



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Phuong Thao Bui

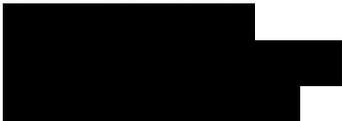
Applikation und Validierung einer modellbasierten Dosiersoftware für ein
Tandem-SCR-System

Fakultät Life Science
Department Umwelttechnik

Phuong Thao Bui

**Applikation und Validierung einer modellbasierten
Dosiersoftware für ein Tandem-SCR-System**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Umwelttechnik mit Schwerpunkt Regenerative Energie
am Department Umwelttechnik
der Fakultät Life Science
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
in Zusammenarbeit mit:
Firma: IAV GmbH



Erstprüfer/in: Prof. Dr. Carstens Frank
Zweitprüfer/in: Dipl.-Ing. (FH) Patrick Stracke
Abgabedatum: 30.04.2020

Abstract

Selektive katalytische Reduktionssysteme (SCR) sind die mit am häufigsten verwendeten Systeme zur Reduzierung von NO_x-Emissionen. Im Dieselfahrzeug wird AdBlue, eine wässrige Ammoniaklösung, als Reduktionsmittel verwendet. In den Fahrzeugen wird eine Dosiersoftware genutzt, um die in den SCR zu dosierende AdBlue-Menge zu berechnen und zu steuern. Die Menge des AdBlue wird durch ein niedrigdimensionales (nulldimensionales) physikalisches SCR-Modell in der IAV-Dosiersoftware berechnet. Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, die modellbasierte Dosiersoftware zu bedaten. Zu diesem Zweck wurden mehrere Ansätze für die Modellierung untersucht, und dann wurde das nulldimensionale physikalische SCR-Modell unter verschiedenen Fahrbedingungen validiert. Diverse Störungen wurden gleichzeitig aufgeschaltet, damit das Verhalten und die Regelung der Dosiersoftware analysiert werden konnte.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Tabellenverzeichnis	v
Abbildungsverzeichnis	vi
Nomenklatur	viii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation für das Thema	1
1.2 Gliederung der Arbeit.....	1
1.3 Ziel der Arbeit	2
2 Schadstoffe des Diesels	3
2.1 Abgaszusammensetzung des Dieselmotors	3
2.1.1 Kohlenwasserstoffe	3
2.1.2 Kohlenmonoxid.....	4
2.1.3 Stickoxide.....	4
2.1.4 Staubpartikel.....	5
2.1.5 Schwefeldioxid.....	6
3 Abgasgesetzgebung	7
3.1.1 Abgasnorm	7
3.1.2 Testzyklen	8
4 Das Abgasnachbehandlungssystem am Dieselmotor	10
4.1 Auslegung eines Abgasnachbehandlungssystems	10
4.2 Die Katalysatoren	11
4.2.1 SCR-Katalysator.....	11
4.2.2 SCR-Beschichtung auf Dieselpartikelfilter	14
4.2.3 Ammoniak-Schlupf-Katalysator	15
5 IAV-modellbasierte Dosiersoftware	16
5.1 Die Regelung der Dosiersoftware.....	16
5.2 Das niederdimensionale Modell	18
5.2.1 Komponentenmodell	18
5.2.2 Reaktionsraten.....	19
6 Simulative Methode für die Modellbedatung	23
6.1 Die Simulationsumgebung AxiSuite	23
6.2 Optimierungsmethodik	24
6.3 Kalibrierung und Validierung des 0-dimensionalen Modells.....	27
6.4 Modellierungsansätze und Optimierungsergebnisse	28
6.4.1 Modellierungsansätze.....	28
6.4.2 Optimierungsergebnisse	29
6.5 Skalierbarkeit für SCR1.....	34
7 Erweiterung der Dosiersoftware	37
7.1 Das erweiterte Kalman-Filter	37
7.2 4 - Brick-Temperaturmodell der Softwareerweiterung	46
7.3 Dosiersoftware des erweiterten Systems	49
8 Validierung und Robustheitsanalyse	51

8.1	Vergleich der Modellierungsansätze	51
8.1.1	Simulationsergebnisse des ersten Modellierungsansatzs	51
8.1.2	Simulationsergebnisse des zweiten Modellierungsansatzs	54
8.2	Validierung des vorderen EKF's	57
8.2.1	Auswirkung von Dosierstörungen.....	57
8.2.2	Auswirkung von Sensorstörungen	60
8.3	Validierung des hinteren EKF's.....	62
8.4	Validierung des hinteren EKF's mit NOx-Sensor hinter SCR2	66
8.4.1	Simulationsergebniss beim Norminalfall	66
8.4.2	Auswirkung von Dosierstörungen.....	67
8.5	Toleranzanalyse	69
8.6	Untersuchung der Problemfälle	72
9	Fazit und Ausblick.....	76
9.1	Zusammenfassung	76
9.2	Ausblick.....	77
A nhang	A-1	
A	Parametrierung des Modells	A-1
B	Bedeutung für die Rückkopplung.....	A-2
Literaturverzeichnis.....	xx	

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: EURO-Normen für Diesel-Pkw	7
Tabelle 2: Beschreibung der Symbole in Stoffbilanzgleichung.....	18
Tabelle 3: Beschreibung der Symbole in der Abbildung 14.....	19
Tabelle 4: Die Beschreibung der Symbole in der thermodynamischen Gleichungen	47
Tabelle 5: Die betrachtete Toleranzparameter und ihre Bandbreite	69
Tabelle 6: Die Referenzwerte des System im Norminalfall nach sechs Zyklen	70

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Abgaszusammensetzung des Diesel-Motors.....	3
Abbildung 2: Der Entstehungsmechanismus des Rußpartikels	6
Abbildung 3: Das Fahrprofil des WLTC-Testzyklus.....	8
Abbildung 4: Das Fahrprofil des RDE-Thyrow-Testzyklus	8
Abbildung 5: Das Fahrprofil des TfL-Testzyklus.....	9
Abbildung 6: Das Fahrprofil des BAB-Testzyklus.....	9
Abbildung 7: Beispiel eines dieselmotorischen Abgasnachbehandlungssystems	10
Abbildung 8: Der schematische Aufbau des SCR-Katalysators.....	11
Abbildung 9: Alterungseinflüsse des Katalysators	14
Abbildung 10: Das Arbeitsprinzip und der schematische Aufbau eines Partikelfilters	14
Abbildung 11: Das Funktionsprinzip eines ASC.....	15
Abbildung 12: Schema der Regelung in der Dosiersoftware.....	16
Abbildung 13: Das SCR-Modell nach dem Arbeitsprinzip eines idealdurchgemischten Reaktors	18
Abbildung 14: Die unterschiedliche Energieniveau der Reaktion mit und ohne Katalysator.....	19
Abbildung 15: Die betrachteten Faktoren und Simulationsphasen in Axisuite	23
Abbildung 16: Der schematische Ablauf der Optimierung	24
Abbildung 17: Optimierungsergebnis für SCR1-SCRF 0D-NDM.....	29
Abbildung 18: Optimierungsergebnis des SCR-ASC-0D-Modells	30
Abbildung 19: Optimierungsergebnisse des SCR2-0D-Modells	31
Abbildung 20: Optimierungsergebnis des SCR1-Modells.....	32
Abbildung 21: Optimierungsergebnis des SDPF-Katalysators.....	33
Abbildung 22: Optimierungsergebnis des SCR2-Katalysators mit SCR1-Sollfüllstand	34
Abbildung 23: Emissionen des SCR1 mit Einsatz von SCR2-Parametern.....	35
Abbildung 24: Temperaturunterschiede zwischen SCR1 und SCR2.....	36
Abbildung 25: Der Arbeitsprinzip des EKFs.....	38
Abbildung 26: Beispiel der EKF-Adaption	43
Abbildung 27: Das Schema der Temperaturberechnung	47
Abbildung 28: Temperaturvergleich zwischen NDM und Axisuite (1. Reihe: BAB vor Anpassung, 2.Reihe: BAB nach Anpassung, 3.Reihe: WLTC-Validierung der Anpassung Blau: Axisuite, Orange: NDM)	48
Abbildung 29: Die Struktur der Dosiersoftware	50
Abbildung 30: Die Simulationsergebnisse der vorderen Komponenten (links: WLTC , rechts: BAB)	52
Abbildung 31: Die Simulationsergebnisse der vorderen Komponenten (links: WLTC , rechts: BAB)	53
Abbildung 32: Vergleich der Simulationsergebnisse des Axisuite-Modells und der angepassten Getrennte-NDMs	54
Abbildung 33: Simulationsergebnisse von EKF1 im Norminalfall (links: WLTC, rechts: BAB).....	55

Abbildung 34: Fehlerdetektion im Überdosierungsfall (links: WLTCx10, rechts: RDE-Thyrowx10, --- LDM, — Axisuite).....	57
Abbildung 35: Fehlerdetektion im Unterdosierungsfall (links: WLTCx10, rechts: RDE-Thyrowx10)	58
Abbildung 36: EKF-Korrektur bei Drift des eingangsseitigen NOx-Sensors im WLTCx10 (links: -25% Gain, rechts: 25% Gain).....	60
Abbildung 37: Die EKF-Korrektur bei der Verdriftung der ausgangsseitigen NOx-Sensor im WLTCx10(links: -25% Gain, rechts: 25% Gain)	61
Abbildung 38: Die Überdosierungsfälle mit dem Sensor hinter ASC (links: WLTC, rechts: RDE-Thyrow)	63
Abbildung 39: Die Unterdosierungsfälle mit dem Sensor hinter ASC (links: WLTC, rechts: RDE-Thyrow)	64
Abbildung 40: Der Norminalfall (links: WLTC, rechts: RDE-Thyrow)	66
Abbildung 41: Fehlerdetektion von EKF2 (links: WLTCx10, rechts: RDE-Thyrowx10)	67
Abbildung 42: Fehleradaption für EKF2 (links: WLTCx10, RDE-Thyrowx10).....	68
Abbildung 43: Toleranzergebnisse der Werte nach dem SCR2 und ASC für 169 Fälle jeweils im open-loop-Betrieb und im closed-loop-Betrieb von dem sechsten Zyklus (BAB)	71
Abbildung 44: Ein Beispiel der EKF-Fehladaptation (Motorway-Zyklus)	72
Abbildung 45: Die Varianz des Schätzfehlers von WLTC, RDE, Motorway	73
Abbildung 46: Die Performance-Verschlechterung durch ASC (links: vordere Komponente, rechts: hintere Komponente) - BAB Zyklus	75

Nomenklatur

Verwendete Formelzeichen

Variablen	Einheit	Bedeutung
Allgemeine Notation		
a		skalare Größe
\hat{a}		geschätzte Größe
Lateinische Buchstaben		
c	mol/m^3	Konzentration
E	J/mol	Molare Aktivierungsenergie
M	g/mol	molare Masse
m	g	Masse
\dot{m}	g/s	Massenstrom
N	-	Teilchenanzahl
\dot{r}	$\text{mol}/(\text{m}^3\text{s})$	Reaktionsgeschwindigkeit
R	$\text{J}/(\text{molK})$	Ideale Gaskonstante
T	K	Temperatur
\dot{V}	m^3/s	Volumenstrom
Griechische Buchstaben		
ψ	-	Temperaturexponent
Ω	-	Tempkin-Parameter
ρ	kg/m^3	Dichte
ε	-	Porosität
Θ	-	relative Beladung
k	-	Reaktionsgeschwindigkeitskoeffizient
ζ	-	Massenanteil
Σ	-	Summe
τ	-	Zeit als Integrationsgröße

⊖	-	relative Beladung
Abkürzung		Bedeutung
AdBlue		32,5 %ige Harnstofflösung
Axisuite		komplexes Katalysator-Simulationsprogramm
CAN		Controller-Area-Network
DOC		Dieseloxidationskatalysator (engl.: „Diesel Oxidation Catalyst“)
EKF		erweiterter Kalman-Filter
ETB		Engine Test Bench/ Motorprüfstand
NDM/LDM		Niederdimensionales Modell /Low Dimension Modell
P		P-Regler
PI		PI-Regler
RDE		Real Driving Emission
RTB		Roller Test Bench / Rollenprüfstand
SCR		selektive katalytische Reduktion
Uniplot		komplexes Diagramm-Darstellungsprogramm
WLTC		Worldwide harmonized Light vehicle Test Cycle

Verwendete Indizes

Symbol	Bedeutung
ads	Adsorption
Abg	Abgas
avg	Average (durchschnittlich)
des	Desorption
ds	Down stream
MS	Massenstrom
slw	slow
std	Standard
TP	Tail pipe
us	Up stream

1 Einleitung

1.1 Motivation für das Thema

Um den verschärften Vorschriften zum Ausstoß von Luftschadstoffen durch PKW zukünftig einhalten zu können, müssen neben innermotorischen auch außermotorische Maßnahmen zur Abgasreinigung genutzt werden. Es wird eine Vielzahl an Katalysatoren, wie Oxidations-, hydrolyse Katalysator oder NOx-Speicherkatalysator verwendet. Das verbreitetste Verfahren in der nachmotorischen Emissionsreduktion ist jedoch der Einsatz der selektiven katalytischen Reduktion (SCR), die zur Stickoxiden-Minderung schon seit langer Zeit im PKW eingesetzt wird. Im Laufe der Zeit ist dieses System kontinuierlich komplexer geworden. Basierend auf dem Fundament des SCR sind weitere Verfahren von SCR-Technologien entwickelt worden, wie SCR-Katalysator auf Dieselpartikelfilter, Edelmetall-SCR... Nachteilig muss beim SCR zusätzlich das Reduktionsmittel ins System eingespritzt werden, was bei der Überdosierung eine hohe Welle des Ammoniaks verursacht. Aufgrund ihrer gesundheitsschädlichen Auswirkung wird der Grenzwert für den Ammoniak-Ausstoß in der Zukunft gesetzlich vorgeschrieben. Um das Ammoniak zu eliminieren werden zusätzlich weitere Katalysator eingesetzt. In dem zukünftigen EU7 kompatibelen ANB-Layout nimmt die Anzahl der hintereinanderggebauten Katalysatoren zu und die Dosierstellen werden verdoppelt.

Mit zunehmender Komplexität der gesamten Anlage steigt auch zugleich die Komplexität der Regelung. Die kennfeldbasierte Regelung ist mit den vermehrten physikalischen Modellen kaum noch realisierbar. Stattdessen werden die Komponenten in Einzel modelliert, damit sowohl der Bedatungsaufwand verringert als auch die hohe Robustheit ermöglicht werden kann. Der modellbasierte Ansatz kam mehr zum Einsatz bei dem Tandem-System, in dem zwei SCR-Komponenten hintereinander geschaltet werden, kommen. Die Emissionen nach SDPF können mit modellbasierten Strukturen besser abgebildet werden

1.2 Gliederung der Arbeit

Insgesamt besteht diese Arbeit aus zehn Kapiten, Einleitung, Zusammenfassung und Ausblick miteingeschlossen. Zu Beginn der Arbeit werden die Grundlage der dieselmotorischen Schadstoffe und ihrer Auswirkungen beschrieben. Im nächsten Kapitel wird die Abgasgesetzgebung vorübergehend erläutert und anschließend werden die Testzyklen, die im Laufe der Arbeit zum Validieren verwendet werden, vorgestellt. Die einzelnen Katalysatoren werden zunächst detailliert präsentiert, wobei hauptsächlich auf die Punkte eingegangen wird, die Information von SCR. In Kapitel 5 wird ein kurzer Überblick über das Abgasnachbehandlungssystem-Layout von dem betrachteten Fahrzeug gegeben. Als Nächstes werden der in der Software implementierte Modell und ihre Berechnungen erläutert. Damit der Modell funktionieren kann, muss der Modell kalibriert werden. In dem folgenden Kapitel wird der Vorgehensweise von Parameteranpassung des Modells vorgestellt. Die vordere Komponente werden in zwei verschiedene Wege kalibriert und die hinter Komponente hat hingegen eine einzige Kalibrierungsmöglichkeit. In Kapitel 6 werden die Optimierungsergebnisse von zweien Methoden gezeigt. Am Anschluss muss es analysiert werden, welche Methode sinnvoller ist, um die entsprechende Regelung zu entwickeln. Als Referenzmodell wird die Software-Axisuite verwendet, die um einen generischen Modell geht. Die Parametrisierung der Ansätzen ist anhand des hochdimensionalen Axisuite-Modells erlangt.

Die bisherige modellbasierte Regelung muss an den Layout anpassend mit Fokus auf den Erweiterte-Kalman-Filter ausgelegt und weiterentwickelt werden. Der EKF ist für die Füllstandsschätzung des Katalysators zuständig und hat einen großen Einfluß auf die Steuerung des Systems. In Kapitel 7 werden die Softwareerweiterungen auseinandergesetzt. In der Erweiterung gibt es den EKF des erweiterten Systems, den Temperaturmodell. In Kapitel 8 wird die Erweiterung der Software validiert, in dem das System reagieren auf die vorsätzliche aufgeschaltete Störungen untersucht wird. Am Ende des Kapitels 8 handelt es sich um eine Toleranzanalyse, in der die Simulationsergebnisse vom an- und ausgeschalteten

EKF miteinander verglichen werden. In den Simulationen werden die diversen Fehler gleichzeitig zum Analysieren aufgeschaltet, wie viel von dem EKF profitiert wird. Zum Abschluss wird es an die Zusammenfassung und Ausblick gewidmet.

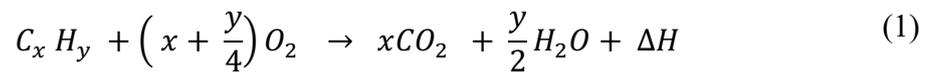
1.3 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es zu untersuchen, ob die Emissionen unter einem breiten Spektrum der Fahrbedingung und Störungen mit der erweiterten Regelung den Abgasgrenzwert noch eingehalten werden können. Es ist auch interessant zu sehen, ob sich die Emissionsergebnisse den zukünftigen Abgasvorschrift erfüllen können. Mithilfe der Simulationen kann es beantwortet werden, welche Änderungen in Software sowie auch in Hardware erforderlich sind, um den kommenden Grenzwert zu ermöglichen. Durch die Simulationsergebnisse werden die Erkenntnisse über das reale Fahrzeug und die Rückschlüsse auf das Problem zu gewinnen. Damit können die unnötige Fehler vermeiden und die Auslegung des Abgasnachbehandlungssystems verbessert werden.

2 Schadstoffe des Diesels

2.1 Abgaszusammensetzung des Dieselmotors

Bei der vollständigen Verbrennung findet die chemische Reaktion wie folgt statt, wenn die Zwischenprodukte nicht berücksichtigt werden. Das Endprodukt H₂O weist keine schädliche Wirkung auf. CO₂ wird nach gemäß dem Umweltbundesamt in auftretender Konzentration nicht zum Schadstoff zugeordnet, hat jedoch ein Einfluss auf den Treibhauseffekt.



In Realität findet keine ideale Verbrennung aufgrund örtlich stark schwankende Luftverhältnisse und der unterschiedlichen äußeren Faktoren statt. Dadurch werden Kohlenstoffmonoxide (CO), Stickoxide (NO_x), unvollständige verbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) und Rußpartikel (PM) ausgestoßen. Die gesamte Abgaszusammensetzung wird im Kuchendiagramm erläutert.

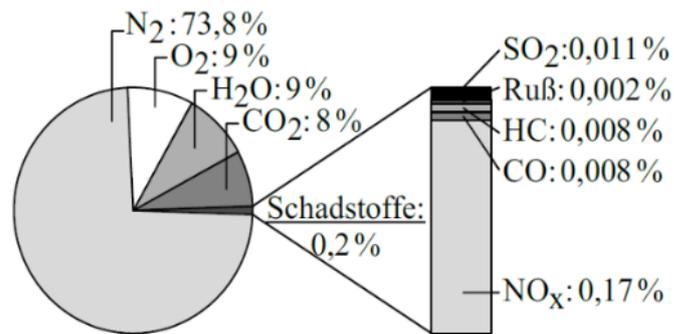


Abbildung 1: Die Abgaszusammensetzung des Diesel-Motors [G.P.Merker et.al., 2018]

Die obenliegende Abbildung 1 zeigt, dass die NO_x-Emission einen hohen Anteil an den Schadstoffen ausmacht. Obwohl der Schadstoffanteil gering ist, haben sie eine große Auswirkung auf die Menschen und Umwelt. In dem folgenden Unterkapitel werden die einzelne Gasspezies des Dieselmotors vorgestellt. Ihre Entstehungsmechanismen werden nachfolgend mithilfe der chemischen Reaktionen detailliert dargestellt. Am Schluss werden ihre Auswirkungen auf die Umwelt und menschliche Gesundheit erläutert.

2.1.1 Kohlenwasserstoffe

Die chemischen Verbindungen sind überwiegend organisch. Ein Teil davon wird von der Industrie in großen Mengen hergestellt. Die meisten von einem PKW freigesetzten Kohlenwasserstoffverbindungen sind Aliphate, Olefine und Aromate wie zum Beispiel: CH₄, C₆H₆, C₈H₁₈, die in einer vereinfachten Summenformel C_xH_y beschrieben werden. Aufgrund der unvollständigen Verbrennung werden die Kohlenwasserstoffe durch die HC-Speicherung und Quench-Effekte hervorgerufen. Der Kraftstoff löst sich im an den Zylinderwänden befindlichen Schmieröl und ruft die HC-Speicherungseffekt hervor. Kohlenwasserstoff taucht meistens in der mageren Flammenaußenzone oder durch Erlöschen des Flammens auf und ihre Oxidation wird deswegen eingeschränkt. Dieser Effekt wird als Quench-Effekte bezeichnet. Bei einem Kaltstart erhöht sich überwiegend die HC-Emission. [W.Boll, 2011, S27]

Die werden als umweltrelevante Schadstoffe anerkannt, da sie toxisch, in der Umwelt persistent sind, sich in der Nahrungskette anreichern und Bioakkumulation verursachen. Die Aromaten sind zwei oder mehr

Benzolringe mit der Leitkomponente Benzo(a)pyren und werden als polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) genannt. PAK löst sich nicht im Wasser, wird jedoch im Körper zu wasserlöslichen abgebaut. Die karzinogenen Zwischenprodukte entstehen dabei. [K.Prigge, 2018, S17]

Anthropogene Kohlenwasserstoffe sind gesetzlich geregelt. Schädliche VOCs sind in der Regel nicht akut toxisch, haben jedoch langfristige Auswirkungen auf die Gesundheit, da die Konzentrationen in der Regel niedrig sind und sich die Symptome nur langsam entwickeln. [Umweltbundesamt, 2019]

2.1.2 Kohlenmonoxid

Bei der vollständigen Verbrennung reagiert die lange Kohlenwasserstoffkette des Kraftstoffs mit Sauerstoff aus der Luft. Daraus entsteht Kohlendioxid CO₂. Aufgrund der niedrigen Verbrennungstemperatur, Sauerstoffmangel und örtlichen kalten Zylinderwand entsteht das Kohlenmonoxid.

Kohlenmonoxid besteht aus einem Kohlenstoffatom und einem Sauerstoffatom. Kohlenstoffmonoxid hat eine chemische Summenformel CO. Die CO-Emission im Verkehrssektor beträgt bis zu 75% Anteil des gesamten CO-Ausstoßes. Die Oxidation findet vollständig statt, wenn die nötige Zufuhrluftmasse den theoretischen erforderlichen Luftbedarf erreicht. Bei der unterstöchiometrischen Anwesenheit von Luft und bei unvermeidbaren realen Bedingungen wird Kohlenmonoxid ausgestoßen. Das von der unvollständigen Verbrennung verursachte Kohlenmonoxid reagiert weiter mit dem gasförmigen Wasser und daraus ergibt sich Kohlendioxid und Wasserstoff. [J.Beck 2015]

Während der Verbrennung des Kraftstoffs ist Kohlenmonoxid ein Zwischenprodukt der Oxidation von Kohlenwasserstoff. Das Kohlenmonoxid reagiert weiter mit Sauerstoff und es entsteht Kohlendioxid, das eine hohe Temperatur bedarf. Das Kohlenmonoxid entsteht vor allem sowohl am Rand des Einspritzkegels als auch an der kalten Brennraumwand, wo die gewünschte Temperatur nicht erreicht werden kann. [J. Werfel, 2014]

Nach BImSchG wird Kohlendioxid nicht zu den Schadstoffen gezählt. Er ist jedoch klimaschädlich und leistet dazu die Erhöhung des Treibhauseffekts. Kohlenmonoxid ist ein geruchs-, farblos- und starkes Giftgas. Ab der Konzentration von 0,3 Vol-% CO kann Kohlenmonoxid zur Lebensgefahr führen. Es blockiert die Sauerstoffaufnahme und lagert sich an das im Hämoglobin vorkommende Eisenatom an. Seine Affinität ist 6-fach höher als Sauerstoff, deshalb wird Erstickten nach bestimmter Zeit wegen des Sauerstoffmangels verursacht. Bei einer CO-Vergiftung ist eine langfristige Beatmung erforderlich. [K.Prigge, 2018]

2.1.3 Stickoxide

Die Stickoxide NO_x sind die abgekürzte Form aller Verbindungen von Stickstoff (N) und Sauerstoff (O). Die im Abgas entstehenden Stickoxide (zum Beispiel NO, NO₂, N₂O, N₂O₃, N₂O₅) sind hauptsächlich NO und NO₂. Der Anteil des NO in der Stickstoff-Zusammensetzung macht bis zu 90% aus.

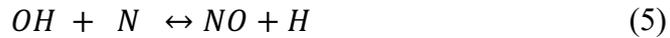
Wie die Stickoxide zustande kommen, erläutern die Reaktionen des Entstehungsmechanismus.

Unter einer hohen Temperatur von circa 2200K kommen die verbundenen Sauerstoffmoleküle in zwei getrennten Atomen vor, wie in der chemischen Reaktion 2 dargestellt. Die für den Verbrennungsprozess zugeführte Umgebungsluft, die 70% aus elementarem Stickstoff besteht, reagiert mit dem atomaren Sauerstoff zu Stickstoffmonoxid und Stickstoff, wie Gleichung 3.

Der überschüssige Luftsauerstoff ist danach in Verbindung mit dem atomaren Stickstoff und daraus entsteht ein weiteres Stickstoffmonoxid-Molekül. In den brennstoffreichen Zonen, die meist hinter der Flammenfront vorkommen, findet Reaktionen zwischen Hydroxidion und Stickstoff statt, das zur Entstehung von NOs und Wasserstoff führt. [K.Hoppe, 2009]

Außerdem entstehen auch die Stickstoffdioxide, die sich innermotorisch gebildet werden. Der Anteil von NO₂ an den NO_x-Emissionen, beträgt bei Dieselmotoren ca. 5 bis 15 %. Durch die Reaktionen mit den HO₂- und OH-Radikalen bilden sich die Stickstoffdioxide. [Tchöke.H et.al, 2018]





Stickoxide können auf mehrere Arten für den Menschen gesundheitsschädlich sein. Zum einen kann Stickstoffmonooxid (NO), wenn es eingeatmet wird, mit dem Hämoglobin im Blut reagieren, wodurch dieses seiner Funktion nicht mehr nachkommen kann. Dadurch wird der Sauerstofftransport im Körper gestört, welcher jedoch für die Stoffwechselreaktionen zur Energiegewinnung eine wichtige Rolle spielt. Des Weiteren kann Stickstoffdioxid (NO₂), wenn es in die Lunge gelangt zu HNO₂ und HNO₃ reagieren. Die Produkte dieser Reaktion sind in der Lage die Schleimhäute zu reizen oder im Extremfall sogar die Lunge zu verätzen, wodurch auch Lungenödeme entstehen können [Prof.Dr.habil. Witt, 2018]. Zudem sind Stickoxide, während sommerlicher Hitzeperioden, an Reaktionen beteiligt durch welche sich schädliche Oxidantien wie beispielsweise bodennahes Ozon bildet [Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin, 2005].

2.1.4 Staubpartikel

Staubpartikel, oft als Partikel (PM) bezeichnet, entstehen aus einer Vielzahl von Quellen und gelangen in die Atmosphäre. Sowohl die Größe als auch die chemische Zusammensetzung variieren stark in Bezug auf die Art der Partikelquelle. Grobe Partikel können als solche mit einem Durchmesser von mehr als 2,5 µm (PM₁₀) und feinen Partikeln von weniger als 2,5 µm (PM_{2,5}) angesehen werden. Unter feuchten Bedingungen ziehen viele Partikel Wasserdampf an und wachsen zu kleinen Tröpfchen. Der Begriff "Aerosol" wird häufig sowohl für feste Partikel als auch für in Luft suspendierte Tröpfchen verwendet [Pruppacher, et.al., 1980].

Die industriellen und transportbedingten Verbrennungsprozesse, bei denen feine Partikel direkt emittiert werden, verursachen typischerweise Partikel im Größenbereich von 0,1 bis 2,5 µm Durchmesser [Schäfer, 2017]. Die schwermetallhaltigen Partikel werden aus einer Vielzahl von Industrie- und Transportquellen emittiert. Metallhaltige Partikel stammen aus Reibungsquellen wie Reifen- und Bremsenverschleiß. Kohlenstoffhaltige Partikel (Ruß) werden von Industrie und Fahrzeugen bei der Verbrennung kohlenstoffbasierter Brennstoffe (Kohle, Öl, Erdgas) freigesetzt. Ruß ist in Dieselfahrzeugen unter brennstoffreichen Bedingungen unvermeidbar. Die Partikelbildung besteht aus mehreren chemisch-physikalischen Vorgängen und haben unterschiedliche Form sowie Größe. Der Entstehungsmechanismus des Rußes wird in der folgenden Abbildung veranschaulicht.

Aus dem Brennstoff und Sauerstoff wird Acetylen (Ethin) gebildet. Diese Moleküle haben die chemische Struktur eines Benzolrings. Sie sammeln sich aneinander, um durch Polymerisation und Dehydrierung ein größeres Gebilde zu erreichen. Die Produkte sind polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe. Mit der steigenden Anzahl des Kohlenstoffs entstehen die Rußkeime. Die fremden Substanzen lagern sich auf der Oberfläche des Rußes ab und die Rußpartikel kommen zustande. Wenn die Temperatur auf 1000K steigt, wird der Ruß wieder zurück zu CO₂ oxidiert [K.Hoppe, 2009].

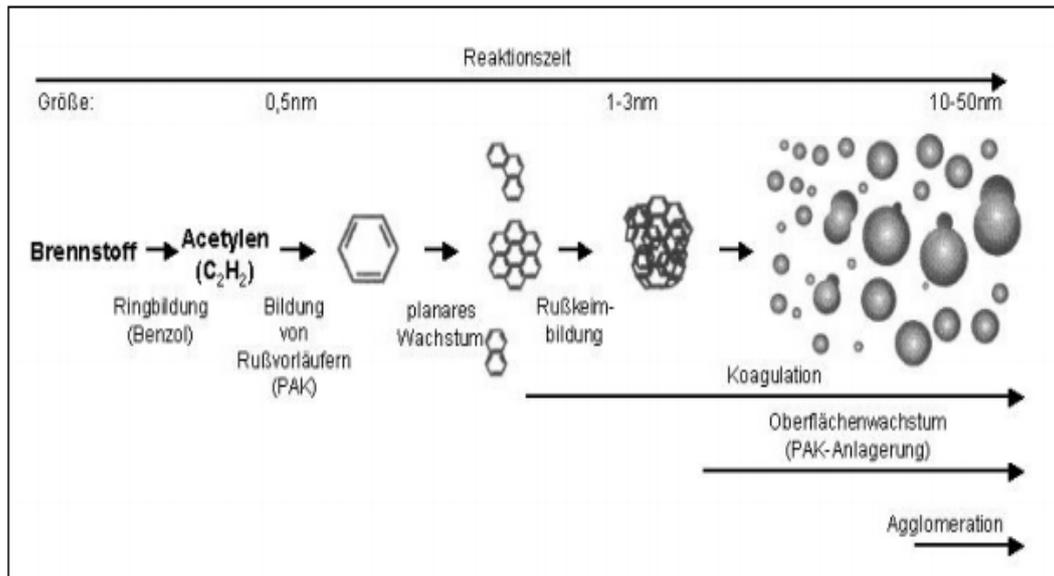


Abbildung 2: Der Entstehungsmechanismus des Rußpartikels [D.RASU, 2001]

2.1.5 Schwefeldioxid

Schwefeldioxid ist ein Gas, welches nicht sichtbar ist und einen scharfen Geruch hat. Es reagiert leicht mit anderen Substanzen und bildet schädliche Verbindungen wie Schwefelsäure, schweflige Säure und Sulfatpartikel.

Schwefeldioxid ist in Kraftfahrzeugemissionen als Ergebnis der Kraftstoffverbrennung enthalten. In der Vergangenheit waren Kraftfahrzeugabgase eine wichtige, aber nicht die Hauptquelle für Schwefeldioxid in der Luft. Dies ist jedoch nicht mehr der Fall.

Schwefeldioxid beeinträchtigt die menschliche Gesundheit, wenn es eingeatmet wird. Es reizt Nase, Rachen und Atemwege und verursacht Husten, Keuchen, Kurzatmigkeit oder ein angespanntes Gefühl in der Brust. Die Auswirkungen von Schwefeldioxid sind sehr schnell zu spüren und die meisten Menschen würden die schlimmsten Symptome in 10 oder 15 Minuten nach dem Einatmen spüren. Am stärksten gefährdet sind Menschen mit Asthma oder ähnlichen Erkrankungen, wenn sie Schwefeldioxid ausgesetzt sind. [DEH, 2005]

Durch die verschärfte gesetzliche Begrenzung des Schwefelgehalts in Kraftstoffen steigt zunehmend der relative Einfluss der motorölbasierten Kontamination (Zn, Ca, Mg, P, Si) bezüglich der chemischen Alterung.

3 Abgasgesetzgebung

Um langfristig den Luftqualitätsstandard einzuhalten, müssen die Abgasemissionen des Straßenverkehrs betrachtet werden. Die Abgasnorm legt die zulässigen Emissionsgrenzwerte der verschiedenen Schadstoffe für den Straßenverkehr fest und fordert heraus, die Technologie immer weiter zu entwickeln. Die Abgasnorm schreibt die maximalen Grenzwerte von Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffoxiden, Kohlenwasserstoffen, der Partikelmasse und der Partikelanzahl vor. Je nach der Art des Motors (Otto oder Dieselmotor) und des Kraftfahrzeugtyps (leichte Nutzfahrzeuge, Leichtkraftrad, Lkw oder Busse) unterscheiden sich die zulässigen Emissionen.

3.1.1 Abgasnorm

Im Jahr 1992 wurde die "Euro" -Emissionsnorm eingeführt, beginnend mit dem Schritt "Euro 1", im Allgemeinen gefolgt von sukzessiven strengeren Normen: Euro 2 bis Euro 6. Mit dem wachsenden Umweltbewusstsein der Industrienationen in den letzten Jahrzehnten wurden für die Automobilbranche europaweit schärfer werdende Abgasnormen durchgesetzt. Derzeit können nur die neuen Fahrzeuge mit der Euro 6-Zertifizierung in der EU verkauft werden. [ICCT, 2017]

In den letzten Jahrzehnten wurden strengere Gesetze verabschiedet. Die Abgasgrenzen in der Mobilitätsbranche wurde festgelegt und die zulässigen Grenzwerte für verschiedene Schadstoffe immer weiter herabgesetzt. Bei der Typprüfung gilt seit dem 1. September 2014 die sogenannte EURO-6-Norm, welche sich nach der Verordnung 582/2011/EU richtet und Emissionsgrenzen für eine Reihe von Schadstoffen festlegt. Seit dem 1. September 2015 gilt die EURO-6-Norm für alle neu zugelassenen Fahrzeuge. Die aktuellste Abgasnorm ist die sogenannte EURO-6d-Temp-Norm, die seit September 2017 vorgeschrieben ist. [Dr. Seiler, J., 2018]

Tabelle 1: EURO-Normen für Diesel-Pkw (Auf Basis von [B.Fietzke, 2016])

Schadstoff	EURO 3	EURO 4	EURO 5a	EURO 6b	EURO 6d-Temp	EURO 6d
Seit	2000	2005	2009	2014	2017	2020
m_{co} [g/km]	0,64	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
m_{NOx} [g/km]	0,5	0,25	0,18	0,08	0,08	0,08
$m_{\text{HC+NOx}}$ [g/km]	0,56	0,3	0,23	0,17	0,17	0,17
m_{P} [g/km]	$50 \cdot 10^{-3}$	$25 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$
N_{P} [1/km]				$6 \cdot 10^{11}$	$6 \cdot 10^{11}$	$6 \cdot 10^{11}$
Testzyklus	NEDC	NEDC	NEDC	NEDC	WLTC	WLTC

In der obenstehenden Tabelle werden die Abgasvorschriften von EURO 3 bis 6 zusammengefasst. Ab EURO 6b-Norm wurde ein neuer Grenzwert, die Partikelzahl, hinzugefügt. Dieser setzt die zulässige Teilchenzahl der Partikel auf 600 Milliarden Teilchen pro km fest. Die tendenziellen Verschärfungen können deutlicher bei NOx und die unvollständige verbrannte der Kraftstoff Kohlenwasserstoff (HC) erkannt werden. Der Testzyklus NEDC wird von EURO 3 bis EURO 6b verwendet, um die Abgasemissionen von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen auf einfache, wiederholbare und reproduzierbare Weise zu zertifizieren. Seit dem 1. September 2017 trat das neue Testverfahren-WLTC in Kraft, das den NEDC ersetzt.

Für eine Lebensdauer von einem 160 000 km zurückgelegenen Strecke, der 5 Jahre entspricht, müssen die Emissionsgrenzwerte eingehalten werden. [K.Hoppe, 2009]

3.1.2 Testzyklen

1. Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure

Im Jahr 2008 begannen die Vereinten Nationen die Arbeit an einem aktualisierten Prüfverfahren, dem „World-Harmonized Light-Duty Vehicle Test Procedure“ (WLTP). Dies beinhaltet einen neuen Testzyklus, der repräsentativer für das durchschnittliche Fahrverhalten ist.

Der WLTP spiegelt reale Emissionen wider und besitzt eine Länge von 23,253 km mit einer Dauer von 180 Sekunden. Die Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt 46,5 km/h und die maximale Geschwindigkeit 131 km/h. [GFEI, 2015].

In der Regel ist der Motor am Start kalt und wird deshalb Kaltstart genannt. Befindet sich ein Fahrzeug in der Kaltstart-Phase, erhöht sich der Emissionsausstoß. Die Umgebungstemperatur wird festgelegt, welche im WLTP 23 ° C vorgeschrieben wurde. Die EU plant jedoch, diese Temperatur auf 14 ° C zu senken, die repräsentativer für europäische Durchschnittstemperaturen ist

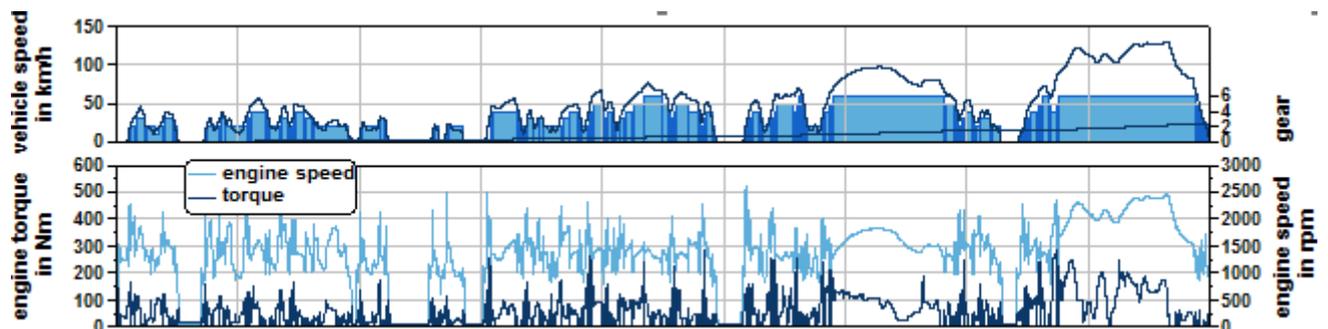


Abbildung 3: Das Fahrprofil des WLTC-Testzyklus [IAV_intern]

2. RDE-Thyrow

Die Laboruntersuchung wird durch die Emissionen im praktischen Fahrbetrieb oder sogenannte Real Driving Emission ergänzt. Die RDE-Prüfbedingungen sollen repräsentativ für die Fahrbedingungen sein, die normalerweise auf europäischen Straßen herrschen. Obwohl der RDE-Test auf öffentlichen Straßen durchgeführt wird, welche für den Verkehr freigegeben sind, werden während der Testfahrten die Bestimmungen eingehalten, die sicherstellen, dass eine breite Palette an Fahrbedingungen abgedeckt wird, denen europäische Fahrer normalerweise ausgesetzt sind. Es wurden Grenzen gesetzt, um zu definieren, was eine gültige RDE-Auslösung ausmacht. Die Außentemperatur, Windgeschwindigkeit, Richtung und Verkehrsdichte sind im RDE-Test völlig zufällig [Dr. Seiler, J., 2018].

RDE-Fahrten decken drei Betriebsarten ab: Stadt-, Land- und Autobahnfahrten. Diese Klassifizierungen basieren ausschließlich auf der Geschwindigkeit. Ein Auto mit einer Geschwindigkeit von bis zu 60 km/h wird als im Stadtverkehr fahrend betrachtet, bei 60 bis 90 km/h unter ländlichen Bedingungen und über 90 km/h unter Autobahnbedingungen. Die weiteren Bedingungen, die in Rahmen eines RDEs erfüllt werden müssen, sind die Stoppzeiten, die Höchstgeschwindigkeit und der Höhenunterschied. [ICCT, 2017].

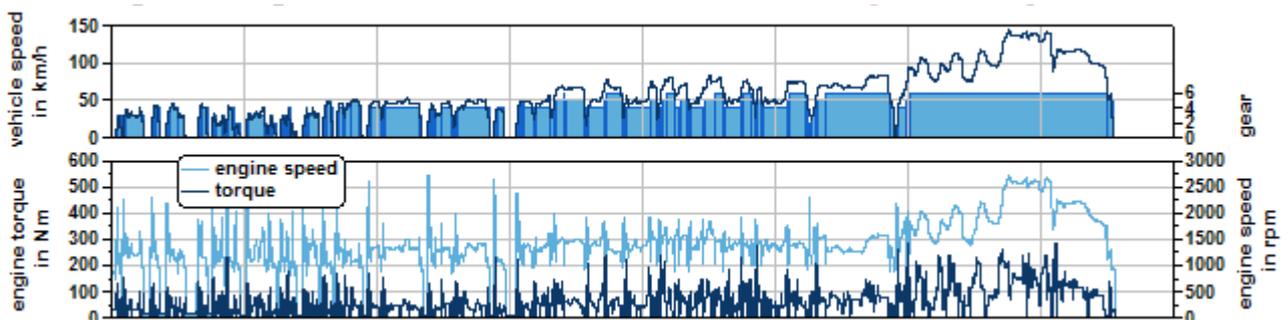


Abbildung 4: Das Fahrprofil des RDE-Thyrow-Testzyklus [IAV_intern]

3. Transport for London

TfL-Testzyklus steht für Transport für London und wird von der gleichnamigen Organisation erstellt. Der Testzyklus ist ein repräsentativer Testzyklus für die Innenstadt-London und es handelt sich wegen seiner geringeren Geschwindigkeit um einen Niederlast-Zyklus. Die Austrittsemissionen werden untersucht und erfasst. Die gesamte Dauer wird in zwei Phase geteilt. Die urbane Phase des TfL-Pkw-Zyklus bildet die repräsentative Verkehrslage in zentral London ab. Diese dauert 1656s mit Geschwindigkeiten zwischen 14 bis 22 km/h. Die Suburban-Phase legt 4.69 km zurück mit Geschwindigkeiten zwischen 30 km/h bis zu 35 km/h. Die durchschnittliche Temperatur in London beträgt 11°C, die dem Test auf der Abgasrolle zu Grunde gelegt ist.

Der TfL-Test umfasst eine Reihe festgelegter Testbedingungen, z. B. ein genanntes vorbestimmtes Geschwindigkeitsprofil und einen engen Umgebungstemperaturbereich von sowohl 11 °C als auch 23 °C, damit die Auswirkung der Umgebungstemperatur beim kalten Motor bewertet wird. [TfL]

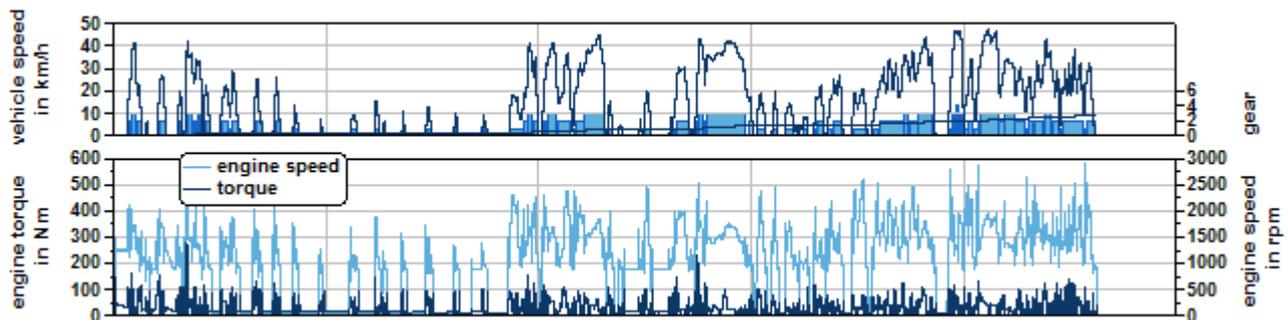


Abbildung 5: Das Fahrprofil des TfL-Testzyklus [IAV_intern]

4. Bundesautobahn

BAB ist die Abkürzung für Bundesautobahn. Der Test wurde von dem Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. entwickelt. Abbildung zeigt der BAB-Fahrgeschwindigkeitsverlauf. Der Zyklus präsentiert das Fahrverhalten eines auf der Autobahn fahrenden Pkws, welches dynamische Geschwindigkeit mit starken Beschleunigungen aufweist und im Vergleich mit anderen Zyklen weniger Stillstand beinhaltet. Laut dem Geschwindigkeitsdiagramm befindet sich das Fahrzeug in einem langen Zeitbereich bei 130 km/h, da die Geschwindigkeit meistens auf der Autobahn festgelegt wird. Der Zyklus dauert 800s. Er besteht aus einer kurzen Vorkonditionierungsphase und zwei gleichen Testphasen. Die Warm-up Phase liegt zwischen 0 und 200s, in der der Motor aufgewärmt wird. Bei der Phase 1 (200s-470s) und Phase 2 (471s-741s) sind identisch. Eine weitere definierte Randbedingung ist Umgebungsbedingungen über eine Fahrt, wo die Umgebungstemperatur des Tests bei 20°C festgesetzt wird. [ADAC, 2011]

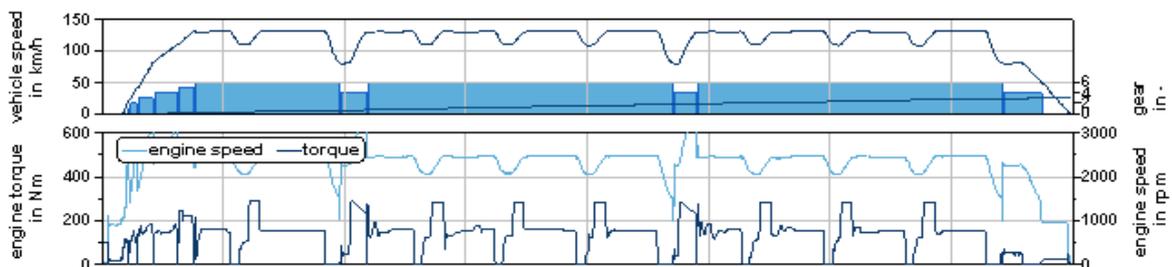


Abbildung 6: Das Fahrprofil des BAB-Testzyklus [IAV_intern]

4 Das Abgasnachbehandlungssystem am Dieselmotor

4.1 Auslegung eines Abgasnachbehandlungssystems

Die Abgasanlage besteht aus unterschiedlichen Komponenten. Die erste Komponente der Abgasanlage ist der Krümmer, der an der Abgasseite des Zylinderblocks angebracht ist. Die Abgase werden durch die einzelnen Öffnungen kontrolliert in den Abgasstrang abgeleitet. Ein Flexrohr ist eine flexible Verbindung zwischen dem Motorblock und den nachfolgenden Katalysatoren. Das Flexrohr hat die Aufgabe, die Bewegung des Motorblocks abzufedern, um den Bruch an der Verbindung bzw. an den Rohren der nachfolgenden Abgasanlage zu verhindern.

Zur Konvertierung der Schadstoffe im Abgas sind unterschiedliche Katalysatoren erforderlich. Abbildung 7 zeigt beispielhaft die verschiedenen Komponenten in einem Abgasstrang für ein EU6 Fahrzeug und das System wird im Rahmen dieser Arbeit betrachtet.

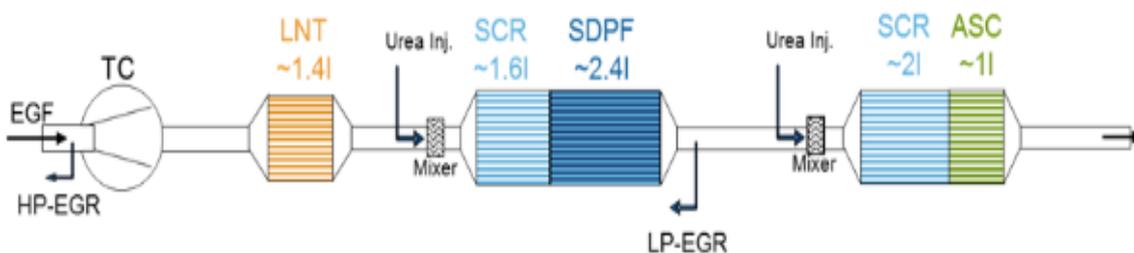


Abbildung 7: Beispiel eines dieselmotorischen Abgasnachbehandlungssystems [IAV-Intern]

Die Katalysatoren für einen Diesel betriebenes Fahrzeug sind in der Reihenfolge dargestellt, ein NO_x-Speicherkatalysator (kurz LNT für Lean NO_x Trap), ein Katalysator mit selektiver katalytischer Reduktion (kurz: „SCR“), ein DPF mit -SCR-Beschichtung (kurz: SCRoF oder SDPF), ein weiterer SCR und zum Schluss ein Ammoniak-Schlupf-Katalysator (kurz „ASC“).

Jedes Bauteil ist zuständig für eine bestimmte Funktion.

- NO_x-Speicherkatalysator (NSK) oder in Englisch LNT (Lean NO_x-Trap): Der LNT ist der erste Katalysator im ANB und befindet sich hinter dem Verbrennungsmotor und Turbolader. Dort werden beim Normalbetrieb mit Sauerstoffüberschuss die Stickstoffoxide adsorbiert.
- SCR-Katalysator: Der SCR wandelt mithilfe von AdBlue die Stickstoffoxide zu elementarem Stickstoff um.
- SCRf-Katalysator: Der SCRf arbeitet mit dem gleichen Prinzip wie ein SCR. Außerdem kann er jedoch dazu die Rußpartikel filtern und verbrennen.
- ASC-Katalysator: Der ASC-Katalysator befindet sich hinter dem SCR-Katalysator und oxidiert möglichen NH₃-Schlupf zu N₂, NO, NO₂ und N₂O.

Nachfolgend werden die einzelnen Katalysatoren im Detail.

4.2 Die Katalysatoren

4.2.1 SCR-Katalysator

Der Katalysator hat einen Grundkörper, der als „Substrat“ oder „Trägerstruktur“ bezeichnet wird. Der konstruktive Aufbau hat eine keramische oder metallische Wabenstruktur mit etwa 1 mm breiten parallel verlaufenden Kanälen. Um die Monolithe im Gehäuse/Canning fest zu integrieren, wird die Isoliermatte, die sich zwischen Gehäusewand und Monolith befindet, wie eine Art von Puffer eingelegt. Weil die Katalysatoren sich im Arbeitsprozess bei 200°C bis 350°C ausdehnen. Die Katalysatoren werden größer und dadurch wird der Raum zwischen Monolithe und Gehäuse enger. Das fängt entsprechend dieser Matten auf. Wenn der Katalysator wieder abkühlt, dehnt sich die Matte wieder auf und fixiert die Monolithe im Gehäuse damit er nicht klappert. Die Matten dienen auch dazu Wärme zu schützen, wenn der Katalysator unter dem Fahrzeug verbaut wird.

Die Katalysatorschicht (sogenannte Washcoat) beschichtet die Kanäle und dadurch wird die spezifische Oberfläche des Katalysators vergrößert, um die Reaktionsoberfläche mit umzuwandelnden Abgasen zu erhöhen. In der Regel wird die hochporöse γ -Al₂O₃ – Aluminiumoxid als das Material für Zwischenschicht (siehe Abbildung 8) verwendet und dadurch wird der Katalysator gegen thermischen Abbau stabilisiert. Auf dem Washcoat befindet sich die katalytisch aktive Substanz, auf dem wie zum Beispiel: metallbasierte Zeolithe.

Die physikalische Eigenschaft des Katalysatorträgers (Zeolith) hat einen großen Einfluss auf die Adsorptions- und Desorptionskapazität. Die chemische Verbindung der Zeolithe-Gruppe, die im SCR verwendet wird, ist die Aluminium-Silikatverbindung. Ihr Kristallgerüst enthält kleinen Poren, die mit Metallatomen zum Beispiel: Kupfer, Eisen oder Vanadium gefüllt sind. Das einströmende Reduktionsmittel (NH₃) tritt in den Katalysator ein und lagert sich an der unbesetzten Oberfläche an. Von daher spielen das gesamte Volumen, die Porengrößenverteilung und die NH₃-Affinität eine entscheidende Rolle.

In Bezug auf dieser Arbeit werden die Geometrie und die Eigenschaften des Katalysators im Folgenden erläutert. Das monolithische Volumen beträgt 1,608 Liter mit der entsprechenden Substrat-Masse von 0,403 kg [IAV-Intern].

Der schematische Aufbau wird in der Abbildung 8 veranschaulicht.

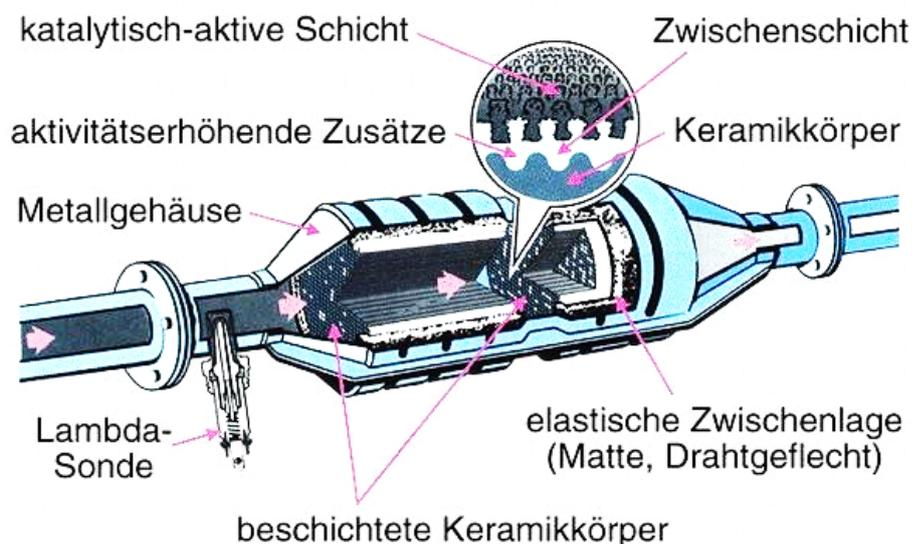
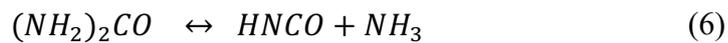


Abbildung 8: Der schematische Aufbau des SCR-Katalysators [Wissenmedia]

Der SCR-Katalysator ist ein technisches Verfahren, bei dem der Umwandlungsprozess von Stickoxid zu elementarem Stickstoff katalysiert wird. Dort werden NO und NO₂ durch die chemischen Reaktionen reduziert. Um die Reaktionen stattzufinden zu lassen, ist NH₃ nötig. Da NH₃ ein giftiges Gas ist, wird NH₃ in Form von AdBlue mittels eines Injektors in den Abgasstrang eingebracht und ins heiße Abgas vermischt. Das AdBlue besteht zu 32,5% aus Harnstoff und zu 67,5% aus demineralisiertem Wasser. Von Fördermodul zum Dosierventil wird das Reduktionsmittel durch eine Pumpe gefördert. Um die Gleichverteilung des NH₃ über den ganzen Querschnitt zu gewährleisten, wird ein Mischer vor dem Katalysator eingebaut. Für die effektive Dosierung des AdBlue ist die Abgastemperatur von mindestens 180°C erforderlich. Schließlich wird das AdBlue zersetzt, daraus folgt, dass die Lösung in der Thermolyse- und Hydrolysereaktion zu Ammoniak umgesetzt wird. Die Thermolysereaktion, in die gasförmige Ammoniak und Isocyanäure freigesetzt werden, läuft wie folgt ab. [Tchöke.H et.al.,2018, S917]



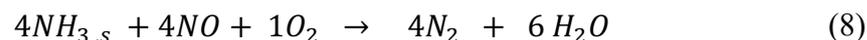
In der Hydrolysereaktion reagiert die Isocyanäure weiter mit dem in der Mischung gehaltenen Wasserdampf zu Ammoniak und Kohlendioxid.



Das auf der SCR-Oberfläche gelagerte Ammoniak steht für die SCR-Reaktionen zur Verfügung. Die optimale Betriebstemperatur für einen hohen Umsatz liegt zwischen 180° und 450°C. Es gibt drei Hauptreaktionen, die im SCR überwiegend abläuft. Die Reaktionen werden unter „Schnell SCR“, „Standard SCR“ und „Langsam SCR“ bezeichnet. Je nach Temperatur, NO₂/NO_x-Verhältnis und verfügbare Sauerstoffkonzentration findet die entsprechende Reaktion größtenteils statt.

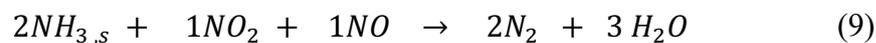
- Standard SCR

Die adsorbierte NH₃ mit Sauerstoff wandelt bei der Betriebstemperatur zwischen 200 und 350°C das NO zu N₂ um. Je nachdem Sauerstoffgehalt im Abgas enthält, verändert sich die SCR-Reaktionsrate und führt zu einem Umsatzlimit. Nach dem Prinzip des Dieselmotors wird der Motor mit Luftüberschuss getrieben.



- Schnell SCR

Um ein Mol NO und ein Mol NO₂ zu N₂ umzuwandeln, sind 2 Mol NH₃ nach der Stöchiometrie benötigt. Die ideale Betriebstemperatur für die schnelle-SCR-Reaktion liegt zwischen 180°C - 300°C. Dabei trägt das äquimolare Verhältnis zwischen Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid eine bestimmte Bedeutung.

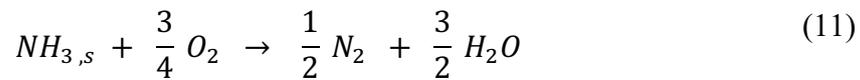


- Langsam SCR

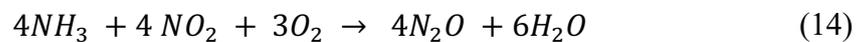
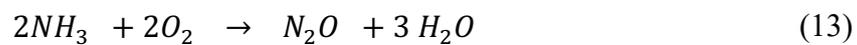
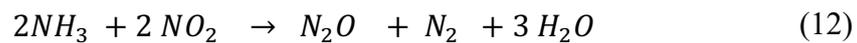
Beim Auftreten des erhöhten NO₂-Anteiles findet die Langsame-SCR-Reaktion überwiegend statt. Die Stöchiometrie zwischen Stickstoffdioxid und Ammoniak entspricht $\frac{3}{4}$ und zeigt, dass mehr NH₃ verbraucht wird, um das molekulare Stickstoff und Wasser zu bilden. Wenn die Umwandlung vorwiegend über die Langsam-SCR-Reaktion abläuft, führt es zu einem steigenden Reduktionsmittelkonsum. Im Temperaturbereich unter 200°C befindet sich der Umsatz kaum und wegen des hohen NO₂-Anteiles tritt die Einspeicherungseffekte auf, deren Produkte Ammoniumnitrit- und Ammoniumnitratbildung sind [S.Käfer, 2004, S24].



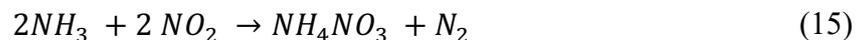
Bei Temperaturen ab 350°C und aufwärts nimmt Oxidation von NH₃ zu, in der das adsorbierte NH₃ unerwünscht mit vorhandenem Sauerstoff oxidiert wird. Der NH₃-Füllstand wird dabei abgebaut und das verfügbare Ammoniak wird stark reduziert. Der Auftritt der Oxidation führt sowohl zu einem Mehrverbrauch, sondern auch die unerwünschten Nebenprodukte wie N₂O und NO.



Parallel dazu laufen die ungewollten Nebenreaktionen in geringerem Ausmaß ab, die N₂O-Atome bilden, welche die Katalysatorselektivität verringern. Es entsteht am häufigsten bei Hochlastfahrt. Die beispielhaften chemischen Reaktionen werden wie folgt dargestellt [C.Walz, 2000, S16].



Es tauchen auch unerwünschte Reaktionen auf, wenn die Temperatur niedriger als 200°C ist. In dem Fall kommt es zur Bildung des Ammoniumnitrats (NH₄NO₃). Es führt zu dem Problem, dass Ammoniumnitrat kristallisiert und sich in den Poren festsetzt. Daraus folgt, dass die Katalysatorwirkung vermindert wird. Ein paar Beispiel für die entsprechende chemische Gleichungen werden wie folgt genannt [C.Walz, 2000, S115 S116].



* Thermische Alterung

Die Effizienz des Katalysators wird durch zwei maßgebliche Effekte beeinflusst. Die thermische Alterung erfolgt durch hohe Abgastemperaturen von mehr als 500°C. Der Washcoat und die Zeolithe werden beschädigt durch die erhöhte irreversible Sinterung der Metallpartikel, da die Metalle unter die Bedingung zu Metalloxiden oxidieren. Bei hoher Temperatur wird die Struktur auch vom Washcoat stark geändert, wodurch die spezifische Oberfläche verkleinert wird. Dabei kommt es vor, dass die Zentren teilweise unzugänglich werden. [LAT, 2017]. Unter dem hohen Temperaturniveau kann die Zeolith-Struktur bis zu 770°C stabil bleiben. Ab Temperaturen von 860°C bricht die Struktur zusammen. [Y.Cheng et.al, 2008]

* Chemische Alterung

Bei chemischer Alterung findet eine Vergiftung statt, bei der die Fremdatome herabgesetzt werden. Es besteht die Möglichkeit, dass sich die Stoffe auf der Oberfläche ablagern und den Washcoat verschmutzen. Die Metallatome werden durch die chemischen Verbindungen vergiftet z.B. Schwefel. Schwefel bildet sich die starke Bindung und (Fe, Cu)/Zeolith reagieren sehr empfindlich auf die Schwefelvergiftung. Die Schwefel-Vergiftung verteilt sich entlang der ganzen Länge des Katalysators. Dabei reduziert die aktiven Zentren und die Umwandlungskapazität des Katalysators. [LAT, 2017]

Ein weiterer Faktor ist Phosphor. Dieser reagiert mit dem Katalysator-Washcoat und bildet Aluminiumphosphate (AlPO₄), welche in den obersten Schichten des Trägermaterials kumuliert ablagert. Dadurch wird die Katalysatoroberfläche vergiftet und die Aktivität eines SCR-Katalysators auf Zeolithe wird deswegen verringert. Außerdem behindern Phosphate den Zugang zu den aktiven Zentren, die zum

Umwandlungsvorgang von NO zu NO₂ verantwortlich sind. [A.Väliheikki, 2016]

Die folgende Abbildung erläutert bildlich die beiden Effekte.

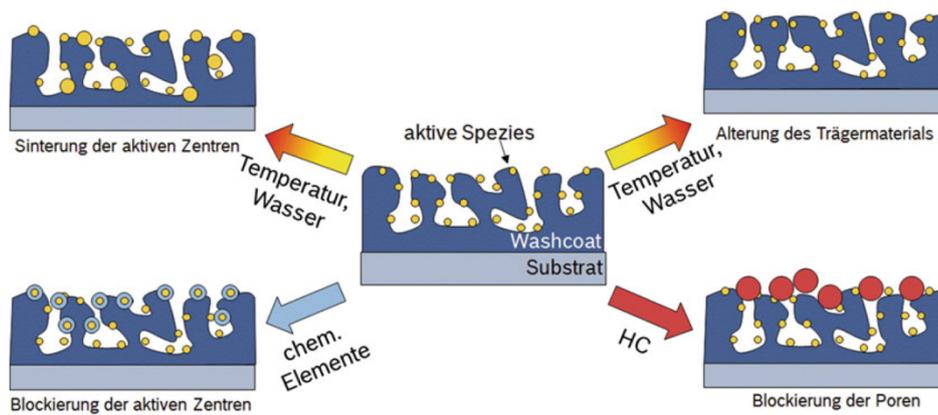


Abbildung 9: Alterungseinflüsse des Katalysators [Tchöke.H et.al.,2018, S909]

4.2.2 SCR-Beschichtung auf Dieselpartikelfilter

Nicht nur die gasförmigen Emissionen gibt es im Abgas, sondern auch die feste Körper wie Rußpartikel. Der Anteil des im Abgas entstehenden Ruß muss filtriert werden. Da kommt der SDPF zum Einsatz, der mehrere Filterkanäle aufweist. Im Gegenteil zu den Kanälen in SCR, die das Abgas durchfließt, sind sie wechselseitig geschlossen. Es folgt, dass das einströmende rußbeladene Abgas zwangsläufig durch die porösen Filterwände durchgehen muss. Die Wände arbeiten wie ein Sieb nach dem Prinzip einer Tiefenfiltration oder Oberflächenfiltration.

Der Rußschicht wächst im Laufe der Zeit und bildet auf der Wand einen Filterkuchen. Wenn die Beladungskapazität des Filters erreicht ist, kann die Filterwand kein Ruß mehr aufnehmen. Dadurch erhöht sich der Abgasgedruck, was die Motorleistung beeinflusst wird. In diesem Fall ist eine Regeneration des Filters nötig, wo der angesammelte Ruß abgebrannt wird [Tchöke.H et.al, 2018, S911].

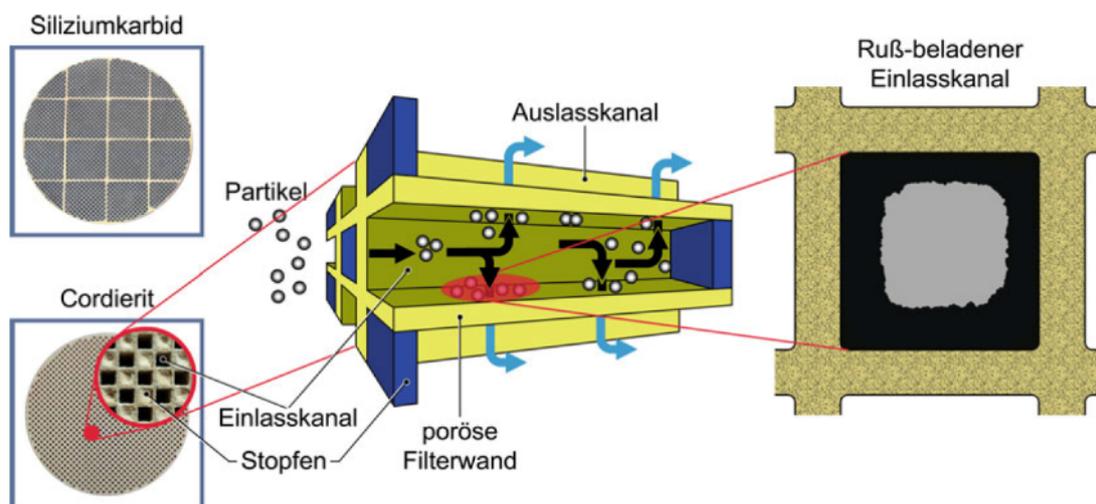


Abbildung 10: Das Arbeitsprinzip und der schematische Aufbau eines Partikelfilters [Tchöke.H et.al, 2018, S911]

Regeneration

Normalerweise muss der SDPF je nach der Auslegung des ANBs nach 300 bis 1000km regeneriert werden. Es gibt mehrere Regenerationsmethoden, die in zwei Hauptgruppe (ein passives System und ein aktives System) klassifiziert werden können.

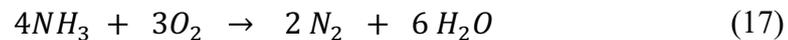
Beim passiven Verfahren wird die Additive zusätzlich eingebracht, um die Zündtemperatur des Rußes zu senken, damit eine automatische Regeneration im Normalbetrieb ermöglicht ist. Die Möglichkeiten, die

in dem passiven Verfahren zugeordnet werden, sind Additiv-unterstützte Regeneration, Regeneration mit NO₂ und Regeneration mit katalytisch beschichtete Dieselpartikelfilter. [Tchöke.H et.al, 2018]

Beim aktiven Verfahren muss der Ruß bei Temperatur zwischen 600°C bis 800°C abgebrannt werden und wird komplett zu Kohlendioxid umgewandelt. Das wird als Nicht-katalysierte (thermische) Oxidation bezeichnet. Dieser Temperaturbereich kann nicht allein von einem Normalbetrieb erreicht werden. Deshalb muss die Temperatur über eine externe Quelle beeinflusst werden. Sehr häufig wird die DPF-Temperatur künstlich mithilfe einer Nacheinspritzung des Kraftstoffs erhöht. [W.A.Majewski 2015]

4.2.3 Ammoniak-Schlupf-Katalysator

Neben allen schädlichen Emissionen ist die NH₃-Emission unerwünscht. Die überschüssigen NH₃-Mengen kommen aus mehreren Gründen wie zum Beispiel aufgrund des überstöchiometrischen Verhältnisses von NH₃ zu NO_x, die Überdosierung des AdBlue oder wegen des aggressiven Fahrverhalten. Das Ammoniak ist gesundheitsschädlich ab einer bestimmten Grenze, deshalb muss die Ammoniak-Schlupfmenge vor dem Ausstoß eliminiert werden. Direkt nach dem SCR wird ein Ammoniak-Schlupf-Katalysator nachgeschaltet, in dem das NH₃ vollständig oxidiert und zu elementaren N₂, NO, N₂O und NO₂ je nach Bedingungen, Temperatur und Konzentration der jeweiligen Gase umgesetzt wird.



Außerdem entstehen die unerwünschten Nebenreaktionen wie folgt.

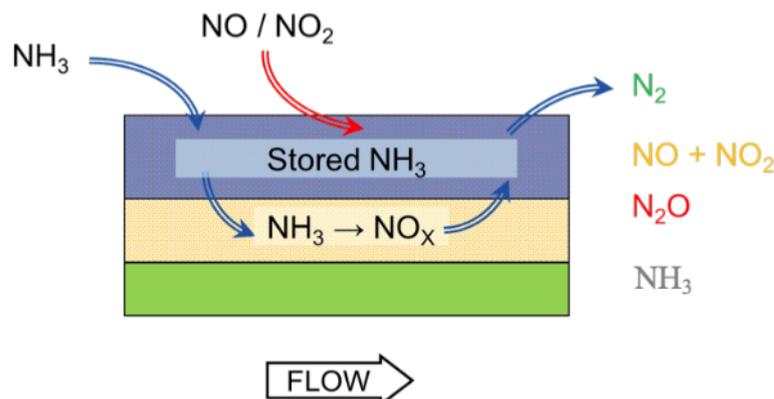
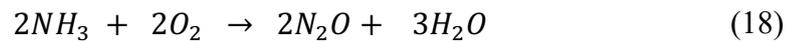


Abbildung 11: Das Funktionsprinzip eines ASC [E.Gil, 2013]

In dem Temperaturbereich zwischen 250°C und 300°C findet die Reaktion zu N₂O überwiegend statt. Um die neu entstandene NO zu beseitigen, wird ein SCR-Beschichtung auf der DOC- Beschichtung übergezogen. Mithilfe der Aufbringung wird der überschussige NH₃ auf der Oberfläche eingelagert und das adsorbierte Ammoniak wandelt wie die SCR-Reaktionen das NO um [E.Langens, 2019].

Die physikalische Geometrie des ASC hat ein Monolith Volume von 1,015L und die entsprechende Porosität von 58,352%.

5 IAV-modellbasierte Dosiersoftware

5.1 Die Regelung der Dosiersoftware

Um einen möglichst hohen Stickoxidumsatz zu erreichen, müssen die NH_3 -Füllstände im Katalysator genau eingeregelt werden. Zur Regelung dieser Füllstände stehen hier 2 AdBlue-Dosierventile zur Verfügung welche mithilfe einer bei IAV entwickelten Software, die auf physikalischen Modellen der SCR-Katalysatoren basiert, betrieben werden.

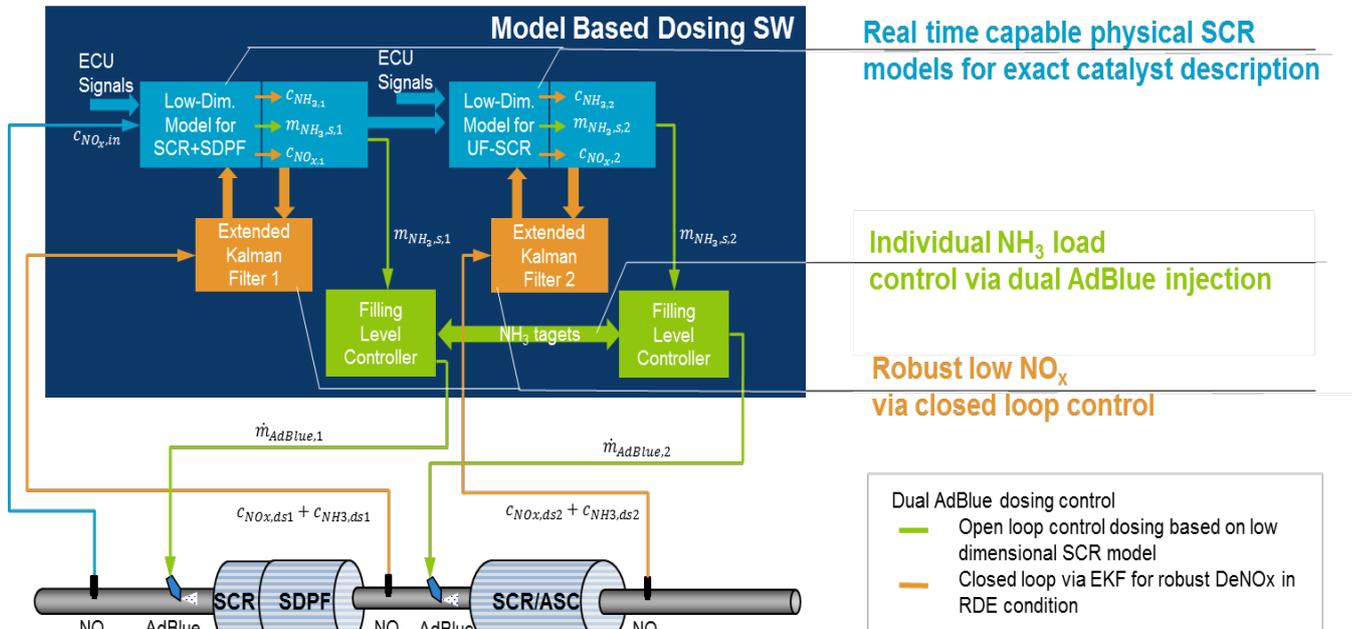


Abbildung 12: Schema der Regelung in der Dosiersoftware [IAV-Intern]

Die Emissionen aus dem realen Fahrzeug sowie der Massenstrom und die Temperaturen in mehreren Stellen werden gemessen. Die NO_x -Sensoren sind vor und hinter dem jeweiligem Katalysator verbaut und messen die NO_x -Konzentration im Abgas. Der NO_x -Sensor vor SCR misst die Eintrittskonzentration in die erste Komponente, die für Vorsteuerung und auch NH_3 -Bilanzierung genutzt wird. Der NO_x -Sensor nach SDPF misst die NO_x -Konzentration am Austritt der ersten Komponente. Zusätzlich dazu ist ein Temperatursensor sowie ein AdBlueinjektor verbaut. Die Information der Temperatur gibt an, wann das System dosieren darf.

Auf Basis dieser Sensorwerte vor den SCR-Katalysatoren und zusätzlichen Signalen wie dem Abgasmassenstrom oder der NO_2/NO_x Rate werden mit Hilfe von niederdimensionalen Modellen die Ausgangsemissionen (NO , NO_2 , NH_3) sowie der NH_3 -Füllstand berechnet. Eine Soll-Füllstandslinie wird in der Dosiersoftware implementiert. Der berechnete Füllstand wird mit dem Soll-Füllstand verglichen. Ist der Ist-Zustand über Soll-Zustand, wird kein AdBlue mehr eindosiert. Die Differenz zwischen Ist und Sollzustand wird verwendet, um den AdBlue-Dosierbedarf zu berechnen.

Aus der Vorsteuerung und dem Regler setzt sich die AdBlue-Anforderung zusammen. Im Regelkreis berechnet der PI-Regler aus der Regelabweichung, die die Differenz zwischen Soll- und Ist-Zustand ist, die AdBlue-Menge. Eine umsatzbasierte Vorsteuerung wird in der Dosierstrategie verwendet und dient dazu, dass der Regler entlastet wird. Der Grund dafür ist, der Regler muss dadurch sich weniger um Regelabweichungen kümmern.

Um gewährt zu leisten, dass das NDM nicht weit entfernt von dem realen Verhalten ist, wird der Kalman-Filter in der Software vorgesehen. Die NO_x -Werte an dem ausgangseitigen SDPF und ASC werden von den NO_x -Sensoren gemessen. Gleichzeitig berechnen die niederdimensionalen Modelle auf dem

Steuergerät die NO_x-Sensorwerte. Die Funktion des EKF ist, kontinuierlich mit den Messinformationen und den Ergebnissen von NDM abzugleichen. Der EKF erkennt die Abweichungen und korrigiert mithilfe der Abweichung zwischen dem Messwert und modellierten Wert den Ist-Zustand. Aus der Information des korrigierten Ist-Zustands wird die Dosiermenge bzw. NH₃-Konzentration berechnet, die an die Eingangsdaten einfließt. Daher wird der Regelkreis geschlossen.

Das reale Verhalten des Katalysators wird mit dem hochdimensionalen Axisuite-Modell simuliert und dient als Referenzdaten zum Analysieren und Gegenüberstellen verwendet.

5.2 Das niederdimensionale Modell

Um die Ausgangskonzentration von NO, NO₂, NH₃ des im PKW verbauten SCR-Katalysator abzubilden, ist ein Modell des SCR-Katalysators abgebildet. Die angenommene Vorgehensweise der im SCR enthaltenen Reaktionen sind vereinfacht und der Katalysator ist als ideal durchmischter Reaktor modelliert.

5.2.1 Komponentenmodell

Die Modellierung findet nach dem Prinzip eines ideal durchmischten Reaktors statt, wodurch die Annahme getroffen wird, dass es einen Konzentrationssprung gibt und die Ausgangskonzentration der Innenkonzentration entspricht.

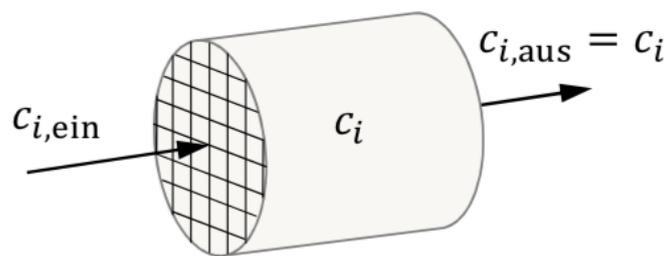


Abbildung 13: Das SCR-Modell nach dem Arbeitsprinzip eines idealdurchgemischten Reaktors

Die Konzentration beim Austritt des Reaktors wird mit folgender Formel beschrieben [ChemP].

$$\dot{V}_o \cdot c_{i,o} - \dot{V}_{aus} \cdot c_i + V \cdot R_i = 0 \quad \text{mit:} \quad R_i = \sum_j \vartheta_{ij} r_j \quad (20)$$

Daraus erweitert sich auf die Stoffbilanz einer Gasspezies i

$$\frac{dc_i}{dt} = \dot{c}_i = v_s \cdot (c_{i,in} - c_i) + \sum_{j=1}^{N_R} v_{j,i} \cdot \dot{r}_j \quad (21)$$

Die Formel beschreibt die allgemeine Formel der kontinuierlichen, idealen Durchmischung. In der Tabelle 2 werden die Symbole von Formel erklärt und beschrieben.

Tabelle 2: Beschreibung der Symbole in Stoffbilanzgleichung

Symbol	Beschreibung	Einheit
\dot{V}_o	Zufließender Volumenstrom	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$c_{i,o}$	Eingangskonzentration der Komponenten i	mol m^{-3}
\dot{V}_{aus}	Abfließender Volumenstrom	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
c_i	Konzentration der Komponente i im Reaktor und im abfließenden Strom	mol m^{-3}
V	Reaktionsvolumen	m^3
R_i	Stoffmengenänderungsgeschwindigkeit der Komponente i	$\text{mol m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
ϑ_{ij}	Stöchiometrischer Faktor der Komponente i in der Reaktion	-
r_j	Reaktionsgeschwindigkeit der Reaktion	$\text{mol m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Die Ausgangskonzentrationen sind abhängig von mehreren Aspekten, wie dem zugeführten Volumenstrom und den einzelnen Eingangskonzentration von verschiedenen Schadstoffspezien. Das Volumen, die Porosität und das Leerraumverhältnis wirken auf die in dem Reaktor bestehende Verweilzeit. Es wird auch angenommen, dass die Strömungswiderstände kein Einfluß auf den Volumenstrom haben.

5.2.2 Reaktionsraten

0. Die heterogene Katalyse

Die in der chemischen Reaktion verbrauchte Substanz und der Katalysator sind in unterschiedlichen Aggregatzuständen. Um die Reaktionen überhaupt zu ermöglichen, ist es wichtig, dass die Edukte in Kontakt mit der Katalysatoroberfläche haben und zu den aktiven Zentren des Katalysators gelangen.

Der erste Schritt wird sogenannte äußerer Stofftransport genannt, wo die Edukte durch die Grenzschicht zur Katalysatoroberfläche diffundieren. Nach dem die Edukte in die Filmdiffusionsschicht durchkommen, kommt die Diffusion der Edukte in die Poren vor. Die Reaktante adsorbiert an der inneren Oberfläche der Poren. Nach der Reaktionskinetik findet die chemische Reaktion statt und ergibt sich die Produkte, die von der Oberfläche des Katalysators desorbiert. Die Produkte diffundieren aus dem Poreninneren nach außen. Danach verlassen die Produkte den Katalysator durch die Grenzschicht und fließen in die Gasstromrichtung weiter.

In der Abbildung 14 sind die unterschiedlichen Energiezustände aufgetragen. Das Diagramm erläutert den großen Unterschied zwischen den Aktivierungsenergien der homogen, nicht katalysierten und der heterogen, katalysierten Gasreaktion. Um die Reaktionen stattfinden zu können, muss eine Mindestenergie zugeführt werden sollen. Die Energiebarriere wird als Aktivierungsenergie bezeichnet.

Es wird gezeigt, dass mithilfe des Katalysators die benötigte Energie um den Betrag von $E_{a,0} - E_{a,1}$ verringert wird. Es hilft dabei, die NO_x konvertierte Reaktionen trotz der niedrigen Temperatur zu erfolgen. [J. Hagen]

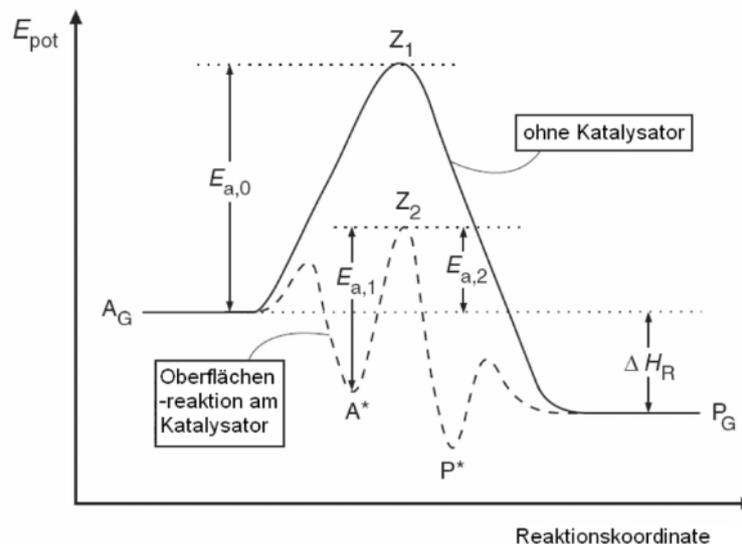


Abbildung 14: Die unterschiedliche Energieniveau der Reaktion mit und ohne Katalysator

[K.Hoppe, 2009]

Tabelle 3: Beschreibung der Symbole in der Abbildung 14

Symbol	Beschreibung	Einheit
$E_{a,0}$	Aktivierungsenergie der homogenen, nicht katalysierten Gasreaktion	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$E_{a,1}$	wahre Aktivierungsenergie	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$

Symbol	Beschreibung	Einheit
$E_{a,2}$	scheinbare Aktivierungsenergie der katalysierten Reaktion	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Z_1	Übergangszustand der Gasphasenreaktion	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
Z_2	Übergangszustand der Oberflächenreaktion	m^3
ΔH_R	Reaktionsenthalpie	$\text{mol} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

1. NH₃-Adsorption

Für die Reaktionskinetik der Adsorption und Desorption wird der Eley-Rideal- Mechanismus angenommen. Es geht davon aus, dass das Gas A auf der Katalysatoroberfläche adsorbiert wird und an gleichen aktiven Zentren mit dem Gas B reagiert. Das Produkt C aus den Edukten A und B wird am Ende desorbiert. Das Modell nimmt an, dass das adsorbierte NH₃-Gas an dem Umwandlungsprozess von NO_x teilnimmt. Der Adsorptionsprozess wird in der untenstehenden Gleichung dargestellt. S wird als ein freies aktives Zentrum bezeichnet.



$$\dot{r}_{ads} = k_{0,ads} e^{\left(\frac{-E_{ads}}{RT}\right)} \cdot C_{\text{NH}_3} \cdot RT^\psi \cdot (1 - \theta) \quad (23)$$

$$\text{mit } \theta = C_{\text{NH}_3} \cdot \frac{V \in M_{\text{NH}_3}}{m_{\text{NH}_{3s,max}}(T)} \quad (24)$$

Um die Reaktionsgeschwindigkeit für Adsorption zu modellieren, wird die \dot{r}_{ads} - Reaktionsgeschwindigkeit mit der ausgangsseitigen Temperatur berechnet. Außerdem ist die Adsorptionsreaktion abhängig von θ . Die relative Beladung θ ist das Verhältnis der aktuellen Beladung des SCR zur maximalen Beladung. Die Maximalbeladung ist temperaturabhängig. Die maximalen Speicherkapazität stehen nicht immer zur Verfügung, weil der Adsorptionsprozess verhindert und von der thermischen, chemischen Alterung bewirkt wird. Der relative Füllstand Θ bewegt sich zwischen 0 und 1.

2. NH₃-Desorption

In dem Desorptionsvorgang verlässt das Gas die Oberfläche und die Desorption ist ein Umkehrvorgang der Adsorption. Weiterhin werden nur NH₃ in der Desorption berücksichtigt.



$$\dot{r}_{des} = k_{0,des} e^{\left(\frac{-E_{des}(1 - \Omega\theta)}{RT}\right)} \cdot \theta \quad (26)$$

Wenn die relative Beladung θ nahezu Null beträgt, bedeutet das, alle aktiven Zentren stehen noch zur Verfügung. Dadurch sinkt die \dot{r}_{des} - Reaktionsgeschwindigkeit der Desorption (siehe Gleichung 26) ab. Dies gilt auch im umgekehrten Fall. Die Speicherkapazität des Katalysators ist begrenzt und stark abhängig von der Temperatur. Bei hohen Temperaturen sinkt die Speicherkapazität und die Desorption von NH₃ nimmt zu. Wenn das NH₃ weiter eindosiert wird, besteht die Gefahr vom Durchbruch und NH₃ wird direkt an die Umgebung freigesetzt. Die Desorption wird nach dem Tempkin-Ansatz erweitert. Je größer die relative Beladung ist, desto größer wird die Desorptionsrate. Daraus folgt, dass die Aktivierungsenergie der Desorption anhand der relativen Beladung verändert wird. Um die Stärke der Senkung und Steigung der Aktivierungsenergie zu beschreiben, ist die Gleichung 26 abhängig von dem Tempkin-Parameter Ω . Der Wert von Ω variiert im Bereich zwischen 0 bis 1.

3. Reduktionsreaktionen

Nach der Arrhenius-Gleichung werden die Reaktionsraten wie folgt dargestellt. Im Gegensatz zu Sorptionsreaktionen werden die Reaktionsraten hingegen mit der mittleren Katalysatortemperatur berechnet. Die logarithmische Mitteltemperatur wird aus dem Verhältnis von der Differenz zwischen den Ein- und Ausgangstemperaturen und Logarithmus des Verhältnis von Eingangstemperatur zu Ausgangstemperatur (siehe Gleichung 27) berechnet, wenn die Differenz größer als 0,1 ist. Sollte es nicht der Fall sein, wird die Mitteltemperatur gleich der Eingangstemperatur gesetzt.

$$T_{log} = \frac{T_{ein} - T_{aus}}{\log\left(\frac{T_{ein}}{T_{aus}}\right)} \quad (27)$$

- Standard SCR

$$\dot{r}_{NO} = k_{0,NO} \cdot e\left(\frac{-E_{NO}}{RT}\right) \cdot C_{NH_{3,s}} \cdot C_{NO} \quad (28)$$

- Schnelle SCR

$$\dot{r}_{NO_x} = k_{0,NO_x} \cdot e\left(\frac{-E_{NO_x}}{RT}\right) \cdot C_{NH_{3,s}} \cdot C_{NO} \cdot C_{NO_x} \quad (29)$$

- Langsame SCR

$$\dot{r}_{NO_2} = k_{0,NO_2} \cdot e\left(\frac{-E_{NO_2}}{RT}\right) \cdot C_{NH_{3,s}} \cdot C_{NO_2} \quad (30)$$

4. Oxidation von $NH_{3,s}$

Die Oxidation des Reduktionsmittels wird bei der Modellierung betrachtet. Unter hohen Temperaturen findet der Abbau des NH_3 -Füllstands stark statt (siehe Gleichung 11). Die Gleichung 31 zeigt die Oxidationsreaktion mit der Auswirkung auf den Füllstand. Die Reaktionen von der Oxidation und Desorption sind für den NH_3 -Schlupf verantwortlich. [E.Langen, 2019].

$$\dot{r}_{Ox} = k_{0,Ox} \cdot e\left(\frac{-E_{Ox}}{RT}\right) \cdot C_{NH_{3,s}} \quad (31)$$

5. Zustandsraummodell

Nachdem die Reaktionsraten der jeden Abgasspezies wie oben genannt werden, können die zeitliche Änderung der Stoffkonzentrationen nach der Gleichung 21 modelliert werden. Daraus resultiert das folgende Differentialgleichungssystem. Mithilfe des Gleichungssystem können der Konzentrationsverlauf der betrachteten Abgase kontinuierlich berechnet werden.

$$\frac{dC_{NH_{3,s}}}{dt} = \dot{r}_{ads} - \dot{r}_{des} - \dot{r}_{NO} - \dot{r}_{NO_x} - \dot{r}_{NO_2} - \dot{r}_{Ox} \quad (32)$$

$$\frac{df_{inj}}{dt} = 0 \quad (33)$$

$$\frac{dC_{NH_3}}{dt} = 0 = v_s \cdot (f_{inj} \cdot C_{NH_{3,in}} - C_{NH_3}) - \dot{r}_{ads} + \dot{r}_{des} \quad (34)$$

$$\frac{dC_{NO}}{dt} = 0 = v_s \cdot (C_{NO,in} - C_{NO}) - \dot{r}_{NO} - 0.5 \cdot \dot{r}_{NO_x} \quad (35)$$

$$\frac{dC_{NO_2}}{dt} = 0 = v_s \cdot (C_{NO_2,in} - C_{NO_2}) - 0,75 \cdot \dot{r}_{NO_2} - 0,5 \cdot \dot{r}_{NO_x} \quad (36)$$

Die zeitliche Änderung der NH_3 -Konzentration ist die Differenz zwischen der Adsorptionsrate und den anderen Reduktionsraten. Der Adaptionparameter $finj$ handelt sich um eine dimensionslose Konstant. In der Gleichung 34 wird die dosierte NH_3 -Menge mit $finj$ multipliziert. Um die NH_3 -Menge in dem fehlerhaften Fall aufrecht zu halten, dient der Adaptionfaktor dazu zum Korrigieren. Je nach dem ob eine Unterdosierung oder Überdosierung bedingt durch ein fehlerhaften Sensor oder Aktuator vorliegt, wird der Faktor $finj$ entsprechend verringert oder verstärkt. Bei einem fehlerfreien System ist $finj$ nahezu 1 und dadurch wird die Dosiermenge nicht verändert. Das Analysieren der Fällen wird in Kapitel 8 weiter erläutert.

Durch dem numerischen Integrationsverfahren werden das Verhalten der betrachteten Reaktionen kalkuliert. Um das zu ermöglichen, ist ein hoher numerischer Rechenaufwand erforderlich. Der Füllstand des Katalysators verändert sich sehr langsam im Gegenteil zur Änderung der Gaskonzentration. Aus diesem Grund werden die Differentialgleichungen 34, 35, 36 gleich Null gesetzt, um den Rechenaufwand zu verringern. Von daher wird die Dynamik des Systems von der Gleichung 32 bestimmt. Die Konzentrationen von NH_3 , NO und NO_2 werden in Abhängigkeit der restlichen Variablen analytisch berechnet. [J.Schrader, 2019]

6 Simulative Methode für die Modellbedatung

6.1 Die Simulationsumgebung AxiSuite

Axisuite dient als Ersatz zur realen Strecke und ermöglicht so die bedatung via Simulation. Der hochdimensionale Axisuite-Modell wird in die Matlab/Simulink Simulationsumgebung verknüpft. Axisuite ist eine modular aufgebaute Software für die Simulation von Abgasnachbehandlungskomponenten und -systemen. Axisuite verwendet als Eingabe die Abgaszusammensetzung, Durchflussrate und Abgastemperatur sowie die Eigenschaften der Abgasvorrichtungen und modelliert die Wärmeübertragung, den Stofftransport und die Schadstoffminderung (Filtration und chemische Reaktionen). Axisuite besteht aus den folgenden Simulationsmodulen, die einzeln oder als Paket lizenziert werden können:

- Axitrap für Wandstrom -Partikelfilter
- Axicat für Durchflusskatalysatoren mit jeglicher Katalysatorbeschichtung
- Axifoam für Filter und Katalysatoren auf Schaum- oder Faserbasis mit jeder Art von katalytischer Beschichtung
- Axiheat zum Verbinden von Rohren

Mit Axisuite-Modellen können die dynamischen virtuellen Versuche durchgeführt werden. In der Abbildung 15 werden die Eingangsgrößen, die für die Simulation verwendet wird, dargestellt. Die Daten werden gerechnet und daraus ergeben sich die Ausgangsgrößen.

Die folgende Abbildung wird auf Basis von [K.Hoppe, 2009] erstellt, in der die schematische Zusammenfassung von einem Simulationsablauf der Axisuite dargestellt wird.

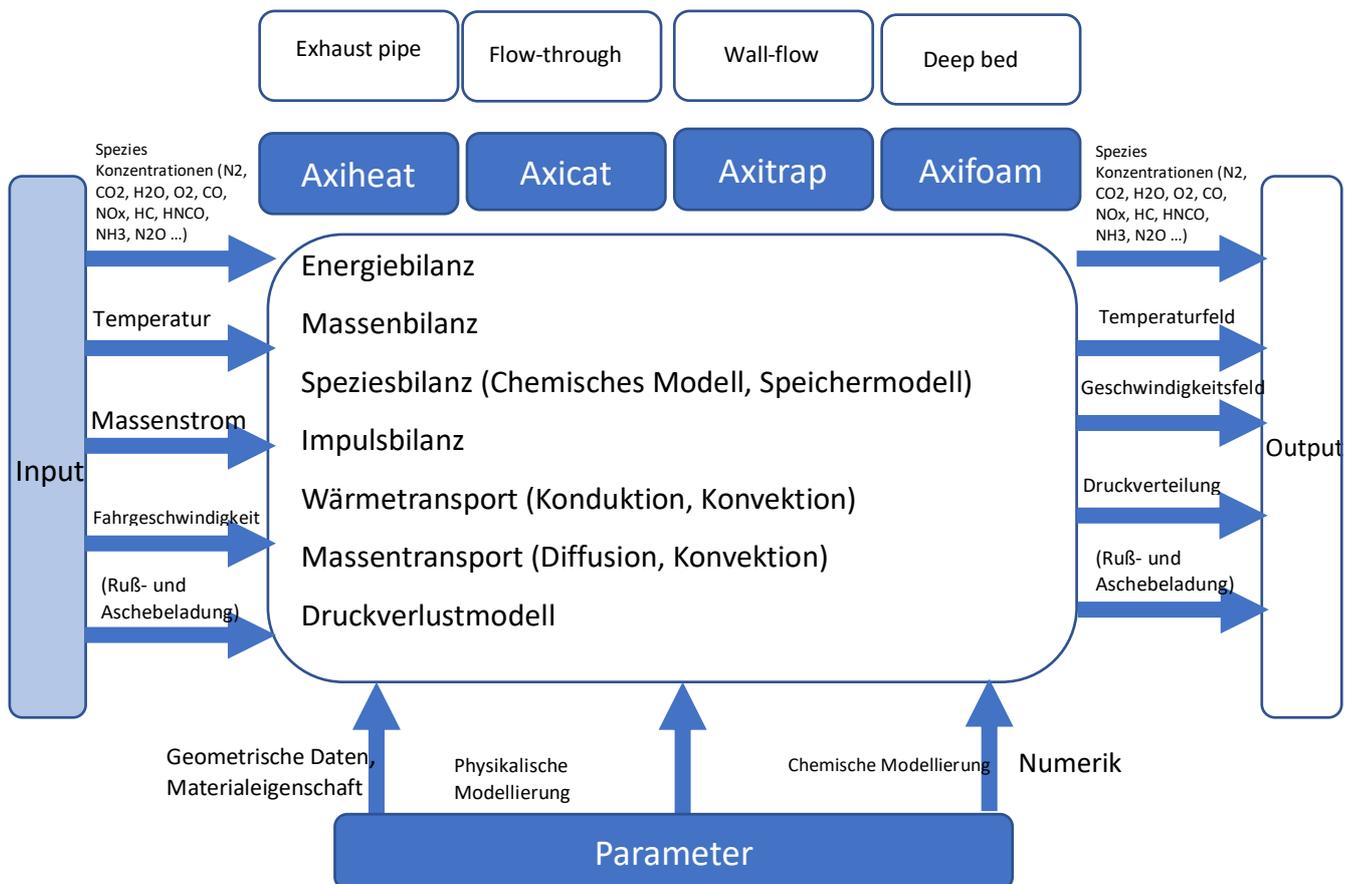


Abbildung 15: Die betrachteten Faktoren und Simulationsphasen in Axisuite

6.2 Optimierungsmethodik

Damit das im vorherigen Kapitel 5 beschriebene Modell die Emissionen ausreichend korrekt abbilden kann, ist die Anpassung der Kinetikparameter erforderlich. Wegen der eingeschränkten Rechenkapazität werden die sechs ausgesuchten Hauptreaktionen bedatet. Ihre entsprechenden Kinetikparameter sind jeweils die Aktivierungsenergie und der Stoßfaktor sowie die Parameter des Tempkin-Ansatzes. Alle diese Parameter werden optimiert, bis die Summe der Fehler das Minimum erreicht hat.

Die Parameter werden nach dem Prinzip von dem Simplex-Algorithmus von Nelder und Mead optimiert. Für den Optimierungsvorgang werden die Daten der SCR-stromauf- und stromab Konzentrationen verwendet. Die Daten können entweder aus einer realen Messung des betrachteten Fahrzeugs kommen oder mit dem Axisuite-Modell generiert werden. Das 0-dimensionale Modell wird dadurch antrainiert.

Die anzupassenden Parameter in der IAV-Software sind:

E_{Ads} , E_{Des} , E_{NO} , E_{NO_2} , E_{NO_x} , E_{Ox} , A_{Ads} , A_{Des} , A_{NO} , A_{NO_2} , A_{NO_x} , A_{Ox} , ω

Modelleingangsdaten bestehen aus: \dot{m}_{Abg} , T_{ein} , T_{aus} , $C_{NH_3,in}$, $C_{NO,in}$, $C_{NO_2,in}$

Die benötigte physikalische Parameter: V , ϵ , $m_{NH_3,max}$, δ , R , Molarmasse der Gasspezies

Der Optimierungsprozess beginnt mit einem Satz von Modellparametern, hier durch Par_0 dargestellt. Die Startparameter werden in obengenannten Fahrzyklen (Kapitel 3) eingesetzt und simuliert. Die berechneten Konzentrationen bei Eingang und Ausgang des nulldimensionalen SCR-Modells werden erfasst und mit den Bezugsdaten verglichen. Die hieraus ergebenden Abweichungen aus den Simulationsergebnissen und Referenzdaten wird berechnet. Die Fehlerfunktion, die die Summe der einzelnen Fehlergrößen beträgt, gibt an wie gut die angepassten Parameter in der bestimmten Iteration das Verhalten des Katalysator modelliert. Mithilfe der Fehlerfunktion kann der Optimierer vergleichen, ob der Parametersatz nach Iterationen verbessert wird. In jedem Iterationsschritt variiert der Optimierer die Parameter des SCR-Modells (Par_k) solange bis der $F_{ges,k}$ einen Minimalwert erreicht. [S.Song, 2018]

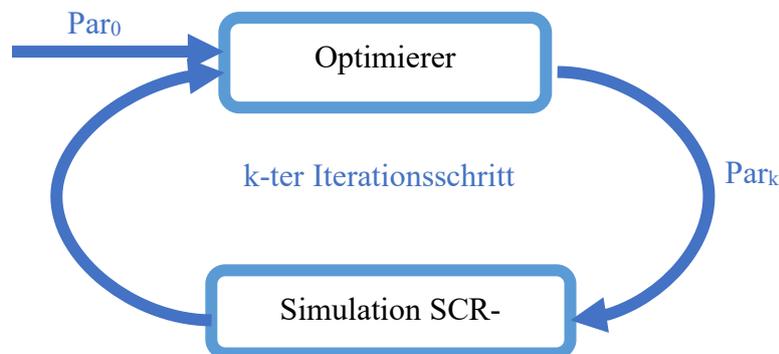


Abbildung 16: Der schematische Ablauf der Optimierung

Die Fehlerfunktion ist die Zusammensetzung der einzelnen Größen und lautet wie in der folgenden Gleichung:

$$F_{ges} = F_{NH_3} + F_{NO} + F_{NO_2} + F_{NH_3,s} + \sum_l F_{con,l} \quad (37)$$

$$F_i = W_j \cdot \int_{t_{0,j}}^{t_{end,j}} \left(C_{i,j,NDM}(t) - C_{i,j,ref}(t) \right)^2 \cdot dt \quad (38)$$

F_i in der Gleichung 37 ist eine Fehlerfunktion, wobei der Index i die jeweilige Gasspezies darstellt. F_i wird aus der Differenz der jeweiligen berechneten NDM-Konzentration und der Axisuite-Konzentration und die Gewichtung W_j berechnet. Das Signal $c_i(t)$ in der Gleichung 38 beschreibt die Austrittskonzentration des nulldimensionalen SCR-Modells der Gasspezies i . Die Größe $c_i(t)$ stellt den berechneten Konzentrationsverlauf der Komponente i sowie $C_{i,ref}(t)$ den Verlauf der entsprechenden Referenzkonzentration, die von Axisuite erzeugt werden, dar. In der Gleichung 38 wird die Methode der kleinsten Quadrate verwendet und die Differenzen in dem gesamten Ablauf quadriert. Außerdem taucht die Größe W_j in Gleichung 38 auf.

$$W_j = \frac{1}{(t_{end,j} - t_{0,j}) \cdot C_{i,j,max,ref}^2} \quad (39)$$

W_j stellt die Wichtungsfunktion der Komponente i in dem Zyklus j dar. In der Wichtungsfunktion (siehe Gleichung 39) ist zum einen die Zeitspanne des jeweils simulierten Zyklus im Nenner enthalten. Somit wird das Fehlerintegral zeitlich normiert, damit Modellfehler von jedem Zyklus gleich gewichtet sind, egal wie lang dieser andauert. Entscheidend ist vor allem die quadratische Maximalkonzentration im Nenner der Fehlerfunktion. Diese stellt das Quadrat des Maximalwerts der jeweiligen Konzentration in den Referenz-Ausgangsdaten dar, auf welche das SCR-Modell angepasst werden soll. Mit der Division durch diesen Wert, wird sichergestellt, dass jede Größe in ähnlicher Größenordnung in die Fehlerfunktion eingeht.

$F_{con,l}$ in Gleichung 38 wird als die Strafwerte addiert, wenn die Parameter bei der Optimierung die Gültigkeit nicht einhalten wie zum Beispiel: Jeder einzelne Parameter muss größer gleich Null sein oder der Tempkinparameter muss kleiner als Eins sein. Dabei hat der Strafwert einen Wert von $10E8$. Dadurch wird der Wert der Gesamtfehlerfunktion viel größer. Der Optimierer wird die Fehler erkennen.

$$F_{con,l} = \begin{cases} 0 & \text{wenn } \forall Par_i \geq 0 \cap \Omega \in [0,1] \\ 10^8 & \text{wenn } \exists Par_i < 0 \cup \Omega < 0 \cup \Omega > 1 \end{cases} \quad (40)$$

Damit die Parameter für eine zufriedenstellende Darstellung des Katalysatorverhaltens herausgefunden werden, laufen die Optimierungen mit unterschiedlichem Fokus ab. Nach jedem Optimierungsschritt werden verschiedene Parameter und eine Gesamtfehlerfunktion ermittelt. Der erste Schritt ist die Optimierung der NO_x-Reaktionen. Ihre entsprechenden Parameter sind für die im nulldimensionalen SCR-Modell abgebildeten chemischen Reduktionsreaktionen (standard, schnell, langsam SCR) zuständig. Als Grundlage wird der NH₃-Beladungszustand von Axisuite verwendet.

1.Schritt: Optimierung der Reduktionsreaktionen

Anzupassende Parameter: A_{NO} , E_{NO} , A_{NO_2} , E_{NO_2} , A_{NO_x} , E_{NO_x}

Verwendung von axisuite-Daten: $NH_{3,s}$

$$\text{Gesamtfehlerfunktion: } F_{ges} = F_{NO} + F_{NO_2} + F_{NO_x} + \sum F_{con,l} \quad (41)$$

Nachdem die Reduktionsparameter angepasst wurden, ist der nächste Schritt die Optimierung der Speicherfähigkeit, bei welcher die Werte der gesuchten Parameter auf den Endergebnissen des vorherigen Schritts (NO und NO₂ Axisuite-Daten) basieren.

2.Schritt: Optimierung der Speicherfähigkeit

Anzupassende Parameter: A_{des} , E_{des} , Ω

Verwendung von axisuite-Daten: $NH_{3,s}$, NO_2 , NO

$$\text{Gesamtfehlerfunktion: } F_{ges} = F_{NH_3} + \sum F_{con,l} \quad (42)$$

3.Schritt: Optimierung der Oxidationsreaktion

Anzupassende Parameter: A_{ox}, E_{ox}

$$\text{Gesamtfehlerfunktion: } F_{ges} = F_{NH_3,s} + \sum F_{con,l} \quad (43)$$

Am Ende werden alle Parameter der vorherigen Schritte als Startwert verwendet und dann gleichzeitig optimiert.

4.Schritt: Optimierung aller Reaktionen

Anzupassende Parameter: $A_{des}, E_{des}, \Omega, A_{NO}, E_{NO}, A_{NOx}, E_{NOx}, A_{NOx}, E_{NOx}, A_{NO_2}, A_{ox}, E_{ox}$

$$\text{Gesamtfehlerfunktion: } F_{ges} = F_{NH_3,s} + F_{NO} + F_{NO_2} + F_{NH_3} + \sum F_{con,l} \quad (44)$$

Es könnten direkt alle Parameter auf einmal optimiert werden. Es ist jedoch ineffektiv, die Parameter nach manchen Fällen anzupassen, da sie dann nicht mehr gültig für andere Betriebsbereiche sind. Ein weiterer Nachteil ist, dass die einzelnen Fehlerfunktionen unterschiedlich gewichtet sind. Als Startwerte wird der Parametersatz von dem vorherigen Projekt für die Optimierung eingesetzt. Diese Voroptimierung dient dabei, die Parameter auf dem richtigen Wertbereich zu optimieren und gleichzeitig mit guten Werten zu initialisieren. Außerdem kann der Prozess dadurch beschleunigt werden.

6.3 Kalibrierung und Validierung des 0-dimensionalen Modells

In diesem Kapitel werden die Kalibrierung und Validierung des nulldimensionalen Modells erläutert. Die Trainingsdaten werden mit Axisuite in unterschiedlichen Beladungszuständen generiert. Um das Modell zu kalibrieren wird das Modell mittels des Optimierers bedatet. Zum Schluss wird die Modellgenauigkeit überprüft, indem die modellierten Emissionen des NDM mit Axisuite verglichen werden.

Die reale Emission nach LNT sowie Fahrzeuggeschwindigkeit, Umgebungstemperatur, Druck gehen als Inputdaten in das hochdimensionale Modell-Axisuite ein. Danach werden die Referenzdaten zur Optimierung in Rahmen meiner Arbeit unter diversen Fahrbedingung durch Simulation generiert.

Nach Initialisierung eines leeren SCR-Katalysators ist die räumliche Verteilung des adsorbierten Ammoniaks sehr unregelmäßig. Das Ammoniak absorbiert überwiegend in dem vorderen Teil des frischen Katalysators und kann beim Niederlastzyklus erst nach mehreren Fahrzyklen gut über die Katalysatorlänge verteilt werden. Bei hohen Temperaturen wie im BAB schlupft das NH_3 hingegen in einem Zyklus in den SCR.

Das hochdimensionale Modell-Axisuite kann akkurat die Diffusionsbewegung des adsorbierten Ammoniaks im Katalysator simulieren. Hingegen kann das nulldimensionale Modell dies jedoch nicht. Da es nach dem Prinzip eines idealen durchgemischten Reaktors arbeitet und das Vermischungsverhalten nicht betrachtet wird. Deshalb wird die Parameteranpassung des jeweiligen Optimierungsschrittes immer an das Katalysatorverhalten des zweiten Zyklus angepasst. Es ist in den Optimierungsergebnissen zu erkennen, dass die Zyklen immer mit einem initial beladenen Katalysator simuliert werden.

Um die gesamte Betriebsbreite von dem Katalysator abzudecken, werden die Referenzdaten für verschiedene NH_3 -Sollbeladungen simuliert. Für Axisuite-Simulationen wurden vier Zyklustypen und drei Betriebssollwerte für die NH_3 -Beladung ausgewählt. Die unterschiedlichen NH_3 -Beladungen führen zu verschiedenen AdBlue-Dosiermengen und NH_3 -Schlupfprofile. Die Abgastemperatur wirkt sich sehr stark auf die NH_3 -Speicherfähigkeit aus. Deshalb werden verschiedene Fahrprofile von Niedriglast- bis Hochlastzyklen für die Optimierung genutzt. Ziel ist es, ein System mit niedriger, mittlerer und hoher NH_3 -Beladung zu simulieren, damit das Modell unter all diesen geeigneten Füllstände bedatet werden kann. Die maximale NH_3 -Speicherkapazität liegt bei circa 5g bis 7g je nach Volumina des Katalysators. Jedoch betragen die Sollbeladung von den vorderen Komponenten normalerweise beim Betrieb zwischen 1g und 2g. Die Sollwerte für die vordere Komponenten SCR und SDPF wurden wie folgt ausgewählt:

Niedriger NH_3 -Beladungszustand: $m_{\text{NH}_3,\text{soll}} = 1 \text{ g}$

Mittlerer NH_3 -Beladungszustand: $m_{\text{NH}_3,\text{soll}} = 1,5 \text{ g}$

Hoher NH_3 -Beladungszustand: $m_{\text{NH}_3,\text{soll}} = 2 \text{ g}$

Zur Generierung der Zyklen für die Optimierung der Modells für SCR/ASC wird nur über den 2.Injektor dosiert. Bei der Erstellung der Referenzdaten werden die Zyklen mit der ausgeschalteten 1.Dosierstelle simuliert. Das heißt es findet keine NO_x -Umwandlung im ersten Katalysator statt. Es gibt deswegen kein NH_3 -Schlupf nach SCRF, die unerwünscht in den 2.Katalysator geht und irrelevant für die Parameteroptimierung ist.

Für den Unterbodenkatalysator werden die Sollbeladungen niedriger gewählt. Üblicherweise liegt der Füllstand zwischen 0,25g und 1g. Der Grund dafür ist, dass Schadstoffe, die den SCR verlassen, direkt in die Umgebung geleitet werden. Daher sollte der SCR-Füllstand so nahe wie möglich am Optimum gehalten werden, damit NO_x und NH_3 am Endrohr minimal sind.

Niedriger NH_3 -Beladungszustand: $m_{\text{NH}_3,\text{soll}} = 0,25 \text{ g}$

Mittlerer NH_3 -Beladungszustand: $m_{\text{NH}_3,\text{soll}} = 0,5 \text{ g}$

Hoher NH_3 -Beladungszustand: $m_{\text{NH}_3,\text{soll}} = 1 \text{ g}$

6.4 Modellierungsansätze und Optimierungsergebnisse

6.4.1 Modellierungsansätze

1. Die vorderen Komponenten

Für SCR1 und SDPF werden zwei verschiedene Ansätze zur Erstellung eines passenden SCR-Modells untersucht.

In dem ersten Ansatz wird das reale Abgasnachbehandlungssystem vereinfacht. Die beiden Katalysatoren SCR1 und SDPF werden als eine Komponente betrachtet. Das bedeutet, dass es für beide Komponenten nur ein NDM-SCR-Modell berücksichtigt wird. Ihre kombinierte Funktionalität wird an ein gemeinsames Modell optimiert und bedatet.

Der überwiegende Vorteil dieser Vereinfachung ist für die Dosiersoftware. Aufgrund der Vereinfachung wird weniger Rechenleistung benötigt. Ein weiterer Pluspunkt liegt bei dem messtechnischen Prozess des Fahrzeuges. Um die Modelle auf Basis von Fahrzeugmessungen zu kalibrieren, sind Emissionen vor und der Komponente zu messen. Die dafür erforderliche Zusatzmesstechnik an Abgasrolle kann einfach vor und nach SCR1/SCR2 verbaut werden.

Darüber hinaus gibt es auch Nachteile. Die chemischen Reaktionen sind gemeinsam bedatet, das heißt der Parametersatz wird zwingend an die Reaktionskinetik der beiden Komponenten angepasst. Bedingt dadurch, ist eine entsprechende Ungenauigkeit des Modells zu erwarten, wenn die Reaktionskinetiken von SCR1 und SCR2 stark unterschiedlich sind.

Bei dem zweiten Ansatz werden die beiden Katalysatoren separat modelliert. Das heißt, je Katalysator wird ein 0-D-Modell implementiert und kalibriert. Dazu wurde die Dosiersoftware dahingehend erweitert. Ein NDM berechnet das NO_x - Umwandlungsvermögen des SCR1s. Die daraus resultierenden Austrittskonzentrationen bilden die Eingangsemissionen in das zweite Katalysatormodell des SCR2. Es ist zu erwarten, dass die Einzelkomponenten gut abgebildet werden können und dadurch die Emissionen nach SCR2 deutlich besser modelliert werden. Eine höhere Genauigkeit in der Modellierung der Emissionen nach SCR2 begünstigt die Modellierung des SCR/ASC.

Damit erhöht sich der Rechenaufwand sowie Speicherbedarf im Steuergerät und auch der EKF muss bedingt durch das zweite Modell erweitert werden. Die Bedatung der Modelle erfordert einen alternativen Ansatz gegenüber den Möglichkeiten in der Simulation, da die Emissionen nach SCR1 aus Platzgründen nicht gemessen werden können.

2. Die hinteren Komponenten

Das Verhalten des SCR2 und ASC wird in einem gemeinsamen Modell abgebildet. Trotz des unterschiedlichen Mechanismus gegenüber SCR wird der ASC-Katalysator durch das NDM-SCR-Modell abgebildet.

Der Hauptvorteil dieses Ansatzes besteht in der Vereinfachung der Modellbedatung. Es müssen keine ASC-spezifischen Reaktionen in dem Modell berücksichtigt werden. Die zusätzlichen Reaktionen können leicht die Komplexität des erweiterten Differenzialgleichungssystems erhöhen.

In diesem Ansatz gibt es jedoch viele Nachteile. Aufgrund der Verwendung des gemeinsamen Modells werden die Emissionen vor dem SCR2 und hinter dem ASC genutzt. Dies führt dazu, dass die Eintrittskonzentrationen sowie eingangsseitige Temperatur von SCR2 und ASC sich nicht unterscheiden werden. Die durchschnittliche Temperatur des Unterbodenkatalysators wird sehr grob ermittelt und die entspricht ungefähr der Temperatur hinter SCR2. Die Temperatur ist erstmal nicht ausreichend präzise für die SCR-Modellberechnung. Ein weiterer Schwachpunkt liegt daran, dass kein tatsächliches Verhalten des ASCs abgebildet wird. Wenn der NH_3 -Schlupf hinter SCR2 in den ASC einfließt, wird das gasförmige Ammoniak durch die ASC-Funktionalität zu NO , NO_2 und weitere Gasspezies umgewandelt. Die Oxidationsreaktionen sind nicht in dem SCR-Modell separat berücksichtigt, sondern müssen über die Oxidationskinetik des SCR abgebildet werden. Aus diesen Gründen wird keine hinreichende Genauigkeit der Optimierungsergebnisse erwartet.

6.4.2 Optimierungsergebnisse

Die Optimierungsergebnisse sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Aus den Ergebnissen geht hervor, wie gut die LDM-Ergebnisse mit den Axisuite-Ergebnissen übereinstimmen. Zu diesem Zweck wurden LDM- und Axisuite-Ergebnisse für NH_3 -Beladung, NH_3 -Schlupf sowie die Emissionen von NO , NO_2 und NO_x kumuliert (Summe von NO und NO_2) miteinander verglichen.

Darüber hinaus sind die charakteristischen Eigenschaften der jeweiligen Zyklen zum Beispiel T_{ein} , T_{aus} , T_{avg} , und das Geschwindigkeitsprofil dargestellt.

6.4.2.1 Abbildung von zwei SCR-Katalysatoren mit einem 0 dimensionalen Modell

1. Das kombinierte SCR1-SCRF-Modell

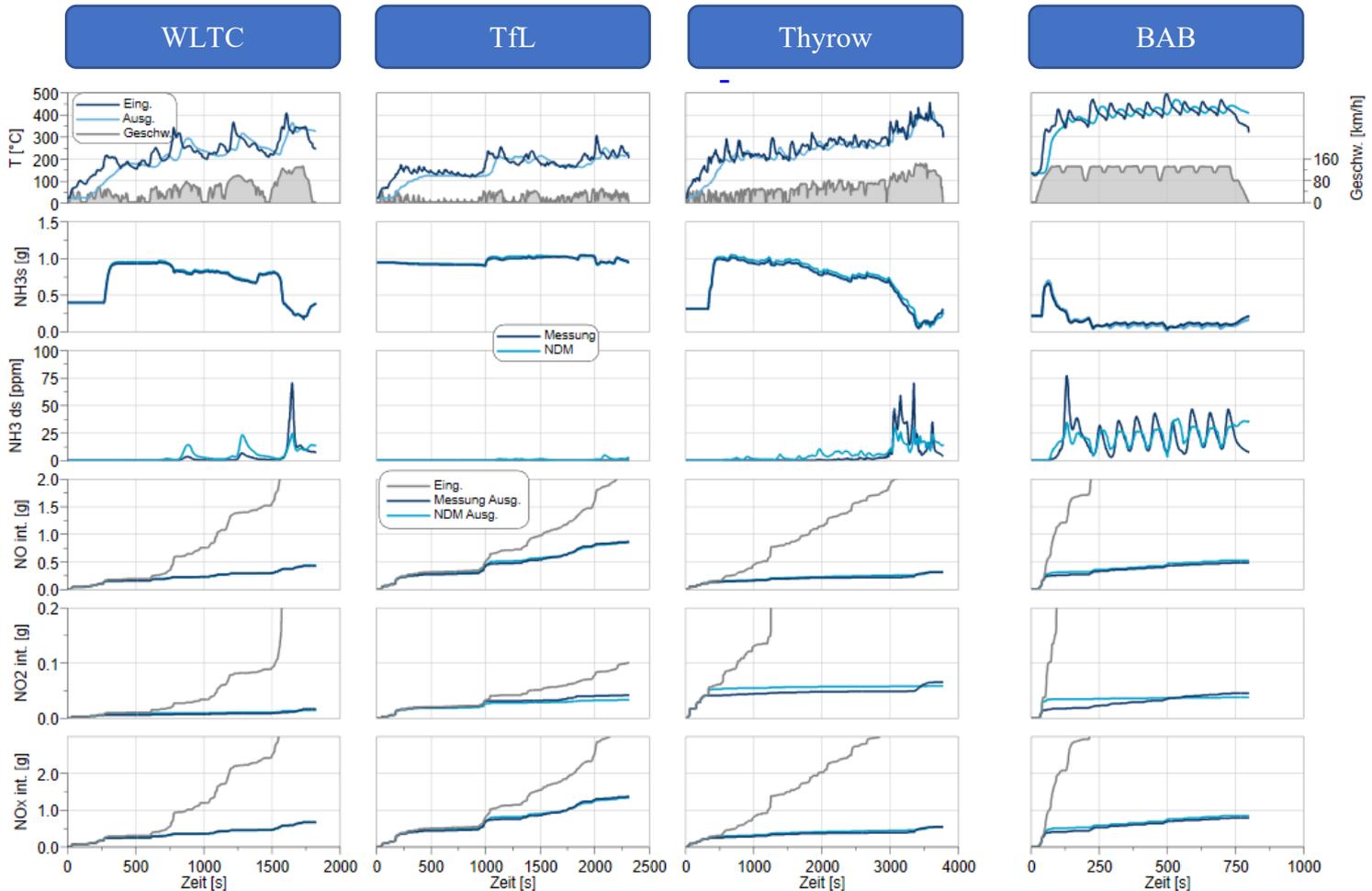


Abbildung 17: Optimierungsergebnis für SCR1-SCRF 0D-NDM

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass die NH_3 -Beladung des NDM gut mit Axisuite übereinstimmt. Es sind aber Abweichungen für die Emissionen NO_2 und NH_3 deutlich erkennbar.

Der NH_3 -Schlupf wird in nahezu allen Zyklen nicht hinreichend genau abgebildet. Im WLTC Zyklus liegt die NH_3 -Emission des Modells in den ersten 1500s deutlich über der NH_3 -Emission von Axisuite. Erst bei höheren Temperaturen und deutlich zunehmender Desorption ändert sich das Bild. Die NH_3 Emission von Axisuite liegt deutlich über dem Modell. Lediglich der Beginn des NH -Schlupf wird von dem Modell gut abgebildet.

Ähnlich ist das Verhalten im Thyrow Zyklus. Im BAB Zyklus ist zu erkennen, dass die Dynamik der NH_3 -Emissionen durch das Modell gut abgebildet ist, jedoch die absoluten Emissionen nicht übereinstimmen. Die Ergebnisse zeigen bei allen Zyklen eine gute Übereinstimmung der NO -Emissionen. Hingegen weicht die NO_2 -Emission von Axisuite ab. Da die NO_2 -Emission gegenüber der NO -Emission sehr gering ist, sind die Auswirkung auf die NO_x -Emission vernachlässigbar klein.

Mit diesem Parametersatz sind die NO_x-Emissionen gut abgebildet, aber die NH₃-Emission zeigt deutliche Abweichungen.

2. Das kombinierte SCR-ASC-Modell

Die in Abb. 18 dargestellten Ergebnisse für das vereinfachte SCR-ASC-Modell stimmen in allen Bereichen relativ gut mit Axisuite überein.

Auch ist eine Abweichung der NO₂-Emission in den Zyklen erkennbar. Im WLTC und Thyrow weicht das Modell vorrangig bei höheren Temperaturen von Axisuite ab. Im BAB dagegen sind die Abweichungen deutlich höher, so dass die kumulierte NO₂-Masse des NDM Faktor 2 über Axisuite liegt. Bedingt durch den ASC und den definierten Beladungszuständen für die Optimierung bildet Axisuite und auch das NDM kein NH₃-Schlupf in den Zyklen ab. Eine Bewertung der NH₃-Emission ist auf Basis dieser Ergebnisse nicht möglich.

Wenn der Katalysator eine hohe Beladung erhält, wird entsprechend mehr dosiert, wodurch auch mehr NH₃ aus dem SCR2-Katalysator desorbiert.

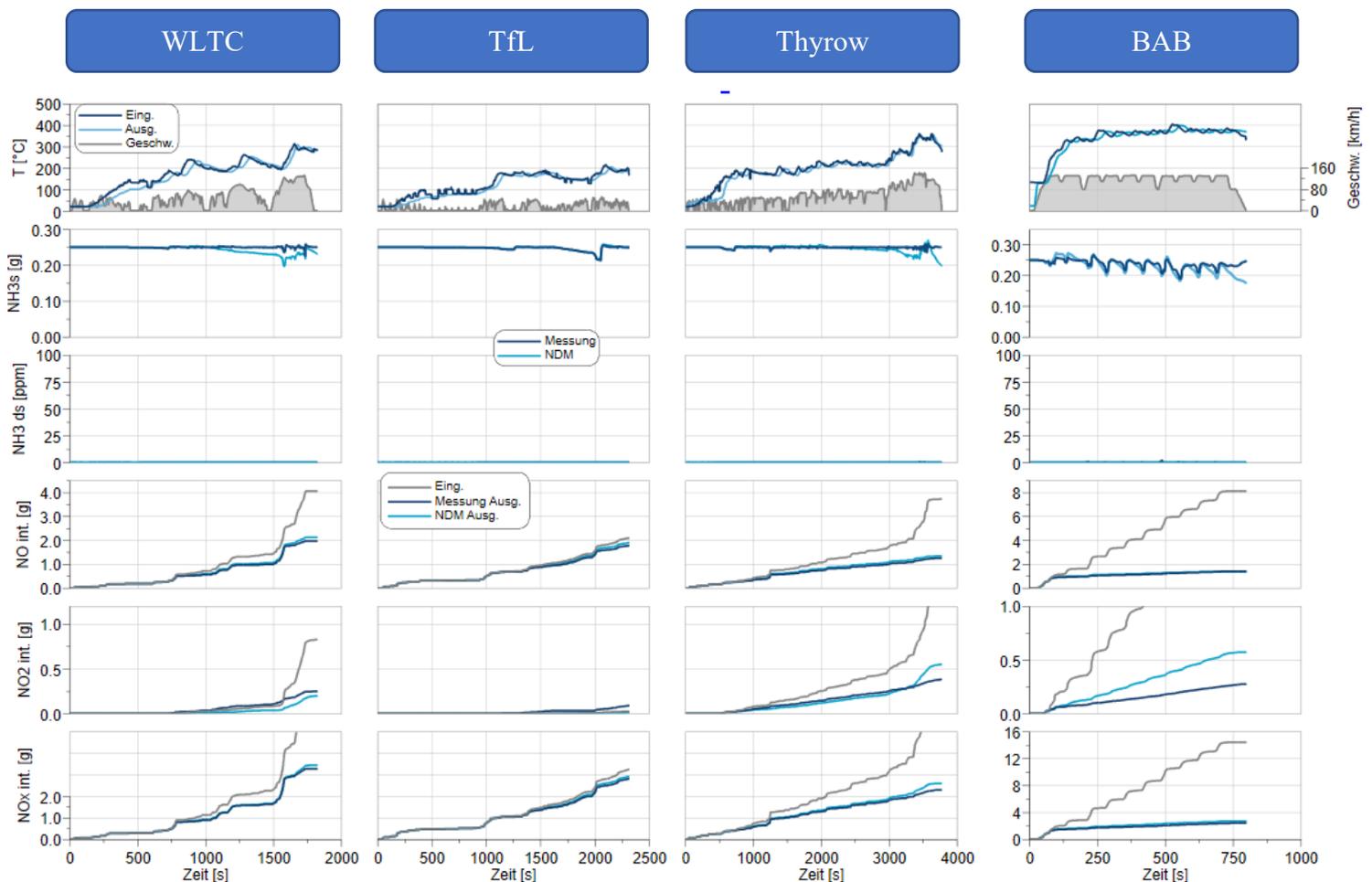


Abbildung 18: Optimierungsergebnis des SCR-ASC-0D-Modells

Das Diagramm 19, zeigt die Optimierungsergebnisse eines NDM, das nur den SCR2 abbildet bei einer NH₃-Beladung von 1g. Es ist ein deutliche NH₃-Emission nach dem SCR2 zu erkennen, die von dem Modell sehr gut abgebildet wird. Auch die NO_x-Emissionen stimmen sehr gut mit Axisuite überein.

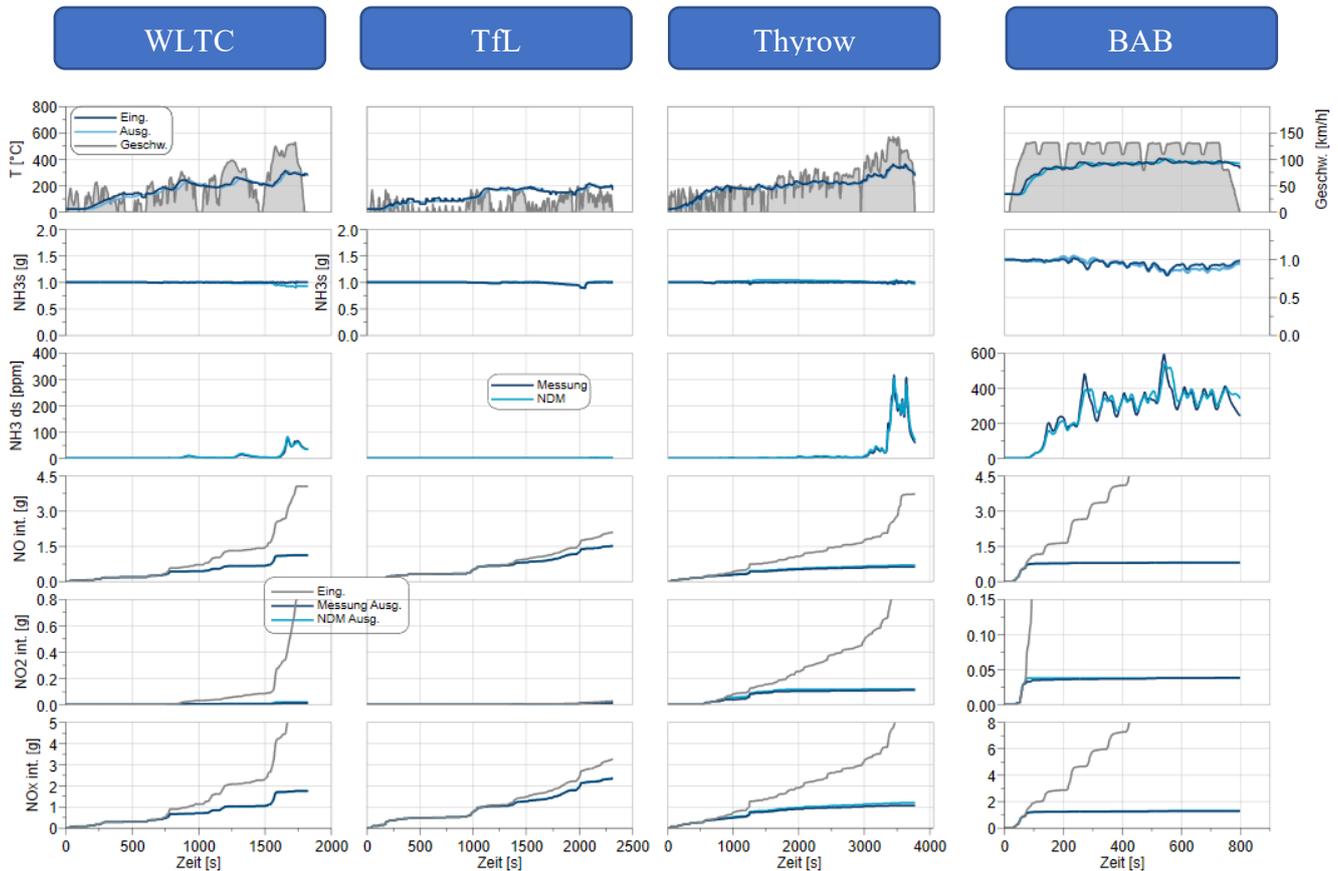


Abbildung 19: Optimierungsergebnisse des SCR2-0D-Modells

6.4.2.2 Abbildung von SCR-Katalysatoren mit jeweils einem 0 dimensionalen Modell

1. SCR1-Optimierung

Wie erwartet liefert die Bedatungsmethodik einen Bedatungssatz, deren Ergebnisse der SCR1-Optimierung eine sehr gute Übereinstimmung zwischen NDM und Axisuite zeigt (siehe Abbildung 20). Bei der NO₂-Emission wird die Abweichung gegenüber der SCR1-SDPF-Optimierung verringert. Eine weitere Verbesserung der Genauigkeit ist mit einem 0D-Modell voraussichtlich nicht möglich. Die abgebildeten NO-Emissionen stimmen bei allen Zyklen mit den Referenzemissionen überein. Die integralen NO_x-Werte liegen nur leicht über denen des Axisuite-Modells.

Die NH₃-Emission ist in allen Zyklen gut abgebildet, nur teilweise weichen die Emissionen nach dem Auffüllvorgang deutlicher voneinander ab. Dies resultiert aus dem 0D-Ansatz, bei dem im Auffüllvorgang das NH₃ über die Länge der Komponente gleich verteilt ist. Somit befindet sich in dem NDM bereits mit Beginn der Dosierung auch im hinteren Teil der Komponente bereits NH₃. Im WLTC ist dieser Effekt bei dem ersten NH₃-Schlupfpeak bis ca. 200ppm gut sichtbar. Das NDM überschätzt den NH₃-Schlupf deutlich gegenüber Axisuite. Dies tritt bei dem zweiten starken NH₃-Schlupfpeak nicht mehr auf. Auch im Thyrow schätzt das NDM bis Sekunde 1500s NH₃-Schlupf, der so von Axisuite nicht modelliert wird.

Beim Hochlastzyklus-BAB wird der Verteilungsvorgang beschleunigt. In den ersten 150s wird der Schlupf nicht gut abgebildet. Danach erreicht das NDM eine gute Übereinstimmung mit Axisuite. Außer bei Sekunde 500 entsteht eine große Abweichung bis zu 150 ppm.

Diese Abweichungen kann mithilfe von weiteren Optimierung reduziert werden. Bei der Optimierung kann die Gewichtung auf den Oxidations- und Desorptionsvorgang erhöht werden.

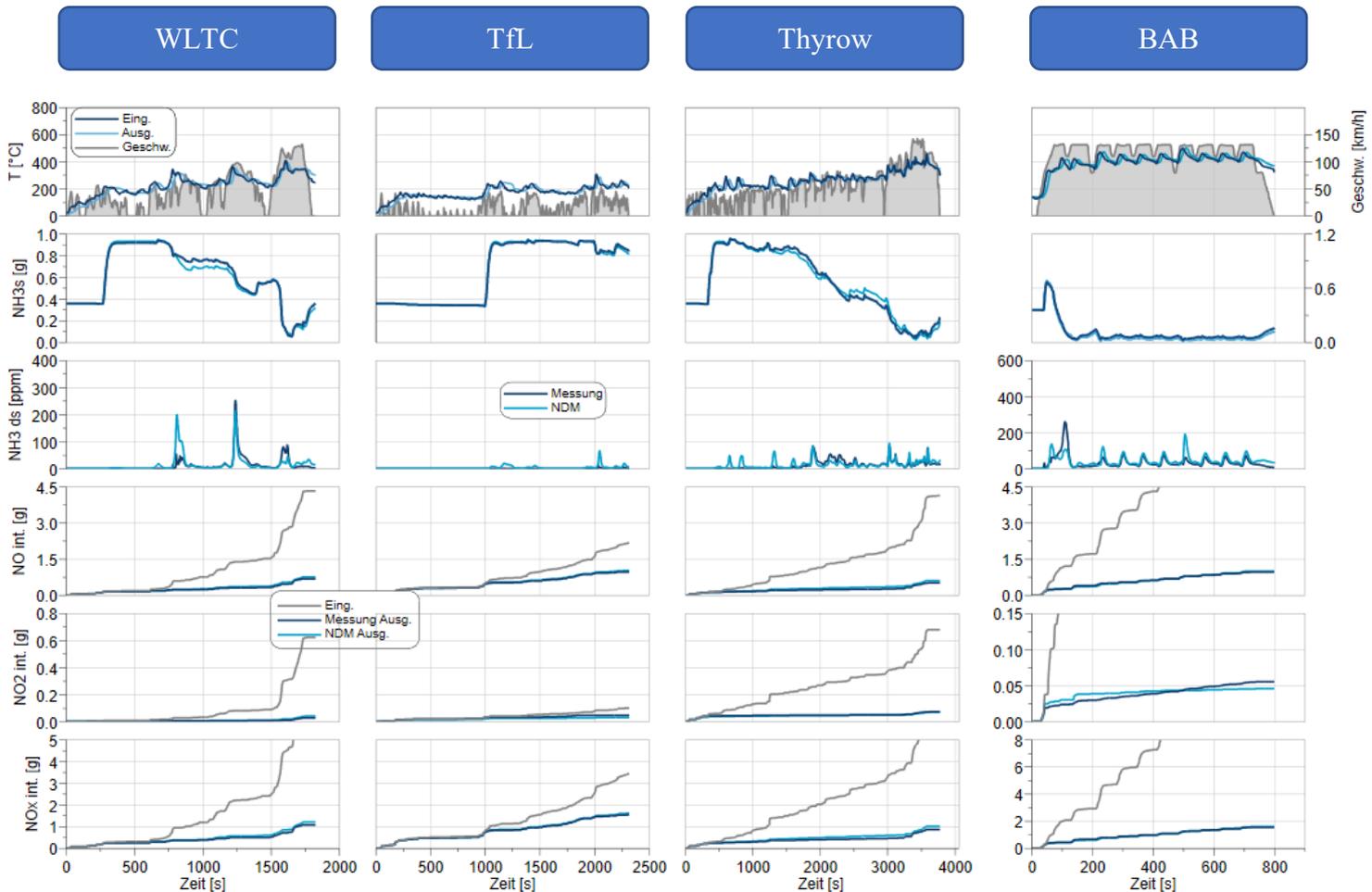


Abbildung 20: Optimierungsergebnis des SCR1-Modells

2. SDPF Optimierung

Die Optimierungsergebnisse des angepassten SDPF-Modells sind in Abbildung 21 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der in hell blau dargestellte Verlauf des Modells mit den angepassten Parametern eine sehr gute Modellgenauigkeit erreicht. Die Simulationsergebnisse stimmen zu großen Teilen mit den Ergebnissen des hochkomplexeren Axisuite-Modells (dunkelblau) überein.

Die Beladung von NDM und Axisuite liegen fast hundertprozentig aufeinander mit marginalen Abweichungen. Es ist zu erkennen, dass die NH_3 -Beladung des SCR1s sich bedingt durch den NH_3 -Schlupf des SCR1 erhöht. Die NH_3 -Emission nach SCR1 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Axisuite-Modell.

Die NO-Emission wird sehr gut abgebildet. Die berechnete NO_2 -Emission liegt bei allen Zyklen unter dem Axisuite-Verlauf mit geringen Abweichungen außer beim BAB. In diesem Zyklus beträgt die kummulierte NO_2 -Masse annähernd ein Drittel der Masse des Axisuite-Modells. Da die NO_2 -Masse im Vergleich zur NO-Masse sehr klein ist, ist der Einfluss auf die gesamte NO_x -Masse gering.

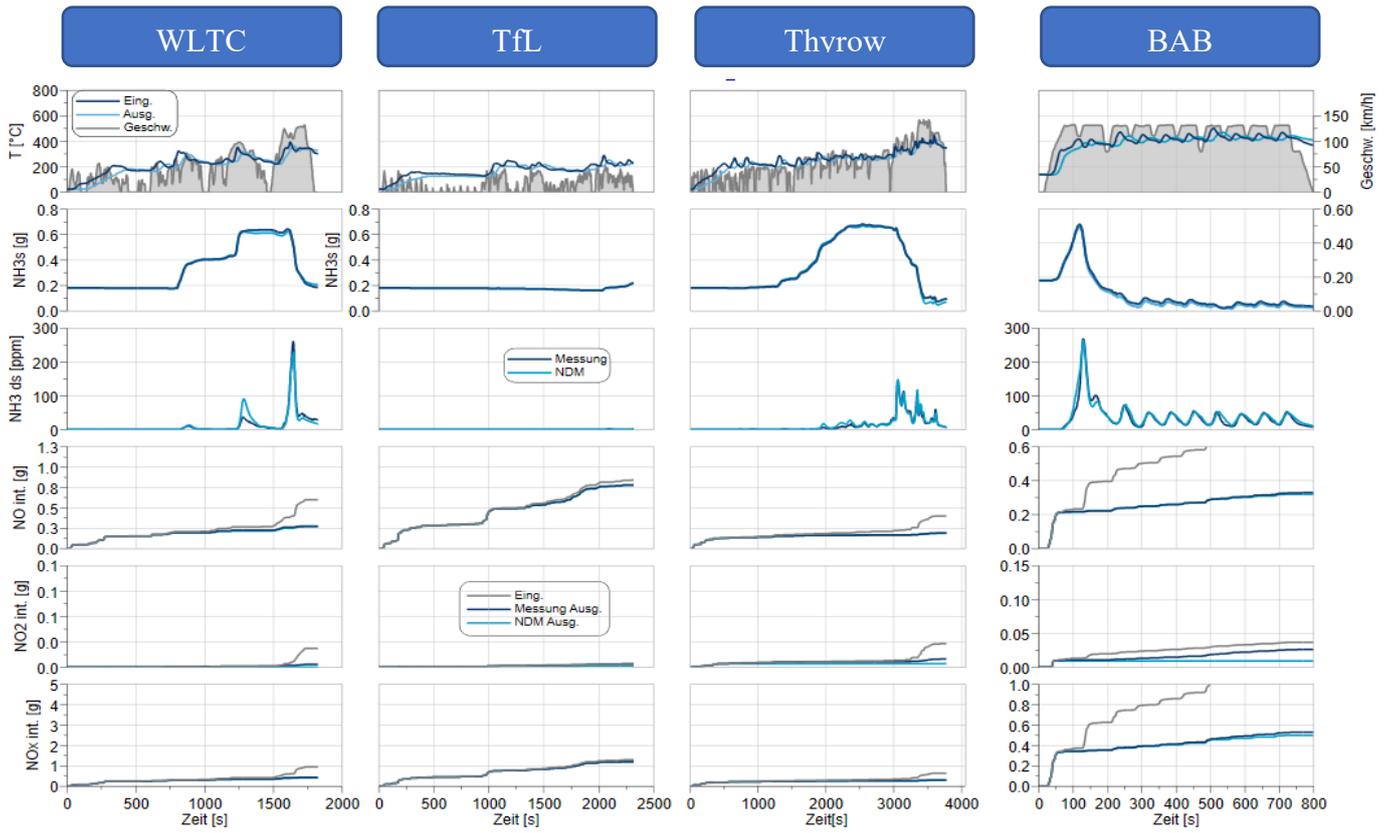


Abbildung 21: Optimierungsergebnis des SDPF-Katalysators

6.5 Skalierbarkeit für SCR1

SCR2-Optimierung

In dem Fall, wo die Modellbedatung durch das Antrainieren auf die reale Messdaten erfolgt wird, sind die Zusatzmesstechnik erforderlich. Die Messinformationen hinter SCR1 bzw. vor SDPF sind für die Bedatung der beiden Modelle notwendig. Es kommt in dem Fahrzeug vor, dass der SCR1 und SDPF in einem gemeinsamen Canning sind und es zwischen Katalysatoren die an der Abgasrolle vorhandene Zusatzmesstechnik nicht gibt. Der Ansatz ist den SCR2 zu optimieren und die daraus ergebende Bedatung für den SCR1 zu übernehmen, da die Messdaten hinter dem SCR2 abgegriffen werden können. Die entscheidende Frage ist, ob das Modell über das Volumen skalierbar ist.

Die Trainingsdaten sind die Simulationsdaten vor und nach dem SCR2. In der Simulation wird der erste Injektor ausgeschaltet, damit keine irrelevanten Reaktionen stattfinden. Außerdem stellt sich der SCR2-Sollfüllstand auf den SCR1-Sollfüllstand ein, damit das SCR2-Modell das Verhalten des SCR1 abbilden kann.

Die beiden Komponente haben die gleiche SCR-Technologien. Ihr Volumina sind jedoch uneinheitlich. Die Volumen unterscheiden sich wie folgt, das SCR1-Volumen (1,608L) ist um ein Drittel kleiner als das SCR2-Volumen (1,993L). Des Weiteren teilt sich die Frage, ob das NDM skalierbar hinsichtlich des Volumens ist.

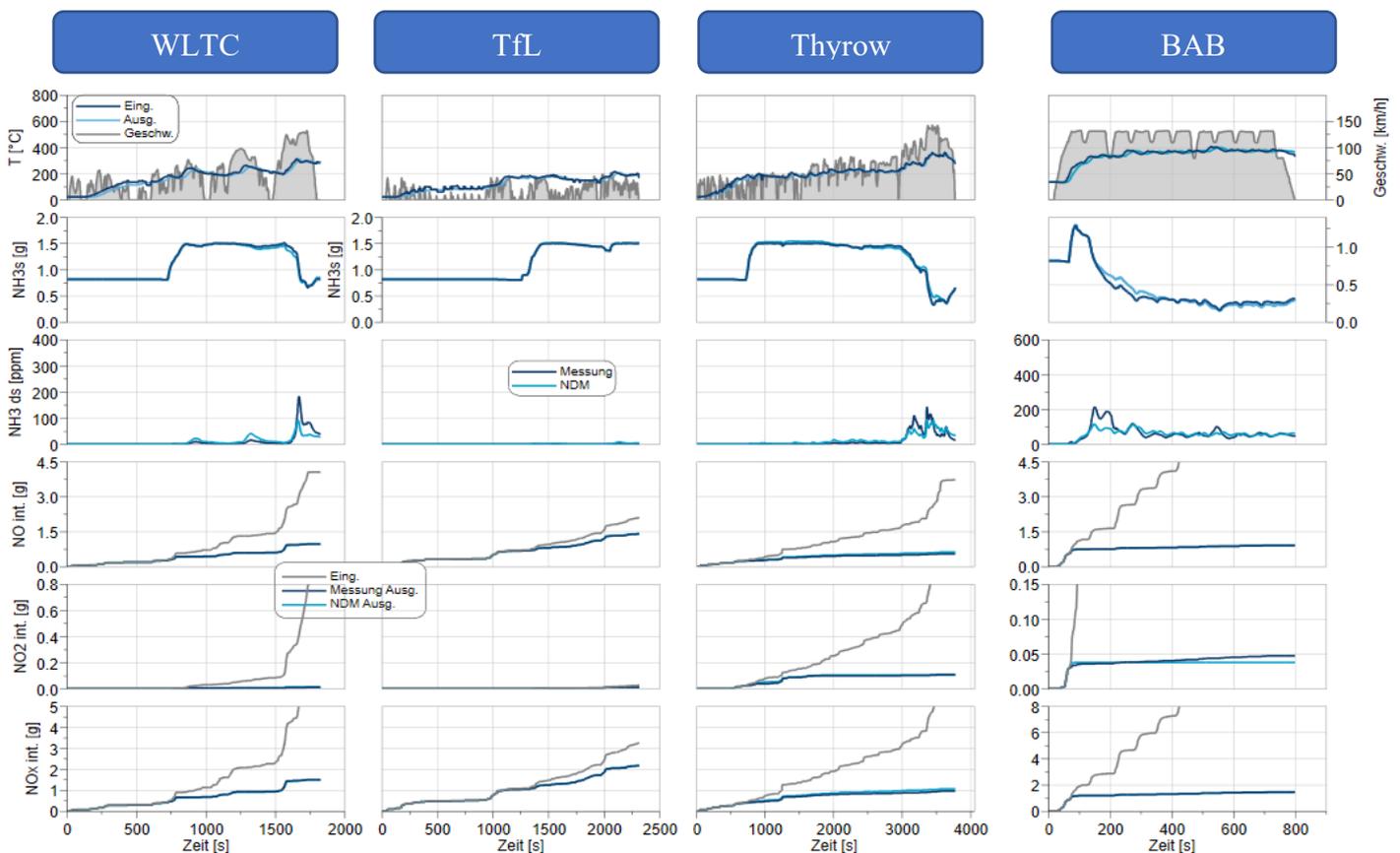


Abbildung 22: Optimierungsergebnis des SCR2-Katalysators mit SCR1-Sollfüllstand

Die in Abbildung 22 dargestellten Ergebnisse für die antrainierten Parameter zeigen in allen Bereichen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen NDM und Axisuite. Beim BAB-Zyklus weichen die Verläufe der Emissionen minimal ab, das Verhalten des NDM nähert sich ausreichend an das hochdimensionale Modell an.

Die optimierten Parameter werden in dem SCR1-Modell eingesetzt, um die Skalierbarkeit der Parameter zu testen. Es ist zu erkennen, dass die berechneten Emissionen des NDM eine gute Modellgenauigkeit

erreichen. Die NO, NO₂ und NO_x-Emissionen werden sehr gut abgebildet. Beim BAB-Zyklus weichen die NO und NO₂-Emissionen von Axisuite deutlicher ab. Die NH₃-Emissionen sind aber weiterhin gut abgebildet. Die Füllstände von Tfl und BAB stimmen mit der Axisuite überein. Jedoch zeigt es sich das die NH₃-Beladung im WLTC und Thyrow abweicht. Dies kann aus der geringeren Abgastemperatur an der Position des SCR2 mit Vergleich mit SCR1 liegen. Die Parameter, die für die NH₃-Beladung verantwortlich sind, sind der Stoßfaktor und Aktivierungsenergie der Desorptions- und Oxidationsreaktionen. Sie sind stark von der Temperatur abhängig. Es ist ersichtlich, dass der Parameter den Oxidationsvorgang unterschätzt. Die berechneten NDM-Beladungen von WLTC und Thyrow sind in machen Phasen über den Axisuite-Ergebnisse zu finden.

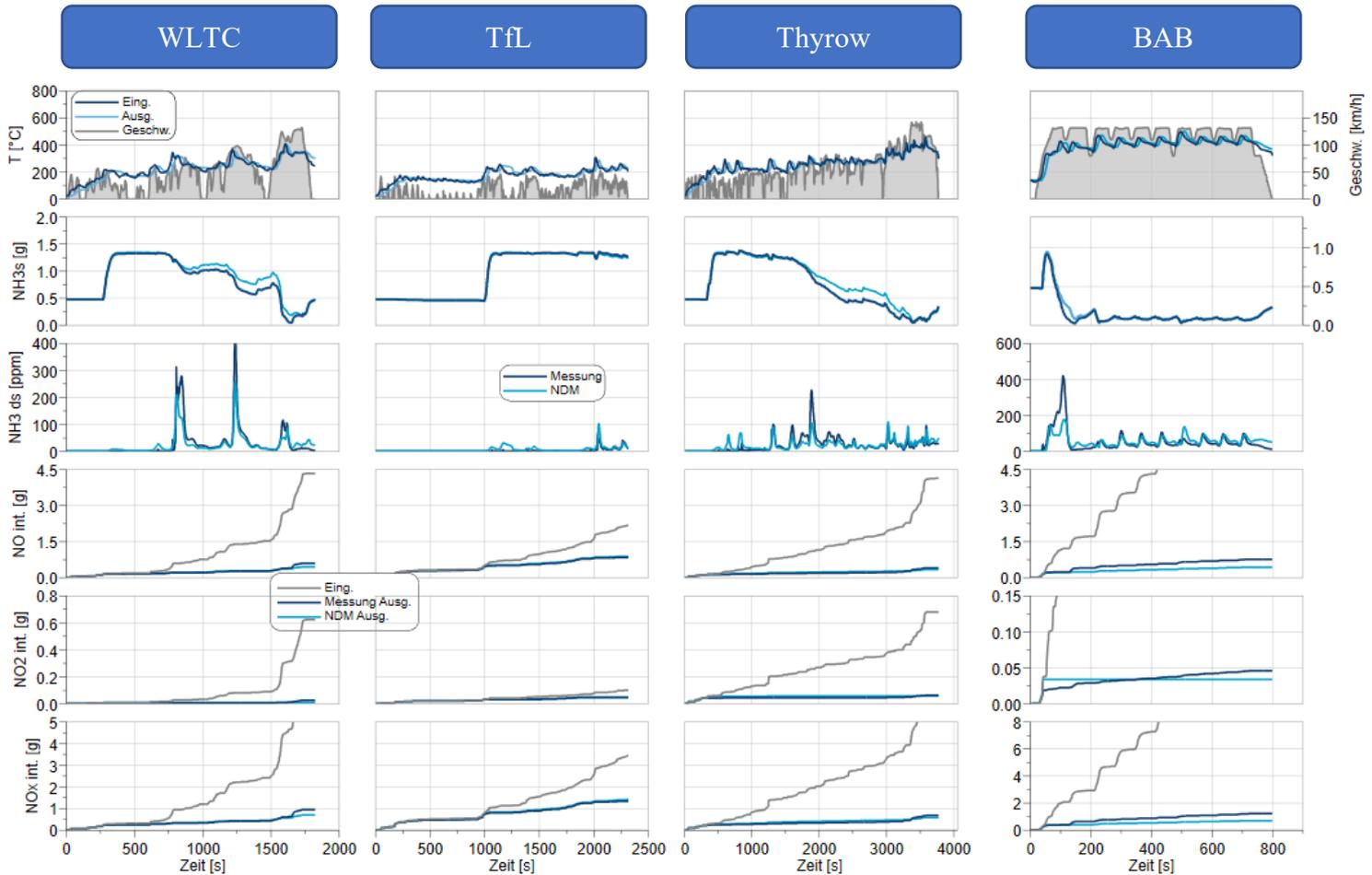


Abbildung 23: Emissionen des SCR1 mit Einsatz von SCR2-Parametern

In der Abbildung 24 werden die Temperaturunterschiede zwischen SCR1 und SCR2 in den Zyklen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Abgastemperatur des SCR1 deutlich über der Abgastemperatur des SCR2 liegt. Die Temperaturunterschiede betragen teilweise über 100°C. In SCR2 liegt die Temperatur meistens unter 350°C, in dem keine Desorption stattfindet. Dies ist auf unterschiedliche Betriebsbereiche hinsichtlich der Position der Komponenten zurückzuführen. Diese sind für den SCR1 und SCR2 teilweise deutlich unterschiedlich, so dass die Bedatung des SCR2 nicht für den gesamten Betriebsbereich des SCR1 ausgelegt ist. Da der Schwerpunkt bei der Modellbedatung auf den Austrittsemissionen liegt, ist die Modellgüte durchaus akzeptabel.

Für diese Vorgehensweise ist also eine sinnvolle Auswahl von Zyklen für die Parametrierung des SCR2 erforderlich, so dass die Bedatung auch für den SCR1 genutzt werden kann.

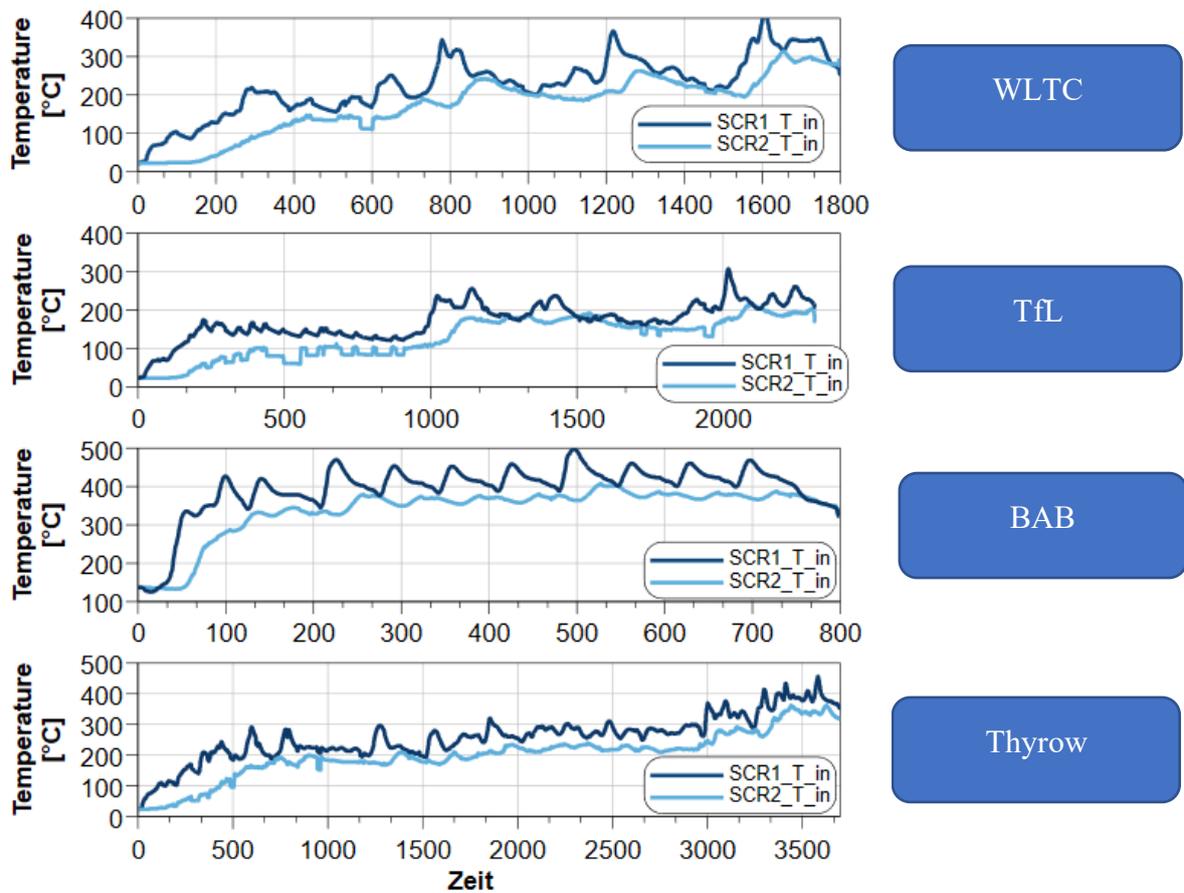


Abbildung 24: Temperaturunterschiede zwischen SCR1 und SCR2

Das Modell ist für die höheren Temperaturen nicht antrainiert, wodurch sich Abweichungen in der Modellierung der Emission ergeben können. Dies stellt letztendlich ein Nachteil in dieser Vorgehensweise dar.

7 Erweiterung der Dosiersoftware

7.1 Das erweiterte Kalman-Filter

Toleranzen oder Störungen der Sensorik und Aktuatorik wirken sich auf die Bilanzierung des NH₃-Füllstandes aus. Damit die Emissionen des Gesamtsystems weiterhin die gesetzlichen Anforderungen über Fahrzeuglebensdauer erfüllen, ist eine Adaption der AdBlue-Dosiermenge zur Kompensation der Störungen erforderlich. IAV hat dafür einen erweiterten Kalman-Filter (EKF) eingesetzt.

Lineares Kalman-Filter

Ein Kalman-Filter ist ein lineares diskretes zeitinvariantes System. Linear gibt an, dass es nur lineare Zusammenhänge gibt und eine Variable x führt zu einem entsprechenden y . Diskretes System bedeutet, das System arbeitet zeitlich mit gleichen Abständen ab. Es gibt keine Zeitpunkte, die übersprungen wird. Daraus entsteht keine unterschiedlich große Lücken. Invariantes bedeutet, dass das System keine große Änderung über die Zeit hat.

$$\underline{\dot{x}}(t) = A\underline{x}(t) + B\underline{u}(t) + \underline{w}(t) \quad (45)$$

$$\underline{y}(t) = C\underline{x}(t) + D\underline{u}(t) + \underline{v}(t) \quad (46)$$

In den oben genannten Gleichungen wird der Zustandsvektor als $\underline{x}(t)$ bezeichnet und $\underline{u}(t)$ als Stellengrößenvektor. Die Matrix A steht für Systemmatrix und die Matrix B für Ausgangsmatrix.

Gleichung 45 stellt die Zustandsgleichungen von dem Model dar. Der Anfangszustand wurde angegeben und der nächste Zustand wird herausberechnet, wo das Rauschen noch dazu kommen. Da wird das Systemrauschen $\underline{w}(t)$ mitberücksichtigt.

In der Gleichung 46 beschreibt die Messgleichung mit $\underline{y}(t)$ als Messvektor, C als Ausgangsmatrix und D als Durchgriffsmatrix. Wegen der Querempfindlichkeit der Sensoren, wo die NH₃-Konzentration unerwünscht mitgemessen wird, wird $\underline{v}(t)$ als Messrauschen dazu beaufschlagt.

Man geht immer davon aus, dass das Systemrauschen und Messrauschen normal verteilt sind. Wenn beiden Information kombinieren, kann der Zustand aus den Kovarianzen berechnet werden, wie die Beladungszustand ist [M.Reiner et.al , 2017] .

Im Kalman-Filter gibt es hauptsächlich zwei Schritte und sie sind Predict-Schritt und Update-Schritt. Bei dem Predict-Schritt wird das Verhalten der Zustände aus den modellierten Parametern vorhergesagt. Bei dem Update-Schritt wird der Vergleich zwischen Modell und Messdaten ausgeführt.

Die Vorhersage wird mittels des Modells über eine kleine Zeitspanne gemacht. Der Kalman-Filter hat eine Vorhersage des nächsten Zustands und eine Korrektur der Vorhersage durch Messung, gewichtet durch Kovarianz. Die Korrektur wird aus der Wägung der Vorhersage des Systems und die Messungen getroffen. Durch diesen Kreislauf wird der beste Schätzungszustand hingekriegt. Bei der Zustandsschätzung mittels Kalman-Filter werden diese Unsicherheiten als stochastische Größen betrachtet. Der Prozess wird kontinuierlich iterativ durchgeführt [M.Reiner et.al , 2017]

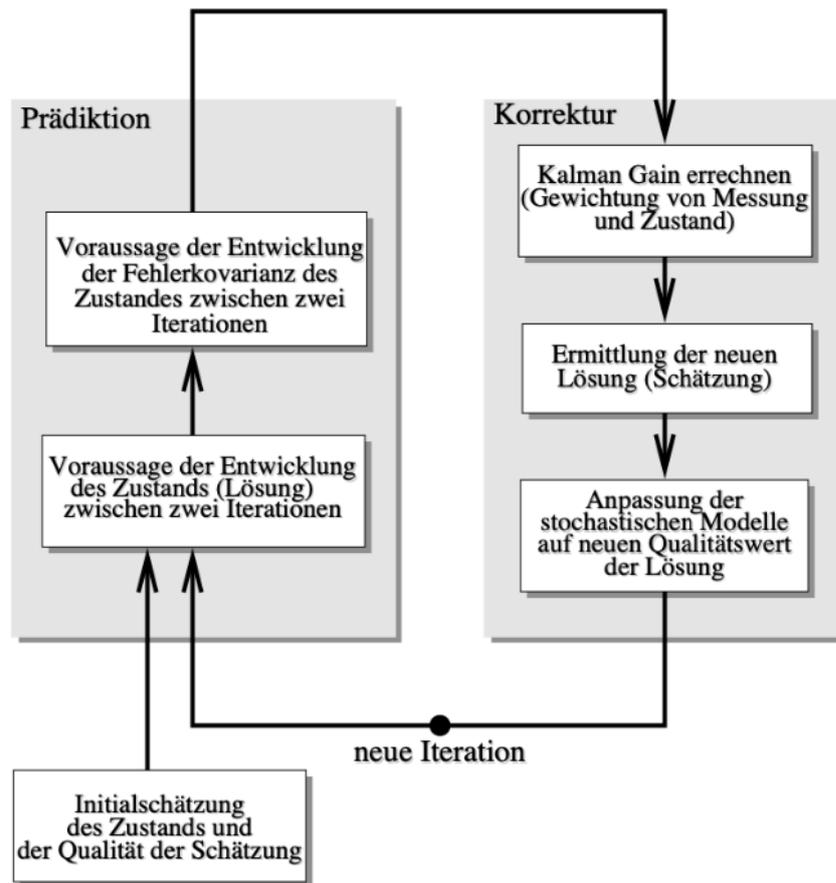


Abbildung 25: Der Arbeitsprinzip des EKF's

Erweitertes Kalman-Filter

In Realität sind die Systeme meistens nichtlinear. Der lineare Kalman ist nur gültig für lineare diskrete zeitinvariante Systeme. Für nichtlineare Systeme, ist es erforderlich, dass die nichtlineare Transformation durchgeführt wird. Deshalb muss es noch geschafft werden, dass der Schätzwert nach Taylor linearisiert und entwickelt wird. Für die nicht ganz stark nichtlineare Systeme reicht es aus einmal nach Taylor zu entwickeln. Das macht der erweiterte Kalman-Filter. Je öfter die Reihe entwickelt wird, desto genauer wird das Zustandsmodell, allerdings auch mit höherem Rechenaufwand.

Die Zustandsgleichung und die Messgleichung werden wie folgt dargestellt.

$$\dot{\underline{x}}(t) = f(\underline{x}(t), \underline{u}(t)) + \underline{w}(t) \quad (47)$$

$$\underline{y}(t) = h(\underline{x}(t), \underline{u}(t)) + \underline{v}(t) \quad (48)$$

In den folgenden Gleichungen sind die nichtlinearen Funktionen der Messgleichung h und der Zustandsgleichung f erläutert. Die Linearisierung erfolgt durch die Potenzierung der Funktion, damit die Funktion geglättet wird. Das EKF wertet daher zunächst die nichtlineare Funktion mit einem Mittelwert aus, der die beste Annäherung an die Verteilung darstellt, und schätzt dann eine Linie, deren Steigung in der Nähe liegt. Dieser Anstieg wird durch die Ableitung erster Ordnung der Taylor-Entwicklung bestimmt, da die Ableitung erster Ordnung einen linearen Wert ergibt. Daher wird diese Methode zum Ermitteln der Steigung aus der ersten Ableitung der Taylor-Reihe als Taylor-Entwicklung erster Ordnung bezeichnet.

Diese Ableitung erster Ordnung ist der Eintrag von Jacobian-Matrix. Die Jacobian-Matrizen sind ähnlich wie Systemmatrix A , B , C beim linearen Kalman-Filter. Sie sind jedoch nicht statisch, sondern ändern sich bei jedem Iterationsdurchlauf. [G.Welch et.al., 2006]

$$F(\hat{\underline{x}}(t), \underline{u}(t)) = \left. \frac{\partial f(\underline{x}(t), \underline{u}(t))}{\partial \underline{x}} \right|_{\hat{\underline{x}}(t)} \quad (49)$$

$$H(\hat{\underline{x}}(t), \underline{u}(t)) = \left. \frac{\partial h(\underline{x}(t), \underline{u}(t))}{\partial \underline{x}} \right|_{\hat{\underline{x}}(t)} \quad (50)$$

Der im NDM implementierte Zustandsvektor der Software besteht aus drei Variablen. Den NH_3 -Füllständen des SCR1-Katalysators und des SDPF-Katalysators sowie einem Adaptionparameter f_{inj} .

$$\underline{x}(t) = \begin{pmatrix} c_{\text{NH}_3, s_1} \\ c_{\text{NH}_3, s_2} \\ f_{inj} \end{pmatrix} \quad (51)$$

Die Initialisierungswerte für c_{NH_3, s_1} und c_{NH_3, s_2} betragen 0 und f_{inj} wird immer mit dem Startwert 1 initialisiert, dann aber mit den werten aus dem vorangegangenen Zyklus. Die Zustandsgleichung, lautet wie in der Gleichung 52.

$$\underline{x}(t) = f\left(\begin{pmatrix} c_{\text{NH}_3, s_1} \\ c_{\text{NH}_3, s_2} \\ f_{inj} \end{pmatrix}, c_{\text{NH}_3, in}\right) + \underline{w}(t) \quad (52)$$

Die Messgleichung in der Dosiersoftware ist gemäß der folgenden Gleichung implementiert. Der NOx-Sensor misst die Konzentrationen von NO, NO₂, NH₃ und dementsprechend sind die Emissionen in der Gleichung 53 zu finden. Wegen der NH₃-Querempfindlichkeit des NOx-Sensors wird ein Faktor in der Gleichung berücksichtigt, da der Sensor die Konzentration von NH₃ misst.

$$y(t) = C_{NO} + C_{NO_2} + q \cdot C_{NH_3} \quad (53)$$

Die F-Matrix enthält die partiellen Ableitungen der Systemgleichung nach Zuständen und wird Jacobi-Matrix genannt. Die Jacobi-Matrix ist in der Gleichung 54 definiert.

$$F = \begin{bmatrix} \frac{\partial c_{NH_3,s_1}}{\partial c_{NH_3,s_1}} & \frac{\partial c_{NH_3,s_1}}{\partial c_{NH_3,s_2}} & \frac{\partial c_{NH_3,s_1}}{\partial f_{inj}} \\ \frac{\partial c_{NH_3,s_2}}{\partial c_{NH_3,s_1}} & \frac{\partial c_{NH_3,s_2}}{\partial c_{NH_3,s_2}} & \frac{\partial c_{NH_3,s_2}}{\partial f_{inj}} \\ \frac{\partial f_{inj}}{\partial c_{NH_3,s_1}} & \frac{\partial f_{inj}}{\partial c_{NH_3,s_2}} & \frac{\partial f_{inj}}{\partial f_{inj}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial c_{NH_3,s_1}}{\partial c_{NH_3,s_1}} & 0 & \frac{\partial c_{NH_3,s_1}}{\partial f_{inj}} \\ \frac{\partial c_{NH_3,s_2}}{\partial c_{NH_3,s_1}} & \frac{\partial c_{NH_3,s_2}}{\partial c_{NH_3,s_2}} & \frac{\partial c_{NH_3,s_2}}{\partial f_{inj}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (54)$$

Der Adaptionparameter f_{inj} wird auf Basis der Korrekturmatrix verändert, geht aber in die Modell- und EKF-Berechnung als konstanter Wert ein. Deshalb ergeben sich alle Einträge der dritten Reihe, für die Ableitungen von f_{inj} zu Null. F (1,2) ist die Ableitung der zeitlichen Änderung des Füllstands SCR1 nach dem Füllstand von SCR2. Da der SCR1-Füllstand unabhängig von der Änderung des SCR2-Füllstand ist, wird F (1,2) zu Null gesetzt. Die Systemmatrix wird nach der Vereinfachung wie in der Gleichung 54 dargestellt.

Aufgrund der komplexen analytischen Lösung der partiellen Ableitung wird eine numerische Differentiation durch Vorwärtsdifferenzenquotienten näherungsweise berechnet. Das Element F (1,1) beschreibt die Zeitableitung des SCR1-Füllstands in Abhängigkeit vom SCR1-Füllstand. In der Berechnung enthält F (1,1) die aktuelle Füllstandsgradiante des SCR1 und das lokale Verhalten der Füllstandsgradiante des SCR1, wenn der Füllstand um ein Delta Δ erhöht wird. Δ besitzt einen Wert von 0,001 und damit erreicht die Näherungslösung für F (1,1) ein ausreichend präzises Ergebnis. Daraus wird der Differenzenquotient wie in der Gleichung 55 berechnet.

$$F(1,1) = \frac{c_{NH_3,s_1}(c_{NH_3,s_1} + \Delta) - c_{NH_3,s_1}^2}{\Delta c_{NH_3,s_1}} \quad (55)$$

Der Element F (2,1) ist die Zeitableitung des SDPF-Füllstands in Abhängigkeit vom SCR1-Füllstand, wenn der SCR1-Füllstand um Δ erhöht.

$$F(2,1) = \frac{c_{NH_3,s_2}(c_{NH_3,s_1} + \Delta) - c_{NH_3,s_2}c_{NH_3,s_1}}{\Delta c_{NH_3,s_1}} \quad (56)$$

Nach dem gleichen Berechnungsprinzip beschreibt der Eintrag F (2,2) die Zeitableitung des SDPF-Füllstands in Abhängigkeit vom um Δ erhöhten SDPF-Füllstand.

$$F(2,2) = \frac{c_{NH_3,s_2}(c_{NH_3,s_2} + \Delta) - c_{NH_3,s_2}^2}{\Delta c_{NH_3,s_2}} \quad (57)$$

Aus der F-Matrix weist das Element F (1,3) die zeitliche Ableitung des SCR1-Füllstands in Abhängigkeit vom Adaptionparameter auf. Der Eintrag des F (1,3) wird wie folgt berechnet.

$$F(1,3) = \frac{\partial c_{NH_3,s_2}}{\partial f_{inj}} = \frac{\partial \dot{r}_{ads_2}}{\partial f_{inj}} = k_{ads_1} \cdot (1 - \theta_1) \cdot \frac{\partial C_{NH_3,out_1}}{\partial f_{inj}} \quad (58)$$

Mit der homogenen Lösung der Zustandsgleichung kann die Austrittskonzentration nach SCR1 berechnet werden und wird in der Gleichung 59 dargestellt.

$$C_{NH_3,out_1} = \frac{\tau_1^1 \cdot f_{inj} \cdot c_{NH_3,in_1} + \dot{r}_{des_1}}{\tau_1 + k_{ads_1} \cdot (1 - \theta_1)} \quad (59)$$

Die Berechnung für C_{NH_3,out_1} wird in die Gleichung 58 eingesetzt und nach f_{inj} abgeleitet. Daraus ergibt sich die Berechnung für das Element F (1,3).

$$F(1,3) = k_{ads_1} \cdot (1 - \theta_1) \cdot \frac{\tau_1^1 \cdot c_{NH_3,in_1}}{\tau_1 + k_{ads_1} \cdot (1 - \theta_1)} \quad (60)$$

Mit dem gleichen Prinzip wie bei F (1,3) wird der Katalysatorfüllstand des SCR2 in F (2,3) nach dem Adaptionparameter abgeleitet.

$$F(2,3) = \frac{\partial c_{NH_3,s_2}}{\partial f_{inj}} = \frac{\partial \dot{r}_{ads_2}}{\partial f_{inj}} = k_{ads_2} \cdot (1 - \theta_2) \cdot \frac{\partial C_{NH_3,out_2}}{\partial f_{inj}} \quad (61)$$

Die homogene Lösung von der NH₃-Austrittskonzentration wird für die Berechnung der jeweiligen F (1,3) und F (2,3) erforderlich. Die Eingangskonzentration vom SDPF wird aus der Ausgangskonzentration von SCR1 berechnet. In der Stelle von c_{NH_3,in_2} wird die Gleichung 59 (C_{NH_3,out_1}) eingesetzt. Daraus ergibt sich die homogene Lösung für die C_{NH_3,out_2} wie in der unteren Gleichung

$$\begin{aligned} C_{NH_3,out_2} &= \frac{\tau_2^1 \cdot c_{NH_3,in_2} + \dot{r}_{des_2}}{\tau_2 + k_{ads_2} \cdot (1 - \theta_2)} \\ &= \frac{\tau_2^1 \cdot \left(\frac{\tau_1^1 \cdot f_{inj} \cdot c_{NH_3,in_1} + \dot{r}_{des_1}}{\tau_1 + k_{ads_1} \cdot (1 - \theta_1)} \right) + \dot{r}_{des_2}}{\tau_2 + k_{ads_2} \cdot (1 - \theta_2)} \end{aligned} \quad (62)$$

Wenn die Berechnung von C_{NH_3,out_2} nach dem Adaptionparameter f_{inj} abgeleitet wird, kann der Eintrag von F (2,3) wie folgt bestimmt werden.

$$F(2,3) = k_{ads_2} \cdot (1 - \theta_2) \cdot \frac{\tau_2^1 \cdot \tau_1^1 \cdot c_{NH_3,in_1}}{(\tau_1 + k_{ads_1} \cdot (1 - \theta_1)) \cdot (\tau_2 + k_{ads_2} \cdot (1 - \theta_2))} \quad (63)$$

$$\text{mit } k_{ads_1} = k_{0,ads_1} e^{\left(\frac{E_{ads_1}}{RT}\right)} \text{ und } k_{ads_2} = k_{0,ads_2} e^{\left(\frac{E_{ads_2}}{RT}\right)} \quad (64)$$

Die Messmatrix H enthält die partiellen Ableitungen des geschätzten Messwerts nach dem SDPF nach dem jeweiligen Zustand. Die Matrix H wird wie folgt definiert.

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{y}}{\partial c_{NH_3,s_1}} & \frac{\partial \hat{y}}{\partial c_{NH_3,s_2}} & \frac{\partial \hat{y}}{\partial f_{inj}} \end{bmatrix} \quad (65)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial (c_{NO} + c_{NO_2} + q \cdot c_{NH_3})}{\partial c_{NH_3,s_1}} & \frac{\partial (c_{NO} + c_{NO_2} + q \cdot c_{NH_3})}{\partial c_{NH_3,s_2}} & \frac{\partial (c_{NO} + c_{NO_2} + q \cdot c_{NH_3})}{\partial f_{inj}} \end{bmatrix}$$

In der Messgleichung werden die modellierten Emissionen des NDM bezüglich des Füllstands geschätzt und sind die Einträge in der Messmatrix H. Das sind die geschätzten Emissionen des Modells. Wie bei F (1,1) werden für die H (1,1) und H (1,2) die numerische Ableitung gebildet.

H (1,1) ist die Ableitung der Messgleichung nach dem Füllstand des SCR1 und sagt aus, wie sich der geschätzte Messwert nach SDPF, bei einer Erhöhung des SCR1 Füllstandes um ein definiertes Delta, verändert. Der Eintrag von H (1,2) weist die Zeitableitung des geschätzten Messwert nach dem erhöhten Füllstand von SDPF an.

$$H(1,1) = \frac{\hat{y}(c_{NH_3,s_1} + \Delta) - \hat{y}}{\Delta c_{NH_3,s_1}}$$

$$= \frac{c_{NO} + c_{NO_2} + q \cdot c_{NH_3} (c_{NH_3,s_1} + \Delta) - (c_{NO} + c_{NO_2} + q \cdot c_{NH_3})}{\Delta c_{NH_3,s_1}} \quad (66)$$

$$H(1,2) = \frac{\hat{y}(c_{NH_3,s_2} + \Delta) - \hat{y}}{\Delta c_{NH_3,s_2}}$$

$$= \frac{c_{NO} + c_{NO_2} + q \cdot c_{NH_3} (c_{NH_3,s_2} + \Delta) - (c_{NO} + c_{NO_2} + q \cdot c_{NH_3})}{\Delta c_{NH_3,s_2}} \quad (67)$$

H (1,1) und H (1,2) definieren die Richtung der Korrektur des NH3-Füllstandes. Wenn die Einträge von den Elementen H (1,1) oder H (1, 2) größer als 0 sind, schließt sich eine Folgerung dass ein NH3-Schlupf bei der erhöhten NH_{3,s}-Konzentration vorliegt. Bei Erhöhung des Füllstandes um Δ und einem Anstieg der Messgleichung, kann nur eine Erhöhung der NH3-Emission die Ursache sein. Das bedeutet die zeitliche Ableitung $\frac{\partial c_{sensor,out}}{\partial c_{NH_3,s}}$ steigt an. Im Gegenteil kommt die weinige NOx-Emission nach SDPF vor,

wenn der Füllstand um Δ erhöht. Daraus folgt dass $\frac{\partial c_{sensor,out}}{\partial c_{NH_3,s}}$ sinkt ab. Da die geschätzte Konzentration von Emission und Schlupf nach dem SDPF einen großen Einfluss auf das Verhalten des Katalysator (NOx-Schlupf oder NH3-Schlupf) hat, wird die Korrektur darauf basisert. Die Korrekturen bei NH3-Schlupf in entgegengesetzter Richtung als bei NOx-Schlupf.

Der Schlupf stößt nicht sofort nach SDPF aus , wenn der Füllstand des SCR1s erhöht wird, sondern wird NH3 erstmal auf SDPF angelagert und gepuffert. Hingegen kommt der Schlupf nach SDPF schneller vor, wenn der Füllstand des SDPFs erhöht wird. Aus diesem Grund kann festgestellt werden, dass die

Gewichtung von H (1,2) viel größer als H (1,1) meiste die Korrekturrichtung entscheidet.

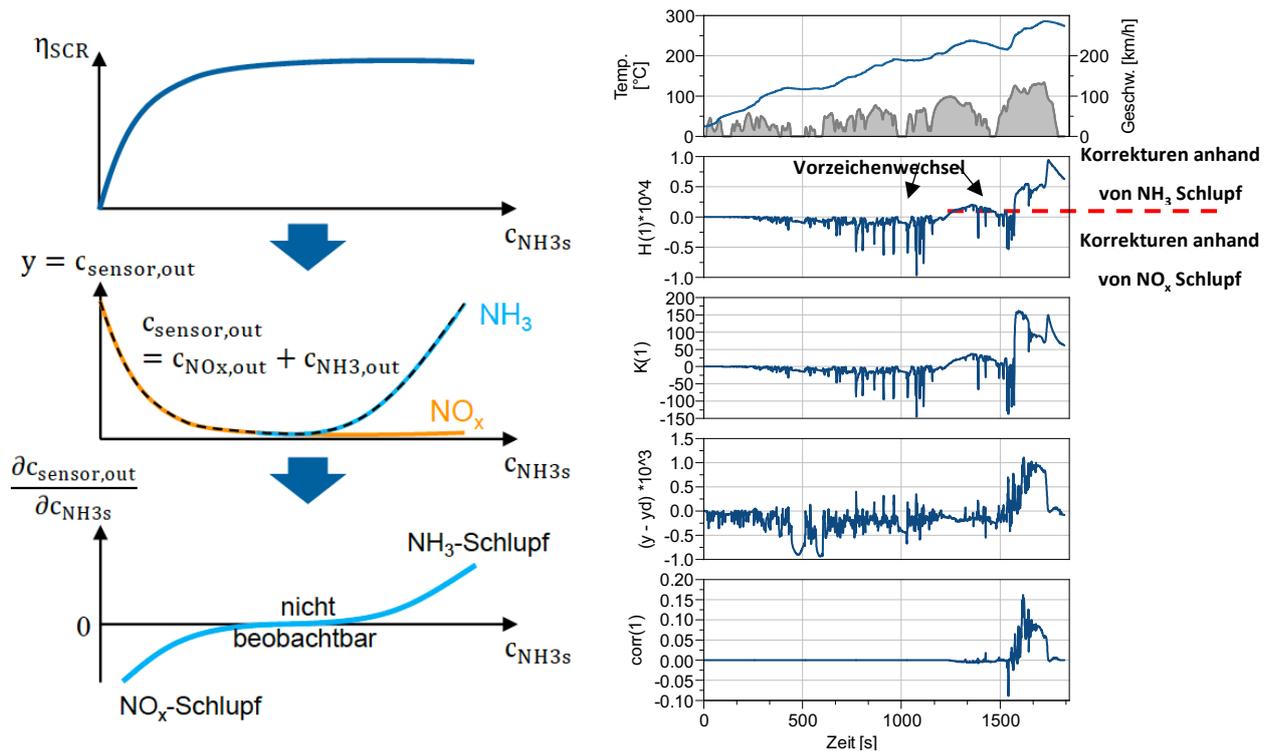


Abbildung 26: Beispiel der EKF-Adaption

Das Element H (1,3) beschreibt das lokale Verhalten der Messfunktion in kleiner Änderung des Adaptionparameters. Mit der homogenen Lösung für c_{NH_3} kann der Eintrag von H (1,3) analytisch berechnet werden und wird in der unteren Gleichung dargestellt.

$$H(1,3) = \frac{\partial \hat{y}_2}{\partial f_{inj}} = q \cdot \frac{\tau_2^2 \cdot c_{NH_3,in,2}}{\tau_2 + k_{ads,2} \cdot (1 - \theta_2)} \quad (68)$$

P ist die Kovarianzmatrix des Schätzfehlers und sagt aus, wie zuverlässig das momentane System ist. Die Kovarianzmatrix des Schätzfehlers wird wie unten dargestellt.

$$\dot{P}(t) = F(t)P(t) + P(t)F^T(t) + Q - K(t)RK^T(t) \quad (69)$$

Laut der Matrix-Riccati-Differentialgleichung wird die Spektraldichtematrix des Systemrauschens Q dazu addiert. Je größer der Wert Q ist, desto größer steigt die Unsicherheit an. Bei der erhöhten Unsicherheit ist das Vertrau-Gewicht auf die Messungen größer. Somit wird es stärker auf das System eingegriffen.

Der Kovarianzmatrix P wird wie den untenliegenden Wert (siehe Gleichung 70) initialisiert. Wenn die Matrix P mit einem zu geringen Wert initialisiert wird, dass der Startzustand eine hohe Qualität erhält. Deshalb kann der EKF beim fehlerhaften Fall sehr langsam die Fehler detektieren.

Um einen zufriedenstellenden Wert für P_0 zu gewährleisten, wird das System erstmal mit einer Null-Matrix simuliert. Ab dem 5.Zyklus erlangt die Kovarianzmatrix einen stabilen Bereich. Der sich daraus ergebende Wert wird als Intiialisierung für die Kovarianzmatrix P verwendet. Mit einem vorkonditionierten Wert erfolgt die Füllstand-Korrektur mit einer ausreichenden Geschwindigkeit.

$$P_0 = \begin{pmatrix} 300000 & 20000 & 40000 \\ 20000 & 400000 & 4000 \\ 5000 & 4000 & 2000 \end{pmatrix} \quad (70)$$

Mit dem Initialwert der Kovarianzmatrix P_0 und den Matrizen Q und R kann der EKF bezüglich der Korrekturgeschwindigkeit kalibriert werden.

Die Sensoren sind verrauscht und haben möglicherweise eine Drift. Das Rauschen des Sensors wird als R bezeichnet. Wegen des unveränderlichen Rauschverhaltens der gemessenen Daten trägt R einen konstanten Wert.

$$R = 5 \quad (71)$$

Q ist die Spektraldichtematrix des Systemrauschens. Die Q -Matrix steht für das Prozessrauschen und sagt aus, wie zuverlässig das System ist. Die Matrix Q präsentiert die allgemeine Schätzung, nachdem die Schätzungen vom Modell berechnet werden. Je größer der Eintrag ist, desto stärker wird das System gestört und unvertraut angenommen. Die Matrix Q kann selbst auslegt werden, damit das System geregelt wird, wie stark adaptiert werden soll oder kann.

Die Elemente $Q(1,1)$ und $Q(2,2)$ sind die Varianz der geschätzten Füllstände. Die Eingriffe der Q -Elementen wirken auf die Schätzfehler der entsprechenden SCR1 und SCR2 Beladungen ein. Die Größenordnung von $Q(1,1)$ und $Q(2,2)$ ist vielfach größer als $Q(3,3)$. Die Varianz der $Q(3,3)$ ist für den Adaptionsparameter zuständig. Anhand des Eintrags $Q(3,3)$ wird der Adaptionsparameter berechnet und eine kleine Änderung von $finj$ zu einer großen Änderung des Modellverhaltens.

$$Q = \begin{pmatrix} 5000 & 0 & 0 \\ 0 & 5000 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \quad (72)$$

Die Korrekturmatri $K(t)$ berechnet sich anhand der Kovarianzmatrix des Schätzfehlers P , der Kovarianzmatrix der Messgleichung H und Spektraldichtematrix des Messrauschens R . Ist das Rauschen des Sensors groß das heißt, R beträgt einen hohen Wert, sind die gemessene Daten weniger zuverlässig.

$$K(t) = P(t) H^T(t) R^{-1} \quad (73)$$

Der neue Beladungszustand ist die Summe aus dem vorherigen Zustand und der Korrekturmenge, die gemäß dem unteren Term berechnet wird. $y(t) - \hat{y}(t)$ ist die Differenz zwischen dem Sensorwert und die vom Modell geschätzte Summe der Konzentrationen von NO, NO2 und NH3.

$$\text{Corr} = K(t)(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (74)$$

Die Matrix Corr hat eine gleiche Größe von 3x1-Matrix wie die Matrix- K und dient zur Korrektur der Zeitableitung der Modellzustände. Der Eintrag $\text{Corr}(1,1)$ erhält die korrigierte $\text{NH}_{3,s}$ -Konzentration des SCR1-Füllstands und entsprechend wird der SDPF-Füllstand von dem $\text{Corr}(2,1)$ korrigiert. Der letzte Index ist für die Korrektur des Adaptionsparameters zuständig. In der folgenden Gleichung wird die Korrektur der Modellzustände dargestellt.

$$\hat{\underline{x}}(t) = f(\hat{\underline{x}}(t), \underline{u}(t)) + K(t) \cdot (y(t) - \hat{y}(t)) \quad (75)$$

mit

$$\begin{aligned}\underline{\hat{x}}(0) &= \underline{\hat{x}}_0 \\ \underline{\hat{y}}(t) &= h(\underline{\hat{x}}(t), \underline{u}(t))\end{aligned}\tag{76}$$

Aus der Integration von $\frac{d\underline{\hat{x}}(t)}{dt}$ und $\frac{dP(t)}{dt}$ ist $\underline{\hat{x}}(t + \Delta t)$ und $P(t + \Delta t)$ danach zu erhalten und die Informationen gehen in die nächste Iteration ein.

7.2 4 - Brick-Temperaturmodell der Softwareerweiterung

Es ist wichtig, ein Temperaturmodell im NDM zu haben, um die Temperatur zwischen SCR und SDPF Katalysator zu kennen. Die Temperatur hinter dem SCR1 ist relevant für die Modellbedatung von SCR1 und SDPF. Für den zweiten Modellierungsansatz gibt es jedoch hinter SCR1 keinen Sensor, der die Temperaturen nach SCR1 misst. Daher sind diese Werte im Steuergerät nicht vorhanden. Andererseits ist es wichtig, diese Temperaturwerte zu kennen, da die Reaktionsgeschwindigkeiten von der Temperatur abhängen. Damit das Temperaturmodell die Temperatur richtig darstellen kann, muss der Modell angepasst und bedatet werden.

Im Temperaturmodell wurde die Energiebilanz für den Katalysator analysiert. Die Wärmeübertragungen aus Leitung und Konvektion wurden in die Energiebilanz einbezogen. Die von den exothermischen Reaktionen entstehende Wärmemenge wird nicht mitberücksichtigt.

Die folgende Formel beinhaltet die Energiebilanz eines Bricks.

$$\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{abgas} - \dot{Q}_{konvek} \quad (77)$$

Die Wärmekapazität, der Abgasmassenstrom und die Temperatur vor dem Katalysator sind schon bekannt. Die spezifische Wärmekapazität des bestimmten Stoffs wird ausgewählt, in diesem Fall ist die Wärmekapazität der Substrate laut Axisuite $730 \frac{J}{kg \cdot K}$. Die Temperaturdifferenz ergibt sich aus der Eingangs- und Endtemperatur des Bricks. Die zugeführte thermische Wärmeleistung wird aus den drei Werten zusammengesetzt.

$$\dot{Q}_{Abgas} = c_{p,abgas} \cdot \dot{m}_{abgas} \cdot \Delta T \quad (78)$$

Der konvektive Wärmestrom ist aufwändiger zu berechnen, da er einen Einfluss von mehreren Außenfaktoren wie Fahrgeschwindigkeit und Umgebungstemperatur berücksichtigt. Die Wärmeübertragung findet zwischen dem festen Katalysatorgehäuse und dem strömenden Fluid, das in diesem Fall Luft ist, statt. Die konvektive Wärmeleitung ist von der Fahrgeschwindigkeit abhängig, deshalb wird in der Formel ein von der Geschwindigkeit abhängiger Korrekturfaktor berücksichtigt. Je schneller sich das Fahrzeug bewegt, desto größer ist die in die Umgebung abtransportierte Wärme. Der Temperaturunterschied ergibt sich aus der Umgebungstemperatur und der Austrittstemperatur.

$$\dot{Q}_{konvek} = \frac{Nu \cdot \lambda}{L_{\lambda}} \cdot \frac{U_{cat} \cdot L_{cat}}{n} \cdot f_k \cdot \Delta T \quad (79)$$

$$\frac{dT_{cat}}{dt} = \frac{\dot{Q}_{Abgas} - \dot{Q}_{konvek}}{c_{p,cat} \cdot m_{cat}} \quad (80)$$

Nach der Berechnung von $dTdt$ wird dieser Wert durch einen Integrator-Block integriert und somit die Katalysatoraustrittstemperatur erhalten. Der berechnete Temperaturwert wird für die nächste Abtastzeitberechnung erneut in den Modellblock eingegeben. Somit werden die Temperaturwerte zu jedem Zeitpunkt berechnet und das Temperaturprofil für den Katalysator während des Zyklus wird bereitgestellt.

$$T_{cat} = \int_{t_0}^{t_{end}} \frac{\dot{Q}_{Abgas} - \dot{Q}_{konvek}}{c_{p,cat} \cdot m_{cat}} dt \quad (81)$$

Tabelle 4: Die Beschreibung der Symbole in der thermodynamischen Gleichungen

Symbol	Beschreibung	Einheit
Nu	Nußelt-Zahl	[-]
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\frac{W}{mK}$
L_λ	Basislänge zur Berechnung der Alpha-Umgebung	m
U_{cat}	Umfang des Katalysator	m
L_{cat}	die Länge der Katalysator	m
f_k	Korrekturfaktor	-
$c_{p,cat}$	Wärmekapazität des Katalysators	$\frac{J}{kgK}$
m_{cat}	Masse des Katalysators	kg
n	Die Anzahl der Bricks	-
ΔT	Die Temperaturabstand zwischen Eingangs- und Endsbrick	K

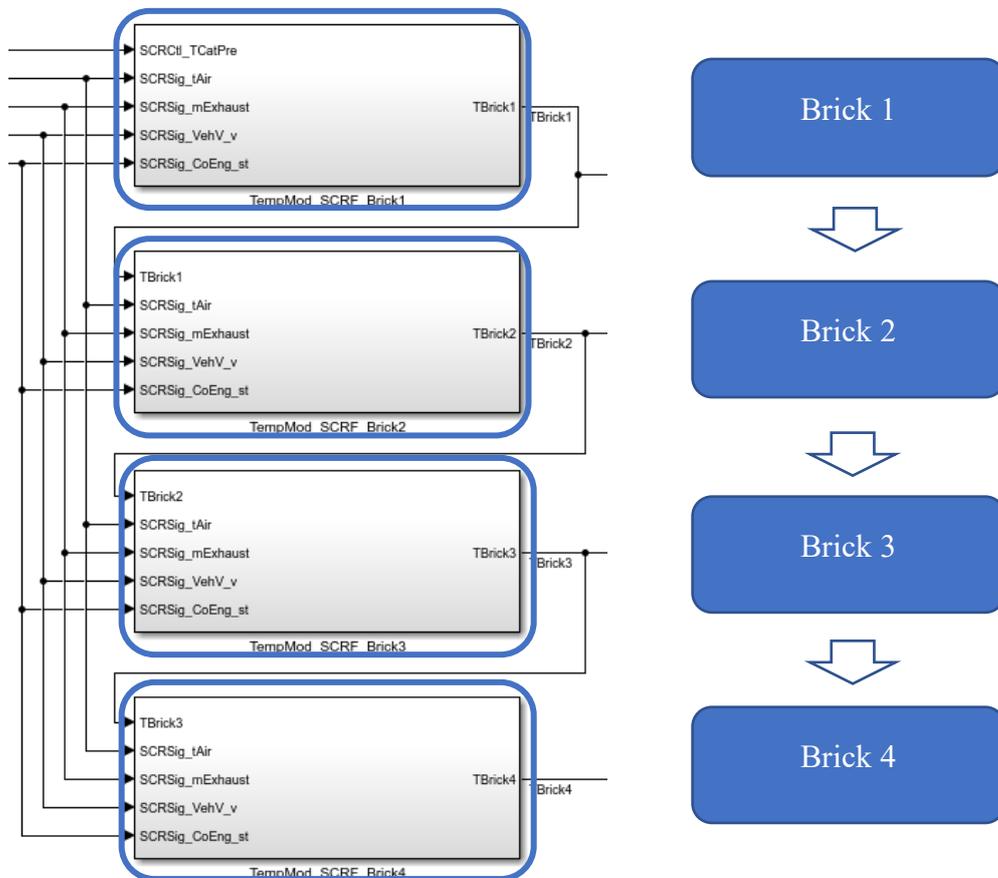


Abbildung 27: Das Schema der Temperaturberechnung

Die Austrittstemperatur von dem vorherigen Brick wird als Eintrittstemperatur des nachfolgenden Bricks verwendet. Der Katalysator wird in vier Bricks geteilt. Als Referenzdaten für das Temperaturmodell wird Axisuite verwendet. Axisuite arbeitet mit dem gleichen Prinzip, da wird der Katalysator axial in 20 Bricks aufgeteilt. Axisuite betrachtet mehrere Kriterien und Dynamik deshalb ist es viel präziser und genauer als die Temperatur im Modell. Um die ausreichende Genauigkeit des Modells zu erreichen, wird das Modell an Axisuite angepasst. Der Betrag der Katalysatorwärmekapazität wird variiert. In Axisuite werden die Wärmekapazitäten von allen Komponenten wie Gehäuse, Substrate, Washcoat usw. mitberücksichtigt. Das Modell hat alle der einzelnen Angaben in eine einzige kompakte Variable vereinfacht.

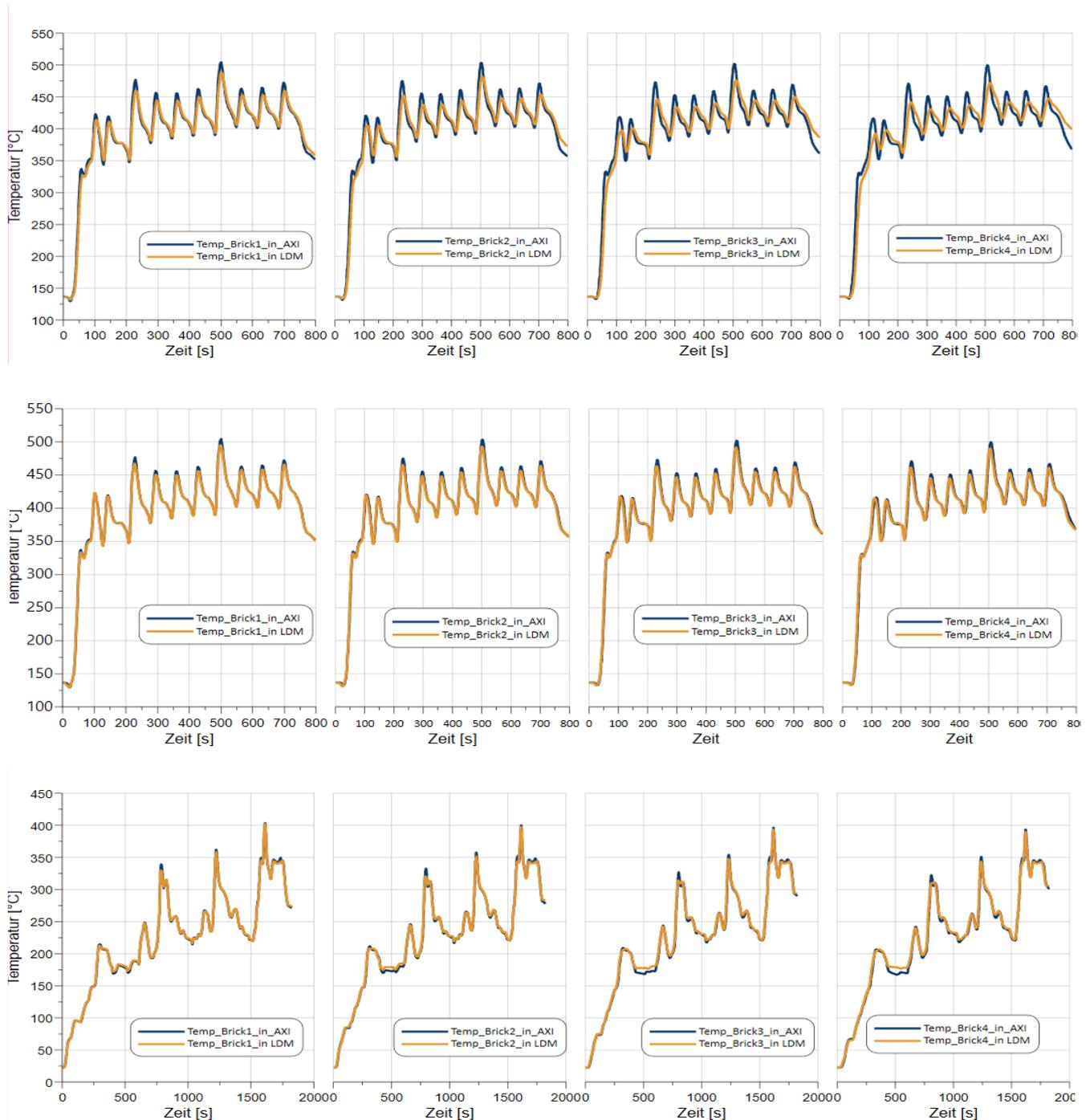


Abbildung 28: Temperatursvergleich zwischen NDM und Axisuite (1. Reihe: BAB vor Anpassung, 2.Reihe: BAB nach Anpassung, 3.Reihe: WLTC-Validierung der Anpassung | Blau: Axisuite, Orange: NDM)

Die Ergebnisse nach der Anpassung und die Validierung werden in der Abbildung 28 gezeigt. Vor der Anpassung verlaufen die Temperaturen des LDMs abweichend von dem Axisuite. Die Fehler werden von einem Brick zu einem anderen fortgepflanzt. Am vierten Brick nimmt der Unterschied deutlich zu und der maximale Unterschied beträgt 50°C.

Nach der Anpassung liegen die Axisuite- und NDM-Verläufe gut aufeinander. Die Austrittstemperatur ist nach den Gleichungen 23 und 26 zuständig für die Berechnung der Adsorptions- und Desorptionsrate. Die Ausgangstemperatur des zweiten Bricks wird als mittleren Katalysatortemperatur in dem NDM verwendet.

Zur Bedatung der im SDPF herrschenden Temperatur gibt es zwei Möglichkeiten. Es könnte ein weiteres Temperaturmodell wie bei SCR1 hinzugefügt werden. Dadurch erfolgt das System eine sehr gute Genauigkeit der Temperaturberechnung, die zur verbesserten modellierten Zustandsberechnung führt. Die Bedatungsmethodik muss jedoch in die Software implementiert und die Software wird leicht komplexer werden. Die zweite Möglichkeit ist, dass der logarithmische Mittelwert aus den Eintritt- und Austrittstemperaturen für den SDPF in die Berechnung einbezogen wird.

7.3 Dosiersoftware des erweiterten Systems

Die gesamte Struktur der Dosiersoftware wird in der untenliegenden Abbildung 29 veranschaulicht. Basierend auf den Messdaten am Eingang berechnet der SCR1-Modell die ausgangsseitigen Emissionen. Diese Konzentrationen am Ausgang des SCR1 fließen in das SDPF-Modell ein. Mithilfe des 4-Brick-Temperaturmodells wird die Temperatur vor SDPF modelliert. Damit kann das NDM des SDPF die Konzentrationen der jeweiligen Gasspezien und den Zustandsvektor nach dem SDPF berechnen. Die modellierten Beladungen von SCR1 und SPDF werden zusammen addiert und daraus ergibt sich der gesamte Füllstand der vorderen Komponenten. Der EKF1 verwendet den Ist-Zustand und die Messdaten, um die nötige Zustandskorrektur durchzuführen. Der Vergleich des von Modell geschätzten Wert mit dem Messwert aus dem NO_x-Sensor wird mathematisch von dem EKF1 durchgeführt. Aus der Gewichtung von Messung und Zustand wird der Gain-Faktor errechnet. Die Korrekturmenge ergibt sich entsprechend draus.

Die Kovarianzmatrix P wird integriert und ihr Integral wird als die Voraussage der Entwicklung des Zustands zwischen zwei Iterationen verwendet. Der Zustandsvektor wird an die Modelleingang zurückgeführt, um die Konzentration des nachfolgenden Zeitschritts zu bestimmen.

Die Summe aus der Vorsteuerung und dem Regler ergibt sich das anforderte AdBlue. Der AdBlue-Massenstrom als Stellgröße wird weiterhin von einem Füllstandsregler dosiert. Aus der Soll- und Schätzfüllstand wird die Regeldifferenz berechnet. Der PI-Regler greift auf die Regelabweichung zurück, um die erwünschte restliche AdBlue-Menge zu dosieren. Der P-Anteil des Reglers verhält immer proportional zu der Regelabweichung und Gegenteil wird sie bei dem I-Anteil diskret aufaddiert.

Die ausgangsseitige Emissionen nach SDPF tritt in den Unterbodenkatalysator ein. Da wird das Verhalten der hinteren Komponenten durch das kombinierte SCR2-ASC-Modell nachgebildet. Das NDM berechnet den NH₃-Füllstand des SCR2. Aus der Vertrauen-Gewichtung zwischen Messung und modellierten Zustand korrigiert der EKF2 den Füllstand. Die Arbeitsprinzip des EKF2 und Füllstandsreglers ist gleich wie von den vorderen Komponenten.

Wenn der zweite Füllstand wegen der Überdosierung oder NH₃-Schlupf von den Vorderkomponent weit von dem Soll-Beladung entfernt ist, wird der zweite Füllstand mithilfe einer Füllstandskopplung geregelt. In der Software wird ein fester Zusammenhang zwischen der Führungsgröße (die dosierte NH₃-Menge) und der Steuerausgangsgröße, die in diesem Fall die gesamte vordere Ist-Beladung (SCR1+SDPF) und der hinteren Ist-Beladung (SCR2) sind, implementiert. Darauf basierend wird die Dosiermenge von der ersten Dosierstelle dementsprechend geregelt, damit die beiden Katalysatoren kontinuierlich auf dem Soll-Beladungszustand bleiben können. Falls die Beladung des SCR2 weit über

dem Sollwert liegt, wird weniger AdBlue in die vordere Komponente eindosiert. Bei dem umgekehrten Fall wird die vordere Dosiermenge nachgeregelt.

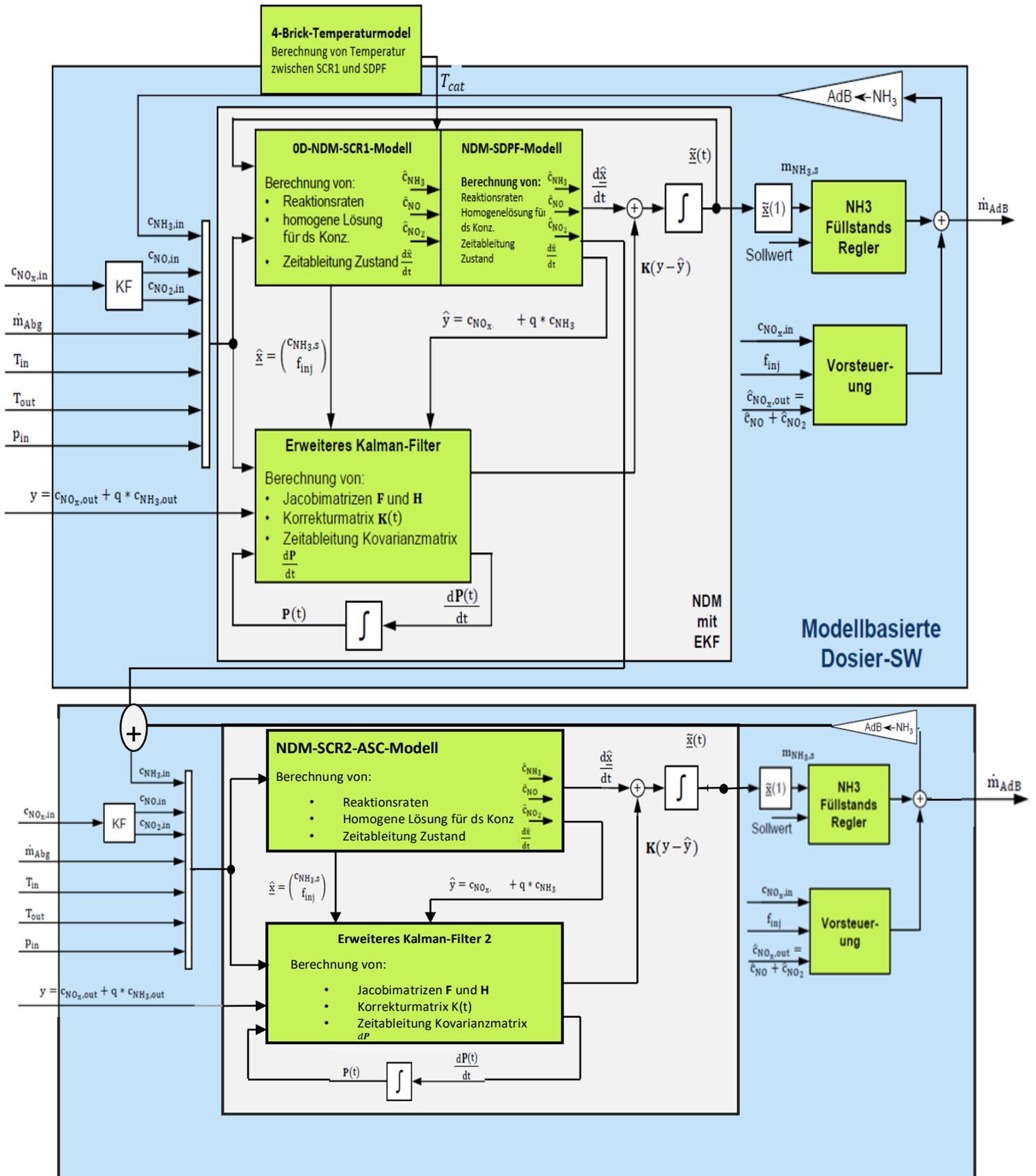


Abbildung 29: Die Struktur der Dosiersoftware

*KF : Kennfeld

8 Validierung und Robustheitsanalyse

Im diesem Kapitel wird der vordere EKF in dem erweiterten System unter unterschiedlichen Fahrbedingungen validiert. Es wird die Robustheit des Systems in Bezug auf Toleranzen untersucht.

8.1 Vergleich der Modellierungsansätze

Nach den Optimierungen ergeben sich gute Parametersätze der jeweiligen Bedatungskonzepte. Zuerst wird der Ausmaß der Ungenauigkeit der beiden Modellierungsansätze für die vordere Komponenten untersucht. Die aus den in Kapitel 6 durchgeführten Optimierungen stammenden Bedatungen werden in der Dosiersoftware eingesetzt und simuliert. Mithilfe der Simulationsergebnisse kann die Frage geantwortet werden, welche Einflüsse Modellungenauigkeiten auf das Systemverhalten hat. Für die Validierung des Modellierungsansatzes wurden zwei Fahrzyklen (WLTC und BAB), die bereits zur Optimierung verwendet wurden, mit dem aus- und angeschalteten EKF simuliert. Es wird geprüft, welcher Ansatz besser die „Realität“ abbilden und das System regeln kann. Da die Katalysatoren zum Test vorbeladen werden müssen, wird der WLTC als Vorkonditionierung benutzt und danach der BAB Zyklus simuliert. Für die Einstellung wird der vordere Katalysator mit der NH₃-Sollbeladung von 2,0g und der hintere Katalysator mit 0,25g gefahren. In der ersten Untersuchung wird das System im Norminalfall bzw. keine Fehleraufschaltung analysiert. Exemplarisch sind die Ergebnisse von der NH₃-Beladung, den Emissionen und den dem EKF zugehörigen Parametern dargestellt. Die Ergebnisse der Validierung können wie folgt gesehen werden.

8.1.1 Simulationsergebnisse des ersten Modellierungsansatzs

- **Ergebnisse im open-loop-Betrieb**

Abbildung 30 zeigt eine Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse zwischen NDM und Axisuite von den vorderen Komponenten im Open-Loop-Betrieb, in dem das EKF ausgeschaltet wird.

Die Verläufe des NH₃-Schlupf deuten wie erwartet an, dass die NH₃-Konzentrationen wegen der Vereinfachung des Modells schlecht abgebildet werden. Beim WLTC weichen die ersten zwei NH₃-Peaks nicht massiv ab. Bis zu Sekunde 1200 entstand noch kein bedeutender Unterschied zwischen Axisuite und NDM. Die Differenz bei dem zweiten NH₃-Peak von ungefähr 50 ppm führt zu einer entsprechenden abweichenden modellierten NH₃-Beladung von 0,1g. Die Abweichung zwischen den Füllständen bleibt unveränderlich bis zum nächsten NH₃-Schlupf. Am Ende des WLTCs ist die Beschleunigungsphase und die thermische Desorption findet statt. In dieser Phase sagt das NDM einen NH₃-Schlupf von circa 100ppm voraus, während Axisuite 300ppm modelliert. Aus diesem Grund wird der modellierte NH₃-Füllstand in diesem Bereich stark beeinträchtigt. Dadurch entsteht eine Abweichung im NH₃-Füllstand von fast 0,5g. Dieser Endfüllstand wird als Startbeladung für den BAB-Zyklus verwendet.

Das gleiche markante Problem ist wieder im BAB zu sehen. Das NDM konnte beim NH₃-Schlupf das physikalische Verhalten des Katalysators nicht nachbilden. Am Anfang des Zyklus kann noch keine Aussage über die Genauigkeit des Modells wegen der schlechten Initialierungsbeladung getroffen werden. Ab Sekunde 200 nähern sich die Beladung aneinander an. Der dritte modellierte NH₃-Schlupf-Peak wird am Ende des Zyklus leicht zeitlich von der Axisuite verschoben. Der Grund dafür liegt an dem Temperaturverlauf. Die für die Desorptionsberechnung verwendete Temperatur ist die Austrittstemperatur am SDPF. Es ist deutlich zu sehen dass die Peaks des NH₃-Schlupfs entstehen, wenn die Peaks der hellbau dargestellten Temperatur angegeben werden. Von der Größe des Schlupfs erreicht der Unterschied bis 100 ppm bei ungefähr 600s. Ab 750s folgt der Gradient des berechneten Schlupfs sogar in die entgegengesetzte Richtung von Axisuite.

Bei den beiden Zyklen gibt es keine verhältnismäßige Abweichung in der NO_x-Emission. Größtenteils kann die NO_x-Emission gut abgebildet werden. Unterhalb 200°C findet keine NO_x-Umwandlung statt und in dieser Phase liegen die NO_x-Verläufe von Axi und NDM exakt aufeinander. Bei dem

Temperaturbereich über 200°C ist es zu erkennen, dass die von Axisuite berechnete NO_x-Emission bei manchen Zeitpunkten höher als die von NDM ist. Bei manchen Zeitpunkten tauchen die Differenz bis zum 100 ppm. Die sind jedoch nicht dramatisch wie beim NH₃-Schlupf, da der Peak des NO_x sehr schmal ist. Deshalb beträgt die unter dem Peak integrierte NO_x-Masse davon eindeutig weniger als NH₃. Diese Abweichungen von NO_x haben einen geringeren Einfluß auf die NH₃-Beladung als von NH₃-Schlupf.

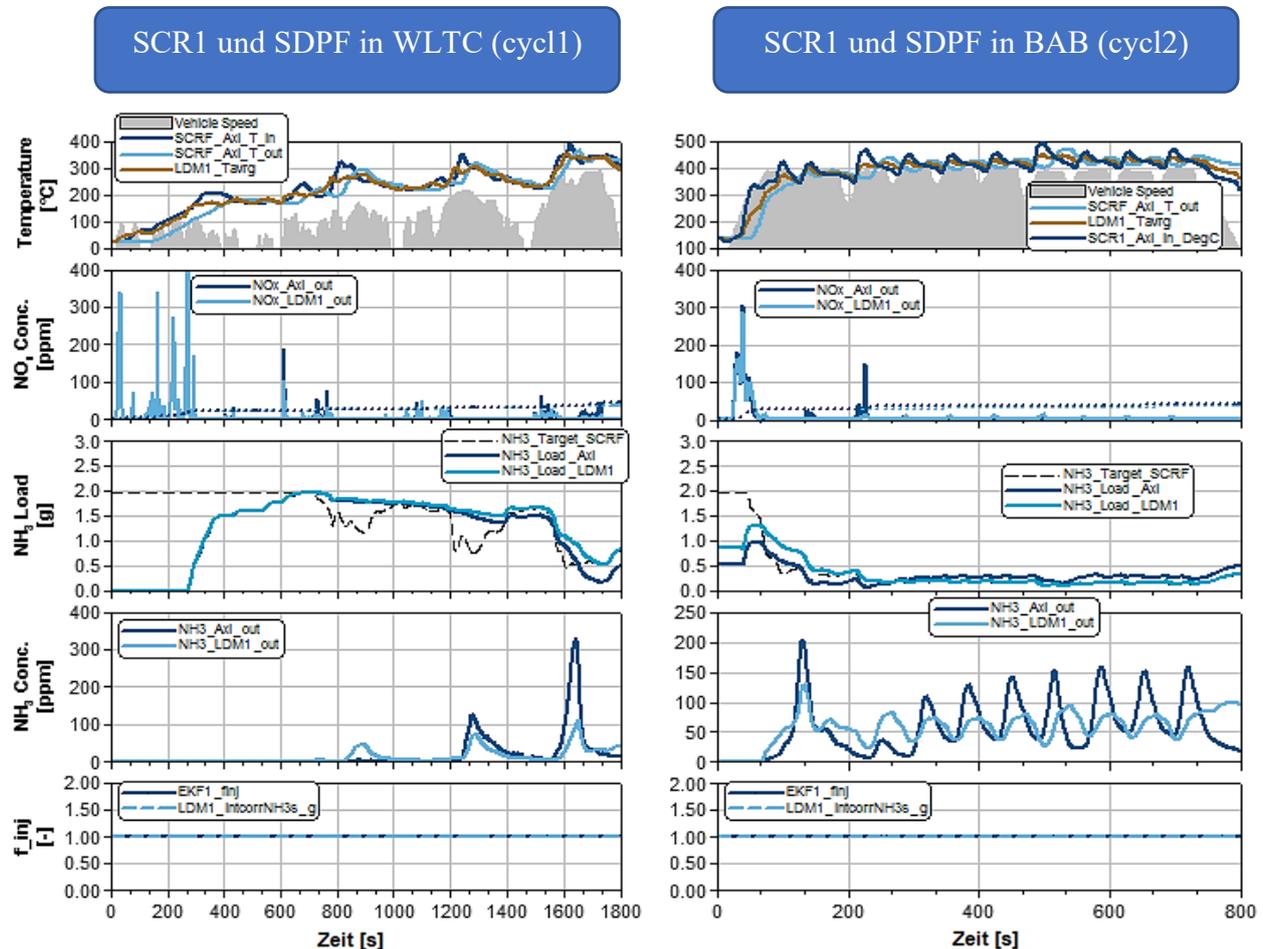


Abbildung 30: Die Simulationsergebnisse der vorderen Komponenten (links: WLTC , rechts: BAB)

• Ergebnisse im closed-loop-Betrieb

Die Simulationsergebnisse des kombinierten Modells wird in Abbildung 31 dargestellt. Zu erkennen ist, dass der modellierte Zustand (hellbau) allgemein keine gute Modellgenauigkeit erreicht, da sich die Simulationsergebnisse zu großen Teilen nicht mit den Ergebnissen des Axisuite-Modells (dunkel blau) decken. Die NDM-Zustände weichen in dem BAB-Zyklus besonders stark gegenüber Axi ab.

Im closed-loop-Betrieb wird das System mithilfe des EKF geregelt. Die Freigabebedingung für das EKF ist abhängig von der Temperatur. Erst ab 180°C wird das EKF angeschaltet, es ist circa ab 400s. Zwischen 400s und 800s greift der EKF in das System nicht ein. Der finj-Wert ist bei Eins gehalten. Danach hat der EKF die erste Abweichung von 30 ppm im NH₃-Schlupf erkannt und die Abweichung als NO_x-Schlupf detektiert. Folgend korrigiert die Beladung leicht nach unten, obwohl die NDM-Beladung erhöht werden soll. Deshalb wurde der Abstand zwischen beiden Füllständen voneinander weiter genommen. Der Adaptionparameter bleibt weiterhin konstant.

Bei 1300 Sekunden kommt der zweite NH₃-Schlupf vor und der EKF hat nochmal die Beladung in die Richtung- NO_x-Schlupf korrigiert. Der finj-Wert sinkt geringfügig ab und dadurch kann das EKF stärker auf die NDM-Beladung zugreifen. Deshalb wird die Differenz am Füllstand vergrößert.

Es ist zwischen 1600s und 1800s am deutlichsten zu erkennen. In den Open-Loop-Ergebnissen wurde eine Abweichung von 200 ppm gezeigt. Laut Axisuite entsteht ein NH₃-Schlupf gleichzeitig zu dem

Anstieg der Temperatur-Flanke. Erst circa 100s später sagt das kombinierte Modell NH₃-Schlupf voraus. Der Schlupf von NDM und Axisuite steigen zeitlich versetzt parallel an. Deshalb vergrößert sich die unüberlappte Fläche zwischen zwei Verläufen, auf der die Korrektur des Modellfüllstands basiert. Wegen der schlechten Bedatung des kombinierten Modells entsteht die zeitliche Verschiebung, die auf die Korrektur beeinflusst hat. Der EKF hat den Füllstand in die Richtung NH₃-Schlupf korrigiert. Durch EKF wird der Füllstand um 0,5g erhöht und der NDM-Füllstand ist deswegen weit von der Solllinie entfernt. Daraus folgt, dass ab dem Zeitpunkt kein AdBlue ins System eindosiert wird. Wegen des NO_x-Umsatz baut der Füllstand ab und der tatsächliche Beladungszustand landet auf 0g. Deshalb wurde der NO_x-Einbruch von 20 mg/km auf 75 mg/km verursacht.

Der NO_x-Einbruch fließt in den Unterbodenkatalysator ein und wird da rechtzeitig vor dem Ausstoß in die Umgebung umgesetzt. Es führt aber dann zu der weiteren Abweichung im zweiten Katalysator.

Es ist ein Norminalfall und die Adaptionsparameter sollten um 1 schwanken, was es nicht der Fall ist.

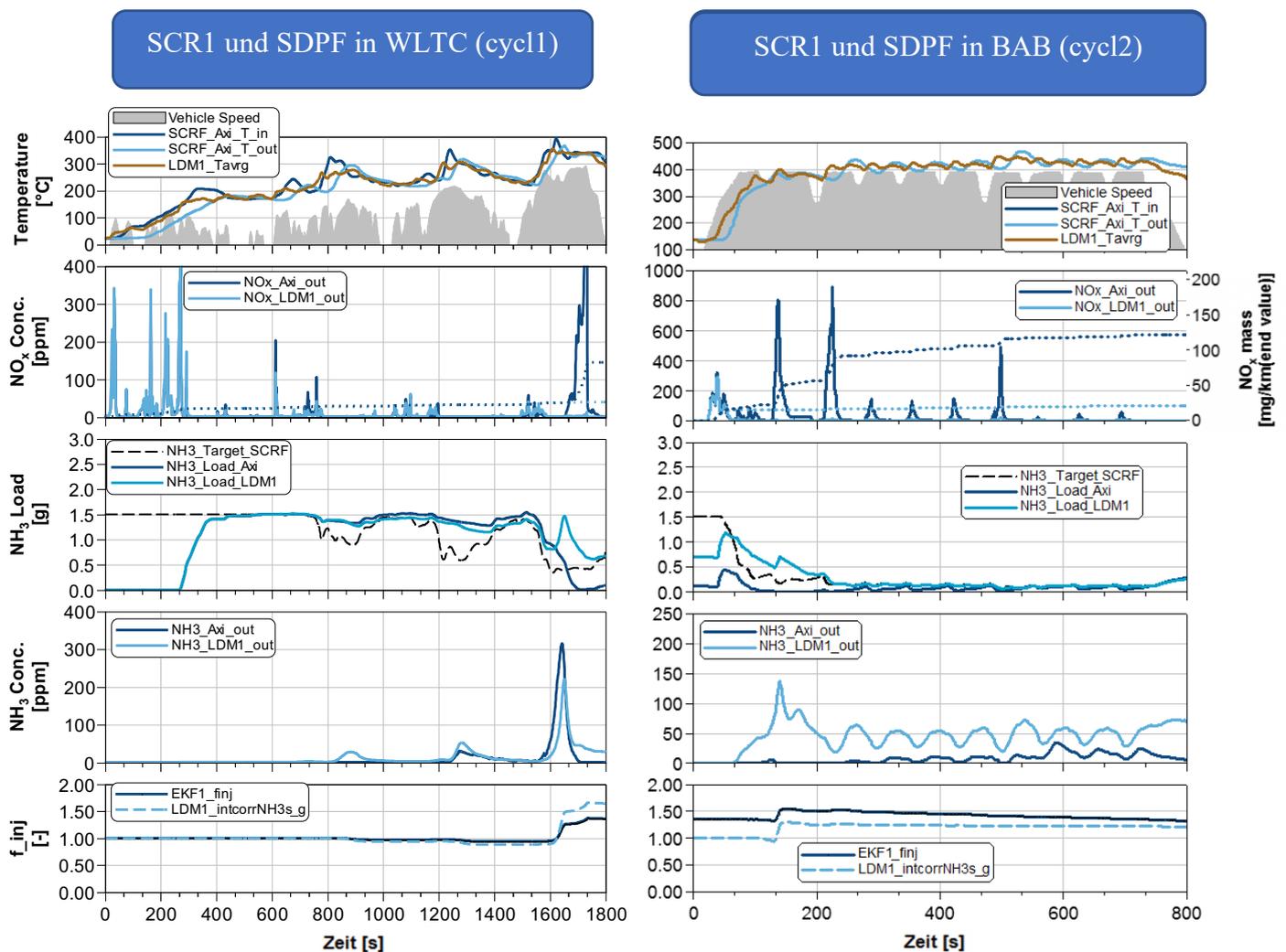


Abbildung 31: Die Simulationsergebnisse der vorderen Komponenten (links: WLTC , rechts: BAB)

Am Ende des WLTC-Zyklus liegt der vordere Beladungsunterschied bei 0,7 g. Es ist schlechter Startpunkt für den nachkommenden Zyklus. Im dem zweiten Zyklus wird der BAB simuliert.

In der Abbildung 31 ist es ersichtlich, dass keine Verläufe des NDMs die von Axisuite folgen.

Der modellierte NH₃-Schlupf liegt mit großem Abstand im Laufe des gesamten Zyklus über dem von Axisuite. Der NH₃-Schlupf von Axi beträgt im ersten Drittel annähernd Null. Später stimmen die Beladung miteinander gut überein, es gibt trotzdem die große Abweichung am Schlupf.

Nicht nur NH₃-Schlupf, sondern auch NO_x-Konzentration kann nicht gut abgebildet werden. Laut der Berechnung des NDM nähert sich die Konzentration von NO_x größtenteils Null, obwohl die „reale“ NO_x-

Konzentration bei manchen Stellen sehr hoch ist. Bevor der EKF angeschaltet wird, liegen beide NO_x-Emissionen aufeinander. Der Grund dafür ist die Temperatur kleiner als 180°C und in diesem Temperaturbereich erfolgt noch kein Umsatz im Katalysator. Bei 130s hat der EKF die Beladung in die falsche Richtung (NH₃-Schlupf) korrigiert und die NDM-Beladung wird um 0,3 g erhöht. Danach sinkt der *finj*-Wert moderat ab. Die Dauer des Zyklus reicht nicht aus, dass der Adaptionsparameter wieder auf Eins zurück korrigiert, obwohl der EKF die große Abweichungen in sowohl NH₃-Schlupf als auch NO_x-Emission schnell eingreifen sollte.

8.1.2 Simulationsergebnisse des zweiten Modellierungsansatzs

- **Ergebnisse im open-loop-Betrieb**

Die Ergebnisse der zwei getrennten 0-dimensionalen Modelle zeigt der Erwartung nach das bessere Abbilden mit Vergleich mit dem kombinierten Modell (siehe. Abbildung 32) an.

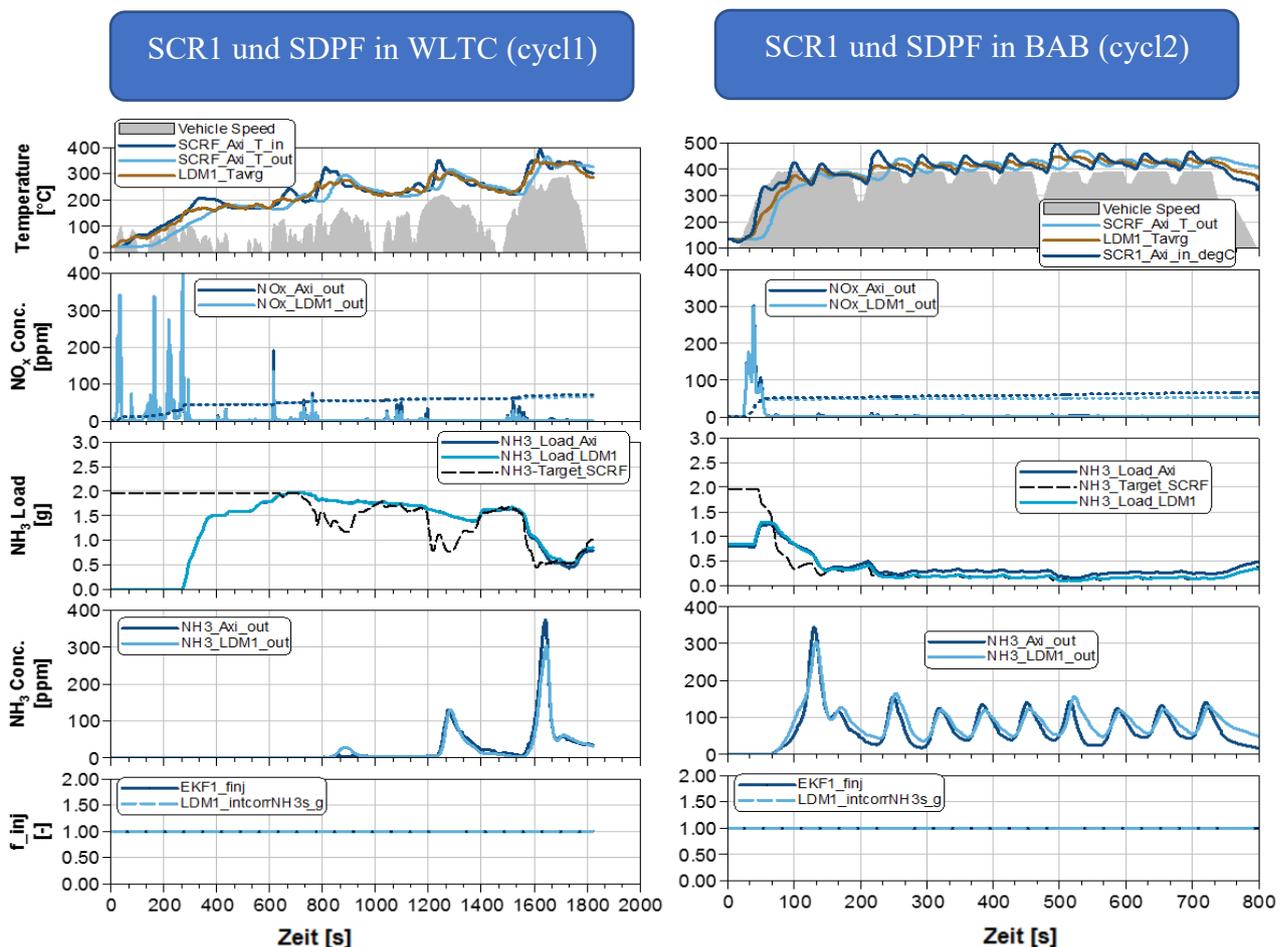


Abbildung 32: Vergleich der Simulationsergebnisse des Axisuite-Modells und der angepassten Getrennte-NDMs

Die in der Abbildung 32 dargestellten Ergebnisse zeigen in allen Bereichen der Zyklen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen NDM und Axisuite. Die modellierten Verläufe haben ähnliche Dynamik, die Peak-Höhe und minimale Extrempunkte wie die Axisuite. Daraus resultiert ein gutes Abbilden der Füllbeladung. Die Modellbedatung erreicht eine gute Genauigkeit. Beim WLTC gibt es weiterhin Abweichungen im NH₃-Schlupf und den NO_x-Emission. Im BAB sind die einzig sichtbaren Abweichungen im NH₃-Schlupf zu erkennen, mit Auswirkung auf die NH₃-Beladung. In den kumulierten NO_x-Massen ist eine leichte Unterschätzung der Emissionen durch das Modell gegeben. Deshalb liegt der integrale Wert von NO_x-Masse pro km dementsprechend niedriger als Axisuite.

Die Abweichungen stammen meistens aus der Vereinfachung des 0D-Modells und die sind unvermeidbar.

Die Parameter und dieser Modellierungsansatz haben eine zufriedenstellende Genauigkeit des Modells gegenüber dem anderen Ansatz.

• Ergebnisse von EKF1 im closed-loop-Betrieb

Die Simulationsergebnisse des zweiten Modellierungsansatzes im closed-loop-Betrieb sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Zu großen Teilen stimmen das NDM und Axisuite überein. Es gibt in den beiden Zyklen keine auffällige Abweichung, die einen starken Einfluss auf das System haben.

In dem Zeitraum zwischen 1600s und 1800s im WLTC entstehen beim NH₃-Schlupf kleine Abweichungen von circa 20 ppm. Die NO_x-Emissionen weichen vorrangig bei größeren NO_x-Peaks ab. Der NDM-Endwert der NO_x-Masse liegt nur 5 mg/km unter dem Wert von Axisuite. Der Eingriff des EKF's ist in den genannten Stellen nur sehr geringfügig. In der Open-Loop-Simulation (siehe Abbildung 32) haben die Emissionen im WLTC nach der Optimierung schon sehr gut mit Axisuite passen. Deshalb sollte der EKF in diesem Fall nicht korrigieren und der *finj*-Wert sollte in dem gesamten Zyklus nur um eins schwanken.

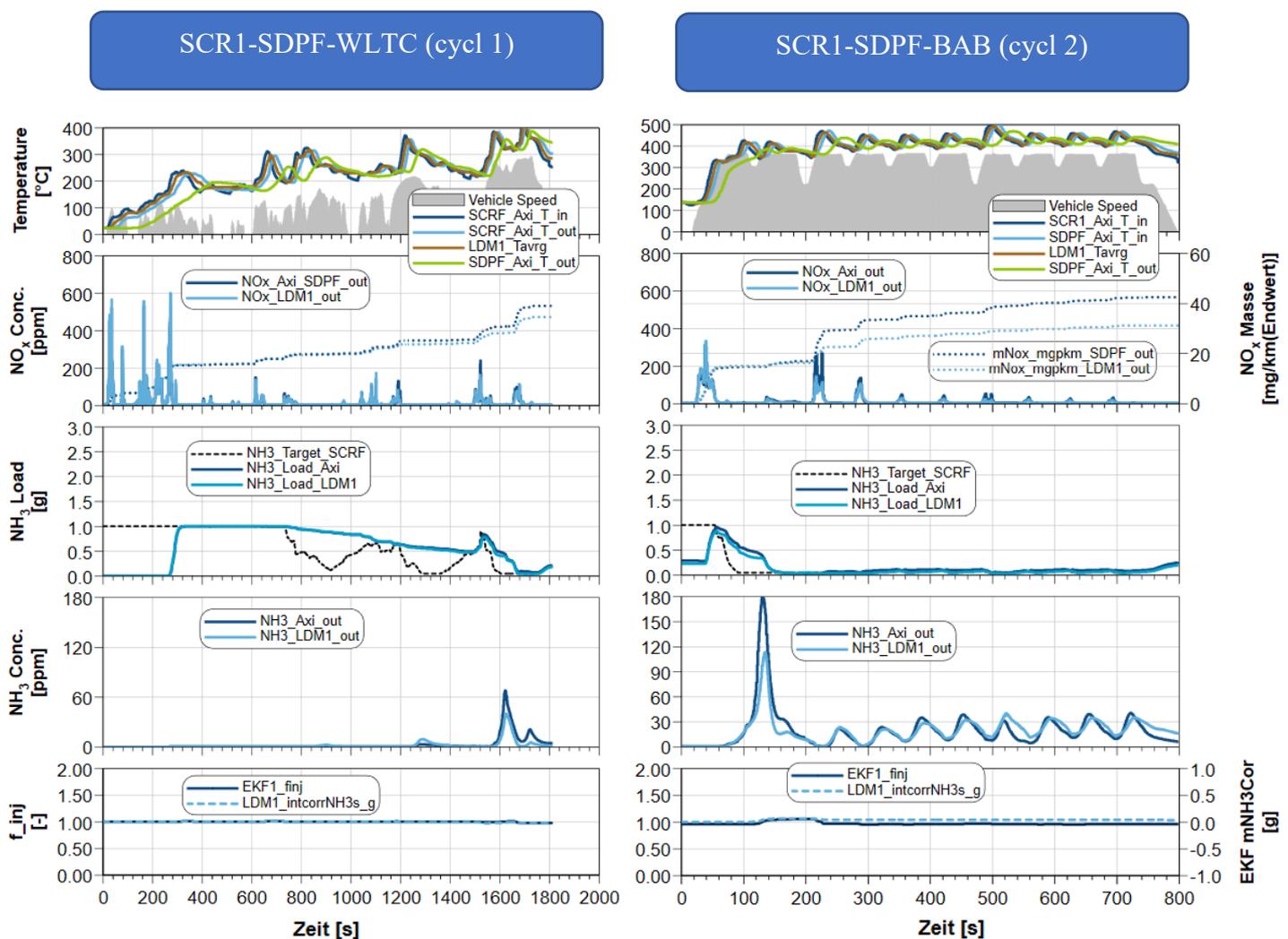


Abbildung 33: Simulationsergebnisse von EKF1 im Normalfall (links: WLTC, rechts: BAB)

Beim BAB taucht ein relativ großer Unterschied im NH₃-Schlupf von 60 ppm am Beginn des Zyklus auf. In dem Moment zwischen 100s und 200s erreicht der NO_x-Umsatzrate 100% und keine NO_x-Emission nach SDPF entsteht. Gleichzeitig gibt es einen hohen NH₃-Schlupf. Deswegen hat der EKF sofort den Adaptionparameter und die korrigierte NH₃-Menge nach oben korrigiert. Ab dann liegen die Beladungen gut aufeinander.

Bei dem 300s Zeitpunkt weicht die modellierte NO_x-Emission um 100 ppm ab. Es ist ersichtlich durch die integrierte NO_x-Masse, dass die Performance dadurch von 15 mg/km auf 30 mg/km verschlechtert wird. Der Unterschied wurde erkannt deshalb sinkt der Adaptionparameter wieder auf Eins. Im Durchschnitt ist die Übereinstimmung überwiegend.

- **Zusammenfassung**

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der zweite Modellierungsansatz besser das Verhalten der vorderen Katalysatoren abbilden kann. Bei dem ersten Modellierungsansatz weist deutlich eine schlechtere Übereinstimmung zwischen NDM und Axisuite an. Aus den Simulationsergebnissen ist es zu sehen, dass das kombinierte Modell nicht die Emissionen von zwei Katalysatoren abbilden kann darstellen kann. Der EKF reagiert deutlich auf die Ungenauigkeit des Modells und korrigiert sehr stark, obwohl kein Fehler aufgeschaltet ist. Deshalb ist der erste Modellierungsansatz für die vordere Komponente (SCR1 und SDPF) nicht zielführend. Hingegen kann der zweite Modellierungsansatz im erweiterten System die Zustände gut abbilden, wodurch die Zustandsschätzung richtig durchgeführt werden kann. Das EKF muss bedingt durch die hohe Übereinstimmung des NDM und Axisuite nur geringfügig adaptieren.

8.2 Validierung des vorderen EKF's

8.2.1 Auswirkung von Dosierstörungen

Die Auswirkung einer Dosierstörung mit angeschalteten EKF1 wird wie folgt genauer betrachtet und dargestellt. In Realität ist es nicht ungewöhnlich, dass das Dosierventil die gewünschte AdBlue-Menge nicht dosieren kann. Da die Dosierventilspitze sich im Abgasstrom befindet, wird das Ventil aufgrund von hohen Temperaturen stark belastet. Das Reduktionsmittel im Ventil wird zum Kochen gebracht und das führt zu einer Zumesstgenauigkeit. [Tchöke.H et.al, 2018, S896].

Die Unterdosierung kommt in den folgenden Fällen vor. Das AdBlue im Tank ist aus Versehen mit Wasser verdünnt. Die großen AdBlue-Tropfen haben eine kurze Aufenthaltsdauer im Abgas und können nicht verdampft werden [Tchöke.H et.al, 2018, S.895]. Stattdessen entsteht die unerwünschte Tropfen-Ablagerung, die auch die Dosierung beeinflussen kann.

Im Gegenteil kann eine Überdosierung verursacht werden, wenn das Dosierventil nicht mehr ordentlich schließen kann.

Überdosierung

Um die Frage zu beantworten, wie viele Zyklen erforderlich sind, damit der EKF1 den Fehler des gestörten Systems kompensiert, werden die Simulationen von WLTC und RDE-Thyrow mit jeweils zehn Durchläufen durchgeführt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden in den Ergebnissen nur die ersten fünf Zyklen und der letzte Zyklus der insgesamt zehn hintereinander simulierten WLTCs dargestellt. Die Abbildung 34 zeigt die Ergebnisse der NH₃-Beladung, des NO_x-, NH₃-Schlupf und des

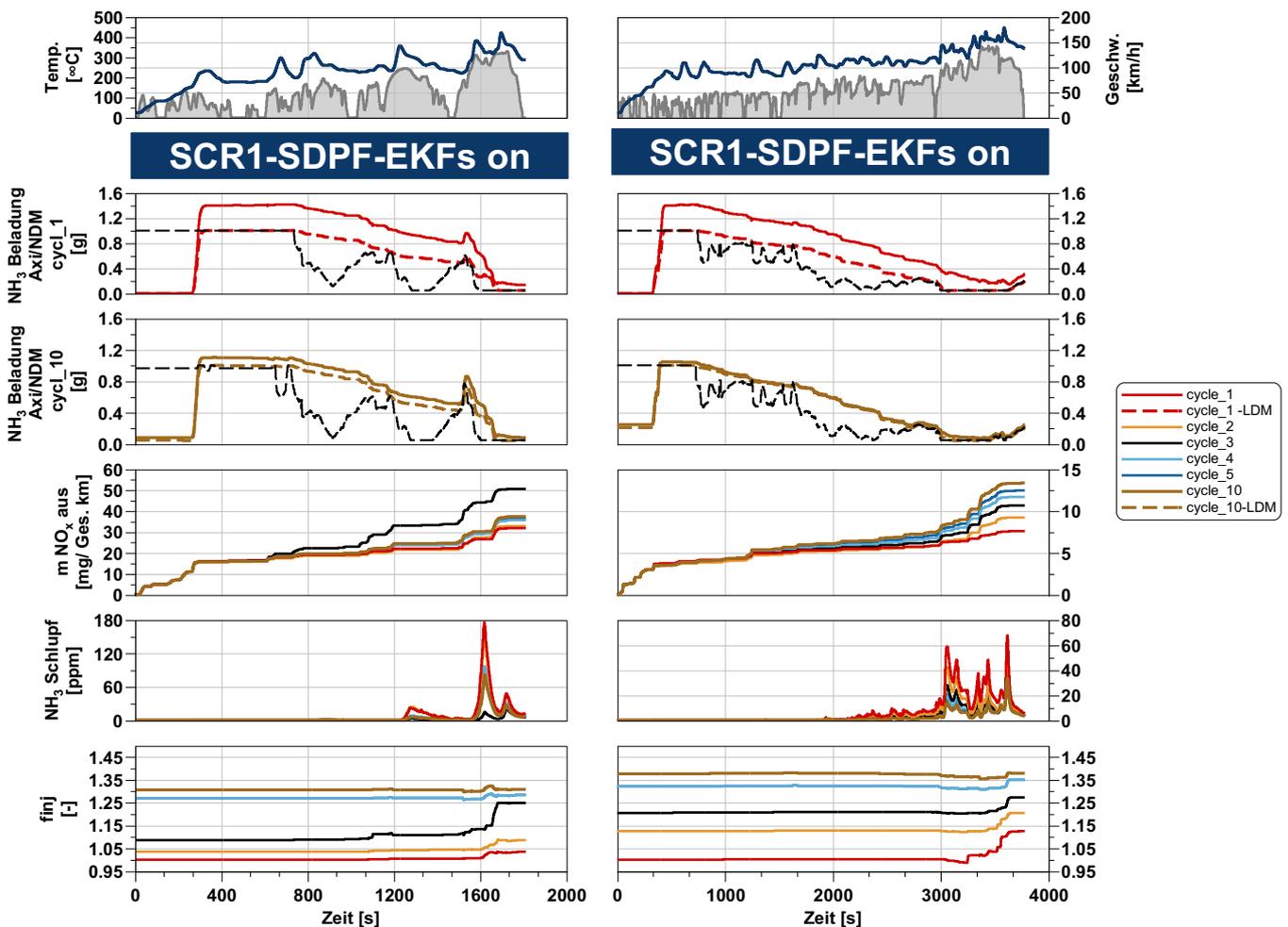


Abbildung 34: Fehlerdetektion im Überdosierungsfall (links: WLTCx10, rechts: RDE-Thyrowx10, --- LDM, — Axisuite)

Adaptionsparameters $finj$ bei Überdosierung. Alle durchgestrichenen Linie präsentieren die Axisuite-Verläufe und die gestrichenen Linie sind die modellierte Verläufe.

Es ist im Diagramm der NH_3 -Beladung von Axisuite/LDM im ersten Durchlauf zu erkennen, dass eine deutlich große Abweichung zwischen dem Axisuite-Referenzmodell und dem nulldimensionalen Modell berechnete Füllstand in den beiden Zyklen entsteht. Da der Injektor bedingt durch die Drift von +40% mehr AdBlue eindosiert, steht der tatsächliche Füllstand (Axisuite) im ersten Durchlauf 40% über dem NDM. Als Folge entsteht ein hoher NH_3 -Schlupf (rote Linie).

Laut dem Diagramm von $finj$ steigt der Wert des Adaptionsparameters im WLTC in jedem Zyklus an. Der EKF greift mit steigendem Parameter in das NDM ein. Zum einen wird der Modellfüllstand erhöht und zweitens ein höhere NH_3 -Emission am Eingang des NDM bedingt durch $finj$ berücksichtigt (siehe Gleichung 34). Daraus folgt dass das System schließlich weniger AdBlue fordert, wodurch die Überdosierung kompensiert wird. Dementsprechend nähert sich die NDM und Axisuite-Beladung aneinander an. Der EKF bewirkt, dass der Axisuitefüllstand reduziert und an das NDM angepasst wird, damit dieser nahe dem Sollwert ist. Ab dem vierten Durchlauf verändert sich der Adaptionsparameter nur noch minimal. Im zehnten Zyklus nähert sich der Adaptionsparameter an 1,35. Der EKF hat den Fehler nicht vollständig ausadaptiert aber die Störung nahezu kompensiert. In dem zehnten Durchlauf stimmt die modellierte Beladung mit der Axisuite-Beladung überein.

Im RDE-Thyrow ist es in den Ergebnissen zu sehen, dass der Adaptionsparameter $finj$ ab 5te Zyklus auf einem Wert 1,4 verbleibt und damit den 40% Überdosierungszustand des Modells repräsentiert. Deshalb liegen die beiden Beladungen ausgezeichnet aufeinander.

Unterdosierung

Das Verhalten eines um 40% Unterdosierungsfalls wird im Folgenden untersucht. Weil der Injektor 40% weniger dosiert als es sein sollte, liegt der reale Füllstand im Laufe des ersten Zyklus unter der Soll-

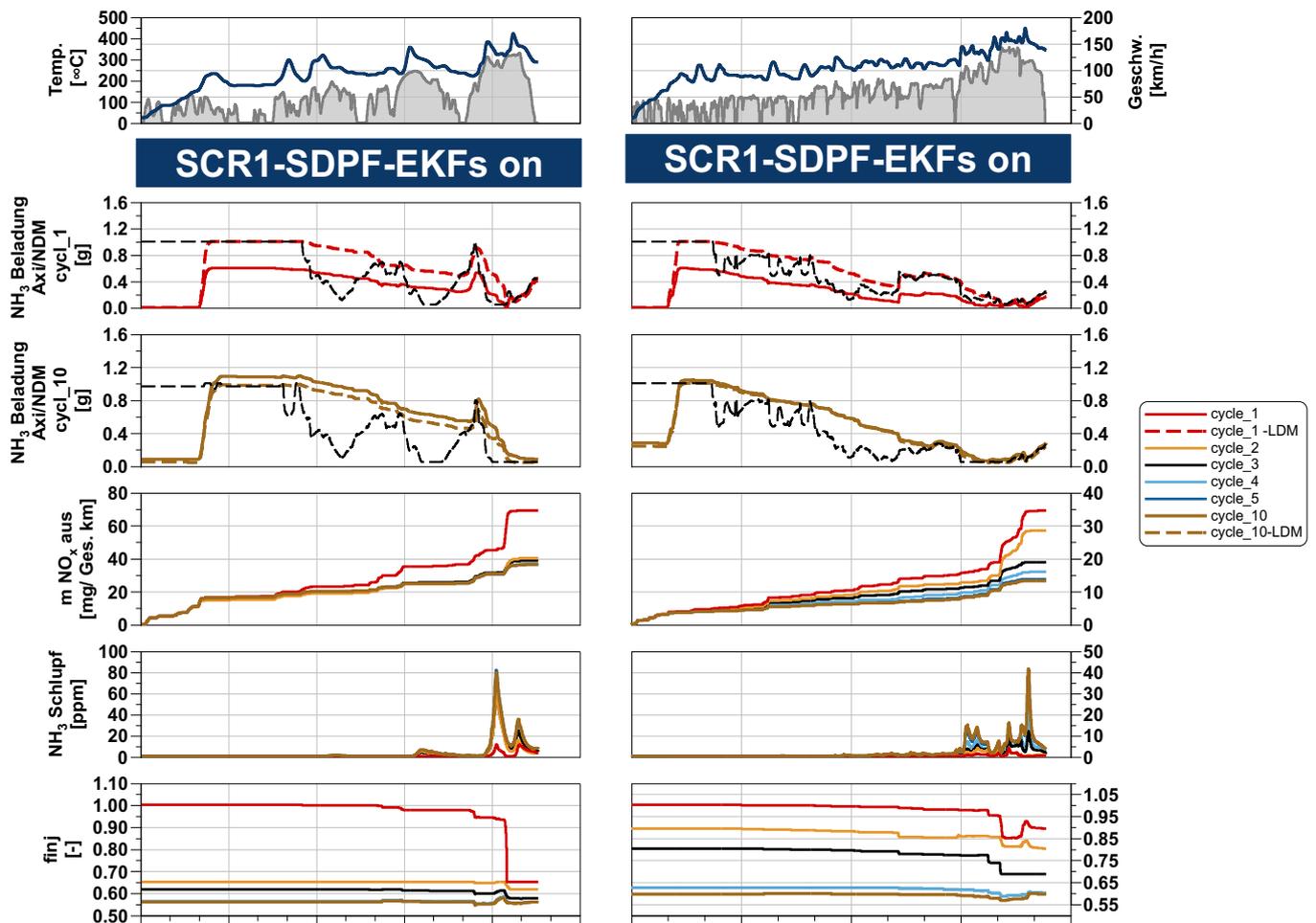


Abbildung 35: Fehlerdetektion im Unterdosierungsfall (links: WLTCx10, rechts: RDE-Thyrowx10)

Linie. Daraus resultiert eine schlechte NO_x-Umwandlungsrate gegenüber dem Norminalfall.

Im WLTC hat der Adaptionfaktor ab circa 1600s des ersten Zyklus sehr stark auf das gestörte System eingegriffen, da der finj -Wert von dem Initialisierungswert 1 auf 0,65 runtergesprungen ist. Der Grund für die aggressive Korrektur liegt an dem NO_x-Einbruch, der in der gleichen Zeit von circa 40 mg/km auf 70 mg/km angestiegen ist. Mithilfe des sinkenden Adaptionparameters sinkt der geschätzte Füllstand an und die NH₃-Eingangskonzentration soll erhöht werden. Infolgedessen wird mehr AdBlue über den Regler und die Vorsteuerung verlangt, dadurch wird die Unterdosierung kompensiert. Anschließend steigt der Axisuite-Füllstand an. Ab dem dritten Zyklus nähert sich der Adaptionfaktor 0,6 an und der EKF hat den Fehler komplett kompensiert. In dem darauffolgenden Zyklus fällt der finj -Wert geringfügig unter 0,6 und daraus ergibt sich ein minimaler Unterschied zwischen Axisuite und NDM in dem zehnten Zyklus.

Beim RDE-Thyrow sinkt der Parameter moderat, da es kein kritischen NO_x-Einbruch wie im WLTC gibt. Erst ab dem vierten Zyklus bleibt der Wert stabil auf 0,6 und der EKF hat den Fehler ausadaptiert. Aus diesem Grund verbessert sich die NO_x-Performance langsam und die Verläufe ab dem viertem Zyklus nähern sich dem Norminalfall an. Die finj -Werte zwischen 4.Zyklus und 10.Zyklus liegen nahezu aufeinander. In der Abbildung 35 kann es erkannt werden, dass der berechnete Füllstand mit Axisuite übereinstimmt.

Aus den beiden Fällen kann es festgestellt werden, dass der EKF1 eine Über- oder Unterdosierung von +/-40% kompensieren kann.

8.2.2 Auswirkung von Sensorstörungen

Im EKF sind die NO_x-Sensoren allgemein ein entscheidender Sensor, der für Überwachung und Steuerung eingesetzt wird und deren Informationen wichtig für die Berechnung der Jacobi-Matrizen ist. Aus den unterschiedlichen Gründen erfasst der Sensor ungenaue Messdaten. Von den Symptomen der Alterung wie z.B. ein Gain und/oder Offset sind die Messdaten des NO_x-Sensors beeinflusst. Diese genannten Faktoren sind unvermeidbar. Aufgrund der Problematik ergibt sich folgende weiterführende Frage, wie sich das System unter NO_x-Sensorstörung mit angeschalteten EKF1 verhält. Für den folgenden Teil wird nur der Zertifizierungszyklus WLTC in Betracht genommen.

Eingangsseitige NO_x-Sensorstörung

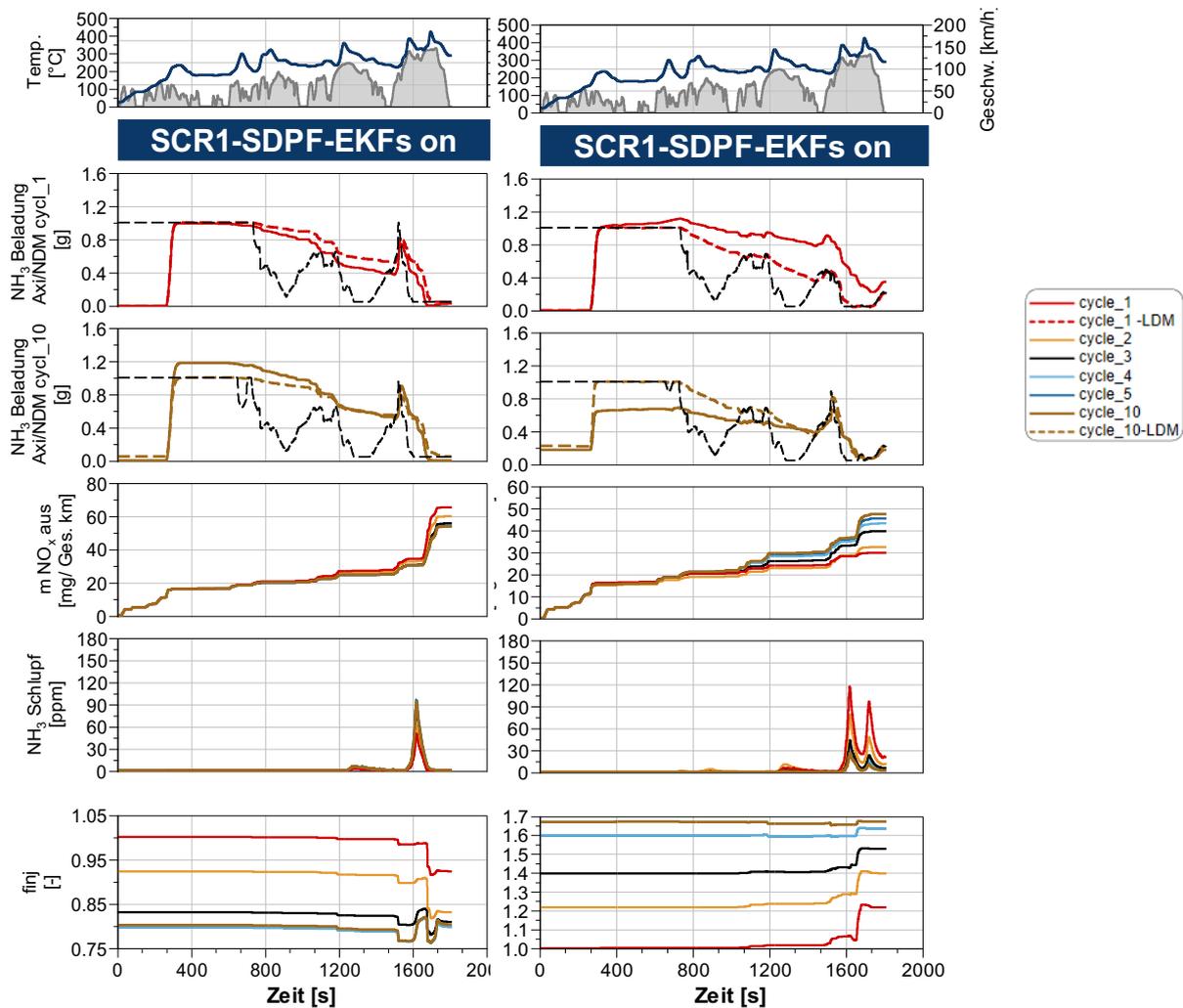


Abbildung 36: EKF-Korrektur bei Drift des eingangsseitigen NO_x-Sensors im WLTCx10 (links: -25% Gain, rechts: 25% Gain)

Der NO_x-Sensor vor dem SCR1 schickt eine falsche Eintrittskonzentration von NO_x an die Dosiersoftware und es führt zu einer veränderlichen Dosiermenge. Es wird in zwei Fällen unterschieden. Die Spalte auf der linken Seite der Abbildung präsentiert die Ergebnisse der -25% Gain-Sensorstörung und die Spalte auf der rechten Seite die Ergebnisse der 25%-Gain-Sensorstörung.

In dem ersten Fall wird der Sensor verdriftet. Er hält einen Offset von -25ppm und die Messwerte sinken ab 100 ppm um -25% des tatsächlichen Werts. Das Verhalten des EKF1 in diesem Fall ist ähnlich wie der Unterdosierungsfall des ersten AdBlueinjektors. Der Sensor misst einen geringeren Messwert der NO_x-Eintrittskonzentration und dosiert dementsprechend weniger ein. Der Dosierbedarf wird nicht gedeckt und der Axisuite-Füllstand liegt die meiste Zeit unter dem NDM-Füllstand. Es führt zu einem NO_x-Anstieg von 30 mg/km auf über 60 mg/km. Deshalb sollte der EKF1 auf Basis des NO_x-Schlupfs

mit dem sinkenden Adaptionsfaktor korrigieren. Anhand dieser Simulation wird deutlich, dass der EKF1 richtig funktioniert hat.

In dem zweiten Fall hält der rechte WLTC umgekehrt einen Offset von 25ppm zwischen 0-100 ppm. Ab einer Konzentration von 100 ppm wird der Messwert nicht mehr von dem Offset sondern von einem Gain-Faktor beeinflusst. Der Gain-Faktor liegt bei 1,25. Dieser Faktor geht multiplikativ in die Eingangskonzentration von NO_x ein. Deswegen steigert sich der Messfehler um 25% des wahren Werts. Eine höhere Eintrittskonzentration gegenüber der realen Emission wird in der Dosiersoftware verwendet. Aus diesem Grund fordert die Software mehr AdBlue als es sein sollte und der hohe NH₃-Schlupf kommt zustande. Es führt dazu, dass die Axisuite-Beladung über der NDM-Beladung steht. Laut der Abbildung 36 rückt der finj-Wert immer nach oben und das NDM wird auf Basis des NH₃-Schlupfs korrigiert. Im NDM wird ein höhere AdBlue-Menge durch den Adaptionsfaktor berücksichtigt. Daraus wird der modellierte Füllstand nach oben korrigiert. Die Füllstände liegen im 10. Zyklus trotzdem nur am Ende des Zyklus übereinander. Der Fehler wurde nicht kompensiert, jedoch erreichen die Emissionen und der NH₃-Schlupf beim zehnten Zyklus relativ den Normalfall-Wert.

Ausgangsseitige NO_x-Sensorstörung

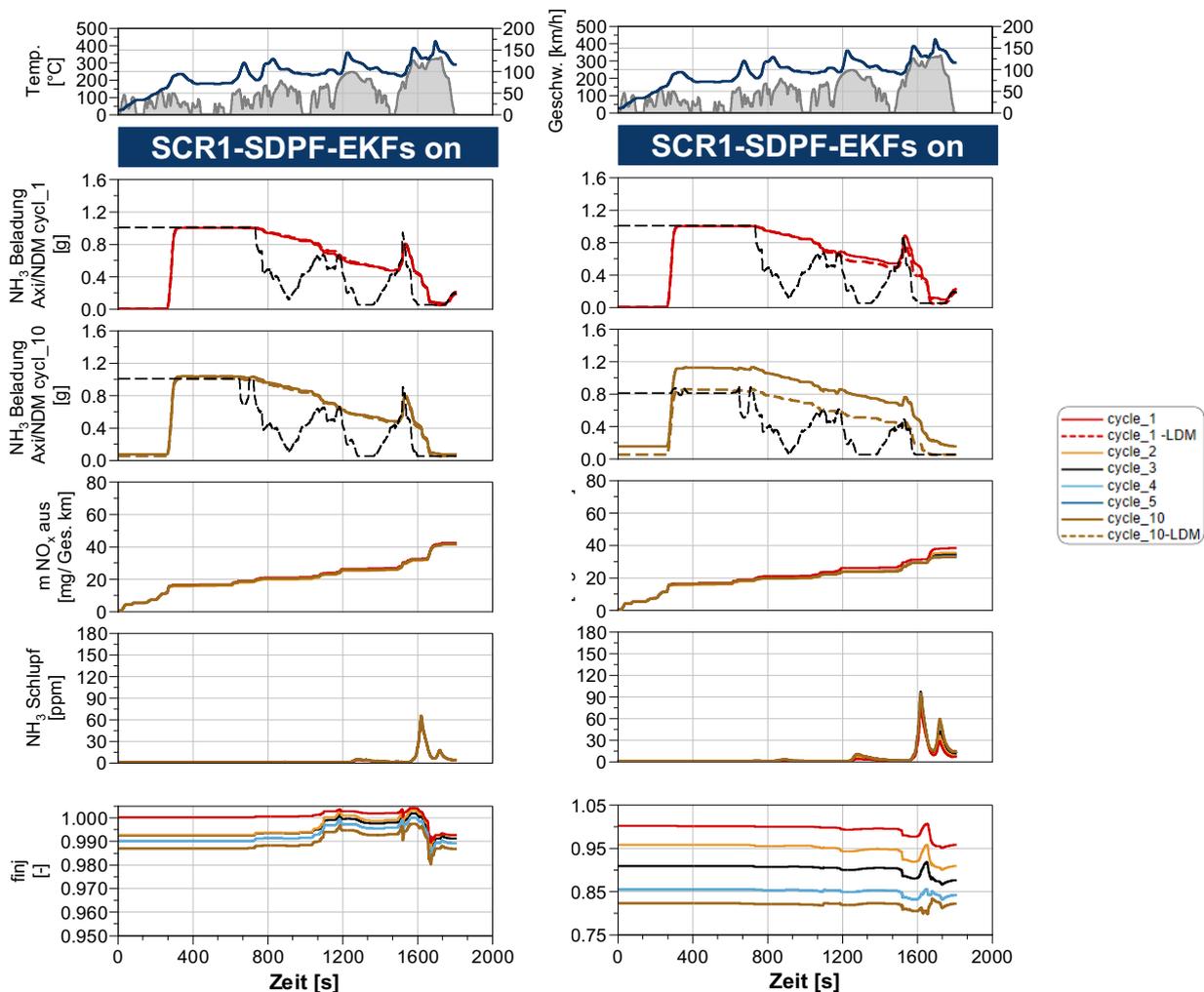


Abbildung 37: Die EKF-Korrektur bei der Verdriftung der ausgangsseitigen NO_x-Sensor im WLTCx10(links: -25% Gain, rechts: 25% Gain)

Die ausgangsseitige NO_x-Sensorstörung hat bei dem Open-Loop-Betrieb kein Einfluss auf der Dosiermenge. Diese Störung hat jedoch eine bedeutende Auswirkung auf den EKF1. Die Messdaten nach dem SDPF werden zur Füllstandsschätzung verwendet und sind sehr aussagekräftig, wie der EKF den Füllstand korrigieren soll. Basierend auf dem Unterschied zwischen geschätzten und gemessenen Werten wird die Korrektur des Füllstandes (siehe Gleichung 74) berechnet. Wegen der Driftung der NO_x-Sensor

nach SDPF korrigiert das EKF1 fehlerhaft. Die Störung dieses Sensors bringt viele Nachteile für den EKF1. Im Gegenteil wird der fehlerhafte Messdaten nach SDPF im open-loop Betrieb nicht beeinflusst, da die Messdaten nach SDPF nicht verwendet wird. Es ist bei dieser Störung zu erwarten, dass die Ergebnisse durch das EKF verschlechtert werden.

In dem ersten Fall, wo der Sensor einen Offset von -25 ppm und einen Gain von -25% hält, ist es in Ergebnissen zu sehen, dass die Adaptionparameter sich nur leicht zwischen 0,985 und 1 bewegen. Da das AdBlue bei dieser Störung richtig eindosiert wird, sollte der Adaptionparameter ungefähr bei 1 bleiben. Der EKF1 hat in dem Fall richtig korrigiert. Deswegen treffen sich die NO_x-Emission, NH₃-Schlupf und die Beladung im Laufe der zehn Zyklen identisch aufeinander. In diesem Fall weichen die Verläufe seit dem ersten Zyklus nie so richtig ab, was bedeutet, dass die NO_x-Sensorstörungen keinen großen einfluss hat.

Bei der Störung von 25% hat der EKF1 die Beladung verschlechtert. In dem ersten Zyklus liegen die Beladungen von Axisuite und NDM übereinander. Hingegen weicht die modellierte Beladung in dem zehnten Zyklus stark von der Axisuite ab und die Differenz erreicht bis zu 0,4g. Anhand des Diagrammes kann es festgestellt werden, dass die Abweichung durch den Adaptionfaktor verursacht wird. Der EKF1 hat auf Basis des NO_x-Schlupfs korrigiert. Deshalb sinkt der finj-Wert stetig ab. Nach dem zehnten Durchlauf beträgt der Adaptionfaktor nur noch 0,82. Es führt dann dazu, die Axisuite-Modellbeladung durch den EKF erhöht wird und deutlich über dem Sollwert liegt. Obwohl der Abstand zwischen NDM und Axisuite weiter auseinander gezogen wird, liegen die NO_x und NH₃-Verläufe noch sehr gut aufeinander.

Zusammenfassung

Aus den dargelegten Simulationsergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen. Der EKF von dem erweiterten System kann unter unterschiedlichen Störungsfällen gut die Füllstandsschätzung durchführen. Bei den Verdriftungsfällen werden die Füllstände und Emissionen gewährleistet. Der EKF hat auch erfolgreich die eingangsseitige Sensorstörung kompensiert. Hingegen wird die Zustandsschätzung bei der ausgangsseitige Sensorstörung durch den EKF verschlechtert. Nach dem vierten Durchlauf stimmt das NDM überwiegend mit Axisuite überein. Mithilfe des Initialisierungswerts von P_0 erreicht das System eine gute Kompromiss zwischen der Adaptiongeschwindigkeit und der Stabilität des Systems. Wenn das System zu lange zum Korrigieren braucht, führt es zu langen Phasen, wo entweder eine schlechte NO_x-Umsatzrate oder einem hohen Ausstoß des NH₃ herrscht. Umgekehrt kann eine zu schnelle Korrektur starke Überschwingen oder Instabilität des Systems verursachen.

8.3 Validierung des hinteren EKFs

Das zweite Dosierventil befindet sich am hinteren Bereich des ANBs, wo die Temperatur niedriger ist. Deswegen wird er weniger davon belastet und die Wahrscheinlichkeit der Verdriftung ist niedriger als das Vordere. Trotzdem besteht die Gefahr, dass die Störungen in dieser Stelle vorkommen. In diesem Kapitel werden die Simulationsergebnisse von den hinteren Komponenten im Closed-Loop-Betrieb vorgestellt. Zwei Driftszenarien des Dosierventils werden diskutiert. Sie sind $\pm 40\%$ Überdosierung- und Unterdosierungsfälle. Um das Verhalten der Dosiersoftware zu untersuchen, werden die zwei Zyklen (WLTC und RDE-Thyrow) verwendet. Der WLTC wird wie im vorherigen Teilkapitel als der Vorkonditionierungszyklus genommen und der RDE-Thyrow wird als nächstes simuliert.

• Ergebnisse von EKF2 im closed-loop-Betrieb

Im ANB positioniert ein weiterer NO_x-Sensor nach dem ASC. Das generische Axisuite-Modell weist einen geringsfügigen NH₃-Schlupf nach ASC an, da die NH₃-Konvertierung durch die Oxidationsreaktionen stattfindet. Aus diesem Grund führt es dazu, dass der NO_x-Schlupf hinter SCR2 geringer als hinter ASC beträgt. Die Bedeutung des kombinierten Modells von SCR2-ASC ist durch die Modellvereinfachung nicht vollständig physikalisch-sinnvoll bedatet und kann die aus NH₃-Schlupf produzierte NO_x-Konzentration grundsätzlich nicht modellieren. In den unterliegenden Untersuchungen

werden die negative Einflüsse der Modellvereinfachung analysiert. Folgenden werden die Ergebnisse von Driftsimulation mit angeschalteten EKF2 angezeigt.

Überdosierung

Beim Überdosierungsfall wird das AdBlue um 40% mehr ins System eindosiert. Im WLTC beträgt der Axisuite-Füllstand dementsprechend 40% über dem NDM-Füllstand. Eine Überdosierung führt zu einer guten NO_x-Umsatzrate, wo die NO_x-Emission stark abgebaut wird. Die NO_x-Masse pro km hinter dem SCR2 liegt bei circa 20 mg/km. Hingegen verursacht die Überdosierung einen Austritt der großen NH₃-Menge. In den letzten 200s des WLTC-Zyklus entsteht ein großer NH₃-Schlupf, der bis zu 400 ppm erreicht. Der NH₃-Schlupf wird jedoch durch ASC überwiegend zu NO_x oxidiert. Dieser Effekt resultiert hinter ASC einen starken Anstieg der NO_x-Masse, die von 20 mg/km auf 30 mg/km zunimmt. Der ausgangsseitige NO_x-Sensor misst in dieser Stelle die gesamte Emissionen von NO_x und NH₃. Deswegen erhöht sich die gemessene Daten und geht in die Messgleichung des EKF2s ein. Die Differenz zwischen dem geschätzten und gemessenen Messwert vergrößert sich. Der NDM behauptet jedoch, dass kein NH₃-Schlupf und kein NO_x-Emission am Tail-Pipe ausstoßt. Aus diesem Grund könnte es zu einer fehlerhaften Korrektur führen. Im schlimmsten Fall detektiert das EKF2 bei der Überdosierung den NH₃-Schlupf als NO_x-Schlupf. Als Folge wird zwangsläufig mehr AdBlue in das System eindosiert und die Situation wird weiterhin verschlechtert.

In der Abbildung 38 ist es zu erkennen, dass die Adaptionparameter während der Zyklusdauer auf dem Initialwert 1 verbleibt und der NH₃-Füllstand trotz einer Unterschied von 0,5g nicht berichtigt wird.

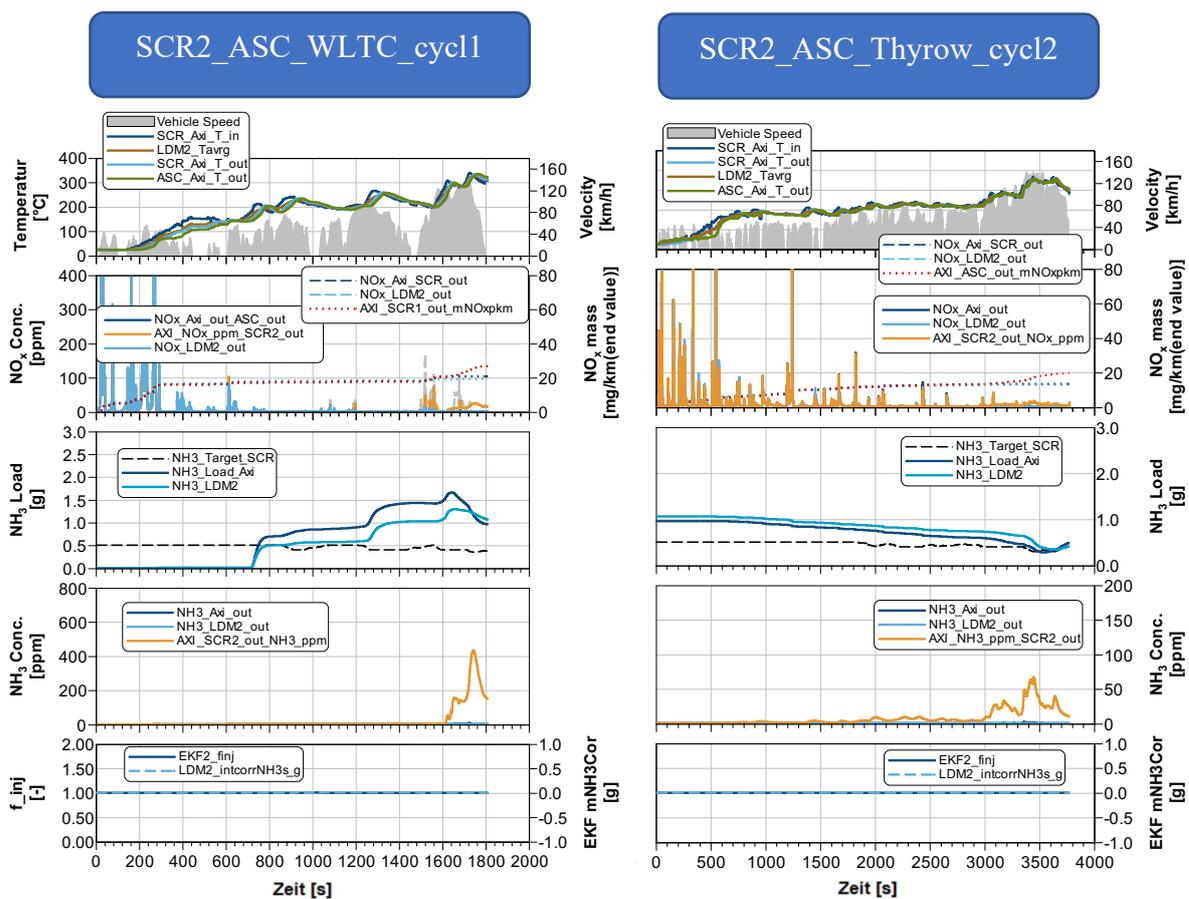


Abbildung 38: Die Überdosierungsfälle mit dem Sensor hinter ASC (links: WLTC, rechts: RDE-Thyrow)

Beim RDE-Thyrow befindet sich die modellierte Startbeladung in einer günstigen Moment, wo der Axisuite und NDM-Füllstand am Ende des WLTCs zufällig getroffen sind. Die Beladung liegt über die Soll-Linie und deshalb wird kein AdBlue zusätzlich für die zweiten Katalysator eindosiert. In dem gesamten Verlauf findet nur der Füllstandsabbau statt. In der 1.Dosierstelle wurde der Füllstand vom EKF1 richtig geregelt und dabei entsteht keine Abweichung von NH₃-Schlupf nach dem SDPF zwischen NDM und Axisuite, was auf den hinteren Katalysatorsfüllstand beeinflussen kann. Aus diesen Gründen weicht die NDM-Beladung akzeptabel von Axisuite ab.

In der beschleunigten Phase fällt stetig NH₃-Schlupf nach SCR2 an. Gleichzeitig steigt die NO_x-Masse von 18 mg/km auf 20 mg/km an. Der Adaptionfaktor hält auf dem Initialisierungswert ein.

Unterdosierung

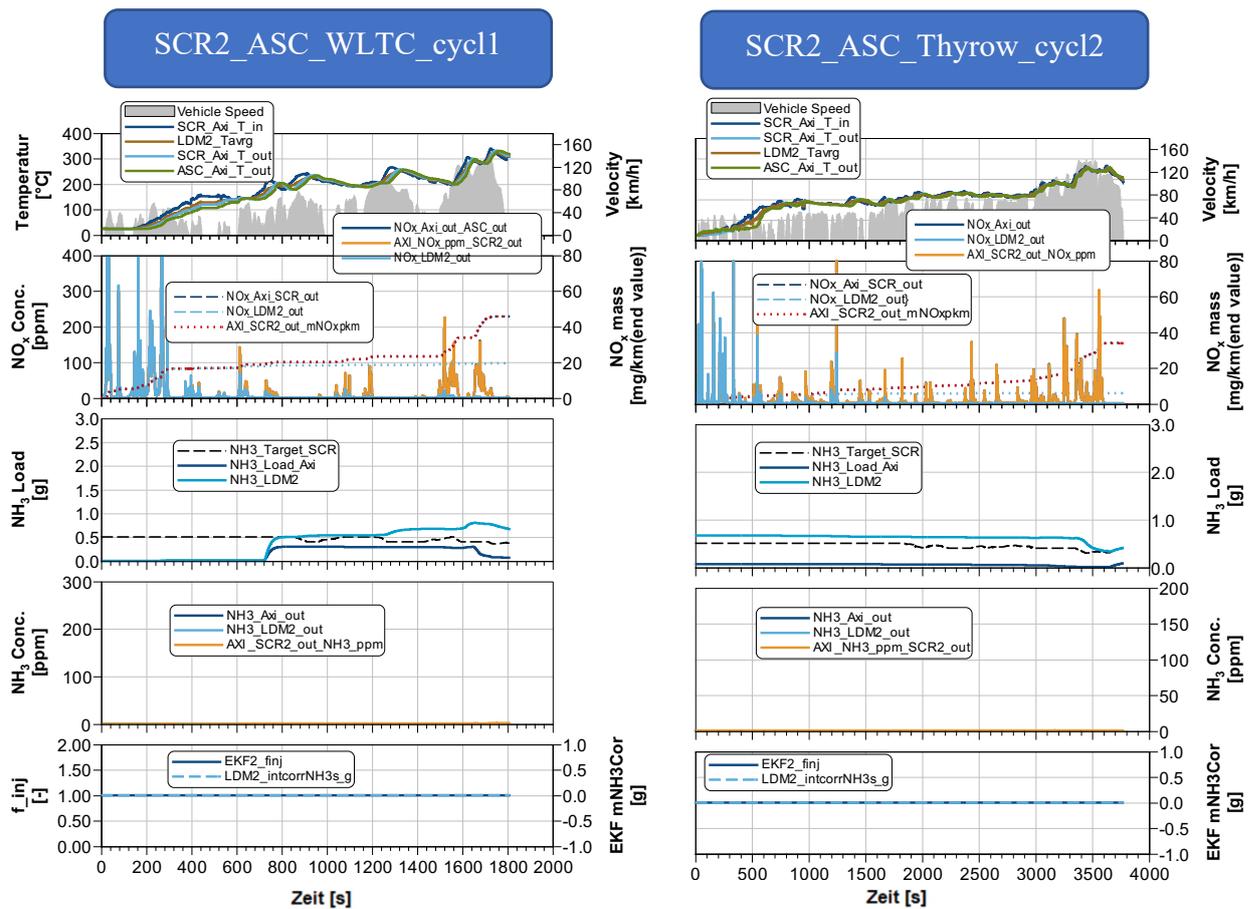


Abbildung 39: Die Unterdosierungsfälle mit dem Sensor hinter ASC (links: WLTC, rechts: RDE-Thyrow)

Der modellierte Beladung liegt in beiden Zyklen geringsfügig über den Sollwert, während die tatsächliche Beladung stetigs unter den Sollwert liegt. Deswegen wird ab 1200ste Senkunde des WLTCs kein AdBlue in der zweiten Dosierstelle mehr dosiert und findet danach nur der Füllstandsabbau statt. In Realität wird wegen der unbehobenen Fehler nur 60% der AdBlue-Bedarf tatsächlich dosiert. Zur Folge hat es eine große Auswirkung auf die wahre Beladung, dass der Axisuite-Füllstand ständig am null beträgt. Dadurch verschlechtert sich die NO_x-Umsatzrate. Der Sensor erfasst eine höhere Summe von NO_x und NH₃. Das NDM sagt voraus, dass es kein NH₃-Schlupf und NO_x-Schlupf gibt. Gleichzeitig hat das EKF jedoch nicht auf die eine große Differenz zwischen den geschätzten und gemessenen Messwerten reagiert. Der Adaptionfaktor bleibt während der ganzen Simulationsdauer bei Null und die Beladung wird nicht korrigiert. Die Fehler werden nicht behoben.

Zusammenfassung

Abschließend kann es mithilfe der Abbildung 38 und 39 feststellen, dass die Verdriftung von dem zweiten Injektor von Zyklus zu Zyklus tendenziell nicht kompensieren kann.

Eine Lösung für diese Problematik ist das Verlegen des NOx-Sensors auf die Position hinter dem SCR2-Katalysator, weil in dieser Stelle die NOx-Emission und NH₃-Schlupf höher, dynamischer und deutlicher zu erkennen ist. Im Fahrzeug ist die Verlegung des Sensors realisierbar, da SCR2 und ASC nicht miteinander ein gemeinsames Gehäuse teilen.

In dem folgenden Teilkapitel werden die Unterdosierungs- und Überdosierungsfall untersucht, wo der NOx-Sensor sich hinter dem SCR2 statt dem ASC befindet.

8.4 Validierung des hinteren EKF's mit NO_x-Sensor hinter SCR2

In diesem Teilkapitel wird die Simulationsergebnisse unter Verwendung von der modellbasierten Dosiersoftware beim Verlegen des dritten Sensors auf die Position hinter dem SCR2-Katalysator vorgestellt. Um das Verhalten der Dosiersoftware zu analysieren, werden zwei Testzyklen in der bestimmten Reihenfolge -WLTC - RDE-Thyrow verwendet. Als erster Schritt wird der störungsfreie Fall simuliert. Dazu werden die Störszenarios bei der Unter- und Überdosierung untersucht.

8.4.1 Simulationsergebniss beim Norminalfall

Wegen der Verschiebung des Sensors muss das NDM dem SCR2 entsprechen. Im Gegenteil zu dem kombinierten SCR2-ASC-Modell muss die Modellbedatung des SCR2 keine zusätzliche Reaktionen von ASC zwangsläufig betrachten.

In den beiden Zyklen liegen die NDM und Axisuite-Verläufe überwiegend aufeinander. In WLTC erreicht der NDM-Füllstand durch den Füllstandsregler nach 700 Sekunden die Sollbeladung. Im Bereich zwischen 1600- 1800s weicht die modellierte Beladung um 0,2g gegenüber die Axisuite ab, da das NDM doppelt so viel NH₃-Schlupf als Realität berechnet (siehe Abbildung 40, links). In den Ergebnissen ist es zu sehen, dass der Adaptionfaktor sich geringsfügig um den Intialwert bewegt und damit den Normalzustand des Modells darstellt.

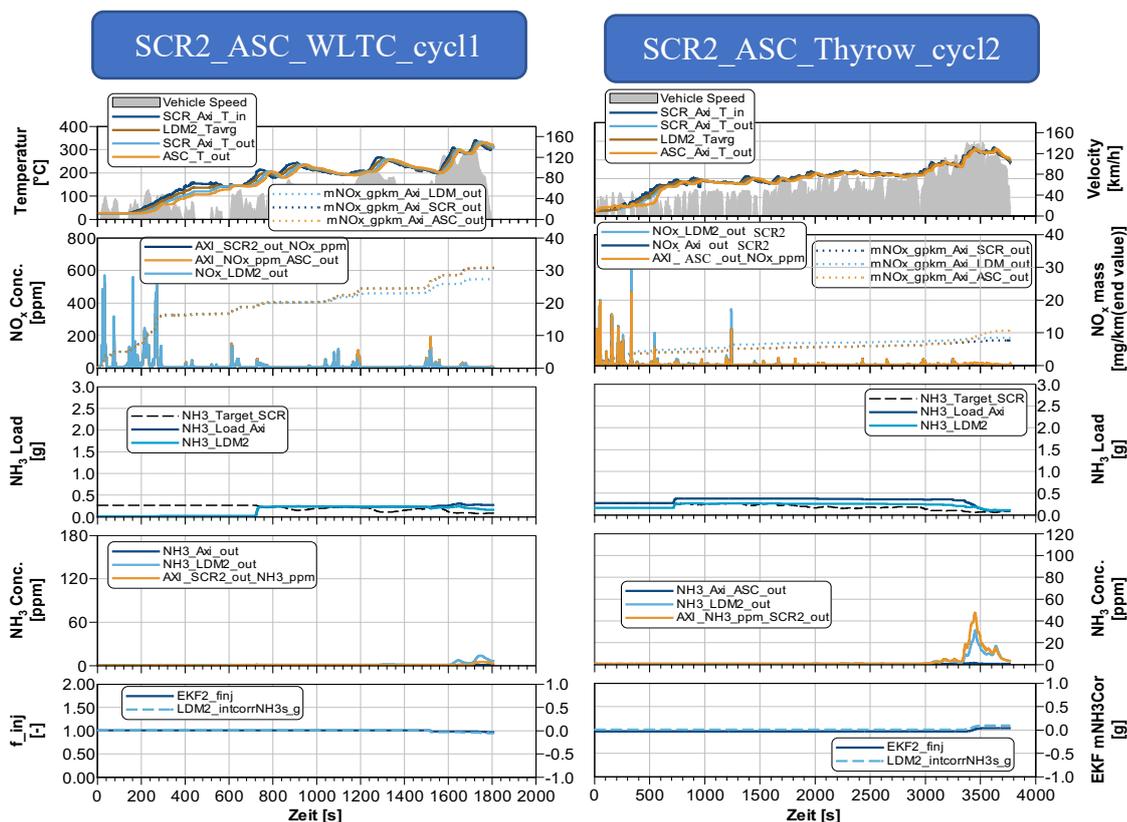


Abbildung 40: Der Norminalfall (links: WLTC, rechts: RDE-Thyrow)

Beim RDE-Thyrow hat das NDM im Vergleich zu Axisuite eine gute Übereinstimmung erreicht. Es gibt eine kleine Abweichung im NH₃-Schlupf, auf der die Füllstandskorrektur durch den EKF2 basiert hat. Die NDM-Beladung und der Adaptionfaktor werden minimal nach oben korrigiert.

Zusammenfassung

Die Abweichungen von NO_x und NH₃-Schlupf in beiden Zyklen sind nach den Optimierungen bereits bekannt. Generell haben die Ungenauigkeiten in Modellbedatung keinen großen Einfluss auf dem Füllstand von SCR2. Die kleinen Abweichungen lassen sich durch den EKF2 beheben.

8.4.2 Auswirkung von Dosierstörungen

Überdosierung

Die Auswirkung des verdrifteten 2.Dosierventil ist identisch zu dem Fall des 1.Dosierventils, wobei die in der 2.Dosierstelle eingespritzte AdBlue-Menge wegen des niedrigen vordefinierten Füllstands um 5-fach weniger beträgt. Deshalb entsteht eine Abweichung von geringem Ausmaß.

In Abbildung 41 sind die Ergebnisse der Simulation vom 2.EKF, in der die beiden Dosierventile eine Verdriftung von 40% aufgeschaltet werden. Die linke Seite der Abbildung stellt die Simulationsergebnisse der zehn WLTC-Durchläufe dar und auf der rechten Seite sind von zehn RDE-Durchläufe.

Es ist zu erkennen, dass die Axisuite-Beladung in dem 1.Zyklus um 40% höher als die NDM-Beladung zur Folge hat. Eine andere wesentliche Aspekt der Auswirkung muss berücksichtigt werden, dass die Abweichungen vom NH₃-Schlupf nach SDPF zu Abweichungen in SCR2-Beladungen führen können. In den Ergebnissen wurde gezeigt, dass der Abstand zwischen NDM und Axisuite ab 1600s bei WLTC und 3000s bei RDE-Thyrow sich vergrößert.

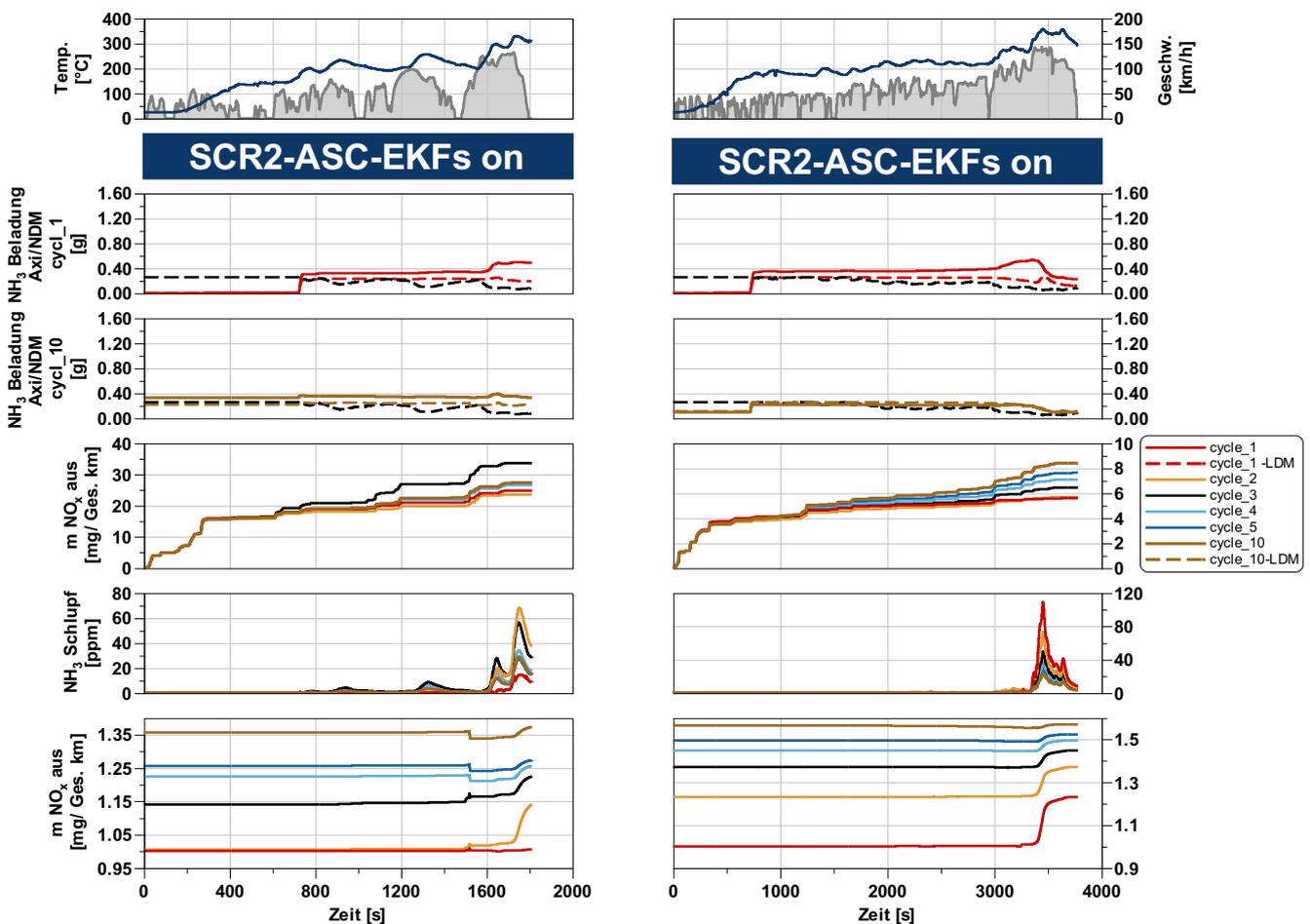


Abbildung 41: Fehlerdetektion von EKF2 (links: WLTCx10, rechts: RDE-Thyrowx10)

In Abbildung 41 ist es zu erkennen, dass die Adaptionparameter bei WLTC stufenweise steigt. Am Ende des 10.WLTCs hat der finj-Wert von circa 1,4 angenommen. Der NDM-Füllstand läuft im zehnten Zyklus parallel zum Axisuite-Füllstand mit unennenswerten Abweichungen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass der EKF2 richtig die Fehler detektiert und korrigiert hat.

Am Ende des ersten RDE- Zyklus ist der Adaptionparameter sprunghaft von 1 auf 1,2 gestiegen. Der Grund dafür ist die zur gleichen Zeit vorkommende Differenz zwischen dem Sensor und den modellierten Emissionen, die durch den 120 ppm NH₃-Peak verursacht wird. In den auf folgenden Zyklen ist der Anstieg des finj-Werts langsamer geworden, da der NH₃-Schlupf-Peak auf unter 30 ppm sinkt und die Überdosierung entgegengewirkt wird. Die geringfügige Abweichung des NH₃-Füllstands im 10.Zyklus

deutet darauf hin, dass der Einfluss der Dosierstörung mit angeschaltetem EKF vollständig ausgeglichen ist. Der $finj$ -Wert übersteigt außerdem den erwünschten Wert von 1,4, damit die von NH₃-Schlupf nach SDPF verursachte Abweichung kompensieren kann.

Unterdosierung

Das Verhalten bei der unterdosierten Störung wird im Folgenden mit einer Simulation, in der das Dosierventil um -40% verdriftet wird, untersucht. Im Unterdosierungsfall kommt kein NH₃-Schlupf nach SDPF hervor und dadurch wird die Füllstandsabweichung nur wegen der Verdriftung verursacht. In dem ersten Zyklus von beiden WLTC und RDE-Thyrow ist es zu erkennen, dass der tatsächliche Füllstand 40% geringer als der modellierte Füllstand. Beim WLTC liegen die Referenzdaten nach zehn Durchlaufen sogar über dem NDM. Die Abweichung lässt sich nach 10 Zyklen nicht verbessern. Nach dem ersten Zyklus verschlechtert sich die NO_x-Performance von 30 mg/km auf 50 mg/km. Daraus folgt, dass der Adaptionparameter von 1 auf circa 0,88 sinkt. Ab dem fünften Zyklus steigt der $finj$ tendenziell wieder an, weil der Axisuite-Füllstand den NDM überholt. Daraus folgt, dass der EKF in die Richtung NH₃-Schlupf korrigieren muss.

Im zehnten Zyklus ist der berechnete Füllstand beim RDE-Thyrow identisch mit Axisuite. Der Endwert von der NO_x-Masse und der NH₃-Schlupf erreichen die Werte beim Norminalfall. Damit kann es festgestellt werden, dass der Fehler ausadaptiert werden.

Genauso wie bei dem Überdosierungsfall landet der Adaptionparameter nicht konstant auf dem erwünschten Wert 0,6 sondern bewegt sich unruhig. Der Grund dafür ist, der EKF2 versucht die Abweichung von der nach SDPF einfließenden NO_x-Emission zu kompensieren.

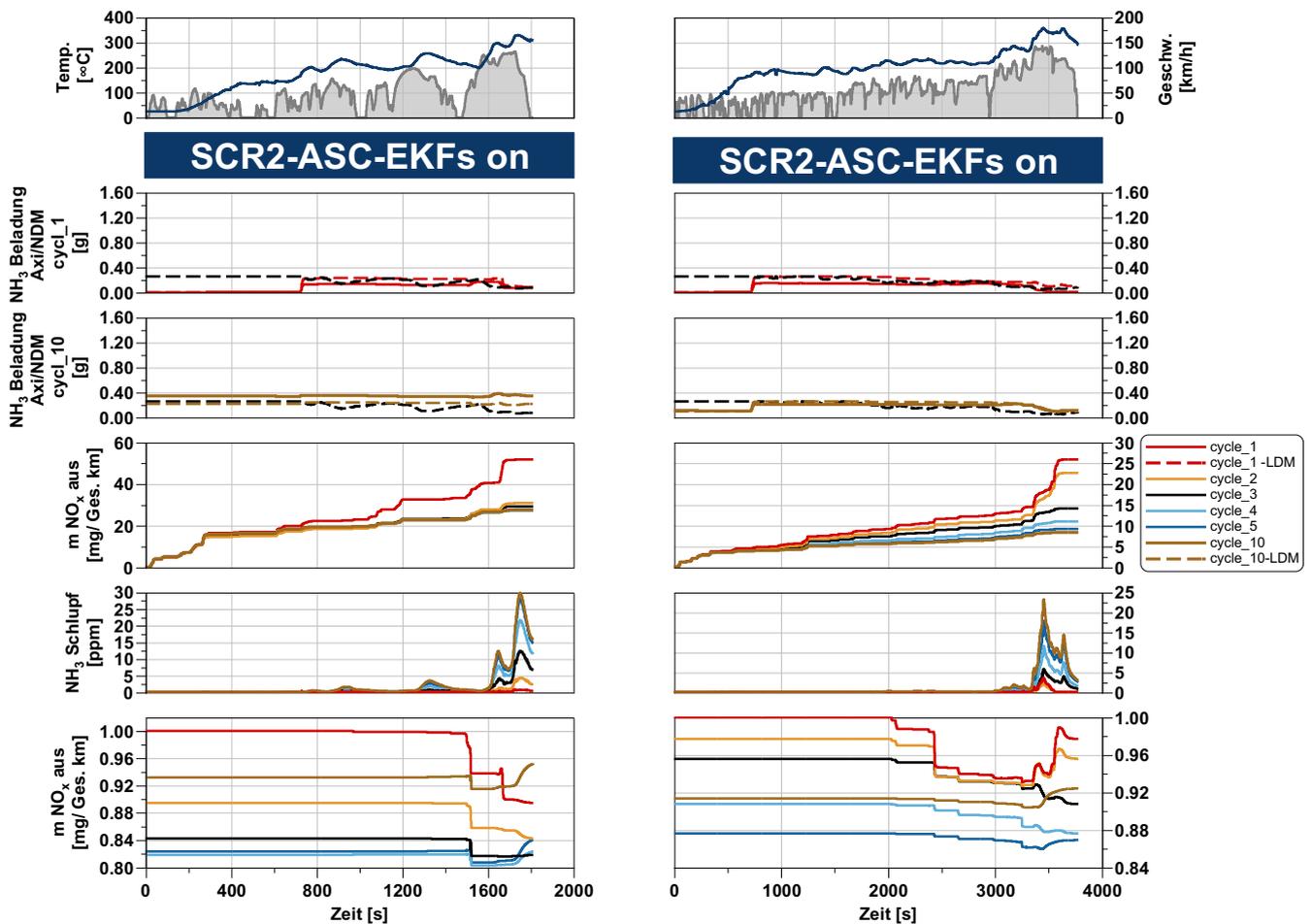


Abbildung 42: Fehleradaption für EKF2 (links: WLTCx10, RDE-Thyrowx10)

8.5 Toleranzanalyse

Unter den äußeren Bedingungen wird die Messtechnik in Realität die falschen Daten erfassen, die als falsche Information in die Software eingehen. In der folgenden Tabelle sind ausgewählte Toleranzbereiche und Fehler der Sensoren eingetragen. Aus dem Gain-Bereich und dem Offset werden die Messungenauigkeiten zusammengesetzt. Der Gain ist die Vergrößerungsfaktor und beschreibt einen proportionalen Zusammenhang zwischen den wahren und fehlerhaften Messwerten.

Der Offset kommt in NO_x-und Temperatursensoren vor. Die Messung, die außerhalb der Messspanne liegt, wird mit dem tatsächlich Wert um den Offset-Wert verschoben. Letztendlich ergeben sich die Messdaten aus der Multiplikation mit Gain-Wert und wird mit Offset-Wert weiter addiert. Insgesamt sind zwölf unterschiedlichen Fehleraufschaltung, die gleichzeitig ins System einfließen.

Tabelle 5: Die betrachtete Toleranzparameter und ihre Bandbreite

Parameter	Gain	Offset
Abgasmassenstrom	+/- 15%	-
AdBlue-Massenstrom (Injektorstelle 1 und 2)	+/-40%	-
NO _x -Sensoren (vor SCR1, nach SDPF, nach SCR2)	+/-25% (ab 100ppm)	+/-25ppm (bis 100ppm)
NH ₃ -Querempfindlichkeit des NO _x -Sensors	+/-25%	-
Temperatursensoren (vor SCR1, nach SDPF, nach SCR2)	+/-3.33% (ab 300°C) 0% (unten 300°C)	10°C (ab 300°C) 20°C (unten 300°C)

Um die aufgeschalteten Fehlergröße zu variieren, geht ein Toleranzvektor, deren einzelne Größe zwischen -1 und 1 pendelt, multiplikativ in die jeweilige fehlerhafte Signale ein. Der Toleranzvektor ist eine Reihe von dem Zufallszahlen und wird von der Monte-Carlo-Methode bestimmt. Das bedeutet dass die Toleranzen normiert sind. Aus den obengenannten Toleranzen werden 169 Kombinationen der Fehler erstellt und durchgehend simuliert. Die ausgewählte Simulationszyklen-Reihe WLTC-Thyrow-BAB-WLTC-Thyrow-BAB wird verwendet und am Anfang leer gestartet. Die Zyklen decken ein breites Spektrum an Fahrmöglichkeiten von Niederlast bis zur Hochlast ab. Außerdem werden die Zyklen verdoppelt, damit der EKF ausreichend Zeit zum Korrigieren hat. Mit den selben Fehlerkombinationen werden sowohl der open-loop-Betrieb als auch der closed-loop-Betrieb simuliert. In der Toleranzanalyse wird eine Positionierung des NO_x-Sensors hinter den SCR2 vorgenommen.

Nach den Simulationen werden die Endergebnisse der einzelne Zyklen zum Bewerten gesammelt. Die entscheidenden Daten sind die Tail-Pipe-Emissionen (die maximale Konzentration von NO_x, NO_x-Masse pro km, NH₃-Ausstoß). Außerdem ist es auch interessant zu sehen, wie sich die Emissionen hinter SCR2 verhalten und wie viel schlechter die Performance durch den ASC wird. Alle die Informationen sind auf der Y-Achse aufgetragen und werden zusammen mit dem Toleranzvektor in einem Streuplot dargestellt. Um die Übersichtlichkeit zu erschaffen, werden die Endergebnisse in einer Matrix aus 5x12 Diagrammen wiedergegeben. Eine Diagrammmatrix zeichnet die Endemissionen von NO_x und NH₃ nach sowohl SCR2 als auch ASC. Die hellbauen Punkte präsentieren die closed-loop-Ergebnisse und die open-loop-Ergebnisse sind in grau geplottet (siehe Abbildung 43). Die Referenzdaten sind die Endwerte von Axisuite von einem gesteuerten Norminalfall und werden in der folgenden Tabelle eingetragen.

Tabelle 6: Die Referenzwerte des System im Normalfall nach sechs Zyklen

Parameter	Beschreibung	Wert
AdBlue-Menge	gesamte dosierte AdBlue an der ersten Dosierstelle	32,07 g
AdBlue-Menge-2	gesamte dosierte AdBlue an der zweiten Dosierstelle	0,69 g
NOx-SCR2-ds	NOx-Emission nach SCR2	18,00 mg/km
NH3-max-SCR2-ds	maximale NH3-Peak nach SCR2	69 ppm
NOx-ASC-ds	NOx-Emission nach ASC	29,84 mg/km
NH3-max-ASC-ds	maximale NH3-Peak nach ASC	1 ppm

In der unterliegenden Abbildung werden die Toleranzergebnisse des sechsten Zyklus dem BAB dargestellt. Zuerst kann es festgestellt werden, dass die Ergebnisse im closed-loop-Betrieb in den meisten Fällen die Referenzdaten annähen. In den 169 Fällen gibt es sechs Fälle, wo die Dosiermenge von dem zweiten Injektor stark von Referenzen abweicht. Insgesamt ergibt sich trotzdem kein kritischer Fall, in dem eine schlechte NOx-Umsatzrate oder hohe NH3-Überschussmenge vorkommt. Das bedeutet, dass das System unter den fehlerhaften Bedingungen gewährleisten kann. Der Vorteil des regelten System ist deutlich zu erkennen, im Vergleich zu dem Open-Loop-Betrieb.



Abbildung 43: Toleranzergebnisse der Werte nach dem SCR2 und ASC für 169 Fälle jeweils im open-loop-Betrieb und im closed-loop-Betrieb von dem sechsten Zyklus (BAB)

8.6 Untersuchung der Problemfälle

In den Toleranzanalyse gab es keine Ausreißerfälle, wo der NOx-Emission am Tailpipe kritisch den Grenzwert überschritten wurde. Das EKF hat in den fehlerhaften Bedingungen alle Fälle ausgeregelt. In Realität kommen die Fehladaptation in dem EKF vor. In diesem Teilkapitel werden einige Beispiele außerhalb der Toleranzanalyse aufgeführt, in dem die Performance des Katalysator durch die Fehlkorrektur von EKF und die ungünstige Konstellation verschlechtert wird. Darüber hinaus werden der Grund und die entsprechende Lösung aufgewiesen.

• Fehladaptation

In Falle einer Über- oder Unterdosierung kann das EKF die Fehler gut erkennen und mithilfe des Adaptionparameters richtig korrigieren.

Das unterliegende Diagramm zeigt eine Fehladaptation von dem EKF1 an. Die im diesem Fall vorliegende Fehleraufschaltung ist die Drift des NOx-Sensor vor SCR1 von -25%.

In der Zeitspanne zwischen 700s bis 1000s ist es zu erkennen, dass die Füllstände von beiden Katalysatoren falsch korrigiert werden. Wenn der NOx-Schlupf tatsächlich hinter dem SDPF entsteht, sagt das Modell wegen der Verdriftung einen NH3-Schlupf voraus. Deshalb korrigiert der EKF in die falsche Richtung und erhöhte den Füllstand um circa 2g, um zwangsläufig mithilfe der Fehladaptation weniger AdBlue zu dosieren. Laut Axisuite sinkt die tatsächliche Beladung von SCR1 und SDPF deswegen auf 0g und der NOx-Schlupf erreicht bis zu 1600 ppm.

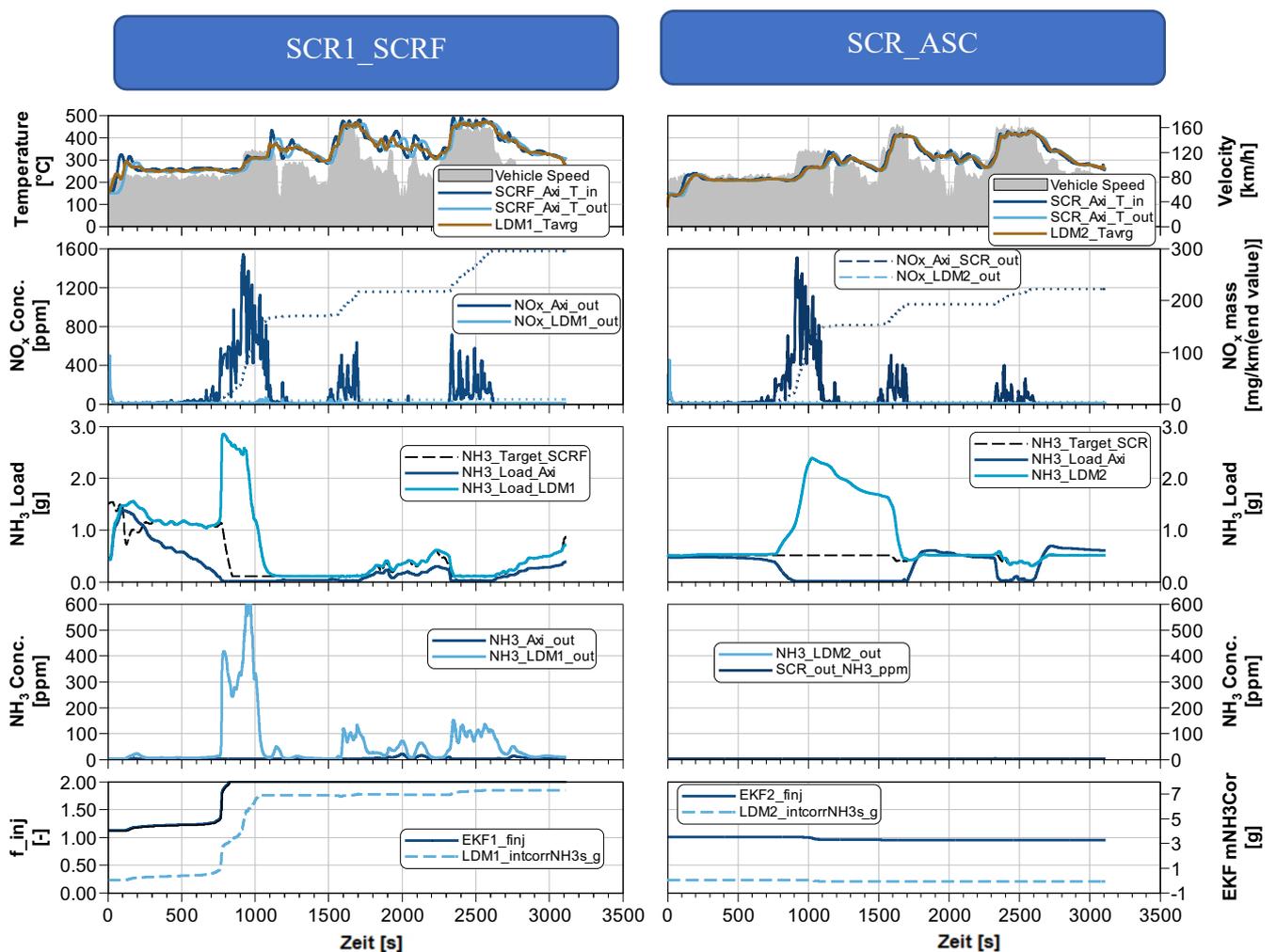


Abbildung 44: Ein Beispiel der EKF-Fehladaptation (Motorway-Zyklus)

Zwischen 700s bis 1600s steigt die Beladung des SCR2 auf dem Zustand von 2,5g. Aus dem untersten rechts Diagramm hat der EKF2 während des Motorway-Zyklus den SCR2-Beladungszustand sehr geringfügig korrigiert. Die große Abweichung von der SCR2-Beladung wird durch den NH₃-Schlupf nach SCRF verursacht. Da das Modell aus der Fehladaptation einen hohen NH₃-Schlupf nach dem SDPF aufweist, führt dazu, dass die NH₃-Überschussmenge die Erhöhung auf die SCR2-Beladung beeinflusst. Während des gesamten Zyklus steht die Beladung über der Sollbeladung, deshalb darf kein AdBlue in der zweiten Dosierstelle dosiert werden und kann der einfließende NO_x – Schlupf nicht eliminiert werden. Daraus ergibt sich die Tail-Pipe-Emission von NO_x über 200 mg/km, obwohl sie im Nominalfall unter 30mg/km liegen sollte.

- **Begründung**

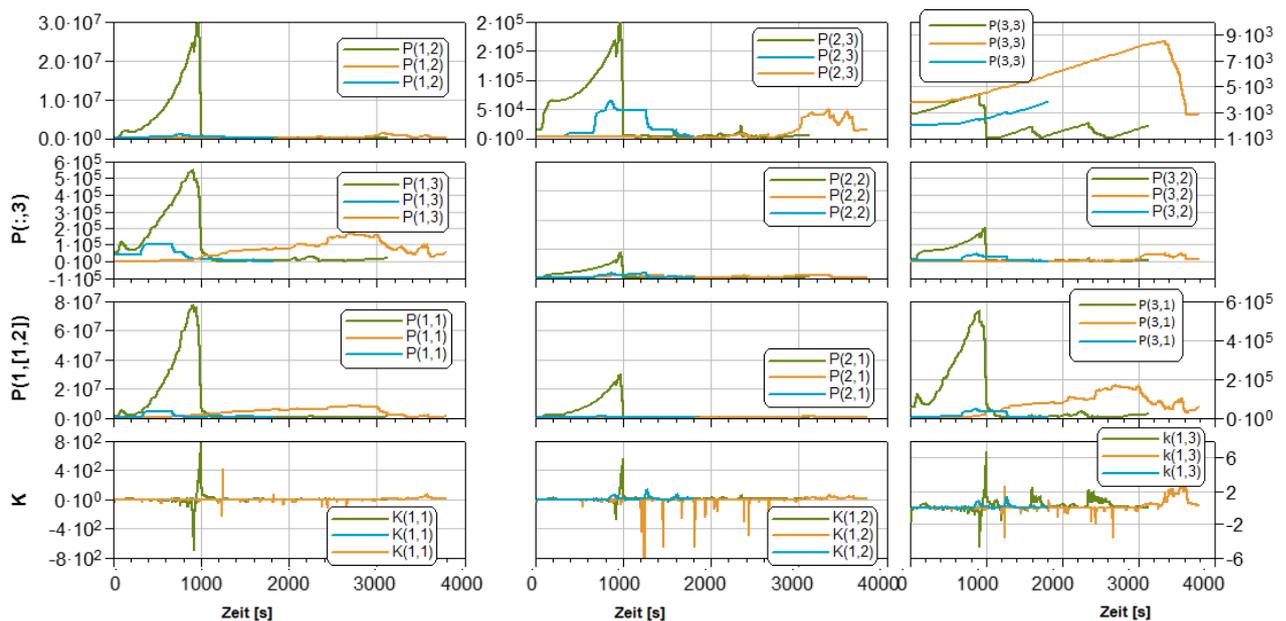


Abbildung 45: Die Varianz des Schätzfehlers von WLTC, RDE, Motorway

Im dem obenliegenden Diagramm wird die Varianz des Schätzfehlers von WLTC, RDE-Thyrow und Motorway dargestellt. Die Grafik zeigt das Verhalten der P-Matrix im gesamten jeweiligen Zyklus und der draus ergebene K-Matrix. Es gibt 3 Verläufe, einen grünen, einen blauen und einen orangen Verlauf. Grün ist für Motorway, Blau ist für WLTC und Orange ist für RDE-Thyrow.

Es lässt sich im Motorway eine deutliche Tendenz erkennen. Innerhalb der Simulationszeit schwanken die Elemente der P-Matrix von WLTC und RDE-Thyrow nur in einem kleinen Bereich und es gibt keine aggressive Steigung oder Senkung. Im Motorway steigen die Werte in den ersten 750s rasant an und fallen danach wieder auf den Startwert ab. Das grundlegende Problem der Fehladaptation liegt an dem Temperaturprofil in den ersten 1000s des Motorway-Zyklus, in dem die Temperatur konstant bei 250°C liegt. Das ist ein idealer Temperaturbereich, wo der maximale NO_x-Umsatz erreicht und das adsorbierte NH₃ nicht desorbiert wird.

Nach dem SDPF tritt kein NO_x oder NH₃-Schlupf auf. Deswegen misst der Sensor in der Zeitspanne ständig nahezu Null. Auf Basis der geringeren Sensorinformation erhöht sich die Unsicherheit der Schätzung bzw. die Varianz des Schätzfehlers. Es entspricht zum Beispiel bei P (1,1) einen Anstieg von 0 auf 8E7 oder bei P (1,3) von 0 auf 6E5. Da die Korrekturmatri K in dem Zusammenhang mit der Matrix P ist, werden die Elemente der K-Matrix zwischen 800s und 1000s schlagartig schwankt (siehe Abbildung 45). Der weitere Grund für die Fehladaptation des EKF2 ist auf diesen Sonderfall zurückzuführen. Da die in das NDM eingegangene NO_x-Konzentration wegen der NO_x-Sensorstörung niedriger gegenüber der realen Konzentration ist, bildet das Modell einen geringeren NH₃-Verbrauch für

die SCR-Reaktionen ab. In Abbildung 44 ist es zu sehen, dass der NH₃-Füllstand des NDMs auf dem Sollwert geregelt wird. Tatsächlich wird der Füllstand in der Zwischenzeit schon entleert. Wenn der Axisuite-Füllstand auf null landet, steigt die NO_x-Konzentration nach SDPF kontinuierlich an. Die Konzentration wird von dem Sensor erfasst. Aufgrund des deutlich höheren geschätzten NH₃-Füllstand des NDM wird der NO_x-Schlupf von dem Modell weniger wahrscheinlich geschätzt. Deswegen wird die von der NO_x-Emission verursachte Konzentration als NH₃-Schlupf wahrgenommen. Von daher wird kein AdBlue mehr dosiert. Die Differenz zwischen dem gemessenen und geschätzten Messwert vergrößert sich wegen der Fehlschätzung. Der delta y-Wert wird mit dem einzelnen Element der K-Matrix multipliziert (siehe Gleichung 74). Daraus ergibt eine sprunghafte Korrektur des Füllstands. Aus diesem Grund erweitert sich der Abstand zwischen dem Axisuite und NDM-Füllstand auseinander.

- **Performance-Verschlechterung durch ASC im Hochlastzyklus**

In dem folgenden Fall wird die NO_x-Umsatzverschlechterung durch den ASC-Katalysator veranschaulicht. Die Diagramme auf der linken Seite zeigen das Verhalten der vorderen Komponenten im BAB-Zyklus und die Verläufe auf der rechten Seite gehören zum entsprechenden Verhalten der hinteren Komponenten. Die Daten sind die Simulationsergebnisse und wurden in dem unterliegenden Diagramm dargestellt. Es ist in den Verläufen des SCR2-ASCs zu erkennen, dass die NO_x-Emission nach SCR2 unter 20 mg/km (gestrichelte dunkelblaue Linie – Diagramm zweite Reihe rechts) liegt und nach ASC auf circa 60 mg/km (gestrichelte rote Linie – Diagramm zweite Reihe rechts) steigt.

- **Begründung**

Ursache für den Anstieg der NO_x-Emissionen nach ASC ist der NH₃-Schlupf nach SCR2. Da das Temperaturniveau den Desorptionsvorgang begünstigt hat, findet die Desorption in SCR2 überwiegend statt. Der Füllstand von 0,5g im SCR2/ASC und die Temperaturen bedingen maßgeblich den NH₃-Schlupf. Im ASC wird die NH₃-Emission nach SCR2 oxidiert und die Umsatzrate wird dadurch verschlechtert.

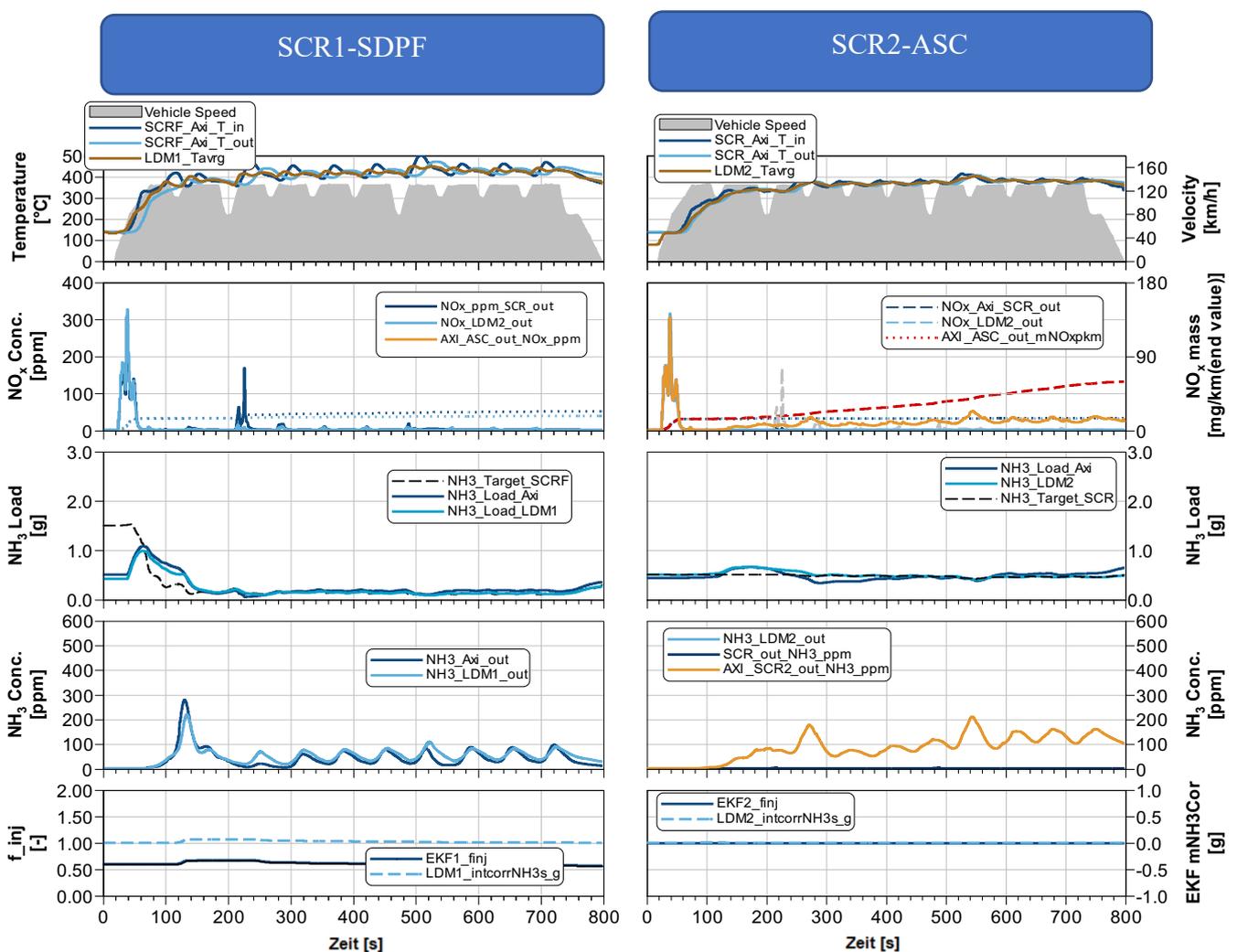


Abbildung 46: Die Performance-Verschlechterung durch ASC (links: vordere Komponente, rechts: hintere Komponente) - BAB Zyklus

- **Lösung**

Um den hohen NH₃-Schlupf zu vermeiden, muss der Soll-Füllstand von beiden Katalysatorgruppen in diesem Temperaturbereich zwischen 300°C und 500°C verringert werden. Es muss darauf geachtet werden, dass der Soll-Füllstand so angepasst wird, dass der Füllstand-Abbau rechtzeitig und regelungstechnisch möglich ist. Deshalb sollte das Beladungsniveau unter 300°C schon reduziert werden.

9 Fazit und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zuerst die Katalysatoren der vorderen Komponente auf zwei verschiedenen Wege kalibriert. Um das Verhalten des 0-dimensionalen-Modells zufriedenstellend darzustellen, werden die kinetische Parameter je nach Modelle und Modellierungsansatz angepasst. Nach dem Algorithmus - Melder-Mead-Simplex können die Parameter trotz des Nicht-Erreichen des Minimums bei der Optimierung eine hinreichende Genauigkeit erlangen.

Danach hat der Vergleich der Modellierungsansätze gezeigt, dass eine kombinierte Betrachtung aus SCR1 und SDPF in einem gemeinsamen Modell nicht zu einem zielführenden Resultat führt. Bei dem Norminalfall konnte festgestellt werden, dass der Füllstand im Close-Loop-Betrieb bei Verwendung des kombinierten Modells nicht gewährleistet werden kann. Deshalb ist das kombinierte Modell für dieses Abgasnachbehandlungssystem-Layout nicht geeignet. Mit der Erstellung eines separaten Modells für SCR1 und SDPF kann eine gute Genauigkeit der Emissionen nach SDPF erreicht werden. Um den separaten Bedatung-Ansatz in die Dosiersoftware umzusetzen, wurde ein Temperaturmodell wegen der fehlenden Messstelle implementiert, dass die Temperaturen der Bricks im SCR1 und SDPF berechnet. Das Modell zeigt eine sehr gute Abbildung der Temperaturverläufe im Vergleich zu Axisuite.

Weiterhin wurde das für die Zustandskorrektur der Modelle eingesetzte Erweiterte Kalman-Filter entsprechend der Modellverdoppelung erweitert. Dabei musste für die SCR1 und SDPF-Modelle die Berechnung der Systemmatrix F und Messmatrix H weiterentwickelt werden. Anhand der Simulation der aufgeschalteten Störungen hat der EKF des erweiterten Systems unter verschiedenen Fahrbedingungen zutreffend korrigiert.

In den Untersuchungen hat das EKF1 des erweiterten Systems gute Adaption unter verschiedenen Störungen gezeigt. Die Störungsfälle werden stabil ausgegelt. Mit der ausreichenden Adaptionsgeschwindigkeit werden die Fehler innerhalb vier Zyklen kompensiert.

Für die hinteren Komponenten (SCR2-ASC) werden die Katalysatoren trotz des nicht-physikalisch sinnvoll Bedatungsprozess betrachtet, da das ASC-Modell nicht in die Software implementiert wurde. Die Bildung von NO und NO₂ im ASC werden nicht abgebildet, was auf den Hochlastzyklus am meistens beeinflusst. Deshalb dürften die Parameter nur an den Niedrigfüllstand optimiert werden, so dass kein NH₃-Schlupf nach SCR2 entsteht. Das kann die NO_x-Umsatzrate der hinteren Katalysatoren verhindern. Der Modellierungsansatz ist nicht vielversprechend.

Die Ergebnisse der closed-loop Simulation haben gezeigt, dass der EKF2 den Fehler nicht detektieren kann. Der Grund dafür ist die geringe Werte am Ausgang des ASCs, die für EKF2 nicht aussagekräftig ist. Der EKF2 konnte nicht aufschließen, ob es ein NO_x oder NH₃-Schlupfskorrektur sein sollte. Deswegen wird der Sensor hinter ASC auf die Stelle nach SCR2 verlegt.

Zum Abschluss der Untersuchungen wurde die Systemrobustheit zwischen der ohne EKF und dem erweiterten System verglichen. Dabei wurde eine Toleranzanalyse durchgeführt, bei der die beiden Systeme anhand von mehreren gleichzeitig auftretenden Fehleraufschaltungen simuliert wurden. Als Fazit konnte aus den Ergebnissen gezogen werden, dass die Robustheit des erweiterten Systems die Fehler gut detektiert und kompensiert. Anschließend wird eine Fehlradaption des EKF1s diskutiert.

9.2 Ausblick

Bei der experimentellen Bedatungsvorgang für Fahrzeug muss folgende Punkte geachtet werden. Laut des 6.Kapitels sei angemerkt, dass es möglich ist, den SCR1 über den SCR2 zu bedaten. Um eine repräsentative Bedatung für Fahrzeug zu ermöglichen, muss es jedoch die folgende Anforderung erfüllen. Der SCR2 muss das ähnliche Temperaturniveau wie von dem SCR1 herrschen. Darüber hinaus muss der NH₃-Füllstand des SCR2s den von SCR1 entsprechen, wodurch die dosierte AdBlue-Menge gewährleistet wird. Damit die Bedatung SCR1-physikalisch-sinnvoll ist.

Für die Dosiersoftware gibt es viel Verbesserungspotential. So könnte das Modell von dem nulldimensionalen Modell auf eindimensionalem Modell entwickelt, wo die Temperatur, NH₃-Füllstand besser abgebildet werden können. Damit kann die örtliche Verteilung des adsorbierten NH₃ entlang der Lauflänge dargestellt werden. Der eindimensionale Modell ist ein Form des Multibrick-Model, wo der Katalysator entlang der Länge in mehrere Einzelheit und je nach der Modellgenauigkeit grob oder fein aufgeteilt wird. Andererseits ist ein höherer Rechenaufwand erforderlich und die Dosiersoftware wird leicht komplexer werden. Zum Überlegen müssen nicht alle vier Katalysator von nulldimensionale auf eindimensionale aufgerüstet werden, sondern nur die beide vordere Katalysatore. Da das Verhalten der SCR1 und SDPF wegen der hohen Schlupfe schwieriger abzubilden ist. Außerdem kann die auf auffolgende Katalysatore beeinflussende Fehlerfortpflanzung vermeiden.

Um eine ausreichend präzise Betrachtung zu ermöglichen, muss der SCR-Modell die zusätzlich chemischen Reaktionen von ASC mitberücksichtigen oder ein getrennter ASC-Modell wird dazu erstellt.

Der Temperatur erfasst einen hohen Zuverlässigkeit gegenüber Axisuite. Deshalb kann der Temperaturmodell in alle Modelle (SDPF, SCR2, ASC) implementieren.

Ein Beispiel für die Fehladaptation wurde im Kapitel 8.6 gezeigt. Der Grund dafür ist, der eingangsseitige NO_x-Sensor misst wegen der Störung eine kleine Eintrittskonzentration und hingegen misst der ausgangsseitige NO_x-Senser einen stark erhöhten Messwert. Es führt zu einer Fehladaptation des EKF1s. In einer angefertigen Arbeit wurde eine NH₃-Schlupferkennungsfunktion entwickelt, in der eine Korrelationsfunktion auf Basis von dem Zusammenhang zwischen eingang- und ausgangseitige NO_x-Sensoren erstellt wurde. Die Schlupferkennungsfunktion sollte in die Software implementiert werden.

Damit der EKF2 besser die Fehler detektieren kann, wurde es simulativ gezeigt werden, dass der Sensor auf die Position hinter dem SCR2 verlegt werden soll. Um die Umpositionierung des Sensor zu vermeiden, muss die Jakobimatrix für den ASC angepasst werden, wo die Reaktionen von ASC mitberücksichtigt werden.

Die Dosierung ist ein entscheidender Faktor für einen höchstmöglichen NO_x-Umsatz und wird wegen mehreren Gründen abgeweicht. Die Abweichungen können durch die Toleranzen der Sensoren, Injektor oder ein fehlerhafte Bedatung wegen der Veralterung hervorgerufen werden. Die Abweichungen sollen beseitigt werden, sonst führen sie zu der Ungenauigkeit von dem Beladungszustand und den unerwünschten Schlüpfen. Es könnte die Adaptionen eingesetzt werden. Die kontinuierliche Adaption ist für die Messunsicherheit von den Sensoren zuständig und mithilfe einer konventionellen Adaption werden die wahre Werte trotz der veränderten Bedatung kalkuliert.

Anhang

A Parametrierung des Modells

A.1. Parametrierung des kombinierten Modells

In der folgenden Tabellen sind die Bedatungsparameter des ersten Modellierungsansatz eingetragen. Die Parameter sind die Optimierungsergebnisse und werden in den Simulation verwendet.

Tabelle A. 1: Die Bedatungsparameter für SCR1-SDPF und SCR2-ASC mit der Reihenfolge von links nach rechts

Parameter	Beschreibung	Wert (SCR1_SDPF)	Wert (SCR2_ASC)
V	Katalysatorvolumen	4,028 L	3,008L
$m_{NH_3,s}$	Maximaler NH_3 -Füllstandkapazität		
A_{Ads}	Frequenzfaktor der NH_3 -Adsorption	1,00E+05	1,00E+07
E_{Ads}	Aktivierungsenergie der NH_3 -Adsorption	0,00E+00	0,00E+00
A_{Des}	Frequenzfaktor der NH_3 -Desorption	2,98E+10	310,835
E_{Des}	Aktivierungsenergie der NH_3 -Desorption	9,20E+04	4,425E+08
omega	Nichtlinearer Desorptionsfaktor	0,2932	0,2478
A_{NO}	Frequenzfaktor der NO-Umsatzreaktion	2,16E+06	4,481E+07
E_{NO}	Aktivierungsenergie der NO-Umsatzreaktion	5,71E+04	6,827E+04
A_{NO_x}	Frequenzfaktor der NO_x -Umsatzreaktion	8,02E+08	1,269E+13
E_{NO_x}	Aktivierungsenergie der NO_x -Umsatzreaktion	5,25E+04	8,742E+04
A_{NO_2}	Frequenzfaktor der NO_2 -Umsatzreaktion	2,16E+06	6,359E+03
E_{NO_2}	Aktivierungsenergie der NO_2 -Umsatzreaktion	5,79E+04	3,362E+04
A_{Ox}	Frequenzfaktor der NH_3 -Oxidationsreaktion	2,16E+06	3,765E+05
E_{Ox}	Aktivierungsenergie der NH_3 -Oxidationsreaktion	5,71E+04	9,374E+04

A.2. Parametrierung der separaten Modelle

In der folgenden Tabellen sind die Bedatungsparameter des einzelnen Komponents eingetragen. Die Parameter sind die Optimierungsergebnisse und werden in den Simulation verwendet.

Tabelle A. 2: Die Bedatungsparameter für SCR1 und SDPF mit der Reihenfolge von links nach rechts

Parameter	Beschreibung	Wert (SCR1)	Wert (SDPF)
V	Katalysatorvolumen	1,608 L	2,420L
$m_{NH_3,s}$	Maximaler NH_3 -Füllstandkapazität		
A_{Ads}	Frequenzfaktor der NH_3 -Adsorption	1,00E+05	1,00E+05
E_{Ads}	Aktivierungsenergie der NH_3 -Adsorption	0,00E+00	0,00E+00
A_{Des}	Frequenzfaktor der NH_3 -Desorption	9,18E+10	1,67E+11
E_{Des}	Aktivierungsenergie der NH_3 -Desorption	9,40E+04	9,04E+04
omega	Nichtlinearer Desorptionsfaktor	0,3793	0,458
A_{NO}	Frequenzfaktor der NO-Umsatzreaktion	1,22E+07	5,26E+07

Parameter	Beschreibung	Wert (SCR1)	Wert (SDPF)
E_{NO}	Aktivierungsenergie der NO-Umsatzreaktion	7,264E+04	6,88E+04
A_{NO_x}	Frequenzfaktor der NO _x -Umsatzreaktion	2,021E+39	1,555E+21
E_{NO_x}	Aktivierungsenergie der NO _x -Umsatzreaktion	4,347E05	1,517E+05
A_{NO_2}	Frequenzfaktor der NO ₂ -Umsatzreaktion	1,87E+07	4,241E+25
E_{NO_2}	Aktivierungsenergie der NO ₂ -Umsatzreaktion	5,79E+04	3,0044E+05
A_{O_x}	Frequenzfaktor der NH ₃ -Oxidationsreaktion	1,86E+05	1,638E+06
E_{O_x}	Aktivierungsenergie der NH ₃ -Oxidationsreaktion	9,67E+04	1,0963E+05

B Bedatung für die Rückkopplung

In diesem Kapitel wird die Bedatung für Rückkopplung, die für die Toleranzanalyse eingesetzt wurde, in die Tabelle eingetragen.

Tabelle B.1: Die Bedatung der Rückkopplung

Parameter	Wert
FLCntr1.ModGain	3
FLCntr1.SatModGain.UpLim	1,00E+06
FLCntr1.SatModGain.LowLim	0
FLCntr1.ModKonst	0,75
FLCntr1.Mod_MinDen	0,5
FLCntr1.SatNH3Soll.UpLim	1
FLCntr1.SatNH3Soll.LowLim	0,045

Literaturverzeichnis

- [A.Väliheikki, 2016] A.Väliheikki, 9.September.2016, „RESISTANCE OF CATALYTIC MATERIALS TOWARDS CHEMICAL IMPURITIES - The effect of sulphur and biomaterial-based compounds on the performance of DOC and SCR catalysts“, UNIVERSITY OF OULU, letzter Zugriff 19.01.2020, <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526212845.pdf>
- [ADAC, 2011] ADAC Fahrzeugtechnik, 2011, „EcoTest“, ADAC, letzter Zugriff 18.01.2020 https://www.adac.de/_mmm/pdf/EcoTest_alt_2003-2011_118922.pdf
- [B.Fietzke, 2016] B.Fietzke, 2016, „Modellbasierte Regelung eines SCR-Katalysators und Umsetzung in einer steuergätenahen Umgebung“, IAV-Masterarbeit
- [ChemP] ChemgaPedia, „Ideale Reaktoren für homogene Reaktionen“, ChemgaPedia, letzter Zugriff 02.03.2020, http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/10/homogene_reaktoren/ideale_reaktoren/ideale_reaktoren.vlu/Page/vsc/de/ch/10/homogene_reaktoren/ideale_reaktoren/kontinuierlich_betriebener_ruehrkessel/kontinuierlich_betriebener_ruehrkessel.vscml.html
- [C.Walz, 2000] C.Walz, 2000, „NO_x-Minderung nach dem SCR-Verfahren: Untersuchungen zum Einfluß des NO₂-Anteils“, Universität Karlsruhe
- [DEH, 2005] Department of the Environment and Heritage(DEH), 2005, “Sulfur dioxide (SO₂)-Air quality fact sheet”, Australian Government- Department of the Environment and Heritage, letzter Zugriff 27.10.2019 <https://www.environment.gov.au/protection/publications/factsheet-sulfurdioxide-so2>
- [Dr. Seiler, J., 2018] Dr. Jakob Seiler, 2018 „Abgasemissionen“, Verband der Automobilindustrie e.V. letzter Zugriff 05.05.2019 <https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/abgasemissionen/emissionsmessung.html>
- [D.RASU, 2001] Dipl. Masch.-Ing. ETH Rafael August Schubinger Untersuchungen zur Russbildung und –oxidation in der dieselmotorischen Verbrennung (D.RASU), 2001,“ Thermodynamische Kenngrößen, Verbrennungsanalyse und Mehrfarbenendoskopie Diss.ETH Nr.14445“, November 2001 <https://www.wissen.de/lexikon/katalysator-fahrzeugtechnik>
- [E.Gil, 2013] E.Gil, 2013, „Evaluation of Ammonia slip catalysts“, Chalmers University of technology, letzter Zugriff 05.02.2020 <https://pdfs.semanticscholar.org/74ea/17917378396ed965bb5d0ec4e4ac77e72be8.pdf>
- [E.Langen, 2019] E.Langen, 2019, “Erweiterung eines SCR Katalysatormodells um einen ASC und Auslegung einer Zustandsschätzung mittels Erweitertem Kalman-Filter für PKW-Anwendungen”, IAV-Masterarbeit
- [GFEI, 2015]. Global Fuel Economy Initiative (GFEI), 2015, “International test cycles for emissions and fuel economy”, GFEI, letzter Zugriff 20.05.2019 http://www.unep.org/transport/gfei/autotool/approaches/information/test_cycles.asp

- [G.P.Merker. et.al, Merker, Günter P; Teichmann, Rüdiger, 2018, „Grundlagen Verbrennungsmotoren: Funktionsweise und alternative Antriebssysteme Verbrennung, Messtechnik und Simulation“, Springer-Verlag, 2018
- [G.Welch et.al., G.Welch, G.Bishop, 2006, „An Introduction to the Kalman Filter“, University of North Carolin, letzter Zugriff 17.03.2020 https://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf
- [ICCT, 2017] ICCT, Januar 2017, “REAL-DRIVING EMISSIONS TEST PROCEDURE FOR EXHAUST GAS POLLUTANT EMISSIONS OF CARS AND LIGHT COMMERCIAL VEHICLES IN EUROPE”, ICCT, letzter Zugriff 30.09.2019 https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EU-RDE_policy-update_18012017_vF.pdf
- [J.Beck, 2015] J.Beck, 2015, “Methodik zur Erhöhung der Genauigkeit der AdBlue® Dosierung zur Zielerreichung aktueller und zukünftiger Emissionsniveaus” , IAV-Bachelor Arbeit.
- [J.Hagen] Hagen, J., Technische Katalyse: Eine Einführung. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft GmbH, 1996
- [J.Schrader, 2019] J.Schrader, 2019, „Erstellung einer Funktion zur NH3-Schlupferkennung in SCR-Systemen von Dieselmotoren“; IAV-Bachelorarbeit
- [J.Werfel, 2014] J.Werfel, 2014, “Vergleich und Weiterentwicklung von NOx-Speichermodellen bei NSK-Katalysatoren”, IAV-Bachelor Arbeit.
- [K.Hoppe, 2009] K.Hoppe, 2009,“ Analyse von Modellen zur Dieselmotornachbehandlung“, IAV-Diplomarbeit
- [K.Prigge, 2018] K.Prigge, 2018, „Schadstoffe“-Vorlesungsskript, Hochschule für angewandte Wissenschaft-Hamburg
- [LAT, 2017] Laboratory of applied thermodynamics (LAT), 2017, „Durability Task Force, Diesel Engine Catalyst Deactivation /Ageing, https://circabc.europa.eu/webdav/CircaBC/GROW/wltp/Library/WLTP/UNECE_WLTP/WLTP%20Durability%20Task%20Force/Meeting%202014%20December%202017/DTF-Diesel_Catalyst_Ageing-171214.pdf
- [M. Fiedler, 2017] M. Fiedler, 02.2017, „KURZBERICHT FEINSTAUB-PM10 FÜR DEN FEBRUAR 2017“, Hamburger Luftmessnetz, Institut für Hygiene und Umwelt, Hamburger Landesinstitut für Lebensmittelsicherheit, Gesundheitsschutz und Umweltuntersuchungen, letzter Zugriff 07.05.2019 <http://luft.hamburg.de/contentblob/9100934/05089a7d615de2296e4dbc8873c6aa/data/kurzbericht-pm10-episode-februar2017.pdf>
- [M.Reiner et.al, M. Reiner , D.Sebastian: Kalman-Filter: Einführung in die Zustandsschätzung und ihre Anwendung für eingebettete Systeme. Springer-Verlag, 2017
- [Prof.Dr.habil. Witt, 2018] Prof.Dr.habil. Witt.G , 2018, „Luftschadstoffe“, Vorlesungsskript Umwelttoxikologie

- [Pruppacher, et.al., 1980]: Pruppacher, HR, Klett, JD, 1980, „Microphysics of Clouds and Precipitation“, Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, ISBN 978-0-306-48100-0
- [Schäfer, 2017] Schäfer.T , 07.08.2017, „Wie schmutzig ist der Diesel wirklich?“, Institut für Kolbenmaschinen am KIT, letzter Zugriff 28.05.2019 https://www.helmholtz.de/luftfahrt_raumfahrt_und_verkehr/wieschmutzigistderdieselwirklich/
- [Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin, 2005] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung-Berlin, 03.11.2005, „Verkehrsbedingte Luftbelastung durch NO₂ und PM₁₀“, SenStadt (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin)
- [S.Käfer, 2004] S.Käfer, 2004, „Trockenharnstoff-SCR-System und Betriebsstrategie für Fahrzeuge mit Dieselmotor“, Technischen Universität Kaiserslautern, letzter Zugriff 12.12.2019 https://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor/deliver/index/docId/1632/file/Dissertation_Kaefer.pdf
- [S.Song, 2018] S.Song, 2018, „Entwicklung eines Ansatzes zur Abbildung der Katalysatoralterung zur verbesserten Steuerung eines SCR-basierten Diesel-Abgasnachbehandlungssystems“, IAV-Masterarbeit
- [TfL] Transport for London (TfL), 2017, „A summary of the drive cycle development, test programme and comparison of test data compared with Type Approval data“, TfL, letzter Zugriff 18.03.2020 <http://content.tfl.gov.uk/london-exhaust-emissions-study-drive-cycle-development.pdf>
- [Tschöke.H et.al, 2018] Tschöke.H, Mollenhauer.K, Maier.R, 2018, „Handbuch Dieselmotoren“, Springer Verlag, ISBN 978-3-658-07696-2
- [Umweltbundesamt, 2019] Umweltbundesamt, 07.05.2019, „Emissionen prioritärer Luftschadstoffe“, das UBA, letzter Zugriff 15.10.2019, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-indeutschland/emissionen-prioritaerer-luftschadstoffe#textpart-1>
- [Y.Cheng et.al, 2008] Y.Cheng, C.Lambert, J.H.Kwak, C.Peden, 2008, „Understanding the Deactivation Mechanisms of Cu/Zeolite SCR Catalysts in Diesel Application“, 2008 DEER Conference, letzter Zugriff 28.01.2020, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f8/deer08_cheng.pdf
- [W.A.Majewski, 2015] W.A.Majewski, 2015, „Diesel Filter Systems“, DieselNet Technology Guide, letzter Zugriff: https://dieselnet.com/tech/dpf_sys.php
- [W.Boll, 2011] W.Boll, 2011, „Korrelation zwischen Umsatzverhalten und katalytischer Oberfläche von Dieseloxydationskatalysatorenunter Variation von Beladung und Alterungszustand“, KIT, letzter Zugriff 18.03.2020 https://www.itcp.kit.edu/deutschmann/download/2011_BollWilli_AlterungskorrelationAbgaskat_Dr_rernat_KIT_final.pdf

[Wissenmedia] Wissenmedia, „Katalysator“, letzter Zugriff 18.03.2020
<https://www.wissen.de/lexikon/katalysator-fahrzeugtechnik>

Erklärung zur Bachelorarbeit

Ich versichere, dass ich meine Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

