Temperaturprofil ist somit nicht nur die Temperatur während des Magerbetriebs, sondern auch der Zeitpunkt der Regenerationseinleitung von Bedeutung.
- 2.) Die Regenerationsdauer hat den größten Einfluss auf CO - und H_2 -Emissionen.

6 Regenerationsstrategie und VVT-Potentialanalyse

6.1 Sensitivitätsanalyse Regenerationsstrategie

Unter dem Begriff Regenerationsstrategie wird das automatische Einleiten und Beenden von Regenerationen verstanden. Dazu werden verschiedene Kriterien definiert, welche für einen Wechsel vom mageren Betrieb in den Regenerationsmodus erfüllt sein müssen. Ist ein Kriterium nicht mehr im erlaubten Wertebereich, wird die Regeneration beendet und zurück in den mageren Betrieb gewechselt.

Die Voruntersuchungen aus [Kapitel 5](#) zeigen, dass die Temperatur des [NO_x-Speicherkatalysator \(NSK\)](#) während der Regeneration unter anderem maßgeblich für die Konvertierung von [Propen \(C₃H₆\)](#) verantwortlich ist. Ebenfalls ist dort aufgezeigt, dass durch die Wahl von Regenerationszeitpunkten bei hohen Temperaturen die [Stickoxide \(NO_x\)](#)-Konvertierung positiv beeinflusst werden kann. Eine Berücksichtigung der Temperatur scheint somit essentiell zu sein.

Der Durchbruch von Regenerationsmitteln wird über die [Wasserstoff \(H₂\)](#)-Konzentration nach dem [NSK](#) detektiert. Im vorherigen Kapitel konnte gezeigt werden, dass diese Größe hierfür die höchste Sensitivität besitzt. Die Lambda-sonde hat auf diese Größe eine hohe Querempfindlichkeit [11], weshalb diese indirekt am Prüfstand oder auch im Fahrzeug betrachtet wird und hierüber das Ende der Regeneration definiert [69].

Ebenfalls wird die [NO_x](#)-Beladung des [NSK](#) berücksichtigt. Eine niedrige Beladung sorgt für viele freie Speicherstellen [100], so dass auch während längerer Phasen ohne Regeneration [NO_x](#) eingespeichert werden kann. In den folgenden Untersuchungen wird hierfür die Speicherstelle *Ba^{II}* stellvertretend betrachtet, da sie die größte Speicherkapazität hat und auch in dem herrschenden Temperaturniveau den größten Anteil an der Speicherung ausmacht. Die Motorlast wird

ebenfalls mitberücksichtigt, da der Motor, wie in [Abschn. 2.4.3](#) beschrieben, nicht in jedem Betriebspunkt einen fetten Betrieb darstellen kann [11].

In [Tabelle 6.1](#) sind die betrachteten Größen zusammengefasst. In Kombination mit den dargestellten Wertebereichen definieren diese Kriterien den Start und das Ende einer Regeneration und stellen somit die Regenerationsstrategie dar. Die dargestellte Spannweite der Werte repräsentiert die in den folgenden Abschnitten betrachtete Variationsbreite.

Tabelle 6.1: Regenerationsstrategie

Größe	Minimum	Maximum
Temperatur nach NSK	25 - 200 °C	-
H_2 -Konzentration nach NSK	-	10 - 10 000 ppm
NO_x -Beladung des NSK	10 - 90 %	20-100 %
eff. Mitteldruck	1-5 bar	-

Die Temperatur des [NSK](#) ist maßgeblich von der befahrenen Strecke abhängig. Um das Temperaturniveau für die Abgasnachbehandlung auch unabhängig vom Motorbetriebspunkt anheben zu können, haben sich Heizmaßnahmen (siehe auch [Abschn. 2.3](#)) etabliert. Dieser Freiheitsgrad soll hier ebenfalls bewertet werden. Dazu wird eine elektrische Abgasheizung mit variabler Energiezufuhr modelliert.

In der Brennverlaufsmodellierung werden Gemischinhomogenitäten und deren Auswirkungen auf die Gaszusammensetzung nur rudimentär abgebildet. Die Güte der Gemischbildung während des Regenerationsbetriebs lässt sich unter anderem in der [Sauerstoff \(\$O_2\$ \)](#)-Konzentration im Abgas definieren. O_2 hemmt die Regeneration des [NSK](#), weshalb diese Konzentration und deren Sensitivität im Fahrtzyklus ebenfalls untersucht wird.

Zusammenfassend werden in den folgenden Untersuchungen die in [Tabelle 6.2](#) dargestellten Parameter betrachtet und deren Sensitivität auf Emissionsverhalten und Kraftstoffverbrauch während [Real Driving Emissions \(RDE\)](#)-Fahrten ausgewertet.

Tabelle 6.2: Sensitivitätsanalyse: beeinflusste Parameter und variierte Größen

Parameter	variierte Größe
Temperatur nach NSK	Freigabetemperatur oder Heizmaßnahmen
Regenerationsdauer	H₂ -Konzentration nach NSK
NO_x -Beladung	NO_x -Beladung
Motorbetriebspunkt	effektiver Mitteldruck
Gaszusammensetzung	O₂ -Konzentration

Wie im vorherigen Kapitel wird auch hier die anspruchsvolle Strecke *Stadtfokus* und dabei der Stadtanteil untersucht. Um ein Auskühlen des **NSK** bei Stillstand zu verhindern, ist ein Start-Stopp-System aktiviert, sodass bei Fahrzeugstillstand kein Abgasmassenstrom herrscht. Die Randbedingungen für die in diesem Kapitel gezeigten Untersuchungen sind in [Tabelle 6.3](#) zu sehen.

Tabelle 6.3: Randbedingungen RDE-Sensitivitätsanalyse

Parameter	Wert
Umgebungs- und Starttemperatur	27 °C
Anfangsbeladung NSK	90 %
Dauer	2100 s
Route	<i>Stadtfokus</i>
Abschnitt	Stadtabschnitt
Schalten	<i>Schaltstrategie 6</i>
Start-Stopp-System	aktiv

6.1.1 Regenerationsdauer

In diesem Abschnitt wird die Konzentration von **H₂** nach dem **NSK** als Abbruchkriterium für eine Regeneration variiert. Die verwendete Regenerationsstrategie

mit allen betrachteten Bedingungen ist in [Tabelle 6.4](#) dargestellt.

Tabelle 6.4: Regenerationsstrategie Variation Regenerationsdauer

Größe	Bedingung
H ₂ -Konzentration	< 10 - 10 000 ppm
NO _x -Zielbeladung	< 40 %
Ø el. Heizleistung	400 W
O ₂ -Konzentration	0 %
Freigabetemperatur nach NSK	> 150 °C
eff. Mitteldruck	> 5 bar

In [Abb. 6.1](#) sind die Temperatur nach NSK, die NO_x-Beladung des NSK, die kumulierten NO_x-, Kohlenstoffmonoxid (CO)- und H₂-Emissionen nach NSK sowie die kumulierte Regenerationsdauer dargestellt. Die Regenerationszeitpunkte können am sprunghaften Verlauf der kumulierten Regenerationsdauer erkannt werden. Diese Sprünge zeigen sich auch in den anderen Größen.

Es ist zu erkennen, dass mit einer Verringerung der H₂-Konzentration von 10 000 auf 1 000 ppm die kumulierten H₂-Emissionen stark abnehmen. Bei der weiteren Verringerung auf 100 ppm werden auch die CO-Emissionen deutlich reduziert. Mit noch weiterer Senkung dieses Parameters setzt sich die Tendenz fort, dessen Betrag nimmt aber ab.

Durch die leicht gesteigerte kumulierte Regenerationsdauer bei niedrigerer H₂-Konzentration erhöht sich auch die gesamte zur Verfügung stehende Masse an Regenerationsmitteln. Dadurch werden die NO_x-Emissionen leicht verringert. Dieser Einfluss ist aber deutlich schwächer ausgeprägt als derjenige auf die CO-Emissionen.

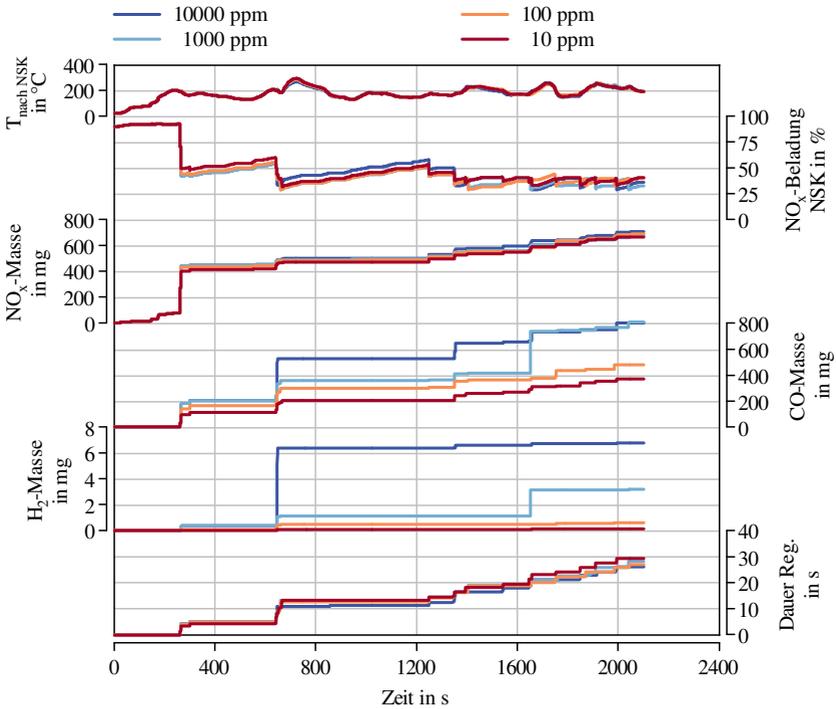


Abbildung 6.1: Zeitlicher Verlauf; Variation der Regenerationsdauer

6.1.2 Stickoxid-Beladung des Speicherkatalysators

Hier wird der Zielwert der Stickoxid (NO_x)-Beladung untersucht. Die detaillierte Regenerationsstrategie ist in Tabelle 6.5 dargestellt. Für ein niedriges Niveau der CO-Emissionen wird eine H_2 -Konzentration von 100 ppm betrachtet. Im Vergleich zum vorherigen Abschnitt wird eine gesteigerte Heizleistung verwendet.

Tabelle 6.5: Regenerationsstrategie Variation Stickoxidbelastung

Größe	Bedingung
H ₂ -Konzentration	< 100 ppm
NO _x -Zielbelastung	< 90 - 10 %
Heizleistung	1300 W
O ₂ -Konzentration	0 %
Freigabetemperatur nach NSK	> 150 °C
eff. Mitteldruck	> 5 bar

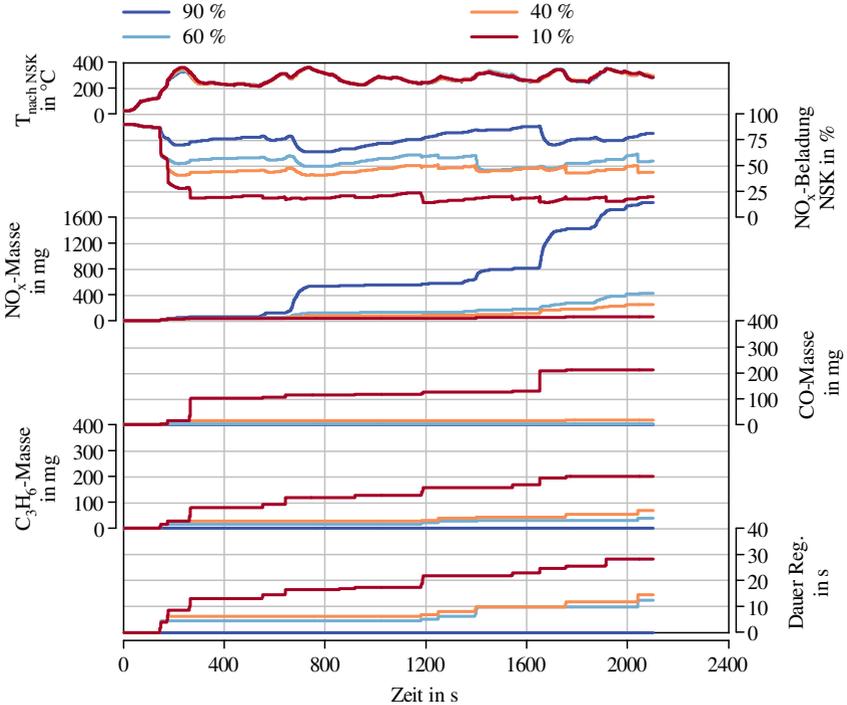


Abbildung 6.2: Zeitlicher Verlauf; Variation der Stickoxidbelastung

Wie im [vorherigen Abschnitt](#) sind in [Abb. 6.2](#) dieselben Ergebnisgrößen dargestellt. Durch das gesteigerte Temperaturniveau aufgrund der hohen betrachteten Heizleistung ist für die NO_x -Zielbeladung von 90 % keine Regeneration erforderlich (kumulierte Regenerationsdauer gleich null). Die herrschende Beladung des NSK ist jedoch nicht durchweg bei 100 %, was sich damit erklären lässt, dass das hohe Temperaturniveau dazu führt, dass sich der NSK teilweise thermisch selbst regeneriert. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass die NO_x -Emissionen ohne aktive Regeneration auf einem sehr hohen Niveau liegen.

Mit einer Verringerung der Zielbeladung des NSK von 90 auf 60 % werden Regenerationen ausgelöst, wodurch die NO_x -Emissionen stark gesenkt werden können. Durch die gesteigerte Anzahl an freien NO_x -Speicherplätzen bei gesenkter Beladung ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass ein NO_x -Molekül einen Speicherplatz in der zur Verfügung stehenden Zeit „findet“ und sich dort adsorbieren kann. Mit weiter sinkender Beladung, und damit mehr freien Speicherstellen, verringert sich die emittierte NO_x -Masse weiter.

Bei einer sehr geringen NO_x -Beladung des NSK (10 %) ist eine deutliche Steigerung der kumulierten Regenerationsdauer zu beobachten. Ebenfalls steigen die CO - und C_3H_6 -Emissionen stark an. Bei den CO -Emissionen tragen die zwei Regeneration zu den Zeitpunkten 260 s und 1650 s den größten Anteil hierzu bei. Für die weiteren Untersuchungen stellt eine NO_x -Beladung von 40 % den besten Kompromiss aus niedrigen NO_x - und vertretbaren CO -Emissionen dar.

6.1.3 Heizen

In diesem Abschnitt wird die elektrische Heizleistung und somit das Temperaturniveau vor dem NSK variiert. [Tabelle 6.6](#) zeigt die Regenerationsstrategie für diese Untersuchung.

Tabelle 6.6: Regenerationsstrategie Variation Heizleistung

Größe	Bedingung
H ₂ -Konzentration	< 100 ppm
NO _x -Zielbelastung	< 40 %
Heizleistung	0 - 1600 W
O ₂ -Konzentration	0 %
Freigabetemperatur nach NSK	> 150 °C
eff. Mitteldruck	> 5 bar

In Abb. 6.3 ist zu erkennen, dass bei Erhöhung der Heizleistung von 0 auf 400 W die Temperatur ansteigt. Dies führt zu einer erhöhten Anzahl durchgeführter Regenerationen und somit auch zur Erhöhung der kumulierten Regenerationsdauer. Dadurch wird die NO_x-Beladung gesenkt und die NO_x-Emissionen werden reduziert. Mit 1300 W Heizleistung steigt das Temperaturniveau weiter an. Die NO_x-Beladung sinkt hierbei vor allem zu Beginn des Zyklus stärker, weil früher länger regeneriert werden kann. Ein Durchbrechen der CO- und C₃H₆-Emissionen wird bei dieser Temperatur weitestgehend verhindert, weil das Temperaturniveau für die Oxidation von CO und C₃H₆ ausreichend hoch ist (überschreiten der ca. 200 °C Light-off Temperatur für Oxidationsreaktionen). Ebenfalls nehmen mehr Regenerationsmittel an der Reduktion von NO_x teil, was an der geringeren kumulierten Regenerationsdauer bei gleichzeitig geringeren CO- und C₃H₆- sowie niedrigeren NO_x-Emissionen zu sehen ist.

Bei einer hohen mittleren Heizleistung (1600 W, rot) und damit großer Temperaturerhöhung setzt der thermische Zerfall von Bariumcarbonat ein. Dies führt auch ohne Regeneration zu hohen NO_x-Emissionen, was ab dem Zeitpunkt 1650 s zu beobachten ist. Die gesamten kumulierten NO_x-Emissionen steigen im Vergleich zur Heizleistung von 1300 W (orange) auf das Niveau der Heizleistung von 400 W (hellblau) an.

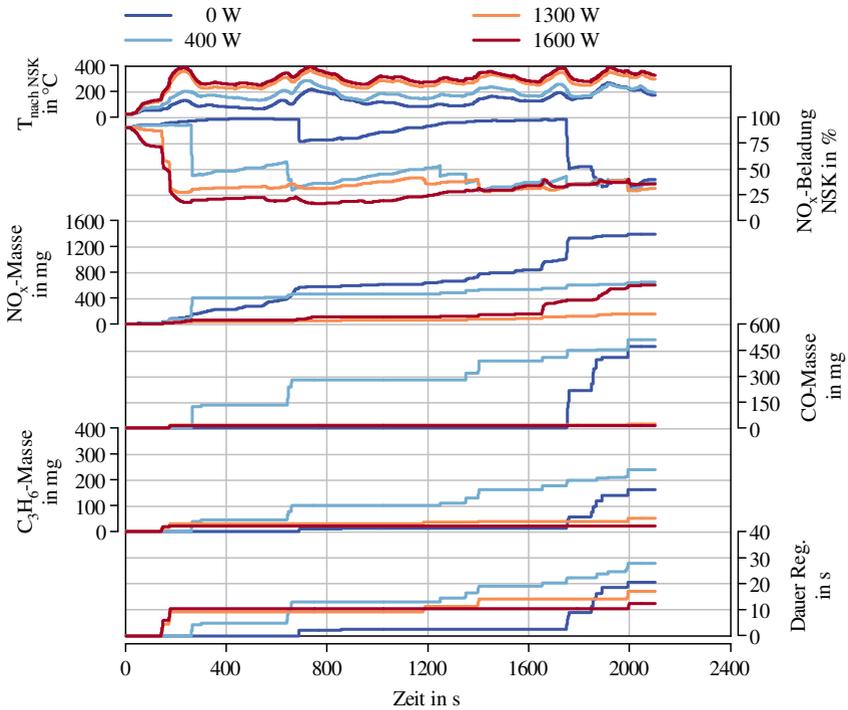


Abbildung 6.3: Zeitlicher Verlauf; Variation der Heizleistung

6.1.4 Sauerstoffkonzentration während der Regeneration

In diesem Abschnitt wird die O_2 -Konzentration im Abgas während der Regeneration variiert. Tabelle 6.7 zeigt die Regenerationsstrategie für diese Untersuchung.

Tabelle 6.7: Regenerationsstrategie Variation O₂-Konzentration

Größe	Bedingung
H ₂ -Konzentration	< 100 ppm
NO _x -Zielbelastung	< 40 %
Heizleistung	1300 W
O ₂ -Konzentration	0 - 2 %
Freigabetemperatur nach NSK	> 150 °C
eff. Mitteldruck	> 5 bar

In **Abb. 6.4** sieht man, dass mit steigender O₂-Konzentration im Abgas die Regenerationsprozesse gehemmt werden. Dies lässt sich bei Betrachtung des Zeitpunkts 400 s erkennen. Die kumulierte Regenerationsdauer ist zu diesem Zeitpunkt mit größerer O₂-Konzentration höher. Die NO_x-Belastung des **NSK** ist entgegen der Erwartung aber nicht niedriger, sondern höher, und somit sind auch die kumulierten NO_x-Emissionen größer. Es zeigt sich auch, dass mit steigender O₂-Konzentration im Abgas die CO- und C₃H₆-Emissionen sinken.

Bei sehr hoher O₂-Konzentration (2 %) und einem hohen Temperaturniveau am **NSK** ist ebenfalls zu beobachten, dass eine thermische Regeneration eingeleitet wird. Dies ist zum Zeitpunkt 700 s der Fall und führt zu einem massivem NO_x-Ausstoß.

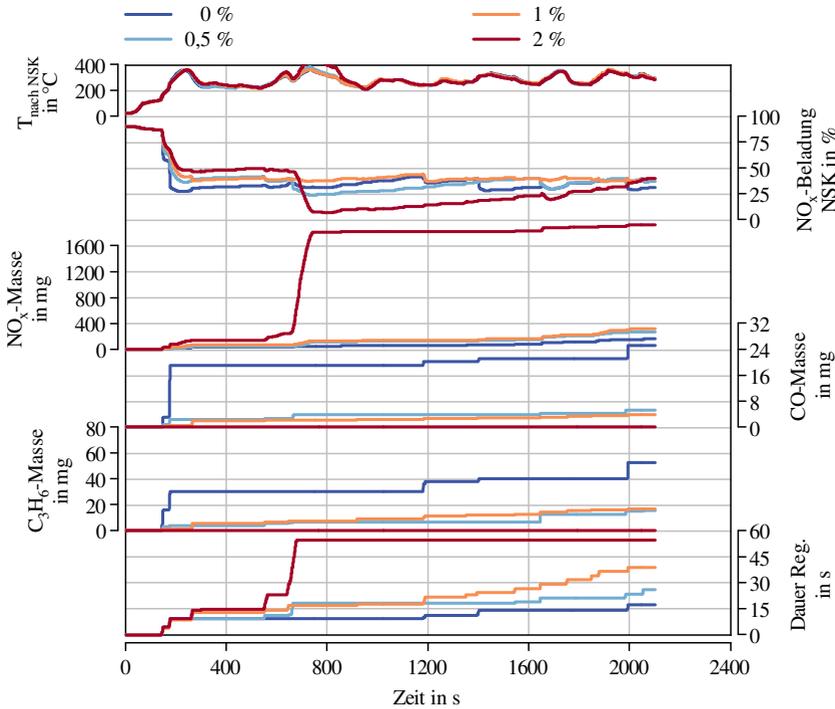


Abbildung 6.4: Zeitlicher Verlauf; Variation der O_2 -Konzentration

6.1.5 Freigabetemperatur

In diesem Abschnitt wird die Temperatur nach NSK, bei der eine Regeneration stattfinden darf, variiert. Tabelle 6.8 zeigt die Regenerationsstrategie für diese Untersuchung.

Tabelle 6.8: Regenerationsstrategie Variation Freigabetemperatur

Größe	Bedingung
H ₂ -Konzentration	< 100 ppm
NO _x -Zielbelastung	< 40 %
Heizleistung	0 W
O ₂ -Konzentration	0 %
Freigabetemperatur nach NSK	> 50 - 200 °C
eff. Mitteldruck	> 5 bar

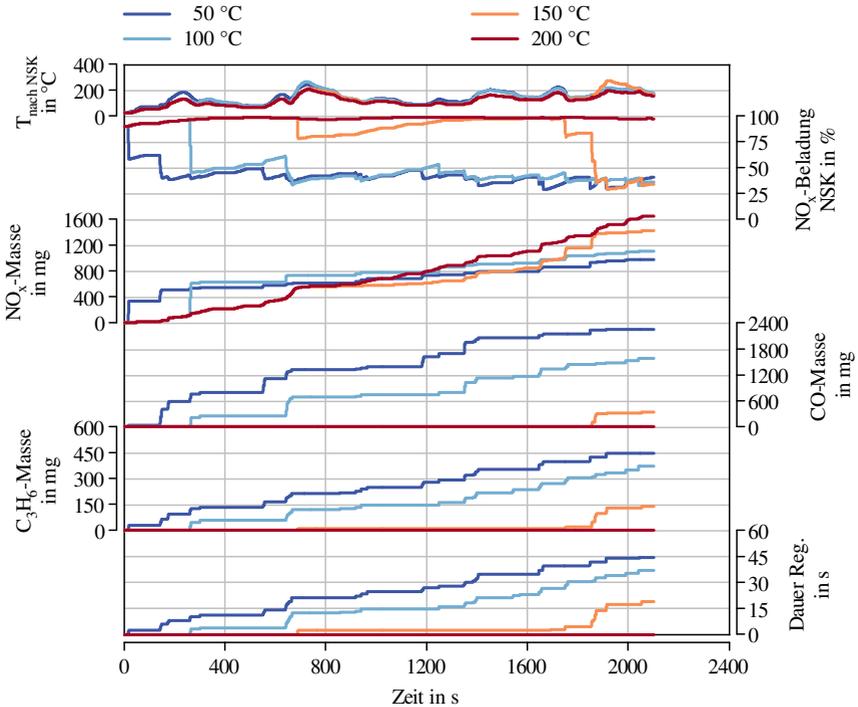


Abbildung 6.5: Zeitlicher Verlauf; Variation der Freigabetemperatur

In [Abb. 6.5](#) ist zu sehen, dass mit sinkender Freigabetemperatur mehr Regenerationen durchgeführt werden und die kumulierte Regenerationsdauer ansteigt. Bei den kumulierten NO_x -Emissionen sind zwei Effekte zu beobachten. Zum einen führt die gesenkte NO_x -Beladung des **NSK** dazu, dass mehr NO_x im **NSK** eingelagert werden kann und somit die mittlere Steigung der kumulierten NO_x -Emissionen mit häufigeren Regenerationen niedriger ausfällt. Zum anderen zeigt sich allerdings, dass mit den Freigabetemperaturen $50\text{ }^\circ\text{C}$ (dunkelblau) und $100\text{ }^\circ\text{C}$ (hellblau) hohe NO_x -Peaks während den ersten Regenerationen zu beobachten sind und so die Vorteile durch eine geringere Beladung bei den NO_x -Emissionen geschmälert werden.

Durch das in weiten Bereichen niedrige Temperaturniveau ($< 200\text{ }^\circ\text{C}$) erhöhen sich mit niedrigerer Freigabetemperatur die CO - und C_3H_6 -Emissionen. Besonders ist dies bei den Freigabetemperaturen $50\text{ }^\circ\text{C}$ (dunkelblau) und $100\text{ }^\circ\text{C}$ (hellblau) zu erkennen. Zusätzlich bleibt zu beachten, dass das **NSK**-Modell nur für Temperaturen größer als $150\text{ }^\circ\text{C}$ entwickelt wurde. Es besteht also die Möglichkeit, dass der Ausstoß von Regenerationsmittel während Regenerationen bei niedrigen Temperaturen mit Unsicherheiten behaftet ist.

6.1.6 Freigabelast

In diesem Abschnitt wird die Motorlast, bei der eine Regeneration stattfinden darf, variiert. [Tabelle 6.9](#) zeigt die Regenerationsstrategie für diese Untersuchung.

Tabelle 6.9: Regenerationsstrategie Variation Freigabelast

Größe	Bedingung
H_2 -Konzentration	$< 100\text{ ppm}$
NO_x -Zielbeladung	$< 40\%$
Heizleistung	0 W
O_2 -Konzentration	0%
Freigabetemperatur nach NSK	$150\text{ }^\circ\text{C}$
eff. Mitteldruck	$> 5 - 1\text{ bar}$

In Abb. 6.6 ist zu sehen, dass mit niedrigerer Freigabelast vor allem die erste Regeneration zum Zeitpunkt 700 s länger wird. Hierdurch können die NO_x -Beladung reduziert und die NO_x -Emissionen verringert werden. Bei den weiteren Regenerationen zeigt sich ein ähnliches Verhalten, sodass am Ende des Zyklus durch die steigende Regenerationsdauer die NO_x -Masse verringert werden kann. Die CO - und C_3H_6 -Emissionen sind bei dieser Variation auf einem ähnlich niedrigen Niveau. Ein eindeutiger Trend in der Abhängigkeit der Freigabelast lässt sich nicht erkennen. Die Auswirkungen der Zeitpunkte der einzelnen Regenerationen und dadurch beispielsweise die Temperatur während der Regeneration scheint einen größeren Einfluss zu haben.

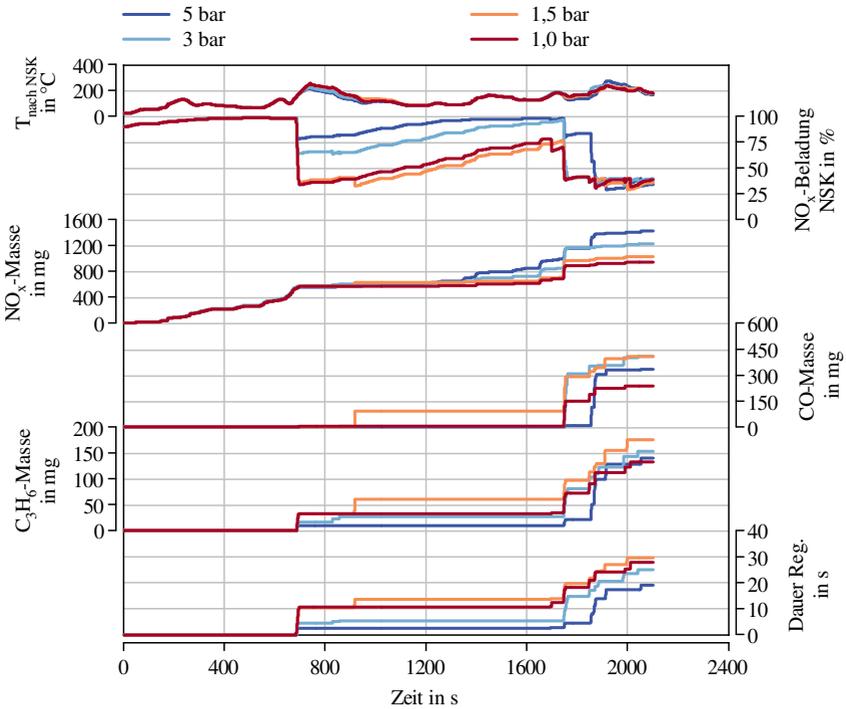


Abbildung 6.6: Zeitlicher Verlauf; Variation der Freigabelast

6.2 Zusammenfassung Sensitivitätsanalyse

In **Abb. 6.7** sind die Haupteinflüsse der in **Abschn. 6.1** betrachteten Größen zusammengefasst dargestellt. Jeder Punkt stellt dabei das Ergebnis eines Fahrzyklus dar. Die Varianten mit den größten Einflüssen auf die Emissionen sind im zweidimensionalen Emissionsschaubild aufgezeigt. Die Pfeile zeigen hierbei in Richtung

- der verringerten Regenerationsdauer durch niedrigere H_2 -Konzentration,
- der erhöhten Heizleistung,
- der niedrigeren Freigabetemperatur und
- der niedrigeren Freigabelast.

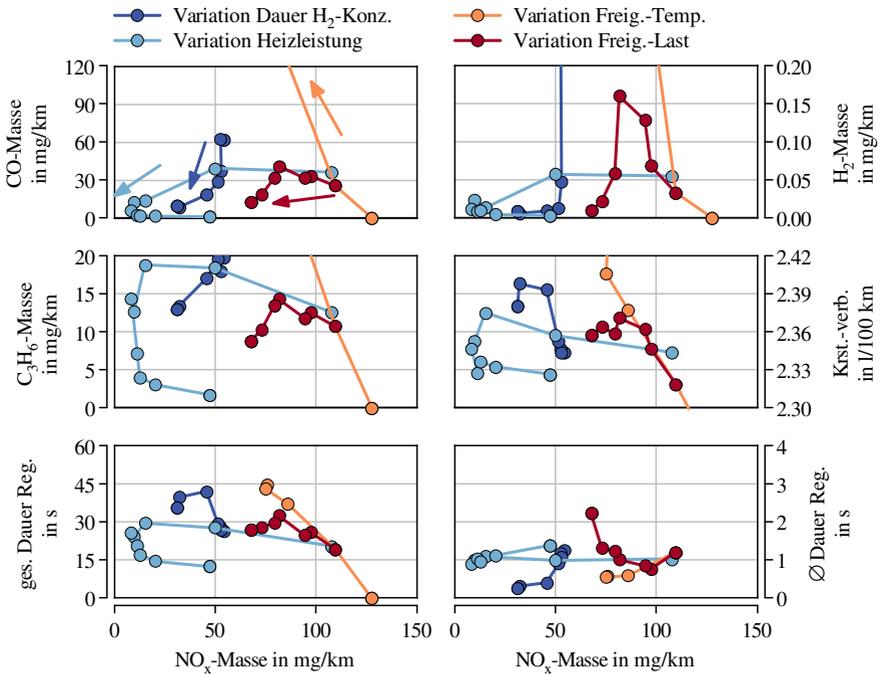


Abbildung 6.7: Zusammenfassung RDE-Regenerationsstrategie

Bei geringen Heizleistungen (hellblau rechts) haben Größen wie Freigabetemperatur (orange) oder Freigabelast (rot) einen großen Einfluss auf die Emissionen. Mit steigender Heizleistung wird dieser Einfluss geringer (hier nicht abgebildet).

6.3 Validierung Regenerationsstrategie

In [Tabelle 6.10](#) ist eine Regenerationsstrategie dargestellt, welche die Erkenntnisse aus den vorherigen Abschnitten aufgreift. Das NO_x -Minderungspotential dieser Strategie ist in den Ergebnissen in [Abb. 6.9](#) dargestellt. Die Randbedingungen und Startbedingungen sind die gleichen wie im vorherigen Abschnitt und soll das Potential des [NSK](#) als alleinige Abgasnachbehandlungskomponente aufzeigen.

Tabelle 6.10: Regenerationsstrategie Ergebnis

Größe	ohne Regeneration	optimierte Regenerationsstrategie
Regeneration	nein	ja
H_2 -Konzentration	-	< 100 ppm
NO_x -Zielbeladung	-	< 40 %
Heizleistung	1200 W	1200 W
O_2 -Konzentration	-	0 %
Freig.-Temp. nach NSK	-	150 °C
eff. Mitteldruck	-	> 5 bar

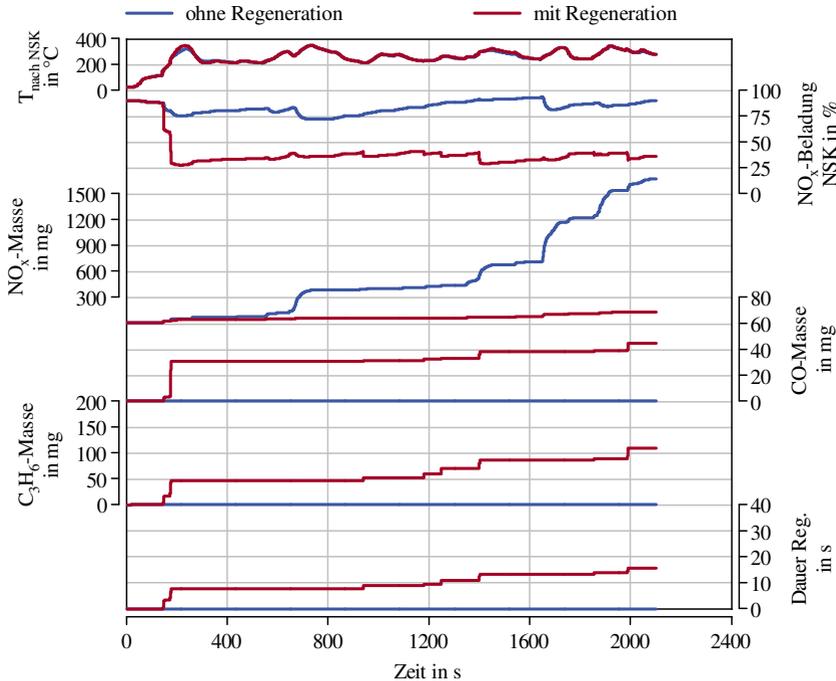


Abbildung 6.8: Zeitlicher Verlauf, optimierte RDE-Regenerationsstrategie

In Abb. 6.8 ist zu erkennen, dass durch die durchschnittliche elektrische Heizleistung von 1200 W ein ausreichend hohes Temperaturniveau herrscht und die Temperatur nach **NSK** in weiten Bereichen zwischen 200 °C und 400 °C liegt. Ohne Regeneration bleibt die Beladung des **NSK** durchgängig auf einem hohen Niveau, verringert sich allerdings bei hohen Temperaturspitzen leicht, was auf den thermischen Zerfall der Nitrats zurückzuführen ist. Die NO_x -Emissionen sind mit ca. 1700 mg auf einem hohen Niveau, **CO** und C_3H_6 werden dagegen nicht ausgestoßen.

Mit der optimierten Regenerationsstrategie liegen die NO_x -Emissionen dagegen nur bei ca. 130 mg und können somit um 92,2 % im Vergleich zur Variante ohne Regeneration reduziert werden. Die Emission von **CO** und C_3H_6 wird nicht

komplett verhindert, sie liegen mit Werten von ca. 3,4 mg/km für **CO** und ca. 8,5 mg/km für **C₃H₆** aber weit unter dem Euro 6 Limit von 500 mg/km (**CO**), bzw. ca. 90 mg/km (**Kohlenwasserstoffe (HC)**). Die Konvertierungsraten dieser Spezies sind in **Abb. 6.9** dargestellt und bestätigen diese Ergebnisse. Mit 99,2 % liegt die Konvertierungsrate von **CO** sehr hoch. Auch die Konvertierung von **C₃H₆** liegt mit einem Wert von 61,1 % in einem annehmbaren Bereich und spiegelt das herrschende Temperaturniveau wider.

Der Kraftstoffverbrauch erhöht sich durch die Regenerationen um 2,0 % und liegt damit in dem Wertebereich, welcher auch in der Literatur beschrieben wird [29, 44, 50, 100]. Die durchschnittliche Regenerationsdauer liegt bei ca. 1,3 s.

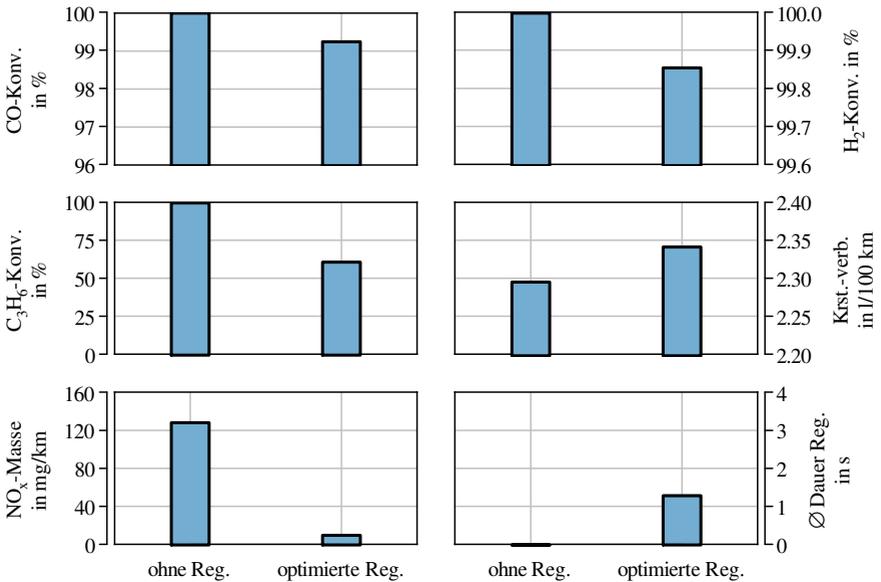


Abbildung 6.9: Ergebnis RDE-Regenerationsstrategie

6.4 Potentialanalyse VVT während RDE-Fahrt

Für die Bewertung des **variablen Ventiltrieb (VVT)**-Systems während einer **RDE-Fahrt** werden die in dieser Arbeit herausgearbeiteten sowie die von Brotz [11] beschriebenen Einflüsse berücksichtigt. Dabei werden während der Regeneration die folgenden Größen mit den entsprechenden Werten für das **VVT-System** im Vergleich zur Variante mit externer **Abgasrückführung (AGR)** berücksichtigt:

- Reduktion des Abgasmassenstroms und Kraftstoffmassenstroms um 1,5 % (Abschn. 4.1.2)
- Erhöhung der **CO**-Konzentration um 0,9 % (Abschn. 4.1.4)
- Erhöhung der **H₂**-Konzentration um 2,3 % (Abschn. 4.1.4)
- Erhöhung der **C₃H₆** Konzentration um 6 % (Abschn. 4.1.4)
- Reduktion der Freigabe-Motorlast um 0,5 bar effektiven Mitteldruck [11]

In **Tabelle 6.11** sind die genauen Werte der Regenerationsstrategien aufgezeigt. Die Rand- und Startbedingungen sind dieselben wie in den vorherigen Abschnitten.

Tabelle 6.11: Regenerationsstrategie ohne und mit VVT

Größe	ohne VVT	mit VVT
Regeneration	ja	ja
H₂ -Konzentration	< 100 ppm	< 100 ppm
NO_x -Zielbelastung	< 40 %	< 40 %
Heizleistung	0 W	0 W
O₂ -Konzentration	0 %	0 %
Freig.-Temp. nach NSK	> 150 °C	> 150 °C
eff. Mitteldruck	> 1,5 bar	> 1 bar
AGR	extern	intern
Gaszusammensetzung während Regeneration	extern	intern

In **Abb. 6.10** ist die Temperatur nach **NSK**, die **NO_x**-Beladung, die kumulierten

NO_x -, CO - und C_3H_6 -Emissionen sowie die kumulierte Regenerationsdauer im zeitlichen Verlauf dargestellt. Die gesenkte Freigabelast mit VVT führt zu einem leicht geänderten Regenerationsverhalten, welches an den unterschiedlichen Regenerationszeitpunkten vor allem gegen Ende des Zyklus zu erkennen ist. Die längsten Regenerationen werden zu den Zeitpunkten bei ca. 680 s und ca. 1550 s durchgeführt. Dies ist an der kumulierten Regenerationsdauer sowie an dem großen Hub der NO_x -Beladung zu erkennen. Das Ende der ersten Regeneration bei 680 s wird durch Unterschreiten der notwendigen Motorlast beendet. Mit VVT dauert diese Regeneration 0,4 s länger als ohne, da die um 0,5 bar niedrigere Motorlast erst 0,4 s später erreicht wird. Die NO_x -Beladung kann dadurch leicht reduziert werden. Die Änderung ist aber so gering, dass sich dies kaum in den NO_x -Emissionen während der darauffolgenden, ca. 800 s dauernden, Magerphase bemerkbar macht.

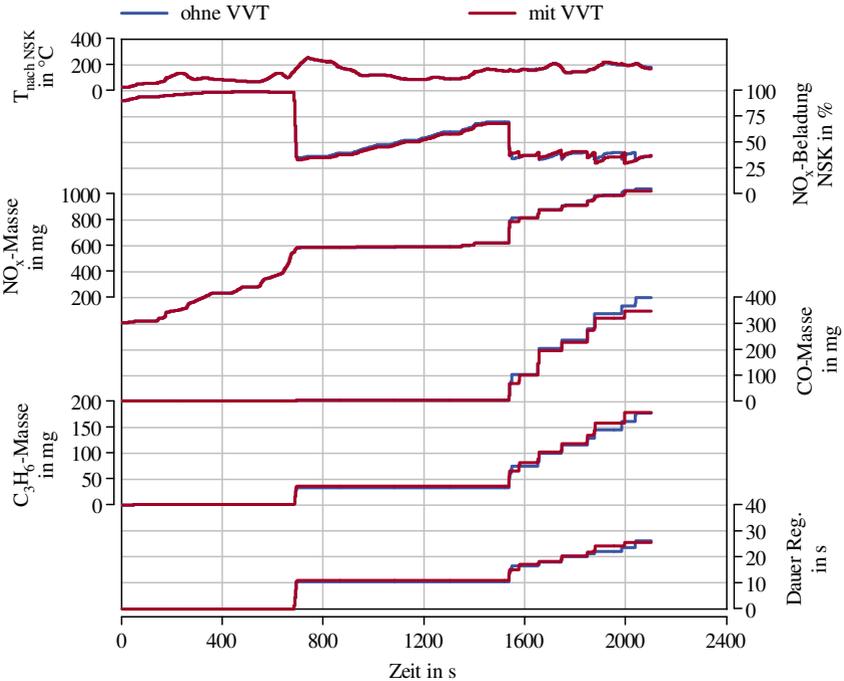


Abbildung 6.10: Zeitlicher Verlauf; Basis und VVT

Beide Varianten verlaufen insgesamt sehr ähnlich und liefern auch ähnliche Gesamtergebnisse. In Abb. 6.11 sind die Konvertierungsraten von CO, H₂ und C₃H₆ sowie der Kraftstoffverbrauch, die NO_x-Emission und die durchschnittliche Regenerationsdauer dargestellt. Es zeigt sich mit der Modellierung von interner AGR und damit des VVT-Systems ein leicht niedrigerer Kraftstoffverbrauch (ca. 0,17 % niedriger), welcher evtl. auf die höhere Regenerationsmittelkonzentration während der Regenerationsphase zurückzuführen ist. Zu beachten bleibt hierbei allerdings, dass auch die Regenerationszeitpunkte Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch haben. Regenerationen bei höheren Motorlasten weisen tendenziell einen geringeren Kraftstoffmeherverbrauch auf. Betriebspunkte bei höheren Lasten besitzen ein geringeres Luft-Kraftstoffverhältnis im mageren Betrieb und so fällt die einzustellende Lambda-Differenz zum fetten Betrieb geringer aus.

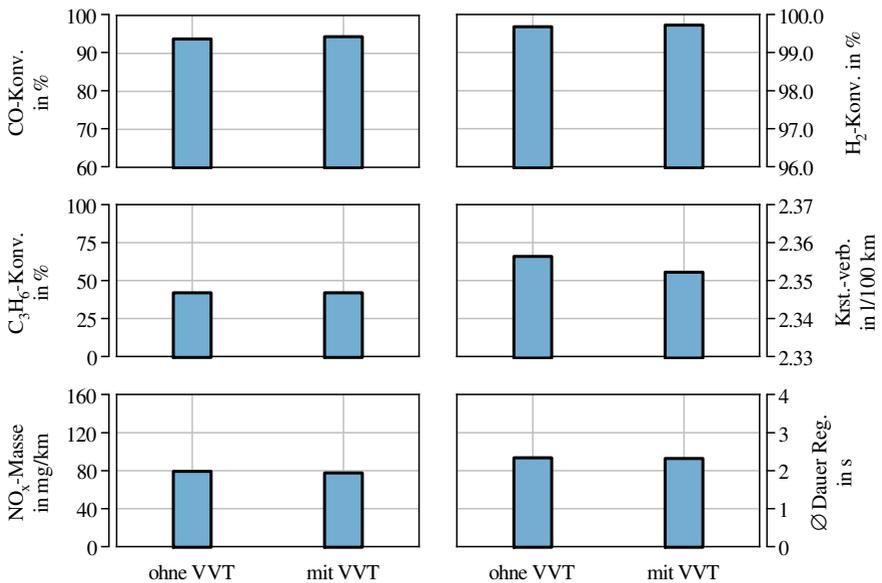


Abbildung 6.11: Vergleich interne und externe AGR

Das Niveau der C_3H_6 -Emissionen liegt bei beiden Varianten auf einem recht hohen Niveau. Die Konvertierungsrate beträgt nur ca. 43 % (vgl. Abb. 6.11). Dies ist auf das allgemein niedrige Temperaturniveau zurückzuführen. In den kumulierten Ergebnissen sind beide Varianten auf dem gleichen Niveau, der Verlauf in Abb. 6.10 lässt auch keinen eindeutigen Einfluss des VVT auf diese Emission darstellen.

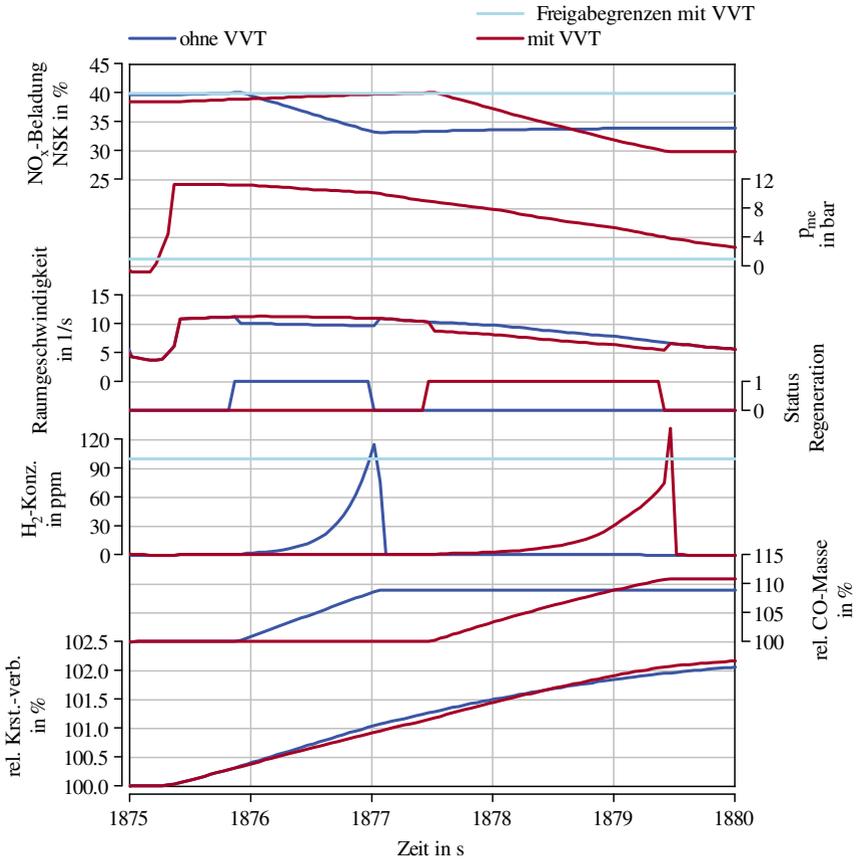


Abbildung 6.12: Zeitlicher Verlauf; ohne und mit VVT, Detailansicht

Der Einfluss des Regenerationszeitpunktes auf Emissionen und Kraftstoffverbrauch lässt sich beispielhaft am Zeitpunkt 1875 s, dargestellt in [Abb. 6.12](#) erklären. Durch eine leicht niedrigere Beladung beginnt die Regeneration ohne [VVT](#) 1,6 s früher. Die Motorlast sinkt zu diesem Zeitpunkt mit einer Steigung von ca. 2 bar/s. Die frühere Regeneration ohne [VVT](#) wird bei einer höheren Motorlast ausgelöst. Dabei ist der Abgasmassenstrom höher, wodurch die Standard-Raumgeschwindigkeit im [NSK](#) größer ist (zu Beginn der jeweiligen Regeneration ca. 15 %). Hierdurch bricht H_2 schneller durch den [NSK](#) und beendet dadurch die Regeneration nach ca. 1,1 s wieder. Im Vergleich dazu dauert die Regeneration mit [VVT](#) durch die niedrigere Raumgeschwindigkeit 2,0 s. Durch die längere Regeneration wird die Beladung des [NSK](#) stärker gesenkt, was aber mit einem erhöhten [CO](#)-Ausstoß und einem erhöhten Kraftstoffverbrauch während dieser betrachteten 5 s einhergeht. Es zeigt sich dadurch, dass eine leicht andere Regenerationsdauer die Beladung am Ende der Regeneration beeinflusst und somit großen Einfluss darauf nehmen kann, wann die nächste Regeneration ausgelöst wird.

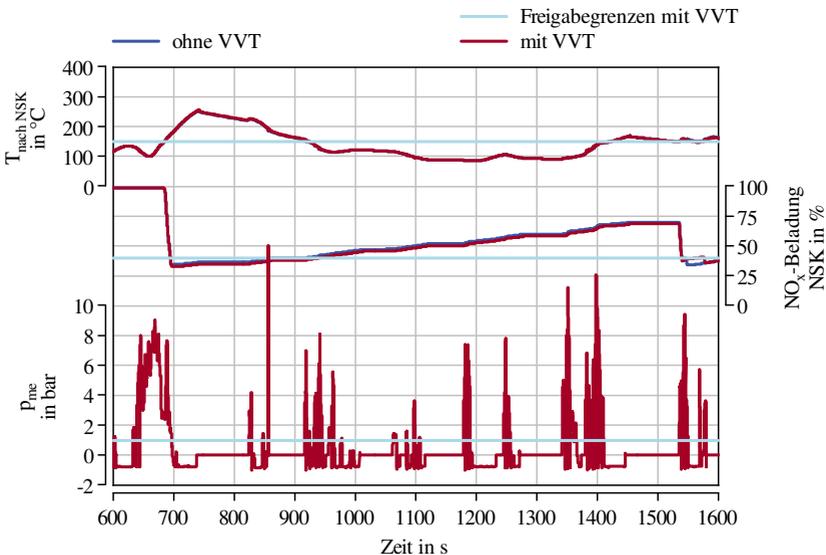


Abbildung 6.13: Zeitlicher Verlauf; Basis und VVT, Detailansicht

Der geringe Einfluss des VVT-Systems lässt sich auch damit erklären, dass die zwei wichtigsten Begrenzungsparameter der entwickelten Regenerationsfreigabe miteinander zusammenhängen. Ohne zusätzliche Heizmaßnahmen erhöhen nur hohe Motorlasten die Temperatur am NSK. Durch die Wärmekapazität ist die Temperatur nach dem NSK im Vergleich zu der Temperatur vor dem NSK geglättet und zeitlich verschoben. Im schlimmsten Fall wird die Regeneration verhindert, weil nach einer Lastphase die Temperatur nach dem NSK nur langsam ansteigt und nach Erreichen des nötigen Temperaturniveaus keine ausreichend hohe Motorlast mehr vorliegt, vgl. Abb. 6.13. In dem betrachteten Zyklus tritt so ein Verhalten zwischen 800 und 1500 s auf. Die lange Lastphase zwischen den Zeitpunkten 640 und 700 s führt zu einer Temperaturerhöhung. Zum Zeitpunkt 680 s erreicht die Temperatur nach dem NSK die erforderlichen 150 °C, eine Regeneration wird ausgelöst und die NO_x-Beladung sinkt. Es folgt eine lange Phase (bis 1300 s) mit nur sehr niedrigen und kurzen Lastphasen. Die Temperatur nach dem NSK sinkt auf unter 150 °C und trotz einer hohen NO_x-Beladung wird keine Regeneration ausgelöst. Erst die Phase mit höheren Motorlasten ab dem Zeitpunkt 1300 s führt wieder zu der nötigen Temperaturerhöhung, in deren Anschluss regeneriert wird. Somit ergibt sich hier eine Einspeicherphase von ca. 13 min Länge.

Bei niedrigen Motorlasten sind die NO_x-Rohemissionen niedrig. Dadurch wird der NSK langsam beladen und er kann ein Großteil der vom Motor emittierten NO_x speichern. Zu erkennen ist dieses Verhalten an den nahezu konstant bleibenden NO_x-Emissionen in Abb. 6.10. Dieser Effekt sorgt dafür, dass dieses Verhalten keinen kritischen Zustand darstellt.

Auf der anderen Seite sind bei höheren Motorlasten zwar die NO_x-Emissionen höher, die Temperatur steigt ebenfalls und damit die Wahrscheinlichkeit, dass die nötige Motorlast und Temperatur für eine Regeneration herrschen auch. Dieses Verhalten ist ab dem Zeitpunkt 1600 s zu beobachten.

Zusammenfassend kann man sagen, dass sich mit den in dieser Regenerationsstrategie berücksichtigten Größen kein eindeutiger Einfluss des VVT-System erkennen lässt. Die ausgewählte Strecke besitzt einen sehr niederlastigen Verlauf (durchschnittliche Steigung über 12 km: -3,6 %) und soll somit den äußersten Rand von in der Realität vorkommenden Fahrsituationen darstellen. Es zeigte

sich, dass die Freigabetemperatur die Anzahl von ausgelösten Regenerationen am stärksten limitiert. Durch die gesenkte Freigabelast des Motors werden mit der verwendeten Regenerationsstrategie kaum mehr Regenerationen ermöglicht. Obwohl die Strecke sehr viele niederlastige Betriebspunkte enthält, zeigte sich, dass genügend Regenerationen ausgelöst werden können, um die gewünschte Beladung des **NSK** zu erreichen. Die gesenkte Freigabelast, welche Brotz [11] in seiner Arbeit aufzeigt, erweitert zwar den zur Regeneration freigegebenen Motorbetriebsbereich, aber in dieser Untersuchung können keine eindeutigen Vorteile auf das Emissionsverhalten oder den Kraftstoffverbrauch bei dynamischen **RDE**-Fahrprofilen beobachtet werden.

7 Zusammenfassung

Das Bestreben nach sauberen „Zero-Emission“ Fahrzeugen mit verbrennungsmotorischem Antrieb sowie immer strenger werdende gesetzliche Vorschriften, wie **Real Driving Emissions (RDE)**, erfordern den emissionssicheren Betrieb des Motors im gesamten Kennfeld und während jeder Betriebssituation. Bei Dieselmotoren stellen die **Stickoxid (NO_x)**-Emissionen trotz jahrzehntelanger Forschung und Entwicklung immer noch ein Verbesserungspotential dar.

Für die im realen Straßenverkehr vorkommenden langen Betriebsphasen mit niedrigen Lasten und niedrigen Temperaturen ist der **NO_x-Speicherkatalysator (NSK)** ein wichtiger Baustein bei der Verringerung von NO_x-Emissionen. Durch seine Fähigkeit, bei niedrigen Temperaturen NO_x einzulagern, besitzt dieser Vorteile gegenüber anderen Abgasnachbehandlungstechniken. Anschließend an eine Einlagerungsphase muss für die Regeneration des NSK das Luft-Kraftstoffverhältnis des Motors reduziert und in den unterstöchiometrischen Bereich abgesenkt werden. Die so vom Motor erzeugten Regenerationsmittel **Kohlenstoffmonoxid (CO)**, **Wasserstoff (H₂)** und **Kohlenwasserstoffe (HC)** reduzieren die zuvor eingespeicherten NO_x zu unkritischem **Stickstoff (N₂)**.

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der **NSK-Regeneration** und die Bewertung des Einflusses von interner **Abgasrückführung (AGR)** auf den Regenerationsbetrieb sowie eine Potentialabschätzung dieser Technologie im realen Fahrbetrieb. Hierfür lässt sich die Arbeit in drei Teile gliedern.

Im **ersten Teil** wird mithilfe eines detaillierten thermodynamischen Vollmotormodells die Auswirkungen von interner **AGR** während des Regenerationsbetriebs bei niedrigen Motordrehzahlen und -lasten untersucht. Mit interner **AGR** erhöht sich die Temperatur zu Beginn eines Arbeitsspiels. Dies führt zu einem höheren Temperaturniveau im Brennraum während des gesamten Arbeitsspiels und somit auch zu höheren Wandwärmeverlusten. Das Darstellen der internen **AGR** durch einen variablen Ventiltrieb mit zweitem Auslassventilhub während des Ansaugtaktes erhöht zudem die Ladungsbewegung im Auslasskrümmer.

Dies führt zu erhöhten Wandwärmeübergangskoeffizienten und ebenfalls zu gesteigerten Wandwärmeverlusten auch im Auslasskrümmer. In dem untersuchten Betriebspunkt zeigt sich dadurch, dass die Temperatur am **NSK** mit interner und externer **AGR** auf dem gleichen Niveau ist.

Die gesteigerte Temperatur im Brennraum und die leicht andere Gaszusammensetzung zu Beginn des Arbeitsspiels mit interner **AGR** führen zu geänderten chemischen Gleichgewichtsbedingungen und somit zu einer Konzentrationserhöhung der Reduktionsmittel **CO**, **H₂** und **HC**. Die verringerte Ladungswechselsarbeit mit interner **AGR** führt bei gleichem effektivem Mitteldruck zu einer Verringerung der indizierten Arbeit und somit zu einem reduzierten Kraftstoffverbrauch. Bei gleichem globalen Luft-Kraftstoffverhältnis führt dies zu einem geringeren Abgasmassenstrom. Die Kombination aus reduziertem Massenstrom und gesteigerter Regenerationsmittelkonzentration führt zu fast gleichem **CO**-Massenstrom und zu einem leicht erhöhten **H₂**- und **HC**-Massenstrom während der Regeneration mit **variabler Ventiltrieb (VVT)**.

Im **zweiten Teil** wird ein Vorgehen für die Abbildung realistischer Lastzustände im realen Straßenverkehr entwickelt und untersucht. Dafür werden verschiedene Streckenverläufe auf die Eignung als **RDE**-Fahrt bewertet und mithilfe von differentiell **GPS** mehrere Routen vermessen. Die hierbei gesammelten Daten lassen Rückschlüsse auf das Fahrverhalten und die Lastzustände zu und ermöglichen das Nachbilden dieser mithilfe von Fahrzeuglängsdynamiksimulationen. Dabei zeigt sich, dass die befahrene Strecke einen großen Einfluss auf die Temperatur der Abgasnachbehandlung hat. Das Geschwindigkeits- und Höhenprofil charakterisiert die erforderliche Arbeit und damit direkt den Kraftstoffverbrauch. Niedrige Geschwindigkeiten, wie sie z.B. in der Stadt vorkommen, führen zu niedrigen Abgastemperaturen. Weitere Parameter, wie z.B. die Schaltstrategie, zeigen nur untergeordnete Einflüsse auf das Abgastemperaturniveau. Auf das Rohemissionsniveau zeigt sich zwar ein großer Einfluss, allerdings erst bei höheren Lasten, bspw. auf der Landstraße und der Autobahn. Die Fahrprofile aus dem vermessenen Pool realen Fahrten werden in Abschnitte unterteilt und in einem iterativen Prozess zu einem neuen virtuellen Profil zusammengesetzt. So wird ein Fahrprofil erzeugt, welches zu Beginn eine lange Phase mit negativer Steigung aufweist. Dies führt zu sehr niedrigen Temperaturen im Abgasstrang und gilt als besonders anspruchsvoll für die Abgasnachbehandlung.

Im **dritten Teil** wird eine Regenerationsstrategie zur Untersuchung des dynamischen Regenerationsverhaltens im realen Straßenverkehr entwickelt. Die Untersuchungen mit einem Fahrzeuglängsdynamikmodell und einem reaktionskinetischen **NSK**-Modell zeigen, dass **CO**-, **H₂**- und **HC**-Emissionen vor allem bei langen Regenerationen den **NSK** passieren. Über die Wassergas-Shift-Reaktion und die Dampfreformierung werden die beiden Spezies **CO** und **HC** in **H₂** umgewandelt. Durch die Detektion der **H₂**-Konzentration nach dem **NSK** kann ein sinnvolles Ende einer Regeneration bestimmt werden und die **CO**- und **H₂**-Emissionen auf einem niedrigen Niveau gehalten werden.

Als Haupteinflussparameter für niedrige **NO_x**-Emissionen stellt sich eine dauerhaft geringe Beladung des **NSK** mit **NO_x** als entscheidend heraus. Eine niedrige Beladung führt zu vielen freien Speicherplätzen. Dadurch ist während des Magerbetriebs die Wahrscheinlichkeit hoch, dass **NO_x** an diesen Speicherplätzen adsorbiert. Durch häufige Regenerationen kann der Beladungshub des **NSK** klein, die mittlere Beladung niedrig und so die **NO_x**-Emissionen gering gehalten werden. Als weitere Parameter für die Freigabe einer Regeneration werden die Temperatur nach dem **NSK** und die Motorlast berücksichtigt.

Die Temperatur zeigt einen wesentlichen Einfluss auf die Prozesse im **NSK**. Ohne das Vorhandensein des nötigen Temperaturniveaus laufen die Umwandlungsprozesse im **NSK** schlechter ab. Um hohe **CO**- und vor allem **HC**-Emissionen zu verhindern, ist für die Regeneration selbst aber eine gewisse Temperatur notwendig. Ohne zusätzliche Heizmaßnahmen existieren in dem betrachteten Niedriglast-**RDE**-Stadtabschnitt nur wenige Zeitpunkte mit ausreichend hoher Temperatur und gleichzeitig ausreichender Motorlast. Die Anzahl möglicher Regenerationen ist dadurch begrenzt und führt zu höheren **NO_x**-Emissionen als bei höheren Temperaturen.

Brotz konnte in seiner Arbeit [11] zeigen, dass mit dem hier ebenfalls betrachteten **variablen Ventiltrieb (VVT)**-System die Freigabelast von 1,5 auf 1,0 bar effektiven Mitteldruck gesenkt und so der Betriebsbereich einer Regeneration ausgeweitet werden kann. Die Freigabe einer Regeneration wird, bei der in dieser Arbeit entwickelten Regenerationsstrategie, in erster Linie durch die sehr träge Temperatur und in zweiter Linie von der sehr dynamischen Motorlast begrenzt. Beide Größen hängen jedoch miteinander zusammen. Ohne

zusätzliche Heizmaßnahmen führt nur eine hohe Motorlast zu einer Erhöhung des Temperaturniveaus der Abgasnachbehandlung. Bei dem hier betrachteten sehr niederlastigen RDE-Fahrprofil konnte gezeigt werden, dass selbst ohne VVT-System Regenerationen ausgelöst und NO_x reduziert werden können. Die Freigabegrenzen sind dabei ein effektiver Mitteldruck von 1,5 bar und eine Temperatur nach NSK von 150 °C. Die Verwendung des VVT-Systems und dadurch die Absenkung der Freigabelast zeigt zwar einen Einfluss auf die individuellen Regenerationszeitpunkte und die individuellen Regenerationsdauern. Ein eindeutiger Vorteil durch den erweiterten Betriebsbereich konnte jedoch in dem betrachteten, niederlastigen Fahrzyklus mit der hier entwickelten Regenerationsstrategie nicht festgestellt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] AARONIA AG: *Aaronia GPS Logger Datenblatt*. <http://www.aaronia.de/Datenblaetter/Messgeraete/Aaronia-GPS-Logger.pdf>. Version: 02.06.2014, Abruf: 15.02.2021
- [2] ABDULHAMID, H. ; FRIDELL, E. ; SKOGLUNDH, M. : Influence of the Type of Reducing Agent (H_2 , CO, C_3H_6 and C_3H_8) on the Reduction of Stored NO_x in a Pt/BaO/ Al_2O_3 Model Catalyst. In: *Topics in Catalysis* 30/31 (2004), S. 161–168. <http://dx.doi.org/10.1023/B:TOCA.0000029745.87107.b8>. – ISSN 1022–5528
- [3] ADAC: *Autotest Testergebnisse*. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/autotest/suche>, Abruf: 08.11.2021
- [4] ADAC: *So sauber sind aktuelle Dieselmodelle*. https://assets.adac.de/image/upload/v1617865886/ADAC-eV/KOR/Text/PDF/31791_rwsbpi.pdf, Abruf: 08.11.2021
- [5] AL-HARBI, M. ; EPLING, W. S.: The effects of regeneration-phase CO and/or H_2 amount on the performance of a NO_x storage/reduction catalyst. In: *Applied Catalysis B: Environmental* 89 (2009), Nr. 3, 315–325. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2008.12.010>. – ISSN 0926–3373
- [6] BARBA, C. : *Erarbeitung von Verbrennungskennwerten aus Indizierdaten zur verbesserten Prognose und rechnerischen Simulation des Verbrennungsablaufes bei Pkw-DE-Dieselmotoren mit Common-Rail-Einspritzung*, ETH Zürich, Dissertation, 2001. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-004228439>
- [7] BASSHUYSEN, R. van: *Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direkteinblasung*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-12215-7>. – ISBN 978–3–658–12215–7

- [8] BASSHUYSEN, R. van ; SCHÄFER, F. : *Handbuch Verbrennungsmotor*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-04678-1>. – ISBN 978-3-658-04678-1
- [9] BORGEEST, K. : *Manipulation von Abgaswerten*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-17181-0>. – ISBN 978-3-658-17180-3
- [10] BREITBACH, H. ; JOACHIM, S. ; BINZ, R. ; LINDEMANN, B. ; LINGENS, A. ; REICHEL, S. : Brennverfahren und Abgasnachbehandlung im Mercedes-Benz-Bluetec-Konzept. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 68. Jahrgang (2007), Nr. 06, S. 432–439. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03227410>
- [11] BROTZ, M. : *NO_x-Speicherkatalysatorregeneration bei Dieselmotoren mit variablem Ventiltrieb*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2021
- [12] BROTZ, M. ; MAUL, M. ; BERNER, H.-J. ; BARGENDE, M. : Investigation of High Internal Residual Gas Rates in Rich Operating Mode for Diesel Lean NO_x Trap Regeneration. In: *SAE Technical Paper 2021-01-0592*, 2021. – ISSN 0148-7191
- [13] BUDDE, M. ; EHRLY, M. ; JACOB, M. ; LAMANNA, G. ; STOTZ, I. : *Dieselmotorenstoffeintrag ins Motorenöl*, Frankfurt am Main, Abschlussbericht zum FVV-Vorhaben Nr. 990, 2010
- [14] CHAN, D. : *Thermische Alterung von Dieseloxydationskatalysatoren und NO_x-Speicherkatalysatoren: Korrelierung von Aktivität und Speichereigenschaft mit physikalischen und chemischen Katalysatoreigenschaften*, KIT Scientific Publishing, Diss., 2013. <http://dx.doi.org/10.5445/KSP/1000037905>
- [15] CRABB, D. ; FLEISS, M. ; LARSSON, J.-E. ; SOMHORST, J. : neue Modulare Motorenplattform von Volvo. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 74. Jahrgang (2013), Nr. 09
- [16] DAW, S. ; CHAKRAVARTHY, K. ; LENO, K. : A simple model for lean NO_x adsorber catalysts. In: *CLEERS* (2003), 01

- [17] DEMUYNCK, J. ; BOSTEELS, D. ; BUNAR, F. ; SPITTA, J. : Diesel-Pkw mit extrem niedrigem NO_x-Niveau im Realfahrbetrieb. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 81. Jahrgang (2020), Nr. 01, S. 42–47. <http://dx.doi.org/10.1007/s35146-019-0157-4>
- [18] DEPPENKEMPER, K. ; GÜNTHER, M. ; PISCHINGER, S. : Potentiale von Ladungswechselvariabilitäten beim PKW-Dieselmotor II. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 78. Jahrgang (2017), Nr. 03
- [19] DIEZEMANN, M. ; POHLKE, R. ; BRAUER, M. ; SEVERIN, C. : Anhebung der Abgastemperatur am Dieselmotor durch variablen Ventiltrieb. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 74. Jahrgang (2013), Nr. 04
- [20] DODEL, H. ; HÄUPLER, D. : *Satellitennavigation*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-79444-8>. – ISBN 978–3–540–79443–1
- [21] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Leitfaden zur Verordnung (EG) Nr. 1400/2002 der Kommission vom 31. Juli 2002*. https://ec.europa.eu/competition/sectors/motor_vehicles/legislation/explanatory_brochure_de.pdf
- [22] EUROPÄISCHE UNION: *Verordnung 1222/2009, EU-Reifenlabel*. <http://data.europa.eu/eli/reg/2009/1222/oj>, Abruf: 24.03.2021
- [23] EUROPÄISCHE UNION: *Verordnung (EU) 2016/427, RDE Paket 1*. <http://data.europa.eu/eli/reg/2016/427/oj>, Abruf: 09.04.2021
- [24] EUROPÄISCHE UNION: *Verordnung (EU) 2016/646, RDE Paket 2*. <http://data.europa.eu/eli/reg/2016/646/oj>, Abruf: 09.04.2021
- [25] EUROPÄISCHE UNION: *Verordnung (EU) 2017/1151, RDE Paket 1&2*. <http://data.europa.eu/eli/reg/2017/1151/oj>, Abruf: 09.04.2021
- [26] EUROPÄISCHE UNION: *Verordnung (EU) 2017/1154, RDE Paket 3*. <http://data.europa.eu/eli/reg/2017/1154/oj>, Abruf: 09.04.2021

- [27] EUROPÄISCHE UNION: *Verordnung (EU) 2018/1832: RDE Paket 4*. <http://data.europa.eu/eli/reg/2018/1832/oj>, Abruf: 09.04.2021
- [28] FKFS: *Bedienungsanleitung UserCylinder v2.6.6*. 2020
- [29] FRAIDL, G. ; PLOCK, W. ; HOLY, G. ; UNGER, E. ; WIRTH, M. : Otto-Direkteinspritzung – Das Verbrauchskonzept für Euro 4. In: *20. Internationales Wiener Motorensymposium* (1999)
- [30] FVV: Studie: Defossilisierung des Transportsektors. (2018). <https://www.fvv-net.de/medien/presse/detail/klimaschutz-technologieoffen-foerdern/>
- [31] GAMMA TECHNOLOGIES: *GT-Suite Flow Theory Manual: Version 2019*
- [32] GLOBAL CARBON PROJECT: *CO₂-Emissionen weltweit in den Jahren 1960 bis 2019 (in Millionen Tonnen)*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37187/umfrage/der-weltweite-co2-ausstoss-seit-1751/>.
Version: 12.12.2020, Abruf: 14.05.2021
- [33] GOLDSTEIN, M. : Carbon Monoxide Poisoning. In: *Journal of Emergency Nursing* 34 (2008), Nr. 6, 538-542. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jen.2007.11.014>. – ISSN 0099–1767
- [34] GOOGLE: *GoogleMaps*. <https://www.google.de/maps>, Abruf: 30.04.2019
- [35] GRAPHHOPPER GMBH: *GraphHopper maps*. <https://graphhopper.com/maps/>, Abruf: 30.04.2019
- [36] GRILL, M. : *Objektorientierte Prozessrechnung von Verbrennungsmotoren*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2006. <http://dx.doi.org/10.18419/opus-4076>
- [37] GRUDEN, D. : *Umweltschutz in der Automobilindustrie: Motor, Kraftstoffe, Recycling*. Vieweg+Teubner / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden (ATZ / MTZ-Fachbuch). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9526-4>. – ISBN 9783834804044

- [38] GUARD, U. S. C.: *GPS Constellation Status*. <https://www.navcen.uscg.gov/?Do=constellationStatus>, Abruf: 05.05.2021
- [39] HEIDUK, T. ; WEISS, U. ; FRÖHLICH, A. ; PFÄFFLE, A. : Der neue V8-TDI-Motor von Audi: Teil 2: Applikative Umsetzung und Abgasnachbehandlung. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 77. Jahrgang (2016), Nr. 07-08
- [40] HERRMANN, H.-O. ; GROPP, B. N. C. ; LEHMANN, J. : Mittelschwerer Nfz-Motor von Mercedes-Benz. In: *Energieeffiziente Antriebstechnologien*. Wiesbaden : ATZ / MTZ-Fachbuch, vol 1. Springer Vieweg, 2013. – ISBN 978-3-658-00790-4. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-00790-4_22
- [41] HERRMANN, H.-O. ; NIELSEN, B. ; GROPP, C. ; LEHMANN, J. : Mittelschwerer Nfz-Motor von Mercedes-Benz. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 73. Jahrgang (2012), Nr. 10, 730–738. <http://dx.doi.org/10.1007/s35146-012-0473-4>. – ISBN 2192-8843
- [42] HERTZBERG, A. : *Betriebsstrategien für einen Ottomotor mit Direkteinspritzung und NO_x-Speicher-Katalysator*, Universität Karlsruhe, Dissertation, 2001
- [43] HOFMANN, K. A.: *Anorganische Chemie*. 21., berichtigte Auflage. Wiesbaden and s.l. : Vieweg+Teubner Verlag, 1973. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-663-14240-9>. – ISBN 9783663142409
- [44] IGUCHI, S. ; KIHARA, T. ; HARADA, J. ; TANAKA, T. ; KATOH, K. : NO_x Storage Reduction 3-Way Catalyst for Lean Burn System. In: *16. Wiener Motorensymposium* (1995)
- [45] IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE): *5. Bericht, Arbeitsgruppe I - Naturwissenschaftliche Grundlagen*. 2013
- [46] JAVAD: *JAVAD GNSS DELTA Operator's Manual*. Version 2.3. 2013
- [47] JI, Y. ; CHOI, J.-S. ; TOOPS, T. J. ; CROCKER, M. ; NASERI, M. : Influence of ceria on the NO_x storage/reduction behavior of lean NO_x trap catalysts. In: *Catalysis Today* 136 (2008), Nr. 1, 146-155. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cattod>.

- 2007.11.059. – ISSN 0920–5861. – Catalytic Control of Emissions from Diesel-Powered Vehicles
- [48] KAAL, B. : *Phänomenologische Modellierung der stationären und transienten Stickoxidemissionen am Dieselmotor*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-18490-2>. – ISBN 978–3–658–18489–6
- [49] KACHELMANNWETTER: *Messwerte und Klimadaten, Luftdruckänderung*. <https://kachelmannwetter.com/de/messwerte/deutschland/luftdruckaenderung/20210504-0200z.html>, Ab-ruf: 06.05.2021
- [50] KATOH, K. ; KIHARA, T. ; ASANUMA, T. ; GOTOH, M. ; SHIBAGAKI, N. : Development of NO_x-Storage Reduction 3-Way Catalyst for Lean-Burn Engines. In: *Toyota Technical Review* 44 (1995), Nr. 2, März
- [51] KEMSKI, T. : *Anpassung eines Dieselmotorenverfahrens zur NO_x-Speicher-katalysator-Regeneration*. Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität, Dissertation, 2014. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5022112>
- [52] KNIRSCH, S. ; WEISS, U. ; MÖHN, S. ; PAMIO, G. : Die neue V6-TDI-Motorenge-neration von Audi: Teil 2: Thermodynamik, Applikation und Abgasnachbe-handlung. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 75. Jahrgang (2014), Nr. 10, S. 48–55. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1007/s35146-014-0575-2>
- [53] KOOP, J. : *Detaillierte Modellierung der Pt-katalysierten Schadstoffmin-derung in Abgasen moderner Verbrennungsmotoren*, Universitätsverlag Karlsruhe, Dissertation, 2008. <http://dx.doi.org/10.5445/KSP/1000009337>
- [54] KOZUCH, P. : *Ein phänomenologisches Modell zur kombinierten Stickoxid- und Rußberechnung bei direkteinspritzenden Dieselmotoren*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2004. <http://dx.doi.org/10.18419/OPUS-4031>

- [55] KURTYKA, K. ; PIELECHA, J. : Cold start emissions from a gasoline engine in RDE tests at different ambient temperatures. In: *Combustion Engines* (2020), Nr. 181(2)/2020, S. 24–30. <http://dx.doi.org/10.19206/CE-2020-204>. – ISSN 2300–9896
- [56] LANDESAMT FÜR GEOINFORMATION UND LANDENTWICKLUNG: SAPOS. <https://www.sapos-bw.de/heps.php>, Abruf: 05.05.2021
- [57] LAVOIE, G. A. ; HEYWOOD, J. B. ; KECK, J. C.: Experimental and Theoretical Investigation of Nitric Oxide Formation in Internal Combustion Engines. In: *Combustion Science and Technology* Bd. 1. 1970, S. 313–326
- [58] LÜCKERT, P. ; ARNDT, S. ; DUVINAGE, F. ; KEMMNER, M. ; BINZ, R. ; STORZ, O. ; REUSCH, M. ; BRAUN, T. ; ELLWANGER, S. : The New Mercedes-Benz 4-Cylinder Diesel Engine OM654: The Innovative Base Engine of the New Diesel Generation. In: *Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology* 24 (2015), S. 867–892
- [59] MASDRAG, L. ; COURTOIS, X. ; CAN, F. ; ROYER, S. ; ROHART, E. ; BLANCHARD, G. ; MARECOT, P. ; DUPREZ, D. : Understanding the role of C₃H₆, CO and H₂ on efficiency and selectivity of NO_x storage reduction (NSR) process. In: *Catalysis Today* 189 (2012), Nr. 1, 70–76. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cattod.2012.03.053>. – ISSN 0920–5861. – Catalytic Materials for Energy: Past, Present and Future
- [60] MAUL, M. ; BROTZ, M. : *VVT für Diesel NSK-Regeneration*, Frankfurt am Main, Abschlussbericht zum FVV-Vorhaben Nr. 1275, 2021
- [61] MAUL, M. ; GRILL, M. ; BARGENDE, M. : Investigation of LNT Regeneration Strategy for Diesel Engines with High Internal Residual Gas Rates. In: *21. Internationales Stuttgarter Symposium*, 2021, S. 337–350. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-33521-2_24
- [62] MCNEILL, J. R. ; ENGELKE, P. ; IRIYE, A. ; OSTERHAMMEL, J. : Mensch und Umwelt im Zeitalter des Anthropozän. In: *Geschichte der Welt; 1945 bis heute: Die globalisierte Welt*. München : Verlag C.H.BECK Literatur - Sachbuch - Wissenschaft, 2013. – ISBN

- 978-3-406-64116-9, S. 357-534. <http://dx.doi.org/10.17104/9783406641169-357>
- [63] MERKER, G. P. ; TEICHMANN, R. : *Grundlagen Verbrennungsmotoren*. 9. Auflage. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-23557-4>. – ISBN 978-3-658-23556-7
- [64] METHLEY, I. ; ASPINALL, J. ; WALTON, M. ; LANCEFIELD, T. ; GRAUL, W. : FlexValve: CVVA System for Diesel Engines. In: *3rd International Conference Diesel-Powertrains 3.0, July 11th/12th, 2017* (2017)
- [65] METZNER, F. T. ; WILLMANN, S. ; HELBING, C. ; EIGLMEIER, C. ; KÖHNE, M. ; KRAUSE, A. ; WIETHOLT, B. ; GERINGER, B. ; LENZ, H.-P. : Die neue Vierzylinder-Dieselmotorengeneration von Volkswagen. In: *39. Internationales Wiener Motorensymposium* (2018), S. 37-66. <http://dx.doi.org/10.51202/9783186807120-37>
- [66] MLADENOV, N. : *Modellierung von Autoabgaskatalysatoren*, Universität Karlsruhe, Dissertation, 24.07.2009. https://www.itcp.kit.edu/deutschmann/download/09_Mladenov_DrIng_UKA.pdf
- [67] MORANDI, S. ; GHIOTTI, G. ; CASTOLDI, L. ; LIETTI, L. ; NOVA, I. ; FORZATTI, P. : Reduction by CO of NO_x species stored onto Pt-K/Al₂O₃ and Pt-Ba/Al₂O₃ lean NO_x traps. In: *Catalysis Today* 176 (2011), Nr. 1, 399-403. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cattod.2010.11.024>. – ISSN 0920-5861. – Special issue dedicated to APAC 2010
- [68] MÜNSTER, H. U.: *Kohlenstoffkreisläufe*. <https://hypersoil.uni-muenster.de/0/05/14.htm>, Abruf: 26.01.2022
- [69] NEUSSER, H.-J. ; KAHRSTEDT, J. ; DORENKAMP, R. ; JELDEN, H. : Die Euro-6-Motoren des modularen Dieselbaukastens von Volkswagen. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 74. Jahrgang (2013), Nr. 06, S. 440-447. <http://dx.doi.org/10.1007/s35146-013-0125-3>
- [70] NOVA, I. ; CASTOLDI, L. ; LIETTI, L. ; TRONCONI, E. ; FORZATTI, P. : On the dynamic behavior of “NO -storage/reduction” Pt-Ba/Al₂O₃

- catalyst. In: *Catalysis Today* 75 (2002), Nr. 1-4, S. 431–437. [http://dx.doi.org/10.1016/S0920-5861\(02\)00093-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0920-5861(02)00093-7). – ISSN 09205861
- [71] OPENSTREETMAP: *OpenStreetMap*. <https://www.openstreetmap.org/copyright>, Abruf: 07.02.2022
- [72] OPENSTREETMAP: *OpenStreetMap*. <https://www.openstreetmap.org/#map=11/48.7716/9.0953>, Abruf: 18.03.2021
- [73] PIETZSCH, J. : *Bioökonomie für Einsteiger*. Wiesbaden : Springer Spektrum Wiesbaden, 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-53763-3>. – ISBN 978–3–662–53762–6
- [74] PISCHINGER, S. ; SCHNITZLER, J. ; WIARTALLA, A. ; SCHOLZ, V. : Untersuchungen zum Einsatz eines NO_x-Speicherkatalysators im Pkw-Dieselmotor. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 64. Jahrgang (2003), Nr. 03, S. 214–221. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03226692>
- [75] POHLKE, R. ; BRAUER, M. ; HIMSEL, F. ; CHRISTGEN, W. : Variabler Ventiltrieb für moderne Dieselmotoren. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 79. Jahrgang (2018), Nr. 11
- [76] PRESSEMITTEILUNG, V. : *Sauber und kultiviert: Der 2.0 TDI mit der neuen Abgasnorm Euro 6d*. <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/pressemitteilungen/sauber-und-kultiviert-der-20-tdi-mit-der-neuen-abgasnorm-euro-6d>
Abruf: 08.11.2021
- [77] RAFIGH, M. ; DUDGEON, R. ; PIHL, J. ; DAW, S. ; BLINT, R. ; WAHIDUZZAMAN, S. : Development of a Global Kinetic Model for a Commercial Lean NO_x Trap Automotive Catalyst Based on Laboratory Measurements. In: *Emission Control Science and Technology* 3 (2017), Nr. 1, S. 73–92. <http://dx.doi.org/10.1007/s40825-016-0049-8>. – ISSN 2199–3629
- [78] REIF, K. : *Dieselmotor-Management im Überblick*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-06555-3>. – ISBN 978–3–658–06554–6

- [79] REIF, K. : *Dieselmotor-Management*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-25072-0>. – ISBN 978-3-658-25071-3
- [80] ROEDEL, W. ; WAGNER, T. : *Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-54258-3>. – ISBN 978-3-662-54257-6
- [81] RÖSSLER, M. ; JANZER, C. : *Bildung/Modellierung NO₂: Untersuchung und Analyse der thermodynamischen Randbedingungen auf die Wirkmechanismen der dieselmotorischen NO₂-Bildung*, Frankfurt am Main, Abschlussbericht zum FVV-Vorhaben Nr. 1173, 2016
- [82] RÖSSLER, M. ; KOCH, T. ; JANZER, C. ; OLZMANN, M. : Wirkmechanismen der dieselmotorischen NO₂-Bildung. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 78. Jahrgang (2017), Nr. 7, 72–78. <http://dx.doi.org/10.1007/s35146-017-0055-6>. – ISBN 2192-8843
- [83] SALMANSBERGER, M. ; HIEMESCH, D. ; STÜTZ, W. ; STEINMAYR, T. : Die Dieselmotorenfamilie des Next-Generation-Baukastens von BMW. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 78. Jahrgang (2017), Nr. 12
- [84] SAMPARA, C. S. ; BISSETT, E. J. ; CHMIELEWSKI, M. : Global Kinetics for a Commercial Diesel Oxidation Catalyst with Two Exhaust Hydrocarbons. In: *Industrial & Engineering Chemistry Research* 47 (2008), Nr. 2, S. 311–322. <http://dx.doi.org/10.1021/ie070813x>. – ISSN 0888-5885
- [85] SCHNITZLER, J. : *Untersuchungen zum Einsatz eines NO_x-Speicherkatalysators im PKW-Dieselmotor*, Frankfurt am Main, Abschlussbericht zum FVV-Vorhaben Nr. 730, 2001
- [86] SCHÜTTLER, T. : *Satellitennavigation*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-53887-2>. – ISBN 978-3-642-53886-5
- [87] SCHÜTTLER, T. : *Relativistische Effekte bei der Satellitennavigation*. Berlin, Heidelberg : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-22161-4>. – ISBN 978-3-658-22160-7

- [88] TEMMLER, M. : *Steuergerätetaugliche Verbrennungsoptimierung mit physikalischen Modellansätzen*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. – ISBN 978–3–658–07652–8
- [89] TROVARELLI, A. : Catalytic Properties of Ceria and CeO₂-Containing Materials. In: *Catalysis Reviews* 38 (1996), Nr. 4, 439-520. <http://dx.doi.org/10.1080/01614949608006464>
- [90] TSCHÖKE, H. : *Real Driving Emissions (RDE)*. 1. Auflage. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-21079-3>. – ISBN 978–3–658–21078–6
- [91] TSCHÖKE, H. ; MOLLENHAUER, K. ; MAIER, R. : *Handbuch Dieselmotoren*. 4. Auflage. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-07697-9>. – ISBN 978–3–658–07696–2
- [92] TTI GMBH - TGU KURVIGER: *Kurviger: Motorrad Routenplaner*. <https://kurviger.de>, Abruf: 30.04.2019
- [93] UMWELTBUNDESAMT: *Stickstoffoxid-Emissionen*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/stickstoffoxid-emissionen#erfullungsstand-der-emissionsminderun>
Version: 03.07.2020, Abruf: 23.04.2021
- [94] UMWELTBUNDESAMT: *Kohlenmonoxid*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick/kohlenmonoxid>.
Version: 08.07.2020, Abruf: 03.05.2021
- [95] UMWELTBUNDESAMT: *Stickstoffoxide*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick/stickstoffoxide>.
Version: 17.09.2020, Abruf: 23.04.2021
- [96] UMWELTBUNDESAMT: *Treibhausgasminderungsziele Deutschlands*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgasminderungsziele-deutschlands>.
Version: 19.02.2021, Abruf: 14.05.2021

- [97] VEREINTE NATIONEN: *Übereinkommen von Paris*. https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en. Version: 2015, Abruf: 14.05.2021
- [98] VOIGTLÄNDER, D. : *Untersuchungen zur Stickoxidminderung an mager betriebenen Ottomotoren mit NO_x-Speicher-Katalysatoren*, Technische Universität Dresden, Dissertation, 1998
- [99] VOTSMEIER, M. ; KREUZER, T. ; LEPPERHOFF, G. : *Automobile Exhaust Control*. Version: 2010. http://dx.doi.org/10.1002/14356007.a03_189. In: *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*. Chichester : Wiley VCH Verlag, 2010. – ISBN 3527306730
- [100] WERQUET, N. : *Modellgesteuerte Regelung der Regenerationseinleitung in einem Abgassystem mit NO_x-Speicherkatalysator*, Technische Universität Clausthal, Dissertation, 2008. https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/receive/import_mods_00000403
- [101] WGSOFT.DE: *Scan-Master-OBDDLink*. <https://www.wgsoft.de/>, Abruf: 16.09.2019
- [102] WIBERG, E. : *Lehrbuch der Anorganischen Chemie*. De Gruyter, 1960. <http://dx.doi.org/10.1515/9783110238327>. – ISBN 978–3–11–023831–0
- [103] WICHMANN, E. : *Expertise zu gesundheitlichen Risiken von Stickstoffdioxid im Vergleich zu Feinstaub und anderen verkehrabhängigen Luftschadstoffen: Bewertung durch internationale Expertengruppen*. (2018). https://vm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/Dateien/PDF/PM_Anhang/Luftreinhalung_Wichmann_2018_Risiken_Stickstoffdioxid_Expertise.pdf, Abruf: 23.04.2021
- [104] WINTERKORN, M. ; BOHNE, P. ; SPIEGEL, L. ; SÖHLKE, G. : *Der Lupo FSI@von Volkswagen —So sparsam ist sportlich*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 102 (2000), Nr. 11, 964–974. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03224328>. – ISBN 2192–8800

- [105] XU, J. ; HAROLD, M. P. ; BALAKOTAIAH, V. : Modeling the effects of Pt loading on NO_x storage on Pt/BaO/Al₂O₃ catalysts. In: *Applied Catalysis B: Environmental* 104 (2011), Nr. 3, 305-315. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.03.014>. – ISSN 0926–3373
- [106] YANG, L. ; FRANCO, V. ; CAMPESTRINI, A. ; GERMAN, J. ; MOCK, P. : *ICCT: "NO_x control technologies for Euro 6 diesel passenger cars"*. <https://theicct.org/publications/nox-control-technologies-euro-6-diesel-passenger-cars>. Version: 2015, Abruf: 05.11.2021
- [107] ZELDOVICH, J. B.: The Oxidation of Nitrogen in Combustion and Explosions. In: *Acta Physicochimica U.S.S.R.* Bd. 21. 1946, S. 577–628
- [108] ZIMMERMANN, W. ; SCHMIDGALL, R. : *Bussysteme in der Fahrzeugtechnik*. 5. Auflage. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-02419-2>. – ISBN 978–3–658–02418–5

Anhang

A.1 Streckenverläufe

Die Streckenverläufe der vermessenen Routen sind in Abb. A1.1 bis Abb. A1.3 dargestellt.

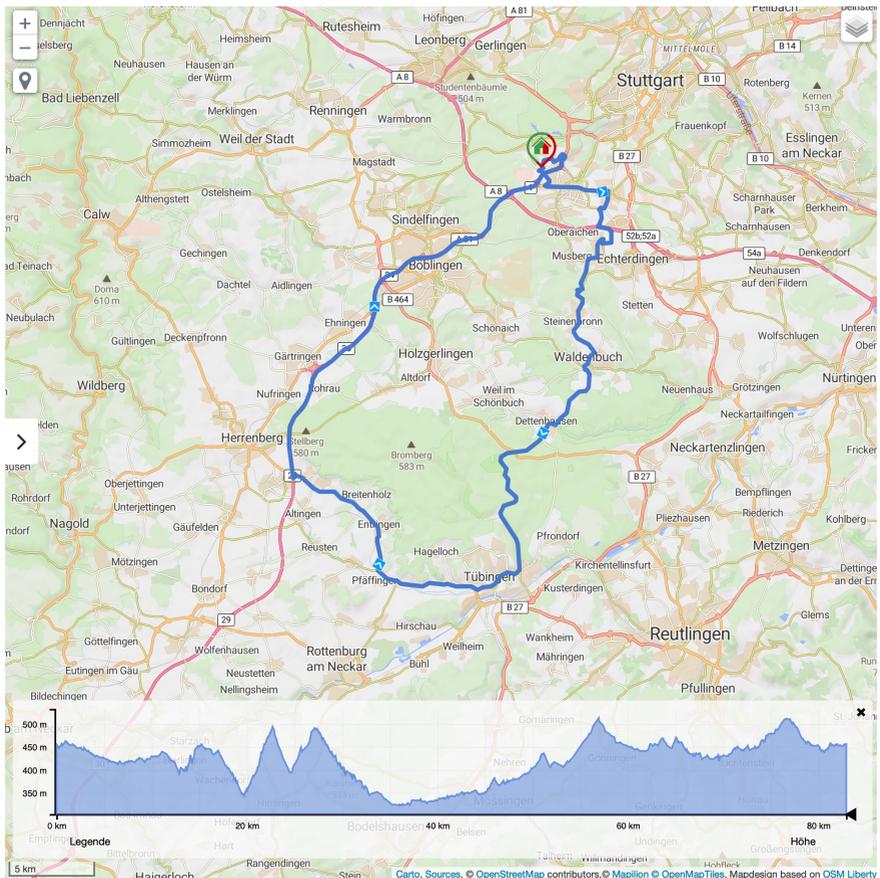


Abbildung A1.1: Streckenverlauf Tübingen, Darstellung von [92], Kartenmaterial von [71]

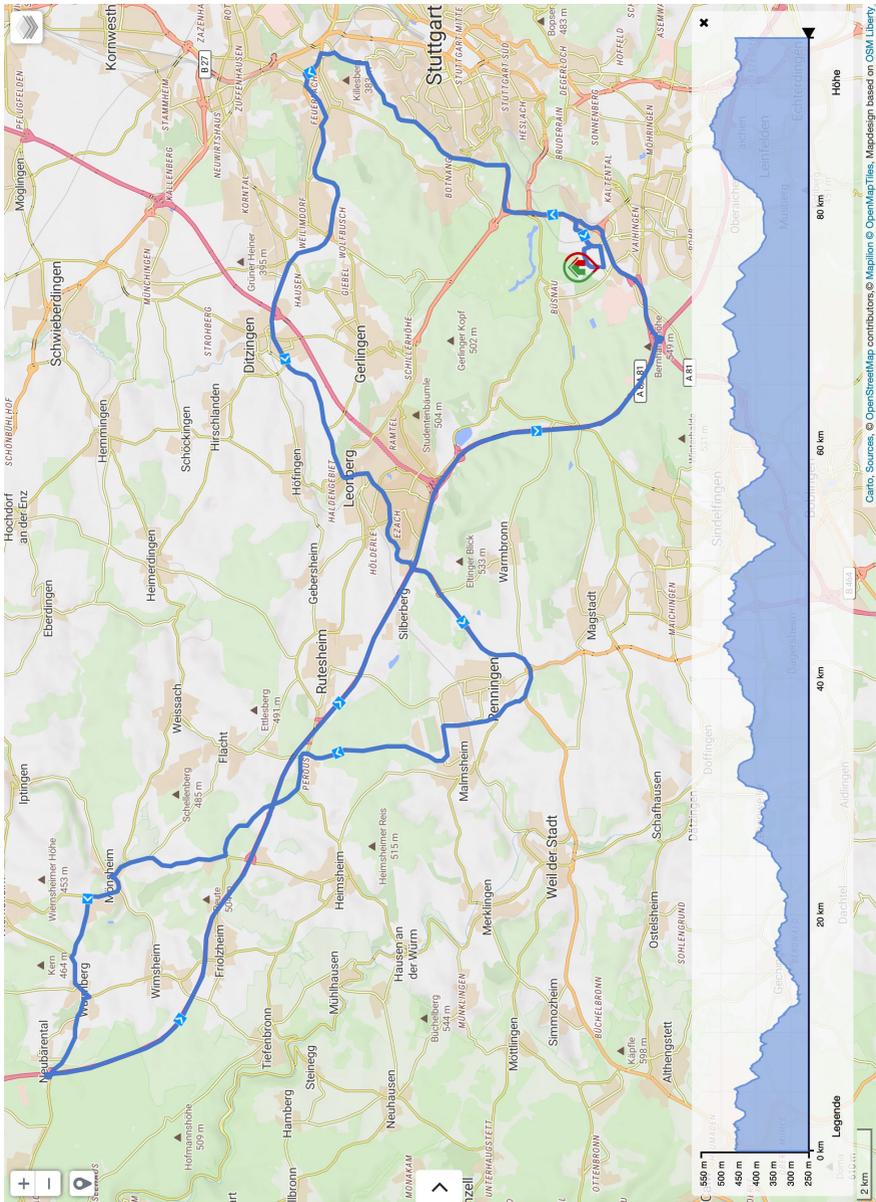


Abbildung A1.2: Streckenverlauf Renningen, Darstellung von [92], Kartenmaterial von [71]

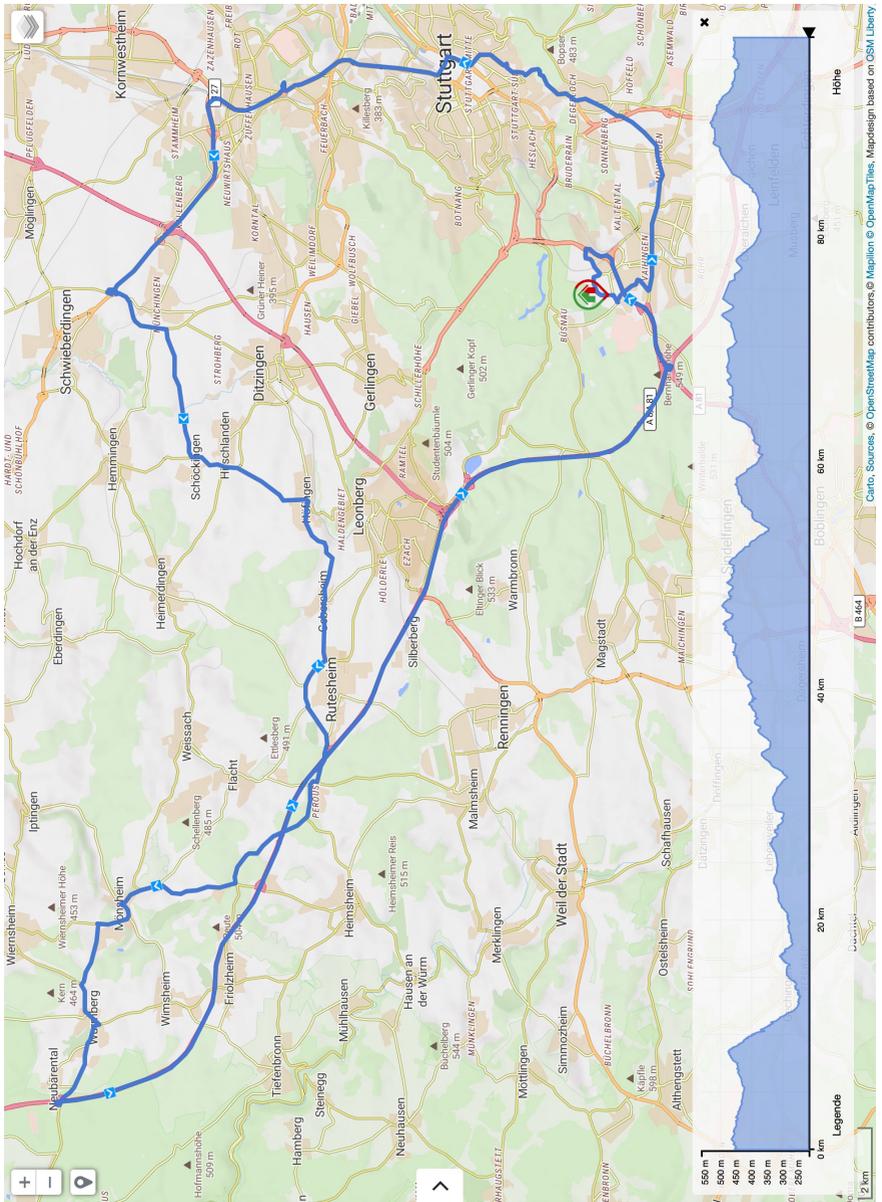


Abbildung A1.3: Streckenverlauf Nordroute, Darstellung von [92], Kartenmaterial von [71]

A.2 RDE-Fahrprofile

Die Geschwindkeits- und Höhenverläufe der in dieser Arbeit entwickelten Fahrprofile sind in [Abb. 3.15](#) dargestellt. In [Tabelle A2.1](#) und [Tabelle A2.2](#) sind die **Real Driving Emissions (RDE)**-Kriterien und damit die **RDE-Konformität** dieser Fahrprofile zu sehen.

Tabelle A2.1: RDE-Fahrkriterien Stadtfokus und Tübingen

	Kriterium	Stadtfokus	Tübingen	gültiger Wertebereich	
	Ges. Fahrt	Dauer	94,8 ✓	95,0 ✓	90 - 120 min
Geschwindigkeit	Steckenanteil	Stadt ($v \leq 60$ km/h)	35,9 ✓	37,5 ✓	29 - 44 %
		Landstraße ($60 < v \leq 90$ km/h)	34,2 ✓	34,5 ✓	23 - 43 %
		Autobahn ($v > 90$ km/h)	29,9 ✓	28,0 ✓	23 - 43 %
	Mindeststrecke	Stadt ($v \leq 60$ km/h)	27,2 ✓	31,0 ✓	≥ 16 km
		Landstraße ($60 < v \leq 90$ km/h)	25,8 ✓	28,5 ✓	≥ 16 km
		Autobahn ($v > 90$ km/h)	22,7 ✓	23,2 ✓	≥ 16 km
	Stadt	Mittl. Geschw.	26,7 ✓	31,5 ✓	15 - 40 km/h
		Ant. Haltezeit	29,2 ✓	11,6 ✓	6 - 30 %
		Einzelhaltezeit	≤ 300 ✓	≤ 300 ✓	≤ 300 s
	Autobahn	Zeit > 100 km/h	10,7 ✓	10,7 ✓	≥ 5 min
Zeitanteil ¹ > 145 km/h		0 ✓	0 ✓	≤ 3 %	
max. Geschw.		118 ✓	118 ✓	≤ 160 km/h	
Kaltstart ²	max. Geschw.	54,4 ✓	47,1 ✓	≤ 60 km/h	
	Mittl. Geschw.	27,7 ✓	30,9 ✓	15 - 40 km/h	
	ges. Haltezeit	85,8 ✓	30,3 ✓	≤ 90 s	
Höhe	Diff. zw. Start & Ende	-96,8 ✓	-6,7 ✓	≤ 100 m	
	kum. pos. Höhendiff.	831 ✓	731 ✓	≤ 1200 m / 100 km	
	kum. pos. Höhendiff. Stadt	547 ✓	500 ✓	≤ 1200 m / 100 km	

¹ Zeitanteil der Dauer des Autobahnabschnitts

² hier für $t \leq 300$ s bewertet, $T_{\text{Kühlwasser}}$ unbekannt

Tabelle A2.2: RDE-Fahrtkriterien Nordroute und Renningen

	Kriterium	Nordroute	Renningen	gültiger Wertebereich	
Geschwindigkeit	Ges. Fahrt	Dauer	113,6 ✓	102,8 ✓	90 - 120 min
	Steckenanteil	Stadt ($v \leq 60$ km/h)	34,3 ✓	38,0 ✓	29 - 44 %
		Landstraße ($60 < v \leq 90$ km/h)	33,9 ✓	29,8 ✓	23 - 43 %
		Autobahn ($v > 90$ km/h)	31,9 ✓	32,3 ✓	23 - 43 %
	Mindeststrecke	Stadt ($v \leq 60$ km/h)	33,1 ✓	35,7 ✓	≥ 16 km
		Landstraße ($60 < v \leq 90$ km/h)	32,7 ✓	28,0 ✓	≥ 16 km
		Autobahn ($v > 90$ km/h)	30,8 ✓	30,3 ✓	≥ 16 km
	Stadt	Mittl. Geschw.	27,8 ✓	33,2 ✓	15 - 40 km/h
		Ant. Haltezeit	20,5 ✓	17,1 ✓	6 - 30 %
		Einzelhaltezeit	≤ 300 ✓	≤ 300 ✓	≤ 300 s
	Autobahn	Zeit > 100 km/h	11,4 ✓	12,6 ✓	≥ 5 min
		Zeitanteil ¹ > 145 km/h	2,5 ✓	2,6 ✓	≤ 3 %
max. Geschw.		156 ✓	154 ✓	≤ 160 km/h	
Kaltstart ²	max. Geschw.	51,4 ✓	81,9 ✗	≤ 60 km/h	
	Mittl. Geschw.	27,4 ✓	36,2 ✓	15 - 40 km/h	
	ges. Haltezeit	61,0 ✓	24,8 ✓	≤ 90 s	
Höhe	Diff. zw. Start & Ende	-6,0 ✓	-0,3 ✓	≤ 100 m	
	kum. pos. Höhendiff.	933 ✓	971 ✓	≤ 1200 m / 100 km	
	kum. pos. Höhendiff. Stadt	626 ✓	732,3 ✓	≤ 1200 m / 100 km	

¹ der Dauer des Autobahnanteils

² hier für $t \leq 300$ s bewertet, $T_{Kühlwasser}$ unbekannt

A.3 Kennfeldbasiertes Motormodell während des Regenerationsbetriebs

In *Abb. A3.1 bis A3.4* sind die für den Regenerationsbetrieb wichtigen Größen motorbetriebspunktabhängig im Vergleich mit den Werten des mageren Betriebs dargestellt. Die Konzentrationen von **Kohlenstoffmonoxid (CO)**, **Wasserstoff (H₂)** und **Propen (C₃H₆)** sind auf die in *Abschn. 4.1.4* ermittelten Werte fixiert und stellen die Variante mit externer **Abgasrückführung (AGR)** dar. Die **Stickoxide (NO_x)**-Konzentration wird mit 0 ppm während der Regeneration

angenommen. Die Kraftstoff- und Luftmasse sind das Resultat der Überlegung aus [Abschn. 5.2.1](#).

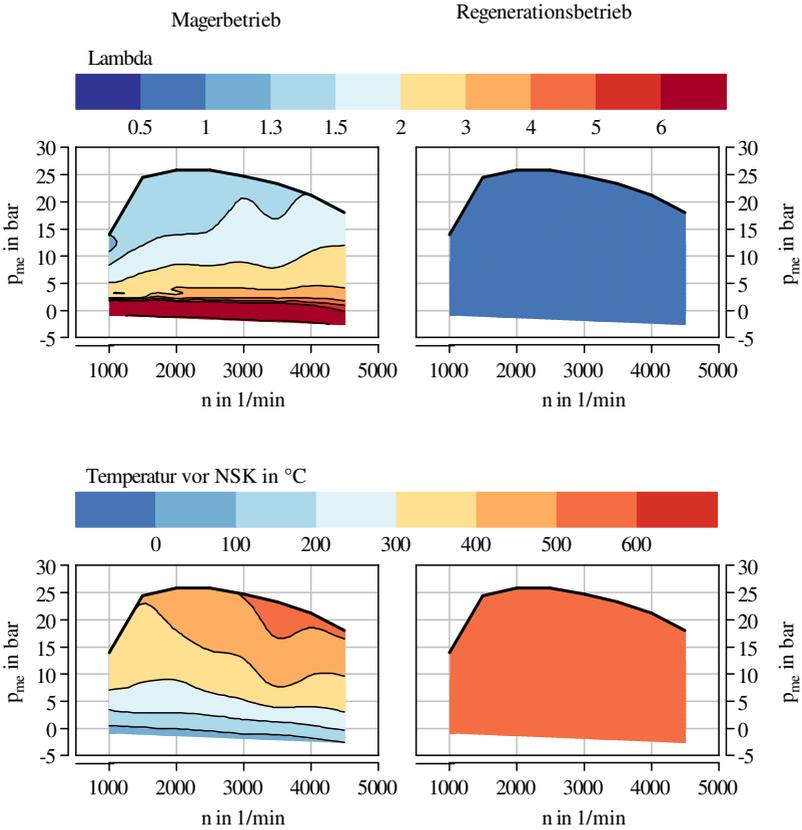


Abbildung A3.1: Lambda und Temperatur vor NSK über Motorlast und -drehzahl für Mager- und Regenerationsbetrieb

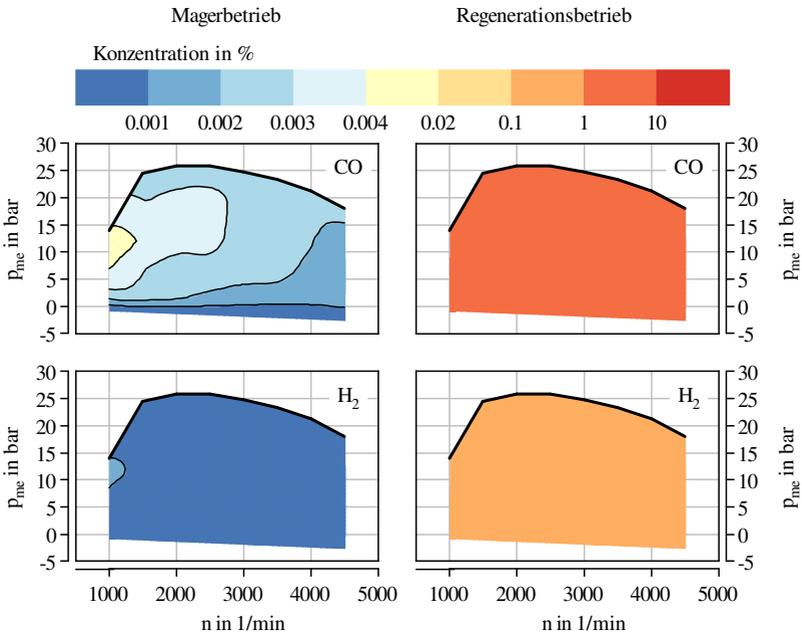


Abbildung A3.2: Konzentration von CO und H₂ über Motorlast und -drehzahl für Mager- und Regenerationsbetrieb

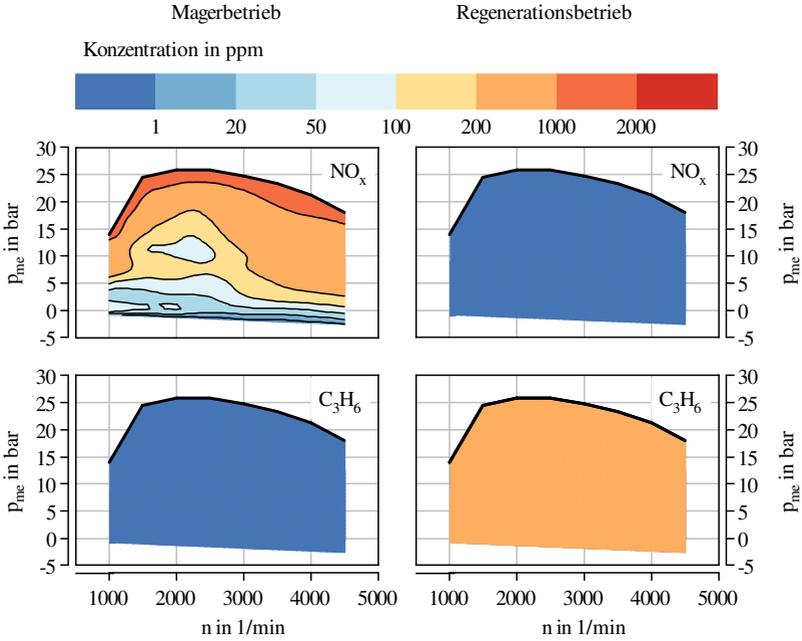


Abbildung A3.3: Konzentration von NO_x und C_3H_6 über Motorlast und -drehzahl für Mager- und Regenerationsbetrieb

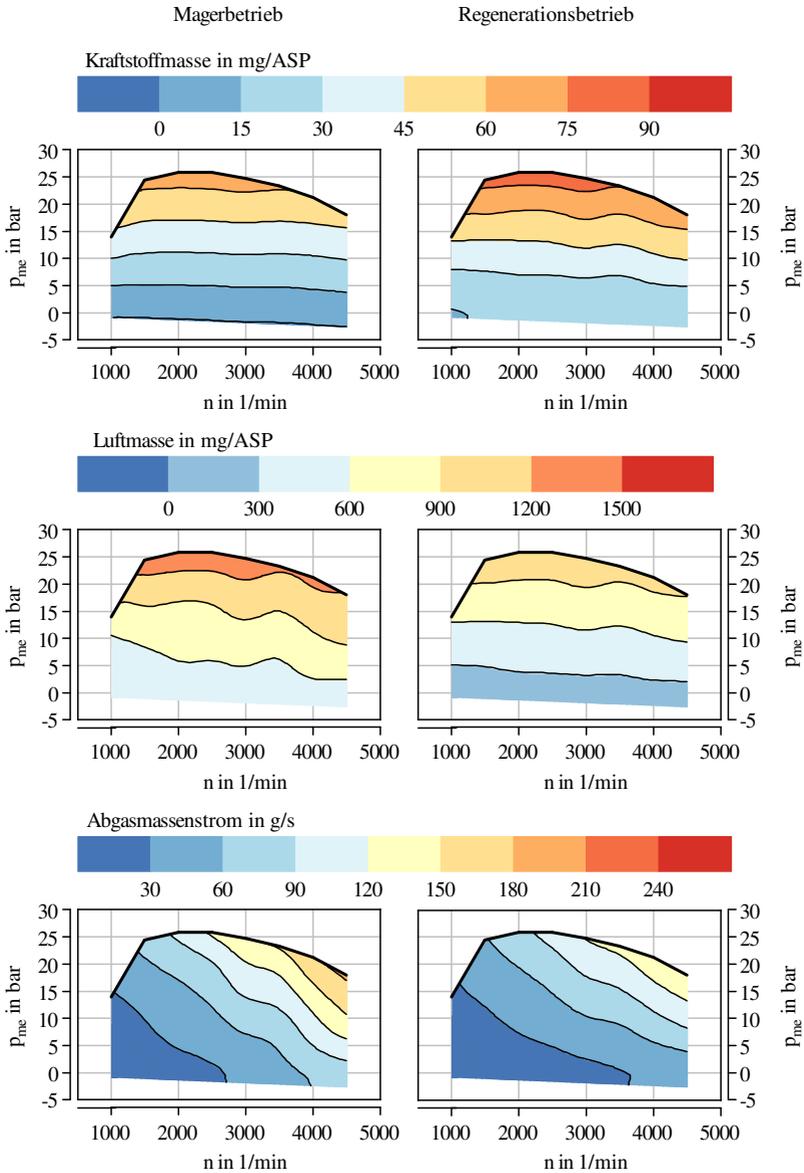


Abbildung A3.4: Kraftstoff- und Luftmasse pro Arbeitsspiel und Abgasmassenstrom über Motorlast und -drehzahl für Mager- und Regenerationsbetrieb