



Philipp Volgger, BSc.

**Ausarbeitung von Methoden zur Dimensionierung von
Abgasnachbehandlungssystemen für Ottomotoren zur Erfüllung
von RDE- Tests**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur
Masterstudium Maschinenbau / Wirtschaftsingenieurwesen - Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Zweitbetreuer
Ing. Kurt Prevedel und Ing. Ricardo P. B. Abrantes
AVL

Graz, April 2017



Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Vorstand: Univ.-Prof. DI Dr. Helmut Eichseder

Vorwort

Diese Masterarbeit entstand zwischen September 2016 und April 2017 in Zusammenarbeit mit der AVL List GmbH. Deshalb möchte ich mich in erster Linie bei Ing. Kurt Prevedel bedanken, der diese Diplomarbeit erst ins Leben gerufen hat und stets Ansprechpartner für mich war. Mein Dank gilt zudem Ing. Ricardo P. B. Abrantes, der die Arbeit betreut und mir stets mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist. Auch allen anderen Bürokollegen, allen voran Ing. Goutham Reddy und Ing. Peter Berger sowie Ing. Cornelia Reinharter und Ing. Anton Reiter soll an dieser Stelle Dank ausgesprochen werden. Sie haben mir stets bei kleineren und größeren Schwierigkeiten durch ihre Erfahrung in der Praxis weitergeholfen und so zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Für die Betreuung der Arbeit von universitärer Seite möchte ich mich bei Ao.Univ.- Prof. Ing. Dr. Stefan Hausberger bedanken, der mir in den Gesprächen sowohl stets neuen Input gegeben, als auch die Arbeit in die richtige Richtung gelenkt hat.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mich während meines Studiums sowohl finanziell als auch emotional unterstützt haben, sowie meinen Freunden, die diesen spannenden Lebensabschnitt so entscheidend mitgestaltet haben.

Inhaltsverzeichnis

FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN	VI
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	X
ZUSAMMENFASSUNG	XI
ABSTRACT	XII
1 EINLEITUNG	1
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	2
2.1 BESTANDTEILE DES ABGASES	2
2.1.1 <i>CO₂</i>	2
2.1.2 <i>NO_x</i>	3
2.1.3 <i>Partikel</i>	4
2.1.4 <i>CO</i>	5
2.1.5 <i>HCs</i>	5
2.2 INNERMOTORISCHE MAßNAHMEN ZUR SCHADSTOFFSENKUNG.....	6
2.3 ABGASNACHBEHANDLUNG.....	7
2.3.1 <i>Drei- Wege- Katalysator</i>	7
2.3.2 <i>Partikelfilter</i>	13
2.3.3 <i>Vier- Wege- Katalysator</i>	14
2.4 ÜBERSICHT ÜBER DIE GESETZGEBUNG	15
2.4.1 <i>EURO 6 Norm</i>	15
2.4.2 <i>WLTC</i>	15
2.4.3 <i>RDE- Prüfverfahren</i>	17
2.5 DER REAL DRIVING EMISSIONS TEST.....	18
2.5.1 <i>RDE Messaufbau</i>	19
2.5.2 <i>Ablauf des Zyklus</i>	19
2.5.3 <i>Emissionslimits des Zyklus</i>	20
2.5.4 <i>Überprüfen der Gültigkeit einer RDE- Fahrt</i>	20
2.5.5 <i>Berechnung des kumulierten positiven Höhenunterschieds</i>	22
2.5.6 <i>Auswertung der RDE Messdaten</i>	22
3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	27
3.1 BERECHNUNGEN VON RDE LEISTUNGS- UND DREHMOMENTKURVEN	27
3.1.1 <i>Zykluspezifische Grenzwerte</i>	27
3.1.2 <i>Berechnung der maximal benötigten Leistung</i>	28
3.1.3 <i>Einbeziehung der Gangcharakteristiken</i>	31
3.2 BERECHNUNG DES MOTORKENNFELDBEREICHS AUF BASIS EINER RDE- GESCHWINDIGKEITSMESSUNG	35
3.2.1 <i>Datenaufbereitung</i>	35
3.2.2 <i>Implementierung einer Schaltstrategie</i>	35
3.2.3 <i>Vergleich der Strategien</i>	38
3.2.4 <i>Leistungsaufteilung</i>	41
3.2.5 <i>Variantenstudie für die RDE- Leistung verschiedener Fahrzeuge</i>	43
3.2.6 <i>Auslegung des Katalysators</i>	46
3.3 ANALYSE VON RDE- FAHRTEN	54
3.3.1 <i>Vergleich Rohemissionen- auspuffseitige Emissionen</i>	54
3.3.2 <i>Ursachen für hohe NO_x</i>	55
3.3.3 <i>Partikel</i>	61
3.3.4 <i>Deckelung der NO Spitzen</i>	63
3.4 SIMULATION.....	64
3.4.1 <i>Das FMU- Modell</i>	64
3.4.2 <i>Aufbereitung der Eingangsgrößen des FMU</i>	65
3.4.3 <i>Anpassen sämtlicher Parameter des Vierwegekatalysators</i>	66
3.4.4 <i>Variantenstudie der Simulation</i>	69
3.4.5 <i>Ergebnisse der Simulation</i>	80
4 AUSBLICK.....	82

5 LITERATUR 84

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

<i>a</i>	m/s ²	Beschleunigung
<i>A</i>	m ²	Fläche, Arrheniuskonstante
<i>b</i>	-	Vibe- Parameter
<i>C</i>	ppm	Volumenkonzentration
CF	-	Conformity factor
<i>c_p</i>	J/(kg·K)	spezifische isobare Wärmekapazität
<i>c_v</i>	J/(kg·K)	spezifische isochore Wärmekapazität
<i>d</i>	km	Distanz
<i>D</i>	mm	Dicke
<i>E</i>	J	Energie
<i>E_A</i>	J	Aktivierungsenergie
EURO6	mg/km	Grenzwerte entsprechend der Euro 6 Norm
<i>f</i>	s ⁻¹	Frequenz
<i>f₀</i>	N	Fahrwiderstandsbeiwert 1
<i>f₁</i>	N·km/h	Fahrwiderstandsbeiwert 2
<i>f₂</i>	N·km ² /h ²	Fahrwiderstandsbeiwert 3
<i>F</i>	N	Kraft
<i>g</i>	m/s ²	örtliche Fallbeschleunigung
<i>G</i>	l/100 km	Kraftstoffverbrauch pro Strecke
<i>h</i>	g/km	Emission pro Strecke
<i>k</i>	-	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante
KG	-	Konvertierungsgrad
<i>l</i>	m	Länge
<i>m</i>	-	Vibe Formparameter
<i>m</i>	kg	Masse
<i>M</i>	g	Masse (nur für Achsenbeschriftung)
<i>M_{CO}</i>	g/mol	molare Masse (z.B. von CO)
<i>M_d</i>	N·m	Drehmoment
<i>M_k</i>	-	Anzahl Stichproben je Kategorie
<i>n</i>	rpm	Drehzahl
<i>N</i>	-	Anzahl Stichproben gesamt
NTE	mg/km	Nicht zu überschreitendes Limit im RDE Test
<i>Nu</i>	-	Nusselt- Zahl
<i>p</i>	Pa	Druck
<i>P</i>	kW	Leistung
<i>Q</i>	J	Wärme
<i>Q(p)</i>	-	Wahrscheinlichkeitsdichte von p
<i>R</i>	J/(kg·K)	spezifische Gaskonstante
RPA	m/s ²	Relative positive Beschleunigung
SV	h ⁻¹	Raumgeschwindigkeit
<i>t</i>	s	Zeit
<i>T</i>	K	thermodynamische Temperatur
TF	-	Transfer function
<i>t_v</i>	s	Verweilzeit
<i>v</i>	m/s bzw. km/h	Geschwindigkeit
<i>V</i>	m ³	Volumen
<i>w</i>	-	Verhältnis der Distanzen von Kaltstart zu Urban,

W	J	Gewichtungsfaktor MAW Arbeit
x	-	Anzahl der Atome der Komponente 1
y	-	Anzahl der Atome der Komponente 2
z	-	Anzahl der Atome der Komponente 3
Z	m	Koordinate

Konstanten

$\alpha = 0.765$	-	Molares Wasserstoffverhältnis des Kraftstoffs
$\sigma = 5.670367 \cdot 10^{-8}$	W/m ² K ⁴	Stefan- Boltzmann- Konstante
$c_{vibe} = 6.91$	-	Vibe- Konstante
$g_n = 9,8067$	m/s ²	Normfallbeschleunigung
$H_a = 8$	g _{Wasser} /kg _{Luft}	Feuchtegrad der Ansaugluft
$H_{CV} = 1.9$	-	Verhältnis H/C- Atome im Kraftstoff
$k_1 = 1.8 \cdot 10^{12} \cdot e^{-319}$	cm ³ /mol·s	Geschwindigkeitskonstante NO- Bildung
$k_2 = 6.4 \cdot 10^9 \cdot e^{-26}$	cm ³ /mol·s	Geschwindigkeitskonstante NO- Bildung
$k_3 = 3 \cdot 10^{13}$	cm ³ /mol·s	Geschwindigkeitskonstante NO- Bildung
$n_C = 3$	-	Anzahl der C- Atome pro Kraftstoffmolekül
$O_{CV} = 0.016$	-	Verhältnis O/C- Atome im Kraftstoff
$R_m = N_A \cdot k_B = 8,3145$	J/(mol·K)	allgemeine (molare) Gaskonstante

Griechische Formelzeichen

α	W/(m ² ·K)	Wärmeübergangskoeffizient
φ	°	Steigungswinkel
ε	-	Toleranzbereich, Emissionsgrad
η	-	Wirkungsgrad
λ_{WL}	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit
λ	-	Luftverhältnis, Luftzahl
ρ	kg/m ³	Dichte

Operatoren und Bezeichnungen

[A]	Konzentration der Spezies A in mol/dm ³
d	vollständiges Differential
\bar{x}	Durchschnitt von x
\dot{x}	Ableitung der Variable x nach der Zeit
Δ	Differenz zweier Größen

Weitere Indices und Abkürzungen

Abg	Abgas
avg	average
B	Beschleunigung
BMEP	Effektiver Mitteldruck
BSFC	Spezifischer Kraftstoffverbrauch
c	Class (MAW)
cc	Close coupled
cold	kalt
cs	chemisorbiert
D	Diesel

DI	Direct Injection
drive	Fahr-
ds	downstream
EAS	Exhaust aftertreatment system
ECU	Engine control unit
EFM	Exhaust flow meter (Abgasmassenstrom Messgerät)
eo	Engine Out
exh gas	Exhaust gas
f	feucht
FW	Fahrwiderstand
FZ	Fahrzeug
g	Gasförmig, gebildet
G	Gasoline
GPF	Gasoline Particle Filter
HC	Hydrocarbons (Kohlenwasserstoffe)
hot	warm
i	Laufvariable für den gesamten RDE- Zyklus (1, 2, ..., m)
ISO	International Organization for Standardization
j	Laufvariable für einen RDE- Zyklusabschnitt (1, 2, ..., n)
k	Zyklus- Kategorie (-Abschnitt)
Kat	Katalysator
kin	kinetisch
Loading	Beladung
m	motorway
MAW	Moving averaging window
max	maximal
MF	Mass flow
min	minimal
Mot	Motor
N	Anzahl Stichproben
NEDC	New European Driving Cycle
nK	Nach Katalysator
NMHC	Nicht- Methan- Kohlenwasserstoffe
norm	normalisiert
PM	Partikelmasse
PN	Partikelanzahl
Poll	Pollutant
pos	positiv
r	rural
RDE	Real driving emissions
ref	Referenz
res	resultierend
RPA	Relative positive Beschleunigung
S	Strahlung, Steigung
St	Steigung
THC	Totality of hydrocarbons (HCs)
tol	Toleranz
tp	Tailpipe out
tr	trocken
u	urban
us	upstream

vK	Vor Katalysator
WS	Widerstand
WL	Wärmeleitung
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure

Eidesstattliche Erklärung

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

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

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "P. Volgger".

Graz, 25.04.2017

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, Möglichkeiten und Grenzen der Auslegung des Abgasnachbehandlungssystems für Ottomotoren bei stöchiometrischem Betrieb aufzuzeigen, um ein Bestehen des ab September 2017 zur Typzulassung von PKWs vorgeschriebenen *Real Driving Emissions* Test, kurz RDE, auch dann zu ermöglichen, wenn die Konformitätsfaktoren nach einer Eingangsphase schrittweise auf 1 gestellt werden. Dabei stehen in erster Linie die Stickoxide, kurz NO_x genannt, im Fokus der Arbeit. Innermotorische Maßnahmen sollen nicht berücksichtigt werden.

Um zu überprüfen, ob die Auslegung des Katalysators überhaupt die RDE- Emissionen beeinflussen kann, muss in einem ersten Schritt der vom Test betroffene Motorkennfeldbereich sowie die Leistungsanforderung des Tests identifiziert werden. Dazu wurde in Excel ein Berechnungsblatt geschrieben, welches, basierend auf der gesetzlich im Zyklus maximal erlaubten Beschleunigung zu 95% der Zeit, der sogenannten $v \cdot a_{\text{pos}_{95}}$, abhängig von Fahrzeuggewicht und -klasse, Übersetzung etc. eben dies ermöglicht. Da hiermit 5% des Zyklus, welche vor allem den Hochlastbereich betreffen, nicht erfasst sind, wurde ein zweites Berechnungsblatt, basierend auf einem real gemessenen RDE- Geschwindigkeitsprofil, geschrieben. In diesem wurden zwei voneinander unabhängige Algorithmen erarbeitet, die das Schaltverhalten eines realen Fahrers bzw. jenes eines Automatikgetriebes mit verbrauchsoptimierter Schaltpunktwahl nachbilden sollen. Damit konnte bestätigt werden, dass der RDE- Zyklus weitaus größere Bereiche abdeckt als etwa der WLTC oder gar der NEDC. Eine Variantenstudie brachte zudem ans Licht, wie sich Fahrzeuggewicht und unterschiedliche Fahrzeugwiderstände im Detail auf den zu emissionierenden Kennfeldbereich auswirken und stellt eine wertvoll Hilfe für die fahrzeugspezifische Auslegung der Abgasanlage bei ansonsten identem Motor dar. Dies dient als Werkzeug dazu, für sämtliche Fahrzeuge die während des Zyklus gebrauchte Leistung zu berechnen und Einflüsse der Schaltstrategie auf eben diese zu identifizieren.

Eine ausgiebige Analyse hinsichtlich der Emissionen von RDE- Messfahrten dreier verschiedener Fahrzeuge des aktuellen Marktes zeigte, dass vor allem im Bereich des Spülens bei niedrigen Drehzahlen und hohen Lasten, wie sie typischerweise beim Beschleunigen auftreten, hohe NO_x - Emissionen entstehen. In allen drei Fällen wird mehr oder weniger stark das Spülen zur Verbesserung des transienten Lastaufbaus eingesetzt. Auch Schubabschaltung führt häufig zu hohen Emissionen, wenn danach nicht ein leicht fetter Motorlauf angesteuert wird, um die Sättigung des Katalysators mit Sauerstoff rasch wieder abzubauen. Im Bereich hoher Leistungen und gleichzeitig stöchiometrischem Betrieb zeigen sich teilweise Katalysatordurchbrüche als Folge hoher Raumgeschwindigkeiten, da marktgängige Katalysatoren heutzutage für den NEDC und dessen niedrigere Leistungen ausgelegt sind. In diesen Bereichen kann ein größeres Katalysatorvolumen zu niedrigeren NO_x führen.

Die Simulation eines Vierwegekatalysators mithilfe von CRUISE M zeigte die Verbesserungspotentiale vorhandener Katalysatoren. Vor allem eine höhere Rhodium-Beladung und eine Aufteilung des Gesamtvolumens auf zwei Bricks, wobei der vordere sehr viel kleiner als der Haupt- Brick ist, brachten Verbesserungen. Da das zur Simulation ausgewählte Fahrzeug allerdings in transienten Bereichen stark zum Spülen neigt, sind die erreichbaren Verbesserungen überschaubar. Lediglich in den stationären Phasen bei stöchiometrischem Motorbetrieb können die NO_x - Emissionen dadurch merklich gesenkt werden, dass die Raumgeschwindigkeit herabgesenkt wird. Weicht in den transienten Bereichen das Luftverhältnis vom stöchiometrischen Ideal ab, so können kaum Stickoxide konvertiert werden.

Ein Ausblick auf zukünftige Lösungen für ein zufriedenstellendes transientes Verhalten bei Vermeidung von Spülen, etwa elektrisch angetriebene Turbolader, schließt die Arbeit ab.

Abstract

The main purpose of this master thesis is the identification of possible limitations of the exhaust after treatment system layout for gasoline run passenger cars to fulfill the RDE test cycle. This specific test cycle is going to be mandatory starting with September 2017. The work focuses on the reduction of nitrous gases by the exhaust aftertreatment system and won't cover the aspect of their internal reduction potential in the engine.

Therefore two excel sheets were written in order to highlight the engine map area that is affected by the test procedure. One was based on the 95% criterion, which limits the power for 95% of the test time and the other was based on a measured RDE speed profile. To mark the specific engine map area, two algorithms were developed to simulate the gear switching behavior of a human driver. Throughout the thesis it could be proven that the affected engine map area is remarkably wider than the one covered by the NEDC or WLTC. A variation study also showed the influence of the vehicle's weight and driving resistances on the power used during the cycle. Furthermore, this can further be used as a tool to identify the engine maps affected area.

In a second step, RDE test drives of three different vehicles from the current market were analyzed to show the most damaging area of the engine map for the overall trip emissions. This was in fact the area of scavenging at high load and low engine speeds which is affected in transient phases of heavy acceleration. In addition, NO_x peaks were identified after phases of fuel cut offs when the oxygen storage of the catalyst is filled to its saturation.

The vehicles showed higher emissions at high power and stoichiometric run engines due to the increased space velocity since the catalysts of the current vehicle models are calibrated on the much less demanding NEDC.

The simulation of the exhaust after-treatment system identified areas of potential improvement of the catalyst layout. Especially an increase of the rhodium loading and a split of the brick showed good results even though they did not affect the transient emissions of the scavenging phases. Only a decreased scavenging characteristic can lower the NO_x emissions effectively in the future. The future focus should therefore not only be on the exhaust aftertreatment system but rather on the engine calibration as well.

1 Einleitung

Durch die immer strengeren Emissionslimits (EURO 1-6) wurden in den letzten 25 Jahren die Emissionen von Fahrzeugen im Straßenverkehr stark reduziert. Die praktische Umsetzung eben dieser Reduktion ist einerseits auf innermotorische Maßnahmen, andererseits auf eine verbesserte Abgasnachbehandlung zurückzuführen, die bei stöchiometrisch betriebenen Ottomotoren mit dem Dreiwegekatalysator eine betriebssichere, zuverlässige und kostengünstige Lösung gefunden hat.

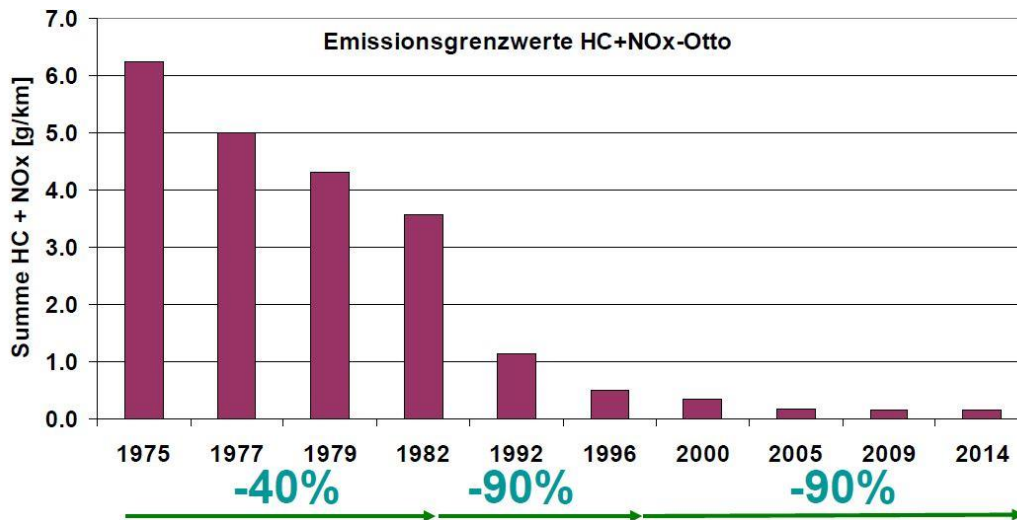


Abbildung 1-1: Reduktion der NO_x- und HC- Emissionen in den letzten 40 Jahren [8]

Die Typzulassung für PKWs erfolgt generell auf dem Rollenprüfstand, auf dem ein vorgegebener Zyklus, der *New European Driving Cycle* (seit 1992), abgefahren wurde. Das wenig dynamische Geschwindigkeitsprofil mit einer Maximalgeschwindigkeit von 120 km/h ermöglichte es dabei, die Einhaltung der Emissionslimits mit relativ kompakt dimensionierten Katalysatoren ($V_{\text{Kat}} \approx V_{\text{Hub}}$) zu bewerkstelligen.

Ab September 2017 soll durch die Einführung der *Worldwide harmonized light duty vehicles test procedure* (WLTP) und ergänzend des *Real Driving Emissions* – Tests, im Folgenden als RDE- Zyklus bezeichnet, die Divergenz zwischen Rollen- und Realmessung geschmälert werden. Vor allem der RDE- Test auf öffentlichen Straßen bildet das reale Fahrverhalten des Durchschnittsfahrers wesentlich besser ab als der NEDC. Die Einhaltung von NO_x- und Partikelemissionsgrenzen wird daher umfassende Maßnahmen bei der Auslegung und Dimensionierung der Abgasnachbehandlungsanlage erfordern.

Durch die nicht genau definierten Geschwindigkeits- und Lastprofile im RDE stellt dieses Testverfahren vor allem mit den sich reduzierenden Konformitätsfaktoren besonders hohe Anforderungen an die Entwickler der Abgasnachbehandlungssysteme und erfordert völlig neue Ansätze zu deren Auslegung.

2 Theoretische Grundlagen

Eine effiziente Abgasreduktion beinhaltet sowohl eine innermotorische Optimierung, als auch eine der Motorcharakteristik und Fahrzeuganforderung optimal angepasste Abgasnachbehandlungsstrategie. Obwohl erstere nicht Gegenstand dieser Arbeit ist, soll auch auf die innermotorische Schadstoffbildung eingegangen werden, um die Entstehungsprozesse zu verstehen. Trotzdem soll der Fokus dieser Arbeit auf allem, was mit den Schadstoffen nach den Auslassventilen passiert, liegen. Im Folgenden sollen die theoretischen Hintergründe wie Gesetzgebung und Möglichkeiten der Emissionsminimierung beleuchtet werden, um die methodischen Ansätze im zweiten Teil der Arbeit besser nachvollziehen zu können.

2.1 Bestandteile des Abgases

Die Verbrennung von Kohlenwasserstoffen führt unweigerlich zur Bildung von Kohlendioxid und Wasser. Deren Entstehung bei der Verbrennung kann nicht vermieden werden, weshalb diese zu den erwünschten Verbrennungsprodukten zählen. Zudem entstehen verschiedene zusätzliche Schadstoffe aufgrund unvollständiger bzw. unvollkommener Verbrennung. Erster Begriff bezieht sich dabei auf die Tatsache, dass sowohl bei Sauerstoffmangel als auch -überschuss die Verbrennung immer nur bestenfalls bis zum chemischen Gleichgewicht abläuft. Wird das chemische Gleichgewicht gar nicht erreicht, etwa weil Teilreaktionen zu langsam ablaufen, oder findet keine optimale Vermischung von Sauerstoff und Brennstoff statt, so spricht man zusätzlich von unvollkommener Verbrennung [14].

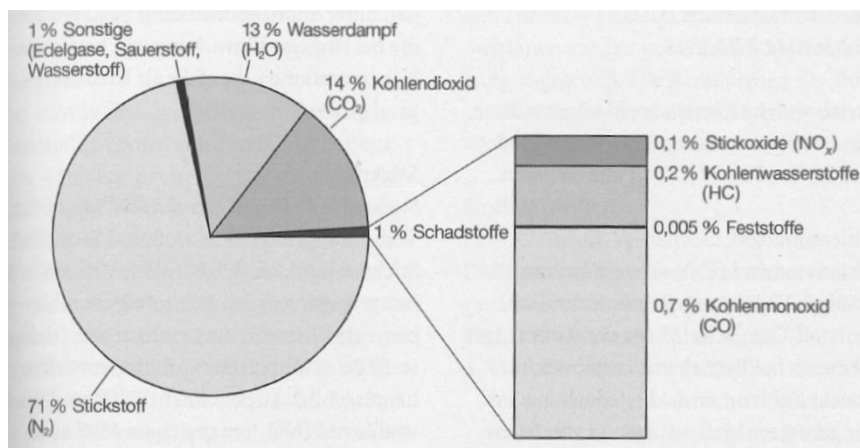
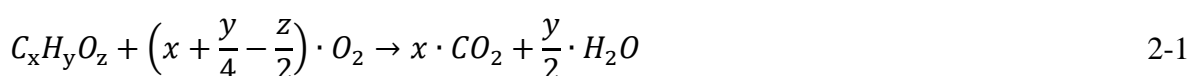


Abbildung 2-1: Zusammensetzung des Rohabgases [17]

Der volumetrische Anteil der Schadstoffe am gesamten Abgas beträgt bei Ottomotoren, wie Abbildung 2-1 zeigt, nur etwa 1 % (variiert je nach Lastpunkt). Doch genau dieser eine Prozent muss weiter reduziert werden, da die darin enthaltenen Stoffe sowohl die Umwelt, als auch die Gesundheit von Mensch und Tier gefährden.

2.1.1 CO₂

Kohlendioxid ist ein grundsätzlich ungefährliches Produkt der motorischen Verbrennung und entsteht dabei in großen Mengen. Die Menge an CO₂, die ausgestoßen wird, steht dabei in direktem Zusammenhang mit dem Verbrauch. Dies ergibt sich bei stöchiometrischer vollständiger Verbrennung aus:



Die Verbrennung eines Liters Benzin führt dabei zur Bildung von 2.38 kg CO₂, die Verbrennung eines Liters Diesel zu 2.65 kg CO₂, wobei der volumetrische Mehrverbrauch nicht zuletzt in der höheren Dichte von Diesel liegt. Die spezifischen Verbräuche können

gemäß 2-2 und 2-3 aus der CO₂- Emission in Gramm pro Kilometer errechnet werden.

$$G_G = \frac{h_{\text{CO}_2}}{23.8} \quad 2-2$$

$$G_D = \frac{h_{\text{CO}_2}}{26.5} \quad 2-3$$

Kohlendioxid ist farb- und geruchlos. Da es ein starkes Treibhausgas ist, trägt es bei Gewinnung aus fossilen Beständen zur globalen Erwärmung bei. Eine Verminderung des Ausstoßes kann lediglich durch Verminderung des Kraftstoffeinsatzes, durch Verwendung von kohlenstoffarmen Kraftstoffen oder der synthetischen Erzeugung von Kraftstoffen aus erneuerbaren Quellen erfolgen [14].

2.1.2 NO_x

Stickoxide entstehen in Verbrennungsprozessen vor allem bei hohen Temperaturen und Sauerstoffüberschuss. Ihre Reduktion ist vor allem bei Diesel- bzw. mager betriebenen direkt einspritzenden Ottomotoren problematisch, weshalb in diesen Fällen entweder Speicherkatalysatoren oder SCR- Katalysatoren Verwendung finden. In stöchiometrisch betriebenen Ottomotoren entstehen zwar ebenfalls Stickoxide, diese können allerdings mit dem Dreiwegekatalysator zu einem hohen Prozentsatz umgewandelt werden.

Neben Stickstoffmonoxid, welches etwa 85% der NO_x ausmacht und Stickstoffdioxid, welches den Großteil des Rests ausmacht, entstehen weitere fünf Stickoxide (NO₃, N₂O, N₂O₃, N₂O₄ und N₂O₅). Deren Mengen sind in Summe für den NO_x- Grenzwert allerdings nicht relevant und sollen im Weiteren nicht näher betrachtet werden. Abbildung 2-2 zeigt den Vergleich der über die Dauer eines RDE Zyklus emittierten NO und NO₂, wobei der Anteil an NO in diesem Fall sogar ca. 96% beträgt. Zum Vergleich: Ein guter Dieselmotor emittiert etwa 1g NO_x pro Kilometer ohne Abgasnachbehandlung [18].

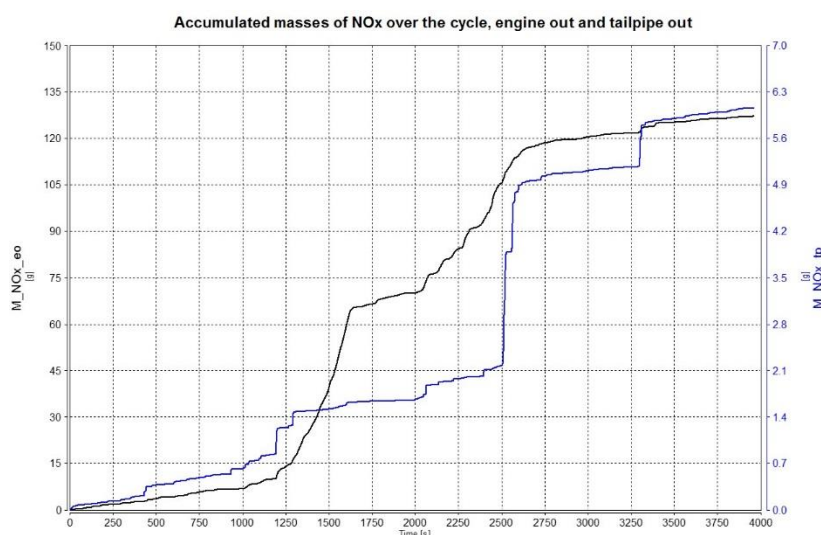


Abbildung 2-2: Vergleich von NO und NO₂ Rohemissionen über einen RDE- Zyklus, beispielhaft ein PKW der EURO6- Klasse

Der Großteil des emittierten Stickstoffmonoxids wird durch die UV- Strahlung der Sonne in Stickstoffdioxid umgewandelt. Die Einatmung größerer Mengen dieses hochgiftigen Reizgases kann lebensbedrohlich sein. Zudem ist NO₂ an der Bildung von Ozon in der Troposphäre beteiligt [9].

Die Bildung von NO kann entweder aus Luftstickstoff bei hohen (Zeldovich- NO) oder niedrigen Temperaturen (promptes NO) oder aus brennstoffgebundenem Stickstoff erfolgen. Der mit Abstand wichtigste Mechanismus dieser drei Möglichkeiten bei der Verbrennung ist die Bildung von thermischem NO, auch Zeldovich- NO genannt. Diese erfolgt bei hohen Temperaturen und einer Aktivierungsenergie der ersten Gleichung von 318 kJ/mol.



Die Bildung von thermischem NO wird vor allem von Temperatur, Luftverhältnis, Sauerstoffkonzentration, Druck und Verweilzeit bestimmt. Promptes NO dagegen entsteht aus einer Nebenreaktion in der Flammenfront aus OH- Radikalen [9].

Der Bildungsmechanismus kann auf die einfache Form 2-7 gebracht werden. Die Bestimmung der Sauerstoffkonzentration erfolgt nach 2-8 [9].

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2 \cdot k_1 \cdot [O] \cdot [N_2] \quad 2-7$$

$$[O] = \left(\frac{k_1 \cdot k_3 \cdot [O_2] \cdot [H_2]}{k_2 \cdot k_4 \cdot [H_2O]} \right) \quad 2-8$$

Die maximale NO_x- Konzentration tritt bei einer Temperatur von etwa 2200- 2400 K und einem Luftverhältnis zwischen 1.05 und 1.1 auf. Bei höheren Luftverhältnissen sinkt die Verbrennungstemperatur, weshalb auch die NO_x- Emission wieder sinkt, bei fetter Verbrennung sinken die Stickoxide ebenso.

Als besonders wirkungsvolle Maßnahme zur innermotorischen NO_x- Reduktion gilt die Abgasrückführung durch ihre die Verbrennungstemperatur senkende und ladungsverdünnende Wirkung sowie durch eine Erhöhung der spezifischen Wärmekapazität c_p [18].

2.1.3 Partikel

Partikel sind jene Stoffe, die bei einer Temperatur unterhalb von 52 °C von einem Filter eingefangen werden können. Sie können fest oder flüssig sein und bestehen hauptsächlich aus Ruß, Asche, Sulfaten und Additiven aus Schmier- und Kraftstoff sowie Produkte des Verschleißes, etwa des Kolbenabriebs [14].

Die Einführung der EURO 5b Norm brachte eine Limitierung der Partikelanzahl für Dieselmotoren mit Erstzulassung ab 01.09.2013 mit sich. Vorher wurde lediglich deren Massenausstoß gesetzlich geregelt (ab EURO 1). Für Ottomotoren brachte erst die EURO 5 Norm (Erstzulassung ab 01.01.2011) eine Limitierung der Partikelmasse und die EURO 6b Norm (Erstzulassung ab 01.09.2015) eine Limitierung der Partikelanzahl mit sich [5]. Vor allem die Anzahl der Partikel, die mit EURO 6b auf $6 \cdot 10^{11} \text{ \#/km}$ limitiert ist, soll im Fokus des RDE Tests stehen. Die von Ottomotoren emittierte Partikelmasse ist dagegen, verglichen mit jener des Dieselmotors, vor allem bei warmem Motor äußerst gering.

Die Entstehung der Partikel ist ein sehr komplexer Prozess. Grundsätzlich stammen Partikel sowohl aus der Verbrennung (Ruß und Asche), als auch aus dem Kraftstoff (und dessen Additiven) und den Schmiermitteln. Daraus folgt auch die sehr unterschiedliche Charakterisierung, Größe und Wirkung auf den Organismus. Für die genaue Berechnung der Partikelbildung und des Partikelwachstums sei auf die einschlägige Literatur verwiesen.

Über die Umweltrelevanz der Partikel ist wenig bekannt. Dagegen weiß man, dass sie durch

die geringe Größe leicht lungengängig sind, was aus humantoxischer Sicht äußerst bedenklich ist. Die Einführung immer schwefelärmerer Kraftstoffe hat sehr viel dazu beigetragen, die Partikelemissionen zu reduzieren [9].

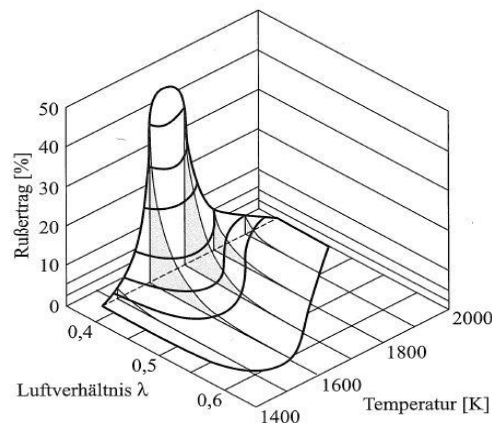


Abbildung 2-3: Bedingungen zur Partikelentstehung [14]

Vor allem beim Kaltstart haben direkt einspritzende Ottomotoren Nachteile in Bezug auf die Partikelemission verglichen mit Saugrohreinjection (PFI, *port fuel injection*). In Bereichen hoher Aufladung sind letztere dagegen im Nachteil. Allgemeine Aussagen diesbezüglich zu treffen ist schwierig, da die Motorkalibrierung starken Einfluss auf die Partikelentstehung hat [18].

2.1.4 CO

Kohlenmonoxid entsteht vor allem bei der unvollständigen Verbrennung unter Sauerstoffmangel sowie bei hohen Temperaturen als stabiles Verbrennungsprodukt und ist farb- und geruchlos. Durch seine Eigenschaft, die Sauerstoffaufnahme des Blutes zu beeinträchtigen, kann es im Organismus zu Vergiftungen führen. Allerdings ist es durch seine mittlere Lebensdauer von ca. 2 Monaten und seine niedrige Konzentration in der Atmosphäre nicht von besonderer klimatischer Relevanz [9].

2.1.5 HCs

Kohlenwasserstoffe im Abgas können sowohl von unvollständiger Verbrennung zeugen, als auch während der Verbrennung neu entstehen. Da die HCs äußerst unterschiedliche Eigenschaften besitzen, ist eine allgemeine Aussage über ihre Wirkung kaum möglich. Lediglich die krebserregende Wirkung ist einigen von ihnen gemein. Da die unverbrannten Kohlenwasserstoffe im RDE- Zyklus nicht mitgemessen werden, sollen sie an dieser Stelle auch nicht näher betrachtet werden. Bei stöchiometrischem bzw. überstöchiometrischem Motorbetrieb werden sie vom Dreiwegkatalysator zuverlässig oxidiert [17].

2.2 Innermotorische Maßnahmen zur Schadstoffsenkung

Eine effiziente Abgasnachbehandlung ist nur ein Teil der Gesamtsystemoptimierung der Verbrennungskraftmaschine. Damit diese so viel Kraftstoff wie möglich umsetzt, muss zunächst das System Motor so optimiert werden, dass die Rohemissionen minimal sind. Dazu zählt einerseits eine bestmögliche Gemischaufbereitung, welche durch die Qualität der Einspritzdüsen, der Gemischbildung und der Strömungscharakteristik (Drall/Tumble) im Brennraum bestimmt wird. Für die Strömung spielt auch die Form des Brennraums eine entscheidende Rolle. Vor allem kompakte Brennräume mit Vermeidung von Totvolumina, eine zentrale Kerzenlage bei Vierventiltechnik und eine Brennraumform, welche den zeitgerechten Zerfall der Ladungsbewegung zu Turbulenz ermöglicht, begünstigen eine effektive Verbrennung mit niedrigen Emissionen. Zudem muss eine sichere Entflammung des Gemisches zu jedem Zeitpunkt gegeben sein, um Zündaussetzer zu vermeiden. Hohe NO_x können vor allem durch den Einsatz der Abgasrückführung, welche die maximale Brennraumtemperatur senkt, späte Zündung und niedrige Verdichtungsverhältnisse vermieden werden, wobei letzteres in Widerspruch mit hohen Wirkungsgraden steht. Vor allem die Variabilität des Ventiltriebs ermöglicht den gezielten Einsatz der AGR bei Ottomotoren, was einerseits die NO_x Emissionen senkt, andererseits zu Wirkungsgradsteigerungen durch Entdrosselung führt. Hohe Kraftstoffqualität sowie geringe Streuungen zwischen den Zylindern sind zudem hilfreich bei der Emissionsminderung [14], [17] und [18].

2.3 Abgasnachbehandlung

Abhängig vom verwendeten Verbrennungsverfahren gibt es verschiedene Abgasnachbehandlungssysteme für Verbrennungsmotoren. Da der Ottomotor mit stöchiometrischem Luftverhältnis Gegenstand dieser Arbeit ist, werden als Systeme in erster Linie der Dreiwegekatalysator, aber auch der Partikelfilter sowie der Vierwegekatalysator als Kombination der beiden betrachtet.

2.3.1 Drei- Wege- Katalysator

Für stöchiometrisch geregelte Ottomotoren ist der Dreiwegekatalysator nach wie vor Stand der Technik. Er wandelt gleichzeitig die drei Schadstoffe CO, NO_x und unverbrannte HCs in die gesundheitlich harmlosen Produkte Wasserdampf, CO₂ und N₂ um. Dabei stellt er Reaktionspfade zur Umgehung von hohen Aktivierungsenergien zur Verfügung. Die chemischen Gleichgewichte werden dadurch nicht verändert [18].

2.3.1.1 Aufbau

Der Großteil der Katalysatoren ist aus einem Trägerkörper, einer Zwischenschicht (Washcoat), welche in vielen Fällen aus Aluminiumoxid Al₂O₃, in manchen auch aus SiO₂ oder TiO₂ besteht, und der katalytisch aktiven Schicht aufgebaut. Der Trägerkörper besteht zumeist aus einer Keramik, seltener aus Stahlblechen. Diese sind den keramischen vor allem dann voraus, wenn starke Vibrationen den Keramikträger zerstören würden oder wenn es darum geht, niedrige Abgasgedrücke zu realisieren, da mit Metallträgern geringere Wandstärken realisierbar sind [18].

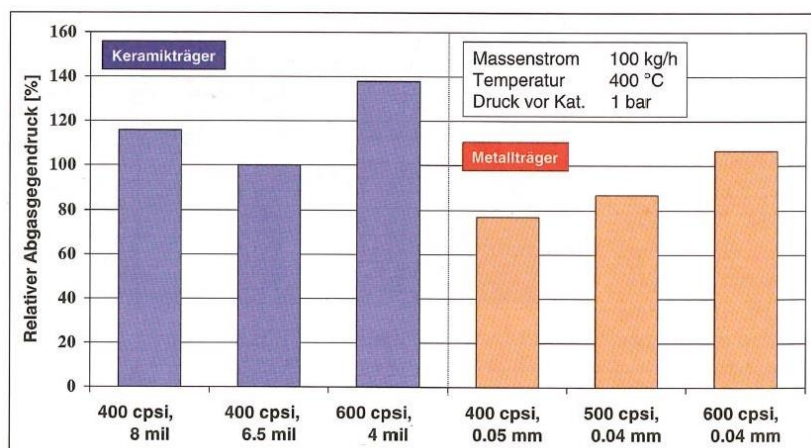


Abbildung 2-4: Vergleich der Abgasgedrücke verschiedener Trägerkörper [18]

Gemeinsam ist beiden Konzepten die wabenförmige Struktur. Die Zelldichte wird typischerweise in [cps, cells per square inch] angegeben und liegt typischerweise zwischen 400 und 900.

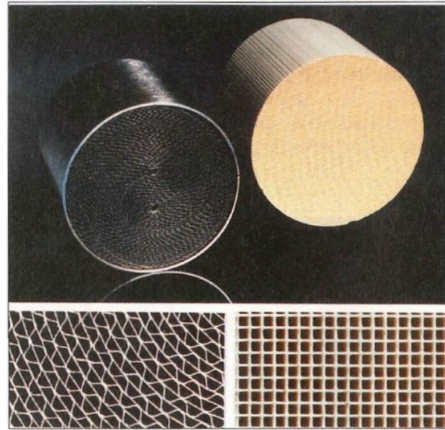


Abbildung 2-5: Vergleich metallischer/keramischer Trägerkörper [18]

Der Washcoat vergrößert die Oberfläche des Trägerkörpers und wird aus einer wässrigen Lösung der Trägeroxide hergestellt. Auf diesem befinden sich die katalytisch aktiven Edelmetalle, welche die Aktivierungsenergie der Oxidations- und Reduktionsreaktionen herabsetzen [18].

	Keramik			Metall			
Zelldichte [cps]	400	600	900	400	600	800	1000
Wandstärke [mil]	6.5	3.5	2.5	2.0	1.6	1.2	1.0
Geometrische Oberfl. [cm²/cm³]	27.3	34.4	43.7	36.8	42.9	51.6	56.0
Freier Querschnitt [%]	75	80	86.4	89.3	89.8	93.7	91.4
Hydr. Durchmesser [mm]	1.1	0.93	0.79	0.97	0.84	0.72	0.65
Dichte [g/cm³]	0.43	0.35	0.24	0.77	0.73	0.55	0.61

Tabelle 2-1: Charakteristische Größen einiger gängiger Katalysatorkonfigurationen [18]

Um Sauerstoff in den mageren Phasen einspeichern und in den fetten wieder abgeben zu können, wird Ceroxid verwendet. Dieses wechselt je nach Sauerstoffangebot zwischen den Oxidationsstufen +III und +IV. Durch Alterung nimmt die Fähigkeit des Katalysators, Sauerstoff einzuspeichern und wieder freizugeben stetig ab. Als Edelmetalle werden vor allem Palladium und Platin zur Oxidation von HC und CO sowie Rhodium zur Reduktion der NO_x eingesetzt.

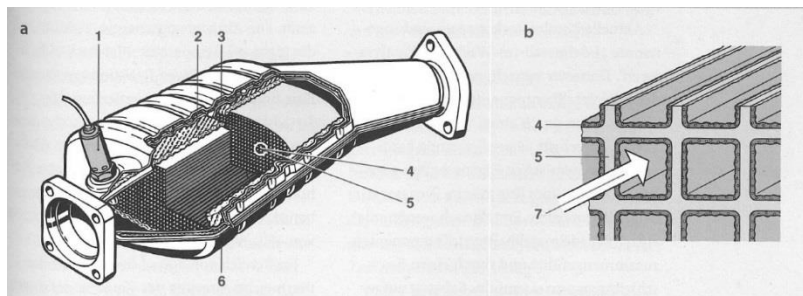


Abbildung 2-6: Aufbau eines Katalysators [17]

Der Monolith, welcher durch Extrudieren und Brennen einer Rohmischung hergestellt wird, wird in einem Blechgehäuse verbaut. Für die Dichtheit sorgen mineralische Quellmatten [17].

2.3.1.2 Arbeitsweise

Die Aufgabe des Katalysators ist es, die Aktivierungsenergien für sämtliche Oxidations- und Reduktionsreaktionen zu senken, damit die Umwandlung der Schadstoffe möglichst rasch und bei den im Abgasstrang herrschenden Temperaturen sicher erfolgt.

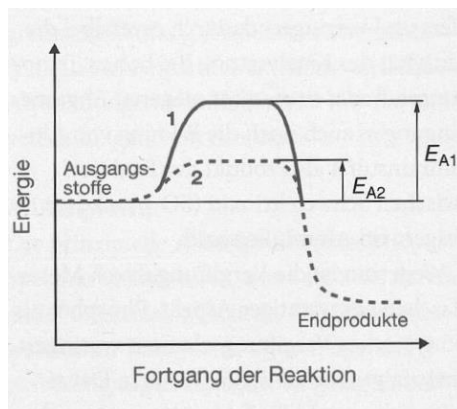
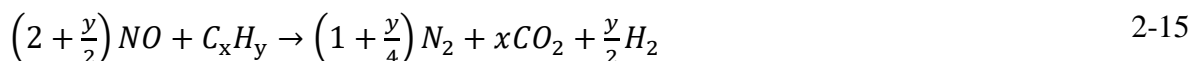


Abbildung 2-7: Aktivierungsenergie [17]

Die wichtigsten Oxidations- und Reduktionsreaktionen sind folgende:



Stickoxide werden zusammen mit Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid und Stickstoff reduziert. Kohlenmonoxid oxidiert mit Sauerstoff zu Kohlendioxid, die unverbrannten Kohlenwasserstoffe werden mithilfe von Sauerstoff zu Kohlendioxid und Wasser aufoxidiert [14].

Die Sauerstoffeinspeicherung bei magerem sowie die Sauerstofffreigabe bei fettem Gemisch erfolgt nach 2-16 bzw. 2-17.



Der Konvertierungsgrad des Katalysators ergibt sich nach 2-18. Dieser ist stark vom eingestellten Luftverhältnis abhängig, siehe Abbildung 2-8.

$$KG_{Kat} = \frac{C_{vK} - C_{nK}}{C_{vK}} \quad 2-18$$

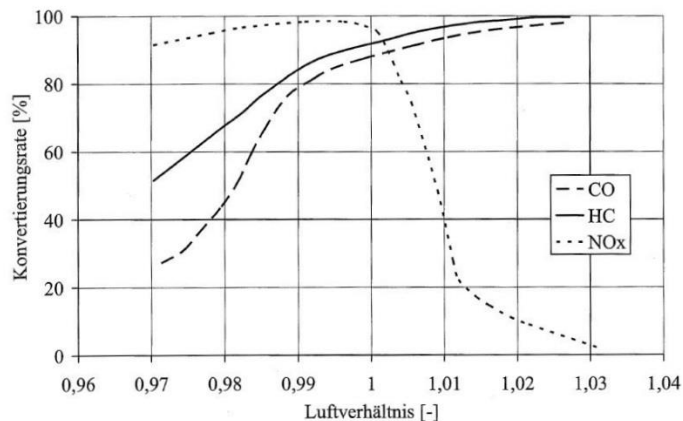


Abbildung 2-8: Konvertierungsrate des Katalysators über dem Luftverhältnis [14]

2.3.1.3 λ - Regelung

Die sehr hohen Anforderungen an die Kraftstoff- Luft- Zusammensetzung haben den Vergaser weitestgehend durch die Saugrohr- oder Direkteinspritzung ersetzt, ebenso wie die λ - Steuerung durch die λ - Regelung auf Basis einer möglichst präzisen Vorsteuerung verdrängt wurde. Durch eine λ - Sonde im Abgasstrang werden Abweichungen vom Soll $\lambda=1$ in Form eines Spannungssprungs (Sprungsonde) erkannt und durch Variieren der eingespritzten Kraftstoffmenge nachkorrigiert. Ein fettes Gemisch ist dabei durch eine hohe Spannung von etwa 800 mV, ein mageres Gemisch durch eine niedrige Spannung von etwa 200 mV gekennzeichnet. Die Messung erfolgt über den Restsauerstoffgehalt im Abgas, welcher bei $\lambda=1$ etwa 0.5 % beträgt [17].

Abbildung 2-10 macht den engen Regelbereich der Gemischzusammensetzung deutlich.

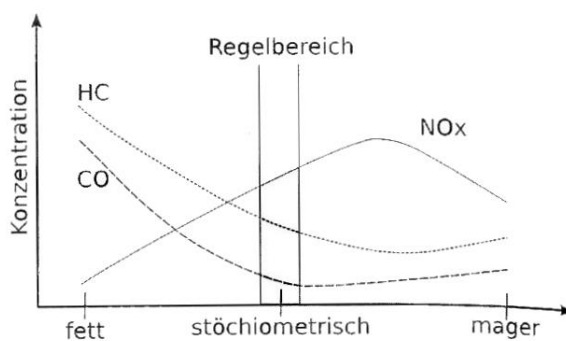


Abbildung 2-9: Qualitative Schadstoffkonzentration vor dem Katalysator [14]

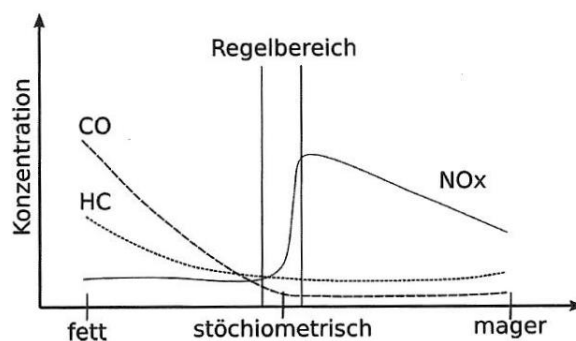


Abbildung 2-10: Qualitative Schadstoffkonzentration nach dem Katalysator [14]

Wird vor dem Katalysator eine Zweipunkt- Sonde verwendet, so kann nur auf $\lambda=1$ geregelt

werden. Die Verwendung einer Breitbandsonde erlaubt dagegen ein stetiges Signal, wodurch auch andere λ -Werte als eins eingestellt werden können, z.B. geregelte Anfettung im Bereich hoher Leistung zum Bauteilschutz. Zudem garantiert diese Art der Sonde eine deutlich dynamischere Regelung mit deutlich kleineren Amplituden im λ -Verlauf. Eine Anbringung der Sonde vor dem Katalysator garantiert eine hohe Dynamik durch kurze Gaslaufzeiten, läuft aber Gefahr zu vergiften. Eine Anbringung nach dem Katalysator dagegen würde nur zu unzureichender Regelgenauigkeit führen, da die Gaslaufzeit zu lang ist. Abhilfe schafft die Zwei- bzw. Dreisondenregelung (bei Verwendung eines motornahen Vorkatalysators). Dabei kann die motornahe Sonde sowohl eine Zweipunkt- als auch eine Breitbandsonde sein, bei der hinteren handelt es sich immer um eine Zweipunktsonde [17].

Prinzipiell besteht die Stellgröße immer aus einem Sprung und einer Rampe. Der Sprung dient dabei zur möglichst schnellen Gemischkorrektur, die Rampe einer langsamen Anpassung im Anschluss bis zum erneuten Spannungssprung.

Bevorzugt wird ein asymmetrischer Stellgrößenverlauf. Dies wird entweder durch Fettverschiebung (a) oder Magerverschiebung (b) erreicht.

Bei der Fettverschiebung verweilt dabei die Stellgröße nach einem Spannungssprung auf „fett“ für eine gewisse Verweilzeit t_v auf „fett“ und regelt erst dann Richtung „mager“. Springt die SONDENSspannung dann auf „mager“, wird sofort mit Sprung und Rampe darauf reagiert. Bei der Magerverschiebung verhält es sich genau umgekehrt [17].

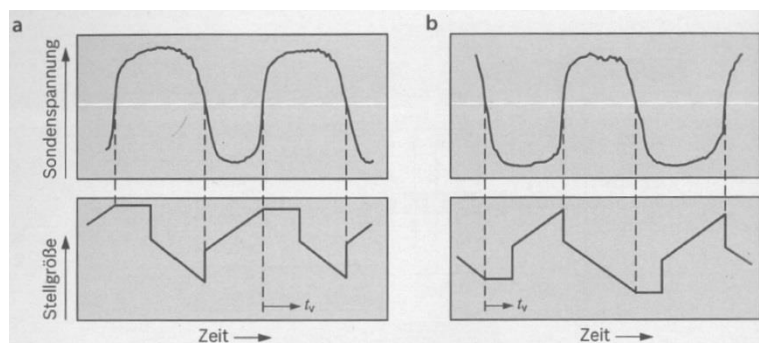


Abbildung 2-11: Fett- und Magerverschiebung der Lambda-Regelung [17]

Zum Erkennen des Beladungszustands des Katalysators kann eine weitere λ -Sonde nach dem Katalysator verwendet werden, was im Besonderen auch für die Überwachung der Funktionalität über die Lebensdauer (On Board Diagnose) relevant ist. Die Differenz der beiden Sonden vor und nach Katalysator stellt die Einspeicherung bzw. den Verbrauch des eingespeicherten Sauerstoffs dar.

Läuft der Motor mager, wird Sauerstoff im Katalysator eingespeichert. Dieser lagert sich z.B. an Cer an und dient als Puffer für die darauffolgende fette Phase, in der der Sauerstoff wieder ans Abgas abgegeben wird. Dies ergibt dann eine Differenz zwischen den Lambdasonden vor und nach dem Katalysator. Ist die Sättigung erreicht, dann misst die Sonde hinter dem Katalysator ebenfalls mageres Gemisch. Dies ist der Trigger für eine Anfettung. Dabei wird der eingespeicherte Sauerstoff wieder verbraucht und die Prozedur beginnt von neuem [17].

2.3.1.4 Betriebsbedingungen

Die Light- Off Temperatur, d.h. jene Temperatur, bei der 50% Konvertierung erreicht werden, beträgt meist um die 300 °C, ideale Betriebsbedingungen herrschen bei 400-800 °C und bei über 800 °C wird die Alterung stark beschleunigt. Zündaussetzer können die Katalysatortemperatur bis auf 1400 °C steigen lassen und den Katalysator vollständig zerstören. Auch eine Vergiftung senkt die Konvertierungsrate stark. Vor allem Blei, das früher als Anti-Klopfmittel eingesetzt wurde, schädigt den Katalysator. Heutzutage ist dies durch die Verwendung von bleifreiem Benzin kein Thema mehr. Vielmehr sind es

Schwefelverbindungen, die die Reaktionsfreudigkeit des Katalysators irreversibel herabsetzen. Ein weiteres Katalysatorgift stellt Phosphor dar, welches in der Motorölflasche enthalten ist. Prinzipiell kann man die selektive und die nicht-selektive Vergiftung voneinander unterscheiden. Erstere ist charakterisiert durch eine gezielte Reaktion gewisser Stoffe mit den aktiven Zentren, zweite durch Ablagerung und somit Verschließen der aktiven Zentren [17].

2.3.1.5 Aufheizverhalten

Essentiell für einen hohen Konvertierungsgrad ist neben einer genauen λ -Regelung ein schnelles Erreichen der Light-Off Temperatur, da der Katalysator erst ab einer gewissen Temperatur (ab ca. 300 °C) und nur in einem sehr engen λ -Fenster gute Umwandlungsgrade garantiert. Prinzipiell unterscheidet man eine motornahe Anordnung (close coupled) von der Unterfluranordnung. Erstere garantiert zwar eine schnelle Aufheizung, allerdings steigt auch die Gefahr schneller Alterung durch hohe Temperaturen. Zudem ist das Platzangebot im Motorraum sowie die gesetzliche Anforderung an die Wirksamkeit über die Lebensdauer ein entscheidender Parameter. Eine motornahe Anordnung zeigt Abbildung 2-12.

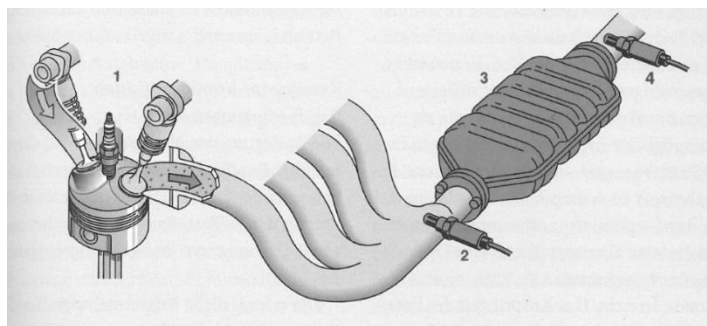


Abbildung 2-12: Close-coupled-Anordnung des Katalysators [17]

Für ein schnelles Aufheizen kann die close-coupled-Variante eines kleinvolumigen Vor-Katalysators, eine elektrische Beheizung des Katalysators, eine Zündwinkelverstellung nach spät, eine höhere Leerlaufdrehzahl, ein frühes Öffnen der Auslassnockenwelle mithilfe eines variablen Ventiltriebs, Homogen-Split (erste Einspritzung während des Ansaugtakts und zweite nahe OT ermöglichen späte Zündzeitpunkte bis ca. 30° nach OT) oder ein fetter Warmlauf bei $\lambda \approx 0.9$ in Kombination mit Sekundärlufteinblasung sorgen. Die höhere Leerlaufdrehzahl, welche den Abgasmassenstrom anhebt, ermöglicht gleichzeitig einen größeren Spätstellwinkel der Zündung [17] und [18].

2.3.1.6 Entwicklungsziele

Für zukünftige Emissionsziele in der EU wird neben dem heute bereits üblichen motornahen Katalysator ein zusätzlicher Unterbodenkatalysator Verwendung finden, um die Emissionen über die Lebensdauer des Fahrzeugs bei beschleunigter Alterung des close coupled Katalysators niedrig zu halten.

Auch die Sauerstoffspeicherung spielt eine Rolle in der derzeitigen Entwicklung, da vor allem fuel-cuts im Schubtrieb dafür sorgen, dass der Sauerstoffspeicher aufgefüllt wird. Wird anschließend wieder Kraftstoff eingespritzt, wird eine große Menge HCs emittiert, die im Katalysator mit dem Sauerstoff reagieren und dessen Aufheizung und somit mögliche Alterung weiter vorantreiben. Eine geringere Menge Sauerstoffspeicherkomponenten könnte dieses Problem verringern.

Eine elektrisch beheizte Scheibe des Katalysatorträgers ist ein weiterer möglicher Schritt in Richtung niedrige Kaltstartemissionen. Die benötigte Heizleistung von ca. 2 kW würde allerdings das Bordnetz gerade in der Kaltstartphase stark beanspruchen, was deren Einsatz in konventionellen Antriebssträngen stark einschränkt. Für Hybridfahrzeuge allerdings wäre die

Lösung plausibel, da in diesem Fall bereits ein Starkstromnetz an Bord ist.

Auch die Verwendung eines HC- Adsorbers kann in Betracht gezogen werden. Dieser speichert die HCs zunächst und gibt diese dann ab, sobald der Katalysator die light-off Temperatur erreicht hat. Hauptproblem ist allerdings die Freigabe der HCs bereits bei ca. 200 °C, bei der der nachfolgende Katalysator noch nicht seine Betriebstemperatur erreicht hat. Eine Kombination von HC- Adsorber und elektrisch beheizter Katalysator wäre denkbar, stellt allerdings einen hohen Systemaufwand dar [17]. Vor allem in Plug- In Hybridfahrzeugen, bei denen die VKM mitunter bei Hochlast und kaltem Abgasnachbehandlungsanlage gestartet wird, kann ein HC- Adsorber sinnvoll sein.

2.3.2 Partikelfilter

Eine erhöhte Partikelbildung findet beim Ottomotor vor allem an kalten Brennraumwänden und bei Wandauftrag des Kraftstoffs statt. Obwohl sich die Partikelthematik durch entsprechende Detailentwicklung entschärfen lässt und beispielsweise die Partikelmassen-Emission beim Ottomotor um Größenordnungen niedriger ist als bei Dieselmotoren, lässt vor allem die Bildung kleiner Partikel im instationären Betrieb die Einhaltung von Partikelanzahl-Grenzwerten unsicher erscheinen. Hier sei noch erwähnt, dass der gut entwickelte DI-Ottomotor im aufgeladenen Lastbereich geringere Partikelemissionen aufweist als ein Saugrohreinspritzer [18].

In Zukunft wird auch beim Ottomotor, wie beim Dieselmotor mittlerweile Standard, ein Partikelfilter als Mittel zur Einhaltung der gesetzlich geforderten Partikellimits erforderlich sein.

Grundsätzlich ist ein Partikelfilter ähnlich dem Katalysator aufgebaut, besitzt allerdings weder Washcoat noch Beschichtung, sondern wechselseitig verschlossene Kanäle. So wird der Abgasmassenstrom durch die porösen Keramikwände gezwungen, an denen sich die Partikel abscheiden. Die bereits abgeschiedenen erhöhen dabei die Filterwirkung, weshalb der Wirkungsgrad mit zunehmender Beladung steigt, allerdings auch der Gegendruck. Deshalb muss von Zeit zu Zeit dieser „Rußkuchen“ abgebrannt werden, hierzu wird die Abgastemperatur erhöht, etwa durch fette Verbrennung und Sekundärlufteinblasung.

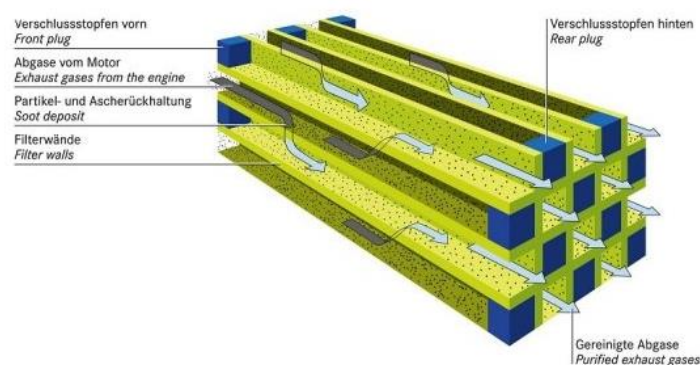


Abbildung 2-13: Aufbau eines Partikelfilters [11]

Der Rückhaltegrad von Partikelfiltern beträgt bis zu 95%, wobei vor allem die Partikelgröße eine entscheidende Rolle hierfür spielt. Kleine Partikel werden durch Diffusion, große durch Impaktion gefiltert. Partikel mittlerer Größe können allerdings zu klein für Impaktion und zu groß für Diffusion sein, weshalb der Wirkungsgrad in diesem Bereich sinkt.

Am Ende der Kanäle lagert sich Asche an den Pfropfen ab, welche nicht abgebrannt werden kann [17].

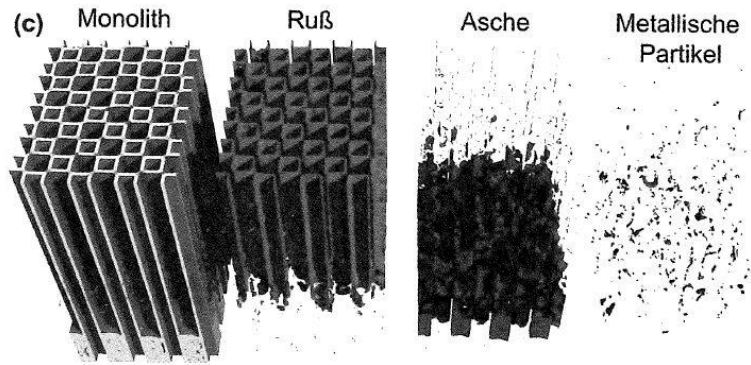


Abbildung 2-14: Segmentierung der einzelnen Rückstände im Partikelfilter [14]

2.3.3 Vier- Wege- Katalysator

Der Vierwegekatalysator vereint Dreiwegekatalysator und Partikelfilter in einem Monolith. Prinzipiell handelt es sich hierbei um einen mit Edelmetallen beschichteten Partikelfilter. Da die Gesamtmenge der Edelmetalle erfahrungsgemäß geringer ist als bei separater Anordnung von Dreiwegekatalysator und GPF, werden die beiden in Zukunft wohl in Kombination verwendet werden mit der Möglichkeit, einen kleinen Dreiwegekatalysator als close coupled auszuführen.

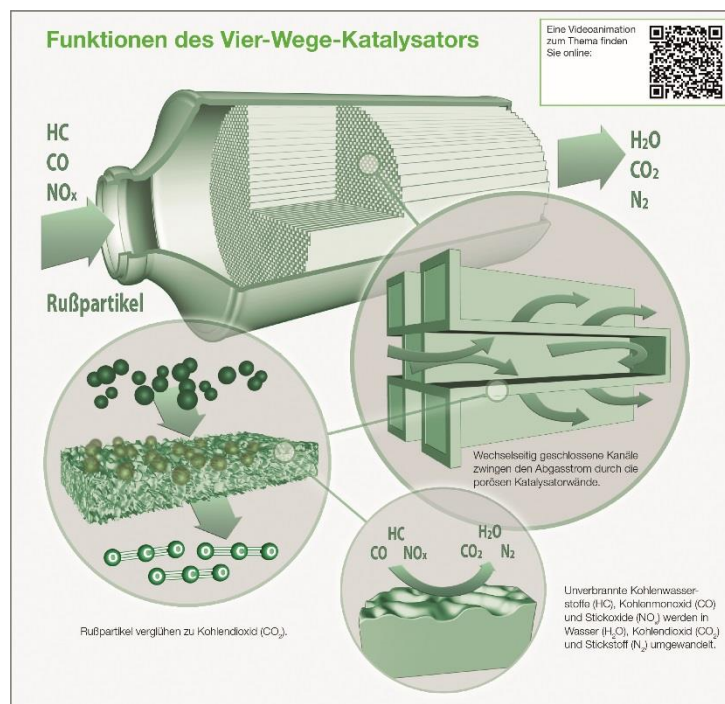


Abbildung 2-15: Prinzip des Vierwegekatalysators [13]

Wie beim Partikelfilter wird der Abgasmassenstrom durch die porösen Wände geleitet. Dort lagern sich die Partikel ab. Durch die Beschichtung werden aber auch die drei Hauptschadstoffe CO, NO_x und HCs konvertiert, sofern das Luftverhältnis stöchiometrisch ist [13].

2.4 Übersicht über die Gesetzgebung

Die folgenden Absätze sollen eine Übersicht über die derzeitigen von der EU verabschiedeten Emissions- Normen geben. Der Schwerpunkt liegt dabei vor allem auf dem RDE- Zyklus. Da dieser in engem Zusammenhang mit dem WLTP und beide wiederum Teil der EURO 6 Norm sind, sollen auch diese beleuchtet werden.

2.4.1 EURO 6 Norm

2014 wurde die EURO 6 Norm für PKWs mit Ottomotoren eingeführt. Die in EURO 6 zusammengefassten Emissionslimits sind in Tabelle 2-2 dargestellt.

Komponente	Limit
CO	1000 [mg/km]
HC	100 [mg/km]
NMHC	68 [mg/km]
NO _x	60 [mg/km]
PM	4.5 [mg/km]
PN	6·10 ¹² [# /km] (6b) 6·10 ¹¹ [# /km] (6c/d)

Tabelle 2-2: EURO 6 Emissionslimits für PKWs mit Ottomotor [2]

Bis inklusive EURO 6b ist der NEDC der gültige Testzyklus. Mit Einführung der EURO 6c wird dieser vom WLTC abgelöst (Genehmigung neuer Fahrzeugtypen ab 1. September 2017, Genehmigung neuer Fahrzeuge ab 1. September 2019). Die Emissionsnorm EURO 6c inkludiert RDE- Tests lediglich zu Überwachungszwecken. Die EURO 6d Norm, welche als Testverfahren erstmals den RDE Test und den WLTC enthält, wird in zwei Schritten eingeführt: Ab 1. September 2017 gilt für die Genehmigung neuer Fahrzeugtypen EURO 6d-TEMP (mit vorläufigem Konformitätsfaktor für den RDE- Test von 2.1) und ab 1. Januar 2020 EURO 6d (mit endgültigem Konformitätsfaktor von 1.5).

Die Limitierung der pro Kilometer emittierten Partikel von PKWs mit Ottomotoren wurde mit Einführung der EURO 6b Norm vorgenommen, wobei diese mit Einführung der EURO 6c Norm um den Faktor 10 gesenkt wurde [5].

2.4.2 WLTC

Grundlage dieses weltweit einheitlichen Labortests ist die Luft- und Rollwiderstandsmessung des Fahrzeugs auf ebener Strecke. Zusammen mit dem Fahrzeuggewicht bildet sie die Ausgangsbasis für die Einstellung der Rollenwiderstände am Prüfstand. Dort wird nun ein neu definiertes Geschwindigkeitsprofil abgefahren. Im Gegensatz zum bisher angewandten NEDC sind dabei viele Parameter wie etwa Bereifung realitätsnäher festgelegt, die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sind höher und der Test dauert 30 statt der bisher gefahrenen 20 Minuten [12].

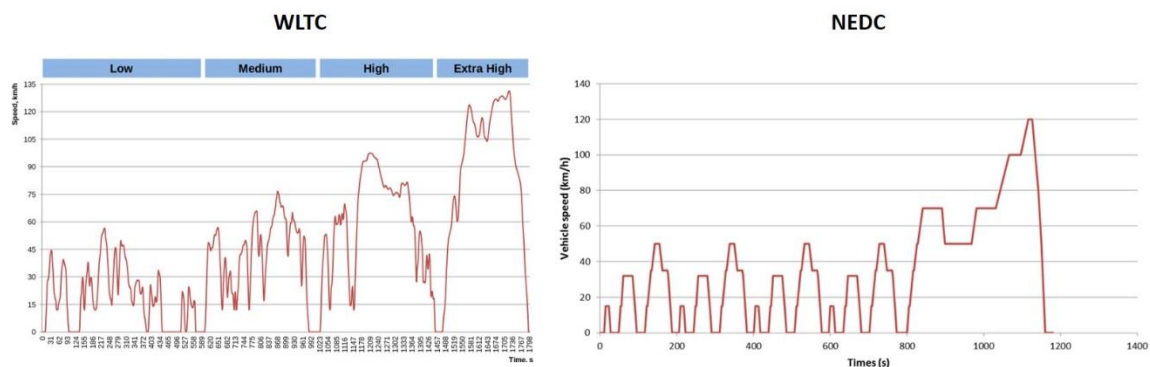


Abbildung 2-16: Geschwindigkeitsprofile von WLTC und NEDC [10] und [12]

Es sind je nach Leistungsgewicht des Fahrzeugs drei verschiedene Zyklen definiert, wobei die meisten Fahrzeuge in die dritte Klasse (>34 kW/t) fallen werden. Der WLTC ist in vier Teilabschnitte unterteilt. Für diese dritte Leistungsklasse ergibt sich folgendes Profil:

Zyklusabschnitt	Low speed	Medium speed	High speed	Extra High speed	Total
Dauer [s]	589	433	455	323	1800
Stillstandsdauer [s]	156	48	31	7	242
Distanz [m]	3095	4756	7158	8254	23262
Stoppanteil [%]	26.5	11.1	6.8	2.2	13.4
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	56.5	76.6	97.4	131.3	131.3
Durchschnittsgeschwindigkeit ohne Stopps [km/h]	25.7	44.5	60.8	94.0	53.8
Durchschnittsgeschwindigkeit mit Stopps [km/h]	18.9	39.5	56.6	92.0	46.5
Minimale Beschleunigung [m/s^2]	-1.5	-1.5	-1.5	-1.2	-1.5
Maximale Beschleunigung [m/s^2]	1.5	1.6	1.6	1.0	1.6

Tabelle 2-3: WLTC Charakteristik [12]

Der WLTC ist dabei momentan vor allem für die EU, China, Indien, Japan und Korea relevant. Andere Länder wie etwa die USA sind komplett aus dem Programm ausgestiegen.

Da die CO_2 - Flottenziele auf den NEDC bezogen sind, vor Inkrafttreten dieser aber der WLTC eingeführt wird, wird mithilfe des Simulations- Tools CO_2MPAS der CO_2 - Ausstoß vom WLTC auf den NEDC umgerechnet. Im Unterschied zum NEDC werden die Schaltpunkte nicht mehr fix vorgegeben, sondern vom einem eigens entwickelten Algorithmus berechnet, um der wachsenden Vielfalt an Getrieben gerecht zu werden. Anzumerken ist, dass keine Steigungen im WLTP realisiert werden [7].

2.4.3 RDE- Prüfverfahren

Durch die Aufdeckung starker Abweichungen der Emissionen von PKWs im realen Fahrbetrieb verglichen mit jenen vom NEDC, durch stark unterschiedliche Betriebssituationen verabschiedete die EU im Frühjahr 2015 das RDE- Prüfverfahren. Dieses soll das reale Emissionsverhalten von PKWs überprüfen. Im Fokus stehen dabei Luftqualität und Gesundheit, weshalb vor allem die Stickoxide und Partikel überwacht werden sollen. Zudem werden dabei weite Kennfeldbereiche, die bisher weder vom NEDC noch vom WLTC abgedeckt wurden, emissionstechnisch erfasst. Dabei kann die Motorbeanspruchung während des RDE- Tests bei entsprechend ungünstigen Kombinationen von schwachem Motor und schwerem Fahrzeug (etwa downsized SUVs) bis in den nennleistungsnahen Betrieb gehen.

Im realen Fahrbetrieb des Fahrzeugs werden dessen Schadstoffemissionen von verschiedensten Faktoren beeinflusst. Diese können fahrerspezifisch (moderates oder dynamisches Fahren), fahrbahnspezifisch (Verkehrsaufkommen, Steigungen etc.), umgebungsspezifisch (Luftfeuchtigkeit, Temperatur etc.) oder fahrzeugspezifisch (Masse, Aerodynamik) sein. Deshalb ist es beim RDE Test besonders wichtig, dass die jeweiligen Grenzen für diese Parameter genau definiert werden, um einen Vergleich verschiedener Fahrzeuge miteinander objektiv zu ermöglichen. Das folgende Kapitel soll die genaue Vorgehensweise beim Test genauer beleuchten [5].

2.5 Der Real Driving Emissions Test

Die Einführung des RDE Zyklus soll in vier Paketen stattfinden. Am 31.03.2016 wurde das erste RDE Paket im Official Journal als EU Kommissionsverordnung 2016/427 veröffentlicht. Definiert sind darin vor allem gasförmige Emissionen sowie die Auswertetools EMROAD und CLEAR. Das 2. RDE Paket wurde mit 20.04.2016 als EU Kommissionsverordnung 2016/646 eingeführt. Es vervollständigt die gasförmigen Emissionen und bringt eine Definition der NTEs mit sich. Das dritte Paket wurde am 20.12.2016 einstimmig befürwortet und beinhaltet den finalen Konformitätsfaktor, Kaltstartspezifikationen, die Regelung für Hybridfahrzeuge und jene für Klein- und Kleinserienhersteller. Es soll im Mai 2017 veröffentlicht werden. Das vierte und letzte Paket soll die Transfer- Funktion definieren, Spezialfahrzeuge inkludieren, das Testverfahren für Hybridfahrzeuge verbessern, Messungenauigkeiten besser berücksichtigen und auch die In- Service Conformity Testbedingungen für RDE- Tests durch unabhängige Prüfstellen definieren. Es soll im Juli 2017 verabschiedet werden [5].

Die Charakteristiken/Anforderungen des RDE- Prüfverfahrens zeigt Tabelle 2-4.

Kriterium	Wert
Fahrzeugmasse	<2610 kg; Testfahrzeug inkl. Fahrer soll <90% der zulässigen Gesamtfahrzeugmasse wiegen
Zusammensetzung Zyklus	Urban (29-44%) Überland (23-43%) Autobahn (23-43%)
Stoppperioden	6-30%, mindestens 180 s lang
Mindestlänge der einzelnen Abschnitte	16 km
Zyklus- Gesamtdauer	90-120 min
Maximale Höchstgeschwindigkeit	145 km/h, Toleranz +15 km/h für weniger als 3% der Autobahn- Gesamtdauer
Höhendifferenz Start-Ziel	< 100m
Maximale positive kumulierte Steigung	1200 m / 100 km
Temperatur	normal 0 bis 30 °C erweitert -7 bis 35 °C
Höhe der Teststrecke (ü.d.M.)	normal < 700 m erweitert < 1300 m
Kraftstoff und Öle	Von der Tankstelle
Fahrweise	Unterscheidung zwischen moderat und dynamisch
Klimaanlage, Autoradio etc.	Sollen nach Bedarf eingeschaltet werden

Tabelle 2-4: RDE Charakteristik [4]

2.5.1 RDE Messaufbau

Die Messung und Aufzeichnung sämtlich motorischer und emissionsbedingter Größen während RDE- Messfahrten ist unabdingbar, will man bestehende Fahrzeuge auf ihrer RDE-Kompatibilität überprüfen oder verschiedene Fahrzeuge miteinander vergleichen. Dieses Kapitel ist der Hardware für die Emissionsmessung gewidmet.

Das sogenannte „portable emissions measurement system“, kurz PEMS, ist ein mobiles Messsystem, das während der RDE- Fahrt die Schadstoffemissionen misst und aufzeichnet. Die Energieversorgung muss dabei extern erfolgen.

Die für die vorliegende Arbeit verwendeten Messdaten wurden ausschließlich mithilfe des für den Einsatz an PKWs entwickelten AVL M.O.V.E. iS GAS & PN PEMS ermittelt.



Abbildung 2-17: Setup für die RDE- Fahrt [6]

Gemessen werden in erster Linie die Konzentrationen von NO, NO₂, CO und CO₂ sowie die Partikelanzahl mit einer Abtastfrequenz von 1Hz. Die verwendeten Technologien zur Messung der Schadstoffe sind folgende:

- NO/NO₂: Ultraviolett- Analysator
- CO/CO₂: Nichtdispersiver Infrarotsensor (NDIR)
- Partikel: Kondensationskernzähler oder Ladungsmessung nach einem Volatile particle remover (VPR)

Die Beschreibung der einzelnen Messprinzipien würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, weshalb auf die einschlägige Literatur verwiesen wird.

Zusätzlich zu den Emissionsmessgeräten beinhaltet das PEMS ein GPS- System zur Messung von Geschwindigkeit, Position und Höhe des Fahrzeugs.

Um die Schadstoffkonzentrationen von den gemessenen [ppm] in [g/s] umzurechnen, muss der Abgasmassenstrom gemessen werden. Diese Aufgabe übernimmt das „exhaust flow meter“, kurz EFM.

Motorspezifische Kenngrößen wie etwa momentanes Drehmoment oder Motordrehzahl werden der ECU entnommen. Als Interface dient die OBD- Schnittstelle oder RawCAN [6].

2.5.2 Ablauf des Zyklus

Die Vehikel- Vorkonditionierung erfolgt durch einstündiges Fahren mit anschließendem Parken bei geschlossenen Türen für etwa sechs bis 56 Stunden im Freien.

Die Leerlaufphase nach Start darf höchstens 30 Sekunden dauern. Die Kaltstartphase dauert 5 Minuten oder solange, bis die Kühlmitteltemperatur 70 °C erreicht, je nachdem, was zuerst

eintritt. Während diesen ersten Minuten soll die Durchschnittsgeschwindigkeit 15-40 km/h, die maximale 60 km/h betragen. Die dabei gemessenen Emissionen werden wie folgt berücksichtigt:

$$m_u = w \cdot h_{\text{cold}} \left[\frac{\text{mg}}{\text{km}} \right] + (1 - w) \cdot h_{\text{hot,u}} \left[\frac{\text{mg}}{\text{km}} \right] \quad 2-19$$

$$w = \frac{d_{\text{cold}}[\text{km}]}{d_u[\text{km}]} \quad 2-20$$

Die Durchschnittsgeschwindigkeit des Stadt- Abschnitts soll 15-40 km/h betragen, wobei Stoppzeiten mit Geschwindigkeiten unter 1 km/h 6-30 % von der Gesamtdauer des Abschnitts ausmachen sollen. Auch mehrere Stoppperioden von mehr als 10 Sekunden sollen vorkommen. Dauern Stopps länger als drei Minuten, so werden die Emissionen exkludiert.

Im Autobahn- Abschnitt soll vor allem der Geschwindigkeitsbereich von 90-110 km/h abgedeckt werden. Zudem wird die Maximalgeschwindigkeit auf 145 km/h plus 15 km/h Toleranz für max. 3% der Autobahn- Zeit festgelegt. Geschwindigkeiten über 100 km/h sollen mindestens 5 Minuten lang gefahren werden [5].

2.5.3 Emissionslimits des Zyklus

Das im RDE- Test nicht zu überschreitende Emissionslimit errechnet sich wie folgt:

$$NTE_{\text{Poll}} = CF_{\text{Poll}} \cdot TF(p_1, \dots, p_n) \cdot EURO6 \quad 2-21$$

Der Übereinstimmungsfaktor CF (conformity factor) ist derzeit nur für NO_x geregelt und beträgt gemäß EURO 6d- TEMP 2.1 und gemäß EURO 6d 1.5. Für die NO_x gelten somit Grenzwerte von 126 bzw. 90 mg/km. Für den Ausstoß von Partikeln wurde noch kein Limit ausgearbeitet.

Der Faktor EURO6 in 2-21 bedeutet das Emissionslimit der EURO6 Norm, siehe Tabelle 2-2.

Die Transferfunktion TF wurde von den Herstellern gefordert, um die Not- To- Exceed- Limits (NTE) bei gesetzlich festgelegtem conformity factor an verschiedene Parameter im RDE- Test wie etwa variierende Dynamik oder Umgebungsbedingungen anzupassen. Die finale Transfer- Funktion soll all diese unterschiedlichen Bedingungen vereinen. Der Faktor Q(p) ist dabei die Wahrscheinlichkeitsdichte eines Auftretens des Parameters p.

$$\int TF(p_1, \dots, p_n) \cdot Q(p_1, \dots, p_n) dp = \int Q(p_1, \dots, p_n) dp \quad 2-22$$

Momentan ist der Wert der Funktion auf eins festgelegt [5].

2.5.4 Überprüfen der Gültigkeit einer RDE- Fahrt

Ist die Messfahrt beendet, gilt es, diese auf Gültigkeit zu überprüfen. Die Prozedur hierfür wird im Folgenden beschrieben.

2.5.4.1 Vorverarbeitung der Daten

Ein erster Schritt inkludiert das Aussortieren von fehlerhaften Zyklen. Die Geschwindigkeitsprofile solcher Zyklen weisen Sprünge, Lücken, Terrassen oder Stufen auf. Zu hohe Geschwindigkeiten, das Überschreiten von Toleranzen bezüglich der prozentuellen Anteile von Urban, Überland und Autobahn und zu hohe Beschleunigungen (>4 m/s² und <-4 m/s²) machen einen Zyklus ebenso nutzlos für weitere Berechnungen. Für die Auflösung der Beschleunigung (Schrittweite) besteht folgende Forderung:

- Wenn $a_{\text{res}} < 0,01 \text{ m/s}^2$ dann ist die Geschwindigkeitsmessung akkurat genug

- Wenn $0,01m/s^2 < a_{res} < a_{max}$ dann ist ein Filter vom Typ T4253H Hanning zu verwenden
- Wenn $a_{res} > a_{max}$ dann ist der Zyklus unbrauchbar

Dies soll eine sinnvolle Auswertung garantieren [5]. a_{max} wurde von der Europäischen Kommission noch nicht definiert.

2.5.4.2 Berechnung von Strecke, Beschleunigung und $v \cdot a$ pro Zeitschritt

Die Abtastfrequenz soll 1 Hz betragen, somit findet pro Sekunde eine Messung statt. Die Geschwindigkeit ist in km/h anzugeben. Die zwischen zwei Messpunkten zurückgelegte Strecke, die Beschleunigung und das Produkt aus Geschwindigkeit und Beschleunigung in $[m^2/s^3]$ bzw. $[W/kg]$ erhält man folgendermaßen:

$$d_i = \frac{v_i}{3,6} \quad 2-23$$

$$a_i = \frac{v_{i+1} - v_{i-1}}{2 \cdot 3,6} \quad 2-24$$

$$(v \cdot a)_i = \frac{v_i}{3,6} \cdot a_i \quad 2-25$$

2.5.4.3 Einteilung der Ergebnisse in Klassen

Nun sollen die Geschwindigkeiten der einzelnen Logpunkte absteigend sortiert und in die Kategorien Stadt-, Überland- und Autobahnzyklus eingeteilt werden. In jedem der drei Zyklen sollen mindestens 150 Logpunkte mit Beschleunigungen größer $0,1 m/s^2$ sein. Für jede Zykuskategorie soll die Durchschnittsgeschwindigkeit diesem Schema berechnet werden [5].

$$\bar{v}_k = \frac{\sum_i v_{i,k}}{N_k} \quad 2-26$$

2.5.4.4 Berechnung von $v \cdot a_{pos-}$ [95] pro Geschwindigkeitsintervall

Als nächstes soll $v \cdot a_{pos-}$ [95], das sogenannte Dynamikkriterium, der einzelnen Kategorien berechnet werden. Hierzu werden die $v \cdot a_{i,k}$ – Werte absteigend sortiert und jene ausgewählt, welche größer als $0,1 m/s^2$ sind. Deren Anzahl beträgt je Zykuskategorie M_k .

Nun sollen die jeweiligen prozentuellen Anteile den $v \cdot a_{i,k}$ – Werten zugeteilt werden, und zwar wie folgt:

Der niedrigste $v \cdot a_{pos-}$ – Wert erhält den Prozentanteil $1/M_k$, der zweitniedrigste den Anteil $2/M_k$ usw. Der höchste Wert erhält den Anteil M_k/M_k und somit 100% (alle Werte sind unter diesem höchsten Wert). $v \cdot a_{pos-}$ [95] ist derjenige Wert, dessen j/M_k 0.95 beträgt und steht für den Grenzwert, unter dem 95% der Samples liegen müssen. Kann dieser Wert nicht direkt ermittelt werden, muss er interpoliert werden.

Die relative positive Beschleunigung RPA (relative positive acceleration) errechnet sich für jeden Zyklusabschnitt wie folgt:

$$RPA_k = \frac{\sum_j (\Delta t \cdot (v \cdot a_{pos-})_{j,k})}{\sum_i d_{i,k}} \quad 2-27$$

Wird der RPA nicht erreicht, war die Fahrweise zu sanft [5].

2.5.4.5 Überprüfung von $v \cdot a_{pos-}$ [95] pro Geschwindigkeitsintervall

- Der RDE- Zyklus ist ungültig wenn bei $\bar{v}_k \leq 74,6 \frac{km}{h}$ (Urban oder Überland) gilt:

$$(v \cdot a_{pos-})_{k-}[95] > (0,136 \cdot \bar{v}_k + 14,44) \quad 2-28$$

- Der RDE- Zyklus ist ungültig wenn bei $\bar{v}_k > 74,6 \frac{km}{h}$ (Überland oder Autobahn) gilt:

$$(v \cdot a_{pos})_{k-1}[95] > (0,0742 \cdot \bar{v}_k + 18,966) \quad 2-29$$

2.5.4.6 Überprüfung der RPA pro Geschwindigkeitsintervall

- Der RDE- Zyklus ist ungültig wenn unabhängig von der Kategorie und $\bar{v}_k \leq 94,05 \text{ km/h}$ gilt: $RPA_k < (-0,0016 \cdot \bar{v}_k + 0,1755)$
- Der RDE- Zyklus ist ungültig wenn für den Autobahn- Zyklusabschnitt mit $\bar{v}_k > 94,05 \text{ km/h}$ gilt: $RPA_k < 0,025$

2.5.5 Berechnung des kumulierten positiven Höhenunterschieds

Die maximale positive Höhendifferenz beträgt 1200m/100km. Dies limitiert nicht die momentane Steigung, sondern lediglich die Gesamtheit der Steigungen der RDE- Strecke. Zusätzlich dürfen Start und Ziel nicht mehr als 100 m Höhendifferenz aufweisen. Die Berechnung des kumulierten positiven Höhenunterschieds geschieht in drei Schritten [5].

2.5.5.1 Überprüfung der Datenqualität

Dies inkludiert die Prüfung auf Vollständigkeit der Daten, die Aufbereitung eben dieser durch Interpolation falls Messwerte fehlen und den Abgleich mit einer topografischen Karte.

2.5.5.2 Korrektur der momentanen Fahrzeughöhendaten

Die Abweichung der vom GPS ermittelten Höhe von jener mithilfe einer topografischen Karte ermittelten Höhe darf nicht mehr als 40 m betragen. Im Falle einer Abweichung muss nachkorrigiert werden. Der so ermittelte Höhendatensatz wird zur Ermittlung des kumulierten positiven Höhenunterschieds verwendet. Dieser soll in [m/100 km] angegeben werden.

2.5.5.3 Berechnung des kumulierten positiven Höhenunterschieds

Der kumulierte positive Höhenunterschied wird durch Integration aller positiven interpolierten und geglätteten Straßenneigungen gebildet.

2.5.6 Auswertung der RDE Messdaten

Die Auswertung der Messdaten erfolgt mithilfe eines Post Processing Tools. Die Auswertmethoden haben dabei folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Wurden alle Bereiche in der Messfahrt abgedeckt?
- Ist das Fahrverhalten in Konformität mit den Anforderungen?
- Einteilung in Klassen/Fenster
- Gewichtung der Abschnitte

Dabei stehen grundsätzlich zwei verschiedene Methoden zur Auswertung der Messdaten zur Verfügung, die momentan (April 2017) beide zulässig sind [5].

2.5.6.1 Moving Averaging Window (EMROAD)

Das von JRC (Joint Research Center) entwickelte Auswerte- Tool „EMROAD“ basiert auf dem Ansatz des „moving averaging window“ (MAW). Der Test wird dabei in Fenster unterteilt, die zueinander um jeweils eine Sekunde gemäß der Abtastfrequenz von 1 Hz verschoben sind. Die Länge eines jeden Fensters entspricht der halben, während dem WLTC ausgestoßenen CO₂-Masse. Abhängig vom Fahrstil des Fahrers variieren die Längen der Fenster somit, je nachdem, wie schnell die für alle Fenster gleiche Menge an CO₂ erreicht wird. Für jedes Fenster und jeden Schadstoff wird sodann eine über die Fensterlänge gemittelte Emissionsbilanz in [g/km] erstellt.

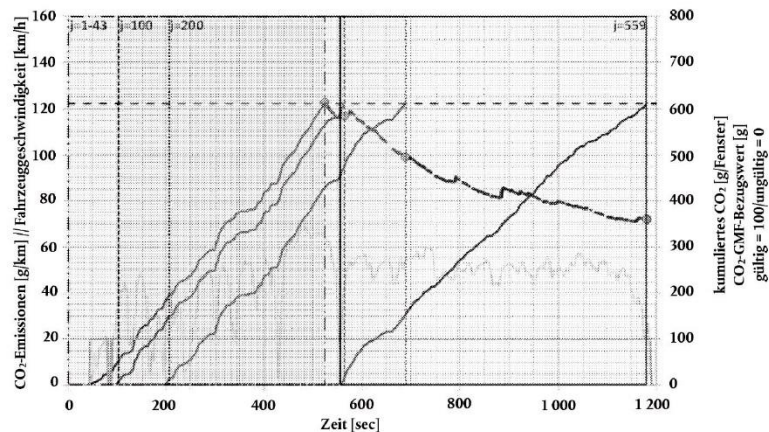


Abbildung 2-18: Fensterbildung MAW [4]

Die im WLTC im low speed cycle emittierte CO_2 -Menge wird mit 1.2 multipliziert, jene im high speed cycle mit 1.1 und jene im extra high speed Zyklus ausgestoßene CO_2 -Menge wird mit 1.05 multipliziert. Diese Werte werden über der Durchschnittsgeschwindigkeit des jeweiligen Zyklusabschnitts (19 km/h für low speed cycle, 56.6 für den high speed cycle und 92.3 km/h für den extra high speed cycle) aufgetragen und miteinander zu einer Kurve verbunden, welche die Basis für die Toleranzkurven bildet. Diese liegen um 25% unter- und oberhalb dieser Kurve. Zwei weitere Toleranzkurven werden für $\pm 50\%$ definiert. Sämtliche Werte, welche außerhalb dieser Zone liegen, werden aus der Auswertung exkludiert [5].

Die Gewichtung der einzelnen Emissionswerte erfolgt durch einen Gewichtungsfaktor, der einer Gewichtungsfunktion entstammt. Dieser beträgt 1 innerhalb der 25%- Grenzen und nimmt Werte zwischen 0 und 1 zwischen den beiden Toleranzkurven an.

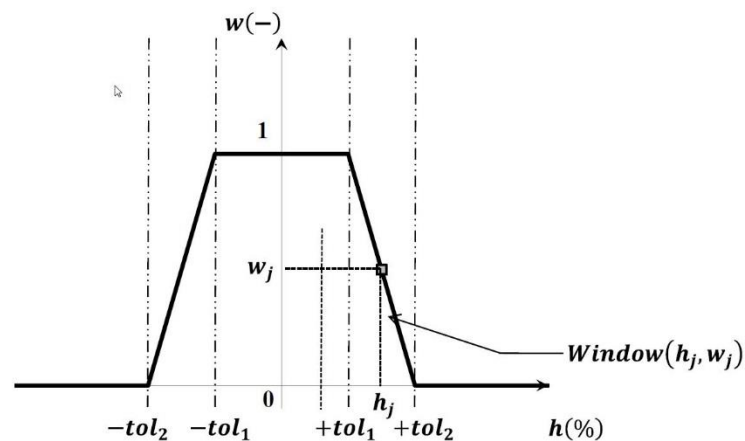


Abbildung 2-19: Gewichtungsfunktion des MAW [4]

Dann werden die über die einzelnen Fenster gemittelten CO_2 -Werte in $[\text{g}/\text{km}]$ über der Fahrzeuggeschwindigkeit aufgetragen. Abbildung 2-20 zeigt beispielhaft das Ergebnis der Prozedur wobei Farbe des Zyklus, der aus den einzelnen Fenstern besteht, Aufschluss über den Gewichtungsfaktor gibt.

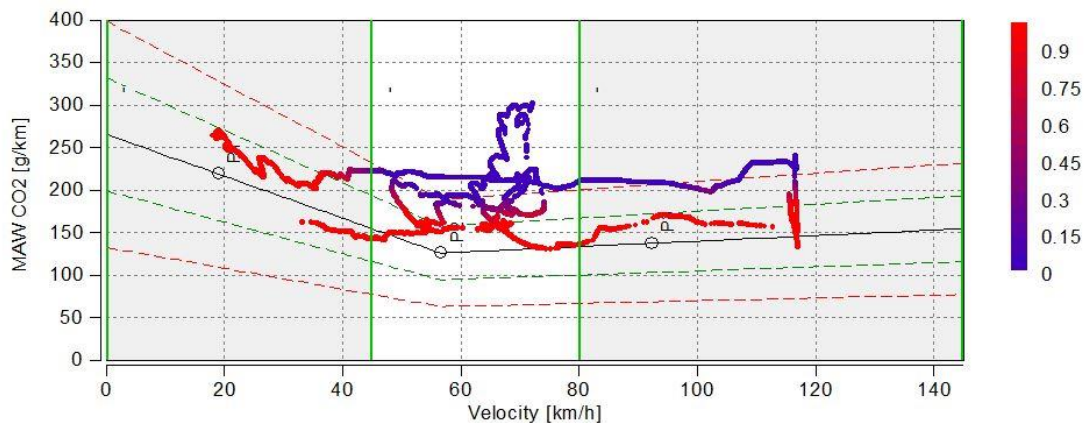


Abbildung 2-20: Methode des MAW

Von den gesamten Fenstern müssen jeweils 15% den Kategorien Urban, Überland und Autobahn zugeteilt werden können. Zudem müssen mindestens 50% aller Messpunkte der jeweiligen Zyklusategorie innerhalb der 25%- Toleranz liegen. Sollte dies nicht der Fall sein, darf die obere 25%- Toleranzkurve um bis zu 5% nach oben korrigiert werden, bis 50% der Messpunkte unterhalb liegen [5].

So sollen nun die distanzspezifischen Emissionen je Zyklusabschnitt und für den gesamten Zyklus aus den fensterspezifischen Emissionen berechnet werden.

Die Vorgehensweise ist prinzipiell immer die folgende:

- Segmentierung der Daten und Ausschluss der Kaltstartemissionen
- Teilmengen- oder fensterweise Berechnung der Emissionen
- Ermittlung der normalen Fenster
- Überprüfung auf Vollständigkeit und Normalität
- Berechnung der Emissionen anhand der normalen Fenster
- Binning am Ende der Auswertung stellt eine Klassifizierung der Ergebnisse entweder nach Last oder Geschwindigkeit dar, um die verschiedenen Gewichtungsfaktoren anzuwenden

2.5.6.2 Power Binning (CLEAR)

Mithilfe des sogenannte „Power binnings“, welches am IVT der TU Graz entwickelt wurde, wird der Zyklus der KFZs in verschiedene Leistungsklassen eingeteilt. Dies soll Unabhängigkeit der Ergebnisse von der Fahrweise und der Teststrecke garantieren. Der Ablauf der RDE- Auswertung mit CLEAR soll im Folgenden genauer vorgestellt werden.

Zuerst müssen die fahrzeugspezifischen Widerstandsbeiwerte f_0 , f_1 und f_2 aus dem WLTP sowie die Fahrzeugmasse m_{FZ} ermittelt werden. Dann wird aus den festgelegten Werten für $v_{ref} = 70 \text{ km/h}$ und $a_{ref} = 0,45 \text{ m/s}^2$ die tatsächliche Radleistung wie folgt berechnet:

$$P_{drive} = \frac{v_{ref}}{3,6} \cdot (f_0 + f_1 \cdot v_{ref} + f_2 \cdot v_{ref}^2 + m_{FZ} \cdot a_{ref}) \cdot 0,001 \quad 2-30$$

Die Werte für $P_{c,norm,j}$ werden nun mit der fahrzeugspezifische Radleistung P_{drive} multipliziert und entnormiert.

Power class No.	$P_{c,norm,j}[-]$		Total trip [%]		Urban trip parts [%]	
	From >	to \leq	Lower bound	Upper bound	Lower bound	Upper bound
Sum 1+2		0.1	15	60	5	60
3	0.1	1	35	50	28	50
4	1	1.9	7	25	7	25
5	1.9	2.8	1.0	10	> 5 counts	5
6	2.8	3.7	> 5 counts	2.5	0	2
7	3.7	4.6	0	1.0	0	1
8	4.6	5.5	0	0.5	0	0.5
9	5.5		0	0.25	0	0.25

Tabelle 2-5: Methode des „power binning“¹

$$P_{c,j}[kW] = P_{c,norm,j} \cdot P_{drive}$$

2-31

Der Index j steht dabei für die Leistungsklasse (1 bis 9). Diese Leistungsklassen sind anteilmäßig an der Gesamtdauer des Trips limitiert. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die höchste zu berücksichtigende Leistungsklasse diejenige ist, welche 0.9·P_{rated} enthält. Das bedeutet für leistungsschwache Fahrzeuge, dass die hohen Leistungsklassen wegfallen können. Nun werden die während dem RDE- Trip erbrachten Motorleistungen, welche mit einer Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet und berechnet wurden, über die Dauer von jeweils 3 Sekunden gemittelt, wobei die Leistungsermittlung über die CO₂- Messung erfolgt. Diese gemittelten Werte werden nun in die Leistungsklassen P_{c,1}...P_{c,9} eingeteilt und anteilmäßig an der Dauer des gesamten Trips gemessen. Zudem wird je Leistungsklasse ein Durchschnitt der Leistung aus allen 3- Sekunden- Leistungen gebildet [5].

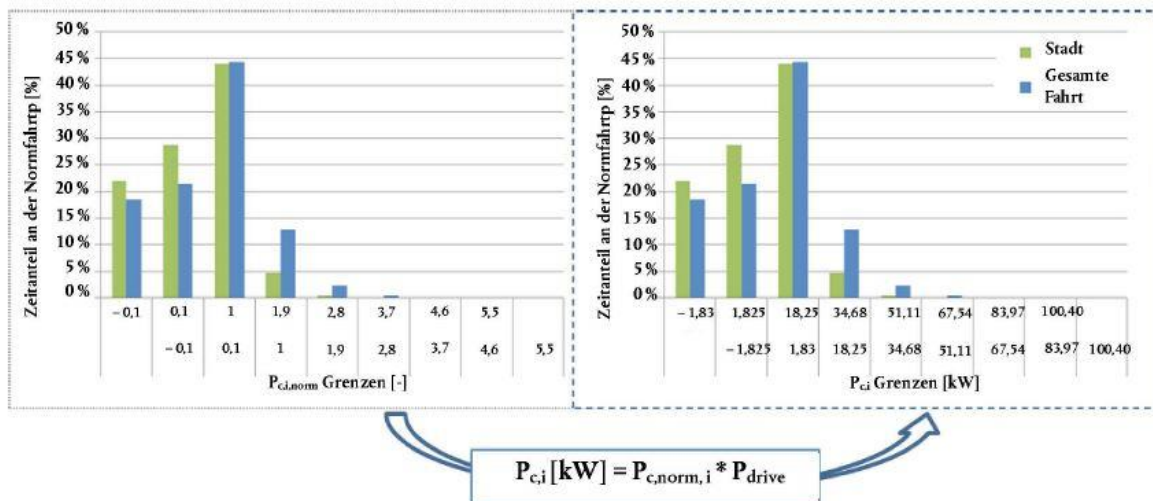


Abbildung 2-21: Entnormisierung der Leistung, CLEAR [4]

Der jeweilige Anteil der Klassen muss den Limitierungen in Tabelle 2-6 Genüge tun.

¹ Im dritten RDE- Paket wurde die Auswertung mittels Power Binning abgeändert, siehe [3]
Graz, April 2017

Leistungsklassennummer	$P_{c, norm,j}$ [-]		Gesamte Fahrt		Fahrtanteil Stadt	
	Von >	bis \leq	untere Grenze	obere Grenze	untere Grenze	obere Grenze
Summe 1 + 2 ⁽¹⁾		0,1	15 %	60 %	5 % ⁽¹⁾	60 %
3	0,1	1	35 %	50 %	28 %	50 %
4	1	1,9	7 %	25 %	0,7 %	25 %
5	1,9	2,8	1,0 %	10 %	> Anzahl 5	5 %
6	2,8	3,7	> Anzahl 5	2,5 %	0 %	2 %
7	3,7	4,6	0 %	1,0 %	0 %	1 %
8	4,6	5,5	0 %	0,5 %	0 %	0,5 %
9	5,5		0 %	0,25 %	0 %	0,25 %

⁽¹⁾ Stellen die Summe der Fahrbedingungen und der Bedingungen bei niedriger Leistung dar.

Tabelle 2-6: Power Binning [4]

Damit die Messung Gültigkeit besitzt, müssen jeder Klasse mindestens fünf gezählte Werte zugeordnet werden können. Für die Kategorie „Stadt“ gilt, dass bis zur fünften Leistungsklasse mindestens fünf gezählte Werte je Klasse erforderlich sind [5].

3 Experimentelle Untersuchungen

Im Zuge dieser Arbeit soll vor allem geklärt werden, welche Bereiche im Motorkennfeld vom RDE- Test abgedeckt werden, in welchen Bereichen des Motorkennfelds besonders viele NO_x entstehen, wie sich Fahrzeugmasse- und Widerstandsbeiwerte auf die RDE- Leistung auswirken, wie gravierend sich einzelne NO_x - Peaks auf die Gesamtbilanz auswirken, wie diese vermieden werden können und inwieweit ein größerer/höher beladener Katalysator zur Senkung der NO_x beitragen kann. Zu diesem Zweck wird dieser Abschnitt der Arbeit in vier Kapitel unterteilt:

- Berechnung des RDE- Kennfeldbereichs auf Basis der $v \cdot a_{\text{pos}}$ [95]
- Berechnung des RDE- Kennfeldbereichs auf Basis einer RDE- Geschwindigkeitscharakteristik, schreiben eines Schaltalgorithmus
- Analyse von RDE- Fahrten, Identifizierung von Emissionsquellen
- Simulation mit Grobauslegung eines Vierwegekatalysators in echtzeitfähigem Tool, Variation der Katalysatorauslegung

Den Abschluss soll eine kurze Zusammenfassung bilden, die die gewonnenen Einsichten resümiert.

3.1 Berechnungen von RDE Leistungs- und Drehmomentkurven

Anfangs sollte untersucht werden, welche Leistungen im Zyklus überhaupt erreicht werden und welche Kennfeldbereiche betroffen sind, wenn $v \cdot a_{\text{pos}}$ [95] voll ausgenutzt wird.

3.1.1 Zyklusspezifische Grenzwerte

Für die einzelnen Zyklusabschnitte ergibt sich, abhängig von den jeweiligen Durchschnittsgeschwindigkeiten, folgendes $v \cdot a_{\text{pos}}$ [95]:

$$\text{Wenn } \bar{v} \leq 74.6 \frac{\text{km}}{\text{h}} : v \cdot a_{\text{pos,max}} = 0.136 \cdot \bar{v} + 14.44 \quad 3-1$$

$$\text{Wenn } \bar{v} > 74.6 \frac{\text{km}}{\text{h}} : v \cdot a_{\text{pos,max}} = 0.0742 \cdot \bar{v} + 18.966 \quad 3-2$$

Die maximale Geschwindigkeit sollte laut Verordnung 145 km/h nicht überschreiten, eine Toleranz von +15 km/h ist für eine kurze Dauer erlaubt, womit 160 km/h als Obergrenze zu gelten hat [5].

Zyklus	RDE Geschwindigkeit [km/h]	Durchschnitt [km/h], Bsp.	$v \cdot a_{\text{pos,max}}$
Urban	0-60	30	18.52
Überland	60-90	78	24.75
Autobahn	90-160	110	27.13

Tabelle 3-1: Beschleunigungskriterium RDE

Über $v \cdot a_{\text{pos,max}}$ gelangt man zur jeweiligen maximal erlaubten Beschleunigung im RDE- Zyklus bei einer gewissen Geschwindigkeit, abhängig von der Durchschnittsgeschwindigkeit im jeweiligen Zyklusabschnitt. Dies ist in Abbildung 3-1 ersichtlich. Dieser Maximalwert kann allerdings bei 5% der Beschleunigungen überschritten werden.

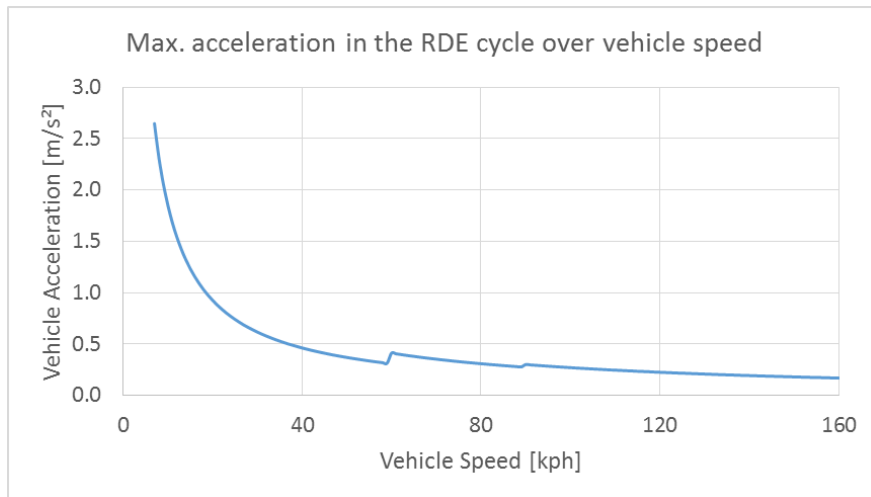


Abbildung 3-1: 95%- Beschleunigung über der Fahrzeuggeschwindigkeit

3.1.2 Berechnung der maximal benötigten Leistung

Aus der maximalen Beschleunigung kann die Beschleunigungsleistung für ein gewisses Fahrzeug abgeleitet werden. Zur Berechnung der Widerstandsleistung werden einige weitere Parameter benötigt, welche in Tabelle 3-2 ersichtlich sind.

	Wert	Einheit
η_{gearbox}	0,85	-
m_{FZ}	1360	kg
f_0	116	N
f_1	1,07	Nh/km
f_2	0,0286	N·h²/km²
Drehzahlbereich	1000-6500	U/min

Tabelle 3-2: Fahrzeugdaten für erste Berechnungen (Kompaktklasse)

3.1.2.1 Beschleunigungsleistung

Aus $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ kann die für die jeweils gefahrene Geschwindigkeit für 95% der Zeit maximal erlaubte Beschleunigung errechnet werden. Bei einer Abtastfrequenz von 1 Hz ist die Geschwindigkeit v_2 nach einer Sekunde beschleunigt erreicht. Aus der Differenz der jeweiligen kinetischen Energien bei v_1 und v_2 , ΔE_{kin} , erhält man die in diesem Punkt notwendige Beschleunigungsleistung.

$$\Delta E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m_{\text{FZ}} (v_2^2 - v_1^2) \quad 3-3$$

$$P_{\text{B,max}} = \Delta E_{\text{kin}} \cdot \frac{1}{\Delta t} \quad 3-4$$

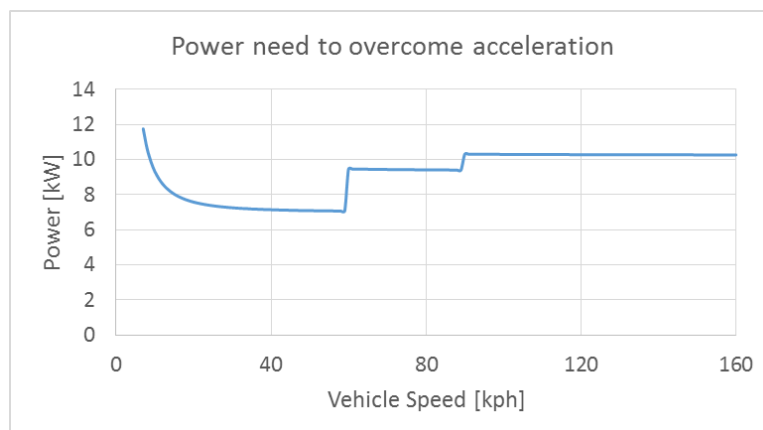


Abbildung 3-2: Leistungsanforderung, um 95%- Beschleunigung zu erreichen

3.1.2.2 Widerstandsleistung

Der im jeweiligen Geschwindigkeitspunkt wirkende Fahrwiderstand setzt sich aus Roll- und Luftwiderstand zusammen und errechnet sich aus den Widerstandsbeiwerten f_0 , f_1 , f_2 , welche aus der fahrzeugspezifischen Widerstandskurve stammen und der momentanen mittleren Geschwindigkeit, die der Mittelwert aus v_n und v_{n+1} ist.

$$F_{FW} = f_0 + f_1 \cdot v + f_2 \cdot v^2 \quad 3-5$$

$$P_{FW} = F_{FW} \cdot v \quad 3-6$$

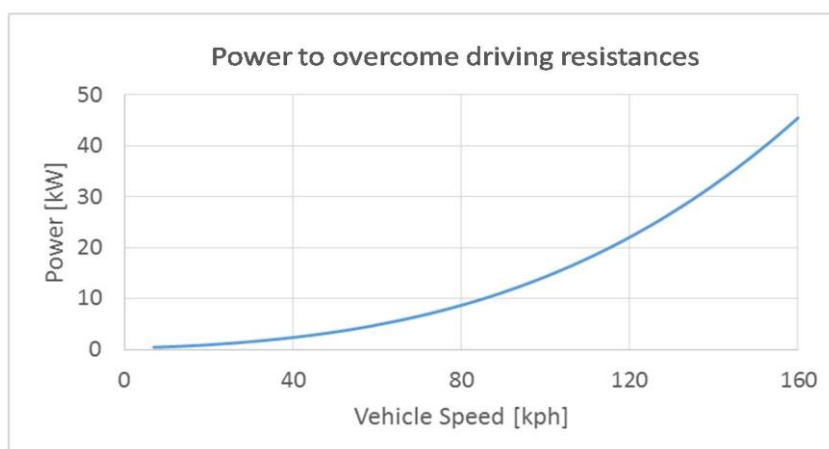


Abbildung 3-3: Leistungsanforderung, um die Fahrwiderstände zu überwinden

Für verschiedenste Serienfahrzeuge ergeben sich für den Luft- und Rollwiderstand die in Abbildung 3-4 abgebildeten Kurven.

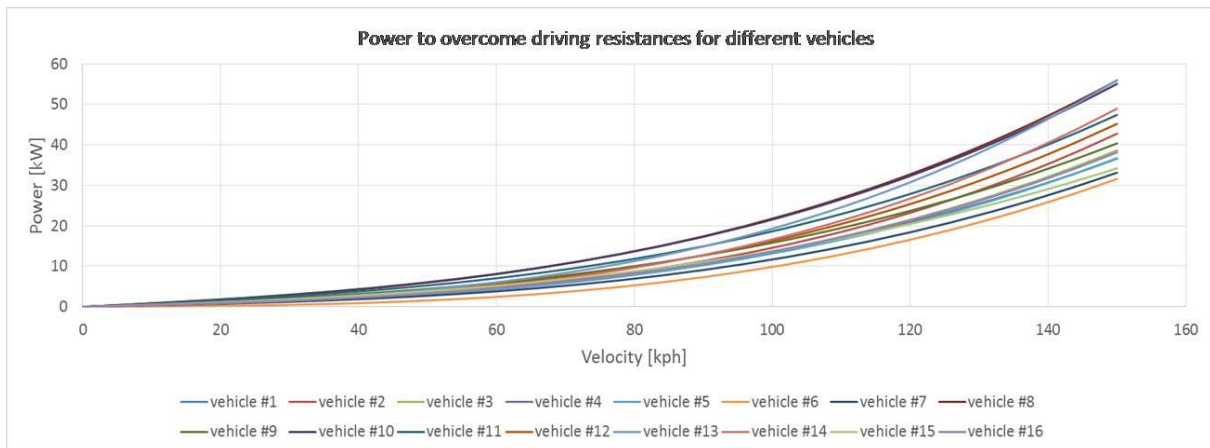


Abbildung 3-4: Verschiedene Leistungsanforderungen zum Überwinden der Fahrwiderstände

Die Streubreite kommt durch die unterschiedlichen mechanischen (Rollwiderstand und Verluste in Radlagern, Achse und Teilen des Getriebes) und aerodynamischen Fahrwiderstände zustande.

3.1.2.3 Steigleistung

Die gesetzlich geregelte maximale positive akkumulierte Steigung beträgt 1200m/100km. Dies ermöglicht große kurzzeitige Steigungen, wenn die Steigung im restlichen Zyklus gering ist. Die im Zuge dieser Arbeit angenommenen maximalen Steigungen sollen 15% für Stadt-, 10% für Überland- und 4% für den Autobahnabschnitt betragen. Das bedeutet Steigungswinkel von $\varphi_u=6.75^\circ$, $\varphi_r=4.5^\circ$, $\varphi_m=1.8^\circ$. Die von der Steigung verursachte Widerstandskraft errechnet sich wie folgt:

$$F_{St} = m_{FZ} \cdot g \cdot \sin\varphi_{St} \quad 3-7$$

Für die angenommene Fahrzeugmasse von 1360 kg bedeutet das eine maximale Widerstandskraft von 1568 N, 1047 N und 419 N. Multipliziert man diese mit der momentanen Geschwindigkeit, erhält man die zu erbringende Steigleistung.

$$P_{St} = F_{St} \cdot v \quad 3-8$$

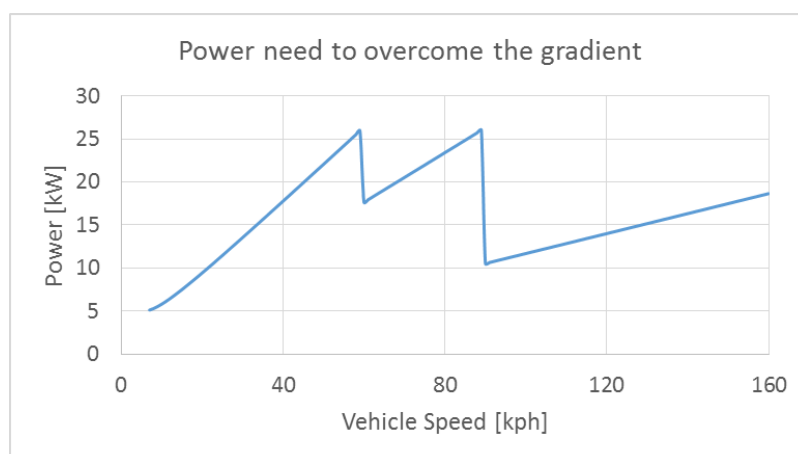


Abbildung 3-5: Leistungsanforderung, um die Steigung zu überwinden

Die Summe aus Beschleunigungs-, Widerstands- und Steigungsleistung ergibt unter Berücksichtigung des Gesamtwirkungsgrades die vom Motor aufzubringende maximale Leistung im RDE- Zyklus in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Wie beschrieben, kann die Beschleunigungsleistung in limitierten Zeiträumen aber über dem o.a. Limit liegen.

$$P_{\max} = \frac{P_{B,\max} + P_{FW} + P_{St}}{\eta_{ges}}$$

3-9

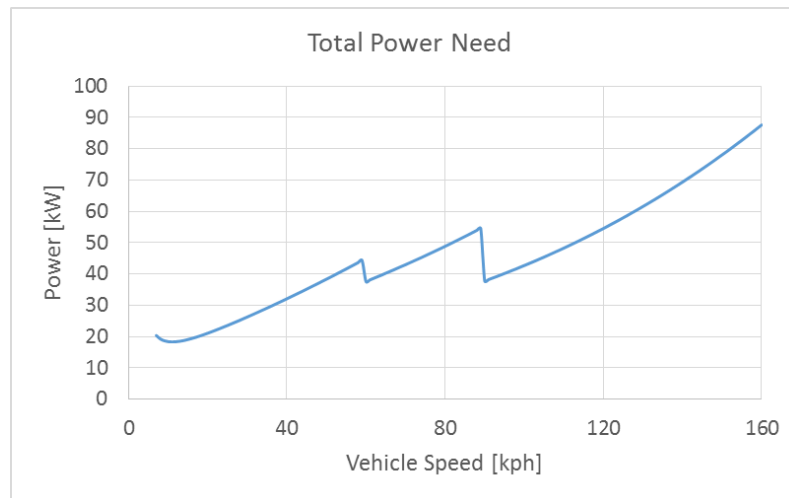


Abbildung 3-6: Leistungsanforderung über der Geschwindigkeit

3.1.3 Einbeziehung der Gangcharakteristiken

Aus den Dimensionen der Räder und den Übersetzungsverhältnissen der Getriebebeschaltstufen und des Achsgetriebes ist die mit dem jeweils eingelegten Gang bei 1000 U/min erreichte Geschwindigkeit v_{1000} bekannt.

Gang #	V_{1000} [km/h]
1	7
2	10
3	17
4	30
5	39
6	55

Tabelle 3-3: Übersetzungen Beispielfahrzeug

Verbindet man diese einzelnen Punkte im v - n -Diagramm mit dem Nullpunkt erhält man die mit dem jeweils eingelegten Gang erzielbaren Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Drehzahl. Fahrzeuggeschwindigkeit und Drehzahl sind im selben Gang immer proportional zueinander, was einen einfachen Zusammenhang zwischen den beiden Größen ermöglicht. So erhält man für jeden Gang das gesamte Geschwindigkeitsband. Von der Last sind diese Linien unabhängig.

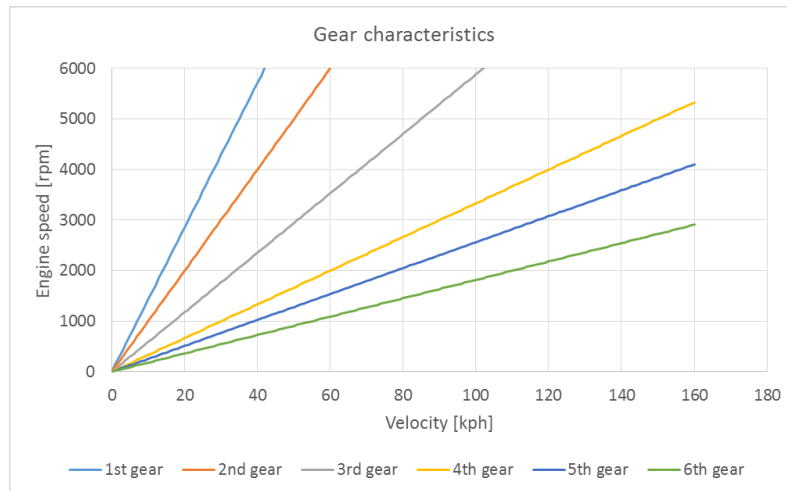


Abbildung 3-7: Gangcharakteristiken des Beispielfahrzeugs

1000 U/min soll dabei die niedrigste realisierbare Drehzahl darstellen, die obere Grenze wurde auf 6500 U/min festgelegt.

Wird die Beschleunigung nicht berücksichtigt und die Leistung nur aus den Widerstandsbeiwerten gebildet, dann ergeben sich im Motorkennfeld für die einzelnen Gänge folgende Verläufe in der Ebene (Abbildung 3-8) und bei 2.5° Steigung (Abbildung 3-9):

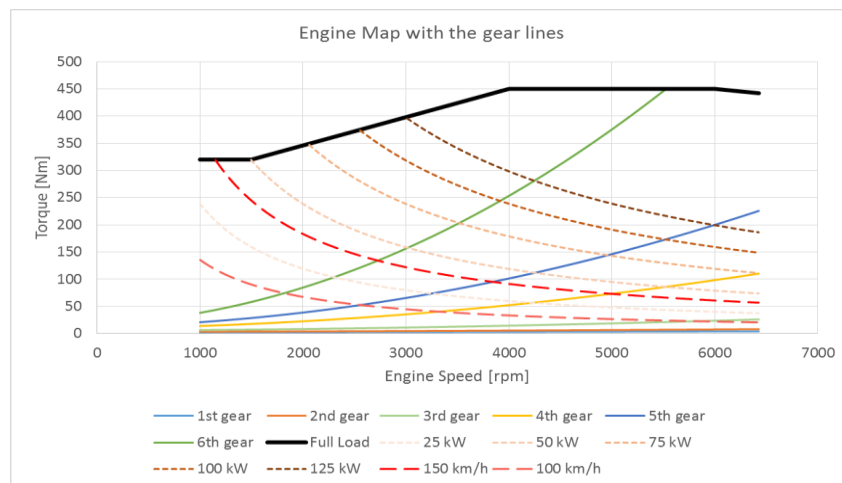


Abbildung 3-8: Kennfeld mit den Ganglinien in der Ebene

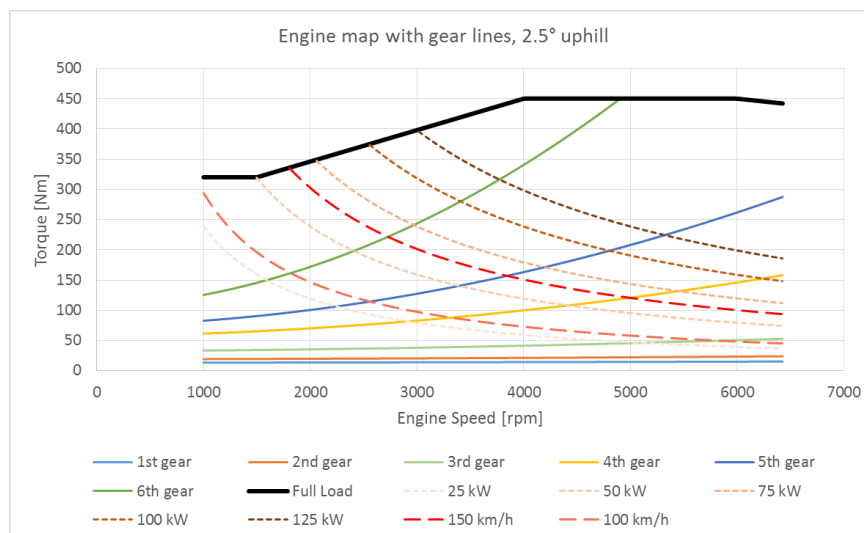


Abbildung 3-9: Kennfeld mit den Ganglinien bei 2.5° Steigung

Wird die 95%- Beschleunigung mitberücksichtigt, so kann aus der maximalen Leistung das im jeweiligen Gang realisierbare Drehmoment abhängig von der Drehzahl errechnet werden.

$$M_{d,max} = \frac{60 \cdot P_{max}}{2\pi \cdot n} \quad 3-10$$

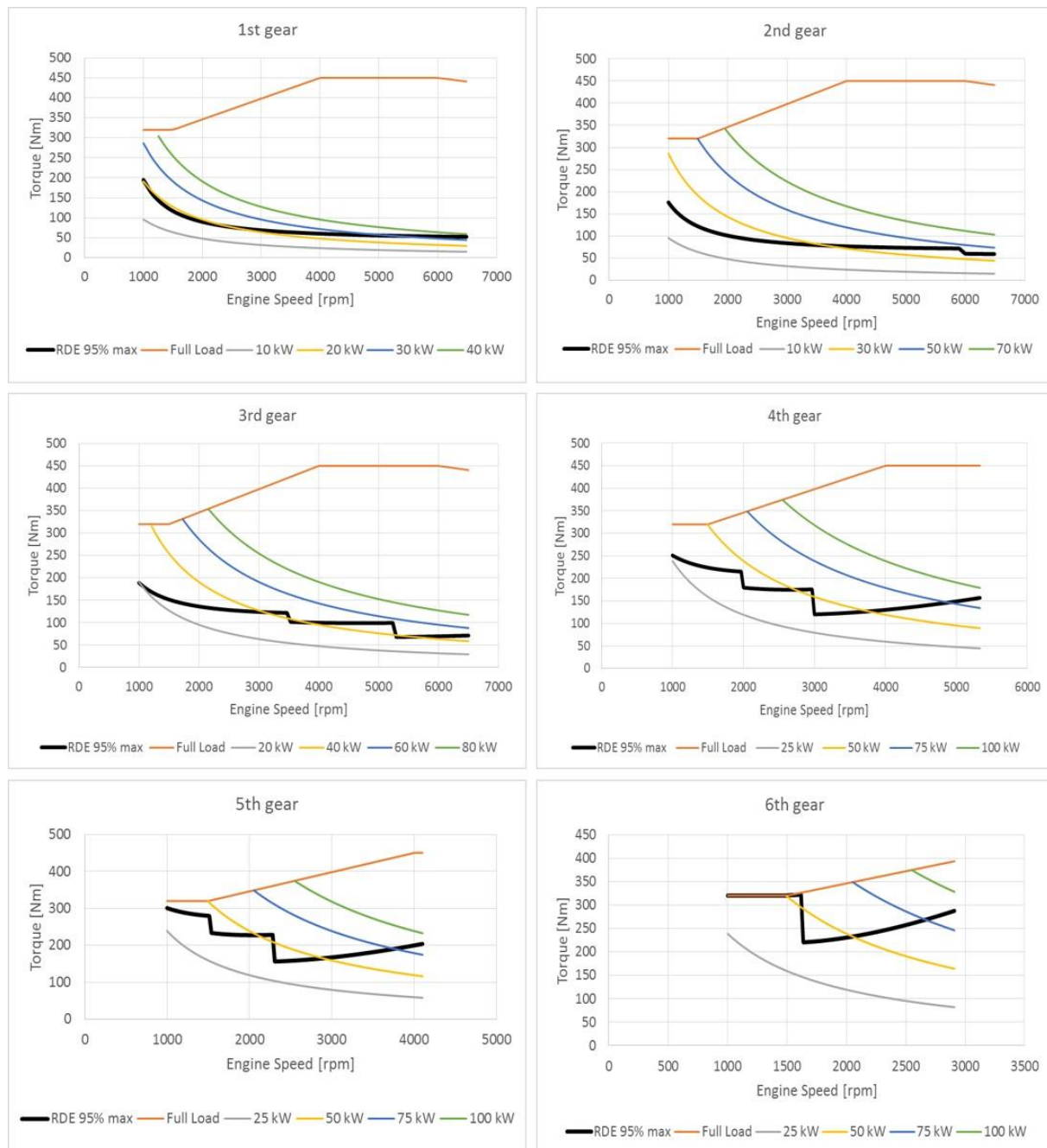


Abbildung 3-10: Maximales Drehmoment je Gang über der Drehzahl

Die Last ist durch die vom Gesetzgeber begrenzte Geschwindigkeit mal Beschleunigung je Zyklusabschnitt begrenzt (erhöht sich die Geschwindigkeit, muss die Beschleunigung zurückgenommen werden). Beim Durchfahren einer Zyklusabschnittsgrenze von 60 bzw. 90 km/h ändert sich auch diese Grenze sprunghaft, was die Sprünge der Ganglinien erklärt (es kann höhere Last gefahren werden). Im 1. Gang wird der 2. Zyklus (Überland) gar nicht erst erreicht, im 2. Gang wird der 2. Zyklus im obersten Drehzahlbereich erreicht und mit den höheren Gängen werden alle drei Zyklen durchfahren. Ab dem vierten Gang ist die im RDE maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h relevant, denn diese wird bereits vor der maximalen Grenzdrehzahl von 6500 U/min erreicht. Deshalb dreht der Motor im Zyklus

im vierten Gang nur bis ca. 5300 U/min, im fünften bis ca. 4100 U/min und im 6. bis knapp 3000 U/min. Damit ergibt sich ein Bereich im Kennfeld, der für den RDE Test relevant ist.

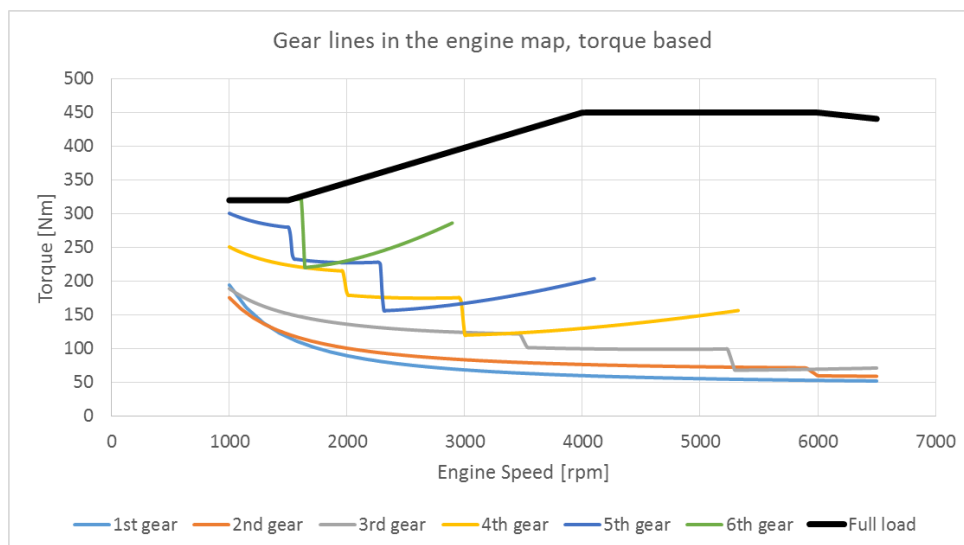


Abbildung 3-11: Ganglinien im Kennfeld

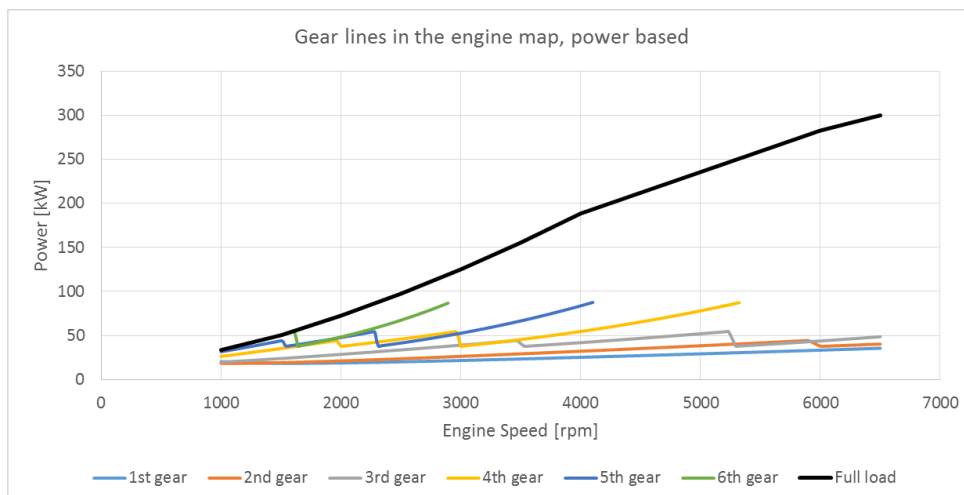


Abbildung 3-12: Ganglinien im Kennfeld, leistungs basiert

Anzumerken ist an dieser Stelle nochmals, dass diese Werte in 5% der Zeit überschritten werden können. Da es sich zudem um ein sehr stark motorisiertes Fahrzeug handelt, wird nicht das gesamte Kennfeld ausgenutzt. Eine detaillierte Betrachtung der Kennfeldausnutzung soll das folgende Kapitel liefern.

3.2 Berechnung des Motorkennfeldbereichs auf Basis einer RDE-Geschwindigkeitsmessung

Das zweite Berechnungstool soll auf Basis einer RDE- Geschwindigkeitsmessung durch Implementierung einer Schaltstrategie für unterschiedliche Fahrzeuge die Identifizierung der während einer RDE- Fahrt durchfahrenen Kennfeldbereiche ermöglichen. Als Fahrzeug wurde exemplarisch ein Fahrzeug aus der Kompaktklasse ausgewählt.

3.2.1 Datenaufbereitung

Als Referenz und Ausgangsbasis für sämtliche Berechnungen dient folgendes gemessenes Geschwindigkeitsprofil:

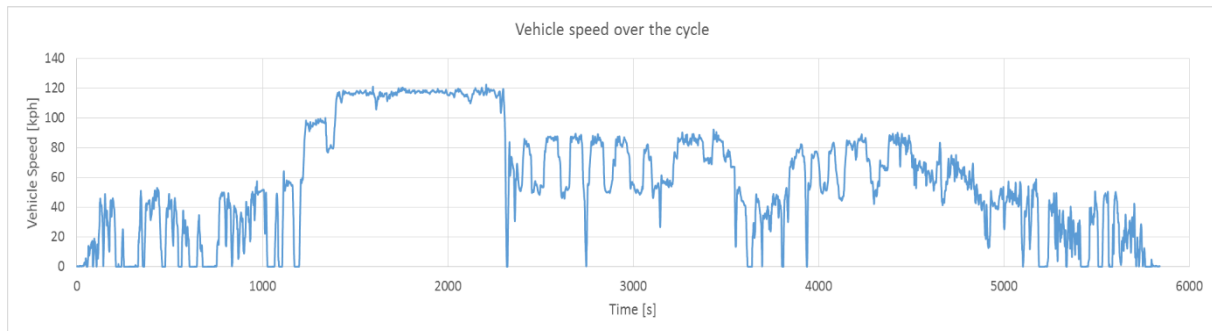


Abbildung 3-13: Typisches RDE- Geschwindigkeitsprofil

Die Abtastfrequenz der Geschwindigkeitsmessung beträgt 2 Hz, womit die Schrittweite auf 0.5 Sekunden festgelegt ist. Sollte das Fahrzeug allerdings nicht genug Leistung besitzen, um dem Geschwindigkeitsprofil zu folgen, so wird die Schrittweite derart vergrößert, dass mit maximaler Leistung die Beschleunigung von v_n nach v_{n+1} realisierbar ist. So kann der Zyklus unabhängig von der Fahrzeugleistung gefahren werden. Ein schwach motorisiertes Fahrzeug bewegt sich dabei häufiger an der Grenzleistung und benötigt für den Zyklus länger.

Was das Höhenprofil betrifft, so wurde das GPS- Signal über Zeitspannen von jeweils 4s gemittelt, da das Signal sehr ungenau ist und stark schwankt. Die aus den Originaldaten abgeleiteten Steigungen waren jenseits jeder Wahrscheinlichkeit.

Von der gefahrenen momentanen Geschwindigkeit kann zusammen mit Steigung, f_0 , f_1 , f_2 und Fahrzeugmasse die benötigte Leistung ermittelt werden. Da auch die v_{1000} bekannt sind, kann das gangspezifische Drehmoment nach Formel 3-10 berechnet werden.

Zu überlegen ist nun eine Schaltstrategie, die das reale Schaltverhalten des RDE- Testfahrers möglichst gut nachbildet. So erhält man einen definierten Kennfeldbereich, der für den RDE Test relevant wird.

3.2.2 Implementierung einer Schaltstrategie

Ziel soll es sein, das reale Schaltverhalten eines Fahrers nachzubilden. Hierzu wurden zwei verschiedene Algorithmen geschrieben: Die eine Strategie folgt den besten Verbrauchsbereichen im Motorkennfeld. Die andere benutzt eine virtuelle Vollastkurve, die unter der nominellen Vollastkurve des Motors angesiedelt ist. Wird diese überschritten, wird zurückgeschaltet. So wird stets versucht, den Motor so nahe wie möglich an diesem virtuellen Grenzmoment zu betreiben, ohne dieses zu überschreiten.

3.2.2.1 Schaltstrategie I: Verbrauchsoptimierte Schaltung

Die Schaltstrategie soll so aufgebaut sein, dass der momentane Kraftstoffverbrauch einen Minimalwert annimmt. Hierfür ist ein Verbrauchskennfeld notwendig. Abbildung 3-14 zeigt den Zusammenhang zwischen momentaner Geschwindigkeit und Verbrauch je nach eingelegtem Gang, wodurch sich immer ein verbrauchsoptimaler Gang ergibt.

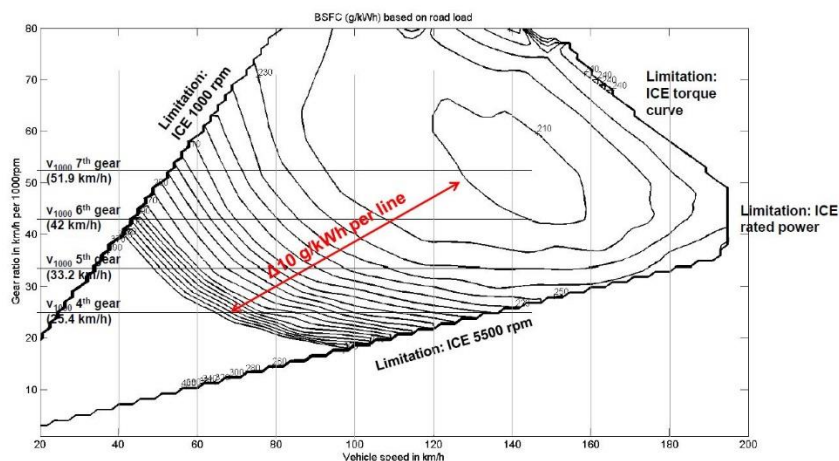


Abbildung 3-14: Verbrauchsdiagramm zur Schaltpunktfindung [16]

Das im Zuge dieses Abschnitts verwendete Verbrauchskennfeld ist in Abbildung 3-15 dargestellt. Sämtliche Zwischenwerte wurden interpoliert.

		Engine speed [rpm]										
		1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
BMEP [bar]	1	591	567	575	579	598	624	626	645	692	712	765
	2	410	383	383	387	410	406	422	425	448	465	477
	3	342	323	320	321	329	335	349	357	366	378	392
	4	309	287	288	289	299	306	311	320	325	333	339
	5	291	271	270	273	280	283	293	295	302	311	314
	6	277	263	259	262	268	268	277	279	286	292	300
	7	267	259	252	254	258	260	267	269	275	282	287
	8	260	251	247	249	251	252	260	261	267	273	279
	9	259	248	244	244	245	246	253	256	261	266	275
	10	262	244	241	240	241	243	248	251	257	262	271
	11	267	243	239	236	237	240	243	247	253	258	271
	12	267	244	239	235	236	237	241	245	250	256	272
	13	270	246	245	238	240	239	240	243	249	256	273
	14	270	249	244	238	240	239	239	242	250	266	276
	15		263	243	239	241	240	240	244	255	274	
	16		264	247	242	246	241	242	245	259		
	17		267	251	247	248	244	245	249	269		
	18		271	256	255	253	248	251	258			
	19		277	260	258	264	255	255	261			
	20		277	268	267	266	260	263				

Abbildung 3-15: Verbrauchskennfeld für Schaltstrategie I

Die Wahl des richtigen Ganges erfolgt für Strategie I nach folgenden Gesichtspunkten:

- Beschleunigt das Fahrzeug, besteht nur die Wahl eines höheren Ganges, nicht aber die eines niedrigeren und umgekehrt
- Der BSFC im höheren bzw. niedrigeren Gang muss niedriger sein als im aktuellen, damit dieser gewechselt wird
- Im 1. Gang kann nicht runter, im höchsten nicht rauf geschaltet werden
- beim Hochschalten darf eine gewisse Grenzdrehzahl nicht unter-, beim Runterschalten eine weitere nicht überschritten werden
- um zu vermeiden, dass kleine Fluktuationen in der Beschleunigung zu Schaltvorgängen führen, wird ein Toleranzbereich für kleine Beschleunigungen ϵ_{pos} , ϵ_{neg} eingeführt, in dem es zu keinen Schaltvorgängen kommt

Abbildung 3-16 zeigt die Schaltcharakteristik über dem RDE- Zyklus. Der Vergleich mit dem Geschwindigkeitsprofil, Abbildung 3-13, lässt auf Plausibilität schließen.

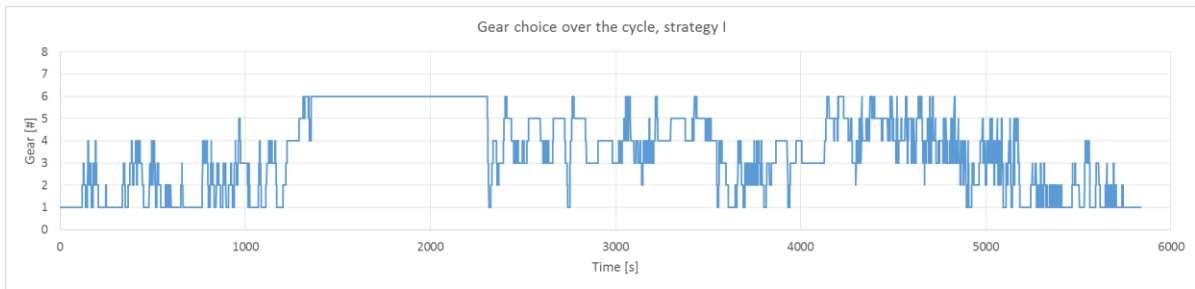


Abbildung 3-16: Gangwahl über dem RDE- Zyklus, Schaltstrategie I

3.2.2.2 Schaltstrategie II: Vereinfachter virtueller Schaltautomat

Diese Methode ist Standard bei der Auslegung von Automatikgetrieben. Anhand des Verbrauchskennfelds wird eine Kurve parallel zur Volllastkurve definiert, welche das höchst zulässige Moment über der Drehzahl darstellt mit dem Zweck, hohe Verbräuche bei hohem Moment zu vermeiden. Zudem wird eine Vertikale definiert, welche die untere Grenzdrehzahl darstellt. Diese hängt von der Zylinderzahl ab. Dabei gilt, je mehr Zylinder, desto stabiler der Lauf auch bei niedrigen Drehzahlen. Diese beiden Linien stellen nun die Grenzen dar, bei deren Überschreitung runter geschaltet werden muss. Überschreitet der nächst höhere Gang diese Linien nicht, so wird hochgeschaltet, um immer das möglichst höchste Moment zu fahren, da das Verbrauchsoptimum stets knapp unter der Volllastkurve liegt (vgl. Abbildung 3-15). Außerdem wurde, wie in Strategie I, ein Toleranzbereich für die Beschleunigung definiert, in welchem nicht geschaltet wird. Da es sich beim hier verwendeten Fahrzeug um ein Kundenprojekt handelt, können keine Werte zum Drehmoment gegeben werden.

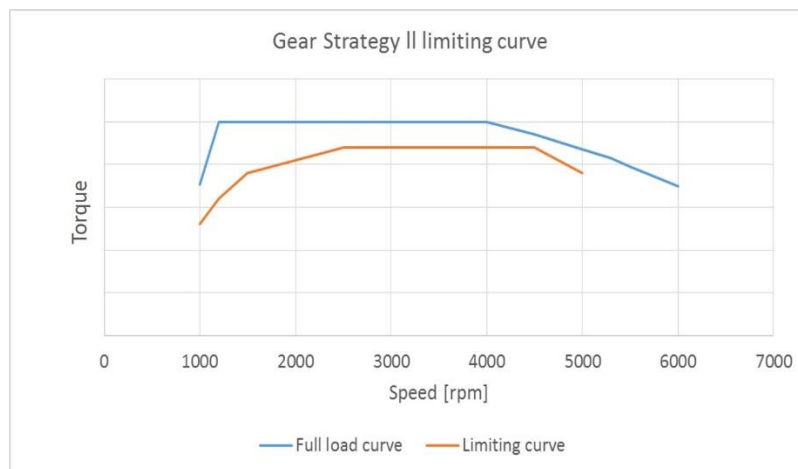


Abbildung 3-17: Virtuelle Volllastkurve, Schaltstrategie II

Schaltstrategie II führt zu folgendem Gangverlauf:

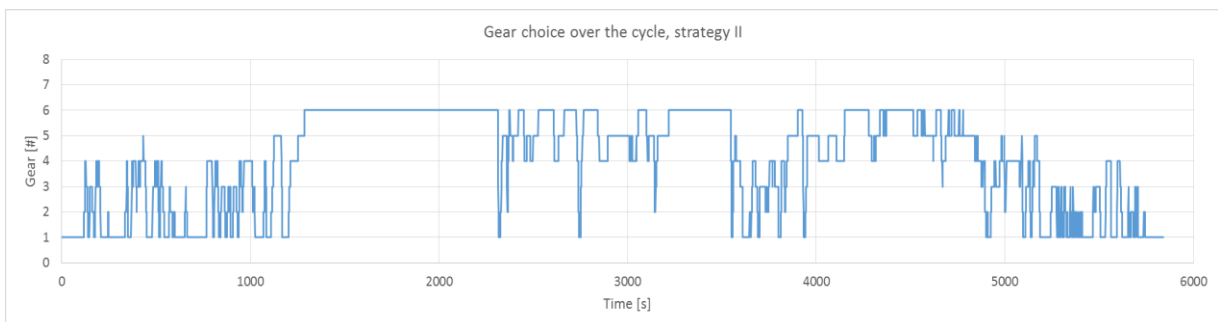


Abbildung 3-18: Gangwahl über dem RDE- Zyklus, Schaltstrategie II

Ein Vergleich mit Abbildung 3-16 zeigt deutliche Unterschiede der beiden Strategien.

3.2.3 Vergleich der Strategien

Da der Mensch als Fahrer nicht mit Allgemeingültigkeit abbild- oder vorhersehbar ist, stellen die beiden Strategien Anhaltspunkte bzw. Annäherungen dar. Auf eine ungefähre Übereinstimmung mit dem tatsächlichen Schaltbild eines gefahrenen Zyklus lässt der Drehzahlverlauf schließen.

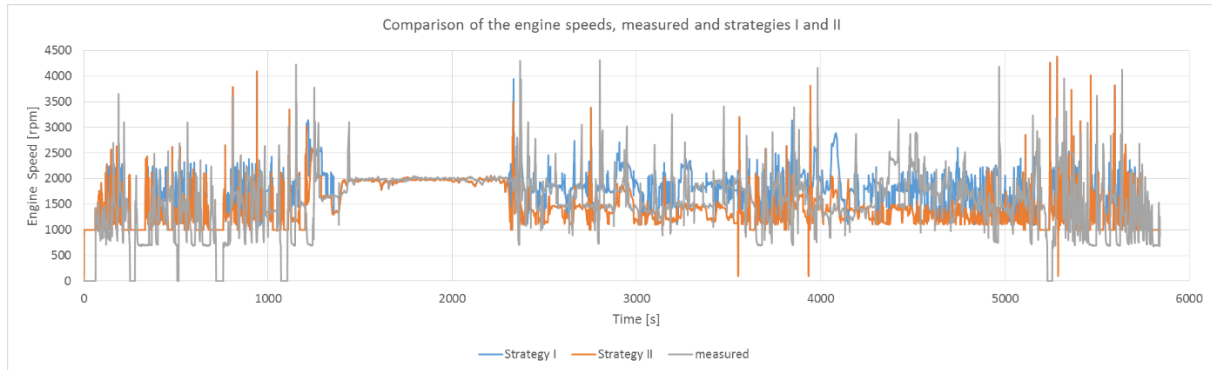


Abbildung 3-19: Vergleich der Drehzahlverläufe gemessen/berechnet

Ein Blick in die Aufteilung der einzelnen Gänge zeigt die Unterschiede der beiden Konzepte noch deutlicher.

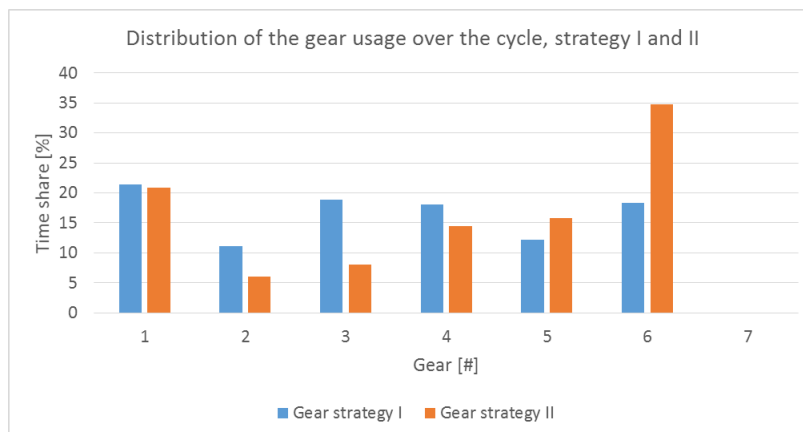


Abbildung 3-20: Aufteilung der Gang- Nutzung über dem Zyklus

Die starken Unterschiede der beiden Strategien sind einfach erklärbar: Strategie I bewegt sich selten in den Bereich hoher Lasten, da der Sweetspot mehr oder weniger weit darunter liegt. Deshalb werden mit dieser Strategie eher niedrigere Gänge und somit höhere Drehzahlen gefahren. Strategie II dagegen bewegt sich stets am Drehmomentlimit, was hohe Gänge und niedrige Drehzahlen bedeutet. Tabelle 3-4 zeigt die Unterschiede der beiden Strategien in den Ergebnissen aus der gesamten RDE- Fahrt.

	Schaltstrategie I	Schaltstrategie II
G [l/100 km]	6.45	6.43
\bar{n} [U/min]	1636	1389
\bar{P} [kW]	9.37	9.29
P_{max} [kW]	109.68	109.68
\bar{P} [% von P_{max}]	8.12	8.05
P_{max} [% von P_{max}]	95.01	95.01
Δt Messung- Berechnung [s]	125.2	186.8

Tabelle 3-4: Ergebnisse der RDE- Berechnung in Excel

Überträgt man den gesamten Zyklus ins Kennfeld, so ergibt sich für die beiden Strategien Folgendes:

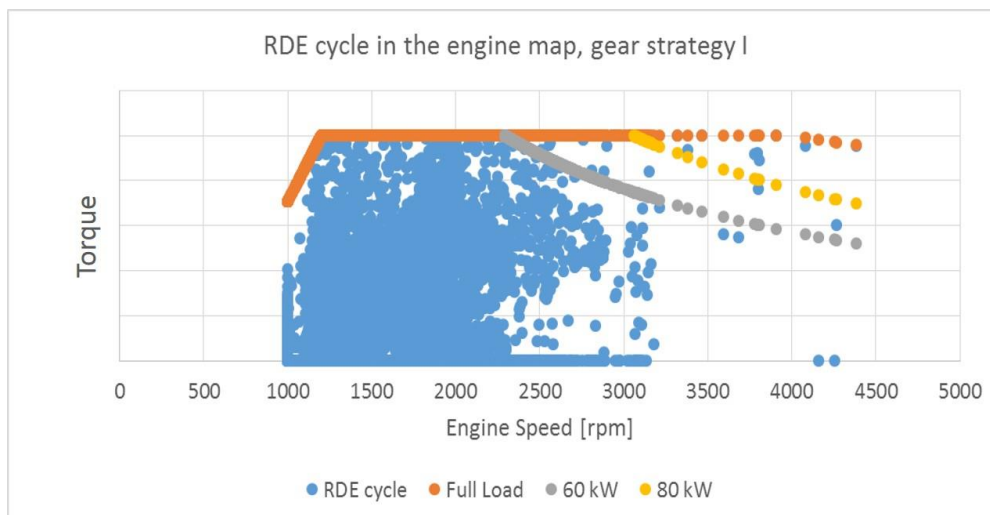


Abbildung 3-21: Im Zyklus genutzter Kennfeldbereich, Strategie I

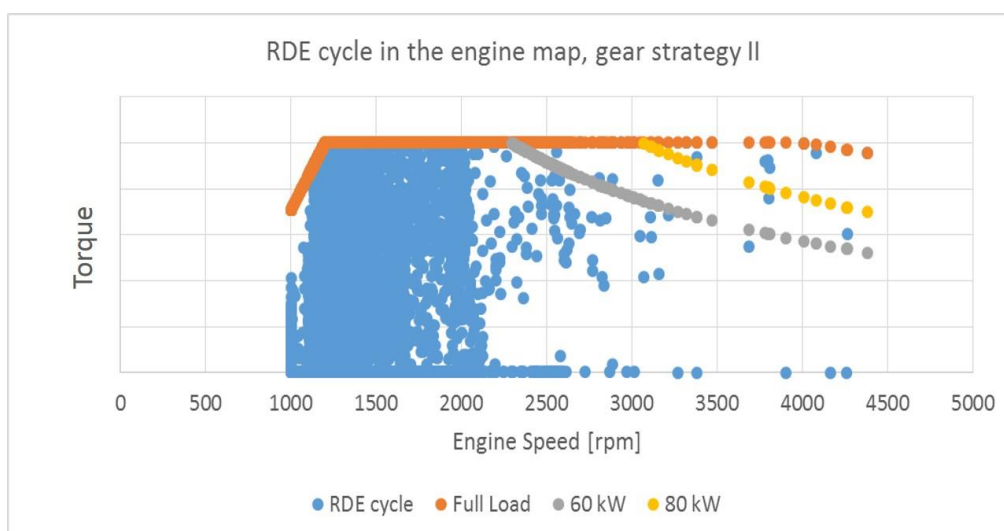


Abbildung 3-22: Im Zyklus genutzter Kennfeldbereich, Strategie II

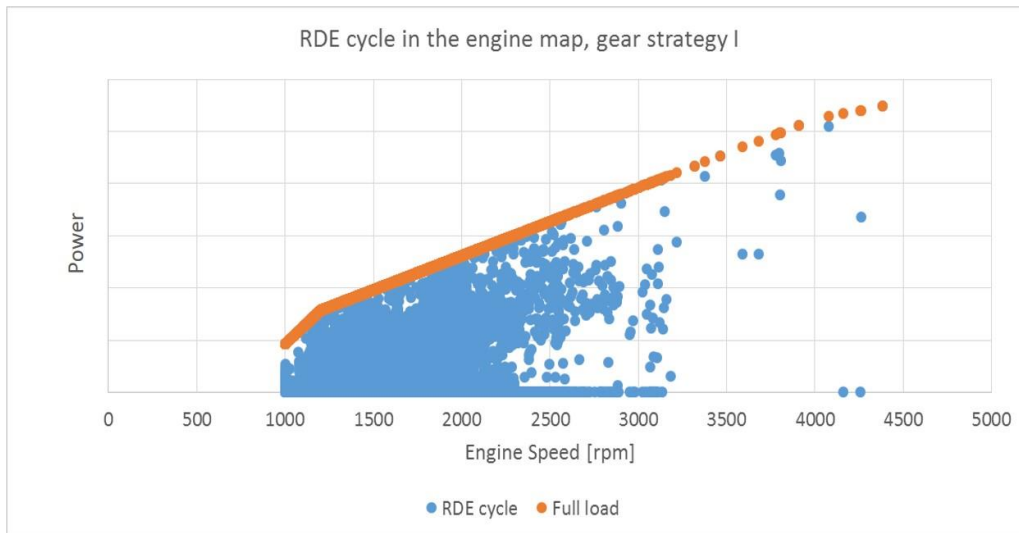


Abbildung 3-23: Im Zyklus genutzter Kennfeldbereich, Strategie I, leistungsbezogen

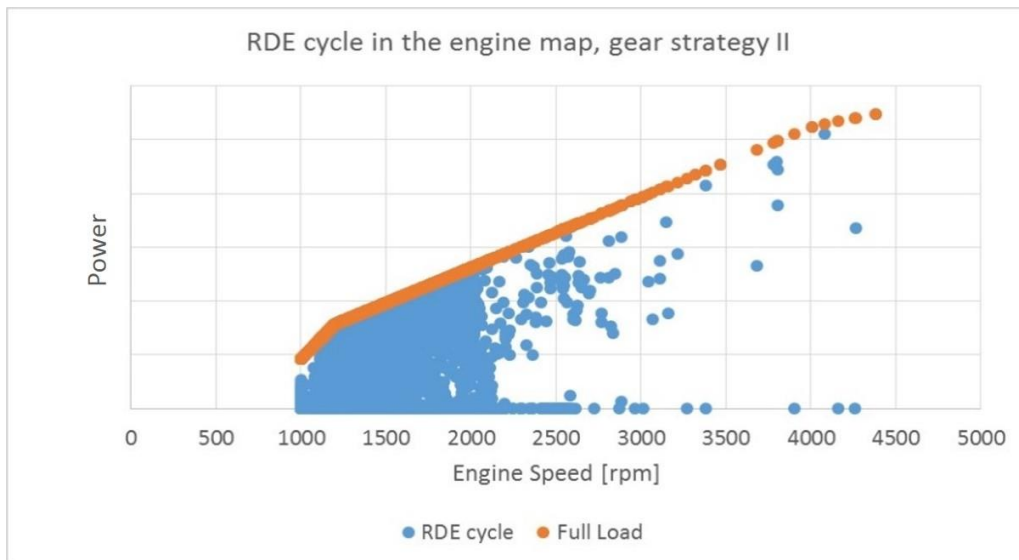


Abbildung 3-24: Im Zyklus genutzter Kennfeldbereich, Strategie II, leistungsbezogen
Das während der Fahrt mit $f=100$ Hz gemessene Drehmoment über der Drehzahl zeigt
Abbildung 3-25.

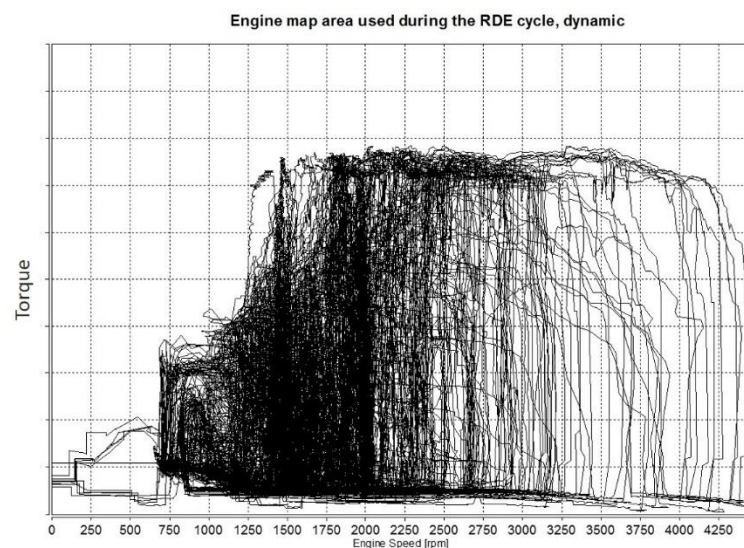


Abbildung 3-25: Gemessener Kennfeldbereich im Zyklus

Weite Teile der Berechnung stimmen mit der Messung überein. Das Tool kann somit als gute erste Näherung betrachtet sowie zur groben Vorauslegung für die RDE- Thematik dienen und soll auch in Zukunft zu diesem Zweck eingesetzt werden.

3.2.4 Leistungsaufteilung

Nun werden die Zeitanteile der benötigten Leistungen nach den Zyklusabschnitten Stadt, Überland und Autobahn berechnet und durch eine Vibe- Funktion angenähert, um ein mathematisches Modell der statistischen Verteilung zu erhalten. Der Zeitanteil ist dabei jener des jeweiligen Zyklusabschnitts, nicht jener des gesamten RDE Zyklus.

$$F_{Vibe} = c \cdot b \cdot (m + 1) \cdot \frac{P - P_0}{P_1 - P_0} \cdot e^{-b \cdot \left(\frac{P - P_0}{P_1 - P_0}\right)^{m+1}} \quad 3-11$$

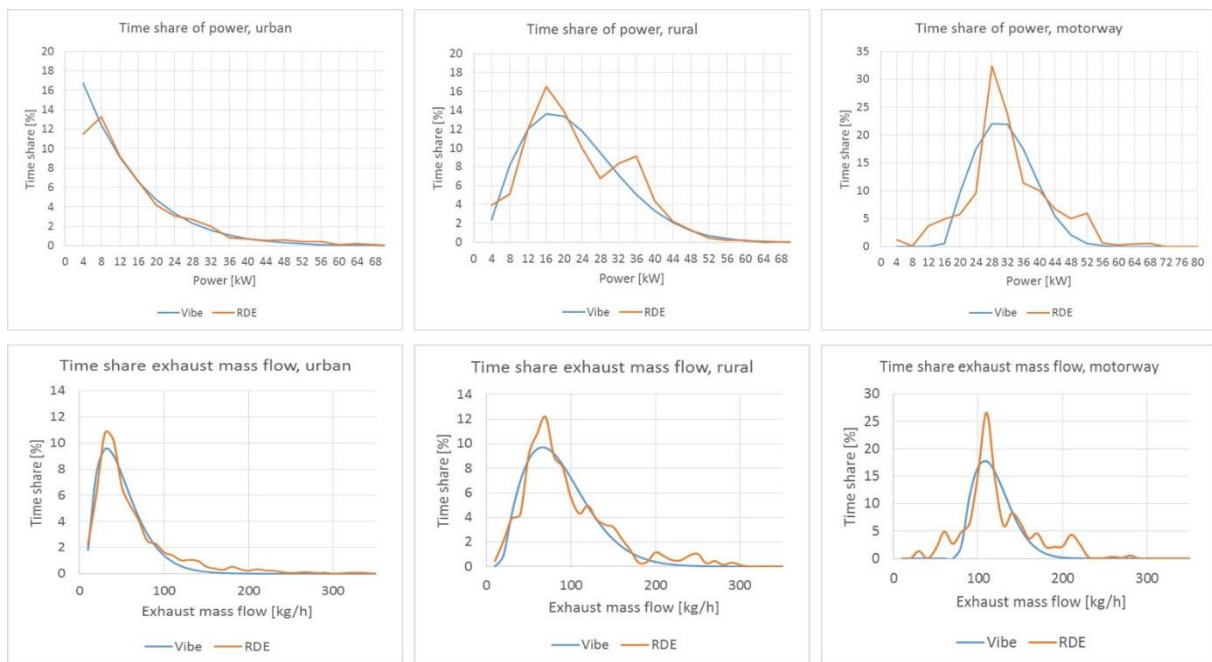


Abbildung 3-26: Anteilsmäßige Leistungs- und Massenstromverteilung über die Zyklusabschnitte

Der Vergleich der beiden Schaltstrategien bezogen auf den Zeitanteil der gefahrenen Leistungen zeigt kaum Abweichungen voneinander. Dies verwundert kaum, unterscheiden sie sich doch nur in ihrer durch den eingelegten Gang unterschiedlichen Drehmoment/Drehzahl-Kombination. Die Abweichungen voneinander bei höheren Leistungen liegen in den unterschiedlichen Zeitschritt- Streckungen, da diese sehr wohl abhängig vom eingelegten Gang sind. Größere Zeitschritte werden im Zeitanteil allerdings nicht separat betrachtet.

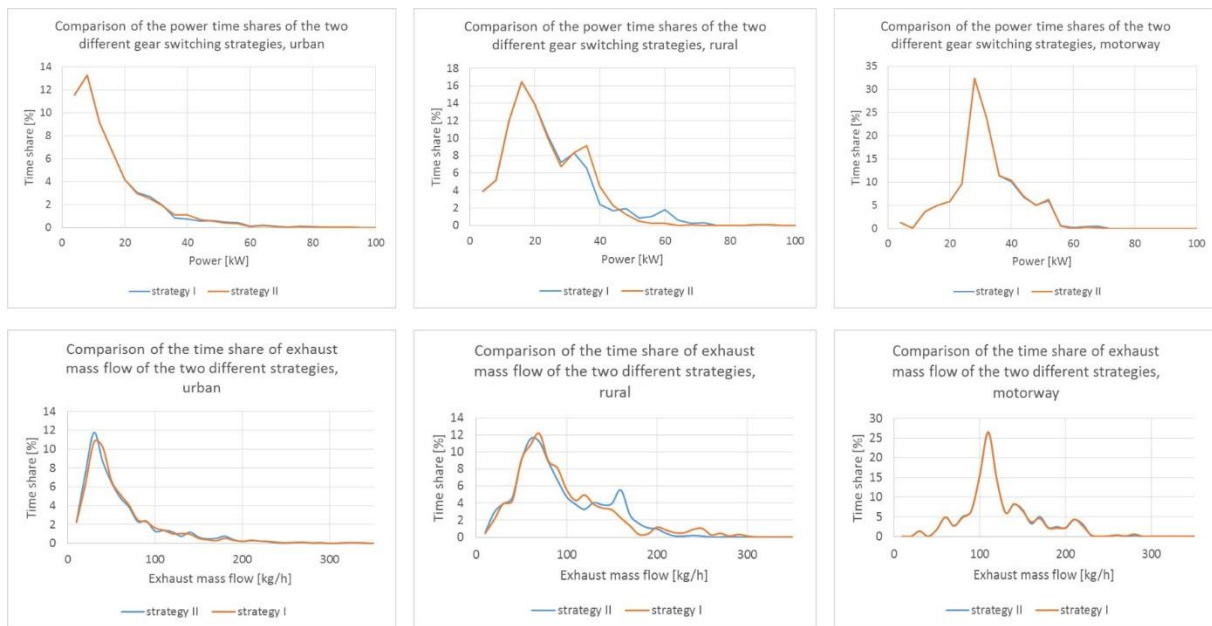


Abbildung 3-27: Vergleich der Zeitanteile von Leistung und Massenstrom der beiden Schaltstrategien

Für den gesamten Zyklus ergibt sich die Leistungsverteilung wie in Abbildung 3-28 dargestellt.

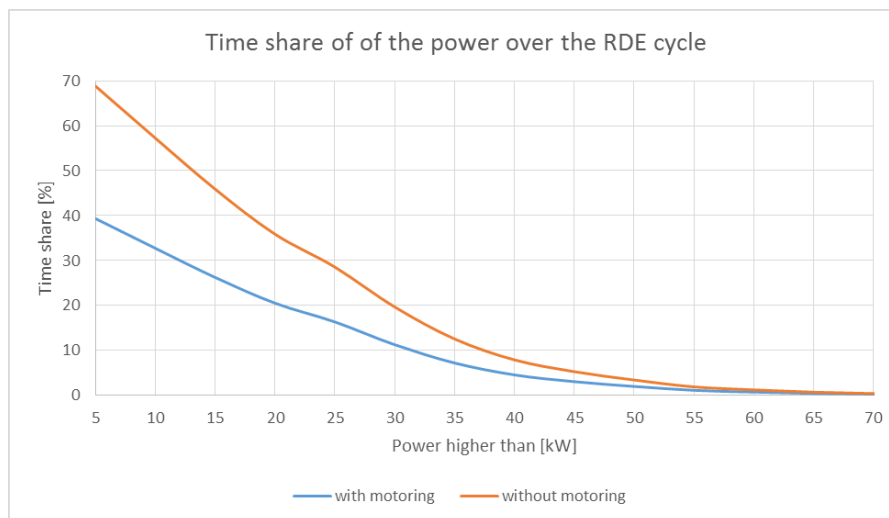


Abbildung 3-28: Zeitanteile der Leistungen über dem gesamten RDE- Zyklus, mit und ohne Schubphasen

Auch die über den Zyklus akkumulierte Beschleunigungsenergie kann nun aufgezeigt werden. Dies kann für eine mögliche Energie- Rekuperation von Hybrid- oder Elektrofahrzeugen nützlich sein. In diesem Fall wird ein Rekuperationspotential von 15% angenommen.

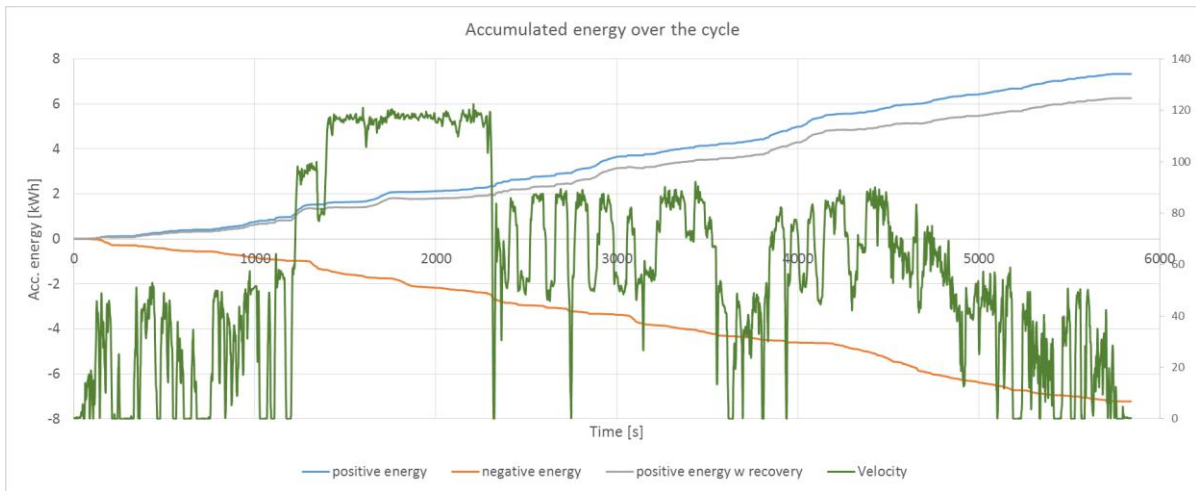


Abbildung 3-29: Energie- Rekuperationspotential des RDE Zyklus

3.2.5 Variantenstudie für die RDE- Leistung verschiedener Fahrzeuge

Die Auswirkungen von Fahrzeugmasse und Widerstandsbeiwerten auf die Leistungsanforderungen während des RDE- Zyklus sollen nun evaluiert werden. Die Widerstandsbeiwerte werden dabei aus dem Mittel verschiedener Fahrzeuge für jeweils eine Fahrzeugklasse (Kompaktklasse, Mittelklasse, SUV, Sportwagen etc.) berechnet. Für die Variation der Fahrzeugmasse wurden konstante Widerstandsbeiwerte angenommen, obwohl diese sehr wohl von der Masse des Fahrzeugs abhängen.

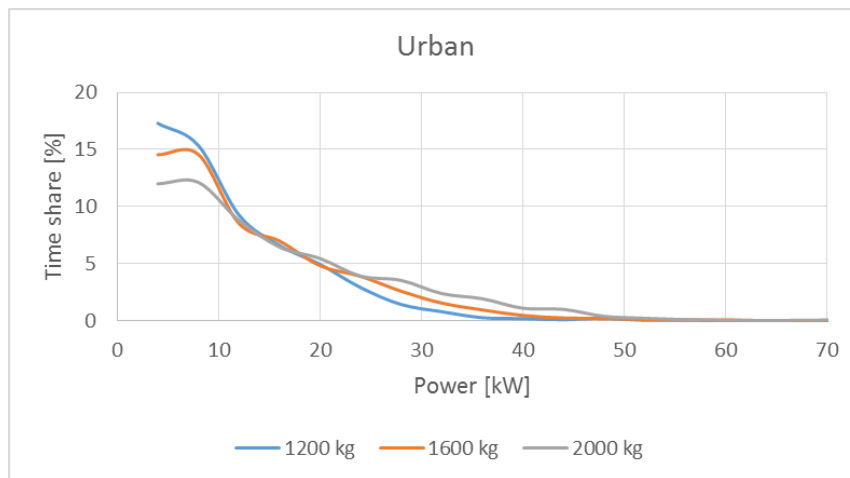


Abbildung 3-30: Einfluss der Fahrzeugmasse auf die Leistungsverteilung, Stadtzyklus

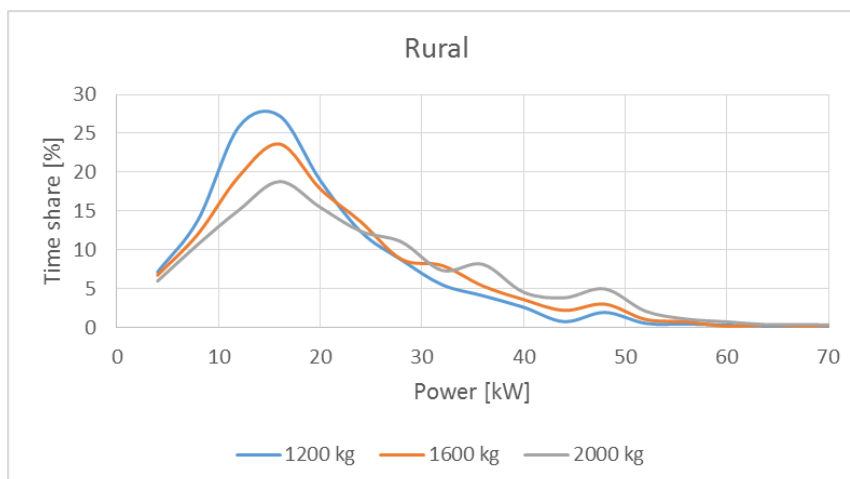


Abbildung 3-31: Einfluss der Fahrzeugmasse auf die Leistungsverteilung, Überlandzyklus



Abbildung 3-32: Einfluss der Fahrzeugmasse auf die Leistungsverteilung, Autobahnzyklus

Die Verschiebung Richtung höherer Leistungen bei höherer Gesamtmasse ist klar ersichtlich. Vor allem im Autobahnzyklus ist ein deutlicher Unterschied erkennbar. Im Stadtzyklus sind die Unterschiede dagegen geringer.

Ein Vergleich verschiedener Fahrzeugklassen hinsichtlich der Karosserien und somit der Widerstandsbeiwerte bei gleich bleibender Fahrzeugmasse ergibt ein ähnliches Bild. Vor allem bei hohen Geschwindigkeiten machen sich die schlechten Widerstandsbeiwerte von SUVs negativ bemerkbar. Der Leistungsbedarf eines SUV in diesem Zyklusabschnitt beträgt etwa 50% mehr als der eines Kompaktwagens.

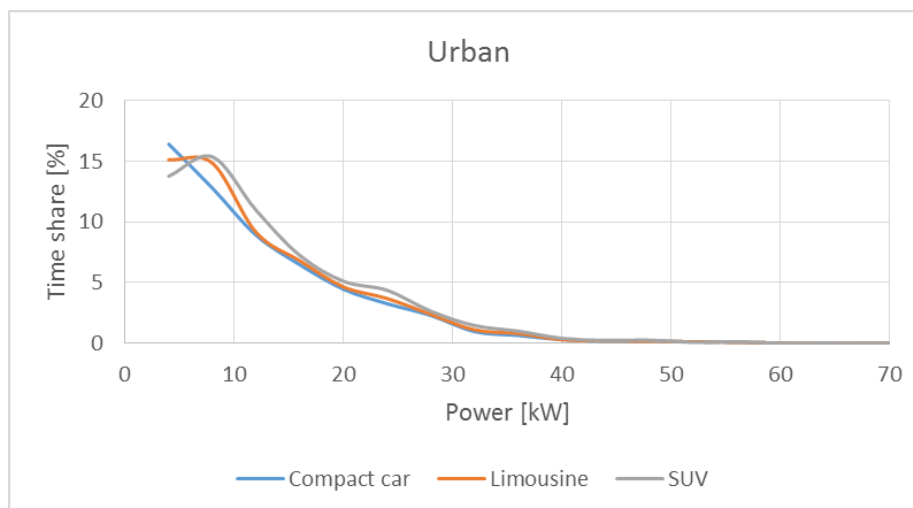


Abbildung 3-33: Einfluss der Fahrzeugklasse auf die Leistungsverteilung, Stadtzyklus

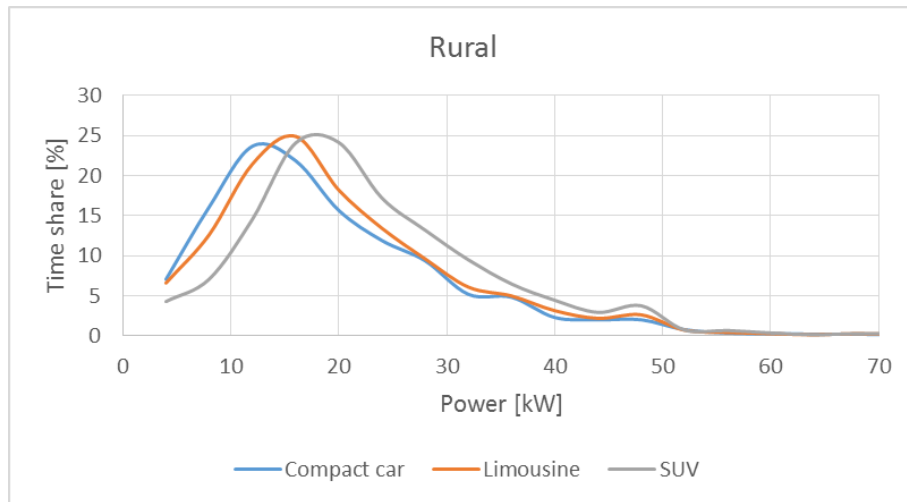


Abbildung 3-34: Einfluss der Fahrzeugklasse auf die Leistungsverteilung, Überlandzyklus

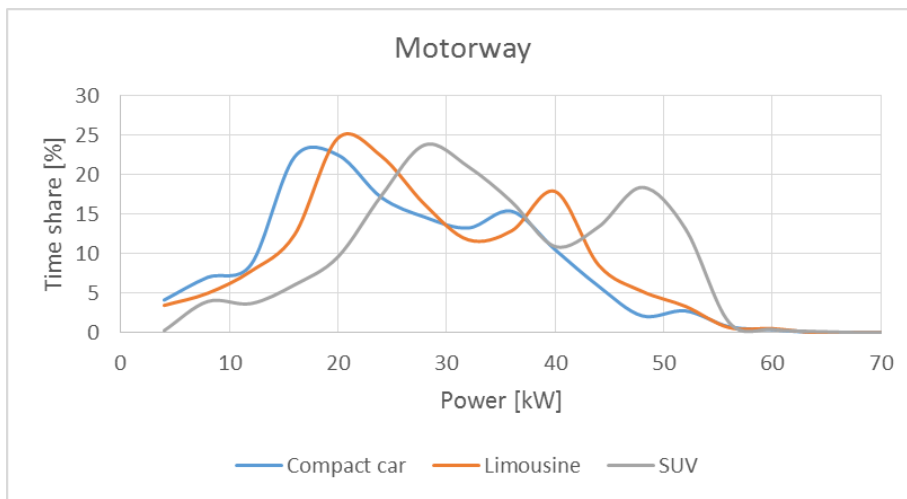


Abbildung 3-35: Einfluss der Fahrzeugklasse auf die Leistungsverteilung, Autobahnzyklus

Eine Übersicht über die berechnete, während des RDE Zyklus durchschnittlich benötigte Leistung verschiedener Fahrzeugklassen und -massen gibt Abbildung 3-36. Klar erkennbar ist einerseits der lineare Zusammenhang von Fahrzeugmasse und benötigter Leistung als auch der steigende Leistungsbedarf für größere Fahrzeuge. Der erhöhte Leistungsbedarf von Sportwagen kommt vor allem durch eine breitere Bereifung sowie massivere Antriebsstrangkomponenten zustande.

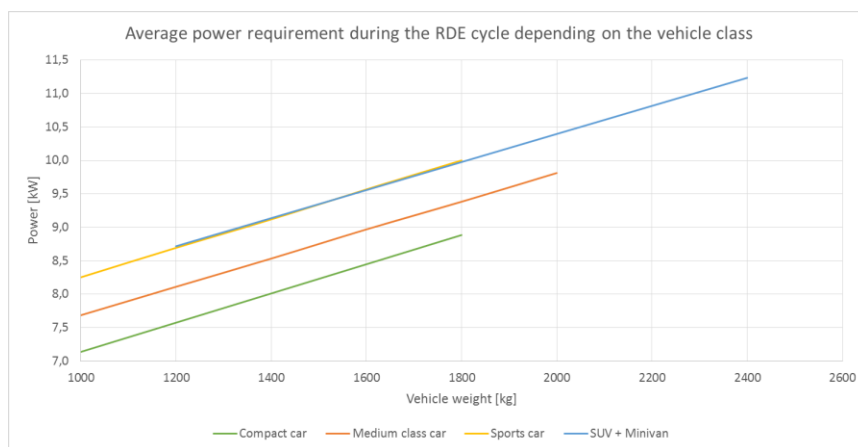


Abbildung 3-36: Durchschnittlich benötigte Leistung während des RDE- Zyklus

Nun können erste Gedanken über die Katalysatorauslegung angestellt werden.

3.2.6 Auslegung des Katalysators

Von Interesse ist vor allem der Bereich hoher Leistungen, wo ein Durchbruch des Katalysators gefährlich für die Emissionswerte ist. Die Frage, die sich nun stellt ist, auf welche Leistung der Katalysator ausgelegt werden muss, damit die Emissionen im vom Gesetzgeber geforderten Rahmen bleiben. Die einfachste Lösung wäre die Auslegung auf die maximale Leistung. Dies ist aber vor allem bei stark motorisierten Fahrzeugen nicht erforderlich und häufig aus Mangel an Bauraum auch nicht möglich. Da die hohen Leistungen während dem RDE- Test nur sehr kurzzeitig angefahren werden und die kurzen Durchbrüche insgesamt möglicherweise keine allzu großen Auswirkungen auf die Gesamtbilanz haben, ist dies auch nicht erforderlich. Somit gilt es nun zu untersuchen, wie klein der Katalysator ausgelegt werden kann, um die Vorgaben noch zu erfüllen.

Ein grober Zusammenhang Leistung- Abgasmassenstrom ist in Abbildung 3-37 dargestellt.

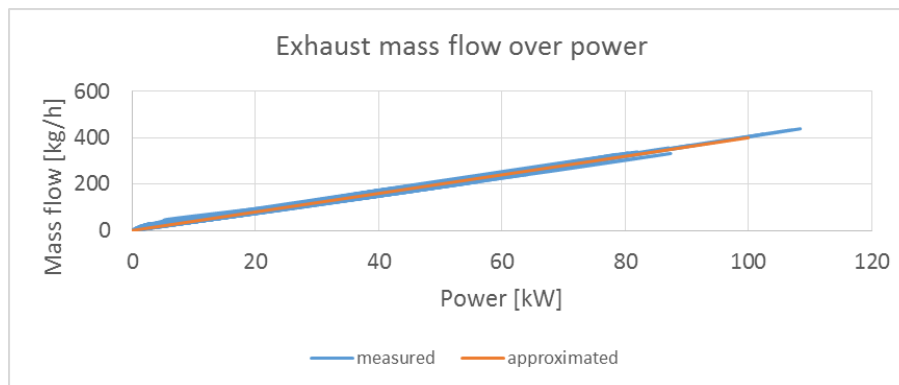


Abbildung 3-37: Zusammenhang Abgasmassenstrom- Leistung

Nun können einige weitere Zusammenhänge aufgezeigt werden.

$$SV = \frac{\dot{V}_{Abg}}{V_{Kat}} \quad 3-12$$

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho_{Abg} \quad 3-13$$

Mit 3-12 und 3-13 ergibt sich für die Raumgeschwindigkeit 3-14.

$$SV = \frac{\dot{m}_{Abg}}{V_{Kat} \cdot \rho_{Abg}} \quad 3-14$$

Unter Einbeziehung von Abbildung 3-37 ergibt sich die empirische Formel 3-15.

$$SV = \frac{4000 \cdot P_{Mot} [kW]}{V_{Kat} [l] \cdot \rho_{Abg} \left[\frac{kg}{m^3} \right]} \quad 3-15$$

Vereinfachend kann die Dichte des Abgasmassenstroms als konstant angenommen werden. Wird die erlaubte Raumgeschwindigkeit ebenfalls vorgegeben, hier beispielhaft 90.000 h^{-1} , so besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Katalysatorvolumen und Motorleistung. Exemplarisch wurden Katalysatorvoluminas von 1.4 l (Volumen Serienkatalysator), 1.6 l und 1.8 l verwendet, welche direkt als Leistungshyperbeln ins Motorkennfeld eingetragen werden können.

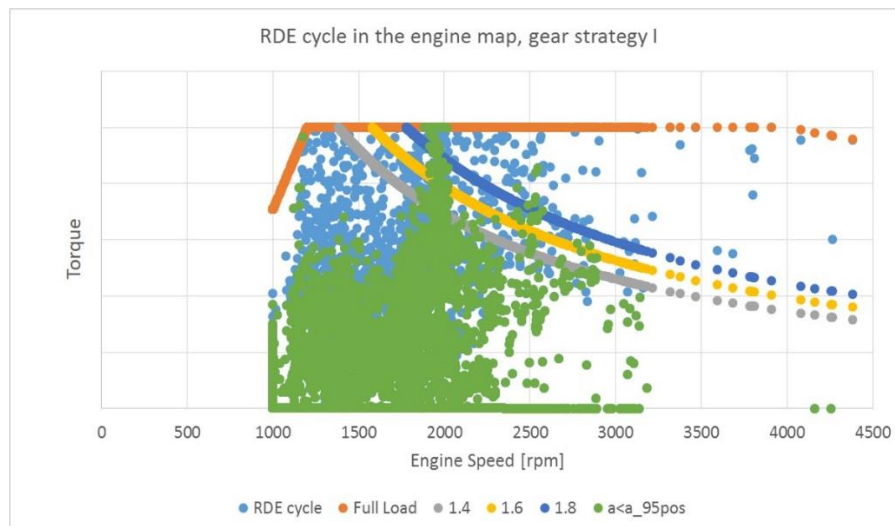


Abbildung 3-38: Verschiedene Katalysatorvolumina im Motorkennfeld, Strategie I

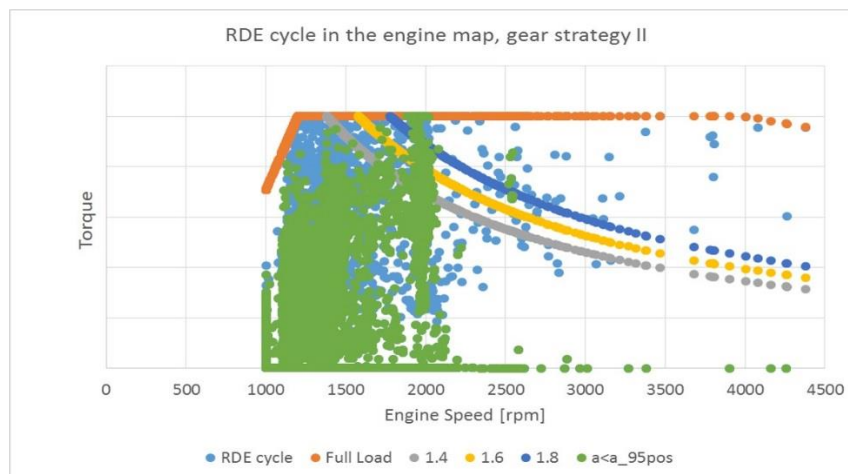


Abbildung 3-39: Verschiedene Katalysatorvolumina im Motorkennfeld, Strategie II

Nun sollen einige Überlegungen bzw. überschlagsmäßige Berechnungen zum Konvertierungsverhalten des Katalysators angestellt werden. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass sämtliche Werte für Konvertierungsraten in diesem Kapitelabschnitt nur für ein sehr enges Lambda-Fenster gelten. Im realen Zyklus schwankt das Luftverhältnis mal mehr mal weniger, da in gewissen Kennfeldbereichen derzeit noch angefettet, in manchen abgemagert wird.

Der Konvertierungsgrad hängt einerseits stark von der Temperatur, andererseits von der Raumgeschwindigkeit, welche den Kehrwert der Verweildauer des Abgases im Katalysator beschreibt, ab. Zudem wird der Wert stark von Edelmetallbeladung und Zelldichte beeinflusst. So zeigen Abbildung 3-40 und Abbildung 3-41 die Konvertierungsraten bei 400 °C und 600 °C über der Raumgeschwindigkeit für mittlere Zelldichte und durchschnittliche Beladung. Die Werte variieren von Katalysator zu Katalysator und sollen nur einen groben Anhaltspunkt geben.

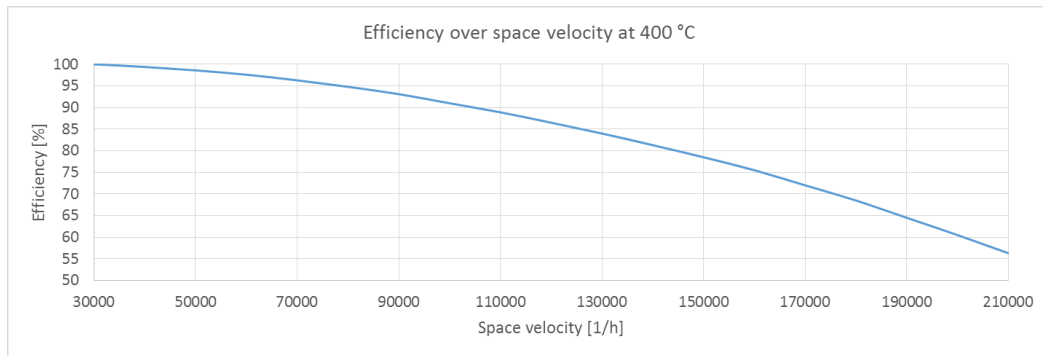


Abbildung 3-40: Katalysatorwirkungsgrad bei 400 °C

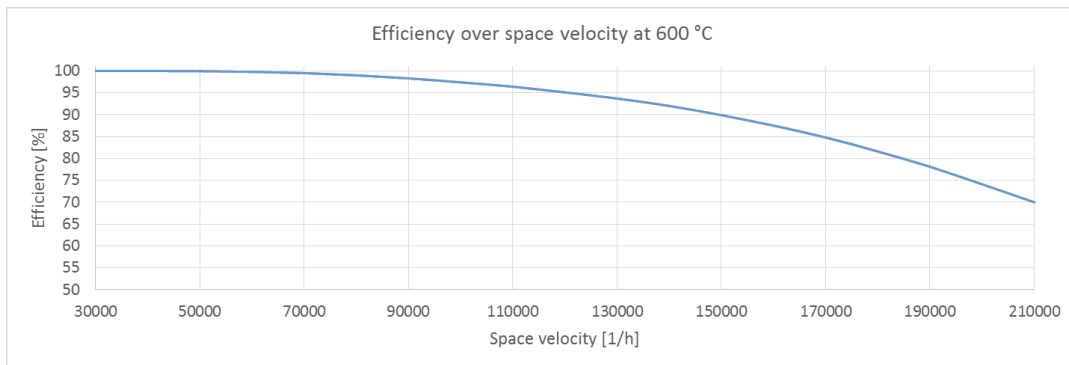


Abbildung 3-41: Katalysatorwirkungsgrad bei 600 °C

Ein ganz allgemeiner Zusammenhang Abgasmassenstrom- Katalysatorvolumen- Raumgeschwindigkeit ist in Abbildung 3-42 dargestellt.

		Cat volume [l]												
		1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
Mass flow [kg/h]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	25	20000	12900	9725	7805	6450	5536	4839	4296	3871	3521	3225	2986	2771
	50	40000	25800	19450	15610	12900	11071	9679	8593	7743	7043	6450	5971	5543
	75	60000	38700	29175	23415	19350	16607	14518	12889	11614	10564	9675	8957	8314
	100	80000	51600	38900	31220	25800	22143	19357	17186	15486	14086	12900	11943	11086
	125	100000	64500	48625	39025	32250	27679	24196	21482	19357	17607	16125	14929	13857
	150	120000	77400	58350	46830	38700	33214	29036	25779	23229	21129	19350	17914	16629
	175	140000	90300	68075	54635	45150	38750	33875	30075	27100	24650	22575	20900	19400
	200	160000	103200	77800	62440	51600	44286	38714	34371	30971	28171	25800	23886	22171
	225	#NV	116100	87525	70245	58050	49821	43554	38668	34843	31693	29025	26871	24943
	250	#NV	129000	97250	78050	64500	55357	48393	42964	38714	35214	32250	29857	27714
	275	#NV	141900	106975	85855	70950	60893	53232	47261	42586	38736	35475	32843	30486
	300	#NV	154800	116700	93660	77400	66429	58071	51557	46457	42257	38700	35829	33257
	325	#NV	#NV	126425	101465	83850	71964	62911	55854	50329	45779	41925	38814	36029
	350	#NV	#NV	136150	109270	90300	77500	67750	60150	54200	49300	45150	41800	38800
	375	#NV	#NV	145875	117075	96750	83036	72589	64446	58071	52821	48375	44786	41571
	400	#NV	#NV	155600	124880	103200	88571	77429	68743	61943	56343	51600	47771	44343
	425	#NV	#NV	#NV	132685	109650	94107	82268	73039	65814	59864	54825	50575	47114
	450	#NV	#NV	#NV	140490	116100	99643	87107	77336	69686	63386	58050	53743	49886
	475	#NV	#NV	#NV	148295	122550	105179	91946	81632	73557	66907	61275	56729	52657
	500	#NV	#NV	#NV	156100	129000	110714	96786	85929	77429	70429	64500	59714	55429
525	#NV	#NV	#NV	#NV	135450	116250	101625	90225	81300	73950	67725	62700	58200	
550	#NV	#NV	#NV	#NV	141900	121786	106464	94521	85171	77471	70950	65686	60971	
575	#NV	#NV	#NV	#NV	148350	127321	111304	98818	89043	80993	74175	68671	63743	
600	#NV	#NV	#NV	#NV	154800	132857	116143	103114	92914	84514	77400	71657	66514	
625	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	138393	120982	107411	96786	88036	80625	74643	69286	
650	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	143929	125821	111707	100657	91557	83850	77629	72057	
675	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	149464	130661	116004	104529	95079	87075	80614	74829	
700	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	155000	135500	120300	108400	98600	90300	83600	77600	

Abbildung 3-42: Raumgeschwindigkeit, Brick- Volumen und Abgasmassenstrom

Eine Interpolation der für die PKW- Anwendung derzeit typischer kleinerer Katalysatorvolumina ergibt eine etwas verfeinerte Darstellung.

		Cat volume [l]							
		1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4
Mass flow [kg/h]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	16000	12898	11053	9679	8598	7778	7032	6449
	40	32000	25795	22105	19358	17197	15555	14065	12898
	60	48000	38693	33158	29037	25795	23333	21097	19346
	80	64000	51590	44210	38716	34393	31110	28130	25795
	100	80000	64488	55263	48395	42992	38888	35162	32244
	120	96000	77385	66316	58074	51590	46665	42194	38693
	140	112000	90283	77368	67753	60188	54443	49227	45141
	160	128000	103180	88421	77431	68787	62220	56259	51590
	180	144000	116078	99473	87110	77385	69998	63292	58039
	200	160000	128975	110526	96789	85983	77776	70324	64488
	220	176000	141873	121579	106468	94582	85553	77356	70936
	240	192000	154770	132631	116147	103180	93331	84389	77385
	260	208000	167668	143684	125826	111778	101108	91421	83834
	280	#NV	180565	154736	135505	120377	108886	98454	90283
	300	#NV	193463	165789	145184	128975	116663	105486	96731
	320	#NV	206360	176842	154863	137573	124441	112518	103180
	340	#NV	#NV	187894	164542	146172	132218	119551	109629
	360	#NV	#NV	198947	174221	154770	139996	126583	116078
	380	#NV	#NV	#NV	183900	163368	147773	133616	122526
400	#NV	#NV	#NV	193579	171967	155551	140648	128975	
420	#NV	#NV	#NV	203258	180565	163329	147680	135424	
440	#NV	#NV	#NV	#NV	189163	171106	154713	141873	
460	#NV	#NV	#NV	#NV	197762	178884	161745	148321	
480	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	186661	168778	154770	
500	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	194439	175810	161219	

Abbildung 3-43: Raumgeschwindigkeit, Brick- Volumen und Abgasmassenstrom, Ausschnitt
 Mit den aus Abbildung 3-40 gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich die theoretischen Konvertierungsgrade für 400 °C, gültig für genaue Lambda-Regelung.

400 °C		Cat volume [l]							
		1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4
Mass flow [kg/h]	0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	20	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	40	99.88	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	60	98.76	99.48	99.81	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	80	97.08	98.44	99.06	99.48	99.74	99.93	100.00	100.00
	100	94.80	97.02	98.07	98.73	99.16	99.47	99.69	99.87
	120	91.84	95.19	96.78	97.79	98.44	98.87	99.22	99.48
	140	88.42	93.04	95.19	96.59	97.58	98.16	98.66	98.99
	160	84.50	90.33	93.37	95.19	96.46	97.31	97.97	98.44
	180	80.18	87.44	91.11	93.59	95.19	96.30	97.17	97.80
	200	75.50	84.26	88.77	91.67	93.78	95.13	96.25	97.02
	220	69.90	80.78	86.11	89.64	92.14	93.86	95.20	96.16
	240	63.70	77.07	83.29	87.42	90.33	92.40	94.05	95.19
	260	57.14	72.82	80.27	85.04	88.47	90.77	92.80	94.15
	280	#NV	68.27	77.08	82.51	86.41	89.13	91.32	93.04
	300	#NV	63.12	73.47	79.85	84.26	87.30	89.85	91.69
	320	#NV	57.83	69.61	77.04	81.96	85.39	88.30	90.33
	340	#NV	#NV	65.34	73.91	79.57	83.40	86.61	88.98
	360	#NV	#NV	60.92	70.52	77.07	81.30	84.85	87.44
	380	#NV	#NV	#NV	66.94	74.32	79.12	83.02	85.87
400	#NV	#NV	#NV	63.07	71.31	76.83	81.12	84.26	
420	#NV	#NV	#NV	59.13	68.27	74.34	79.15	82.54	
440	#NV	#NV	#NV	#NV	64.83	71.61	77.09	80.78	
460	#NV	#NV	#NV	#NV	61.40	68.89	74.89	78.97	
480	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	65.84	72.43	77.07	
500	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	62.72	69.97	75.07	

Abbildung 3-44: Katalysatorwirkungsgrad, Volumen und Massendurchsatz bei 400 °C

Die Konvertierungsgrade für 600 °C werden aus Abbildung 3-41 erhalten und entsprechen eher der Realität bei höheren Motorlasten bzw. Abgasmassenströmen.

600 °C		Cat volume [l]							
		1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4
Mass flow [kg/h]	0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	20	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	40	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	60	99.96	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	80	99.68	99.93	99.98	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	100	99.00	99.67	99.87	99.96	99.99	100.00	100.00	100.00
	120	97.76	99.13	99.61	99.83	99.93	99.97	99.99	100.00
	140	96.14	98.27	99.13	99.57	99.79	99.88	99.95	99.97
	160	93.98	97.08	98.41	99.13	99.54	99.73	99.86	99.93
	180	91.16	95.61	97.45	98.50	99.13	99.50	99.70	99.83
	200	87.50	93.84	96.33	97.69	98.58	99.11	99.48	99.67
	220	82.88	91.61	94.88	96.75	97.89	98.61	99.13	99.45
	240	77.30	88.76	93.25	95.60	97.08	98.00	98.69	99.13
	260	70.82	85.43	91.23	94.28	96.17	97.29	98.17	98.73
	280	#NV	81.40	88.76	92.76	95.05	96.51	97.54	98.27
	300	#NV	76.72	85.94	90.91	93.84	95.53	96.85	97.69
	320	#NV	71.49	82.61	88.73	92.41	94.48	96.07	97.08
	340	#NV	#NV	78.84	86.27	90.70	93.32	95.16	96.44
	360	#NV	#NV	74.52	83.45	88.76	92.00	94.18	95.61
	380	#NV	#NV	#NV	80.24	86.59	90.37	93.09	94.75
	400	#NV	#NV	#NV	76.67	84.17	88.57	91.86	93.84
	420	#NV	#NV	#NV	72.76	81.40	86.60	90.39	92.78
	440	#NV	#NV	#NV	#NV	78.39	84.45	88.77	91.61
	460	#NV	#NV	#NV	#NV	75.00	81.96	87.03	90.25
	480	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	79.27	85.13	88.76
	500	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	76.32	82.94	87.17

Abbildung 3-45: Katalysatorwirkungsgrad, Volumen und Massendurchsatz bei 600 °C

Wenn man nun ein fixes Katalysatorvolumen annimmt und den RDE Zyklus damit abfährt, bewegt man sich in Abbildung 3-46 immer entlang einer bestimmten Kurve.

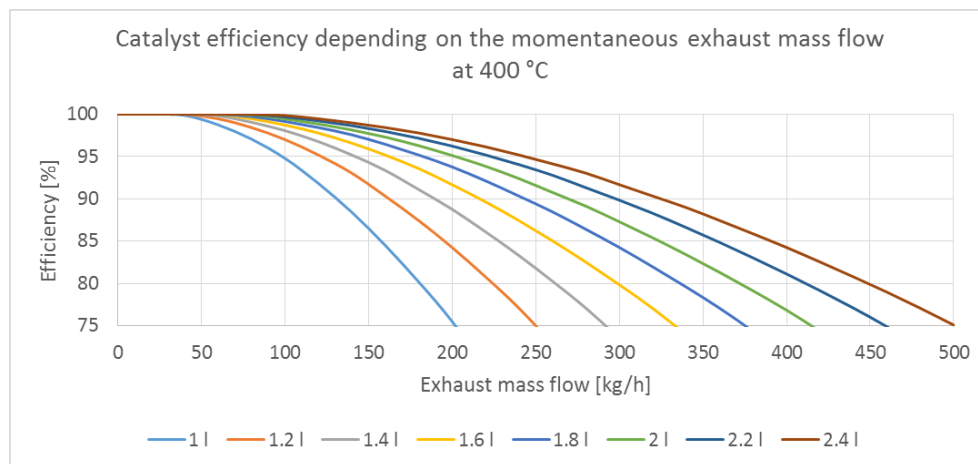


Abbildung 3-46: Wirkungsgrad über Massenstrom für V=konstant bei 400 °C

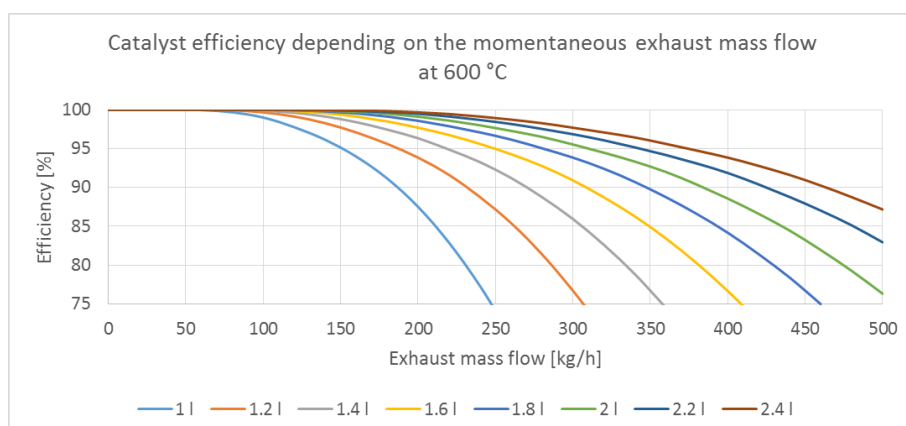


Abbildung 3-47: Wirkungsgrad über Massenstrom für V=konstant bei 600 °C

Die nun gewonnenen Zusammenhänge können nun auf den RDE- Zyklus übertragen werden. Den Verlauf der Raumgeschwindigkeit für das Beispielfahrzeug mit 1.5 l Katalysator zeigt Abbildung 3-48.

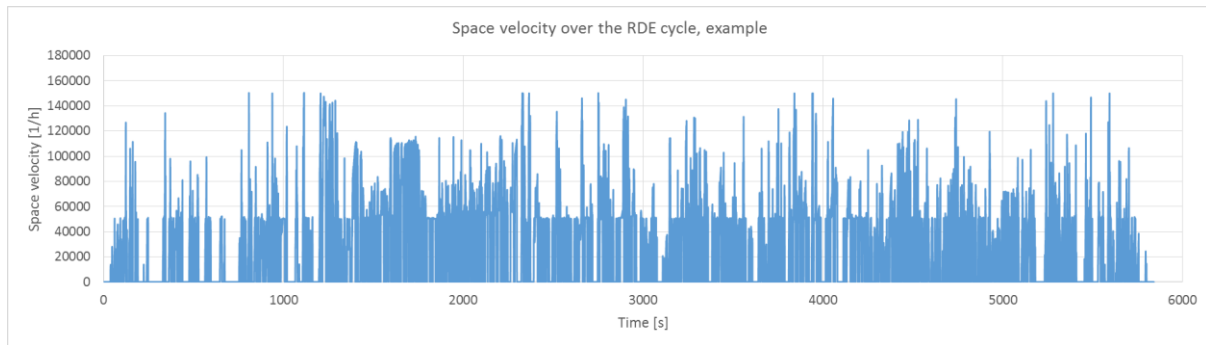


Abbildung 3-48: Raumgeschwindigkeit über den Zyklus, berechnet

Soll daraus nun die Konvertierungsrate berechnet werden, muss man einige Einschränkungen in Kauf nehmen. Das einfache Excel- Tool als Berechnungswerkzeug gerät an dieser Stelle stark an seine Grenzen. Sowohl der Kaltstart, als auch Schwankungen im Luftverhältnis können nicht simuliert werden. Trotzdem soll ein grober Richtwert im Konvertierungsverhalten gezeigt werden. Die Katalysator- Temperatur wird auf konstante 600 °C und das Luftverhältnis stöchiometrisch angenommen.

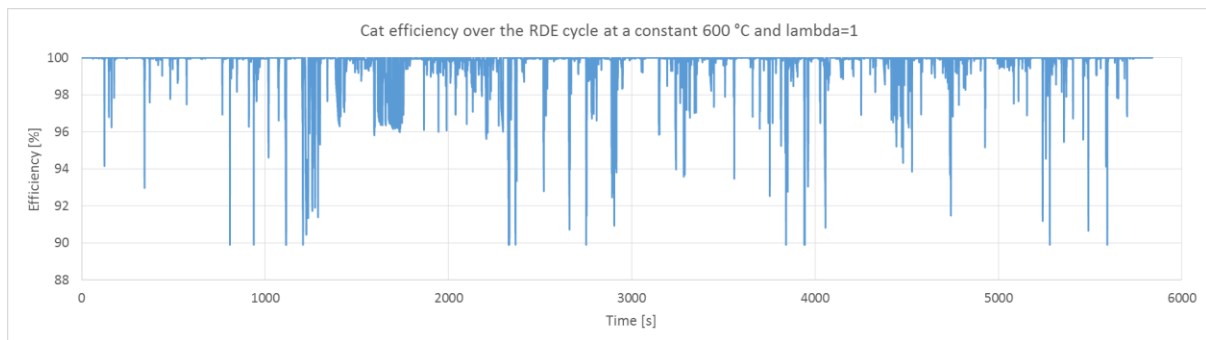


Abbildung 3-49: Theoretischer Katalysatorwirkungsgrad über den Zyklus

Die einzelnen Spitzen niedrigen Konvertierungsgrades aufgrund kurzzeitiger Überlastung wirken sich auf die Gesamtbilanz nur wenig aus, wie Abbildung 3-50 beweist.

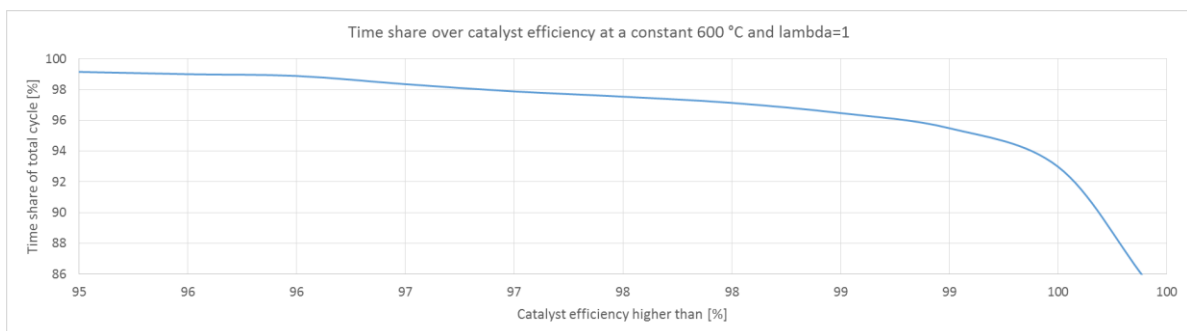


Abbildung 3-50: Zeitanteil der Katalysatorwirkungsgrade über den Zyklus

Demnach beträgt der Konvertierungsgrad für ca. 95% der Zeit über 99%. Das Problem sind aber, wie bereits erwähnt, Abweichungen von $\lambda=1$ und die Kaltstartphase, welche hier nicht berücksichtigt wurde. Der Konvertierungsgrad über der Temperatur bei verschiedenen Raumgeschwindigkeiten ist in Abbildung 3-51 dargestellt. Die light-off Temperatur liegt demnach grob zwischen 210 und 280 °C für mittlere Raumgeschwindigkeiten.

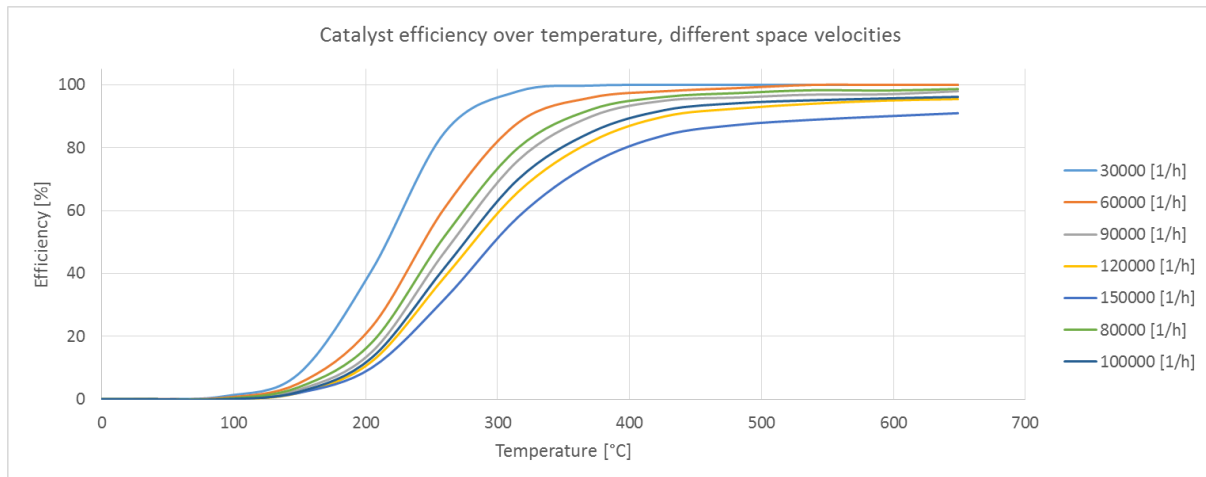


Abbildung 3-51: Konvertierungsgrad in Abhängigkeit von Temperatur und Raumgeschwindigkeit

Legt man das Katalysatorvolumen fest (hier z.B. auf 1.4 Liter), können die Kurven als konstante Abgasmassenströme dargestellt werden, welche wiederum Leistungskurven entsprechen. Diese sind in Abbildung 3-53 dargestellt.

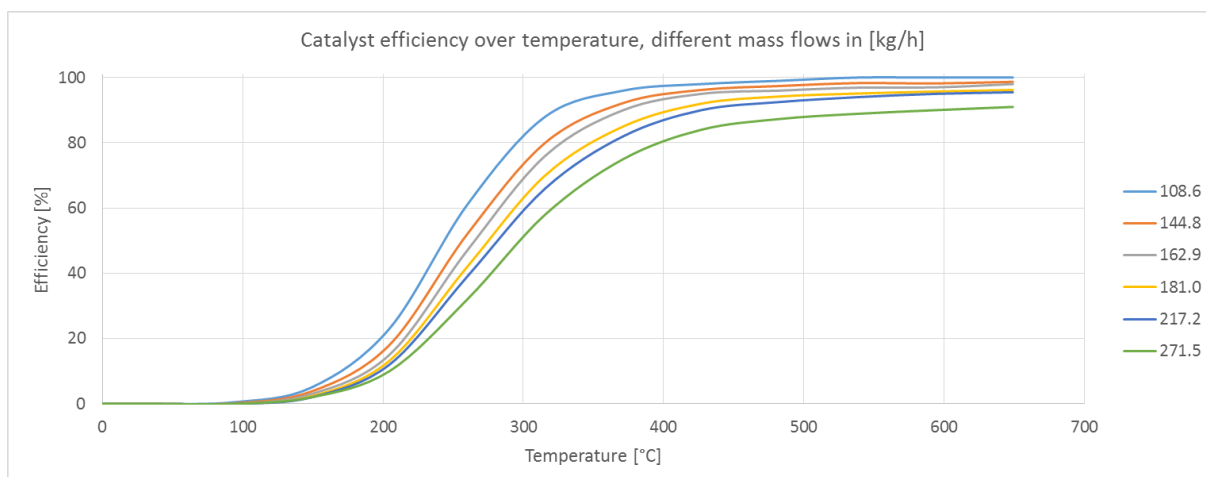


Abbildung 3-52: Konvertierungsgrad in Abhängigkeit von Temperatur und Abgasmassenstrom bei gewissem Katalysatorvolumen

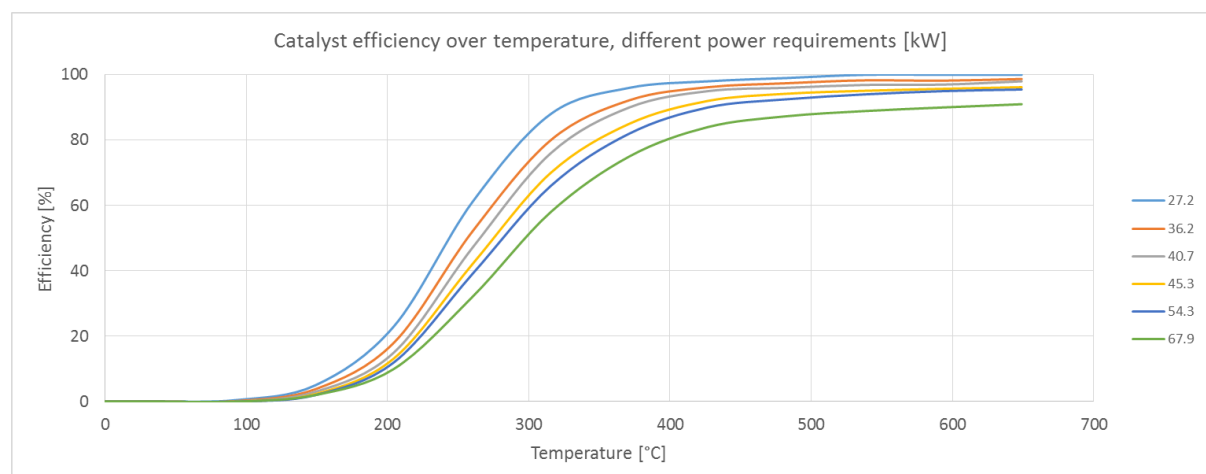


Abbildung 3-53: Konvertierungsgrad in Abhängigkeit von Temperatur und Leistung bei gewissem Katalysatorvolumen

Da im realen Betriebsverhalten des Gesamtsystems Motor- Abgasmachbehandlung vor allem

der Kaltstart und Abweichungen vom stöchiometrischen Luftverhältnis bei starken Beschleunigungen und niedrigen Drehzahlen (Spülen) zu starken Emissionen führen, soll die Analyse von RDE- Messfahrten an dieser Stelle erfolgen. Sie soll Aufschluss über die Emissionsherde im realen Fahrzeug geben.

3.3 Analyse von RDE- Fahrten

Grundlage für die Analyse sind RDE- Messungen an drei ausgewählten Fahrzeugen (Kompaktklasse, Mittelklasse Limousine, SUV). Die Rohemissionen wurden allerdings nur beim Kompaktwagen gemessen, da mit diesem der RDE Zyklus am Rollenprüfstand nachgefahren wurde und dabei erweiterte Messtechnik verwendet werden konnte. Im Gegensatz dazu wurden die beiden anderen Fahrzeuge auf der AVL RDE- Teststrecke gefahren und deshalb lediglich mit einem PEMS am Endrohr und einem Particle Counter ausgestattet.

3.3.1 Vergleich Rohemissionen- auspuffseitige Emissionen

Abhängig von Lambda, Raumgeschwindigkeit und Temperatur werden die Emissionen im RDE Zyklus vom Katalysator unterschiedlich effizient konvertiert. Einen groben Überblick über die Größenordnungen der Konvertierung und die Möglichkeiten des Katalysators liefert Abbildung 3-54, die den Vergleich von Rohemissionen mit den auspuffseitig gemessenen Emissionen für NO_x und CO aufzeigt (Fzg. A).

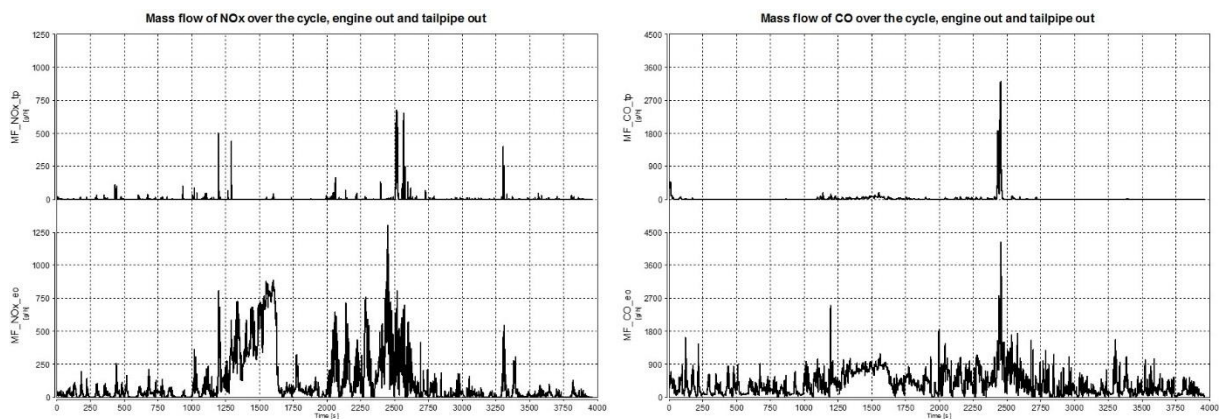


Abbildung 3-54: NO_x - und CO- Rohemissionen und jene am Auspuff gemessenen

Um die einzelnen auspuffseitig emittierten Emissionen in Relation zueinander zu setzen, zeigt Abbildung 3-55 einen Vergleich der Größenordnungen der einzelnen auspuffseitig gemessenen Emissionsspurten in [g/h].

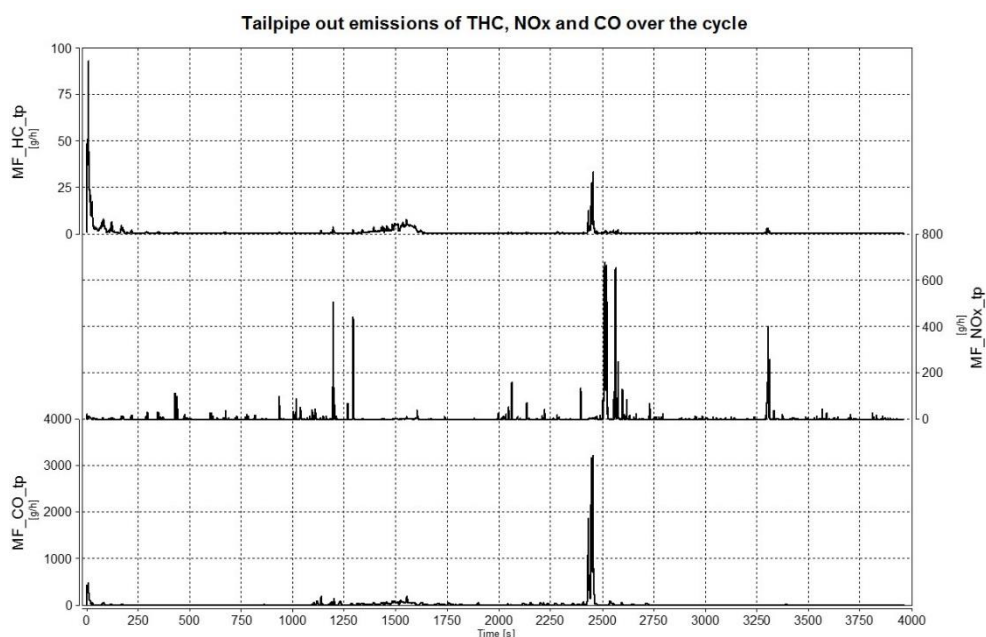


Abbildung 3-55: Vergleich der auspuffseitig gemessenen Emissionen von HCs, NO_x und CO

Über weite Bereiche des Zyklus weist der Katalysator sehr hohe Umsatzraten auf (bis zu 99.9 %). Die Spitzen in den Verläufen der auspuffseitig gemessenen Emissionen sind allerdings viel ausgeprägter im Verhältnis zum restlichen Verlauf, als dies bei den Rohemissionsspuren der Fall ist und bedeuten kurzzeitige sehr niedrige Konvertierungsraten bzw. Katalysatordurchbrüche. Deren Auswirkungen auf die Gesamtbilanz lassen sich durch Akkumulieren über die Zyklusdauer am besten darstellen.

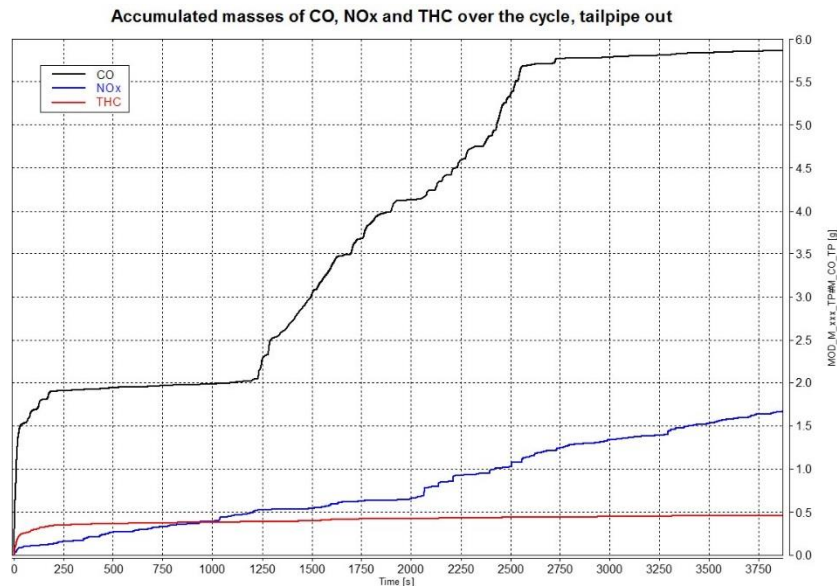


Abbildung 3-56: Vergleich der akkumulierte Emissionen über den Zyklus

Der Anteil der Kaltstartemissionen trägt vor allem bei den HCs, aber auch beim CO, zu einem Großteil der Gesamtemissionen bei. Jener der NO_x ist dagegen vernachlässigbar klein (vgl. dazu Abbildung 3-81). Das folgende Kapitel soll zur Klärung der Ursachenfrage der einzelnen Emissionen dienen.

3.3.2 Ursachen für hohe NO_x

Eine Betrachtung der Emissionsspitzen im Motorkennfeld sowie der Lambda- Kennfelder der Fahrzeuge liefert ein erstes Indiz für die Herkunft der hohen Emissionen.

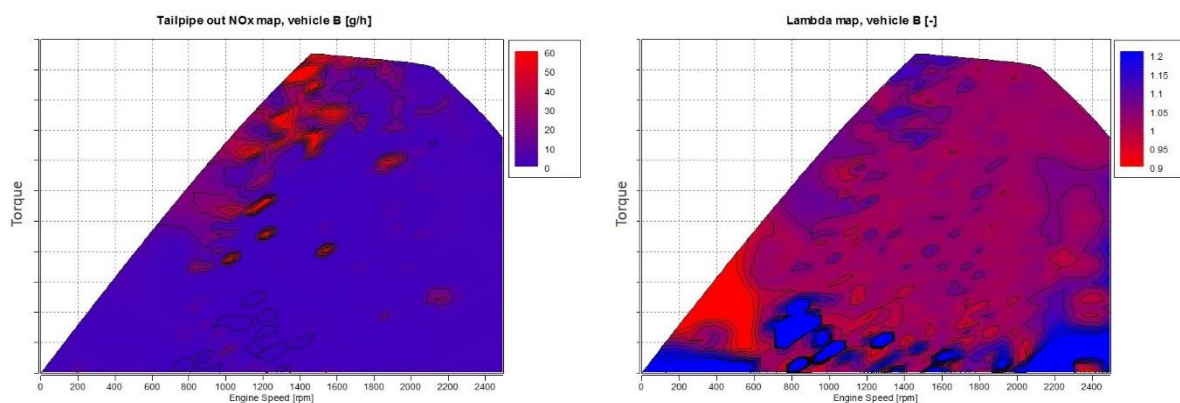


Abbildung 3-57: Vergleich von Lambda- und NO_x- Kennfelder, Fahrzeug B

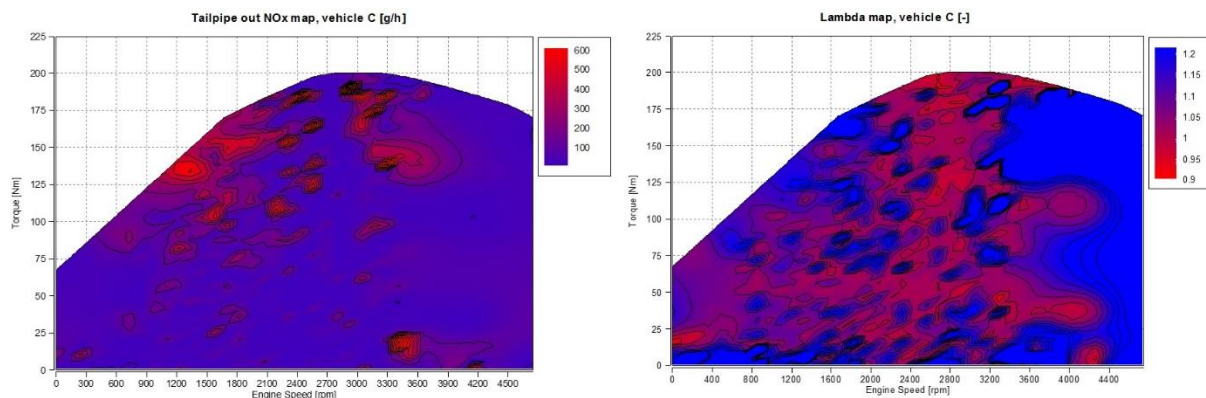


Abbildung 3-58: Vergleich von Lambda- und NO_x - Kennfelder, Fahrzeug C

Auffällig ist erst mal die im Vergleich zu Fahrzeug B ca. zehnmal höhere emittierte Menge an NO_x von Fahrzeug C. Letztendlich ist die pro Kilometer emittierte Menge NO_x von Fahrzeug C auch tatsächlich etwa zehnmal so hoch wie jene von Fahrzeug B. Des Weiteren entstehen die meisten NO_x offensichtlich im Bereich hoher Lasten und niedriger Drehzahlen und damit genau dort, wo spülen (scavenging) auftritt.

Das Spülen dient bei direkt einspritzenden Turbomotoren zur Erhöhung des Abgasmassenstroms bei niedrigen Drehzahlen, um die Turbine bereits verfrüht auf die gewünschte Drehzahl zu beschleunigen und so das unerwünschte Turboloch zu vermeiden. Dabei öffnen die Einlassventile am Ende des Ausschietakts, sodass für kurze Zeit Ein- und Auslassventile gleichzeitig geöffnet sind, damit das restliche Arbeitsgas im Zylinder durch das eintretende Frischgas aus dem Zylinder verdrängt wird. Da auf diese Weise allerdings Frischluft durch den Brennraum spült und über die Turbine in die Abgasanlage gelangt, magert das Gemisch dort ab.

Das Spülen erfolgt immer bei stöchiometrischem Betrieb im Brennraum, sprich insgesamt verschiebt sich das Luftverhältnis gegen mager. Würde man im Brennraum fettes Gemisch einstellen, um ein globales stöchiometrisches Gemisch zu erreichen, wären zum einen die Partikelemissionen untragbar, zum anderen würden die unverbrannten HCs im Abgastrakt mit dem Sauerstoff reagieren und den Katalysator innerhalb weniger Zyklen vollständig zerstören.

Voraussetzung hierfür ist zum einen ein variabler Ventiltrieb, da nur bei niedrigen Drehzahlen der Abgasmassenstrom zu niedrig ist, um die Turbine ausreichend zu beschleunigen. Bei höheren Drehzahlen ist der Abgasmassenstrom ausreichend. Zum anderen ist Direkteinspritzung (und die damit einhergehende innere Gemischbildung) Grundvoraussetzung, da während der Ventilüberschneidung nur Luft, nicht aber unverbrannter Kraftstoff in den Abgastrakt gelangen soll.

Die Wirkung des Spülens kann besonders deutlich bei Fahrzeug B, Abbildung 3-59, veranschaulicht werden.

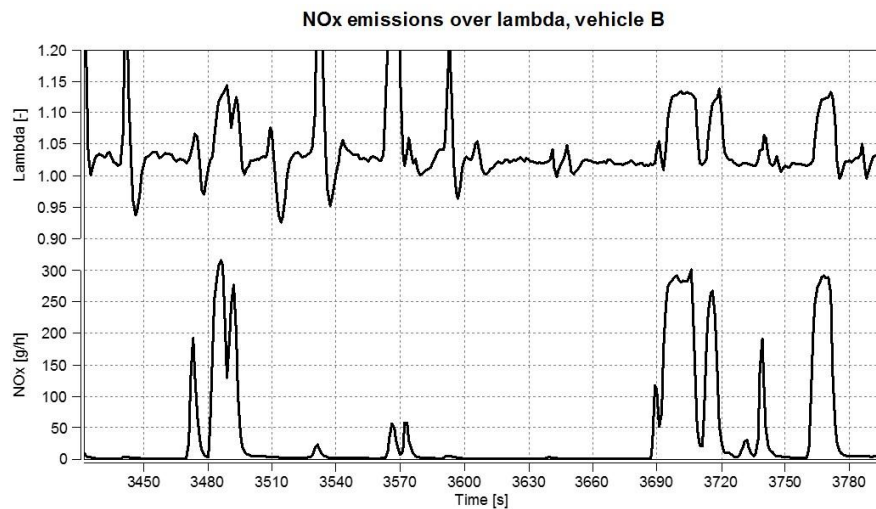


Abbildung 3-59: Auswirkungen der Spülvorgänge auf die NO_x- Emissionen

Die Bereiche, in denen die NO_x- Emissionen null sind und Lambda gegen Unendlich strebt, markieren Phasen der Kraftstoffabschaltung in den Schubphasen, vgl. Abbildung 3-60. Während der Kraftstoffabschaltung füllt sich der Sauerstoffspeicher des Katalysators, da reine Luft durch die Brennräume gespült wird, Lambda steigt. Wird die Einspritzung bei Drehzahlabfall unter einen gewissen Schwellenwert (hier etwa 900 U/min) wieder eingeschaltet, können kleine überstöchiometrische Spitzen im Lambda- Verlauf nicht ausgeglichen werden, weshalb die NO_x- Emissionen in diesen Punkten durchbrechen. Wird nach einer Phase der Schubabschaltung aus niedrigen Drehzahlen wieder beschleunigt, tritt Spülen bei bereits gesättigtem Katalysator auf. Auch in diesem Punkt steigen die NO_x- Emissionen stark.

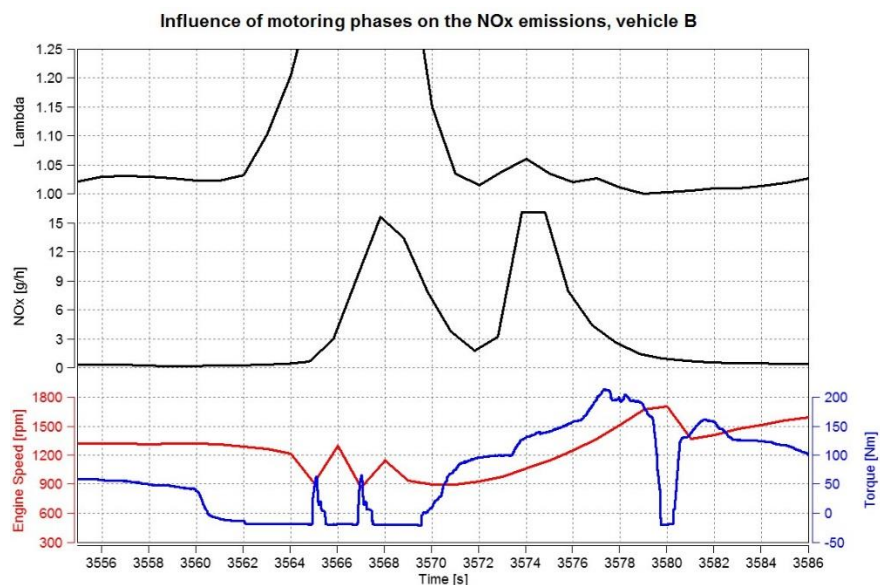


Abbildung 3-60: Einfluss der Schubphasen auf die NO_x- Emissionen

Somit muss Spülen vor allem nach Schubphasen verhindert werden. Dagegen kann ein leicht fetter Motorlauf unmittelbar nach einer Kraftstoffabschaltung den Abbau des Sauerstoffs im Katalysator fördern, wobei dadurch die Rußemissionen wiederum ansteigen. Fahrzeug C dagegen gelingt dies nicht bzw. es tritt sofort nach der erneuten Einspritzung Spülen auf, weshalb an diesen Punkten besonders hohe NO_x entstehen. Auch Fahrzeug C weist starke Spülcharakteristiken nach den Schubphasen auf, vgl. Abbildung 3-61.

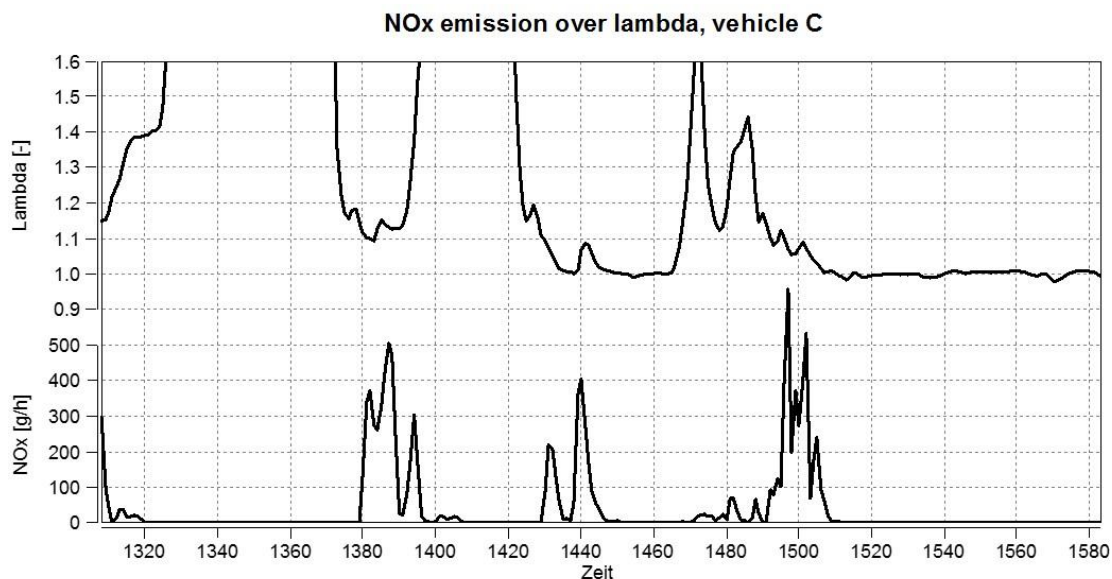


Abbildung 3-61: Auswirkungen des Fuel- Cut- Offs auf die NO_x- Emissionen

Der zweite ausschlaggebende Faktor für die NO_x- Emissionen ist die Raumgeschwindigkeit, welche sich aus Katalysatorvolumen und Abgasvolumenstrom ergibt. Somit ist diese bei gegebenem Katalysatorvolumen in etwa proportional zur Leistung, vgl. Abbildung 3-62. Typischerweise werden im Nennleistungspunkt dabei Raumgeschwindigkeiten in der Größenordnung von 150.000 bis 200.000 h⁻¹ erreicht.

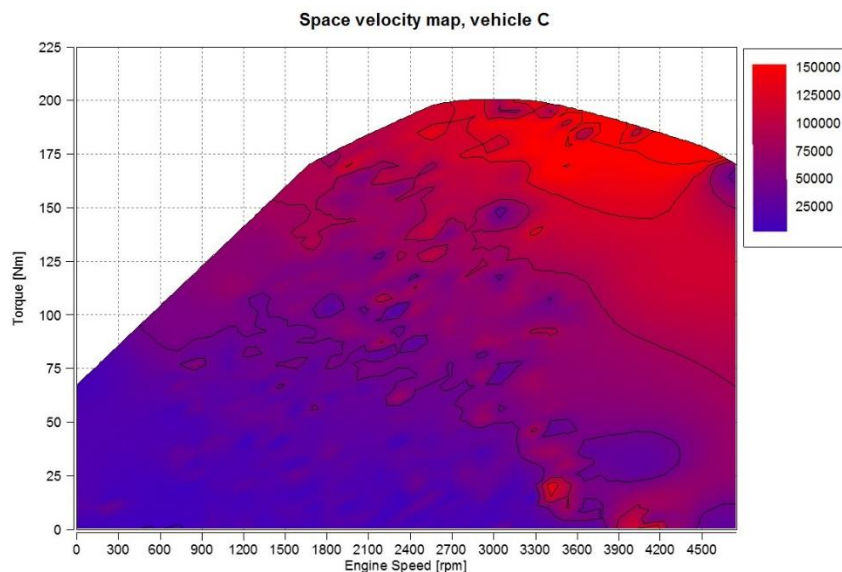
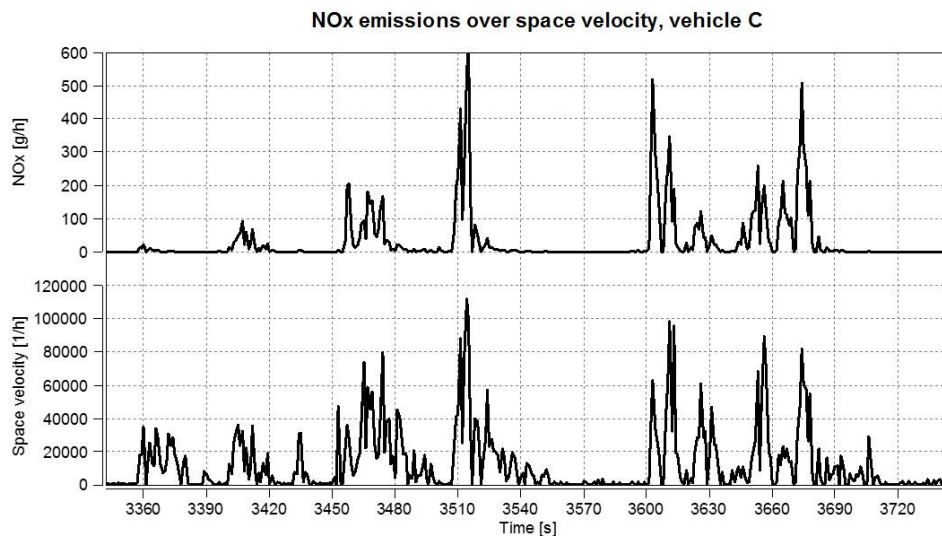
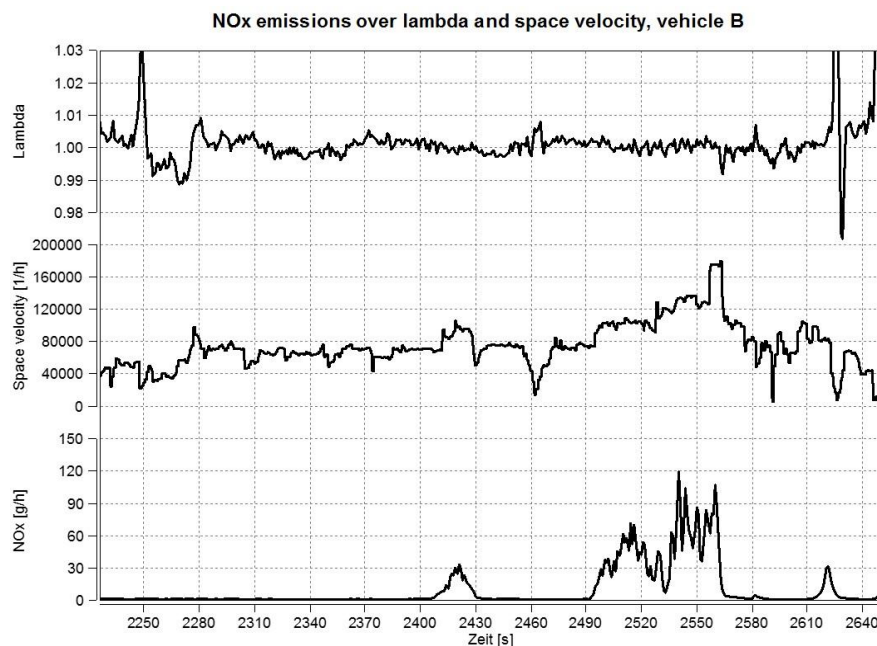


Abbildung 3-62: Raumgeschwindigkeit im Kennfeld

Abbildung 3-63 zeigt die Abhängigkeit der Emissionen von der Raumgeschwindigkeit bei hohen Leistungen sowie die Durchbrüche ab einem gewissen Wert, der in diesem Fall etwa 110000 h⁻¹ beträgt.

Abbildung 3-63: Zusammenhang Raumgeschwindigkeit- NO_x- Emissionen

Bleibt das Luftverhältnis in etwa konstant, ist die Raumgeschwindigkeit der ausschlaggebende Faktor für die NO_x- Emissionen (vgl. Abbildung 3-64). Diese brechen bei etwa 80.000 h⁻¹ durch und steigen sodann rapide an.

Abbildung 3-64: NO_x- Emissionen bei konstantem Lambda in Abhängigkeit von der Raumgeschwindigkeit

Der Zusammenhang von hohen Raumgeschwindigkeiten, magerem Motorbetrieb und NO_x- Emissionen ist in Abbildung 3-65 dargestellt. Treten beide Faktoren gleichzeitig auf, entstehen die größten Spitzen im NO_x- Verlauf.

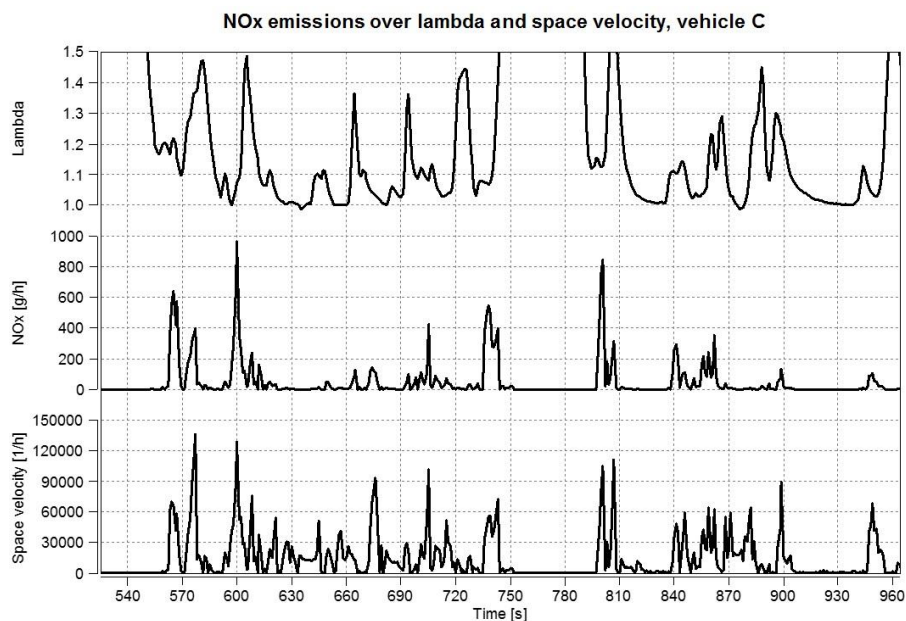


Abbildung 3-65: NO_x- Spitzen in Zusammenhang mit Raumgeschwindigkeit und Lambda

Der dritte Faktor, der ausschlaggebend für den Konvertierungsgrad des Katalysators ist, ist die Substrattemperatur (vgl. Abbildung 3-66). Der Verlauf der Trägertemperatur über dem Zyklus wird anhand von drei Messstellen im Substrat gemessen, ebenso die Gastemperatur. Der Unterschied zwischen Gas- und Katalysatortemperatur ist durch exotherme Reaktionen der HCs zu erklären, die das Substrat zusätzlich aufheizen. Kritisch für die Emissionen sind in diesem konkreten Fall nur die ersten etwa 80 Sekunden, im restlichen Zyklus fällt die Substrattemperatur dann nie unter 500 °C.

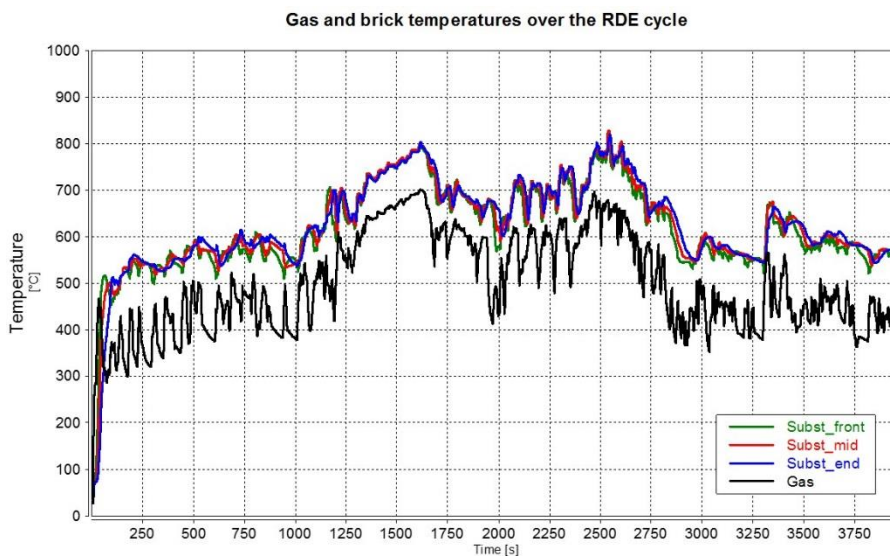


Abbildung 3-66: Vergleich von Gas- und Substrattemperatur an drei Messpunkten

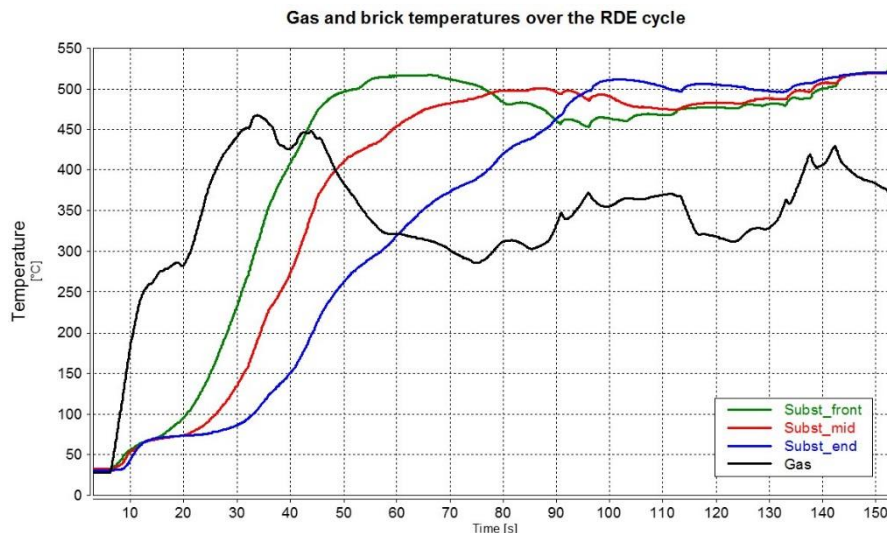


Abbildung 3-67: Aufheizverhalten des Substrats an drei unterschiedlichen Stellen

Wird Abbildung 3-56 betrachtet wird klar, dass der Kaltstart für die NO_x - Bilanz von untergeordneter Bedeutung ist, da vor allem die Spülvorgänge die Emissionen in die Höhe treiben. Von Belang ist die Betrachtung der Aufheizdauer jedoch vor allem für die HCs und in zweiter Linie fürs CO. Diese sind nicht Gegenstand vorliegender Arbeit, weshalb ihnen hier keine weitere Beachtung geschenkt werden soll.

3.3.3 Partikel

Was die Partikel angeht, so verhält es sich genau umgekehrt zu den NO_x - Emissionen. Hohe Emissionen treten vor allem in den fetten Betriebspunkten auf, welche bei hohen Leistungen zum Bauteilschutz verwirklicht werden. Leider liegen keine Messdaten von RDE- Zyklen mit Vierwegekatalysatoren, also beschichteten Partikelfiltern, vor, sodass ein Vergleich Drei-/Vierwegekatalysator nicht vorgenommen werden kann, um den Unterschied aufzuzeigen. Ist ein Fahrzeug mit Vierwegekatalysator ausgestattet, so reduzieren sich die Partikelemissionen um etwa zwei Drittel bei einer Partikelbeladung des Filters bis etwa 2.5 g, bei 5 g Beladung wird die emittierte Masse nochmals halbiert. Ein separater Partikelfilter, der dem Dreiwegekatalysator nachgeschaltet wird, halbiert die Partikelanzahl abermals.

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass bei Verwendung eines GPFs (gasoline particle filter) die Limitierung der Partikelanzahl keine Hürde mehr zum Bestehen des Tests sein wird, weshalb sich diese Technologie in Zukunft wohl als Standard etablieren wird.

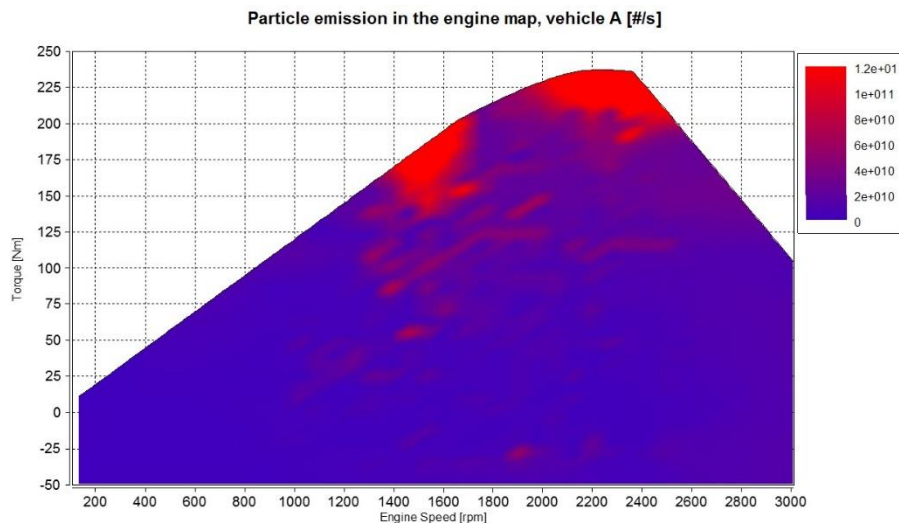


Abbildung 3-68: Partikelkennfeld des Fahrzeugs A

Exemplarisch kann an dieser Stelle der RDE- Bereich mit den höchsten Peaks in den Partikel-Emissionen des Fahrzeugs A herausgenommen werden. Die gefahrene Leistung ist die höchste im ganzen Zyklus, ganz klar erkennbar ist die starke Anfettung des Gemisches zum Bauteilschutz und infolge dessen ein Partikeldurchbruch.

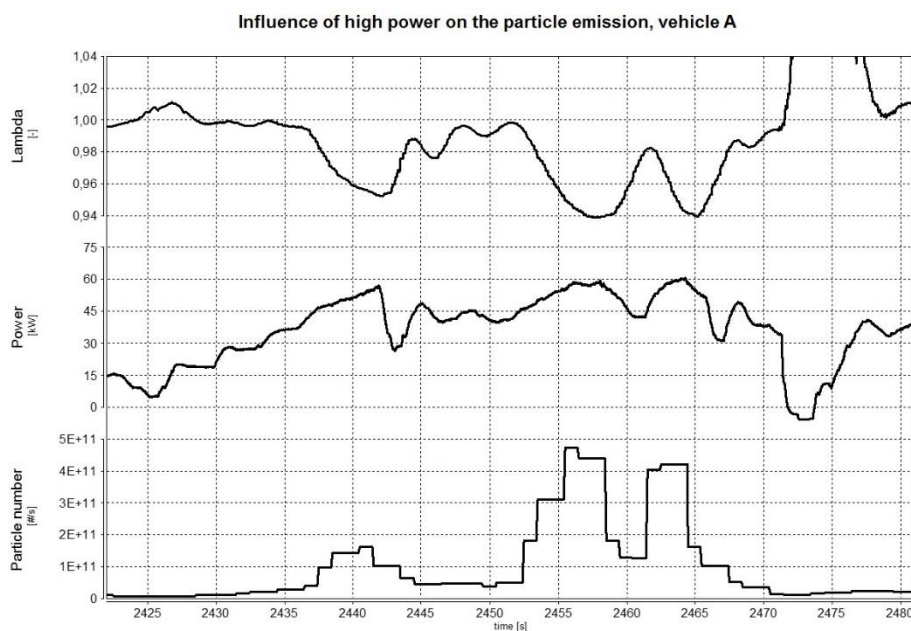


Abbildung 3-69: Partikel- Emissionen in Abhängigkeit von Lambda und Motorleistung

Zusammenfassend kann man sagen, dass kleine Schwankungen im Luftverhältnis, wie sie durch die Lambda- Regelung auftreten, emissionstechnisch nicht ins Gewicht fallen, da der Katalysator durch seine Fähigkeit, Sauerstoff einzuspeichern, diese gut ausgleichen kann. Wird nicht gespült, sind die NO_x - Limits leicht zu erreichen.

Ist das Fahrzeug schwer und zugleich schwach motorisiert, wie in diesem Kapitel Beispiel-Fahrzeug C, so muss durch die geforderte Fahrdynamik ständig gespült werden, um die gewünschte Fahrzeug- Beschleunigung zu erreichen. Dies wirkt sich extrem negativ auf die NO_x - Bilanz aus.

3.3.4 Deckelung der NO Spitzen

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, wie gravierend sich einzelne Spitzen auf die Gesamtbilanz auswirken. Die Spitzen markieren dabei kurzzeitige, sehr schlechte Konvertierungsraten, wie sie etwa beim Spülen auftreten. Da hier die Konvertierungsrate teilweise bis auf null sinkt und somit die Rohemissionen emittiert werden, soll eine Deckelung der Spitzen eine Reduktion der Rohemissionen, etwa durch innermotorische Maßnahmen, simulieren.

Zu diesem Zweck wird die maximale NO- Konzentration schrittweise limitiert und akkumuliert. Als Referenz dient hierzu Fahrzeug C, welches besonders schlecht im RDE-Test abgeschnitten hat (etwa 11fache Überschreitung des Limits).

Eine Deckelung der NO- Spitzen auf maximal 2000 ppm führt zu einer NO_x- Verminderung von 691 auf 597 mg/km. Eine weitere Deckelung auf 1000 ppm (0.1 % des gesamten Abgasvolumens) bringt 407 mg/km, was immer noch der fast siebenfachen erlaubten Menge entspricht. Eine Deckelung auf max. 100 ppm NO ergibt am Ende eine ungewichtete NO_x-Menge von 79 mg/km. Ungewichtet deshalb, weil gewisse Punkte des Zyklus, wenn dieser wie in 2.5.6 bereits beschrieben mit dem Verfahren des moving average window (MAW) evaluiert wird, nicht voll gewertet werden, falls sie außerhalb der Toleranzen liegen.

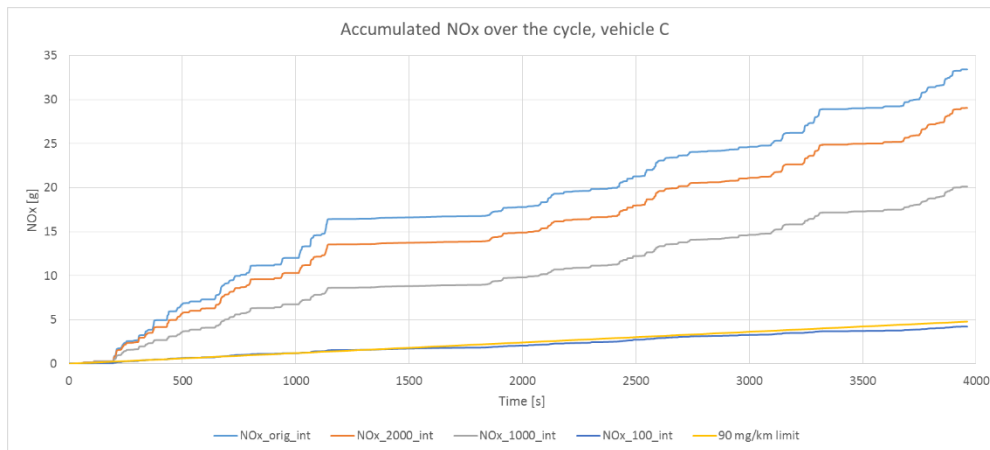


Abbildung 3-70: Deckelung der NO_x- Spitzen

Wie bereits Abbildung 3-61 zeigt, dauern die mageren Phasen einfach zu lange, sodass die Peaks über einen mehrsekündigen Zeitraum bestehen. Werden nur deren Spitzen beschnitten, wird nur ein kleiner Teil der NO_x erwischt.

3.4 Simulation

In diesem Teil der Arbeit soll geprüft werden, wie akkurat sich eine Abgasanlage mit einfachen Mitteln modellieren und die Emissionen über den Zyklus simulieren lassen. Zudem soll die Simulation klären, inwieweit die Auslegung des Katalysators dazu beitragen kann, trotz Spülen als Mittel gegen das „Turboloch“ niedrige Emissionen zu erreichen oder ob in Zukunft nur ein Vermeiden dieser Strategie zielführend ist.

3.4.1 Das FMU- Modell

Als Simulationsplattform für die Modellierung dient AVL CRUISE- M. In diesem wird über ein FMU- Interface (functional mock up) ein in Simulink geschriebenes Modell eingebettet. Dieses bildet die Basis der Simulation, beinhaltet sämtliche eindimensionalen Reaktions-, Strömungs- und Wärmeleichungen und ermöglicht eine individuelle Auslegung der Abgasanlage durch Zu- und Wegschalten verschiedener Komponenten. Die Auflösung erfolgt dabei zellenweise in axialer Richtung [1]. Als Eingangsgrößen dienen die am Rollenprüfstand gemessenen Rohemissionen, die Temperatur vor Katalysator und der Druck nach Katalysator (Umgebungsdruck).

Da vom serienmäßig verbauten Dreiwegekatalysator nur sehr wenige Spezifikationen bekannt sind, wird die Anpassung sämtlicher Parameter an einem Vierwegekatalysator- Modell vorgenommen. Dieser Vierwegekatalysator wurde nachträglich als close coupled nach dem Turbolader ins Fahrzeug eingebaut und ersetzt dort den Dreiwegekatalysator. Da der Katalysator von einem Zulieferer stammt, sind deutlich mehr Spezifikationen wie Abmaße und Beladung davon bekannt.

	Wert	Einheit
Material	Cordierit	-
Zelldichte	300	[cpsi]
Wandstärke	12	[mil]
Beladung Platin	0	[g]
Beladung Palladium	83	[g]
Beladung Rhodium	7	[g]
Maße	4.66·5	[in]

Tabelle 3-5: Spezifikationen des Vierwegekatalysators

Da mit dem Vierwegekatalysator allerdings nur ein WLTC am Prüfstand nachgefahren wurde, werden dessen Parameter mithilfe der WLTC- Messung angepasst und dann auf einen RDE- Zyklus (derselbe wie in 3.3.1) übertragen. Dies soll es ermöglichen, die Auswirkungen verschiedener Zelldichten, Volumina, Beladungen etc. auf die distanzbezogenen Emissionen zu untersuchen.

Da die genauen mathematischen Modelle des FMU der Geheimhaltung unterliegen, werden im Folgenden nur einige grundlegende Zusammenhänge, welche der FMU vereint, erörtert.

3.4.1.1 Wärmeübertragung

Die Wärmeübertragung Gas- Substrat basiert auf der konvektiven Wärmeübertragung, welche durch die Nusselt- Korrelation beschrieben wird.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_{WL}} \quad 3-16$$

Die Wärmeleitung im Substrat erfolgt nach

$$\dot{Q}_{WL} = \lambda_{WL} \cdot A \cdot \frac{T_2 - T_1}{D} \quad 3-17$$

Der Wärmeübergang Substrat- Umgebung wird durch Konvektion und Strahlung beschrieben. Die Wärmestrahlung kann durch das Stefan- Boltzmann- Gesetz beschrieben werden [1].

$$\dot{Q}_S = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad 3-18$$

3.4.1.2 Druckverlust

Der Druckverlust wird über die Bernoulli- Gleichung für reibungsfreie ideale Gase beschrieben [1].

$$\frac{p}{\rho} + g \cdot Z + 0.5 \cdot v^2 + c_v \cdot T = konst. \quad 3-19$$

3.4.1.3 Chemische Reaktionen

Die Berechnung der momentanen Gaszusammensetzung erfolgt zellenweise. Dabei werden sowohl Querempfindlichkeiten zwischen den einzelnen Gasbestandteilen, Inhibitionsterme, Absorption, Desorption und Speicherung berücksichtigt.

Die Reaktionen, welche im Katalysator stattfinden, wurden weiter oben bereits beschrieben (siehe 2.3.1.2). Über die Arrhenius- Gleichung wird die Reaktionskinetik eben dieser beschrieben [1].

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_A}{RT}} \quad 3-20$$

3.4.2 Aufbereitung der Eingangsgrößen des FMU

Die Aufbereitung der Eingangsgrößen beinhaltet vor allem die einheitliche Umrechnung der Volumenkonzentrationen aller Rohemissionsspuren auf feuchte Basis.

Prinzipiell wird bei der Messung versucht, ein Auskondensieren von Wasser im Abgasstrom zu vermeiden. Bei unverdünntem Abgas geschieht dies, indem sämtliche Leitungen beheizt werden. Der Taupunkt vom Wasserdampf, der in relativ großen Mengen (etwa 13 Massenprozent) im Abgas vorhanden ist, beträgt etwa 40 bis 55 °C (Druck max. 200 mbar). Die Temperatur sämtlicher Komponenten in der Abgasmessanlage muss über diesem Wert liegen [18].

Trotzdem reagieren gewisse Gasanalysatoren, im speziellen NDIR für CO und CO₂ sowie PMD für O₂ sensibel auf hohe Temperaturen bzw. weisen eine Querempfindlichkeit gegenüber Wasserdampf auf. Deshalb muss in diesen Fällen der Abgasmassenstrom auf etwa 4 °C gekühlt und das auskondensierte Wasser abgeführt werden. Die Messung erfolgt damit trocken, die Konzentrationen der gemessenen Stoffe sind höher, da die Gesamtabgasmenge um den Anteil des Wasserdampfes reduziert wurde. Folglich müssen die Werte der trockenen Messung auf feuchte Basis umgerechnet werden [2], [14] und [18].

$$k_f = \left(\frac{1}{1 + \alpha \cdot 0.005 \cdot (C_{CO} + C_{CO_2})} - k_{f2} \right) \cdot 1.008 \quad 3-21$$

$$k_{f2} = \frac{1.608 \cdot H_a}{1000 + (1.608 \cdot H_a)} \quad 3-22$$

$$C_f = k_f \cdot C_{tr} \quad 3-23$$

Der Plausibilitätscheck der Eingangsgrößen erfolgt über einen Abgleich von Lambda. Die Berechnung erfolgt über die Brettschneider- Formel.

$$\lambda = \frac{C_{CO_2} + \frac{C_{CO}}{2} + C_{O_2} + \frac{C_{NO}}{2} + \left(\left(\frac{H_{CV} \cdot 3.5}{4 \cdot 3.5 + C_{CO_2}} \right) - \frac{O_{CV}}{2} \right) \cdot (C_{CO} + C_{CO_2})}{\left(1 + \frac{H_{CV}}{4} - \frac{O_{CV}}{2} \right) \cdot (C_{CO} + C_{CO_2} + n_C \cdot C_{HC})} \quad 3-24$$

Die Partikelfiltration kann nicht berücksichtigt werden, da eine Messung vor Katalysator/ ohne Katalysator nicht durchgeführt wurde. Zusätzlich zur Umrechnung trocken- feucht müssen die Emissionsspuren zeitlich zueinander angepasst werden, da die einzelnen Messgeräte unterschiedliche Laufzeiten besitzen. Sämtliche Spuren werden auf den Abgasmassenstrom als Referenz bezogen.

Um die Verläufe der akkumulierten Emissionen der Simulation an jene der Messung anzugleichen, müssen die vom FMU berechneten Emissionskonzentrationen nach dem Katalysator in [ppm] akkumuliert werden. Dies erfolgt in zwei Schritten: Zuerst wird der Massenstrom in [g/s] berechnet, anschließend wird dieser über die Zyklusdauer integriert, um die Massen zu erhalten.

$$\dot{m}_{\text{emission}} = C_{\text{emission}} \cdot \frac{M_{\text{emission}}}{M_{\text{exh gas}}} \cdot \dot{m}_{\text{exh gas}} \quad 3-25$$

Für die molaren Massen ergibt sich Folgendes:

- M_{NO_x} : repräsentativ für alle NO_x wird mit der molaren Masse von NO_2 gerechnet, auch wenn die Emission von NO jene von NO_2 bei weitem übersteigt. Dies kommt daher, dass NO immer in NO_2 umgewandelt wird. Die molare Masse beträgt damit 46.005 g/mol
- M_{CO} : Die molare Masse beträgt 28.01 g/mol
- M_{THC} : Hier muss darauf geachtet werden, wie die HCs gemessen werden. Ist die Messung C_1 - basiert, so wird repräsentativ das fiktive Molekül CH_2 als Referenz verwendet. Ist die Messung C_3 - basiert (C_3H_6), so ist die molare Masse 42.081 g/mol
- M_{Abgas} : Die durchschnittliche molare Masse des Abgases beträgt repräsentativ 28.9 g/mol

$$m_{\text{emission}} = \int_{t_0}^{t_{\text{end}}} MF_{\text{emission}} \cdot dt \quad 3-26$$

3.4.3 Anpassen sämtlicher Parameter des Vierwegkatalysators

Um dem realen Verhalten des Katalysators möglichst nahe zu kommen, müssen zuerst sämtliche Parameter wie Wärmekapazität, Wärmeübergangskoeffizienten, Alterung, Porosität, Beladung etc. so angepasst werden, damit die simulierten auspuffseitigen Emissionen sowie die Temperaturen jene am Prüfstand gemessenen so gut als möglich nachbilden.

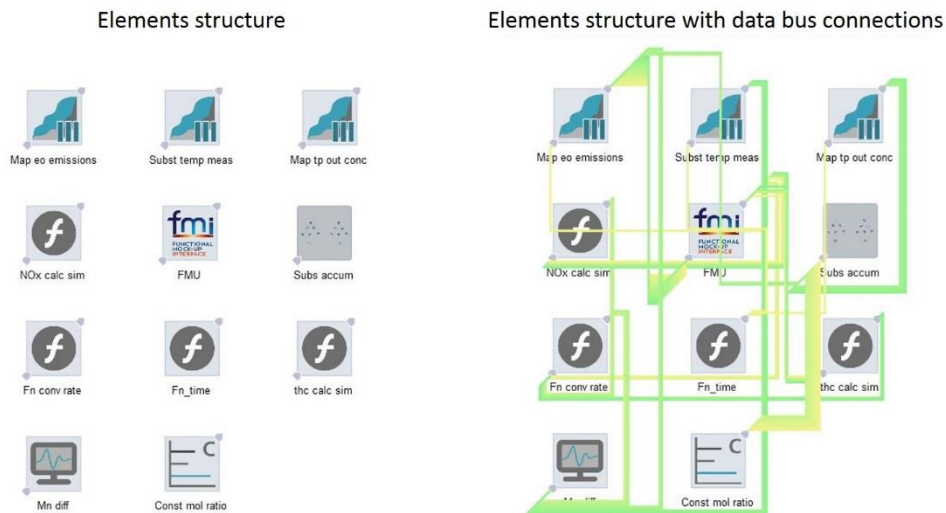


Abbildung 3-71: Struktur des Modells

Die Vorgehensweise, um schnellstmöglich brauchbare Ergebnisse zu erhalten, beinhaltet folgende Punkte:

- Versuchsplanung
- Datengenerierung
- Modellbildung
- Optimierung

Der erste Schritt ist die Anpassung des Temperaturverlaufs. Die Simulation bestätigt die anfänglich erfahrungsbasierten Annahmen für Werte von Wärmeübertragungskoeffizienten (ca. 5-15 W/m²K) und spezifische Wärmekapazität c_p (ca. 0.7-1.5 J/kgK). Nun können Wärmeübergang Gas- Substrat und Substrat- Umgebung (heat transfer radiation, heat transfer internal, heat transfer convection) angepasst werden.

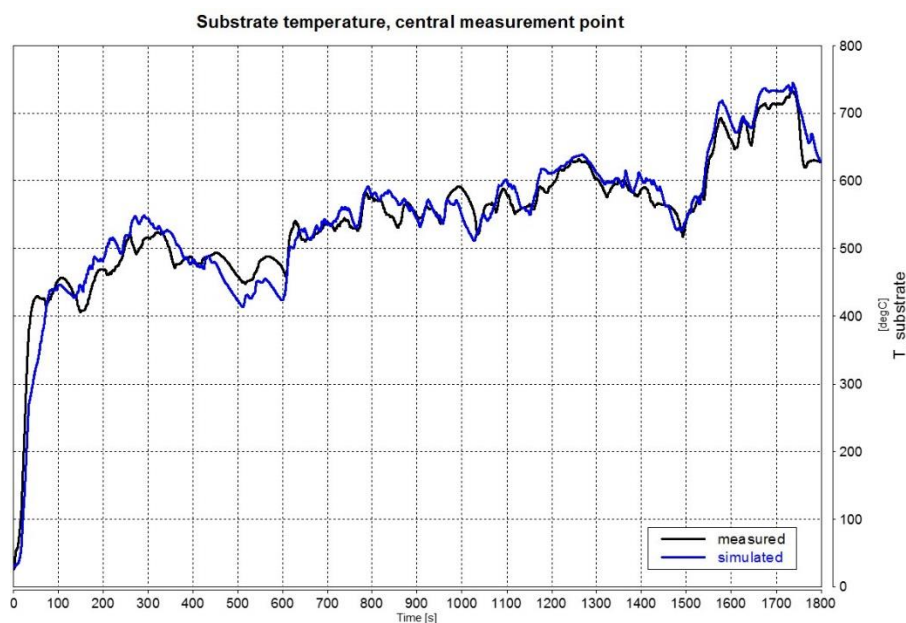


Abbildung 3-72: Mittlere Substrattemperatur, Simulation und Messung

Als nächstes erfolgt die Anpassung sämtlicher Parameter. Einige davon sind bekannt, siehe Tabelle 3-5. Andere dagegen, vor allem dimensionslose Kennzahlen, welche die

Sauerstoffspeicherung und die Konvertierungsdynamik beeinflussen, müssen mithilfe von DoE angepasst werden, bis die Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen von HC, NO_x und CO so gut wie möglich übereinstimmen. Diese Parameter sind z.B. CO- Lightoff, HC- Lightoff, HC- Spaltung, Performance- Kriterien, Sauerstoffspeicherkapazität, NO_x- Konvertierung, CH₄- Konvertierung, HC- und CO- Oxidation, Katalysator- Räumen, Alterung, Aschebelastung und viele mehr.

Die Akkuranz der Anpassung der Verläufe der akkumulierten Emissionsmassen über den WLTP zeigt Abbildung 3-73.

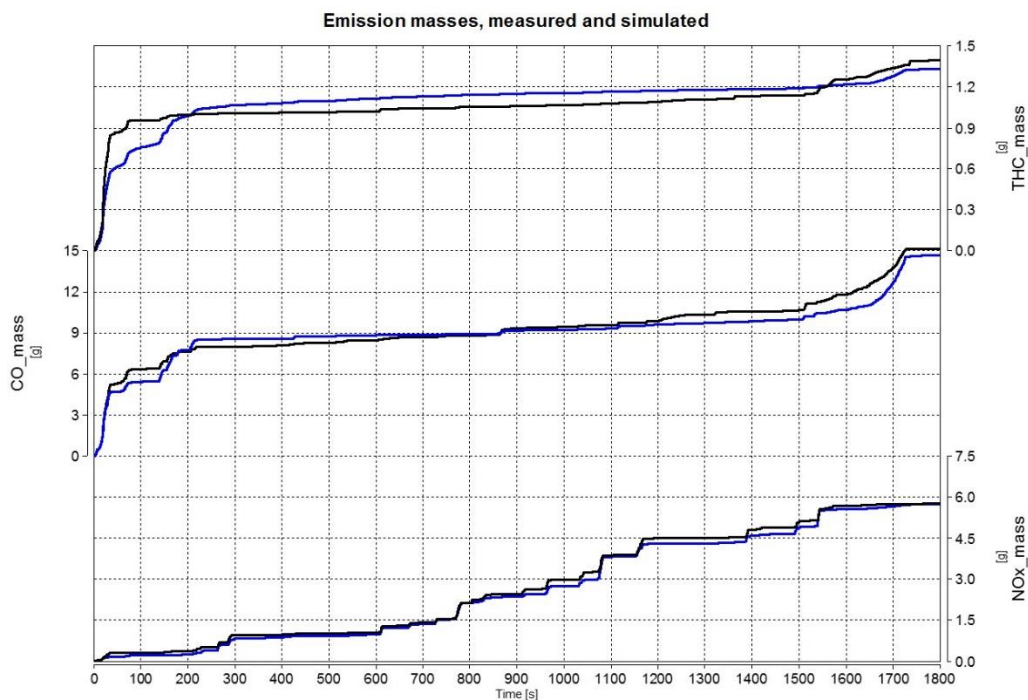


Abbildung 3-73: Vergleich der gemessenen mit den simulierten Emissionen über dem WLTC

Die Verläufe von NO_x und CO stimmen mit den Messungen gut überein, lediglich bei den HCs treten Divergenzen auf. Die Ursache der Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Emissionen sind zum einen auf Messungenauigkeiten, zum anderen auf Ungenauigkeiten in der zeitlichen Anpassung der einzelnen Emissionsspuren zueinander zurückzuführen. Des Weiteren handelt es sich beim Modell immer nur um eine Abbildung der Realität, weshalb dessen Genauigkeit begrenzt ist.

Nun kann dazu übergegangen werden, den Vierwegekatalysator auf einen RDE- Zyklus zu übertragen. Hierzu werden wieder sämtliche Rohemissionsspuren wie in 3.4.2 bereits erläutert umgerechnet und zueinander angepasst. Die Parameter werden aus 3.4.3 übernommen. Die akkumulierten Emissionen ergeben folgende Verläufe:

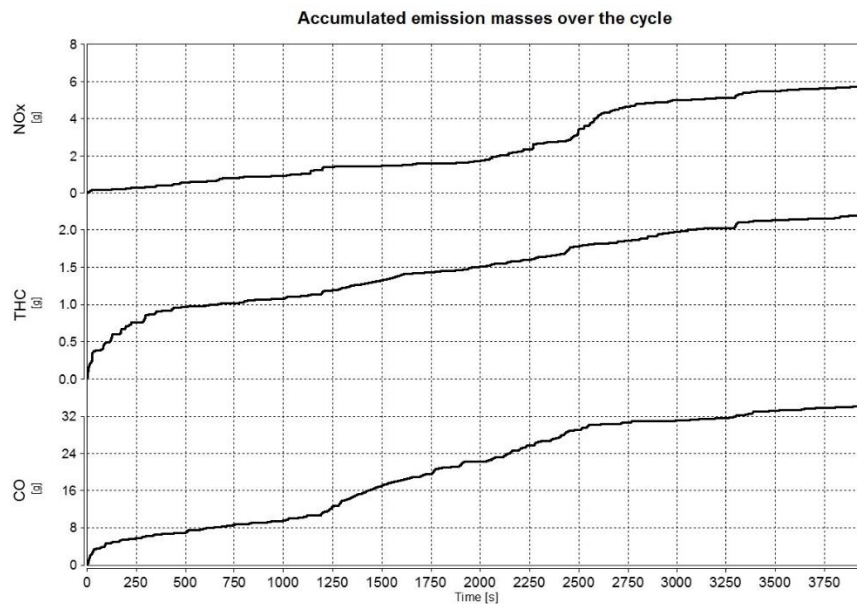


Abbildung 3-74: Verlauf der akkumulierten Emissionen über dem RDE- Zyklus

3.4.4 Variantenstudie der Simulation

Variiert werden sollten vor allem Größe des Katalysators, dessen Beladung mit Edelmetallen, Zelldichte, Sauerstoffspeicherkapazität und die Aufteilung auf zwei Bricks.

3.4.4.1 Variation des Katalysatorvolumens

Das Katalysatorvolumen des Vierwegekatalysators beträgt in etwa 1.4 l. Die Auswirkung eines größeren Katalysators mit ansonsten gleichen Spezifikationen soll in diesem ersten Abschnitt untersucht werden.

Wird nun das Volumen des Katalysators von 1.4 l auf 1.8 l angehoben, wobei der Durchmesser gleich bleibt, reduziert sich die Masse an CO und HCs über den Zyklus drastisch, wie Abbildung 3-75 beweist.

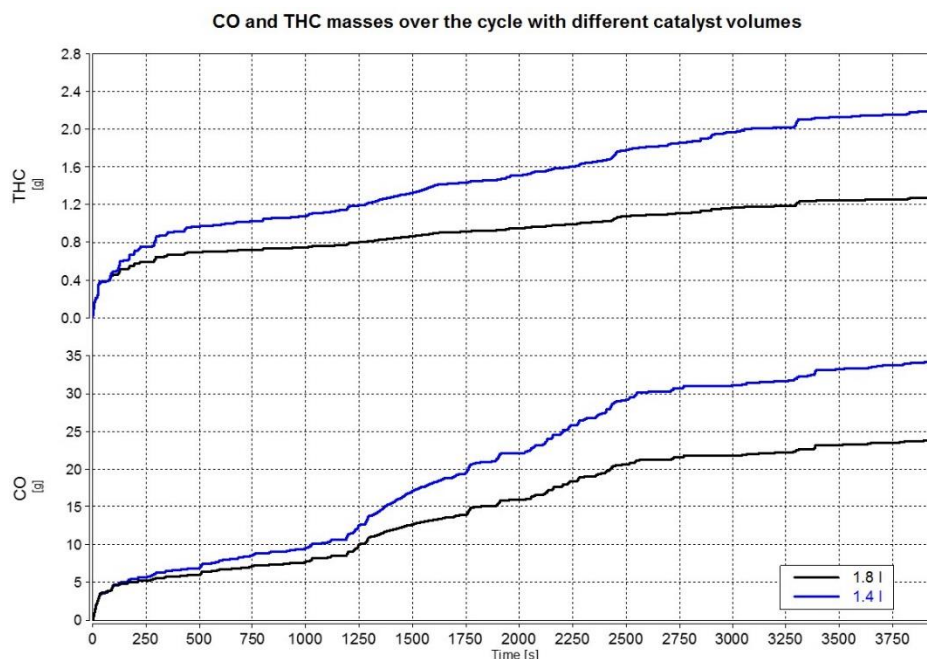


Abbildung 3-75: Einfluss des Katalysatorvolumens auf die CO und HC Masse

Dies war zu erwarten. Ein Blick auf das Reduktionspotential der NO_x zeigt allerdings ein

anderes Bild, siehe Abbildung 3-76. Die Senkung über dem Zyklus beträgt mit etwa 0.05g praktisch null.

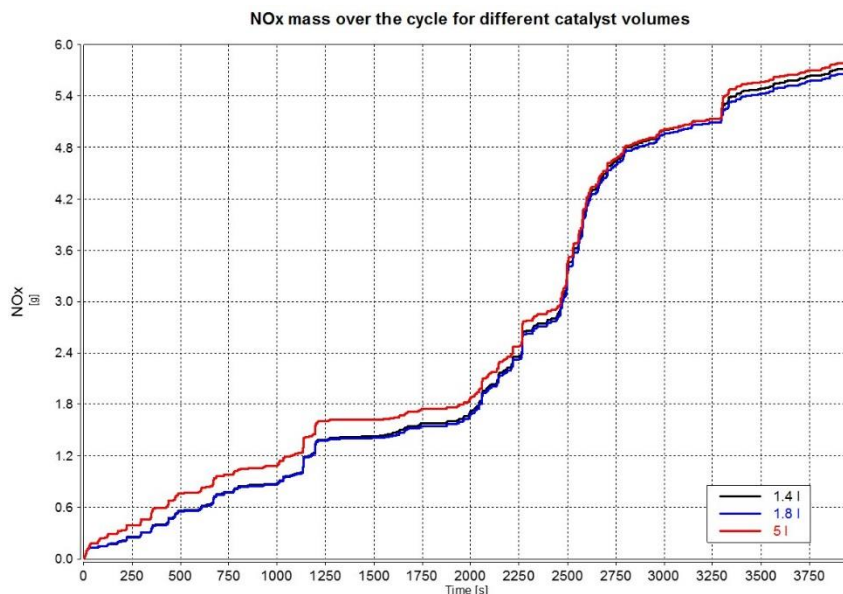


Abbildung 3-76: Einfluss des Katalysatorvolumens auf die NO_x Masse

Der Vollständigkeit halber wurde das Volumen zusätzlich auf einen sehr hohen Wert von 5 l angehoben. Dabei zeigt sich vor allem das schlechte Aufheizverhalten, welches sich in niedrigen Konvertierungsraten nach dem Kaltstart manifestiert. Erst wenn der Katalysator auf Betriebstemperatur ist und Lambda um 1 beträgt, spielt der größere Katalysator seine Stärke der verminderten Raumgeschwindigkeit aus. Das Aufheizverhalten zeigen Abbildung 3-77 und Abbildung 3-78. Wie zu erwarten wird die Temperaturdifferenz der unterschiedlichen Volumina größer, je weiter man sich Richtung hinterem Ende bewegt.

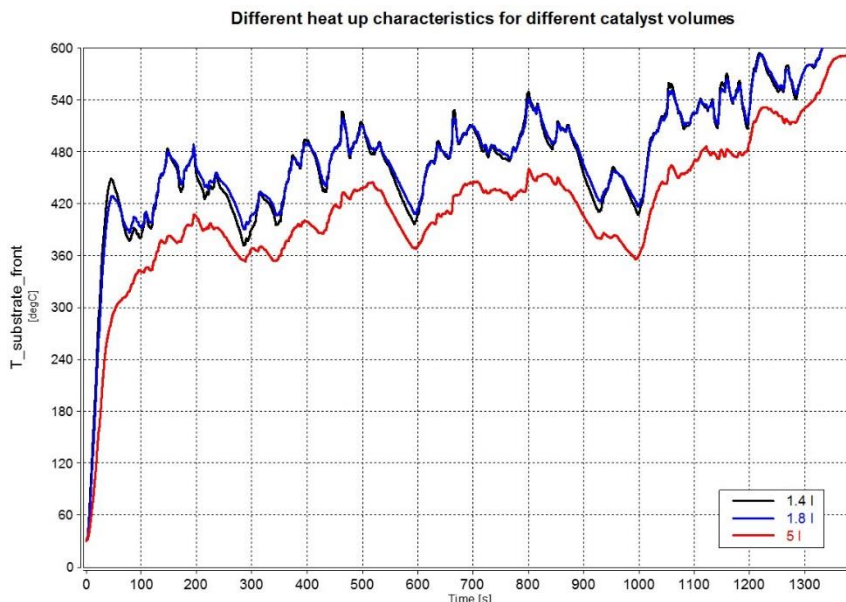


Abbildung 3-77: Aufheizverhalten verschiedener Katalysator- Volumina, gemessen am vorderen Ende des Katalysators

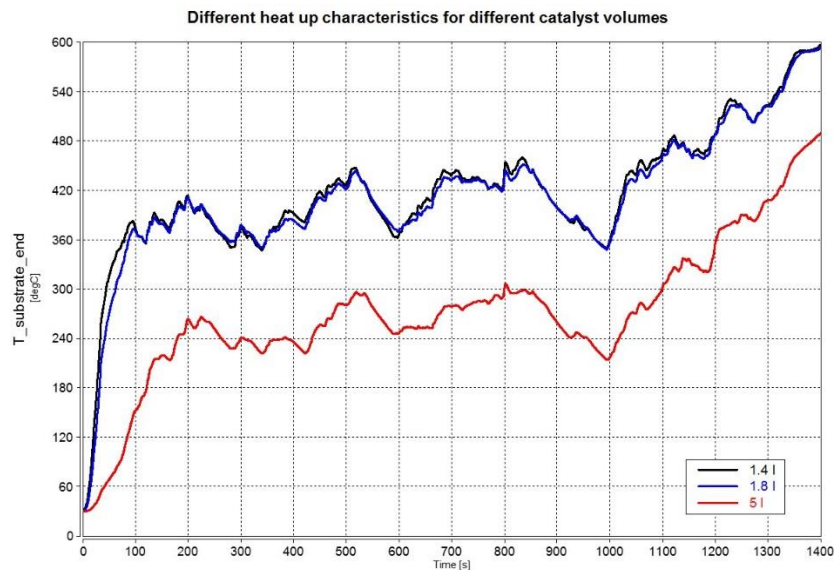


Abbildung 3-78: Aufheizverhalten verschiedener Katalysator- Volumina, gemessen am hinteren Ende des Katalysators

Damit ist klar, dass es ein ideales Katalysatorvolumen für diesen speziellen Fall geben muss. Abbildung 3-79 zeigt den Vergleich verschiedener Volumina und deren Einfluss auf die NO_x -Bilanz. Hier zeigt sich ein Ideal bei einem Volumen von etwa 2 l.

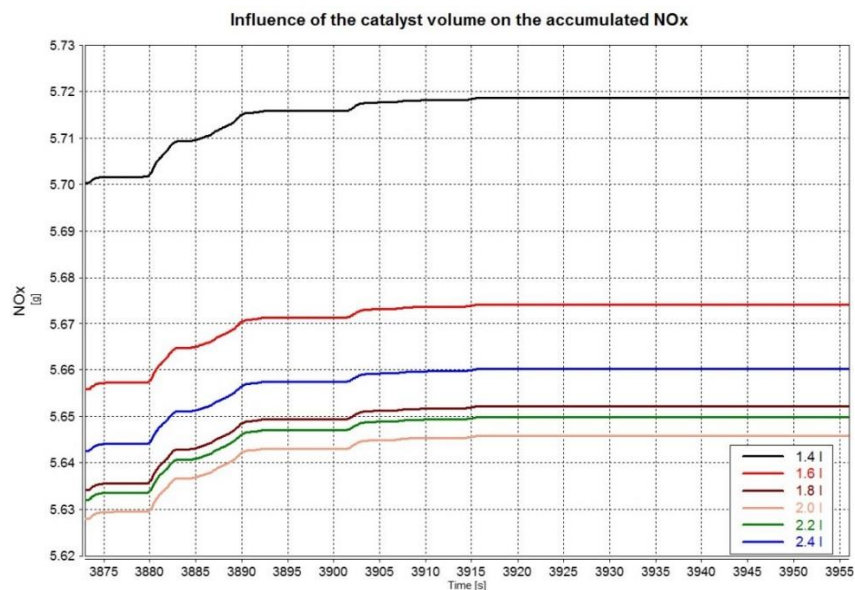


Abbildung 3-79: Vergleich der NO_x - Bilanzen verschiedener Katalysatorvolumina

An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass sich die Light- Off- Verhalten der einzelnen Komponenten des Abgases stark voneinander unterscheiden. Ein Experiment mit dem Vierwegekatalysator- Modell soll dies verdeutlichen. Dabei wird eine typische Abgaszusammensetzung, die sich bei stöchiometrischer Verbrennung in bestimmten Teilen des Kennfelds einstellt, exemplarisch über einen Zeitraum von 2000 Sekunden bei konstant steigender Gastemperatur (bis 800 K) eingespeist. Auch Druck und Abgasmassenstrom ändern sich, wie die Abgaszusammensetzung, nicht. Die Konvertierungsraten über der Zeit sind in Abbildung 3-80 dargestellt.

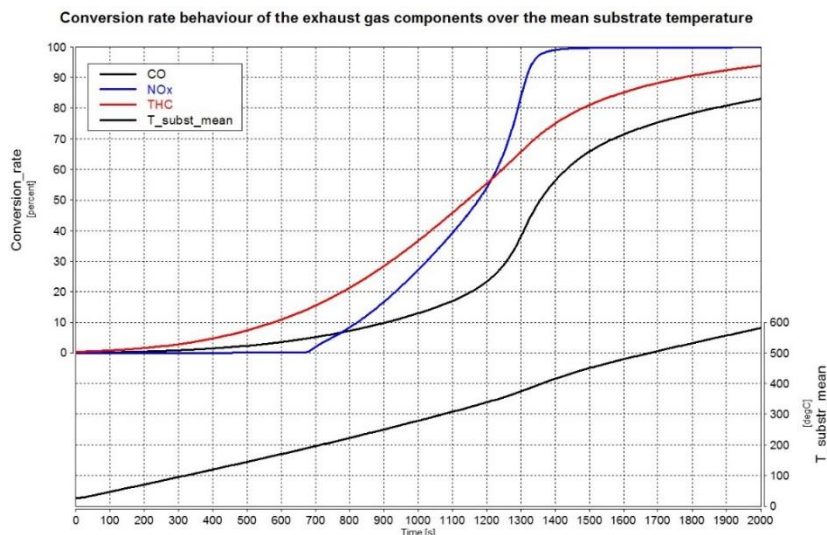


Abbildung 3-80: Light- Off Verhalten der einzelnen Komponenten

Deutlich erkennbar ist die im Gegensatz zu den HCs und CO erst sehr viel später, bei höherer Substrattemperatur, einsetzende Konvertierung von NO_x . Allerdings wird die volle Konvertierungsrate von 100% deutlich schneller erreicht. Bezogen auf die Variation des Katalysatorvolumens bedeutet dies, dass bei sehr großem Katalysatorvolumen und dadurch langsamer Erwärmung des Substrats die Konvertierung der NO_x erst sehr spät beginnt. Ist eine Temperatur des Substrats von ca. 400 °C erst erreicht, werden die NO_x im Gegensatz zu CO und HCs zu nahezu 100% umgewandelt.

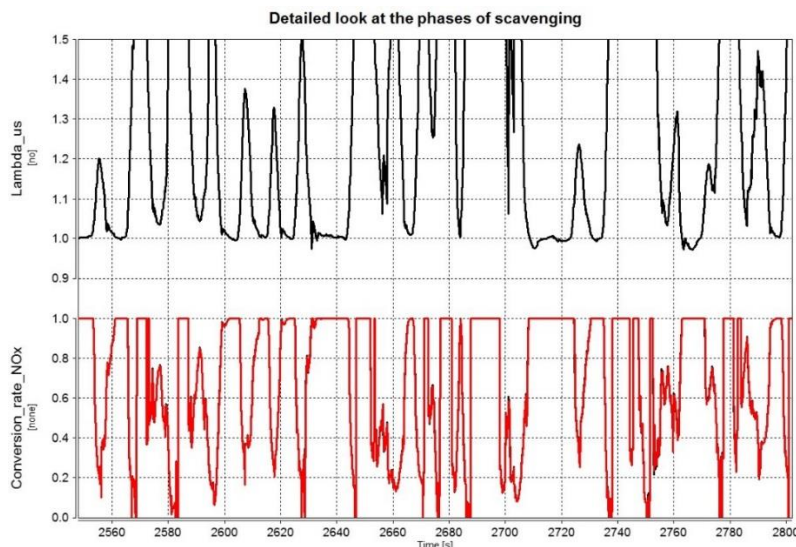


Abbildung 3-81: Vergleich der NO_x vor und nach Katalysator über Lambda

Der Grund, warum ein größeres Katalysatorvolumen kaum Verbesserung der NO_x - Bilanz bringt sind Spitzen im Luftverhältnis. Wie bereits festgestellt, werden durch das Spülen Lambda Werte von weit über 1.2 erreicht. Betrachtet man Abbildung 2-8, so wird klar, dass in diesen Bereichen die Konvertierungsrate stark sinkt, egal wie groß der Katalysator ist. Viel mehr liegt es an der Kalibrierung des Motors, derart hohe Luftverhältnisse zu vermeiden.

Eine Variation des Durchmesser- zu- Länge Verhältnisses bei gleich bleibendem Volumen kann in Cruise M nicht simuliert werden. Diesbezüglich anzumerken ist aber, dass die Temperatur- und Abgasstromverteilung inhomogener wird, je größer der Durchmesser des Katalysators wird.

3.4.4.2 Variation der Zelldichte

Die ursprüngliche Zelldichte von 300 cpsi soll nun auf höhere Werte, konkret auf 600 cpsi angehoben werden. Wie zu erwarten, sinken auch durch diese Maßnahme sowohl HCs als auch CO.

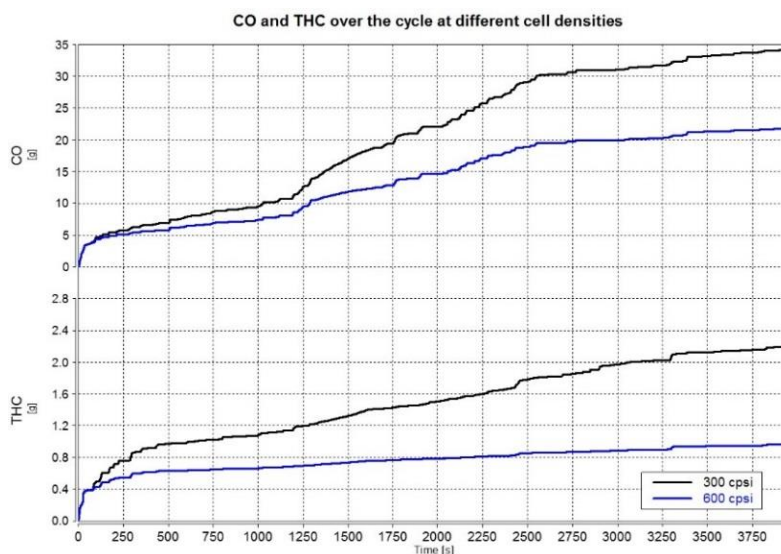


Abbildung 3-82: Einfluss der Zelldichte des Katalysators auf die CO und HC Masse

Die Bilanz für NO_x sieht wiederum ermutigend aus. Die Verdopplung der Zelldichte bringt ein Reduktionspotential von lediglich 0.3g. Die Größenordnung der Verbesserung ist somit bescheiden.

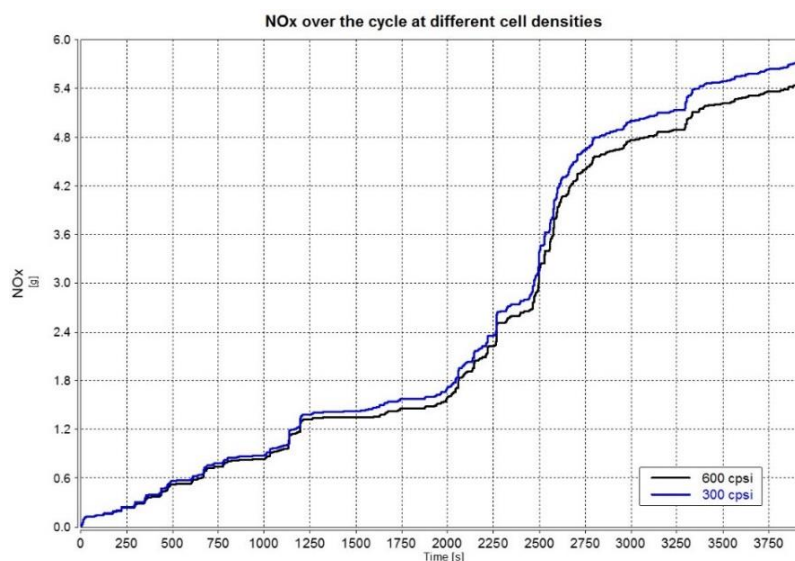


Abbildung 3-83: Einfluss der Zelldichte des Katalysators auf die NO_x Masse

3.4.4.3 Variation der Beladung

Auch die Beladung an Edelmetallen soll angehoben werden. Da für die Konvertierung von NO_x vor allem Rhodium verantwortlich ist, soll dessen Menge von ursprünglich $7\text{g}/\text{ft}^3$ auf $14\text{g}/\text{ft}^3$ verdoppelt werden.

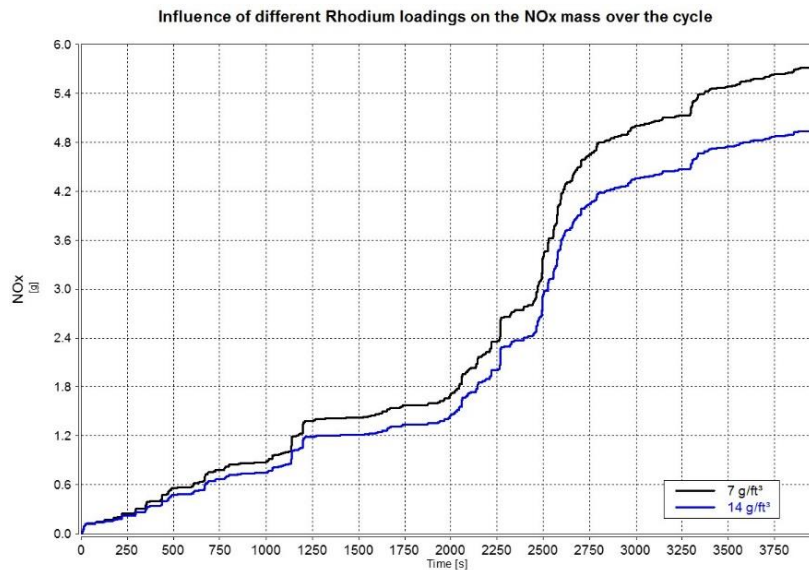


Abbildung 3-84: Einfluss der Rhodium- Beladung auf die NO_x Masse

Die Verringerung der NO_x- Emissionen ist deutlich erkennbar. Dabei wird unabhängig vom Sauerstoff- Level im Katalysator die Konvertierungsrate erhöht, vor allem im Bereich hoher Sauerstoffsättigung beim Spülen bringt die erhöhte Beladung noch ein paar mehr Prozent in der Konvertierung. Ist die Sättigung allerdings erreicht, so unterscheiden sich die Konvertierungsraten nicht mehr voneinander, da beide zu null werden.

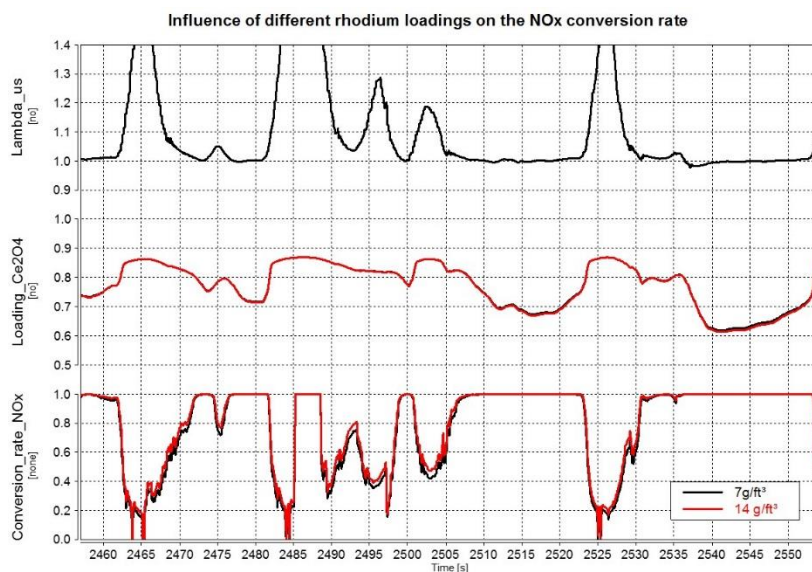


Abbildung 3-85: Einfluss der Rhodium- Beladung auf die Konvertierungsrate von NO_x

Eine Erhöhung der Beladung stellt freilich einen erhöhten Kostenfaktor dar. Somit wäre diese Möglichkeit wohl eher für teurere Fahrzeuge relevant, nicht jedoch für Kleinwagen.

3.4.4.4 Variation der Sauerstoffspeicherkapazität

Eine Möglichkeit, langzeitige magere Phasen zu überbrücken, wäre eine Steigerung der Sauerstoffspeicherkapazität. So wird die Sättigung während den Phasen des Spülers womöglich erst gar nicht erreicht.

Ein Experiment soll zeigen, wie sich eine Änderung der maximalen Sauerstoffspeicherkapazität auf die Ce₂O₄- Beladung auswirkt. Dabei wird zuerst ein fettes Gemisch eingestellt, um das bestehende Ce₂O₄ aufzubauchen (vgl. 2-17). Ab Sekunde 50 wird dann nur noch Sauerstoff (0.03 %) und Stickstoff (99.87 %) ins Katalysatormodell

gespeist. Abbildung 3-86 zeigt die Auswirkung der maximalen Speicherkapazität auf die Beladungskinetik des Katalysators. Der Faktor „Storage capacity“ fließt dabei linear ins Modell ein, sprich eine Verdopplung des Parameters bedeutet eine Verdopplung der Speicherkapazität.

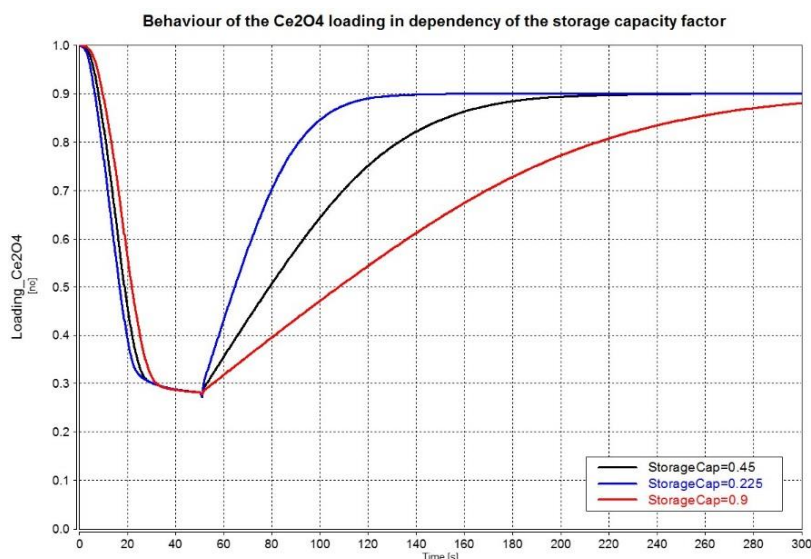


Abbildung 3-86: Variation der maximalen Sauerstoffspeicherkapazität

Dieses Wissen kann nun für die RDE- Simulation verwendet werden. Dabei wird, wie bereits durchgeführt, die Sauerstoffspeicherkapazität verdoppelt.

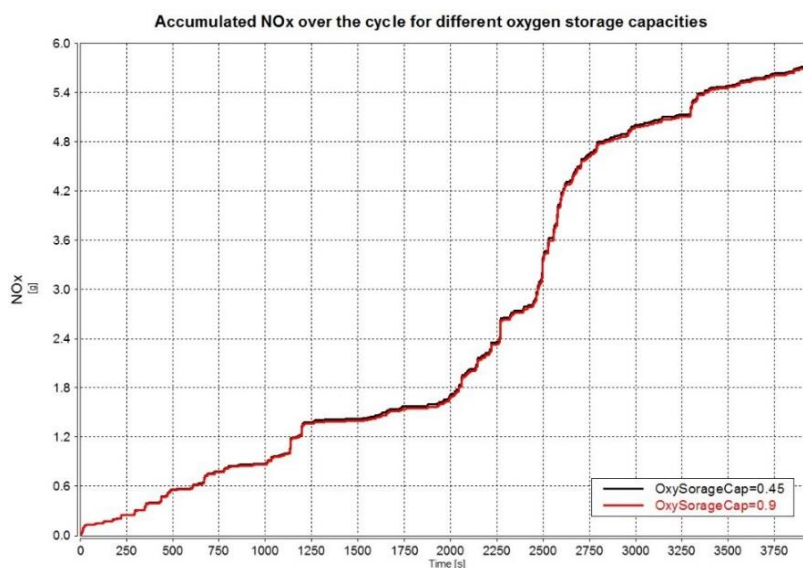


Abbildung 3-87: Auswirkung der Sauerstoffspeicherkapazität auf die NO_x- Bilanz

Die emittierte Schadstoffmenge ist relativ unverändert. Ein detaillierter Blick in die Ce₂O₄-Beladung über einigen Spülvorgängen, in den der Sauerstoffspeicher gefüllt wird, soll Aufklärung schaffen.

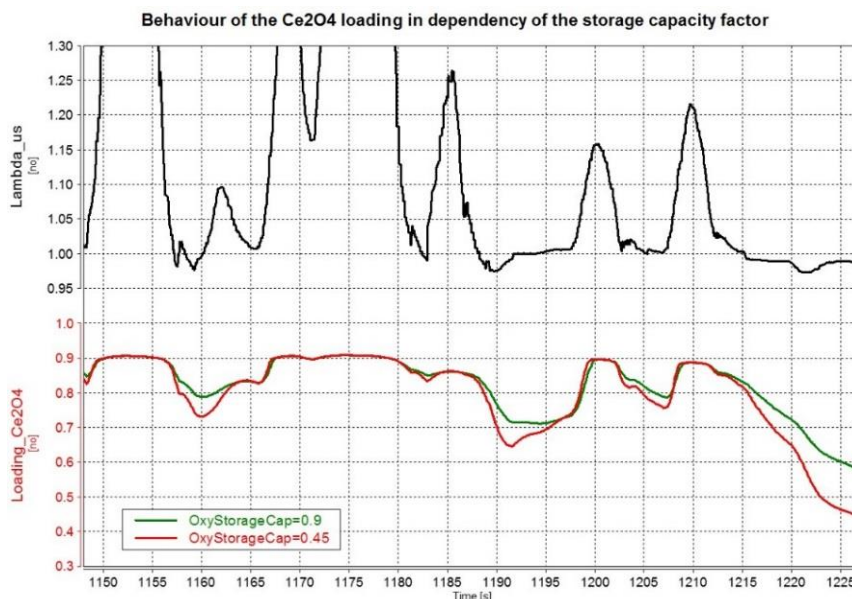


Abbildung 3-88: Ce_2O_4 -Beladung über Lambda

Sofort fällt auf, dass die Phasen der Sättigung für beide Speicherkapazitäten gleich lange dauern. Ist der Katalysator nicht gesättigt, ist die Ce_2O_4 -Beladung nicht von Belang, da stets NO_x konvertiert werden.

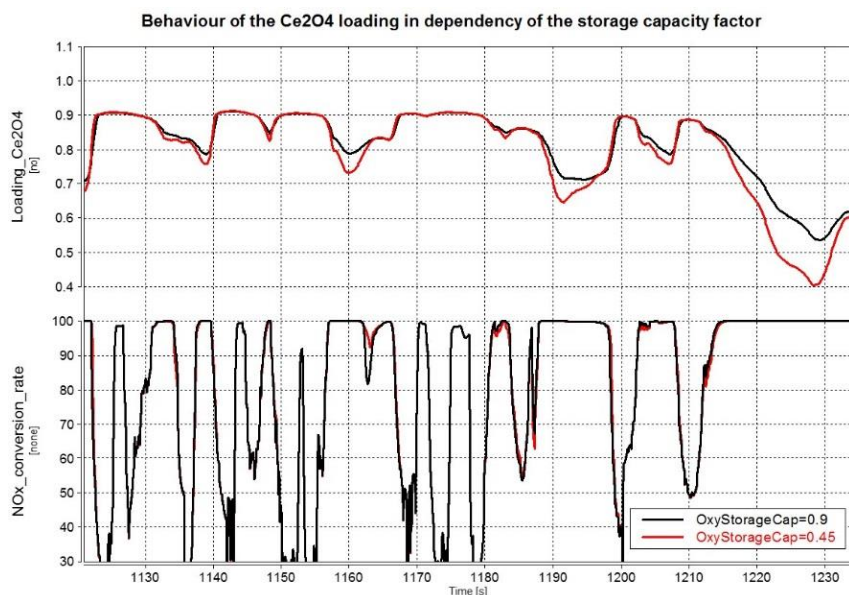


Abbildung 3-89: Konvertierungsrate über Ce_2O_4 -Beladung

De facto sind die Konvertierungsraten nahezu ident.

3.4.4.5 Verringerung der spezifischen Wärmekapazität

In dieser vorletzten Variantenstudie soll untersucht werden, wie sich eine beschleunigte Aufwärmung des Katalysators auf die Emissionsbilanzen auswirken. Zu diesem Zweck wird die spezifische Wärmekapazität von $0,6 \text{ J/K}$ auf $0,4 \text{ J/K}$ gesenkt, um so ein schnelleres Aufheizen zu ermöglichen.

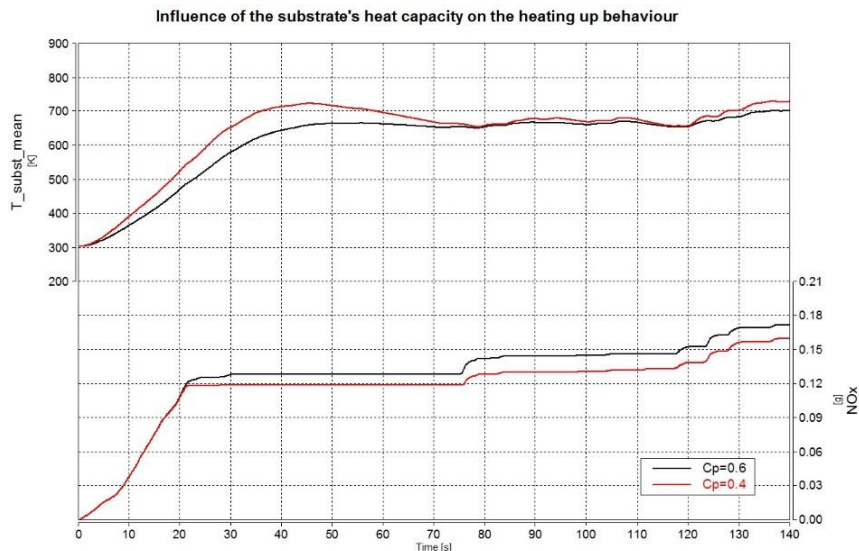


Abbildung 3-90: Einfluss der Wärmekapazität des Substrates auf das Kaltstartverhalten

Da die Kaltstartemissionen insgesamt aber kaum ins Gewicht fallen, ändert auch das schnellere Erreichen der Light- Off- Temperatur, welche für NO_x etwa $340\text{ }^\circ\text{C}$ beträgt (vgl. Abbildung 3-80), nur sehr wenig an den Gesamtemissionen. Diese betragen über den Zyklus für NO_x etwa 5.7 g (vgl. Abbildung 3-87), die Einsparung durch das beschleunigte Aufheizverhalten beträgt etwa 0.02 g . Die Light- Off- Temperatur wird dabei etwa 7.5 s früher erreicht.

3.4.4.6 Variation der Volumenaufteilung

Abschließend soll die Auswirkung der Aufteilung des Katalysatorvolumens auf mehrere Bricks aufgezeigt werden. Dabei soll sowohl lediglich eine Aufteilung desselben Volumens auf zwei Bricks, als auch die Erhöhung des Gesamtvolumens durchgerechnet werden. Die Spezifikationen der beiden Katalysatoren sind dabei ident. Auch die Durchmesser werden nicht verändert, lediglich die Länge der Bricks ändert sich mit variieren der Volumina.

Variante	Brick 1		Brick 2		Gesamtvolumen	
	[#]	[l]	[% of tot.]	[l]		[% of tot.]
Standard		1.4	100	0	0	1.4
I		0.7	50	0.7	50	1.4
II		0.47	33	0.93	67	1.4
III		1.05	50	1.05	50	2.1
IV		1.4	50	1.4	50	2.8
V		0.47	25	1.4	75	1.87

Tabelle 3-6: Übersicht über die verschiedenen Volumenaufteilungen

Die Auswirkungen auf die akkumulierten NO_x - Emissionen über den RDE- Zyklus zeigt Abbildung 3-91. Die Aufteilung des Volumens auf zwei Katalysatoren soll ein schnelles Aufheizen des vorderen garantieren, wobei der zweite Katalysator bei hohen

Abgasmassenströmen für hohe Konvertierungsraten sorgen soll, da die Raumgeschwindigkeit reduziert wird.

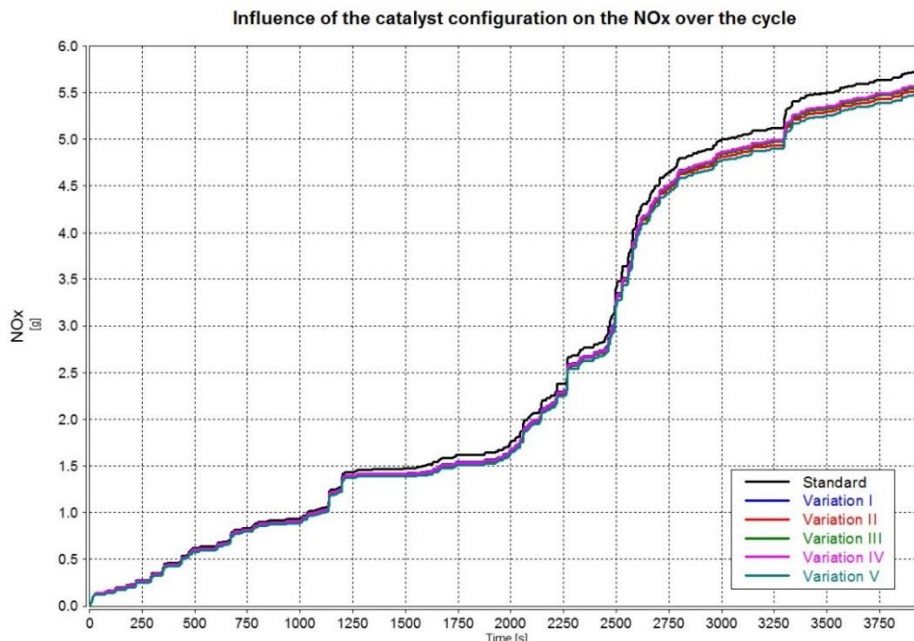


Abbildung 3-91: Auswirkungen auf die NO_x verschiedener Katalysator- Anordnungen

Zwar ist eine Verbesserung der Bilanz verglichen zum Standard- Katalysator für alle Varianten erkennbar, allerdings liefert nur eine detaillierte Betrachtung Informationen über die Unterschiede, siehe Abbildung 3-92. Das beste Ergebnis zeigt dabei Variante V mit kleinem motornahen Brick und großem Zweit- Brick.

Der Vergleich der Varianten I, III und IV ist insofern interessant, da Variante 3 die geringsten NO_x- Emissionen aufweist, obwohl bei 50/50- Volumenaufteilung aller drei Varianten die beiden anderen größere bzw. kleinere Volumina besitzen. Dies bedeutet, dass ein ideales Katalysatorvolumen existiert, welches sich einerseits schnell erwärmt, andererseits hohe Raumgeschwindigkeiten durch genügend großes Volumen verhindert. Analoges wurde bereits in 3.4.4.1 festgestellt.

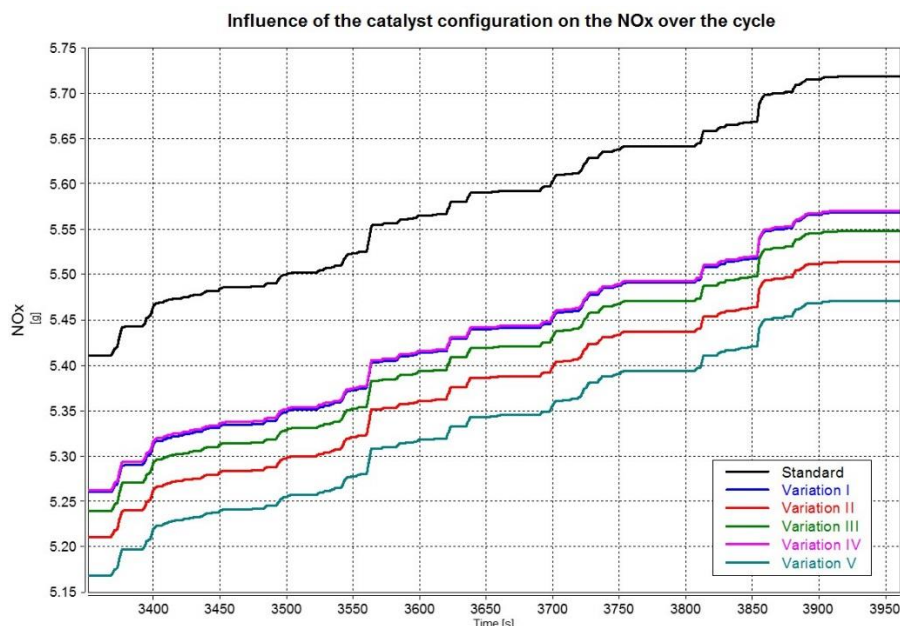


Abbildung 3-92: Detailbetrachtung der NO_x- Bilanzen bei Variation der Volumenaufteilung

Alles in allem sind die Verringerungen der NO_x allerdings beschaulich. Insgesamt lässt sich durch eine vorteilhafte Konstellation in diesem konkreten Fall eine Verbesserung von etwa 0.15 bis 0.25 g erzielen. Allerdings kann eine Kombination von mehreren Verbesserungen gleichzeitig sehr wohl einen großen Unterschied machen. In 3.4.4.7 soll das nun bewiesen werden.

3.4.4.7 Kombination verschiedener Maßnahmen

Werden mehrere Verbesserungen synchron verwendet, so lässt sich die Effizienz der Abgasnachbehandlung noch weiter steigern. Im Folgenden sollen nur jene angewandt werden, welche vielversprechende Ergebnisse erhoffen lassen.

	Zelldichte [cps]		Rhodium Beladung [g/ft ³]		Volumen- aufteilung
	Brick I	Brick II	Brick I	Brick II	
Standard	300	-	7	-	1.4 l Single Brick
Variante I	600	600	14	7	0.47 l Brick I 1.4 l Brick II
Variante II	600	300	14	14	0.47 l Brick I 1.4 l Brick II

Tabelle 3-7: Kombinierte Varianten zur Verbesserung des Konvertierungsverhaltens

Beide Varianten bringen entscheidende Vorteile im Emissionsverhalten. Variante II erbringt mit der höheren Rhodium- Beladung die besseren Ergebnisse.

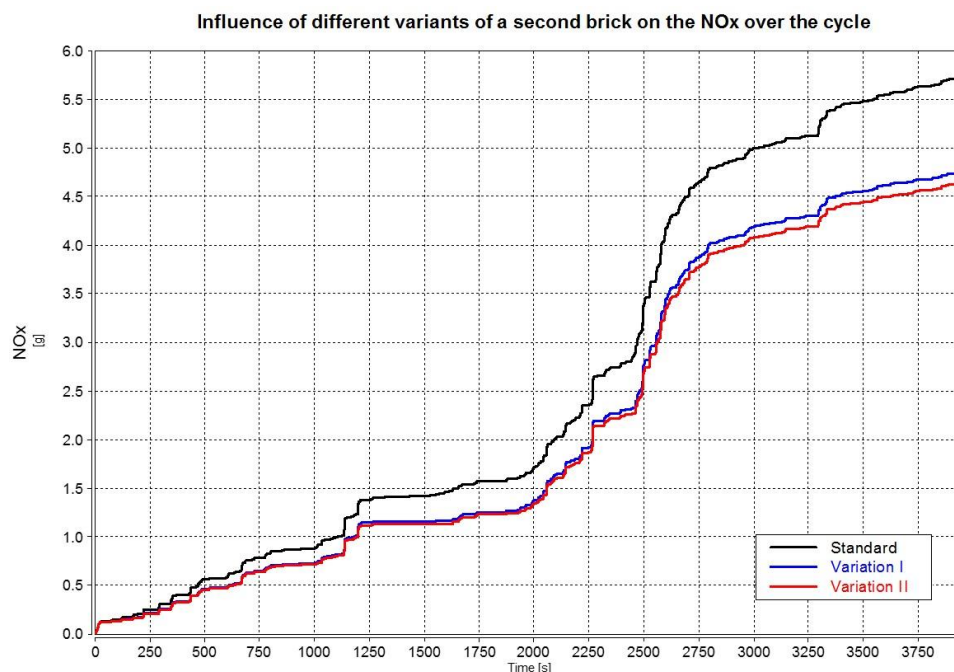


Abbildung 3-93: Vergleich der NO_x von originalem und modifiziertem Katalysator

Der Einfluss der Rhodium- Beladung auf die Konvertierung von CO (und HCs) ist nicht von Belang, vielmehr senkt die erhöhte Zelldichte von Variante II die CO- Emissionen stark. Vor allem das erhöhte Katalysator- Volumen im Vergleich zum Standard- Katalysator und die damit gesenkten Raumgeschwindigkeiten senkt in diesem Fall das CO stark. Der Einfluss auf

die NO_x ist, wie bereits erwähnt, durch starke Abweichungen vom stöchiometrischen Betrieb Richtung mager über weite Bereiche des Tests geringer.

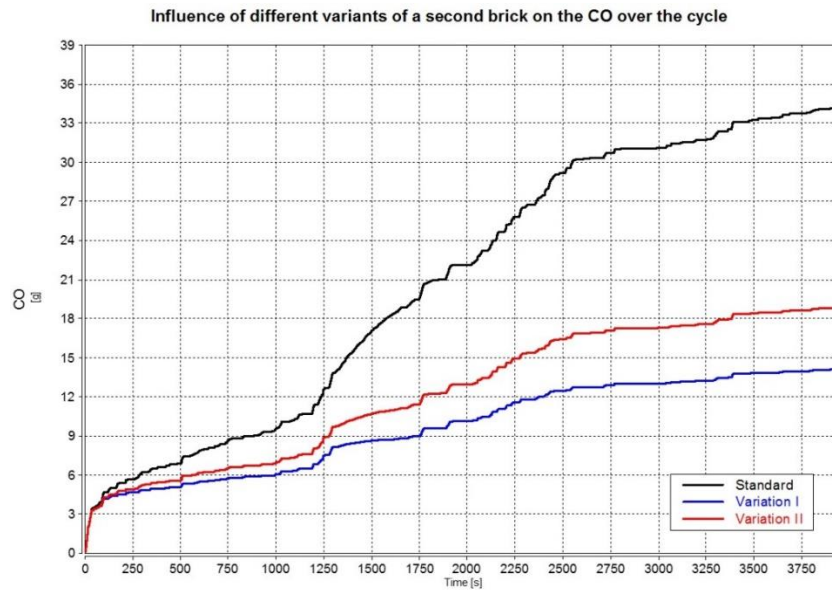


Abbildung 3-94: Vergleich von CO von originalem und modifiziertem Katalysator

3.4.5 Ergebnisse der Simulation

Der Katalysator lässt sich mithilfe von Cruise M mit ausreichender Genauigkeit nachbilden. Die distanzbezogenen NO_x -Emissionen als Ergebnisse der Simulation sind in Tabelle 3-8 zusammengefasst. Dabei wird klar, dass mit den einzelnen Maßnahmen in der Katalysatorauslegung nur relativ geringe Potentiale zur Verbesserung der NO_x -Bilanz bestehen. Dies rührt daher, dass die Durchbrüche in den mageren Betriebsphasen der treibende Faktor hoher NO_x in diesem konkreten Fall bei diesem konkreten Fahrzeug ist. Bei anderen Fahrzeugen, die eine weniger stark ausgeprägte Spülcharakteristik besitzen, können die aufgezeigten Maßnahmen eventuell wirksamer sein.

Maßnahme	NO_x (ungewichtet)	NO_x -Reduktion im Vergleich zum Standard
Standard	109 [mg/km]	-
Vergrößern des Volumens von 1.4 l auf 1.8 l	107 [mg/km]	2 [mg/km]
Erhöhen der Zelldichte von 300 cpsi auf 600 cpsi	103 [mg/km]	6 [mg/km]
Erhöhen der Rhodium- Beladung von 7 g/ft³ auf 14 g/ft³	94 [mg/km]	15 [mg/km]
Verringern der spez. Wärmekapazität von 0.6 J/K auf 0.8 J/K	109 [mg/km]	0 [mg/km]
Kombination aus 3.4.4.6 (Variante V)	104 [mg/km]	5 [mg/km]
Kombination aus 3.4.4.7 (Variante II)	88 [mg/km]	21 [mg/km]

Tabelle 3-8: Auswirkung verschiedener Maßnahmen auf die NO_x -Bilanz

Geht man von einem Konformitätsfaktor von 1.5 aus, beträgt die maximal zulässige NO_x-Menge 90 g/km. Mit Variante II aus 3.4.4.7 ist dies trotz Spülen möglich einzuhalten.

Der Kaltstart ist für die NO_x- Emissionen wenig problematisch. Durch die Aufteilung des Katalysatorvolumens auf zwei Bricks bei gleichzeitiger Vergrößerung des Gesamtvolumens kann trotzdem eine leichte Verbesserung erzielt werden, da die Temperatur des kleineren Katalysators konstant hoch bleibt. Die simple Vergrößerung des einzigen Bricks dagegen ist nur soweit sinnvoll, bis ein Ideal aus verminderter Raumgeschwindigkeit bei langsamerer Aufheizung gefunden ist.

Eine Erhöhung der Rhodium- Beladung dagegen kann sich als sehr sinnvoll erweisen, ist wiederum aber eine Frage des Preises.

Eine Verringerung der spezifischen Wärmekapazität des Katalysators durch ein alternatives Material dagegen bringt keine Vorteile. Die etwas schnellere Aufheizung ist, wie bereits erwähnt, für die NO_x- Bilanz relativ uninteressant.

Eine Erhöhung der Zelldichte vermindert den Ausstoß der NO_x um 6 mg/km

4 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass der RDE- Test große Bereiche des Motorkennfelds abdeckt, die von WLTC und NEDC nicht erfasst werden. Vor allem im Bereich niedriger Drehzahlen und hoher Lasten ergibt sich damit die Problematik hoher NO_x -Emissionen durch Spülen bei aufgeladenen Motoren. Selbst kurzzeitige Abweichungen vom stöchiometrischen Luftverhältnis sind schädlich, da bereits eine sehr kurzzeitige Erhöhung der Sauerstoffspeicherung einen Abfall der Konvertierungsrate mit sich bringt. Somit muss mageres Spülen auf jeden Fall reduziert, im besten Fall verhindert werden. Vor allem bei schweren und zugleich schwach motorisierten Fahrzeugen, welche nur sehr träge dem Beschleunigungswunsch des Fahrers folgen, sind lange Spülvorgänge von mehreren Sekunden üblich, um den benötigten Ladedruck zu generieren. Gerade hinsichtlich dieser Problematik ist die Sinnhaftigkeit des Downsizings schwerer Fahrzeuge zu hinterfragen.

Eine simple Änderung der Motorkalibrierung kann zielführend sein, wenn die Kundenakzeptanz diesbezüglich gegeben ist. Eine komplette Vermeidung des Spülers kann damit nicht verwirklicht werden, sondern lediglich eine Reduktion der Dauer der Vorgänge. Dies kann bereits den entscheidenden Unterschied in der Emissionsbilanz ausmachen, geht aber mit Einbußen in der Fahrzeugdynamik bezüglich transienter Vorgänge einher. Um die Spüldauer deutlich zu reduzieren bzw. komplett zu vermeiden, ist der Einsatz eines zusätzlichen E-Turbos (siehe auch [15]), einer VTG oder einer zweistufigen Verdichtung denkbar, allerdings mit gesteigertem Systemaufwand. Genannte Technologien erhöhen das Ansprechverhalten im low-end Bereich ähnlich dem eines Saugmotors und sind probate Mittel, um bei gleichbleibender Dynamik die NO_x - Emissionen effektiv zu reduzieren. Vor allem bei Hybriden Anwendungen spielt der eBooster seine volle Stärke aus, da bereits ein Starkstrom- Netz im Fahrzeug vorhanden ist.

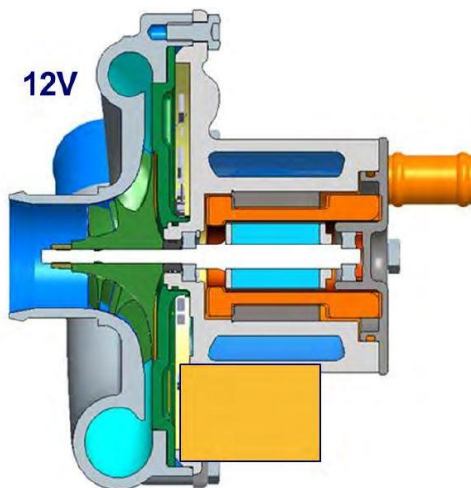


Abbildung 4-1: E- Booster [19]

Der Kaltstart ist in den untersuchten Fällen relativ unproblematisch für die NO_x - Bilanzen, nicht jedoch für CO und vor allem nicht für die HCs, vgl. dazu Abbildung 3-73. Die Installation eines elektrisch beheizten Katalysators kann diesbezüglich sinnvoll sein, ändert an den NO_x - Emissionen aber wenig. Die aufzubringende Systemleistung von etwa 2 kW belastet das Bordnetz stark, ist aber verglichen mit der Abgasheizleistung von etwa 25 kW [17] relativ gering. Ob sich der gesteigerte Systemaufwand durch einen stärkeren Generator bzw. einer zweiten Batterie rechnet, muss dabei von Fall zu Fall untersucht werden.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Reduktion der NO_x vor allem durch die Motorkalibrierung bzw. durch alternative Aufladesysteme positiv beeinflusst werden kann, da die meisten NO_x während dem Spülen emittiert werden. Eine Verbesserung der

Abgasnachbehandlungsanlage ist diesbezüglich nur bedingt sinnvoll und kann nur in Bereichen hoher Leistung noch ein paar Milligramm NO_x pro km bringen. Zudem, und das soll an dieser Stelle auch erwähnt sein, werden während des RDE- Zyklus Bereiche des Spülens sehr viel häufiger durchfahren als Bereiche hoher Leistung (vgl. Abbildung 3-28).

Werden in Zukunft auch die CO- Emissionen weiter beschränkt, wird wohl nichts an einem stöchiometrischen Motorbetrieb im gesamten Kennfeld vorbei führen.

5 Literatur

- [1] ALV CRUISE M manual, 2017
- [2] Amtsblatt der europäischen Union, Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2007
- [3] Amtsblatt der europäischen Union, drittes RDE- Paket
- [4] Amtsblatt der europäischen Union, Verordnung (EU) 2016/427 der Kommission vom 10. März 2016
- [5] AVL emission report. Graz, 2017
- [6] AVL M.O.V.E PEMS iS for LDV, internal presentation, author unknown
- [7] Flitsch S., Hofegger W.: Update WLTP RDE implementation European union, AVL internal presentation
- [8] Hausberger S., Sturm P., Rexeis M., Luz R., Kurz C.: Feinstaub und NOx, Reduktionspotentiale im Straßenverkehr, 2011
- [9] Hausberger, S.: Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2010
- [10] <http://www.car-engineer.com/the-different-driving-cycles/>
- [11] <http://www.kfz-tech.de/Biblio/Abgas/Partikelfilter.htm>
- [12] https://de.wikipedia.org/wiki/Worldwide_Harmonized_Light-Duty_Vehicles_Test_Procedure
- [13] <https://www.basf.com/de/company/news-and-media/science-around-us/catalytic-converter.html>
- [14] Merker G.P., Teichmann R.: Handbuch Verbrennungsmotoren. 7. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden, ISBN 978-3-658-03194-7, 2015
- [15] Prevedel K., Abrantes R., Arnberger A., Kapus P., Theissl H.: Elektrifizierte Aufladung: Ein Entwicklungsthema vom PKW über das Nutzfahrzeug bis hin zur Baumaschine, Paper
- [16] Prevedel, K.: AVL internal customer report, 2015
- [17] Reif, K.: Abgastechnik für Verbrennungsmotoren. Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden, ISBN 978-3-658-09522-2, 2015

- [18] Van Basshuysen, R.: Handbuch Verbrennungsmotoren. 6. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden, ISBN 978-3-8348-1549-1, 2012
- [19] Verschoor, M.: Technologies for enhanced fuel efficiency with engine boosting, Borg Warner Turbo Systems, Paper for automotive megatrends USA 2015