

Aktives Temperaturmanagement in SCR-Systemen - Anwendungsmöglichkeiten und Betriebsstrategien des elektrisch beheizbaren Katalysators EmiCat®

A. Waldhelm^{1,a}, Prof. Dr. C. Beidl^a

Dr. P. Spurk^{2,b}, H.-D. Noack^b

R. Brück^c, R. Konieczny^{3,c}, M. Brugger^c

a TU Darmstadt, Institut für Verbrennungskraftmaschinen
Petersenstraße 30, D-64287 Darmstadt

b Umicore AG & Co KG
Rodenbacher Chaussee 4, D-63457 Hanau-Wolfgang

c Emitec, Gesellschaft für Emissionstechnologie mbH
Hauptstrasse 128, D-53797 Lohmar

Kurzfassung: Für zukünftige Gesetzgebungsstufen werden Abgasnachbehandlungssysteme zur Reduktion der Stickoxid-Emission an Bedeutung gewinnen. Vor allem SCR-Systeme zur selektiven katalytischen Reduktion, die das benötigte Ammoniak im Abgasstrang aus einem eingespritzten Reduktionsmittel (Harnstoff-Wasser-Lösung) generieren, bieten Potential für hohe Umsatzraten. Dadurch entstehen größere Spielräume bei der Stickoxid-Rohemission, was in Vorteilen hinsichtlich Verbrauch bzw. CO₂-Emission resultieren kann. Allerdings wird die Effektivität dieser Systeme limitiert durch die Mindesttemperatur, die zur chemischen Zersetzung des

¹ E-mail: waldhelm@vkm.tu-darmstadt.de, URL: www.verbrennungskraftmaschinen.de

² E-mail: paul.spurk@eu.umicore.com, URL: www.umicore.com

³ E-mail: roman.konieczny@emitec.com URL: www.emitec.com

Reduktionsmittels sowie für die eigentliche katalytische Reaktion benötigt wird. Zum Erreichen der benötigten Gesamtaktivität kann es daher notwendig werden, die Abgastemperaturen aktiv anzuheben. Eine mögliche Variante ist dabei die elektrische Beheizung des Katalysators, bei der die Energie unmittelbar dem katalytisch wirksamen Träger zugeführt wird. Die erzielten Ergebnisse bestätigen das Potenzial des elektrisch beheizbaren Katalysators zur Verschiebung des Aktivitätsfensters hin zu niedrigen Abgastemperaturen.

Schlagworte: SCR, Stickoxid, Temperaturmanagement, Elektrisch beheizter Katalysator

1 Einleitung

Die Reduzierung der CO₂-Emission ist derzeit ein sehr präsent Thema. Der Kundenwunsch sowie gesetzliche Vorgaben zeigen über die bereits erzielten Ergebnisse hinaus jedoch einen weiteren Bedarf zur Kraftstoffverbrauchsabsenkung.

Die Erreichung dieses Ziels erfolgt im Wesentlichen auf drei Wegen (Abbildung 1). Die Grundlage stellt dabei die weitere Optimierung des konventionellen Antriebsstrangs dar. Zu nennen ist dabei unter anderem die weiterführende Verbesserung der Kraftstoffeinspritzung, die Nutzung von Downsizing-Potenzialen und der Einsatz von zweistufiger Aufladung.

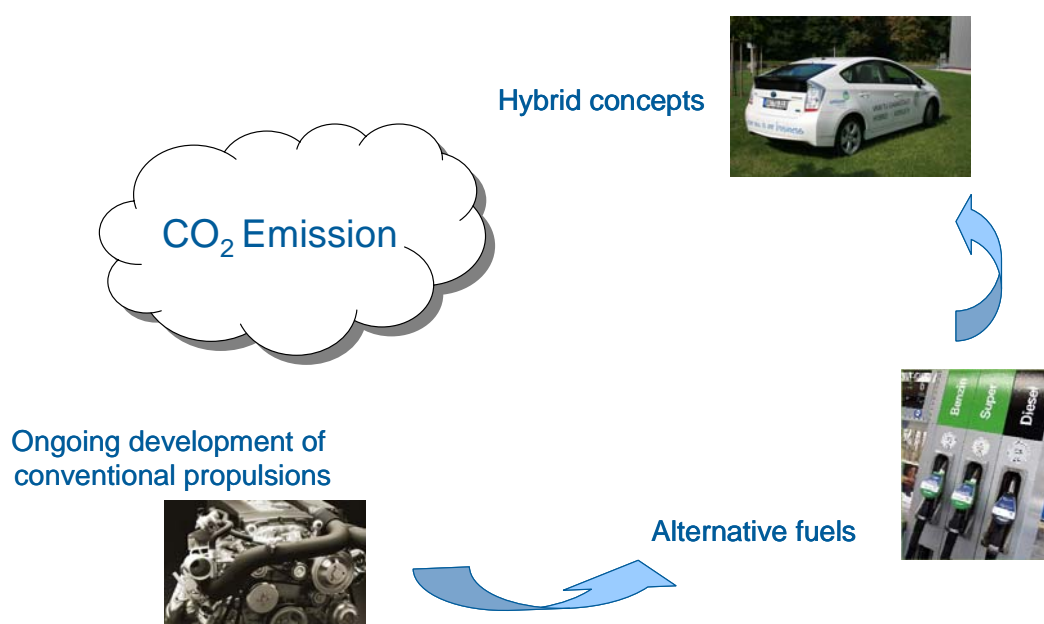


Abbildung 1: Handlungsfelder zur Verringerung der CO₂ Emission

Weitere Aspekte sind die Nutzung alternativer Kraftstoffe sowie die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Der Einsatz von Hybridkonzepten wird als eine der wichtigen Technologien zur Erreichung der zukünftigen CO₂-Reduktionsziele angesehen [1].

Allerdings ist bekannt, dass es sich beim Antriebsstrang um ein fein aufeinander abgestimmtes System handelt. Wird an einer Stelle ein Parame-

ter verändert, kann dies an anderer Stelle signifikante Auswirkungen nach sich ziehen.

Schon heutige dieselmotorische Applikationen weisen niedrige Abgastemperaturen auf; weitere Optimierungen mit dem Ziel der CO₂-Emissionsabsenkung verstärken diesen Effekt zusätzlich (Abbildung 2).

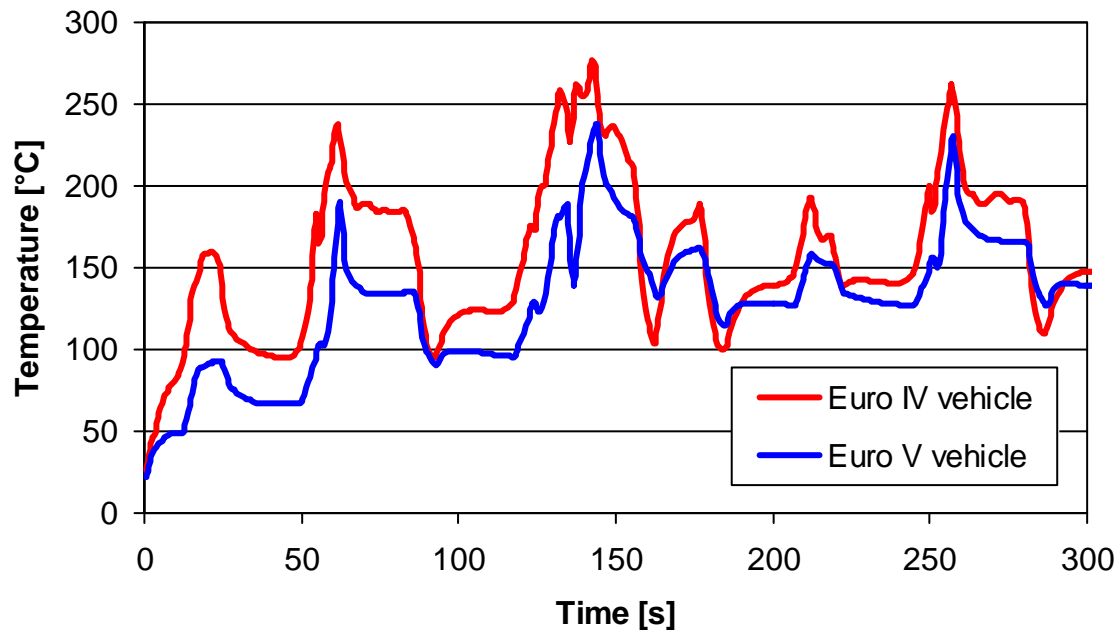


Abbildung 2: Vergleich der Abgastemperatur nach Abgasturbolader eines Euro IV Fahrzeugs zu einem Euro V Fahrzeug

Bekanntermaßen wird die Aktivität der Abgasnachbehandlung aber wesentlich von der Abgastemperatur beeinflusst, wodurch sich an dieser Stelle erst einmal ein Zielkonflikt zwischen Verbrauchs- und Emissionsoptimierung ergibt.

Auf Grund der heutigen und kommenden strengen Emissionsgrenzwerte müssen die Abgasnachbehandlungssysteme allerdings höchste Effizienz aufweisen. Dies kann nur durch weiterführende Optimierung der Katalysatoren zusammen mit den für die chemischen Reaktionen notwendigen Abgastemperaturen erfolgen.

2 Motivation

Die Verringerung der im dieselmotorischen Abgas vorhandenen Schadstoffkomponenten ist immer noch eine wesentliche Herausforderung der

Motorenentwicklung. Eine wesentliche Unterstützung wird durch den Einsatz angepasster Abgasmachbehandlungssysteme erreicht. Für die gasförmigen Kohlenwasserstoffe (HC) und dem Kohlenmonoxid (CO) stehen mit dem Dieseloxydationskatalysator (DOC) und dem katalytisch aktivierten Partikelfilter (DPF) wirkungsvolle Maßnahmen zur Verfügung. Das Umsatzverhalten ist dabei eine Funktion der Abgastemperatur. Beispielhaft ist in Abbildung 3 der sogenannte light-off der Abgaskomponenten HC und CO als Funktion der Temperatur dargestellt.

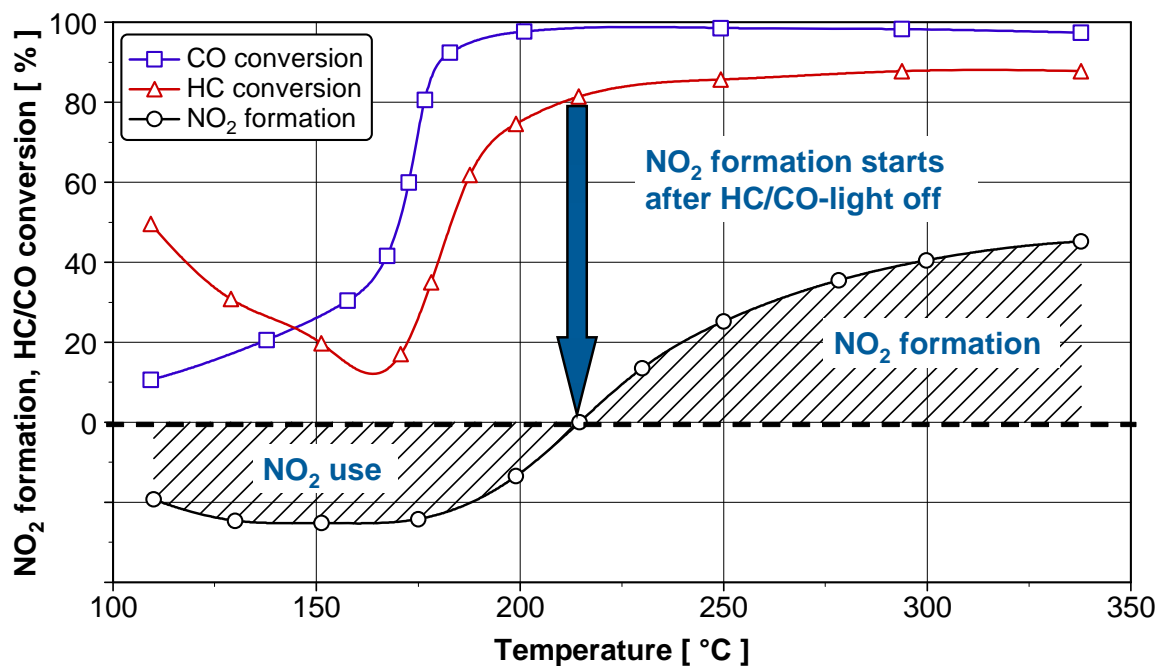


Abbildung 3: HC- und CO-Umsatz sowie die NO₂-Ausbeute während des light-off, gemessen am Motorenprüfstand mit einem 2,0 Liter Motor

Auch die Bildung des für die SCR Reaktion benötigten Stickstoffdioxids (NO₂) ist abhängig von der Temperatur, weil die Bildung erst nach vollständiger Konversion des CO und ungefähr 80 % Umsatz der Kohlenwasserstoffe beginnt. Bevor diese Bedingung erreicht ist, wird das vorhandene und gebildete NO₂ als Oxidationsmittel für CO und HC genutzt, weil NO₂ im Vergleich zu Sauerstoff reaktiver ist.

Für die Verringerung der Stickoxidkomponenten stehen mit dem NO_x-Speicherkatalysator und dem SCR-Katalysator derzeit zwei im Serieneinsatz befindliche, konkurrierende Systeme zur effektiven NO_x-Minderung und zur Erreichung der Emissionsgrenzwerte zur Verfügung. Allerdings ist auch die Effizienz dieser Technologien von der Temperatur abhängig, wie anhand der Abbildung 4 und Abbildung 5 zu erkennen ist.

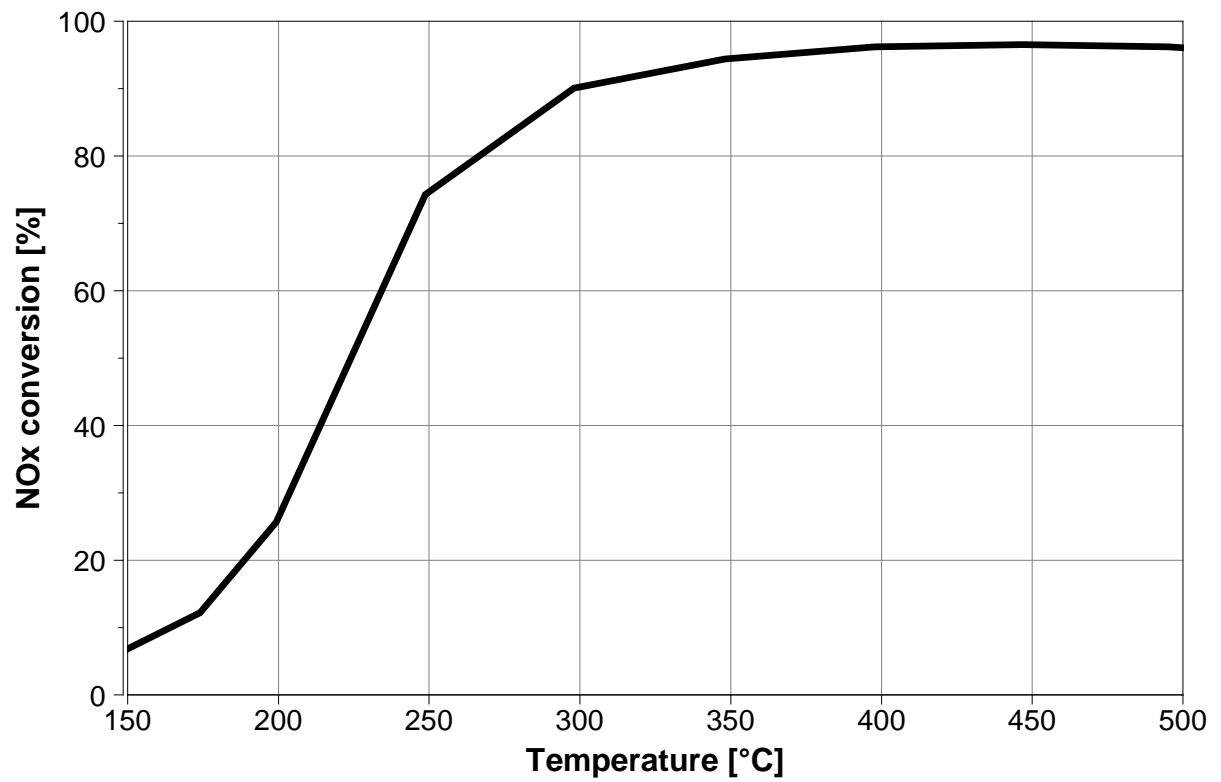


Abbildung 4: NO_x-Umsatz eines heutigen Fe-basierten SCR Katalysators als Funktion der Abgastemperatur; Messung erfolgte im Modellgasreaktor unter synthetischen Testbedingungen (NO_x feed: 100% NO) [2]

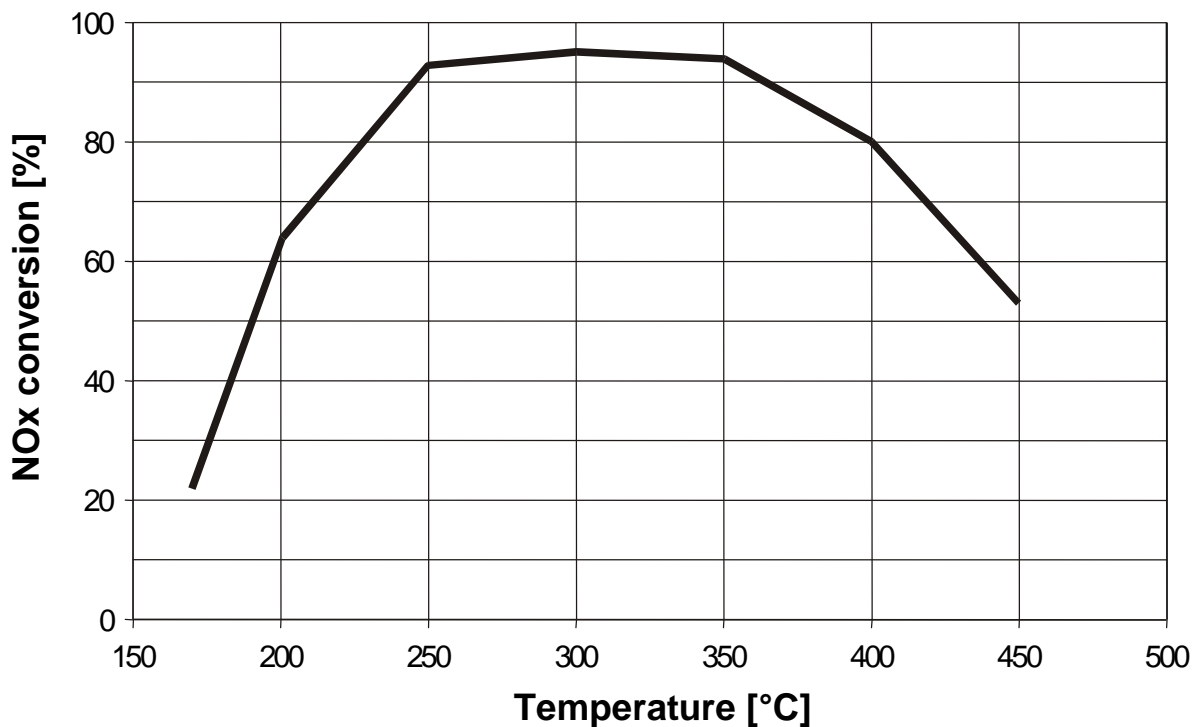


Abbildung 5: NO_x Umsatz eines hydrothermal gealterten NO_x Speicher-katalysators (Raumgeschwindigkeit: 50.000 1/h; fett/mager Zyklus: 120s mager/ 10s fett) [3]

Neben der reinen Aktivität des SCR-Katalysators hängt auch die Dosierung des bisher genutzten Reduktionsmittels (AdBlue) stark von der Temperatur ab. Zur Umsetzung des Harnstoffs zum Ammoniak und zur Vermeidung von Ablagerungen im Abgassystem wird derzeit, je nach Applikation, als Starttemperatur ein Wert von 150°C bis 200°C nicht unterschritten.

Anhand dieser Ausführungen ist ersichtlich, dass die Temperatur ein wesentlicher Faktor zu Erzielung hoher Aktivitäten ist. Aus diesem Grund sind höhere Abgastemperaturen aus Sicht der Abgasnachbehandlung wünschenswert. Um negative Auswirkungen auf die Gesamtenergiebilanz zu vermeiden, ist die CO₂-minimierte Bereitstellung dieser Energie essentiell.

Es gibt unterschiedliche Maßnahmen, um die Temperatur im Abgassystem anzuheben. Motorische Maßnahmen (späte Nacheinspritzung, Ladeluftdrosselung, usw.) sind wirkungsvoll; aber es ist dabei zu berücksichtigen, dass dabei das Abgassystem in Strömungsrichtung aufgeheizt wird. In einem Systemverbund bestehend aus DOC, DPF und SCR-Katalysator im Unterboden wird eine hohe Energie benötigt, um ausreichend Temperatur in den SCR-Katalysator zu bekommen. Hier bieten sich unter Umständen

Alternativen an, welche direkt - lokal - zu einer Temperaturerhöhung führen. Ein Beispiel dafür ist der elektrisch beheizte Katalysator [4].

Die im Folgenden vorgestellten und diskutierten Ergebnisse sind Teil eines Untersuchungsprogramms, welches sich mit dieser Thematik beschäftigt. Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden erste Ergebnisse zum Einsatz elektrisch beheizter Katalysatoren an einem 3.0 Liter 6-Zylinder Dieselmotor beschrieben.

3 Elektrisch beheizbarer Katalysator - Aufbau, Funktion, Anwendungsmöglichkeiten

Zielsetzung bei der Entwicklung des elektrisch beheizbaren Katalysators war ein schnelles Erreichen der katalytischen Aktivität auch unter ungünstigen Kaltstartbedingungen, d.h. sehr niedrigen Abgastemperaturen. Da für diese Aktivität weniger die Abgastemperatur als vielmehr die Substrattemperatur entscheidend ist, wurde bei der Konstruktion daraufhin gearbeitet, dass ein möglichst großer Anteil der elektrischen Energie für die Aufheizung der metallischen Matrix genutzt werden kann, die zum Teil dadurch direkt, zum Teil durch einen hocheffektiven Wärmeübergang über das Abgas aufgeheizt wird.

Zu diesem Zweck wurde die eigentliche Heizvorrichtung als Teil des Katalysators selbst ausgeführt, d.h. in Form einer Wabenstruktur im Eintritt des Katalysators angeordnet. Diese sogenannte Heizscheibe wird unmittelbar vom elektrischen Strom aufgeheizt und kann, da sie ebenfalls über eine katalytische Beschichtung verfügt, direkt mit der Konvertierung der Schadstoffe starten. Der zweite Teil des Katalysators, der sogenannte Stützkat (welcher unmittelbar hinter der Heizscheibe angeordnet ist), dient der Heizscheibe als mechanische Lagerung. Der Stützkat sowie andere nachgeschaltete Komponenten im Abgasstrang werden über das von der Heizscheibe erwärmte Abgas aufgeheizt.

Die Heizscheibe arbeitet dabei nach dem Prinzip einer Heizwendel. Die Stromzuführung erfolgt an einem Ende über einen elektrischen Anschluss, der über eine Halbschale den Strom an das Folienpaket weitergibt. Das Folienpaket selbst bestimmt mit seinem Widerstand die elektrische Leistung des Heizkats. Es wird entsprechend dem normalen Wickelprozess der Metallmatrix S-förmig verschlungen und darüber in die gewünschte Form gebracht. Über eine zweite Halbschale, die üblicherweise mit dem übrigen Katmantel verbunden ist oder alternativ einen separaten Kontakt besitzt, wird die Kontaktierung zur Masse des Fahrzeuges hergestellt (Abbildung 6).

Durch einen Luftspalt wird ein Kurzschluss innerhalb der Heizescheibe verhindert und gewährleistet, dass sie komplett vom Strom durchflossen wird. Zur Lagerung wird die Heizescheibe daher mechanisch abgestützt, was über elektrisch isolierte Stifte geschieht, die sowohl mit der Heizescheibe als auch mit dem Stützkatalysator verlötet werden. Durch diese Konstruktion wird gewährleistet, dass der Katalysator den hohen thermischen und mechanischen Belastungen in der Abgasanlage dauerhaft standhält [5].

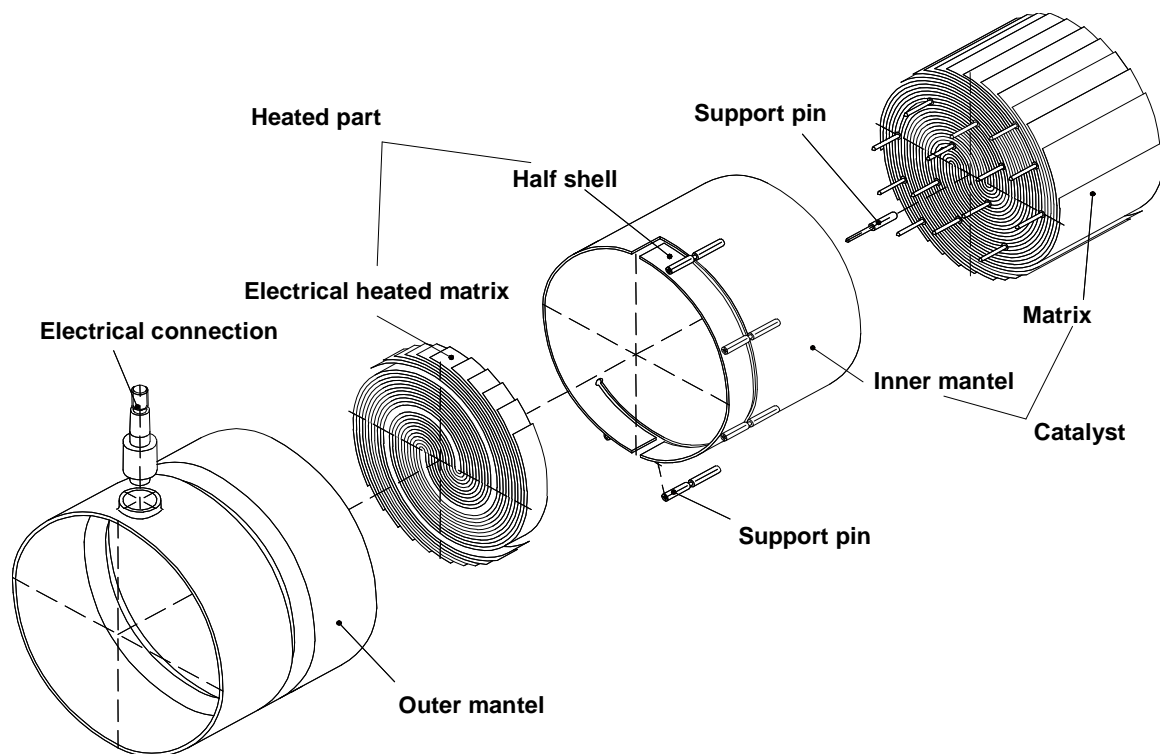


Abbildung 6: Aufbau des elektrisch beheizbaren Katalysators EmiCat[®]

4 Applikation eines E-Kats im SCR-System am Diesel-PKW

4.1 Systemaufbau und Auswirkungen auf das Emissions- und Temperaturverhalten

Für die im Folgenden beschriebenen Versuche wurde ein 3,0 Liter 6-Zylinder Common-Rail PKW-Dieselmotor am dynamischen Motorenprüfstand eingesetzt. Eine reproduzierbare Untersuchung der SCR-Technologie am beheizten SCR-Katalysator erfolgte mit Hilfe einer standardisierten Dosierstrategie. Dazu wurde ein vorgesteuertes HWL-Dosiersystem ver-

wendet, welches nach Erteilung der Dosierfreigabe - in diesem Fall ab einer Temperatur von 150°C vor dem SCR-Katalysator - die HWL mit einem definierten Feedverhältnis dosierte.

Wie bereits in Kapitel 1 erwähnt erfordert die Dosierung von Harnstoff-Wasser-Lösung eine Mindesttemperatur im Abgasstrang, um eine adäquate Harnstoffaufbereitung zu erreichen. Zusätzlich werden durch eine ausreichend hohe Abgastemperatur Ablagerungen am Dosiermodul und im Abgasstrang vermieden.

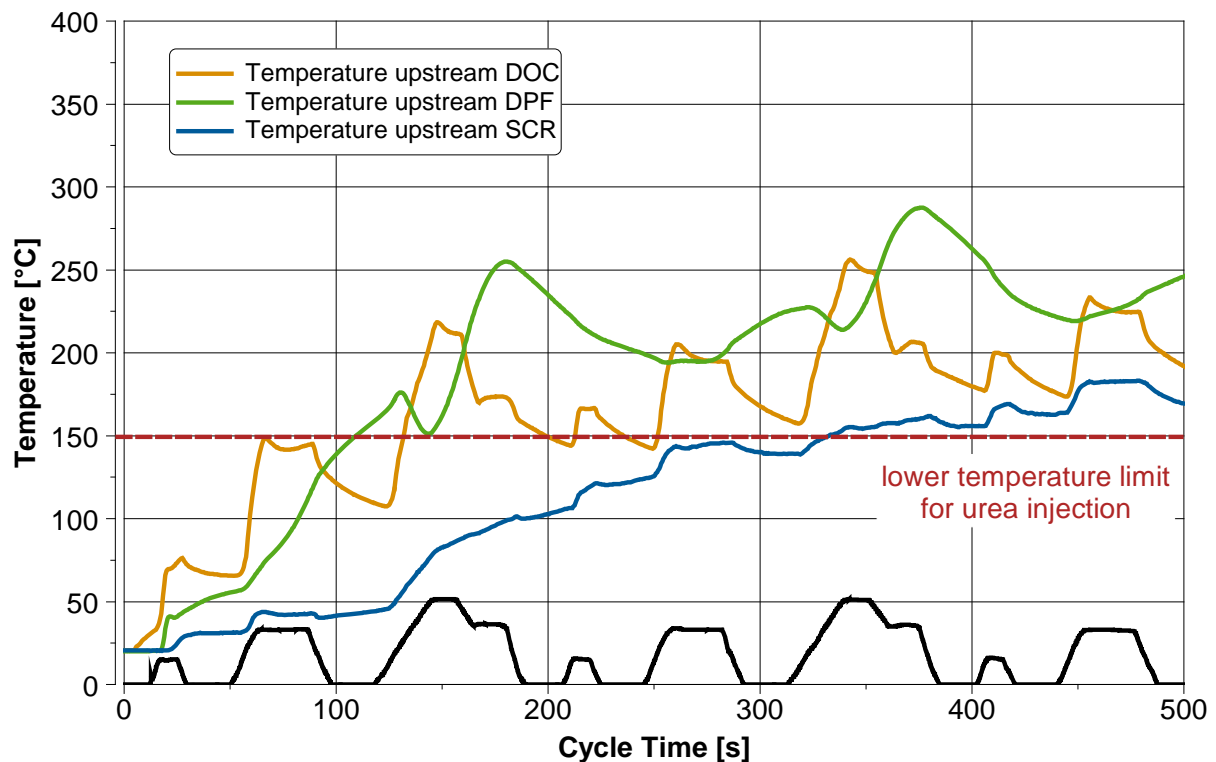


Abbildung 7: Verlauf der Abgastemperaturen im NEDC vor DOC, vor DPF und vor SCR Katalysator

In Abbildung 7 ist der Verlauf der Abgastemperaturen im NEDC vor DOC, vor DPF sowie vor dem elektrisch beheizbaren SCR-Katalysator für den untersuchten Motoraufbau dargestellt. Die Temperaturverhältnisse im SCR-Katalysator wurden mit Hilfe von NiCrNi-Thermoelementen erfasst.

Es ist zu erkennen, dass eine sowohl für die SCR Reaktion als auch die HWL Dosierung ausreichend hohe Abgastemperatur erst nach ca. 350 Sekunden erreicht wird. Aus dieser Problemstellung resultierte der Einsatz eines beheizbaren SCR-Katalysators.

Das am Prüfstand untersuchte SCR-Katalysatorsystem bestand aus einem motornahen DOC und katalytisch aktiviertem DPF sowie, wie in Abbildung 8 dargestellt - drei im Unterbodenbereich angeordneten SCR-Katalysatoren mit einem Gesamtvolumen von ungefähr 5 Litern. Als erster Brick wurde der elektrisch beheizbare Katalysator eingesetzt. Zur Dokumentation des Aufheizverhaltens wurden in allen drei Katalysatoren mittig Temperaturfühler platziert. Abbildung 8 veranschaulicht auch die Positionierung der Thermoelemente im Katalysator.

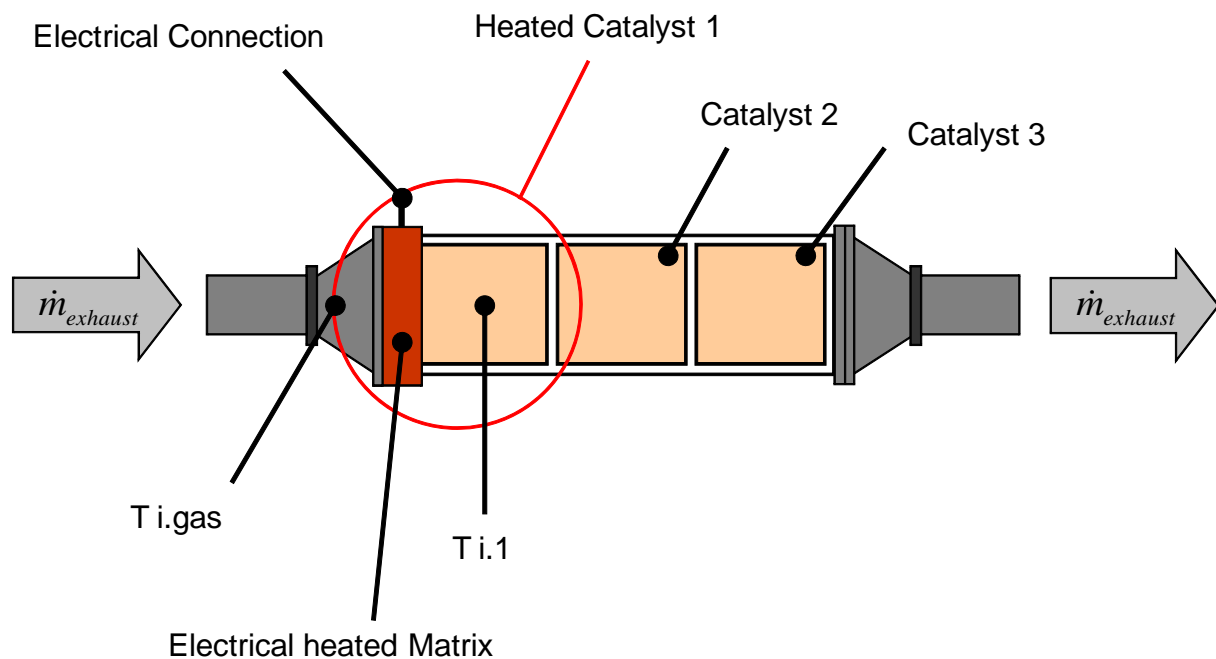


Abbildung 8: Anordnung der Thermoelemente im EHC

Abbildung 9 illustriert den schematischen Aufbau der Energieflüsse des Systems. Da sich die Leistungsanforderung des Heizkats von 2 kW nicht allein mit einer 12V-Batterie bewerkstelligen lässt, wurde die Energieversorgung mit Hilfe der Lichtmaschine des Dieselmotors realisiert und die 12V-Batterie parallel dazu als Energiepuffer verwendet.

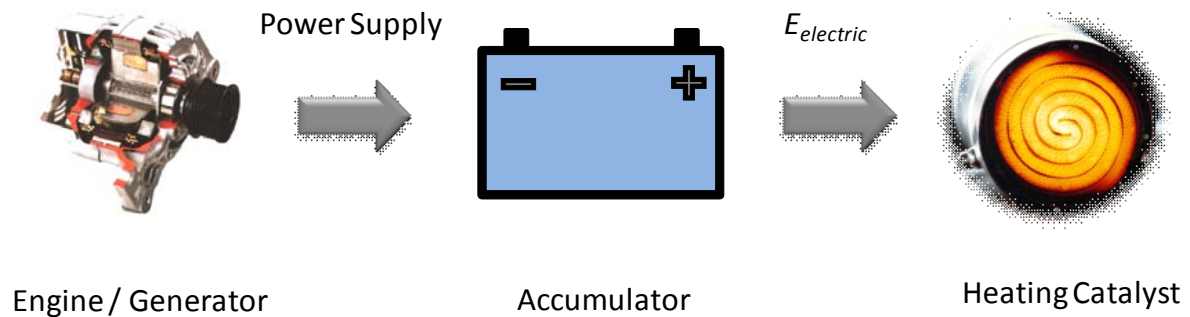


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Energieversorgung des EHCs

Dies führt in den Heizphasen des Katalysators im NEDC zu einer Lastpunktanhebung des Motors, um die Energie bereitstellen zu können. Wie zu erwarten, führt diese Lastpunktverschiebung zu einer Erhöhung der Abgastemperatur bei gleichzeitig zu erwartender Reduzierung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs b_e .

Abbildung 10 veranschaulicht den Effekt. Auf Grund der Lastpunktanhebung wird das für eine HWL-Dosierung erforderliche Temperaturniveau bereits nach gut 250s, also ca. 100s früher, erreicht.

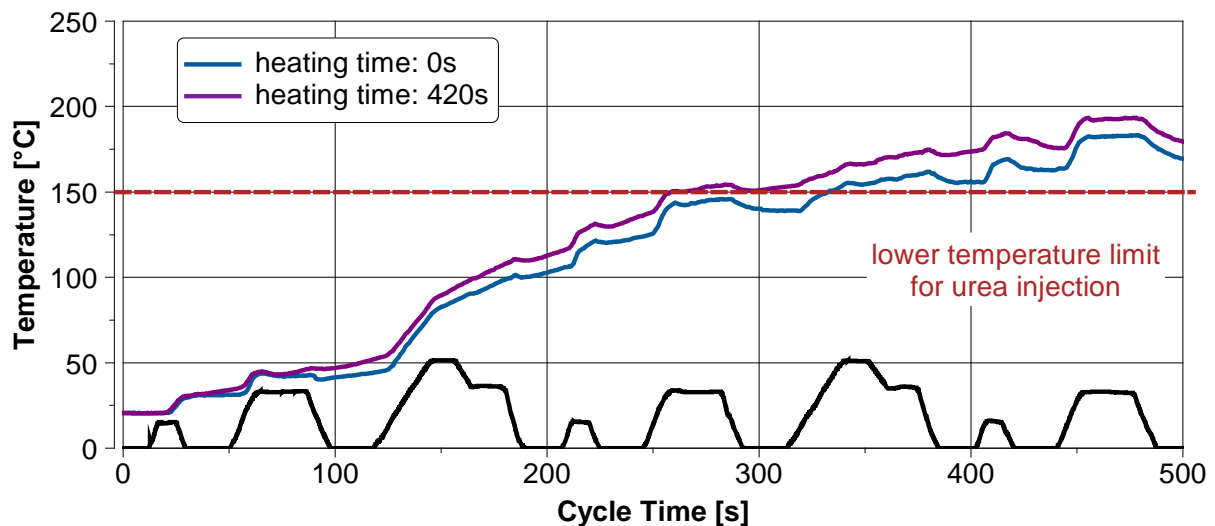


Abbildung 10: Vergleich der Abgastemperaturen vor SCR-Katalysator ($T_{i, gas}$) für die ersten 500 Sekunden des NEDC für den unbeheizten und den 420 Sekunden beheizten EHC (mit bzw. ohne Lastpunktanhebung)

Durch die Lastpunktverschiebung ist eine Rückwirkung auf die Rohemissionen des Motors zu erwarten. Allerdings zeigen die erzielten Ergebnisse für CO und NO_x nahezu identische Rohemissionen im NEDC. Nur bei den Kohlenwasserstoffen ist ein geringer Einfluss erkennbar. Aufgrund des an-

gehobenen Abgastemperaturniveaus in Folge der Lastpunktverschiebung konnte die Aktivität des DOC gesteigert werden.

Rohemissionen vor DOC	CO	HC	NO_x
0s Heizdauer [g/Test]	35,5	4,5	3,0
420s Heizdauer [g/Test]	35,8	4,3	3,0
Proz. Veränderung	1%	-4%	0%
Emissionen nach DOC	CO	HC	NO_x
0s Heizdauer [g/Test]	5,8	0,5	3,0
420s Heizdauer [g/Test]	4,8	0,4	3,0
Proz. Veränderung	-17%	-20%	0%

Tabelle 1: Vergleich der, in Folge der Lastpunktverschiebung resultierenden, Rohemissionen sowie der Emissionen nach DOC für 0s und 420s Heizdauer

Durch den Einsatz des Heizkats und die daraus resultierende Lastpunktanhebung liegen die HC- und CO-Emissionen bei 420s Heizdauer um bis zu 20% unterhalb deren des unbeheizten Katalysators.

4.2 Einfluss von Temperatur und Dosierbeginn auf SCR-Effektivität

In einem ersten Schritt wurde nun der Einfluss der Heizdauer auf das Konvertierungsverhalten des SCR-Katalysators untersucht. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Dauer der Heizperioden. Die Heizintervalle variierten zwischen 0s und 420s wobei immer eine konstante Heizleistung von 2kW eingestellt wurde.

Heizdauer [s]	0	120	180	300	420
Heizleistung [kW]	2	2	2	2	2

Tabelle 2: Heizintervalle im NEDC

Der Verlauf der Abgastemperaturen im NEDC an der Stelle im Stützkatalysator (T_{i.1}) ist in Abbildung 11 für die untersuchten Heizintervalle dargestellt.

Die Heizung wurde in diesen Versuchen direkt mit Motorstart aktiviert. Wie aus den Verläufen in Abbildung 11 ersichtlich, konnte die Temperatur je nach Heizdauer teils deutlich angehoben werden. Die Länge der Heizperiode wirkte sich dabei maßgeblich auf den Temperaturanstieg aus. Mit einer Heizdauer von 300s und 420s konnte das Temperaturniveau im SCR-Katalysator sogar auf über 200°C angehoben werden. Ohne aktives Heizen wird diese Temperaturschwelle erst in der EUDC Phase erreicht.

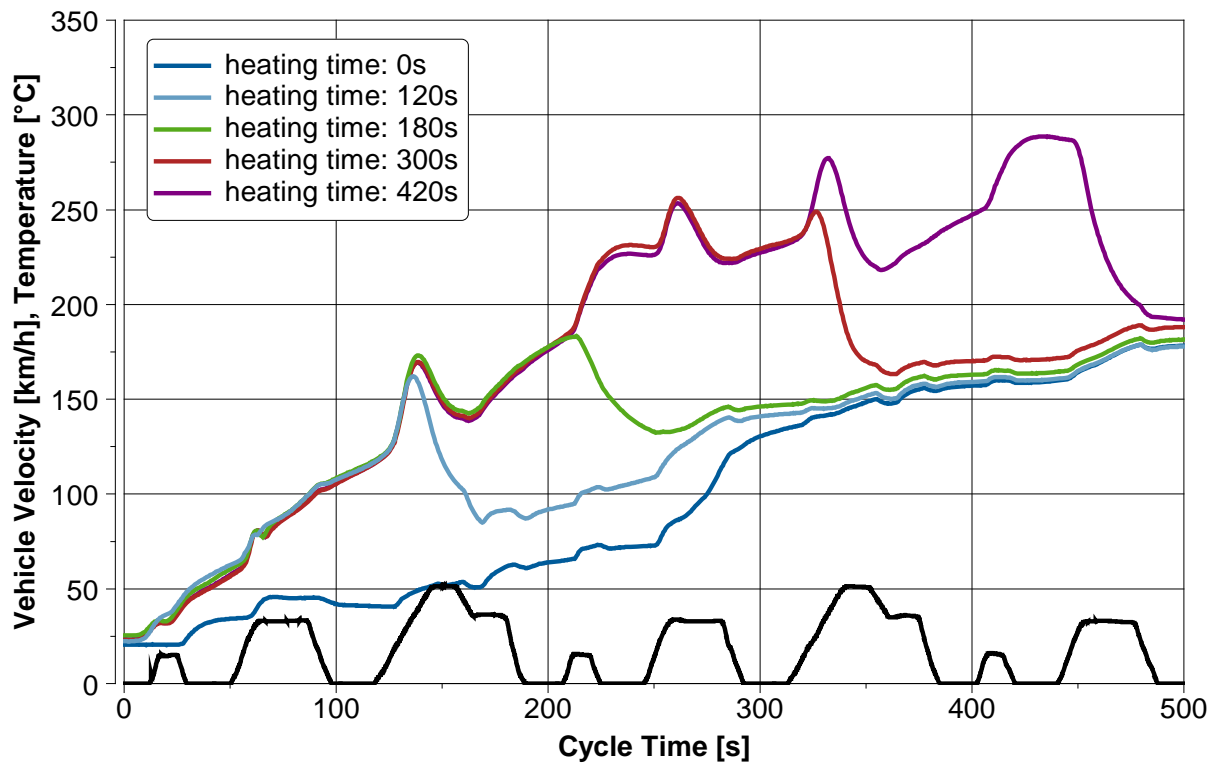


Abbildung 11: Vergleich der Temperatur im Stützkatalysator (T_{i.1}) bei unterschiedlichen Katalysator-Heizintervallen

In der folgenden Abbildung 12 ist der berechnete NO_x-Umsatz für die ersten 500 Sekunden des NEDC für die Varianten ohne Beheizung und mit einer Heizdauer von 420 Sekunden vergleichend dargestellt. Der Zeitpunkt des Dosierbeginns war in diesem Fall für alle Versuche gleich.

Die Temperaturanhebung im SCR-Katalysator führt zu einem früheren Erreichen der Anspringtemperatur, wodurch das in der Vorkonditionierung im SCR-Katalysator eingespeicherte Ammoniak, vor Beginn der eigentlichen HWL-Dosierung, effizienter zur NO_x-Reduktion genutzt wird. Auch nach Beginn der HWL-Dosierung kommt es durch die höhere Katalysatortemperatur zu einem erhöhten NO_x-Umsatz in Folge der gestiegenen SCR Reaktionsgeschwindigkeit.

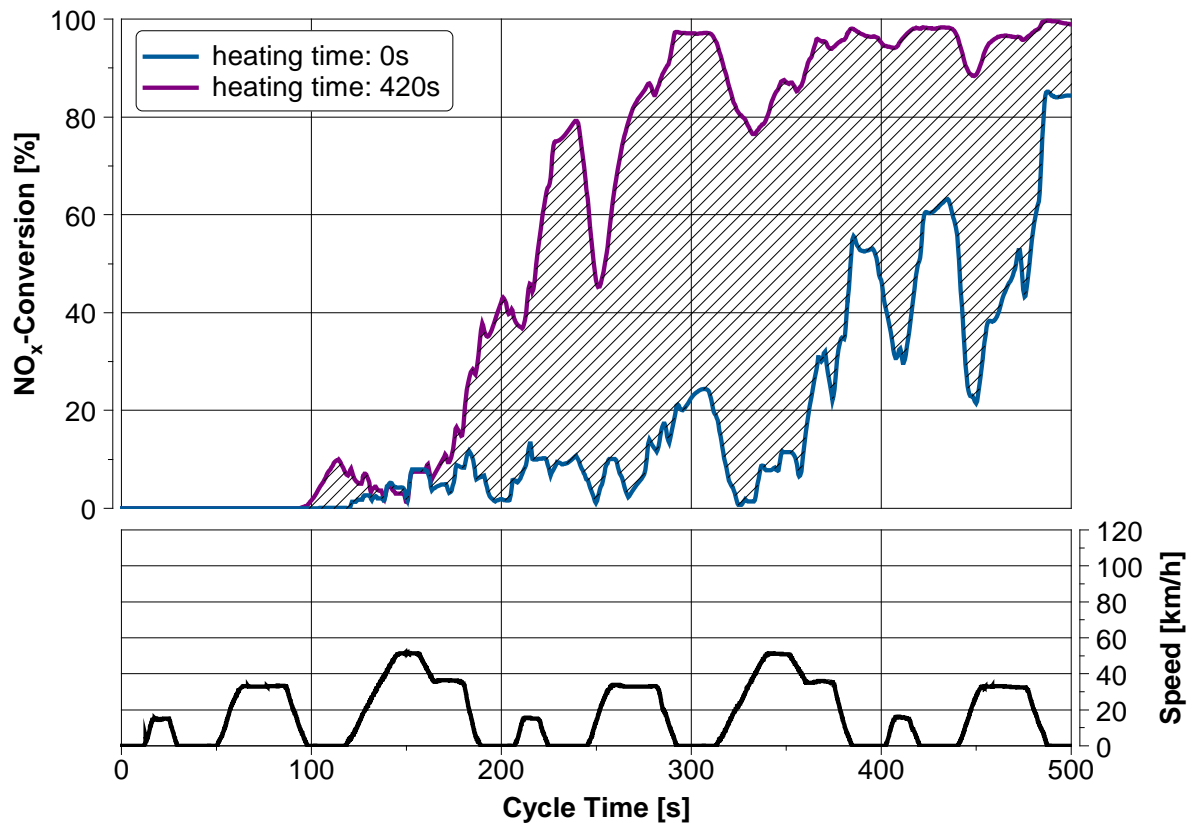


Abbildung 12: Vergleich des NO_x-Umsatzes bei 0s und 420s Heizdauer

Für den gesamten NEDC konnte der NO_x-Umsatz durch die Nutzung des elektrisch beheizten Katalysators von 53% auf 67% gesteigert werden.

4.3 Variation der Heizstrategie, Einfluss auf Effektivität und Mehrverbrauch

Die im vorherigen Kapitel diskutierten Ergebnisse bestätigen das hohe Potenzial des elektrisch beheizten Katalysators hinsichtlich der Emissionsminderung. Die Elektrifizierung des Abgasstrangs führt jedoch zu einem Trade-Off zwischen einem schnellen Katalysatoranspringen und einem geringen Energieverbrauch.

Daraus resultiert die Forderung einer angepassten Heizstrategie für einen möglichst effizienten Umgang mit der Ressource Energie. Angesichts dieses Zielkonflikts wurde das Systemverhalten des EHCs für unterschiedliche Strategien untersucht:

- a) Anpassung der Dosierfreigabe: Vorverlegung der Dosierfreigabe um 100 Sekunden bei einem Heizintervall von 300 Sekunden

- b) Anpassung des Heizbeginns: Verschiebung des Heizbeginns um 100 Sekunden nach Zyklusstart
- c) Betrieb des EHCs in Schubphasen
- d) Betrieb des EHCs in Beschleunigungsphasen
- e) Betrieb des EHCs in Phasen bei $V_{Fzg} > 0$ km/h

a) Anpassung der Dosierfreigabe: Vorverlegung der Dosierfreigabe um 100s bei einem Heizintervall von 300s

Aufgrund des höheren Temperaturniveaus infolge der elektrischen Beheizung ist theoretisch eine Vorverlegung des Dosierbeginns der HWL möglich. Einschränkend ist dazu zu sagen, dass trotz der im Katalysator vorherrschenden höheren Temperatur an der Dosierstelle weiterhin die niedrigen Abgastemperaturen anliegen, weshalb eine Dosierung zu diesem frühen Zeitpunkt - ohne weitere thermische Maßnahmen an der Dosierstelle selbst - kritisch zu bewerten ist. Die eingedüste HWL wird nur unzureichend aufbereitet und die Gefahr von Ablagerungen steigt deutlich an.

Ein, mit einer vorverlegten Dosierfreigabe, durchgeführter Test (Heizdauer: 300 Sekunden) zeigte mit einem in der Vorkonditionierung vorbeladenen SCR Katalysator keine Wirkungsgradverbesserung.

b) Anpassung des Heizbeginns: Verschiebung des Heizbeginns um 100 Sekunden nach Zyklusstart

Wie aus Abbildung 11 bleibt die Abgastemperatur im Stützkatalysator ($T_{i.1}$) trotz Heizmaßnahme während der ersten 100 Sekunden des Testzyklus unter 100°C . Daraus ergibt sich die Fragestellung, ob die Heizmaßnahme bei gleich bleibender Aktivität nicht zu einem späteren Zeitpunkt gestartet werden kann, wodurch eine Energieeinsparung realisiert werden könnte.

Der Verlauf der Abgastemperaturen ($T_{i.1}$) für den unbeheizten, sowie die für 420 Sekunden und 300 Sekunden beheizten EHC ist in Abbildung 13 dargestellt. Bei letzterem wurde die Heizung allerdings erst 100 Sekunden nach Zyklusstart eingeschaltet.

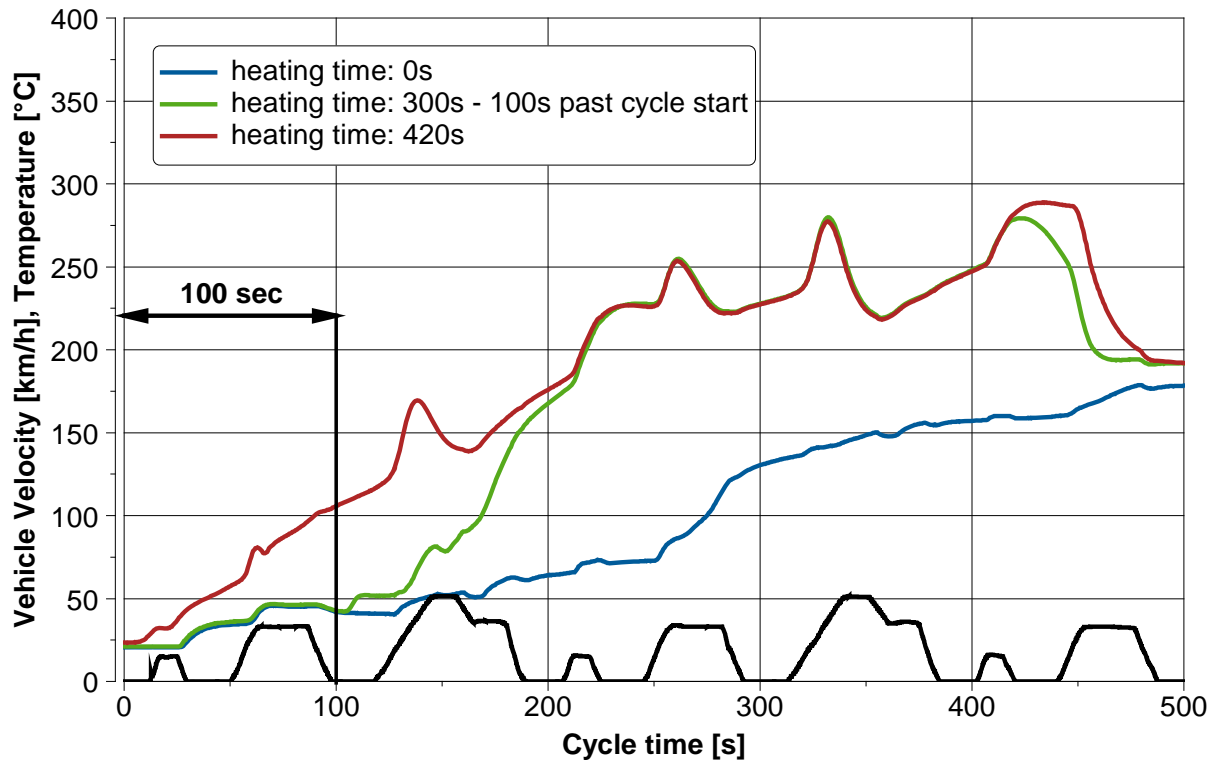


Abbildung 13: Einfluss auf die Abgastemperatur im SCR Katalysator ($T_{i.1}$) bei Verschiebung des Heizintervalls um 100s nach Zyklusstart (Heizdauer: 300 Sekunden)

Ab Sekunde 200 finden sich, trotz unterschiedlicher Startbedingungen, nahezu deckungsgleiche Abgastemperaturen für die beiden beheizten Varianten. Die erzielten NO_x -Wirkungsgrade betragen 66% bei der neuen Heizstrategie im Vergleich zu 67% bei 420 Sekunden Heizdauer und 53% bei unbeheiztem Katalysator.

Bei nahezu gleichem NO_x -Umsatz konnte der Energieaufwand durch den späteren Heizbeginn um ca. ein Viertel reduziert werden.

c-e) Betrieb des Heizkats in Schub-, Beschleunigungsphasen und in Bereichen bei $V_{Fzg} > 0 \text{ km/h}$

Um einen weiteren Energiespareffekt durch Rekuperation zu nutzen, wurde der Heizkat in weiteren Versuchen nur in Motorschubphasen aktiviert. Abbildung 14 veranschaulicht den Einfluss des EHC-Betriebs in Schubphasen. Da die Schubphasen im NEDC allerdings recht kurz ausfallen, wirken sich die Heizphasen eher gering auf die Temperatur im Kat aus. Dennoch zeigt sich eine Steigerung des NO_x -Wirkungsgrades von 53% auf 55%. Anscheinend kann das Temperaturniveau gerade in den Bereich verstärkter SCR-Reaktionen angehoben werden.

Einen deutlicheren Einfluss auf die Abgastemperatur zeigt sich beim Heizen ausschließlich in den Beschleunigungsphasen. Hierbei konnte an NO_x-Umsatz von 57% realisiert werden.

Bei höherem Energieeintrag in das System durch längere Heizphasen jeweils bei $V_{Fzg} > 0$ km/h - beginnend bei 100 Sekunden nach Zyklusstart - lässt sich das Temperaturniveau nochmals deutlich anheben. Dies zeigt sich auch beim auf 60% gestiegenen NO_x-Umsatz.

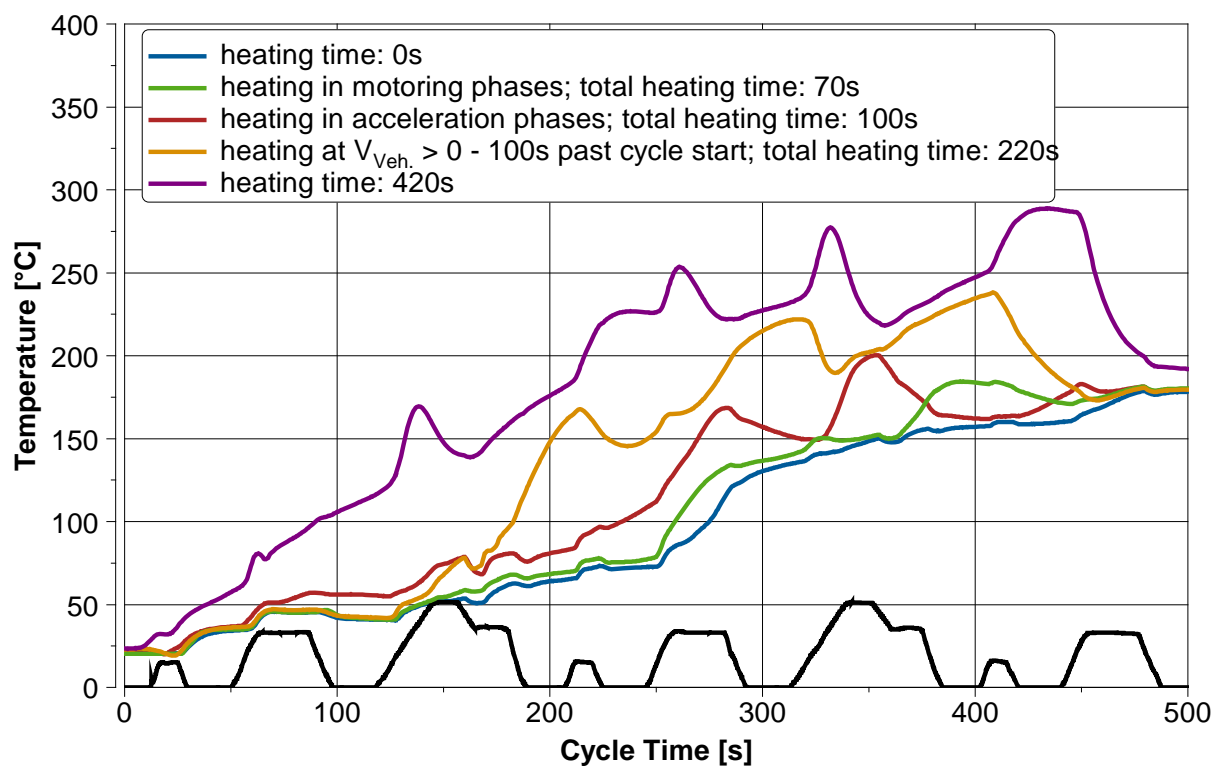


Abbildung 14: Einfluss unterschiedlicher Heizstrategien auf die Abgastemperatur im SCR Katalysator ($T_{i.1}$)

Zusammenfassend ist zu sagen, dass durch den Einsatz des EHC gerade im Kaltstartbereich des Motors deutlich Einfluss auf die Abgastemperatur im SCR Katalysator genommen werden kann. Dies führt, zum Teil, zu einer signifikanten Verbesserung des NO_x-Wirkungsgrades. Allerdings ist der Applikationsaufwand zur Entwicklung der richtigen Heizstrategie zu berücksichtigen. Des Weiteren muss der für die Heizmaßnahmen benötigte Energiebedarf gegenüber anderen Maßnahmen - zum Beispiel motorischen Maßnahmen - betrachtet werden.

5 Energiebilanz / Energiemanagement mit elektrischer Beheizung

Parallel zu den in Kapitel 4 beschriebenen Emissionsmessungen wurden an einem weiteren Motorprüfstand generelle Energiebetrachtungen an einem EHC durchgeführt. Als Motor diente ein 4-Zylinder Diesel Motor mit 2,0L Hubraum und einer Leistung von 103 kW bei einer Drehzahl von 4000 1/min. Der Motor besitzt Common Rail Einspritzung sowie einen Abgasturbolader mit zuschaltbarer Kühlung.

Der EHC mit einer Leistung von 1,6 kW wurde in motornaher Position eingesetzt und als zusätzlicher Verbraucher in das elektrische Bordnetz integriert. Über den Einsatz von Shunt-Widerständen ließen sich die Leistungen des Generators und des E-Kats bestimmen.

Bei der Untersuchung des Kraftstoffverbrauchs in verschiedenen Konstantlastpunkten wurde die Last über Drehzahl und Drehmoment vorgegeben und über die Variation von alpha eingestellt.

Um den benötigten Energieaufwand und den daraus resultierenden Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch abschätzen zu können, wurde zunächst eine Worst-Case Betrachtung durchgeführt. Dabei wurde zugrunde gelegt, dass die benötigte elektrische Energie vollständig über die Wirkungsgradkette Motor/Generator/(Batterie/)E-Kat erzeugt wird. Die jeweiligen, für die vorläufigen Berechnungen angenommenen, gemittelten Wirkungsgrade sind in Tabelle 3 dargestellt.

$\eta_{\text{Motormittel}}$	0,15
$\eta_{\text{Lichtmaschine, mittel}}$	0,8
$\rho_{\text{Dieselkraftstoff}}$	0,835 g/ml
$H_{\text{u, Diesel}}$	42,48 kJ/g
$\text{CO}_2 - \frac{\text{Emission}}{\text{ml Diesel}}$	2,65 g/ml

Tabelle 3: Wirkungsgrade und Kenngrößen für die Berechnung des theoretischen Zusatzverbrauchs

Eine Berechnung des theoretischen Zusatzverbrauchs anhand dieser Annahmen, ergibt für eine Leistungsaufnahme am E-Kat von 1.6 kW und eine Heizdauer von 300s einen Mehrverbrauch von ca. 94g bzw. 113ml über den Gesamtzyklus. Dies entspräche bei einem Gesamtverbrauch von 6l/100km einer Erhöhung um etwa 17%.

Im Realbetrieb führt eine Reihe von Effekten zu einer deutlichen Verbesserung dieser Basis-Bilanz:

- Die Wirkungsgrade der theoretischen Betrachtung basieren auf Annahmen; im realen Betrieb können diese je nach Lastpunkt deutlich variieren
- Hoher Anteil an Schubphasen, in denen der Generator ohne Kraftstoffaufwand betrieben wird (ca. 19% im ECE-Zyklus)
- Lastpunktverschiebung durch zusätzliche Generatorlast → Verbesserung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs speziell in den Niedriglastpunkten
- Möglichkeit des Start-Stopp-Betriebes → keine Beheizung im Leerlauf notwendig
- Energiemanagement → Laden der Batterie nur in den Schubphasen

Abbildung 15 zeigt den Leistungsbedarf eines Fahrzeugs im ECE-Zyklus (ohne elektrische Beheizung). Man erkennt, dass, abgesehen von den kurzen Beschleunigungsphasen, die Bedarfsleistung im Bereich 1-5 kW liegt.

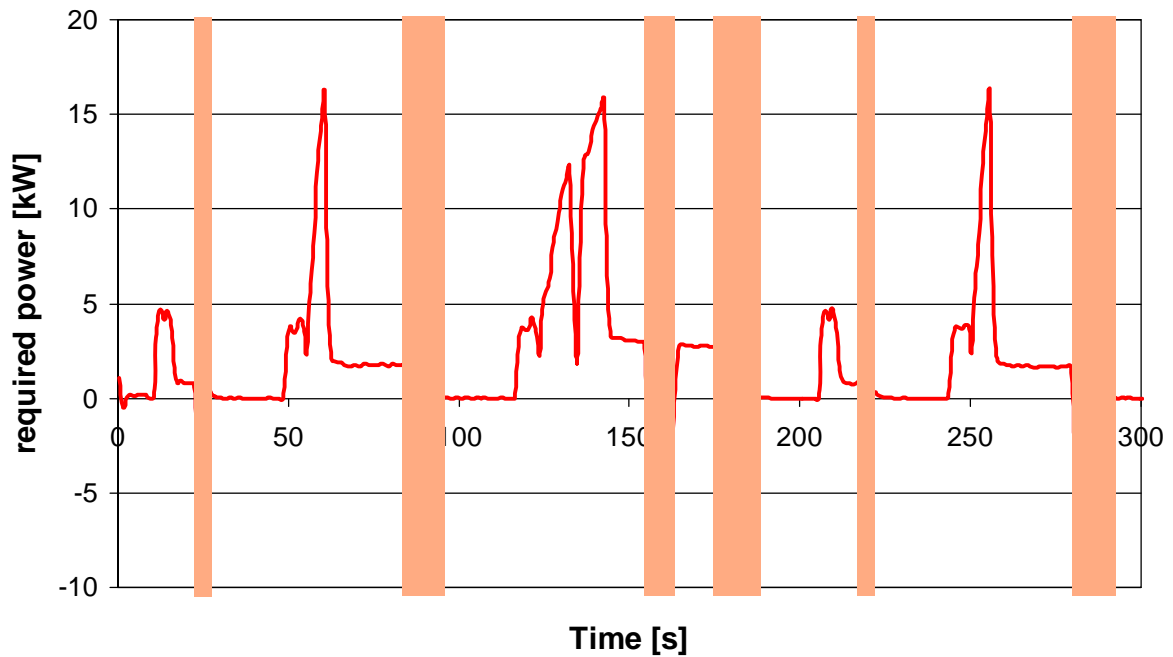


Abbildung 15: Betrachtung der Bedarfsleistung für die ersten 300 Sekunden im NEFC sowie Darstellung der Schubphasen (19%)

Im Verbrauchskennfeld des Motors liegen die Lastpunkte und die dazugehörigen Muschelkurven sehr dicht beieinander (Abbildung 16). Es ist deshalb zu erwarten, dass durch die zusätzliche Generatorlast bei Beheizung der spezifische Verbrauch verbessert wird.

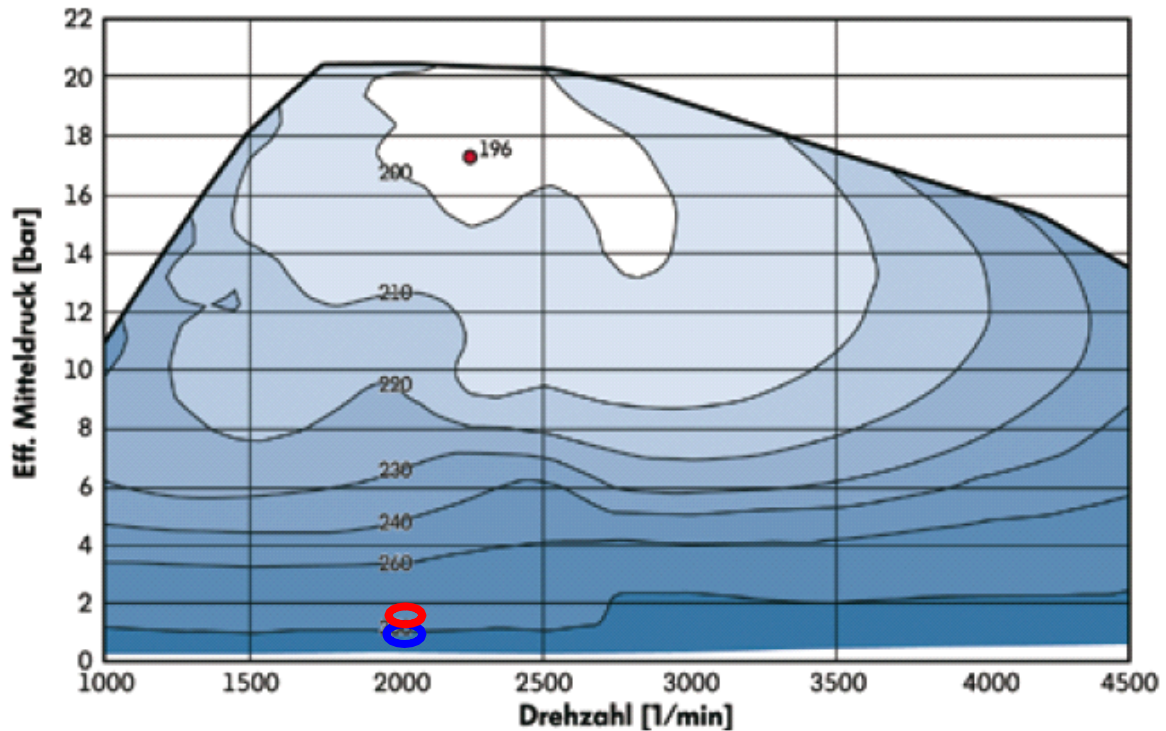


Abbildung 16: Verbrauchskennfeld eines Dieselmotors mit entsprechenden Lastpunkten aus dem NEDC [6]

Um diesen Effekt zu quantifizieren, wurden die relevanten Konstantpunkte aus dem Zyklus am Motorprüfstand nachgefahren, und zwar jeweils mit und ohne elektrische Beheizung des Katalysators. Abbildung 17 zeigt den jeweiligen spezifischen Kraftstoffverbrauch mit und ohne Beheizung. Speziell in den Niedriglastpunkten bei 15 km/h und 30 km/h wird der spezifische Verbrauch deutlich reduziert.

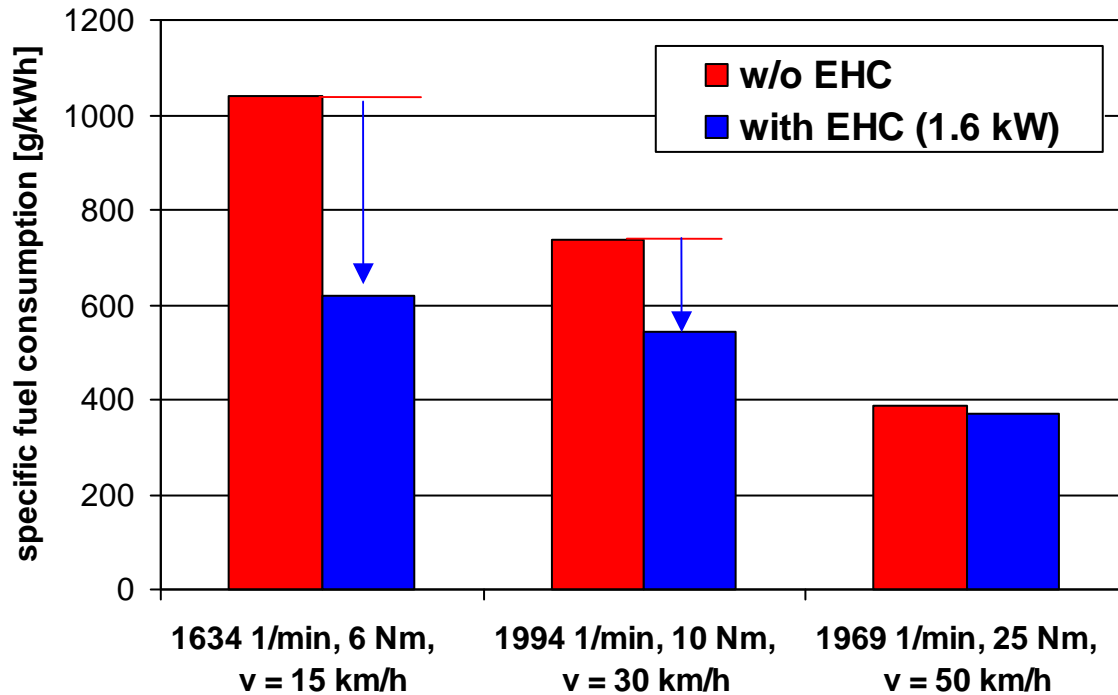


Abbildung 17: Spezifische Kraftstoffverbräuche in Konstantlastpunkten des ECE mit und ohne elektrische Beheizung des Katalysators

Zusätzlich zu den Konstantlastpunkten wurden NEDC-Tests durchgeführt, um den realen Zusatzverbrauch durch die elektrische Beheizung zu ermitteln. Hierbei wurden die Leistungsaufnahme des EHC sowie die Leistungsabgabe des Generators aufgezeichnet. Im normalen Betrieb ohne Heizung sinkt die Generatorleistung nach einem anfänglichen Peak kontinuierlich auf einen konstanten Wert von ca. 120W ab, was in etwa dem durchschnittlichen Stromverbrauch des Fahrzeugs entsprechen dürfte.

Betrachtet man zunächst eine Heizstrategie bei der der EHC in den ersten 300 Sekunden zugeschaltet wird (worst-case), so fährt der Generator auf seine maximale Leistung, die im Bereich 2 kW liegt. In den Leerlaufphasen sinkt die Leistung aufgrund der geringen Motordrehzahl auf einen Wert um 1.2 kW ab. Da der Leistungsbedarf des EHC in diesem Fall die Differenz zwischen Generator-Grundlast und der Maximalleistung übersteigt, muss ein Teil der Energie aus der Batterie zugeführt werden. Dies führt dazu, dass auch nach Abschalten des EHC der Generator auf einem höheren Lastniveau läuft, um die Batterie wieder aufzuladen. Wie aus den Verläufen zu erkennen ist, wird jedoch selbst bei diesem großen Energiebedarf der Ladezustand der Batterie am Ende des NEDC bereits wieder ausgeglichen (Abbildung 18).

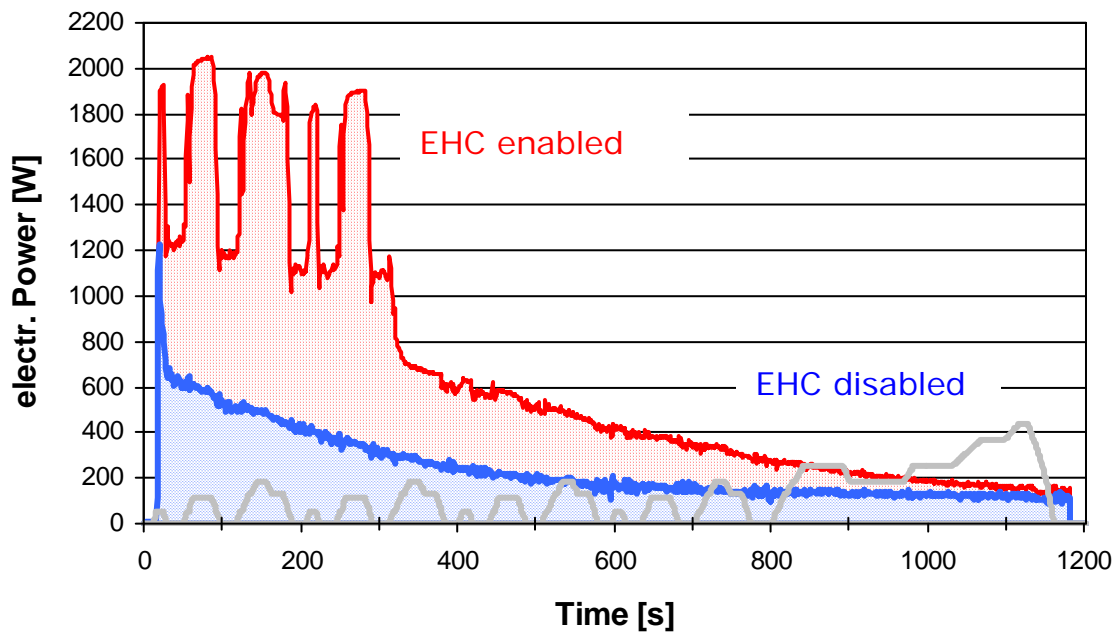


Abbildung 18: Leistungsabgabe des Generators mit und ohne elektrische Beheizung im NEDC (1,6 kW für 300 Sekunden)

Ein Vergleich der für den EHC benötigten beziehungsweise der vom Generator erzeugten Energien, ist in Abbildung 19 dargestellt - es ergibt sich ein Energieverbrauch am EHC von 0.130 kWh und eine vom Generator erzeugte Leistung von 0.138 kWh.

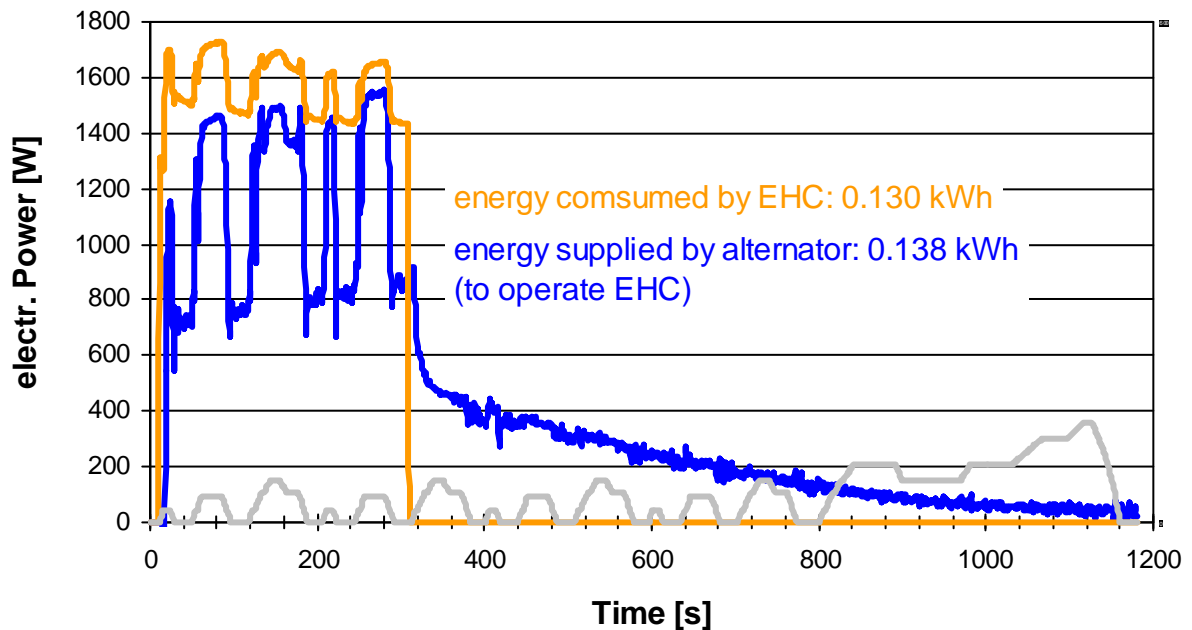


Abbildung 19: Vergleich des Leistungsbedarfs des EHCs zur Leistungsabgabe des Generators im NEDC (1,6 kW für 300 Sekunden)

Die Differenz ist zu einem Teil den Leitungsverlusten zuzusprechen, zu einem anderen Teil dem Entlade-/Auflade-Wirkungsgrad der Batterie. Diese Verluste könnten somit nochmals minimiert werden, wenn der EHC mit niedrigerer Leistung betrieben und somit komplett vom Generatorstrom versorgt werden könnte.

Die beschriebenen Effekte wirken sich verständlicherweise auch auf den, im Vergleich zum theoretischen ermittelten Mehrverbrauch, real erzielten Mehrverbrauch während des EHC Betriebs aus. Die theoretische Betrachtung erbrachte einen Mehrverbrauch von 113 ml. Gemessen wurde bei einer Heizleistung von 1,6 kW und einer Heizdauer von 300s ein Verbrauchsanstieg von 35 Gramm entsprechend 42 ml (Abbildung 20).

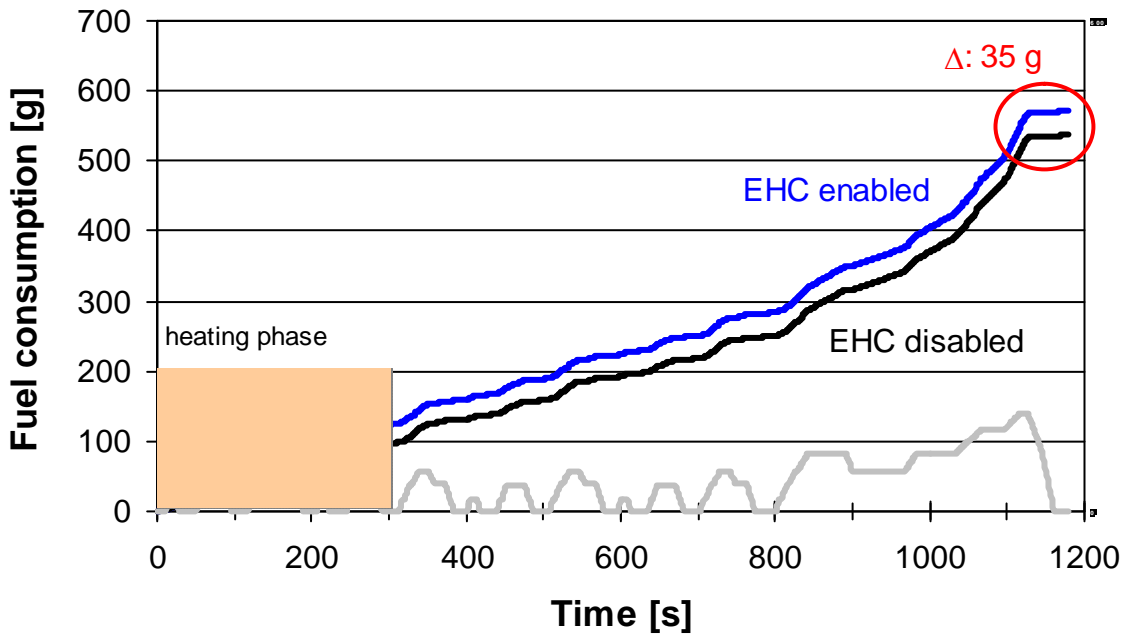


Abbildung 20: Mehrverbrauch im NEDC aufgrund der elektrischen Beheizung (1.6 kW für 300s)

Die ermittelten Werte müssen nun im Hinblick auf die erreichbare Wirkungsgradsteigerung hinsichtlich NO_x Umsatz und vor allem im Vergleich zu motorischen Heizmaßnahmen bewertet werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen eines gemeinsamen Projektes der TU Darmstadt, der Umicore AG & Co KG und der Emitec GmbH wurde der Einsatz eines elektrisch beheizbaren Katalysatorträgers mit SCR-Katalysatorbeschichtung am Motorenprüfstand untersucht. Die vorgestellten Ergebnisse umfassen Parametervariationen hinsichtlich Heizdauer und dem Beginn der elektrischen Heizung.

Die erzielten Ergebnisse bestätigen das Potenzial eines solchen Konzepts. Gegenüber der unbeheizten Variante konnte, auch mit der gewählten Standard SCR-Katalysatorstechnologie, bei korrekter Parameterwahl eine signifikante Steigerung des NO_x -Wirkungsgrades erzielt werden.

Eine wesentliche Limitierung ergibt sich allerdings durch die unbeheizte Dosierstelle. Trotz höherer Temperaturen im SCR Katalysator kann, ohne die Gefahr der Bildung von Ablagerungen, der Dosierbeginn zeitlich nicht

nach vorne verlegt werden. Hier bietet sich weiteres Potenzial zur Systemverbesserung.

Der Einsatz eines elektrisch beheizten Katalysators kostet Energie. Der tatsächliche Mehrverbrauch ist allerdings geringer, als vorläufige Berechnungen zeigten, bei denen überschlagene Wirkungsgrade für Motor und Lichtmaschine angenommen wurden. Dies liegt zum einen daran, dass die realen Wirkungsgrade, zum Beispiel der Lichtmaschine, aufgrund der zusätzlichen Belastung durch den EHC höher sind als theoretisch abgeschätzt. Hinzu kommt weiterhin der Effekt der Lastpunktverschiebung, welche einen wesentlichen Einfluss auf den Verbrauch in den unteren Teillastpunkten hat.

Zusätzliches Potential ergibt sich mit fortschreitender Hybridisierung der Fahrzeuge. So besteht hierbei die Möglichkeit, die benötigte Heizenergie aus der Batterie zu entnehmen, welche dann über Rekuperation wieder geladen wird. Dadurch wird eine zusätzliche Belastung der Lichtmaschine vermieden.

Die optimale Strategie wird allerdings von dem vorliegenden Temperaturniveau, der benötigten Heizleistung sowie dem Emissionsniveau abhängen und somit für jede Applikation individuell zu ermitteln sein. Die je nach Applikation mögliche Absenkung sowohl der Heizleistung als auch der Heizdauer führt zu einem, im Vergleich zum theoretisch abgeschätzten, weiterhin verringerten Mehrverbrauch.

Acknowledgements / Danksagungen

Die Autoren bedanken sich bei allen Kollegen, die mit ihren Anmerkungen, den Messergebnissen, den Diskussionen etc. zur Erstellung dieser Veröffentlichung beigetragen haben.

References / Literatur

- [1] P. Spurk, W. Müller, C. Beidl, P. Weickgenannt, G. Hohenberg, 2010, Abgasnachbehandlung bei Hybridfahrzeugen - welche Anforderungen ergeben sich daraus?, 31. Internationales Wiener Motorensymposium 2010; VDI Verlag Reihe 12 Nr. 716
- [2] P. Spurk, S. Frantz, F.-W. Schütze, H.-D. Noack, W. Müller, 2010, Die NO₂-Bildung am DOC/DPF-System - eine Systemanalyse, 6. Internationales Forum Abgas- und Partikel-Emissionen 2010
- [3] P. Spurk, E. Lox, 2004, Competitive systems for the NO_x storage catalyst for diesel engines, 3. Internationales Forum Abgas- und Partikel-Emissionen
- [4] S. Neugebauer, J. Tonhauser, BMW Group, W. Maus, J. Diringer, A. Schatz, Emitec GmbH, 2006, Effiziente Dynamikkonzepte unter schärfsten Abgasvorschriften, 3. Emission Control Dresden
- [5] W. Maus, R. Brück, R. Konieczny, A. Scheeder, Emitec GmbH, 2010, Der E-Kat als Thermomanagementlösung in modernen Fahrzeuganwendungen, MTZ - Motortechnische Zeitschrift, Ausgabe 05/10
- [6] J. Hadler, F. Rudolph, H-J Engler, S. Röpke, 2007, Der neue 2,0-l-4V-TDI-Motor mit Common-Rail-Einspritzung - Moderne Dieselsechnologie von Volkswagen, MTZ - Motortechnische Zeitschrift, Ausgabe 11/07