
Effizientes Thermomanagement für zukünftige Motor- und Emissionskonzepte – Möglichkeiten zur CO₂ Reduktion mittels beheiztem Katalysator

A. Schatz, R. Konieczny; Emitec GmbH

Kurzfassung

Die fortwährende Optimierung der Wirkungsgrade moderner Motoren und die damit einhergehende Absenkung der CO₂-Emission führt zu deutlich sinkenden Abgastemperaturen. Dadurch wird die Funktion der Abgasnachbehandlung deutlich beeinflusst. Je nach Applikation und Art der Abgasnachbehandlung wird es in Zukunft verstärkt notwendig werden, durch gezieltes Thermomanagement die Funktion der Abgasnachbehandlung zu unterstützen. Eine besonders effiziente Variante stellt dabei die elektrische Beheizung des Katalysators dar, da die Energie gezielt am Katalysator eingebracht wird und dadurch die Wärmeverluste minimiert werden. Das Paper zeigt die Funktion und die Wirkungsgrade auch im Vergleich zum konventionellen motorischen Katheizen für unterschiedliche Applikationen und Abgasnachbehandlungstechnologien auf.

Abstract

The continuous optimization of engine efficiencies and the resulting decrease in CO₂-emission leads to significantly reduced exhaust gas temperatures. This has a strong influence on exhaust gas aftertreatment. Depending on the application and the type of aftertreatment used, specific thermomanagement will be of increasing importance in the future to support the function of the aftertreatment system. A very efficient way in this regard is given by the electrical heating of the catalyst, where the energy is directly feeded into the catalyst, thereby minimizing potential temperature losses. This paper shows the functionality and efficiency for different applications and exhaust aftertreatment technologies also in comparison to conventional engine heating measures.

1. Einleitung

In den letzten Jahren wurden eine Vielzahl von verbrauchsreduzierenden Maßnahmen erfolgreich am Verbrennungsmotor und am Antriebsstrang integriert [1]. Stichworte wie Turbolader und Direkteinspritzung beim Diesel oder Benzindirekteinspritzung und variable Ventiltriebe bei Ottomotoren seien genannt. Auch in weiterer Zukunft spielt der Motor als Hauptenergiewandler bei der Verbrauchsreduzierung eine wichtige Rolle bei der effizienten Energienutzung, aber erst das Verständnis des Gesamtsystems aller Energieströme im Fahrzeug eröffnet weitere Lösungswege. Jegliche Nebenfunktionen des Motors müssen somit dahingehend überprüft werden, ob Alternativen existieren, die einen Vorteil hinsichtlich CO₂ Emission bewirken. Als Beispiel werden in dieser Arbeit die Möglichkeiten zur Verbrauchsreduzierung durch geeignete und ‚sinnvolle‘ Elektrifizierung der Wärmezufuhr an den Abgasnachbehandlungssystemen am Ottomotor (TWC) und am Dieselmotor (DOC und SCR) diskutiert. Selbst oder sogar im Besonderen bieten Fahrzeuge mit Hybridstruktur, die als Folge der CO₂ Einsparpotentiale für die Zukunft entwickelt werden, Möglichkeiten an, die in der Abgasnachbehandlung benötigte Wärmeenergie auf elektrischem Wege und nicht mehr rein motorisch zur Verfügung zu stellen.

2. Thermomanagement

Gezieltes Thermomanagement ist im Bereich Otto-Motoren bereits seit längerem Standard. Spätestens seit der Einführung der ULEV-Gesetzgebung werden zum schnellen Aufheizen des Katalysators spezielle motorische Maßnahmen zur Anhebung der Abgastemperatur vorgenommen. Dadurch konnte der Kaltstartbereich, d.h. die Zeitspanne, die der Katalysator braucht, um seine volle Effektivität zu erlangen, von mehr als 20 s auf unter 5 s reduziert werden. Dabei wird der Motorwirkungsgrad durch entsprechende Maßnahmen (z.B. Leerlaufdrehzahl, Zündzeitpunkt) künstlich verschlechtert und so ein größerer Teil der Kraftstoffenergie für die Aufheizung des Abgases eingesetzt. Dies führt natürlich zu einem erhöhten Verbrauch in diesem Betriebsmodus. Da die Maßnahme aber lediglich im Kaltstart notwendig ist und damit bezogen auf den Gesamttest nur einen geringen Anteil hat, hält sich der Mehrverbrauch in akzeptablen Grenzen. Allerdings muss dies unter den neuen Randbedingungen (CO₂-Gesetzgebung) kritisch hinterfragt werden.

Im Dieselmotorbereich waren in der Vergangenheit solche Maßnahmen nicht notwendig. Zwar sind die Temperaturen im Dieselmotor seit jeher deutlich niedriger als beim Otto-Motor, allerdings konvertiert der Katalysator aufgrund der anderen Randbedingungen die Schadstoffe auch bereits bei deutlich niedrigeren Temperaturen. Durch die fortwährende Optimierung der motorischen Wirkungsgrade zur Absenkung des Kraftstoffverbrauchs

sind die Temperaturen im Niedriglastbetrieb inzwischen aber so niedrig, dass der DOC selbst mit sehr hohen Edelmetallbeladungen erst sehr spät anspringt, vor allem in gealtertem Zustand. Hinzu kommen neue Abgasnachbehandlungsverfahren wie z.B. SCR, die ebenfalls eine starke Temperaturabhängigkeit aufweisen. Weiterhin treten diese tiefen Temperaturen beim Diesel nicht nur in der Kaltstartphase, sondern generell im Niedriglastbetrieb auf. Mögliche Thermomanagement-Maßnahmen betreffen daher einen deutlich größeren Anteil am Gesamtbetrieb. Aus diesem Grund ist es zwingend erforderlich, die Effektivität der eingesetzten Maßnahmen genau zu bewerten. Neben den motorischen Maßnahmen erscheint dabei vor allem die elektrische Beheizung des Katalysators interessant. Dies sei nochmals an folgendem Diagramm erläutert.

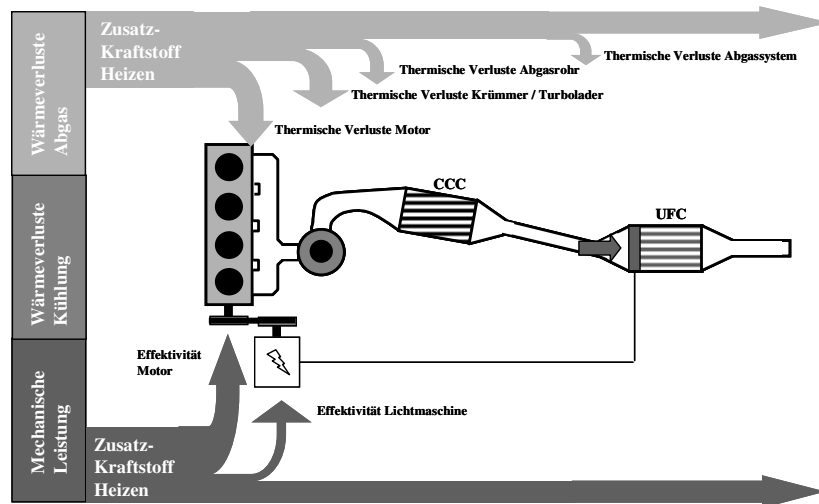


Abb. 1 Energieströme bei innermotorischer und elektrischer Wärmezufuhr

Beim motorischen Heizen wird durch eine künstliche Verschlechterung des Motorwirkungsgrades der Anteil der Abgasenergie erhöht. Auf dem Weg zum Katalysator gehen allerdings unterschiedliche Anteile dieser Zusatzenergie verloren, so z.B. im Motor selbst, im Krümmer / Turbolader sowie in der dem Katalysator vorgelagerten Abgasanlage, so dass nur ein geringer Prozentsatz der ursprünglich eingebrachten Energie am Katalysator angelangt. Beim elektrischen Heizen [2] muss im ungünstigsten Fall die elektrische Energie zunächst über den Generator erzeugt werden, der dafür mit mechanischer Energie aus dem Motor versorgt werden muss. Diese ist mit den bekannten Verlusten behaftet (je nach Betriebspunkt besserer Wirkungsgrad durch Lastpunktverschiebung). Hinzu kommt der Wirkungsgrad der Lichtmaschine selbst. Diese elektrische Energie kann dann aber nahezu verlustfrei direkt in den Katalysator eingespeist werden und führt dort lokal zu der erwünschten Temperaturerhöhung.

3. Einsatz des beheizbaren Katalysators im Bereich Ottomotoren

Wie oben schon erwähnt, entsteht beim Fahrzeug mit Ottomotor ein Großteil der Emissionen während der ersten Sekunden im Kaltstart. Um diese zu reduzieren, wird der Katalysator üblicherweise schnellstmöglich durch motorisches Katheizen auf Temperaturen von $> 280\text{ °C}$ angehoben. Der Einsatz eines elektrisch beheizbaren Katalysators bietet eine Alternative zu diesem Standardverfahren. Motorisches Katheizen

3.1.1. Energiebilanz über den Verlauf der Abgasanlage

In Weiterführung der ersten Untersuchungen [3] wurde das Verbrauchs-Einsparpotential sowie die erzielbaren Vorteile mit elektrischer Beheizung untersucht, welche sich bei Positionierung des Katalysators im motornahen Bereich ergeben. Dazu wurde an einem CO_2 -Konzeptfahrzeug (3 Zyl. Turbo DI mit 1,5 l Hubraum und Mild Hybrid Funktion) eine Energieanalyse durchgeführt. Abbildung 2 zeigt den Energieaufwand in der motornaher und in Unterboden-Position, jeweils berechnet aus den eingespritzten Kraftstoffmengen.

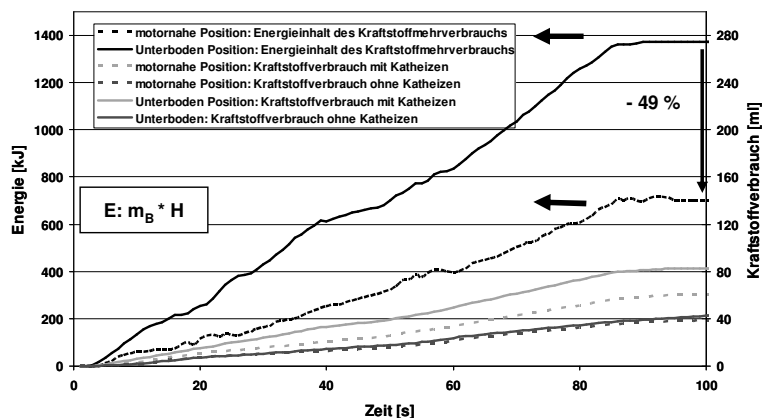


Abb. 2 Eingespritzte Kraftstoffmenge und theoretischer Energieinhalt mit und ohne motorische Katheizmaßnahmen

Entscheidend für die Wirksamkeit der Methode des motorischen Aufheizens des Katalysators während des Kaltstarts ist die Energiemenge, die innerhalb eines gewissen Zeitraums am Katalysator zur Verfügung steht. Um die verbleibenden Wärmemengen an den verschiedenen Positionen (vor Turbolader, vor Katalysator) und die daraus resultierenden Verluste ermitteln zu können, wurde die zusätzliche Wärmemenge mit Hilfe der spezifischen Wärmekapazität des Abgases innerhalb der ersten 100 s im Fahrzyklus ermittelt. Betrachtet wird im Folgenden nur noch die motornaher Position.

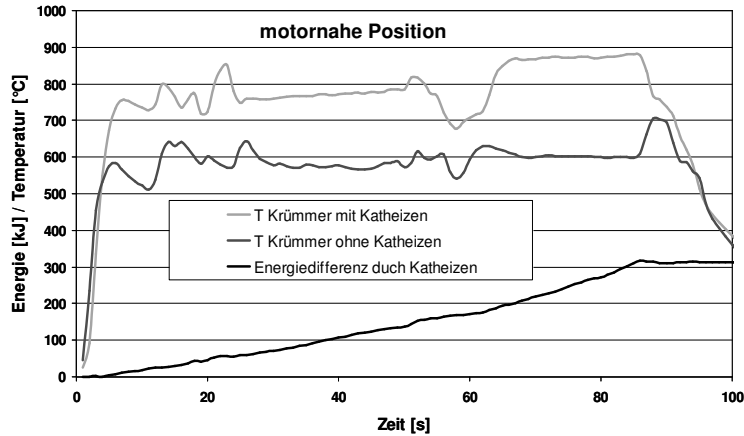


Abb. 3 Energieanstieg des Abgases vor Turbolader in Abhängigkeit der Katheizmaßnahmen

Abbildung 3 zeigt, dass von der vom Motor zur Verfügung gestellten Energie von 700 kJ am Eintritt in das Abgassystem (vor Turbolader) nur noch knapp über 300 kJ zur Verfügung stehen. Das Aufheizen der Massen vor Katalysator verringert diese Wärmemenge nochmals um ca. 80 kJ (Abbildung 4). Zusammengefasst ergibt sich ein Wirkungsgrad von 32 % für das motorische Aufheizen des Katalysators in motornahe Position. Eine Positionierung in den Unterbodenbereich lässt diesen Wirkungsgrad weiter auf etwa 22% sinken [3].

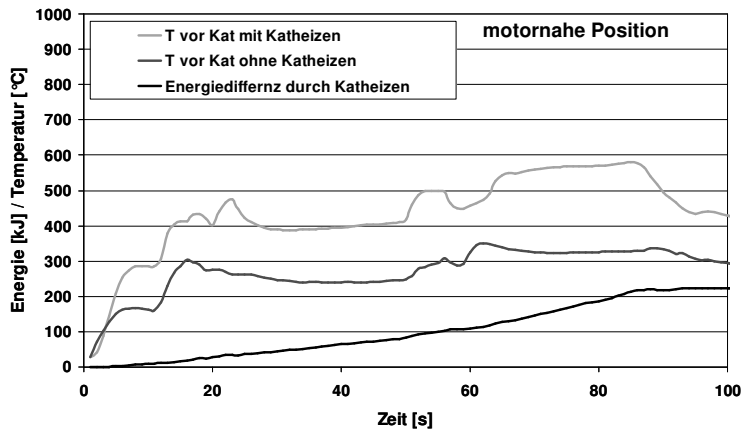


Abb. 4 Energieanstieg des Abgases am Katalysatoreingang in Abhängigkeit der Katheizmaßnahmen

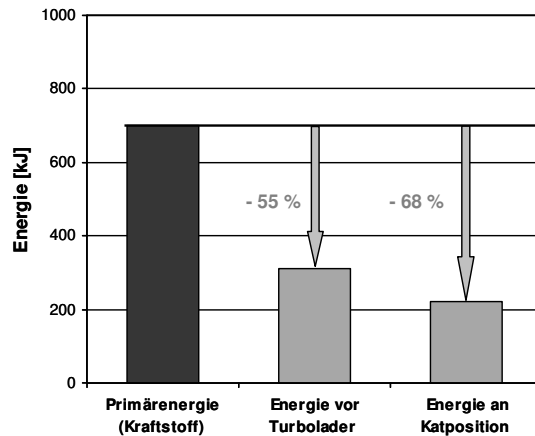


Abb. 5 Energieumwandlung der chemischen (Kraftstoff) in thermische Energie (Abgastemperatur) durch motorische Katheizmaßnahmen während der ersten 100 s im NEDC (motornahe Position)

3.2. Elektrisches Katalysatorheizen

Die Möglichkeit des elektrischen Katheizens erlaubt es, den Motor beim Kaltstart in seinem für diesen Betriebszustand CO_2 verbrauchsoptimalen Kennfeld mit niedrigstem Massenstrom zu fahren. Des Weiteren erfolgt der Energieeintrag bei diesem Ansatz lokal direkt am Eingang in den Katalysator, so dass weitere thermische Massen der Abgasanlage eine untergeordnete Rolle spielen. Nichtsdestotrotz muss auch diese Energie im Normalfall durch den Motor, ggf. über den Energiespeicher Batterie zwischengespeichert, zur Verfügung gestellt werden. Zusätzlich müssen mögliche Leitungsverluste oder sonstige elektrische Verluste in die Wirkungsgradbetrachtung dieser Maßnahme mit einbezogen werden. Vorteile im Gesamtsystem ergeben sich wiederum durch die mögliche Nutzung rekuperativer Energie.

Für die Analyse des Wirkungsgrades der elektrischen Katheizmaßnahme muss in einem ersten Schritt die benötigte Dauer der elektrischen Beheizung bestimmt werden (Abbildung 6). Der Ansatz ist dabei, dass die HC und CO Tailpipe Emissionen mindestens die gleichen Werte erreichen, wie sie durch motorisches Katheizen erzielt wurden. Dazu wurde im Fahrzeug am Rollenprüfstand zeitgleich mit dem Motorstart der Katalysator mit einer Heizleistung von 1,8 kW mit verschiedenen Heizedauern aktiviert.

Um die energetischen Verluste dieser Heizmaßnahme zu bestimmen, wurde eine Simulation eingesetzt, die die komplette Fahrzeugstruktur mit allen Wirkungsgraden und Verlusten abbildet. Die Übereinstimmung dieser Berechnungen mit der Realität wurde

schon in [3] beschrieben und kann somit als Abschätzung des primären Energiebedarfes dienen.

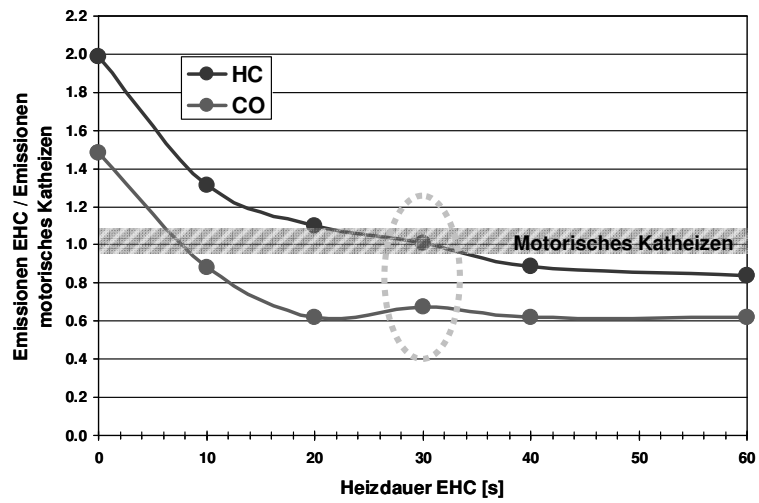


Abb. 6 Verhältnis der Tailpipe Emissionen bei motorischem Katheizen / elektrischem Katheizen in Abhängigkeit der Heizdauer

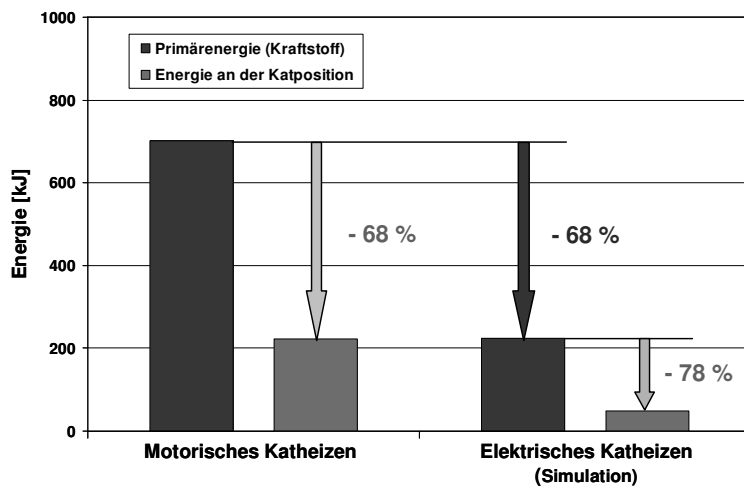


Abb. 7 Vergleich der eingesetzten Primär- und der resultierenden Energien an der Katposition in den ersten 100 s des NEDC (gleiche Tailpipe Emissionen)

Es zeigt sich, dass zwar die absoluten Verluste beim elektrischen Heizen geringfügig höher sind, dass aber die zugeführte Primärenergie im Falle des motorischen Heizens

dennoch deutlich größer ist. Dies ist in erster Linie durch den deutlich höheren Massenstrom beim motorischen Katheizen bedingt. Dieser hohe Massenstrom ist zum einen unmittelbar zur Erzielung der angestrebten Temperaturerhöhung notwendig (siehe Kapitel 2), zum Anderen, um die thermischen Verluste und zeitliche Verzögerung entlang der Abgasanlage zu kompensieren und den Katalysator möglichst früh auf die notwendige Light-Off Temperatur zu erhitzen. Die überschüssige Energie kommt zeitverzögert beim Träger an, kann aber nicht mehr unmittelbar in einen Effektivitätsvorteil umgesetzt werden (Abbildung 8).

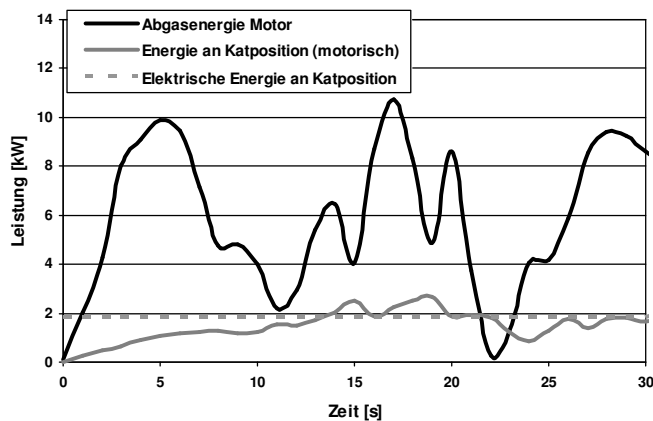


Abb. 8 Am Katalysator zur Verfügung stehende Energieströme im Vergleich zur motorisch eingebrachten Primärenergie

In der Gesamtbilanz ergibt sich, vor allem auch durch den oben erläuterten Einfluss der notwendigen Gesamtenergiemenge, eine mögliche Kraftstoffeinsparung von ca. 1-2% mit elektrischem Katheizen im Vergleich zum motorischen Heizen.

3.4 Einsatz eines beheizbaren Katalysators in Hybridfahrzeugen

Im Zuge der Bemühungen um eine weitere deutliche Absenkung der CO₂-Emission spielen Hybrid-Konzepte eine zunehmend große Rolle. Eine interessante Variante stellt dabei der sogenannte Range-Extender dar, der einen rein elektrischen Antrieb aufweist, zusätzlich zum Energiegehalt der Batterie aber die Möglichkeit besitzt, während der Fahrt durch einen Verbrennungsmotor die Batterie wieder aufzuladen. Dadurch kann mithilfe des kompakten ‚Energiespeichers flüssiger Kraftstoff‘ die Reichweite eines solchen Fahrzeuges deutlich erhöht werden [4]. Wenn es gelänge, einen solchen Antrieb ebenso wie ein Elektrofahrzeug (lokal) emissionsfrei fahren zu lassen, und zwar unter allen

Betriebsbedingungen, wäre er endgültig dem reinen Elektroantrieb in allen Bereichen überlegen.

In dieser Hinsicht kann der elektrisch beheizte Katalysator einen wichtigen Beitrag leisten. Da beim Range-Extender das Starten der Verbrennungsmaschine durch den Ladezustand der Batterie bestimmt wird, besteht die Möglichkeit, im Vorlauf zum Motorstart den Katalysator gezielt aufzuheizen. Hierzu ist es vorteilhaft, den Katalysator mit einer gewissen Luftmasse zu durchströmen, um ein Durchheizen des Katalysators zu erreichen und eine möglichst hohe Energiemenge zu speichern. Dies kann zum Beispiel durch den geschleppten Verbrennungsmotor erfolgen. In Abbildung 9 sind die Temperaturen in 25mm axialer Tiefe im Katalysator (inklusive Heizscheibe) dargestellt, und zwar zum Einen für den passiven Betrieb, zum Anderen für unterschiedliche Heizdauern von 30 und 45s. Man erkennt, dass bereits mit 30s Vorheizen die nötige Light-Off Temperatur überschritten wird und somit bereits ein gewisser Teil des Gesamtvolumens die volle Konvertierungsleistung erreicht.

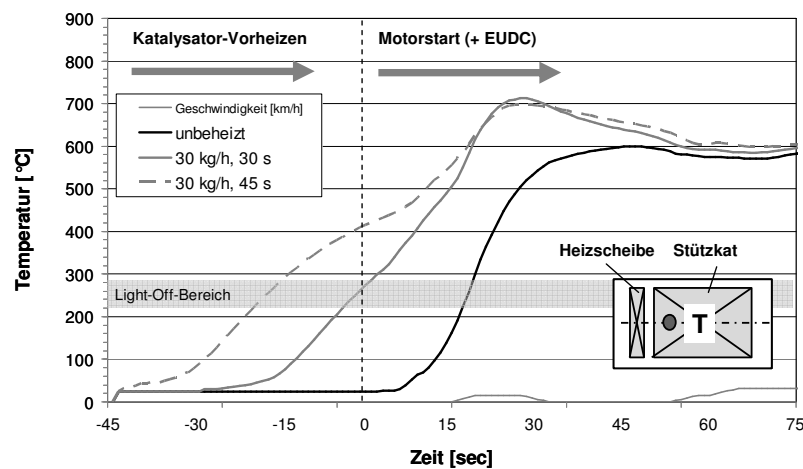


Abb. 9 Temperaturen in 15 mm axialer Tiefe des Stützkatalysators bei Verwendung unterschiedlicher Kaltstartstrategien im NEFZ ($\varnothing 98,4 \times (8 + 140) \text{ mm} / 600 \text{ cpsi}$)

Die Auswirkung dieser Maßnahme wurde zunächst in einem konventionellen NEFZ-Kaltstart untersucht. Wie Abbildung 10 zeigt, kann dabei durch den vorgeheizten Katalysator die HC-Emission gegenüber dem konventionellen Start um ca. 80% gesenkt werden. Die verbleibenden Emissionen werden in erster Linie durch 2 HC-Peaks bestimmt, die zum Einen unmittelbar bei Motorstart und zum Anderen in der Dynamik der ersten Beschleunigung auftreten. Hier erschließt sich weiteres Potential in Verbindung mit dem Hybridkonzept. Hinsichtlich des Kaltstarts kann durch eine erhöhte Startdrehzahl und dementsprechend ‚weichem‘ Einsetzen der Verbrennung die Rohemission deutlich

abgesenkt werden. Im weiteren Betrieb wird der Verbrennungsmotor als Range-Extender vorwiegend in stationären Lastpunkten eingesetzt, so dass hier eine akkurate Gemischregelung ohne Emissionspeaks möglich ist. Beide Maßnahmen gemeinsam ermöglichen einen weiteren großen Schritt in Richtung Null-Emission, was in weiteren Fahrzeugversuchen nachgewiesen werden soll. Diese niedrigen Emissionen sind trotz Kraftstoffmehrerverbrauch durch motorisches Katheizen nicht darstellbar.

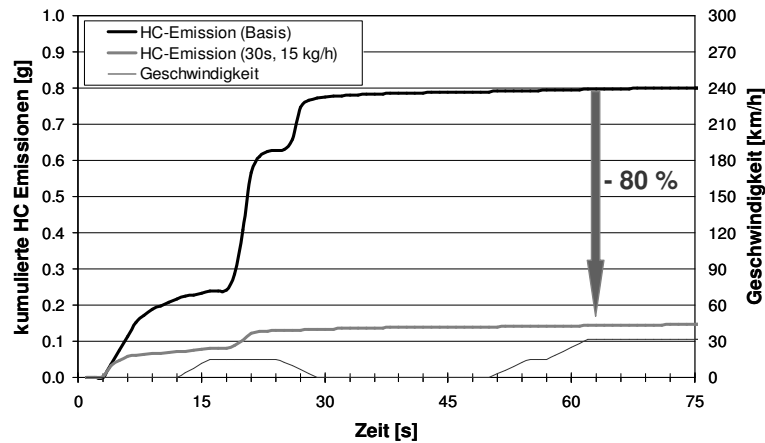


Abb. 10 Einfluss der Vorheizstrategie auf die HC-Emission im Kaltstart des NEFZ

Auch beim Vollhybrid kann man sich Strategien vorstellen, die dafür Sorge tragen, dass der Katalysator zu jederzeit beim Anfahren des Verbrennungsmotors bereits auf Temperatur ist. So könnte z.B. im Niedriglastbetrieb ein gezielter Start mit Vorheizen des Katalysators erfolgen und danach durch eine entsprechende Betriebsstrategie in Kombination mit einer optimierten Isolation des Katalysators die Katalysatortemperatur im aktiven Bereich gehalten werden, so dass jederzeit auch bei unvermitteltem Motorstart die volle Konvertierungsleistung zur Verfügung steht. Im Idealfall lässt sich das mit der Vorgabe verbinden, die Batterie immer im optimalen SOC-Bereich zu halten.

4. Einsatz des beheizbaren Katalysators in modernen Dieselmotoren

4.1. Der elektrisch beheizbare Diesel-Oxidationskatalysator

In den letzten Jahren konnte der Dieselmotor nicht nur bezüglich der Fahrfreude sondern vor allem durch seine zunehmende Wirtschaftlichkeit stark an Bedeutung gewinnen. Viele Maßnahmen wurden ergriffen, um durch einen verbesserten Wirkungsgrad des Diesel-Verbrennungsmotors den CO₂ Ausstoß zu reduzieren. Diese optimierten Brennverfahren verursachen einen deutlichen Rückgang der Abgastemperaturen, was zum Einen zur Folge hat, dass während des Kaltstarts ein langer Zeitraum vergeht, bis die Light Off

Temperatur des Dieseloxidationskatalysators (DOC) erreicht wird und dass an vielen Betriebspunkten, insbesondere bei den Schubphasen, ein erneutes Absenken der Katalysatortemperatur möglich ist. Beide Effekte wirken sich direkt negativ auf die Erfüllung der zukünftigen gesetzlichen Anforderungen bezüglich der HC und CO Emissionen aus.

Ein typischer Temperaturverlauf, wie er beim Durchfahren des ECE-Anteils des NEDC Zyklus entsteht, ist in Abbildung 11 dargestellt. Man sieht, dass erst nach ca. 150 s die Zieltemperatur von 180 °C erreicht ist, und dass anschließend große Zeitanteile diesen Wert erneut unterschreiten. Mit Hilfe des Massenstroms lässt sich auch hier der Energiebedarf bestimmen, der zum Aufheizen auf die Zieltemperatur nötig wäre. Es zeigt, dass nur im Kaltstart eine recht hohe Wärmemenge vonnöten ist, während im weiteren Verlauf ein kontinuierliches Zuführen an Energie mit relativ geringer Leistung ausreicht.

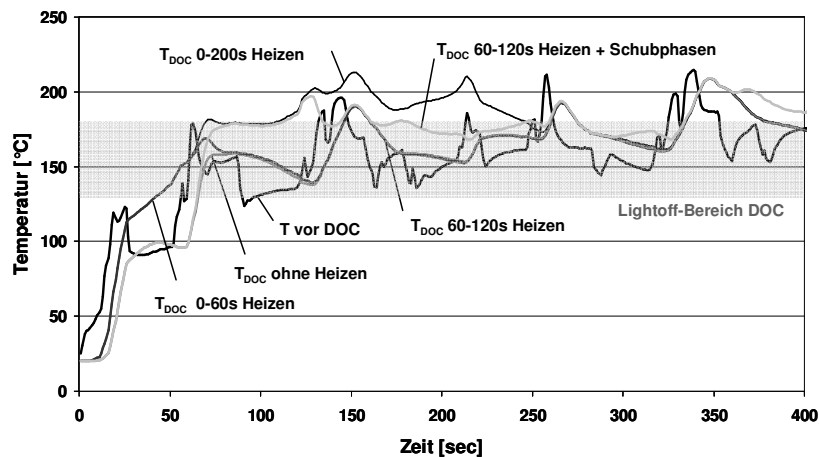


Abb. 11 Temperaturverläufe im Stützkat mit den unterschiedlichen Heizstrategien

Um dieses Wärmedefizit auszugleichen, wurde der elektrische Heizkat als Diesel-Oxidationskatalysator (Leistung 1.2 kW) in das Abgassystem eingesetzt und mit unterschiedlichen Heizstrategien betrieben. Ziel dabei war es, das Verhältnis zwischen eingesetzter Energie und erzielter Wirkungsgrad-Steigerung zu optimieren.

Dazu wurden folgende Heizstrategien untersucht:

- Aktiviertes Heizen mit Motorstart über 200 s
- Aktiviertes Heizen mit Motorstart über 60 s
- Aktiviertes Heizen 60 s nach Motorstart über weitere 60 s
- Aktiviertes Heizen 60 s nach Motorstart über weitere 60 s plus Aktivierung in den Schubphasen

Der Einfluss der unterschiedlichen Strategien auf den Temperaturverlauf ist in Abbildung 11 dargestellt. Erwartungsgemäß werden mit der Heizdauer von 200 s die höchsten Temperaturen erreicht. Allerdings reicht in den ersten 60s die Heizleistung von 1200 W nicht aus, um die Abgastemperatur signifikant über Light-off Temperatur zu bringen. Ab ca. 120 s übersteigt dafür die Temperatur die obere Light-off Temperatur deutlich. Hier reicht bereits ein Nachheizen während der Schubphasen aus, um ein Auskühlen unter 180 °C zu verhindern.

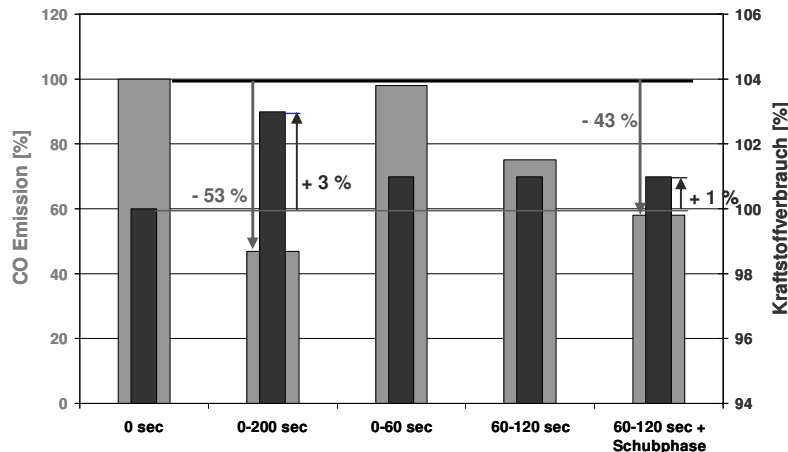


Abb. 12 Einfluss der unterschiedlichen Heizstrategien auf CO-Emission und Kraftstoffverbrauch (berechnet aus Energiebedarf)

Entsprechend wird mit 200 s die größte Reduktion (53 %) erreicht, allerdings zu Lasten eines Mehrverbrauchs von ca. 3 %. Mit der reduzierten Strategie (Heizen ab 60 s + Schubphasen) liegt die Effektivität nur unwesentlich darunter (Verbesserung -43 %), der Kraftstoffmehrverbrauch kann dabei aber auf unter 1% reduziert werden (Abbildung 13).

Dies zeigt, dass man mit einer auf die Applikation maßgeschneiderten Heizstrategie ein sehr gutes Kosten / Nutzen-Verhältnis beim E-Kat erreichen kann. Eine ähnliche Reduktion mithilfe motorischer Katheizmaßnahmen führte in diesem Fall zu einem Mehrverbrauch von ca. 3%, was die Ergebnisse aus Kapitel 3 auch beim Diesel bestätigt.

4.2. Der elektrisch beheizbare Katalysator in SCR Position

Geringe Abgastemperaturen beeinflussen nicht nur die Leistungsfähigkeit des Diesel-Oxidationskatalysators sondern auch die NO_x-Konvertierungen am SCR Nachbehandlungssystem. Durch ein niedriges Temperaturniveau ist die Harnstoffersetzungskinetik bei der Aufbereitung im Abgassystem eine umsatzlimitierende Größe. Zusätzlich ist bei hohen Raumgeschwindigkeiten die

Zeitspanne für eine vollständige Harnstoffzersetzung zu gering, es muss mit Reduktionsmittelschlupf gerechnet werden. Ebenfalls unterstützen höhere Temperaturen die Vermeidung von unerwünschten Nebenprodukten bzw. Ablagerungen (z.B. Ammoniumnitrat).

Vor allem bei SCR-Systemen, die im Unterboden-Bereich angeordnet sind, kann daher der Einsatz eines elektrisch beheizten Katalysators sinnvoll sein. Durch den großen Abstand zum Motorauslass und die großen vorgelagerten thermischen Massen ist die Temperatur am SCR-Kat in diesem Fall besonders kritisch [6].

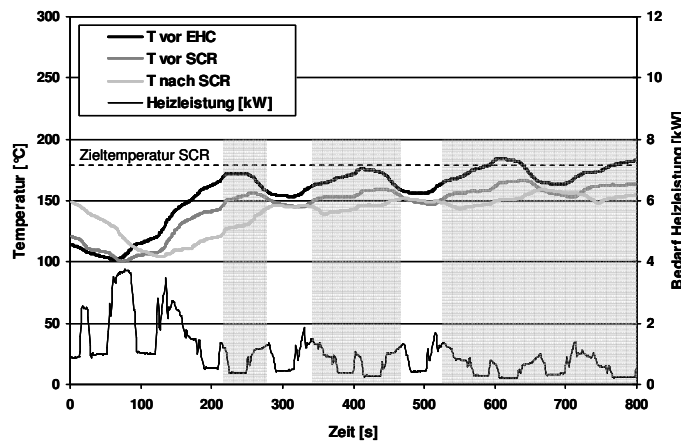


Abb. 13 Temperaturen am SCR Katsystem und notwendiger Energiebedarf zum Erreichen der SCR Betriebstemperatur: Graue Felder: SCR Dosierfreigabe

In diesem Fall wurde vor dem eigentlichen SCR-System ein elektrisch beheizter Hydrolyse-Kat ($P=1.7$ kW) eingesetzt. Die Dosierung des AdBlue erfolgte dabei unmittelbar auf die beheizte Katscheibe, um den größtmöglichen Nutzen aus der Anordnung zu ziehen. Auf Basis dieser Anordnung wurden unterschiedliche Heizstrategien untersucht, um ähnlich wie im Falle des DOCs das bestmögliche Verhältnis aus Effizienzsteigerung und notwendigem Energieeinsatz zu ermitteln. Der SCR-Katalysator war bei diesen Untersuchungen zu Testbeginn komplett Ammoniak-frei, d.h. die hier dargestellten Effektivitäten stellen den Worst-Case dar und erreichen im Realfall mit vorgefülltem NH_3 -Speicher deutlich höhere Werte. Betrachtet werden im Folgenden in erster Linie die Emissionen im UDC-Teil des Tests und die Auswirkung unterschiedlicher Heizstrategien auf das Kaltstartverhalten des Systems. Im wärmeren EUDC-Teil werden üblicherweise Umsatzraten > 90 % erreicht [7], so dass der UDC-Teil einen entscheidenden Anteil am Gesamtergebnis hat.

In Abbildung 13 sind die Temperaturen vor Heizkat sowie vor und hinter SCR dargestellt, und zwar für den nicht beheizten Betrieb. Man erkennt, dass die Möglichkeit zur AdBlue-Eindüsung stark eingeschränkt ist (schraffierter Bereich) und dass im gesamten ECE-Teil die Temperaturen am SCR-Kat deutlich unter 180°C liegen.

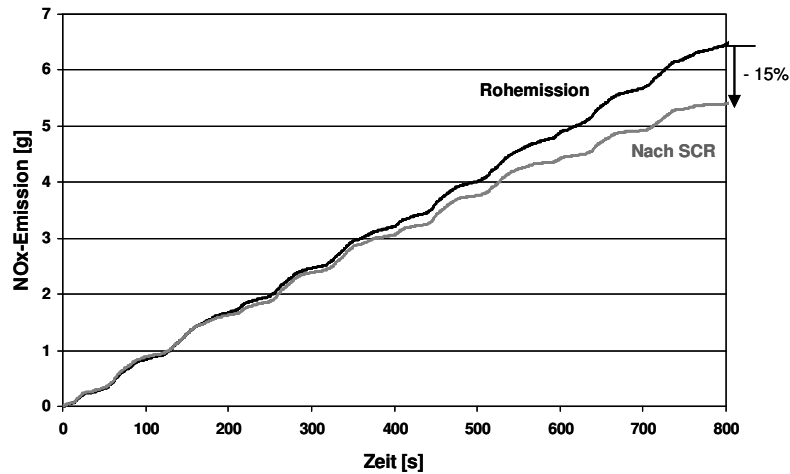


Abb. 14 NOx Emissionen und Konvertierungsleistung des SCR Systems ohne Heizen

In der Folge bedeutet das, dass in Teil 1 des UDC (1 s -195 s) keine NOx Konvertierung erfolgt, und diese erst in Teil 2 des UDC in geringem Maße einsetzt (Abbildung 14). Um das Potential der NOx Reduzierung durch SCR besser auszunutzen ist es daher notwendig, die Betriebstemperatur im UDC Teil deutlich anzuheben. Der dazu notwendige Energiebedarf (Abbildung 13) liegt zu Beginn (UDC E Teil 1) bei Werten bis zu 3,7 kW , sinkt im Bereich UDC 2 aber auf Werte von max. 1,9 kW ab.

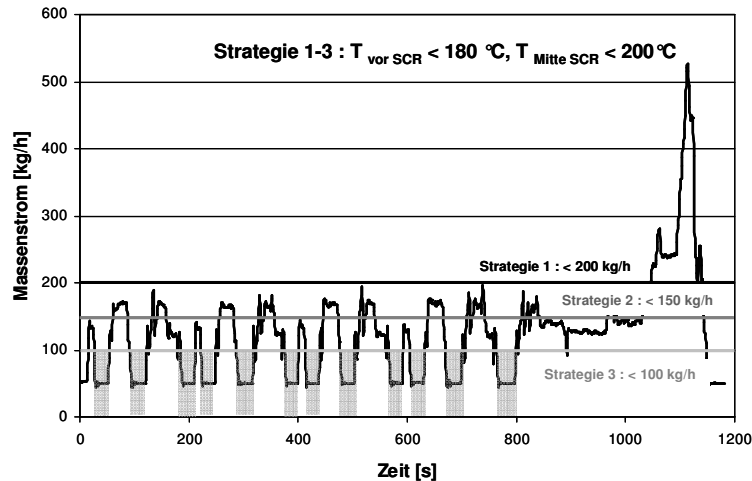


Abb. 15 Der elektrische Heizkatalysator im SCR-System: Betriebsstrategien

Das Ziel dieser Untersuchung war es nun, einen deutlichen Anstieg der NO_x Konvertierung im UDC Anteil des NEDCs zu erreichen mit einem möglichst geringen Anstieg des Kraftstoffverbrauchs. Dazu wurden 3 verschiedene Heizstrategien gewählt (Abbildung 15).

- Strategie 1: $T_{\text{vor SCR}} < 180 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{Mitte SCR}} < 200 \text{ }^\circ\text{C}$, Massenstrom $< 200 \text{ kg/h}$
- Strategie 2: $T_{\text{vor SCR}} < 180 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{Mitte SCR}} < 200 \text{ }^\circ\text{C}$, Massenstrom $< 150 \text{ kg/h}$
- Strategie 3: $T_{\text{vor SCR}} < 180 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{Mitte SCR}} < 200 \text{ }^\circ\text{C}$, Massenstrom $< 100 \text{ kg/h}$

Während mit Strategie 1 der Heizkat nahezu im gesamten UDC aktiviert ist, wird er mit Strategie 2 in den Phasen konstant hoher Geschwindigkeit abgeschaltet, mit Strategie 3 wird nahezu ausschließlich im Leerlauf geheizt. Hintergrund dieser Vorgehensweise ist die Tatsache, dass die verfügbare Leistung des Heizkats abhängig vom Massenstrom nur ein bestimmtes ΔT ermöglicht. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass bei geringen Massenströmen der größte Temperatureffekt erzielt werden kann. Ergänzt werden die verschiedenen Strategien um eine untere Abschaltgrenze, die verhindert, dass bei Temperaturen unterhalb von $130 \text{ }^\circ\text{C}$ die elektrische Beheizung zugeschaltet wird. Dadurch soll vermieden werden, dass unnötig Energie in das System gepumpt wird, wenn keine Aussicht darauf besteht, die Effektivität dadurch entsprechend anzuheben.

Der Einfluss dieser Einschränkung auf den Temperaturverlauf im NEDC ist in Abbildung 16 sichtbar (Einschaltstrategie 2). Ein Vergleich der Häufigkeiten auftretender

Temperaturen mit und ohne Abschaltstrategie zeigt, dass die Unterschiede der für den SCR-Betrieb entscheidenden Temperaturen durch die Abschaltstrategie nur zu einem geringen Anteil negativ beeinflusst wird. Der Energieverbrauchsvorteil durch diese Maßnahme beträgt jedoch 25 %.

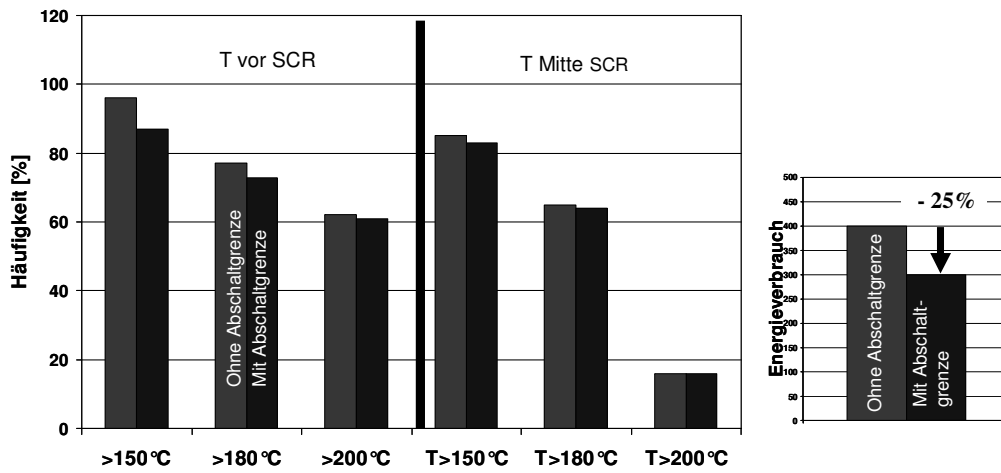


Abb. 16 Vergleich der Temperaturhäufigkeiten und des Kraftstoffverbrauchs mit und ohne Abschaltstrategien

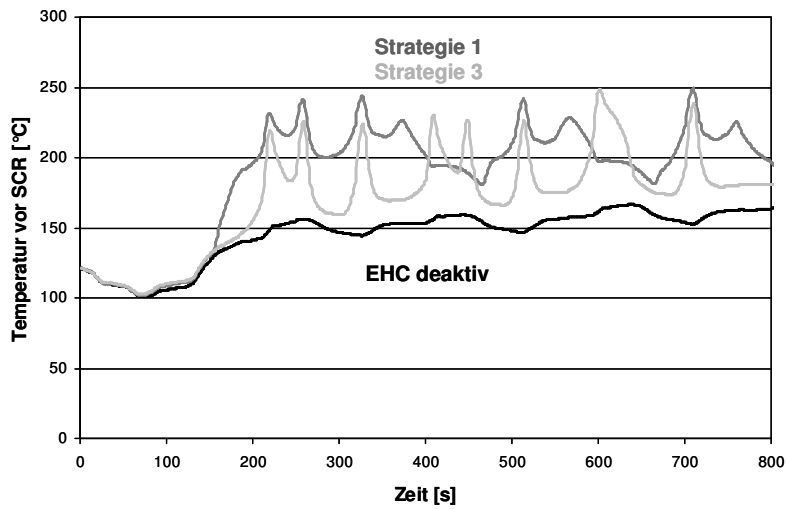


Abb. 17 Temperaturverläufe vor SCR Katalysator mit den unterschiedlichen Heizstrategien

Der Effekt für Strategie 1 und 3 der Aktivierung des Heizkats einschließlich der Einschalt- und Ausschaltstrategien ist in Abbildung 18 dargestellt. Alle Strategien führen zu einem früheren Erreichen der für die Dosierung des Harnstoffs notwendigen Temperatur. Des Weiteren ist sichtbar, dass mit Strategie 1 die Betriebstemperatur von 180 °C vor SCR Kat nach Erreichen nicht mehr unterschritten wird. Dies ist bei der Strategie 3 der Fall, jedoch mit einem nachfolgenden schnellen Wiederanstieg der Temperatur.

Abbildung 18 zeigt dabei die Verhältnisse hinsichtlich erreichbarer Effektivitätsverbesserung und resultierendem Mehrverbrauch. Während die 48% Effektivität im ECE mit Strategie 1 noch mit einem Mehrverbrauch von etwa 7% bezahlt werden müssen, ergeben sich mit Strategie 3 und einem auf 3% reduzierten Mehrverbrauch immer noch eine von 15 auf 37% erhöhte Effektivität. Bei einer PKW-Applikation mit im Vergleich zu dieser Anwendung deutlich reduzierten Massenströmen würde zudem der notwendige Energieaufwand nochmals deutlich niedriger ausfallen.

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Effektivitäten mit vorbeladenem SCR-Katalysator deutlich höher ausfallen.

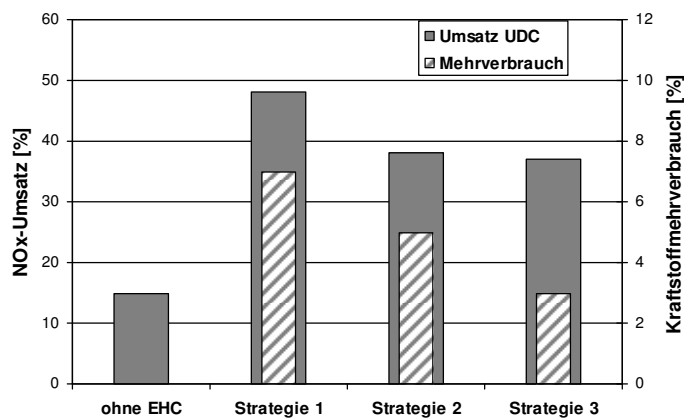


Abb. 18 NO_x-Umsatz im UDC und Mehrverbrauch mit den unterschiedlichen Heizstrategien

Die Untersuchungen zeigen, dass wie in den vorangegangenen Kapiteln eine sorgfältige Auslegung der Heizstrategie notwendig ist, um das bestmögliche Verhältnis zwischen Effektivitätserhöhung und resultierendem Mehrverbrauch zu erreichen. Hier bietet der elektrisch beheizte Katalysator durch seine unmittelbare Energieumsetzung und seine Unabhängigkeit vom vorherrschenden Motorbetriebspunkt ein Höchstmass an Flexibilität.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Das Temperaturmanagement im Abgasnachbehandlungssystem spielt bei modernen Motoren eine zunehmend große Rolle. Der elektrisch beheizbare Katalysator stellt dabei ein sehr flexibles und universell anwendbares Werkzeug dar. Wie die vorliegenden Untersuchungen zeigen, erhöht er dabei nicht nur in wesentlichem Maße die Effektivität der Abgasnachbehandlung, sondern bietet darüber hinaus das Potential der CO₂-Reduktion gegenüber konventionellen Maßnahmen zur Temperatur-Anhebung (z.B. motorisches Katheizen). Dies bedingt allerdings eine detaillierte Anpassung der entsprechenden Heizstrategie an die jeweilige Applikation. Hierzu bietet der Heizkat eine hohe Flexibilität, da er zum Einen die Energie direkt an der Komponente einbringt, wo sie benötigt wird, und damit mit minimaler Verzögerung und geringsten Wärmeverlusten, zum Anderen durch die elektrische Versorgung unabhängig vom Betriebspunkt des Motors arbeiten kann. So ist es möglich, maßgeschneiderte Strategien zu entwickeln, die z.B. auch die Nutzung von rekuperativer Energie einschließen können, wie sie in Zukunft in hybridisierten Antrieben verstärkt vorliegen wird. Zum Thema Hybrid erschließen sich zudem neue Möglichkeiten hinsichtlich Kaltstartstrategie, indem nun die Möglichkeit besteht, das System bereits vor Motorstart auf Temperatur zu bringen und dadurch die Kaltstartemission nahezu vollständig zu eliminieren. Weitere Arbeiten in dieser Richtung werden sich vor allem darauf konzentrieren, wie das Zusammenspiel der Komponenten unter den veränderten Randbedingungen weiter optimiert werden kann.

Literatur

- [1] Dorenkamp, R. : Die Abgasnachbehandlung als Baustein zur nachhaltigen CO₂- und Emissionsreduzierung. 7. FAD-Konferenz 2009, Dresden
- [2] Maus, W., Brück, R., Konieczny, R., Scheeder, A.: Der E-Kat als Thermomanagementlösung in modernen Fahrzeuganwendungen. MTZ - Motortechnische Zeitschrift, Ausgabe 05/10
- [3] Brück, R.; Konieczny, R.: Thermomanagement für Niedrigstmissionskonzepte moderner Antrieb- Der elektrisch heizbare Katalysator . 19. Aachener Kolloquium 2010
- [4] Hartmann, B., Renner, C. : Autark, Plug-in oder Range-Extender? Ein simulationsgestützter Vergleich aktueller Hybridfahrzeugkonzepte. 18. Aachener Kolloquium 2009
- [5] Fleckner, M., Göhring, M., Spiegel, L. : Neue Strategien zur verbrauchsoptimalen Auslegung der Betriebsführung von Hybridfahrzeugen. 18. Aachener Kolloquium 2009
- [6] Wiartalla, A., Severin, C., Rosefort, Y., Kemper, H., Kwee, H. : Diesel Hybrid and Exhaust Aftertreatment – Synergies and Optimization Potentials. MinNox Juni 2008, Berlin
- [7] Brück, R., Holz, O., Konieczny, R. : SCR Retrofit System for EU V Vehicles to lower inner City NO_x Emissions. 3. MinNOx-Konferenz Juni 2010, Berlin