

Dipl. Ing. Wolfgang Maus, Dipl. Ing. Rolf Brück, Dipl. Ing Roman Konieczny, Dipl. Ing.
Peter Hirth,
Emitec GmbH, Lohmar

„Die Zukunft der Katalysatortechnik für elektrifizierte Antriebsstränge“

The Future of Exhaust Aftertreatment Design for Electrified Drive Trains

Kurzfassung

Im Rahmen der CO₂- bzw. Kraftstoffverbrauchsdiskussion werden Elektrofahrzeuge politisch als Lösung dargestellt [1, 2]. Allerdings ist die realisierbare Reichweite dieser Fahrzeuge aufgrund der verfügbaren Energiekapazitäten, vor allem im realen Fahrbetrieb, nicht ausreichend [3]. Eine Alternative stellen elektrifizierte Antriebsstränge beginnend beim Mild-Hybrid, über den Full-Hybrid bis zum Elektrofahrzeug mit Range-Extender dar. Der Verbrennungsmotor stellt im Verbund mit dem Elektromotor, je nach Konzept, deutlich andere Anforderungen an das Katalysatorsystem [4]. Dies gilt insbesondere dann, wenn die minimalen Restemissionen des Verbrennungsmotors das „Zero-Emission“-Image des Elektrofahrzeugs nicht mindern soll.

Der Vortrag beschreibt den Einsatz eines neuen Katalysatorkonzepts, den Range-Extender-Katalysator, und dessen Auslegungskriterien sowie seine Auswirkungen auf die Tailpipe-Emissionen insbesondere beim Einsatz in Ottomotoren.

Abstract

The debates on CO₂ emissions and fuel consumption portray electric vehicles as a political solution. However, the range of these vehicles is severely limited by available power capacities, especially in real driving conditions. Electrified powertrains, ranging from mild hybrids and full hybrids to electric vehicles with range extenders, provide an alternative. When used in conjunction with an electric motor, combustion engines have very different requirements for catalytic converter systems depending on the specific design and particularly in view of the ‘zero emissions’ image of electric vehicles.

This paper describes the application of a new catalyst design the so called range extender catalyst, its design criteria and its impact on tailpipe emissions, especially when used with in petrol engines.

1. Einleitung

Die endliche Menge förderbarer fossiler Kraftstoffe und der Wunsch nach nachhaltiger Mobilität beeinflusst politisch und technisch die Entwicklung der zukünftigen Fahrzeuge bzw. Antriebskonzepte. Das Elektrofahrzeug als „Zero-Emission-Fahrzeug“ und Allheilmittel muss im Rahmen einer objektiven Diskussion und im Rahmen der heutigen technischen Möglichkeiten zumindest in Frage gestellt werden. Hauptursache hierfür sind zum einen die Energiedichten verfügbarer Batterietechnologien [5], die die Reichweiten von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren zur Zeit noch nicht leisten können, und zum anderen die Emissionen bei der Stromentstehung.

Die Emissionen bei der Stromentstehung sind direkt abhängig vom Kraftwerksmix in den jeweiligen Ländern. Unter der Annahme, dass 100% aller Pkw mit Elektroantrieb ausgerüstet wären, würde bei einer jährlichen Gesamtfahrleistung von 1×10^{12} km in Deutschland [6] und einer mechanischen Antriebsleistung von 0,15 kWh/km für ein Mittelklassefahrzeug bezogen auf den europäischen Testzyklus zusätzlich ca. 36 % des Strombedarfs in 2009 benötigt [7], wenn ein Wirkungsgrad der Energieumwandlung im Elektrofahrzeug von 80 % unterstellt wird. Hiermit wird deutlich, dass die Strompolitik der einzelnen Länder und damit die Wahl der Kraftwerkstechnologie einen direkten Einfluss auf die Frage „Ist ein Elektrofahrzeug ein Null-Emissions-Fahrzeug?“ hat. Vergleicht man dazu zum Beispiel die CO₂-Emissionen eines Elektrofahrzeugs in Deutschland mit denen aus unseren europäischen Nachbarländern Frankreich und Dänemark, so ergeben sich die in Abbildung 1 dargestellten Werte. Wie erwartet, hat die Technologie der Stromerzeugung einen entscheidenden Einfluss auf die gesamten CO₂-Emissionen.

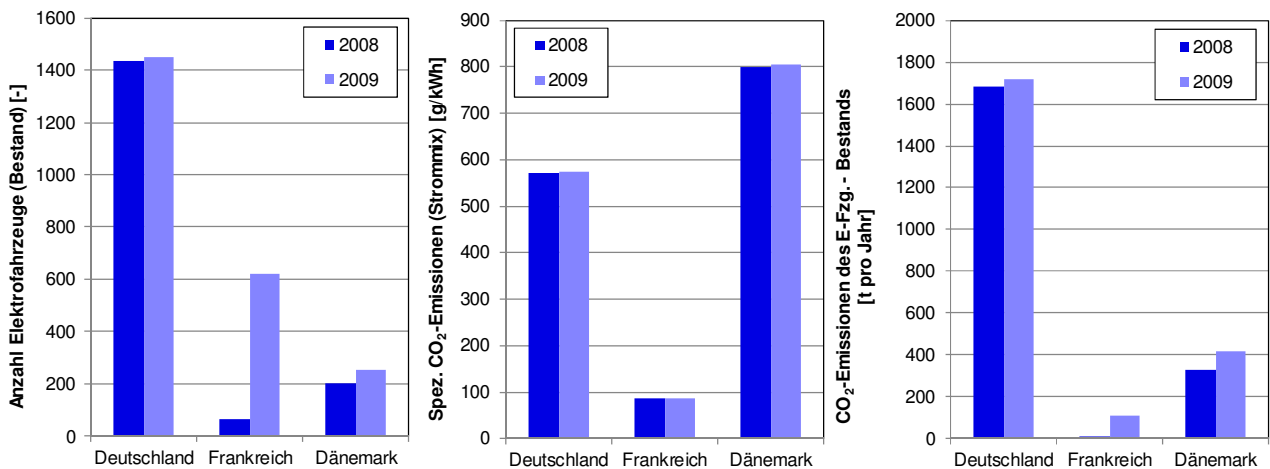


Abbildung 1: Gesamte CO₂ - Emissionen des Bestands von Elektrofahrzeugen auf Basis des Strom-Mix [8, 9, 10, 11] in verschiedenen Ländern (Frankreich, Dänemark und Deutschland 2008 und 2009)

Figure 1: Total CO₂ emissions of electric vehicle stock [8, 9, 10, 11] in various countries (France, Denmark and Germany 2008 and 2009)

Daher sind die CO₂-Emissionen eines Fahrzeugs in einem Land mit hohem Kohlestromanteil bekanntlich signifikant höher als diejenigen eines Fahrzeugs, welches in einem Land mit hohem Kernkraftstromanteil oder natürlich erzeugtem Strom betrieben wird.

Es ist zu beachten, dass sich die dargestellten Werte auf den Kraftwerksmix aus dem Jahre 2008 beziehen, und dass die notwendigen neuen Kraftwerke zur Deckung des zusätzlichen Strombedarfs der E-Fahrzeuge nicht berücksichtigt sind.

Spricht man heute über Elektrifizierung des Antriebsstrangs, sind in der Regel die Antriebssysteme Mild-Hybrid, Full-Hybrid, E-Fahrzeug mit Range-Extender und E-Fahrzeug gemeint.

Einige Marketingkampagnen suggerieren heute, dass bereits ein Mild-Hybrid-Fahrzeug ein Elektrofahrzeug ist. Der Eindeutigkeit wegen werden in den weiteren Ausführungen dieser Abhandlung folgende Definitionen bezüglich der Laufzeiten des im Hybrid enthaltenen Verbrennungsmotors im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) verwendet:

- Mild-Hybrid: 100% (mit Ausnahme Start/Stop)
- Full-Hybrid: 70 – 100 %
- E-Fahrzeug mit Range-Extender: 0–80% (je nach Gesetzgebung; Ausgleich des Ladezustands der Batterie im Test)
- E-Fahrzeug: 0%

Tabelle 1: Klassifizierung der möglichen Grade der Elektrifizierung von Fahrzeugen und Abschätzung der Laufzeiten des Verbrennungsmotors

Table 1: Classification of the possible extent of vehicle electrification and estimated running times of the combustion engines

Der Bezug zum NEFZ ist von Bedeutung, da er die Bezugsgrundlage für sowohl Kraftstoffverbrauchsangaben als auch Fahrleistungsangaben im Batteriebetrieb repräsentiert. Ähnlich dem Realverbrauch ist auch die tatsächliche Reichweite der Elektrofahrzeuge stark vom jeweiligen Fahrverhalten des Anwenders abhängig.

Entsprechend der Leistungsdichte und der Aufladegeschwindigkeit heutiger Batterien gilt zumindest aktuell noch, dass mit Ausnahme von reinem Stadtbetrieb bzw. einem ausschließlichen Einsatz als Kurzstreckenfahrzeug die Verwendung eines zusätzlichen Verbrennungsmotors im E-Fahrzeug sinnvoll erscheint. Neben den Personenkraftwagen gilt dies insbesondere für Transporter sowie für leichte und schwere Nutzfahrzeuge, da hier der Energiebedarf je gefahrenen Kilometer nochmals deutlich höher liegt. So benötigt etwa ein schweres Nutzfahrzeug bei konstanter Fahrt auf der Autobahn eine Energie von ca. 1 kWh/km und damit das 7-fache eines Pkws im NEFZ.

Der Vorteil von elektrifizierten Antriebssträngen im Elektrobetrieb liegt jedoch darin, dass sie in der Lage sind, lokal und im begrenzten Umfang tatsächlich als Null-Emissionsfahrzeuge zu funktionieren. Da jedoch der Verbrennungsmotor je nach Konzept (vgl. Konzeptübersicht oben) trotzdem mehr oder weniger oft anspringen muss, ist es daher notwendig, auch das Katalysatorsystem so auszulegen, dass zum Zeitpunkt nach Motorstart eine nahezu vollständige Umsetzung der gesetzlich limitierten Schadstoffe gewährleistet ist. Da sich die Betriebsart des Verbrennungsmotors innerhalb eines elektrifizierten Antriebsstrangs sehr deutlich von jener unterscheidet, wie man sie aus gewohnten Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor kennt, sind neue Katalysatorkonzepte und Betriebsstrategien notwendig.

2. Randbedingungen für den Einsatz und Betrieb von Abgaskatalysatoren

Die gewählte Variante des elektrifizierten Antriebsstrangs beeinflusst natürlich die Betriebsbedingungen für das Katalysatorsystem in extremer Weise. So muss zum Beispiel in Fahrzeugen mit Range-Extender im Stadtbetrieb bzw. Kurzstreckenbetrieb von längeren Pausenzeiten mit realen Kaltstarts des Verbrennungsmotors (VKM) ausgegangen werden. Dagegen sind im gleichen Konzept bei Überland- bzw. höherlastigem Betrieb keine oder nur kurze Pausenzeiten zu erwarten.

Um also passende Betriebskonzepte für die unterschiedlichen Antriebsvarianten zuschneiden zu können, muss zuerst eine detaillierte Übersicht der in Realität auftretenden Lastfälle vorliegen. Deren Analyse hinsichtlich Ein- und Ausschaltzeiten des Verbrennungsmotors im relevanten Zyklus, die dabei herrschenden Drehzahlen und Lasten sowie die korrespondierenden Abgasmassenströme, Emissionen und Abgas- sowie Katalysatortemperaturen bilden die Basisdaten für Strategien, die sich mit der Optimierung solcher Konzepte beschäftigen.

Im Folgenden sind daher die bereits in Tabelle 1 grob skizzierten Laufzeitszenarien im Rahmen einer Simulation näher untersucht worden.

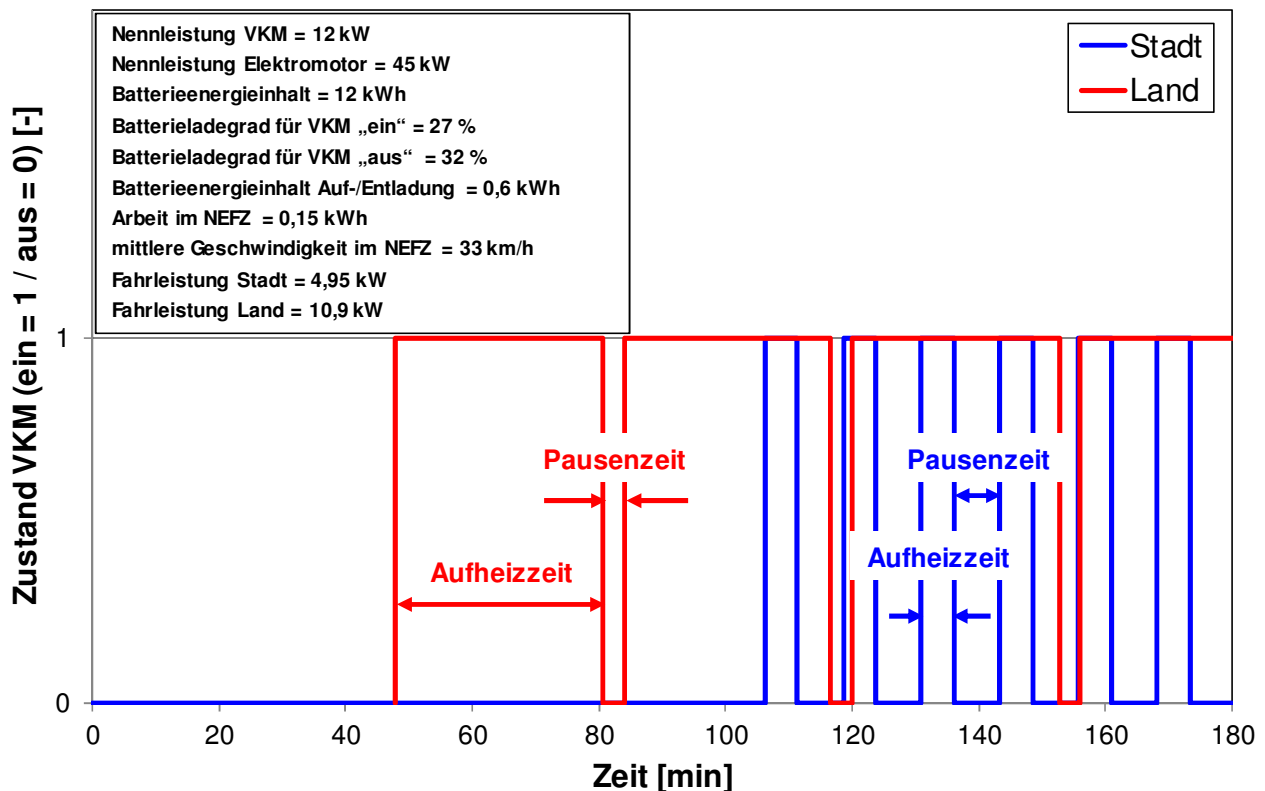


Abbildung 2a: Laufzeiten und Pausenzeiten des Verbrennungsmotors im Range-Extender-Betrieb in zwei Szenarien

Figure 2a: Combustion engine running times and off times in a vehicle with range extender for two scenarios

Range-Extender:

Geht man, in teilweiser Analogie zu [12], von einem typischen Range-Extender-Betrieb aus, bei dem die Batterie bis zu einer Grenzkapazität im elektrischen Betrieb entleert wird,

und dann der Verbrennungsmotor (VKM) zugeschaltet wird, der ab hier sowohl die Antriebsleistung als auch das Nachladen der Batterie übernehmen muss, ergeben sich die in Abbildung 2a gezeigten Pausen- und Aufheizzeiten. Dabei wurden sowohl für das „Stadt“-Beispiel als auch für das Szenario „Land“ mehrere NEFZ-Zyklen aneinandergehängt, wobei die Fahrleistung für die Überlandfahrt mehr als verdoppelt wurde. Die Berechnung wurde mit voller Batterie gestartet und unten den in Bild 2a angegebenen Randbedingungen durchgeführt. Es wurde darauf geachtet, dass die Batterieladung einen Wert von 27% nicht unterschreiten soll, hier erfolgte das Einschalten des VKM. Bei einem Ladegrad von 32% wurde der VKM wieder abgeschaltet. Je nach Lastprofil (Stadtfahrt oder Überlandfahrt) ist dann zum reinen Nachladen der Batterie nur noch wenig Leistung übrig, wodurch die Pausenzeiten für den Verbrennungsmotor immer kürzer ausfallen: Im Beispiel ergeben sich ca. 7 Minuten bei der Stadtfahrt, aber nur noch weniger als 3 Minuten bei der Überlandfahrt. Analog erhält man im Stadtbetrieb eine Anzahl von etwa 5 Neustarts pro Stunde, bei Überlandfahrt entsprechend nur 2 Neustarts. Je nach dazwischenliegender Pausenzeit liegt dann entweder ein Warm- oder ein Kaltstart vor. Die längste Pausenzeit von ca. 50 Minuten bei Überlandbetrieb (ca. 105 Minuten bei Stadtbetrieb) ergibt sich durch die Fahrzeit, die verstreicht, bis die Batteriekapazität von 100% erstmals auf den Grenzwert von 27% abgesunken ist.

Vollhybrid:

Im Gegensatz zum Range-Extender besteht beim Vollhybrid neben der Möglichkeit der rein elektrischen Fahrweise auch die des rein verbrennungsmotorischen Betriebs. Untersuchungen der hierbei z.B. im NEFZ resultierenden Pausenzeiten [13] ergaben Wahrscheinlichkeitsmaxima für Zeiten um 50 und um 80 Sekunden (vgl. Abbildung 2b).

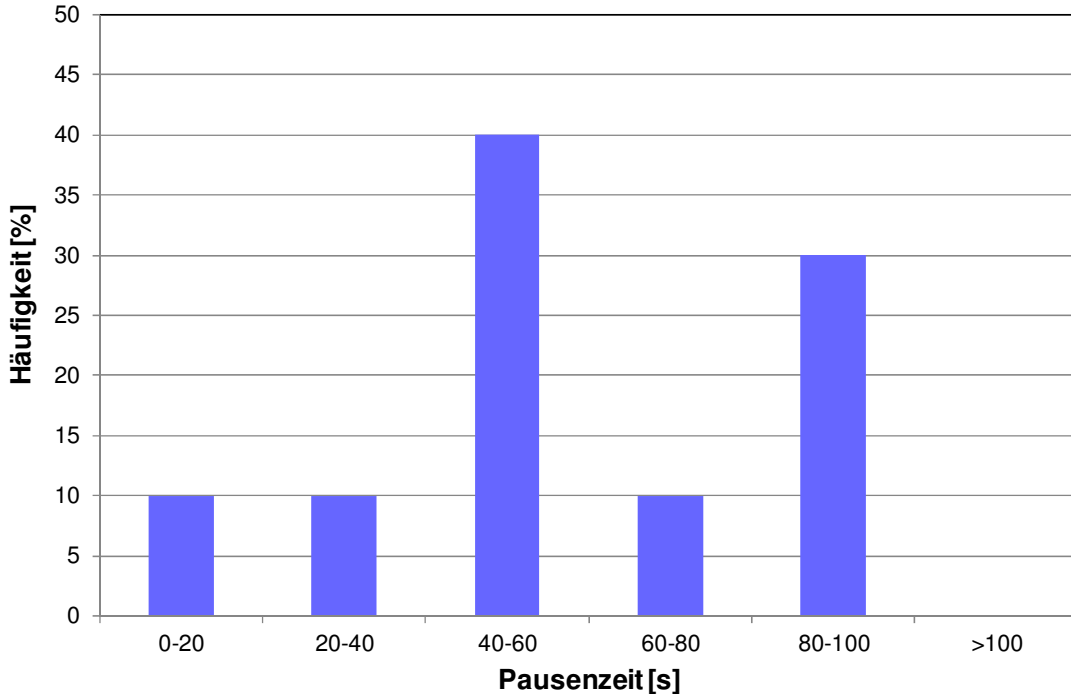


Abbildung 2b: Pausenzeitverteilung des Verbrennungsmotors im Vollhybridfahrzeug [13]

Figure 2b: Distribution of combustion engine off times in full hybrid vehicles [13]

Eine Analyse der Daten zeigt, dass die Situation bzgl. der Abgasnachbehandlung umso kritischer wird, je geringer die Nutzungsdauer des Verbrennungsmotors ist. Mit abnehmender Nutzungsdauer nimmt zum einen die Zahl der Kaltstarts zu, zum anderen steigt auch die Bedeutung des Warmhaltens des Katalysators über einen längeren Stillstandszeitraum des Verbrennungsmotors. Demzufolge existieren zwei kritische Zustände:

- Kaltstart (bzw. Warmstart)
- Pausenzeit nach Motor-Aus

Wenn also die Forderung „Null-Emission“ lautet, muss sichergestellt sein, dass der Katalysator vor allem in den genannten kritischen Betriebszuständen höchst effizient arbeitet und die Emissionen wirkungsvoll verringert. Sowohl im Falle des echten Kaltstarts als auch des Wiederstarts nach Pause wird es also in Abhängigkeit von Temperaturniveau im Katalysator notwendig sein, den Katalysator mehr oder weniger stark vorzuheizen, damit er bei Motorstart bereits auf Betriebstemperatur ist. Zusätzlich ist natürlich eine optimale thermische Isolation erforderlich, so dass das Auskühlen möglichst lange hinausgezögert werden kann.

3. Auslegung eines Katalysatorsystems für die genannten Randbedingungen – das Range-Extender-Konzept

In der Vergangenheit wurde bereits darüber berichtet, dass sich die Randbedingungen für Katalysatorsysteme von Mild- und Full-Hybridfahrzeugen nur unwesentlich von denen in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor unterscheiden. Beide Szenarien entsprechen jedoch nicht dem Anspruch eines Null-Emissionskonzeptes.

Die Erfahrung zeigt z. B. beim Ottomotor, dass der Katalysator nach Erreichen seiner Betriebstemperatur (Kaltstart) einen praktisch vollständigen Schadstoffumsatz erreichen kann [14]. Angewandt auf ein Null-Emissionskonzept bedeutet dies, dass der Katalysator im idealen Fall bereits vor Anspringen des Verbrennungsmotors auf Betriebstemperatur gebracht worden ist, sowie dass ein Abkühlen während der „Motor-Aus“-Phasen wirkungsvoll verhindert werden kann.

Damit sind die beiden wesentlichen Entwicklungsschwerpunkte eines Katalysatorsystems für Hybrid- und Range-Extender-Fahrzeuge bereits genannt.

Die in Kapitel 2 beschriebenen Randbedingungen in Kombination mit der Forderung nach einem ‚Null-Emissionskonzept‘ führen zu den wesentlichen Anforderungen an einen Katalysator für Hybrid- bzw. Range-Extender-Fahrzeuge:

- Aufheizen des Katalysators bereits vor Motorstart
- Katalysator-interne Heizfunktion
- Verzögerung des Auskühlens bei langen Motorstillstandszeiten durch eine optimierte Isolation

3.1 Aufheizverhalten im Kaltstart – E-Kat mit Vorheizfunktion

Bereits in den Ursprüngen der Katalysatorentwicklung für Ultra Low Emission Vehicles (ULEV) wurde das Konzept des elektrisch heizbaren Katalysators vorgelegt [15]. Der Heizkatalysator wurde danach erstmalig beim ALPINA B12 und anschließend auch in den BMW 750er TLEV Modellen in Serie eingesetzt [16, 17].

Diese „Heizkatalysatoren“ bestanden meist aus einer mit wenigen mm Länge relativ kurzen beheizten Scheibe, welcher ein größerer Katalysator nachgeschaltet war. Ziel war es damals, die Heizescheibe bei Motorstart zu aktivieren und so die Kaltstartemissionen zu minimieren. Es wurde auch versucht, den Katalysator vor Motorstart zu beheizen, aber aufgrund der vorhandenen Batteriekapazität lag eine solche Aufheizstrategie außerhalb des darstellbaren Leistungsbereichs damaliger elektrischer Bordnetze. Moderne Motoren mit variabler Ventilsteuerung ließen jedoch bald danach hoch wirksame motorische Katalysator-Heizmaßnahmen zu, so dass der Heizkatalysator zur Verbesserung der Kaltstartemissionen nicht mehr benötigt wurde.

Trotz des Einsatzes motorischen Katalysator-Heizmaßnahmen werden auch heute noch etwa 80% der Gesamtemissionen im Kaltstart emittiert, wenn der Katalysator noch nicht oder nicht vollständig aufgeheizt ist. Genau hier liegt auch die Herausforderung für Null-Emission-Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor.

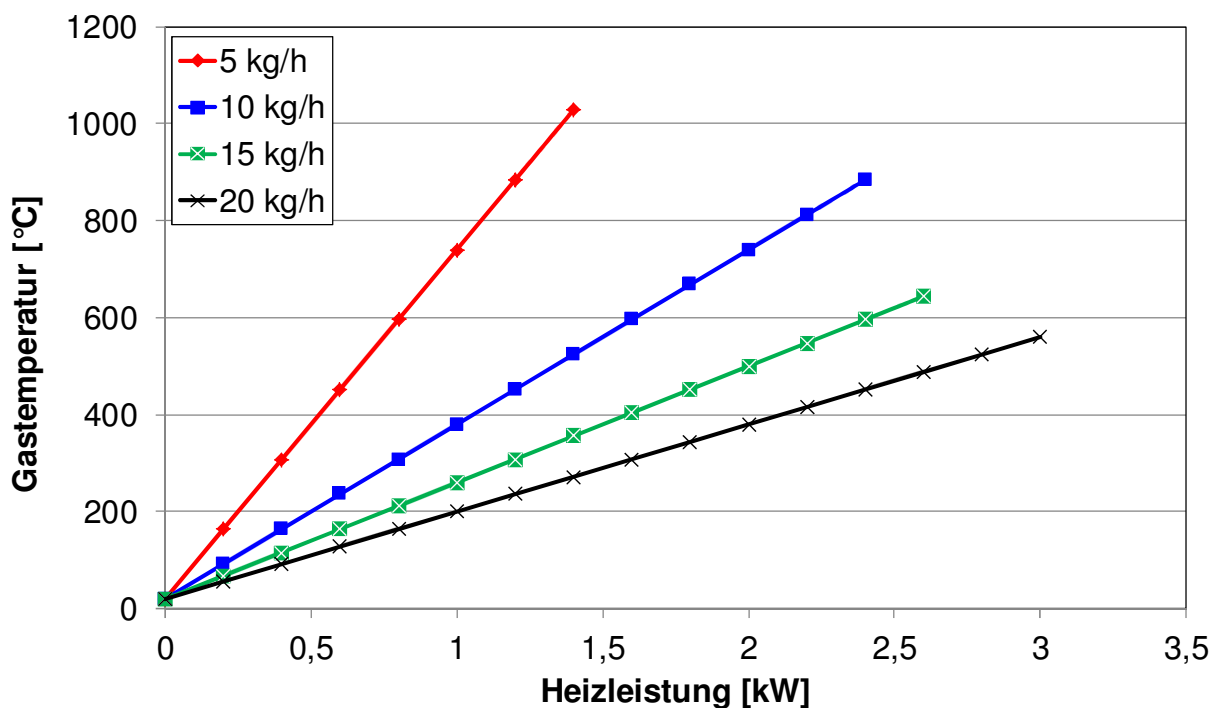


Abbildung 3: Erreichbare Gastemperatur stromabwärts der Heizescheibe als Funktion des Luftmassenstroms und der elektrischen Heizleistung

Figure 3: Achievable gas temperature upstream of the heated disc as a function of air mass flow and electric heating output

Da der Heizkatalysator bzw. die Heizescheibe nur einen kleinen Teil des katalytisch aktiven Volumens aufheizt, ist es für seine Anwendung in Hybrid- und Range-Extender-Fahrzeugen notwendig, die Wärme aus der nur wenige mm langen Heizescheibe in den stromabwärts gelegenen Hauptkatalysator zu transportieren. Eine Möglichkeit dazu stellt die Übertragung über einen Luftstrom dar, der entweder mit Hilfe einer Sekundärluftpumpe oder durch den elektrisch geschleppten Motor selbst eingebracht wird. Hierbei bestimmt der Luftmassenstrom und die elektrische Heizleistung die erreichbare Temperatur (Abbildung 3) des Abgases stromabwärts der Heizescheibe und der Luftmassenstrom die Aufheizgeschwindigkeit des Katalysators, der der Heizescheibe nachgelagert ist (Abbildung 4a). Je niedriger der Luftmassenstrom eingestellt wird, umso höher ist die Temperatur im

Katalysator, die mit gleicher Heizleistung erzielt werden kann, aber desto länger dauert es auch, den Katalysator über die komplette Länge durchzuheizen.

Abbildung 4a zeigt das Durchheizverhalten des Hauptkatalysators als Funktion des Abgasmassenstroms bei einer Heizleistung von 2 kW. Durch Vorheizen des Heizkatalysators vor Motorstart kann also mit einem Massenstrom oberhalb 5-10 kg/h ein großes Teilvolumen (> 50 %) des Hauptkatalysators (140 mm axiale Länge) auf und über die Light-Off-Temperatur aufgeheizt werden. Je höher dabei der Luftmassenstrom eingestellt wird, umso geringer ist zwar die Gastemperatur nach der Heizeischeibe, aber umso schneller wird der nachfolgende Katalysator in der Tiefe aufgeheizt. Damit sollte nach Motorstart der größte Teil der Emissionen umgesetzt werden können, wobei ein Optimum bzgl. des einzustellenden Luftmassenstroms erwartet wird.

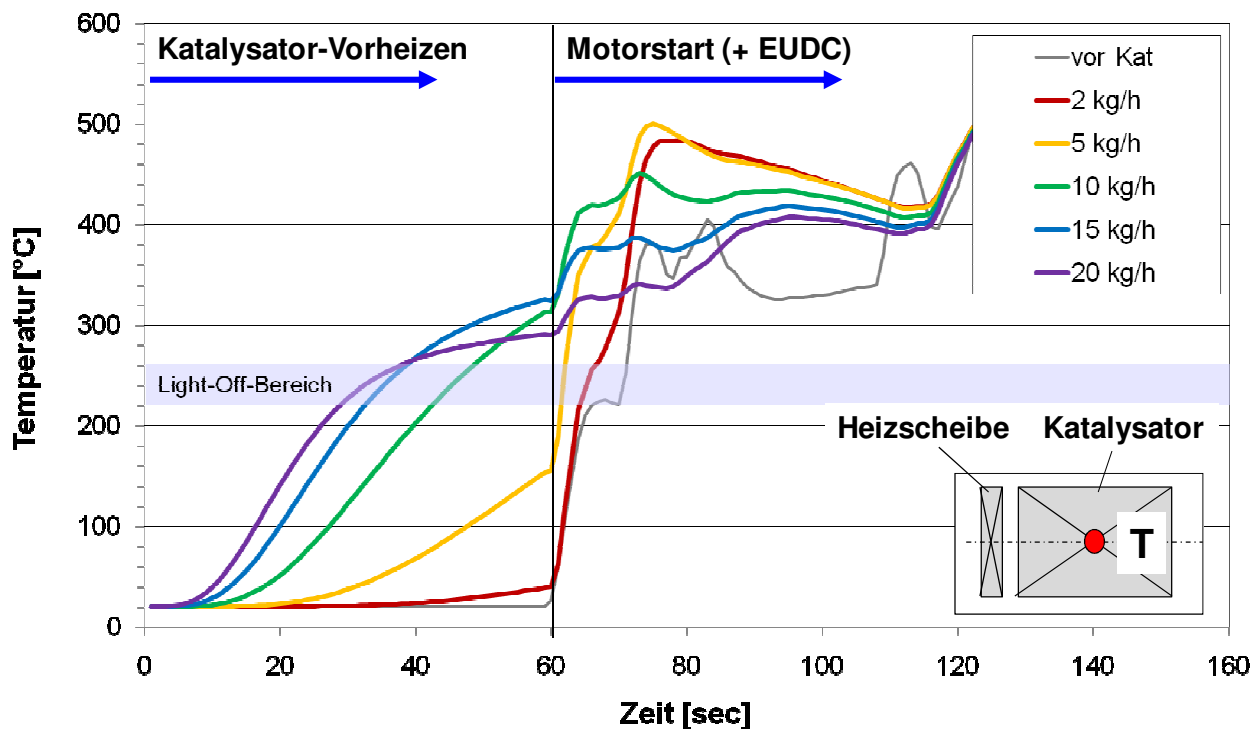


Abbildung 4a: Aufheizverhalten des Hauptkatalysators als Funktion des Abgasmassenstroms bei einer Heizleistung von 2 kW (axiales Zentrum des Katalysators \varnothing 98,4 x (8 + 140) mm Länge / 600 cpsi)

Figure 4a: Heating behaviour of the main catalyst as a function of the exhaust gas mass flow at a heating output of 2 kW kW (at axial centre of catalyst \varnothing 98,4 x (8 + 140) mm / 600 cpsi)

Mittels einer nachfolgenden Emissionsberechnung am gleichen Katalysatorsystem wurde dies überprüft. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Abbildung 4b gezeigt. Aufgetragen sind die berechneten kumulierten HC-Emissionen nach der jeweils angegebenen Vorheizzeit (zwischen 10 und 60 s) und weiteren 90 s im EU-Zyklus unter zusätzlicher Variation des Luftmassenstroms.

Man erkennt zum einen, dass längeres Vorheizen (in den betrachteten Zeiträumen) natürlich eine Verringerung der Emissionen mit sich bringt, und zum anderen, dass es zumindest bei Zeiten > 10 s ein Optimum des Luftmassenstroms im Bereich zwischen 10 und 15 kg/h zu geben scheint, bei dem die Emissionen minimal sind. Die in der Berechnung für den Gesamttest erreichte HC-Emission liegt dann in der Größenordnung

von 1,6 mg HC / km unter der Annahme, dass der Katalysator im weiteren Testverlauf nicht auskühlen würde.

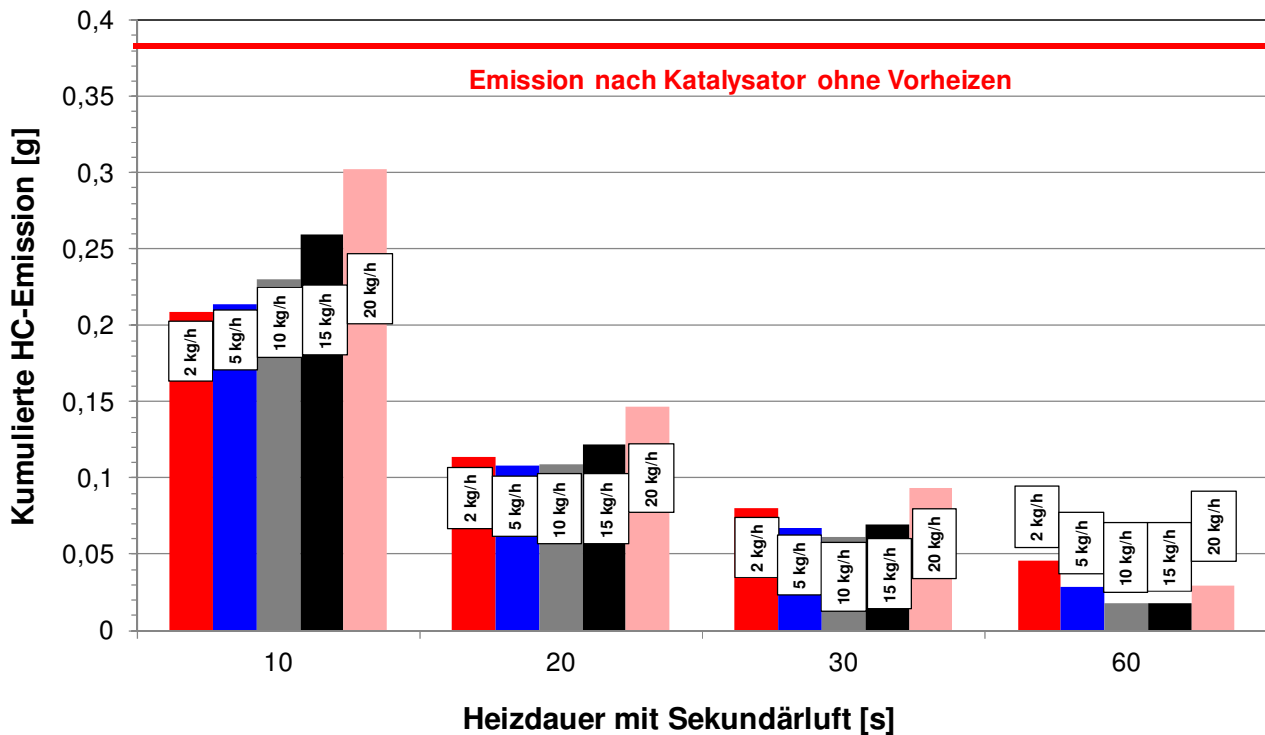


Abbildung 4b: Berechnete kumulierte HC-Emissionen nach unterschiedlichen Vorheizzeiten (zwischen 10 und 60 s) und weiteren 90 s nach Motorstart im NEFZ unter zusätzlicher Variation des Luftmassenstroms zwischen 2 und 20 kg/h

Figure 4b: Calculated cumulative HC emissions for different pre-heating times (between 10 and 60 s), plus a further 90 s after engine start in the NEDC, with additional variation in the air mass flow between 2 and 20 kg/h

3.2 Abkühlverhalten während der Pausenzeiten – Minimierung von Wärmeverlusten

Hinsichtlich des Abkühlverhaltens gilt es, mehrere Faktoren zu berücksichtigen und ihnen durch entsprechende konstruktive Maßnahmen Rechnung zu tragen. Geht man davon aus, dass der Motor prinzipiell unter Last betrieben und ansonsten abgekoppelt wird, handelt es sich dabei im Wesentlichen um die radiale und axiale Wärmeleitung im Träger sowie die Konvektion und Strahlung an die Umgebung. Abbildung 5 zeigt die unterschiedlichen Mechanismen, und Abbildung 6 beispielhaft die Anteile der einzelnen Wärmetransportmechanismen innerhalb eines Luftspalts in Abhängigkeit der Temperatur.

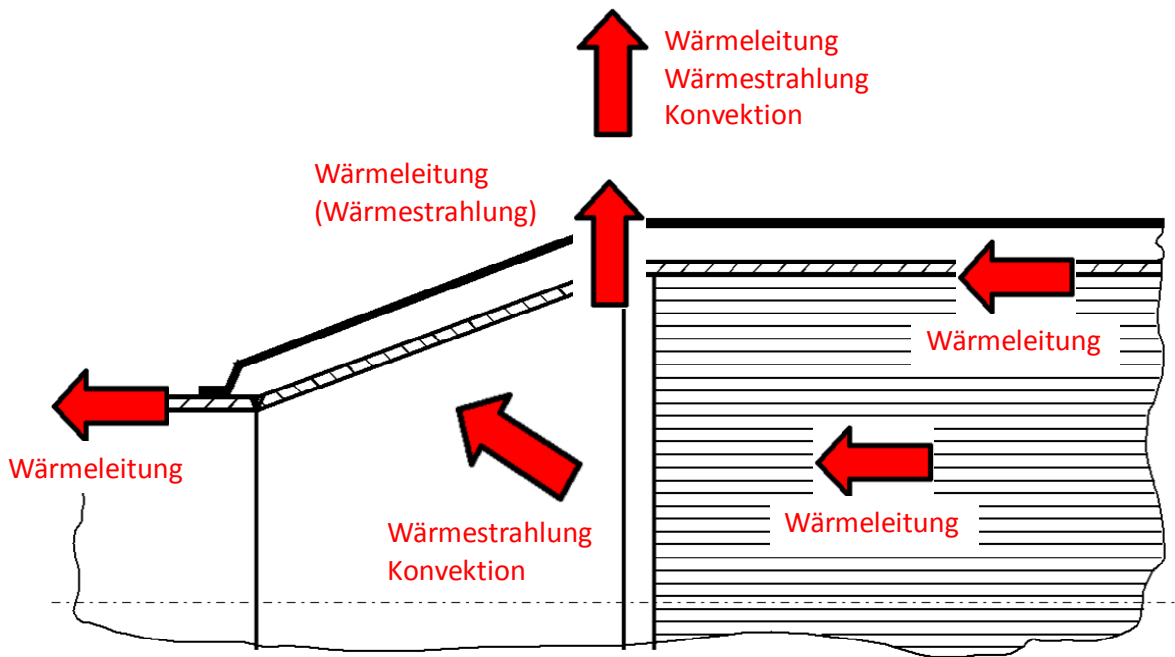


Abbildung 5: Wärmetransportmechanismen am Katalysator, seiner Isolation und seiner Anbindung ans Abgassystem

Figure 5: Heat transfer mechanisms in the catalyst, its insulation and its integration in the exhaust system

Es sind im Wesentlichen zwei Gruppen von Verlustpfaden zu nennen [18]: Zum einen die radiale Wärmeabfuhr durch den Katalysatormantel bzw. die Isolation nach außen, und zum anderen die axiale Wärmeableitung aus dem Träger über die Katalysatorstirnflächen sowie den Mantel in den Bereich der Abgasanlage vor bzw. nach Katalysator hinein. Aufgrund der Größe des Eintritts- bzw. Austrittsbereichs bilden sich dort konvektive Strömungen, die den Temperaturverlust beschleunigen.

Ein wichtiger Parameter bei der Betrachtung der einzelnen Anteile der Wärmeverluste ist darüber hinaus auch das Temperaturniveau, ab welchem die Abkühlung startet. Die hier herrschenden Zusammenhänge sind in Abbildung 6 am Beispiel der Wärmeübertragung innerhalb eines Luftspalts dargestellt. Man erkennt deutlich, dass sich mit zunehmender Katalysatorkerntemperatur die Anteile der Wärmeverluste im Spalt deutlich ändern: Während bei Kerntemperaturen um 300 °C der Anteil der Wärmeleitung noch ca. 60 % vom Gesamt beträgt, liegt der Anteil bei höheren Temperaturen zugunsten der Strahlung auf unter 25%.

Das bedeutet, dass Art und Aufbau der Isolationsmaßnahmen an das zu erwartende Temperaturniveau angepasst werden müssen [19]. Konkret sind also beim angestrebten Einsatzzweck (Temperaturen um 300 °C) eher Maßnahmen zur Verhinderung der Wärmeleitung angebracht.

Zur Reduzierung der Wärmeverluste sollte also zum einen die Wärmeleitung innerhalb des Trägers sowie insbesondere der Wärmetransport an die Grenzflächen (Mantel, Stirnflächen) auf ein Minimum reduziert werden. Weiterhin kann durch eine zusätzliche Isolation im äußeren Mantelbereich der Wärmeaustrag weiter reduziert werden. Abbildung 7 zeigt sämtliche Maßnahmen, die bei der Entwicklung des Range-Extender-Designs umgesetzt wurden.

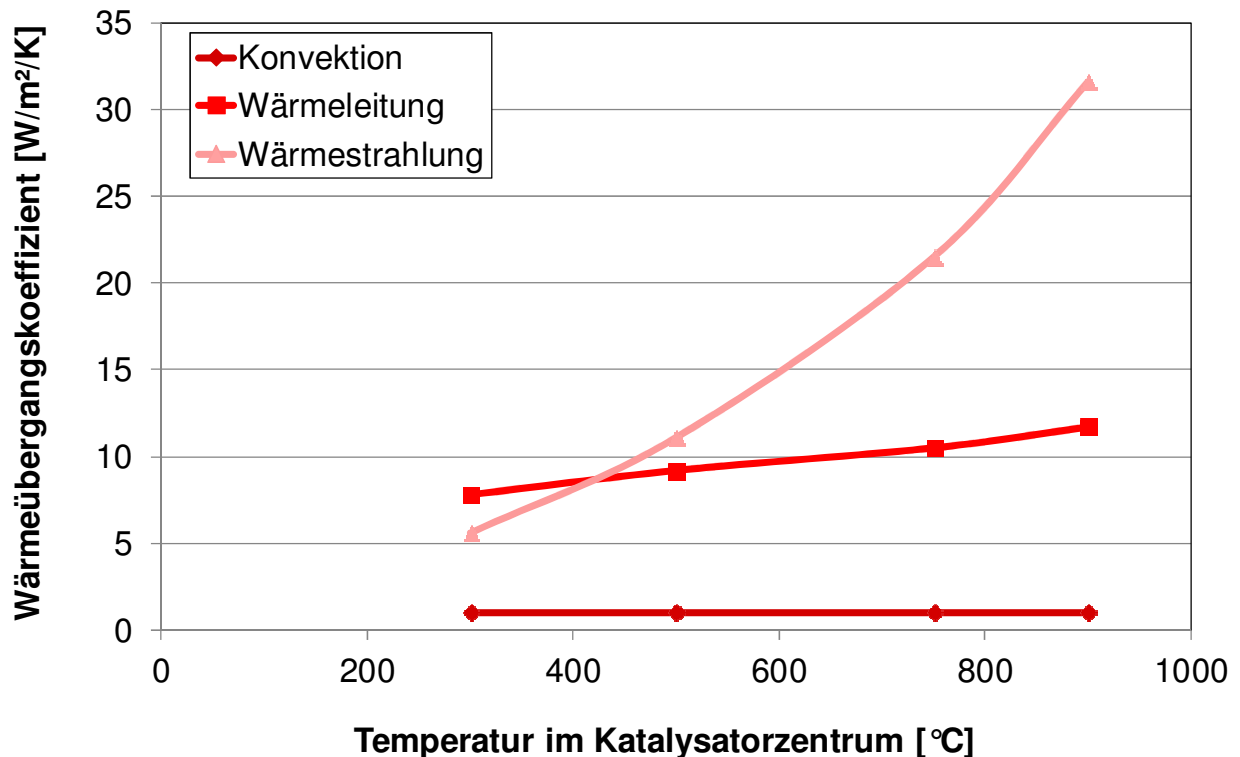


Abbildung 6: Wärmeverluste in Abhängigkeit der Temperatur, exemplarisch innerhalb einer Katalysator-Luftspaltisolation

Figure 6: An example of heat loss in relation to temperature in catalyst air gap insulation

Hierbei handelt es sich folgerichtig mehrheitlich um Maßnahmen zur Behinderung des konduktiven, also des Wärmeabflusses durch Wärmeleitung, sowohl in radialer als auch in axialer Richtung. Dazu gehören unterbrochene Bereiche im radial mantelnahen Bereich der Katalysatormatrix sowie nahe der axialen Stirnseiten, um die Wärmeleitung zu unterbrechen. Zusätzlich wurden Maßnahmen angewendet, die mittels schlecht wärmeleitender Beschichtungen und / oder Luftspalten den Mantel radial thermisch von der Matrix entkoppeln. Auch der Mantel selbst wurde mittels geeigneter Maßnahmen axial thermisch vom Abgassystem entkoppelt. Außerdem wurden unterschiedliche Materialien verwendet, die zur radialen Isolation des Katalysatoraußenmantels und der Kone eingesetzt wurden. In Tabelle 2 sind alle Katalysatorvarianten aufgelistet, bei denen Einzelmaßnahmen oder Kombinationen von Maßnahmen angewendet wurden.

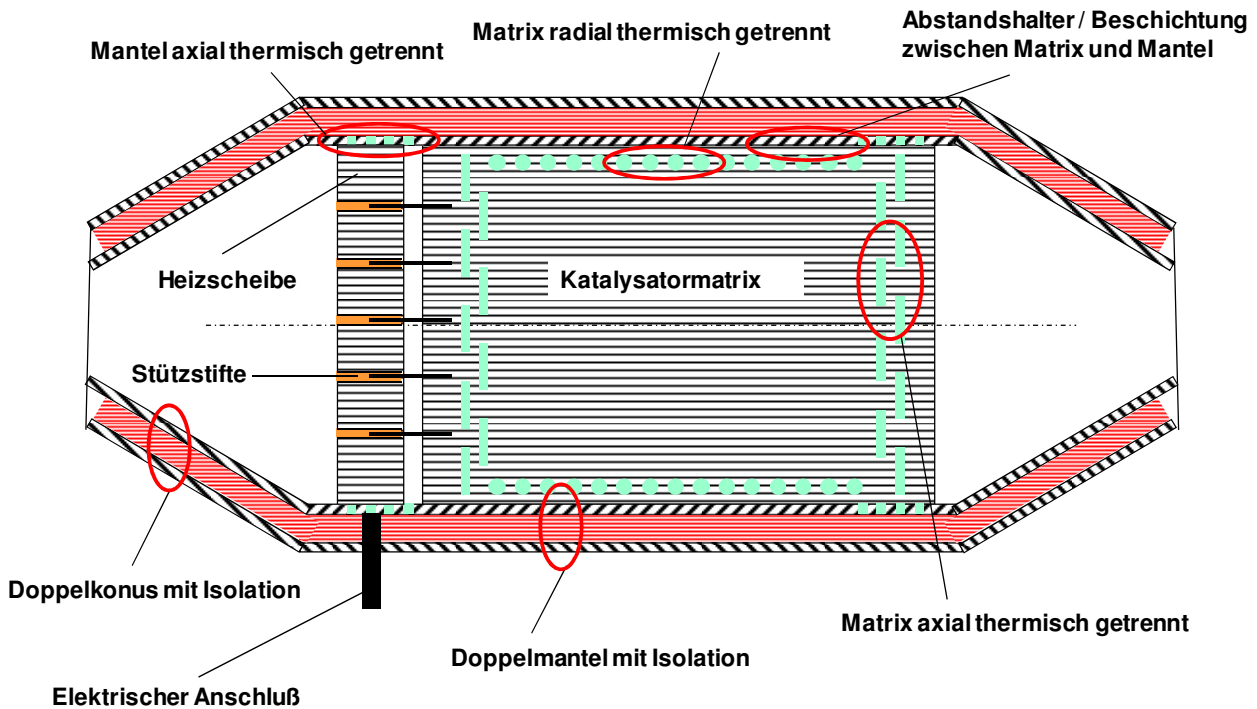


Abbildung 7: Beheizter Range-Extender-Katalysator mit internen und externen Isolationsmaßnahmen

Figure 7: Heated range extender catalyst with internal and external insulation

Zur Bewertung der unterschiedlichen Varianten wurden umfangreiche Versuche auf einem beheizbaren Strömungsprüfstand durchgeführt. Dazu wurden die unbeschichteten Träger mit den Abmessungen $\varnothing 98,4 \times 120 \text{ mm} / 600 \text{ cpsi} / 40 \mu\text{m}$ zunächst mittels eines beheizten Luftstroms auf unterschiedliche Zieltemperaturen im Zentrum aufgeheizt. Im Anschluss daran wurde der Träger – nach Abschalten der Durchströmung - unter Umgebungsbedingungen abgekühlt. Dabei wurde die Temperaturverteilung im Träger über eine Vielzahl von Thermoelementen aufgezeichnet.

Varianten	Isolationsmaßnahme radiale Richtung	Isolationsmaßnahme axiale Richtung
Referenz	<ul style="list-style-type: none"> keine 	<ul style="list-style-type: none"> keine
Radial_1	<ul style="list-style-type: none"> Doppelmantel mit Luftspalt 	<ul style="list-style-type: none"> keine
Radial_2	<ul style="list-style-type: none"> Doppelmantel mit keramischer Fasermatte 	<ul style="list-style-type: none"> keine
Radial_3	<ul style="list-style-type: none"> Matrix radial thermisch getrennt Abstandshalter zwischen Matrix und Mantel Doppelmantel mit keramischer Fasermatte 	<ul style="list-style-type: none"> keine
Radial_4	<ul style="list-style-type: none"> Matrix radial thermisch getrennt Abstandshalter zwischen Matrix und Mantel Innenmantel innen oxydisch beschichtet Doppelmantel mit Nanomaterial 	<ul style="list-style-type: none"> keine

Axial_1	<ul style="list-style-type: none"> keine 	<ul style="list-style-type: none"> Doppelkonus mit Luftspalt
Axial_2	<ul style="list-style-type: none"> keine 	<ul style="list-style-type: none"> Doppelkonus mit Nanomaterial
Radial_Axial_1	<ul style="list-style-type: none"> Matrix radial thermisch getrennt Abstandshalter zwischen Matrix und Mantel Innenmantel innen oxydisch beschichtet Doppelmantel mit Nanomaterial 	<ul style="list-style-type: none"> Matrix axial thermisch getrennt Mantel axial thermisch getrennt
Radial_Axial_2	<ul style="list-style-type: none"> Matrix radial thermisch getrennt Abstandshalter zwischen Matrix und Mantel Innenmantel innen oxydisch beschichtet Doppelmantel mit Nanomaterial 	<ul style="list-style-type: none"> Matrix axial thermisch getrennt Mantel axial thermisch getrennt Doppelkonus mit Luftspalt
Radial_Axial_3	<ul style="list-style-type: none"> Matrix radial thermisch getrennt Abstandshalter zwischen Matrix und Mantel Innenmantel innen oxydisch beschichtet Doppelmantel mit Nanomaterial 	<ul style="list-style-type: none"> Matrix axial thermisch getrennt Mantel axial thermisch getrennt Doppelkonus mit Nanomaterial

Tabelle 2: Versuchsmatrix mit unterschiedlichen Isolationsvarianten, Katalysatorträger Ø 98,4 x 120 mm / 600 cps / 40 µm, unbeschichtet

Table 2: Test matrix with different types of insulation, catalyst Ø 98,4 x 120 mm / 600 cps / 40 µm, uncoated

Die Abbildungen 8 und 9 zeigen die Messergebnisse in Form von Volumenanteilen der Katalysatormatrix, die, ausgehend von einer Kerntemperatur von 400°C, noch oberhalb einer angenommenen Light-Off-Temperatur von 230°C liegen und somit noch katalytisch aktiv sind.

Wärmeverluste in radialer Richtung:

Man erkennt, dass in Abwesenheit jeglicher Isolationsmaßnahme (Referenz), nach etwa 300 s die ersten Anteile der Matrix beginnen, den Wert von 230°C zu unterschreiten. Nach etwa 800 s ist das komplette Volumen kälter als 230°C und somit inaktiv. Durch die Anwendung von radialen Isolationsmaßnahmen wie ein Doppelmantel mit Luftspalt (Radial_1) oder mit einer keramischen Isolation (Radial_2) kann der Prozess der Auskühlung um 200 – 300 Sekunden verzögert werden. Allerdings zeigt eine zusätzliche radiale Abkopplung zwischen Matrix und Mantel (Radial_3) wenig Wirksamkeit, wenn keine zusätzliche axiale Isolation angebracht ist wie in diesem Fall. Erst durch Ersatz der keramischen Matte durch eine Isolationsfüllung mit verringerter Wärmeleitfähigkeit im Luftspalt zusammen mit einer Beschichtung auf der Innenseite des Mantels kann hier eine weitere Verbesserung um zusätzlich 100 s erzielt werden (Radial_4).

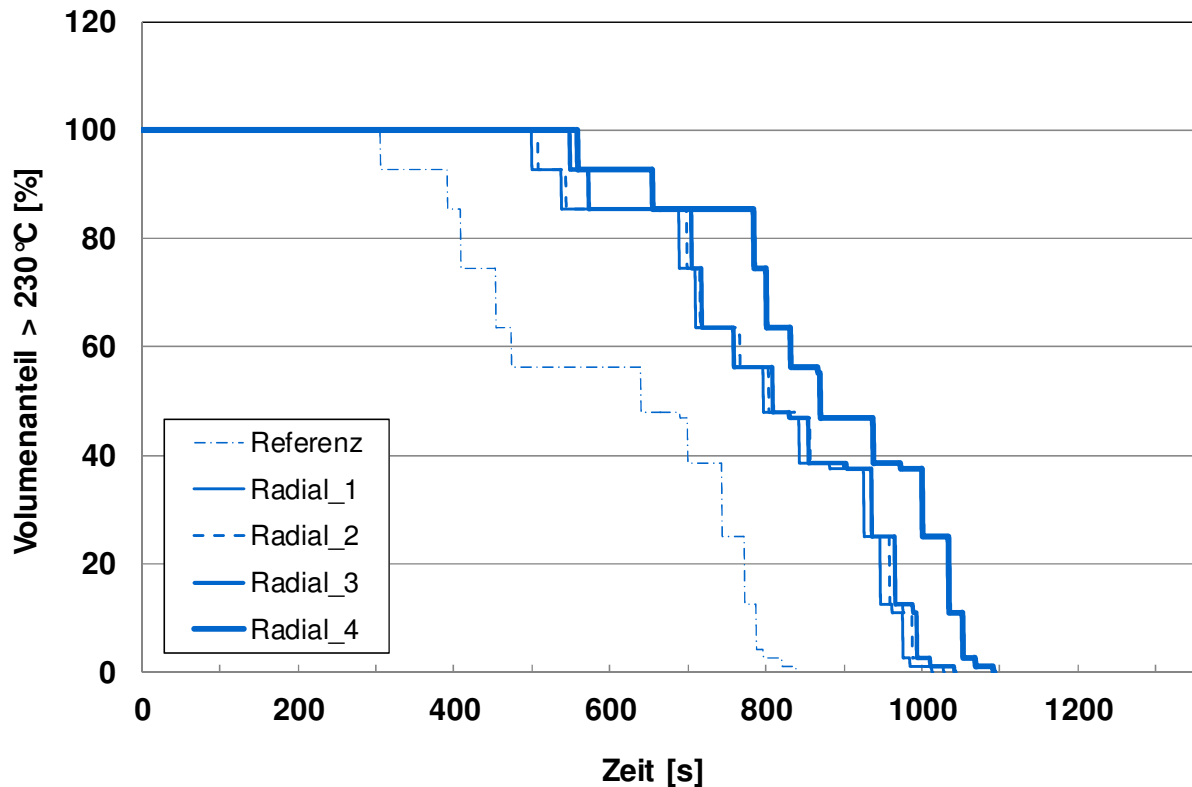


Abbildung 8: Anteile der Katalysatorstruktur oberhalb der Light-Off-Temperatur von 230 °C, unterschiedliche radiale Isolationsvarianten

Figure 8: Share of catalyst volume being on a temperature level above 230 °C, with different radially applied insulation measures

Wärmeverluste in axialer Richtung:

Abbildung 9 zeigt bei Auswertung der Varianten Axial_1 und Axial_2 eine gering ausgeprägte Wirksamkeit der rein axialen Isolationen Doppelkonus mit Luftspalt bzw. mit Nanomaterial mit verringerter Wärmeleitfähigkeit. Dies gilt allerdings nur für den Grenzfall der fehlenden radialen Katalysatorisolation. Rein radial wirkende Varianten wie die Version Radial_4 sind hier bereits deutlich wirksamer.

Fügt man allerdings radial und axial wirksame Katisolation zusammen, wie im Beispiel der roten Kurven in Abb. 9 (Kombination von thermisch getrennter Matrix, Abstandshalter zum Mantel, einer beschichteten Mantelinnenseite sowie einer Außenisolation mit Nanomaterial), bringt jede einzelne der durchgeführten axialen Maßnahmen eine zusätzliche Verbesserung zur Basisversion ohne axiale Isolation (Radial_4). Bereits die axiale thermische Trennung von Matrix und Mantel (Radial_Axial_1) bringt eine deutliche Verbesserung von etwa 150 s. Eine zusätzliche Isolation des Konus bzw. die Verwendung von wärmeleitfähigkeitsoptimiertem Isolationsmaterial zu dessen Isolation bringen jeweils noch einmal Vorteile in ähnlichen Größenordnungen.

In der Summe aller Maßnahmen konnte somit wirksam eine Verzögerung der Abkühlung der Katstruktur erzielt werden, die dazu führt, dass der Katalysator fast 2 mal so lang auf Betriebstemperatur verbleibt wie ohne Isolationsmaßnahmen.

Hierbei wurde deutlich, dass erst die Summe vergleichsweise einfacher Einzelmaßnahmen zum Erfolg führt, denn radiale Maßnahmen für sich genommen wirkten ohne zusätzliche axiale Maßnahmen nur unbefriedigend und umgekehrt. Die Wärmeabflüsse folgen den physikalisch möglichen Pfaden gemäß deren Widerständen, daher gilt es, die Einzelwiderstände soweit als möglich zu erhöhen und insbesondere alle Widerstände in gleicher Weise zu berücksichtigen.

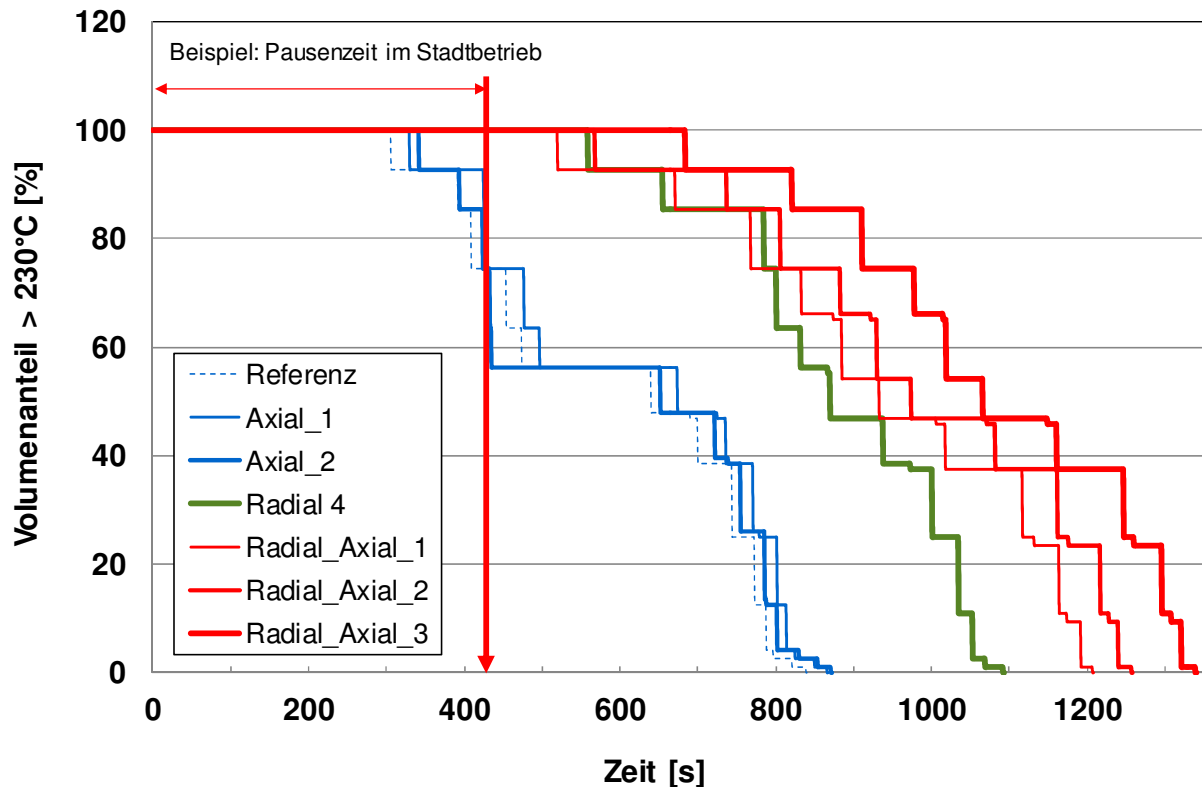


Abbildung 9: Anteile der Katalysatorstruktur oberhalb der Light-Off-Temperatur von 230 °C, unterschiedliche radiale und axiale Isolationsvarianten

Figure 9: Share of catalyst volume being on a temperature level above 230 °C, with different radially and axially applied insulation measures

Legt man das in Abschnitt 2, Abbildung 2a gezeigte Szenario als Beispiel zugrunde, zeigt sich, dass die im Stadtbetrieb erhaltenen Pausenzeiten schon zur emissionsrelevanten Auskühlung des Katalysators führen würden, die sich mittels der gezeigten Maßnahmen jedoch verhindern bzw. abschwächen ließe. Unter Einbeziehung der zuvor beschriebenen Eigenschaften hinsichtlich Aufheiz- und Abkühlverhalten erscheint es nun also möglich, ein Hybrid-Konzept zu realisieren, bei dem der Katalysator bei jedem Motorstart bereits schon oder immer noch weitgehend auf Konvertierungstemperatur ist und somit einen emissionsarmen Motorstart ermöglicht. Die hohe katalytische Effektivität kann darüber hinaus dazu beitragen, im Ballungsräumen Endrohremissionen darzustellen, deren Schadstoffkonzentrationen unterhalb des Niveaus der Umgebungsluft liegen. Im nächsten Kapitel wird die technische Umsetzung am Beispiel eines Versuchsfahrzeuges demonstriert.

4. Optimierte Betriebsstrategie - Fahrzeugtests

Ziel der Untersuchungen am Fahrzeug war es, für unterschiedliche Randbedingungen einen emissionsarmen Motorstart demonstrieren zu können. Gleichzeitig sollten die Simulationsergebnisse aus Kapitel 3 validiert werden. Dazu wurde an einem Versuchsfahrzeug ein elektrisch beheizter Katalysator mit einer Heizleistung von 1.8 kW in motornaher Position verbaut. Die Katalysatorabmessung war $\varnothing 98,4 \times (8 + 140) \text{ mm} / 600 \text{ cpsi}$. Die hier dargestellten Versuche wurden mit einer Sekundärluftpumpe gefahren, um den Einfluss unterschiedlicher Massenströme zu untersuchen. Bei weiterführenden Versuchen soll jedoch der Motor als 'Luftpumpe' genutzt werden. Dies wird möglich durch einen zusätzlichen elektrischen Antriebsmotor mit einer Konstantleistung von 12 kW, der zwischen Motor und Getriebe angeordnet ist und der den Verbrennungsmotor in der Phase vor dessen Start durchdreht.

Erste Versuche wurden auf Basis eines NEFZ-Kaltstarts durchgeführt, weiterführende Untersuchungen sollen vor allem hybridspezifische Startsznarien betrachten, wie sie später noch genauer beschrieben werden.

Zur Temperaturerfassung wurde der E-Kat mit diversen Thermoelementen sowohl hinter der Heizescheibe als auch im nachfolgenden Stützkatalysator ausgerüstet. Abbildung 10 zeigt den Temperaturverlauf einer Messstelle 15 mm tief im Stützkatalysator bei einem NEFZ-Kaltstart mit unterschiedlichen Vorheizzeiten und unterschiedlichen Massenströmen in der Vorheizphase, Abbildung 11 die entsprechenden Temperaturen in 70 mm axialer Tiefe im Stützkat.

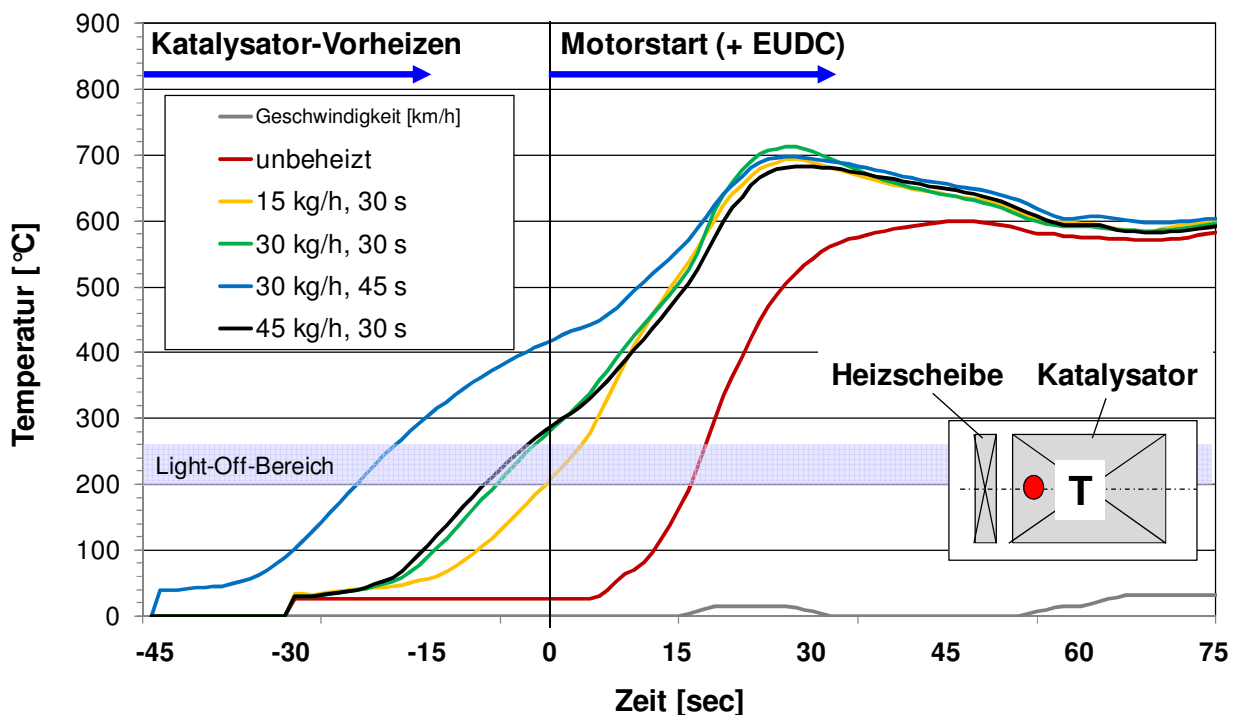


Abbildung 10: Temperaturen in 15 mm axialer Tiefe des Stützkatalysators bei Verwendung unterschiedlicher Kaltstartstrategien im NEFZ ($\varnothing 98,4 \times (8 + 140) \text{ mm} / 600 \text{ cpsi}$)

Figure 10: Temperatures at a depth of 15 mm in the support catalyst for various cold start strategies in the NEFC ($\varnothing 98,4 \times (8 + 140) \text{ mm} / 600 \text{ cpsi}$)

Wie Abbildung 10 zeigt, gelingt es mit einem Massenstrom von 15 kg/h und einer Vorheizzeit von 30s nicht ganz, dass die Temperatur in 15 mm axialer Tiefe den Light-Off-

Bereich des Katalysators erreicht, sondern erst wenige Sekunden nach Motorstart, damit allerdings immerhin schon 13 s früher als ohne Beheizung. Durch eine Verdopplung des Massenstroms auf 30 kg/h ist es dann aber möglich, an der Messstelle bereits bei Motorstart eine Temperatur von ca. 300 °C zu erzielen und somit Light-Off zu ermöglichen. Eine weitere Erhöhung des Massenstroms zeigt an dieser Messstelle keinen signifikanten Einfluss mehr.

Deutlichere Auswirkung hat die Verlängerung der Vorheizzeit bei einem mittleren Massenstrom (30 kg/h) von 30 s auf 45 s. Hierdurch kann die Temperatur an der genannten Position nochmals um 150°C angehoben werden und liegt damit deutlich oberhalb des Light-Off-Bereiches.

Betrachtet man jetzt die Temperaturen in der Mitte des Stützkatalysators (Abbildung 11), so erkennt man, dass ein Durchheizen bis zu diesem Ort ohne aktive Beheizungsmaßnahmen erst nach dem ersten Beschleunigungshügel stattfindet. Unter Anwendung von Vorheizmaßnahmen kann je nach Szenario bereits vor oder während der ersten Beschleunigung die Hälfte des Katalysatorvolumens auf Light-Off-Temperatur gebracht werden. Unter Berücksichtigung der nicht ganz identischen Heizleistungen sowie der deutlich unterschiedlichen Vorheizzeiten in Messungen bzw. Berechnung erscheinen die in Abbildung 4a bzw. 11 gezeigten Temperaturverläufe durchaus plausibel.

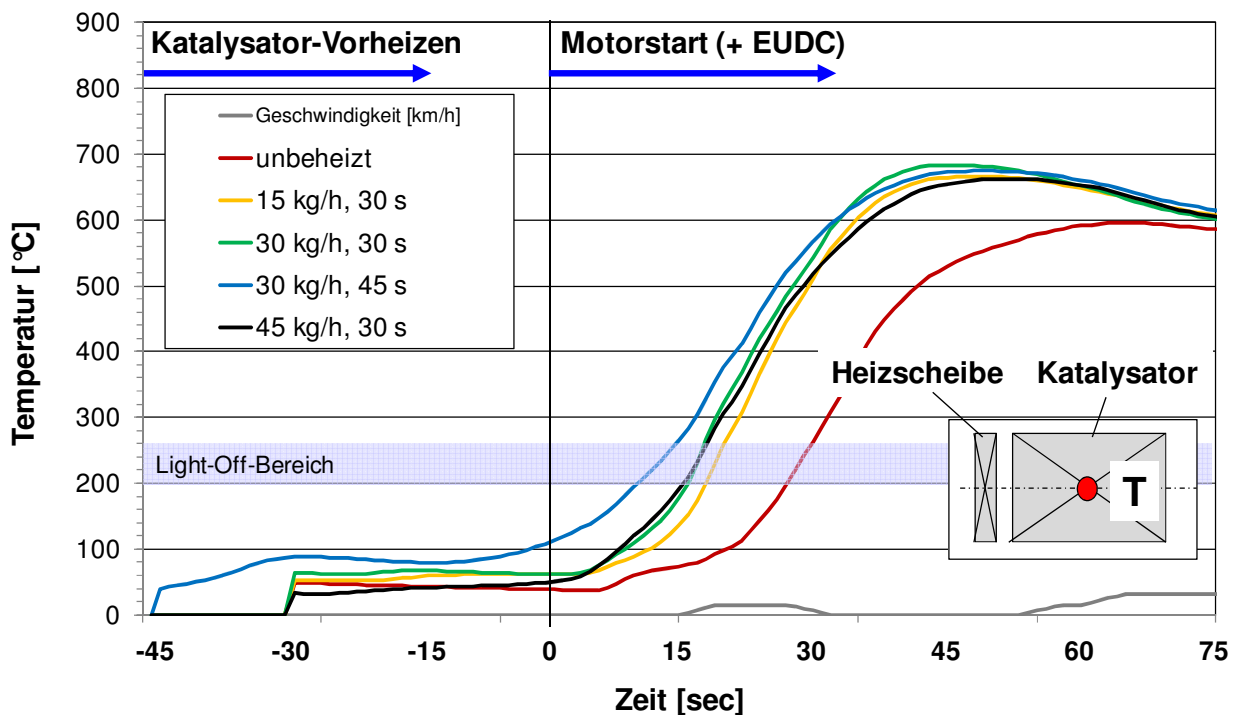


Abbildung 11: Temperaturen in 70 mm axialer Tiefe des Stützkatalysators bei Verwendung unterschiedlicher Kaltstartstrategien im NEFZ ($\varnothing 98,4 \times (8 + 140) \text{ mm} / 600 \text{ cpsi}$)

Figure 11: Temperatures at a depth of 70 mm in the support catalyst for various cold start strategies in the NEFC ($\varnothing 98,4 \times (8 + 140) \text{ mm} / 600 \text{ cpsi}$)

Die Auswirkung dieser Maßnahmen auf die Emission ist in Abbildung 12 dargestellt. Gegenüber dem normalen Kaltstart kann mit einer Vorheizzeit von 30 s und einem Massenstrom in der Vorheizphase von 15 kg/h die HC-Emission im Kaltstart um ca. 80%

von 0,8 g auf 0,15 g reduziert werden. Eine ähnliche Reduktion wird für die CO-Emission erreicht.

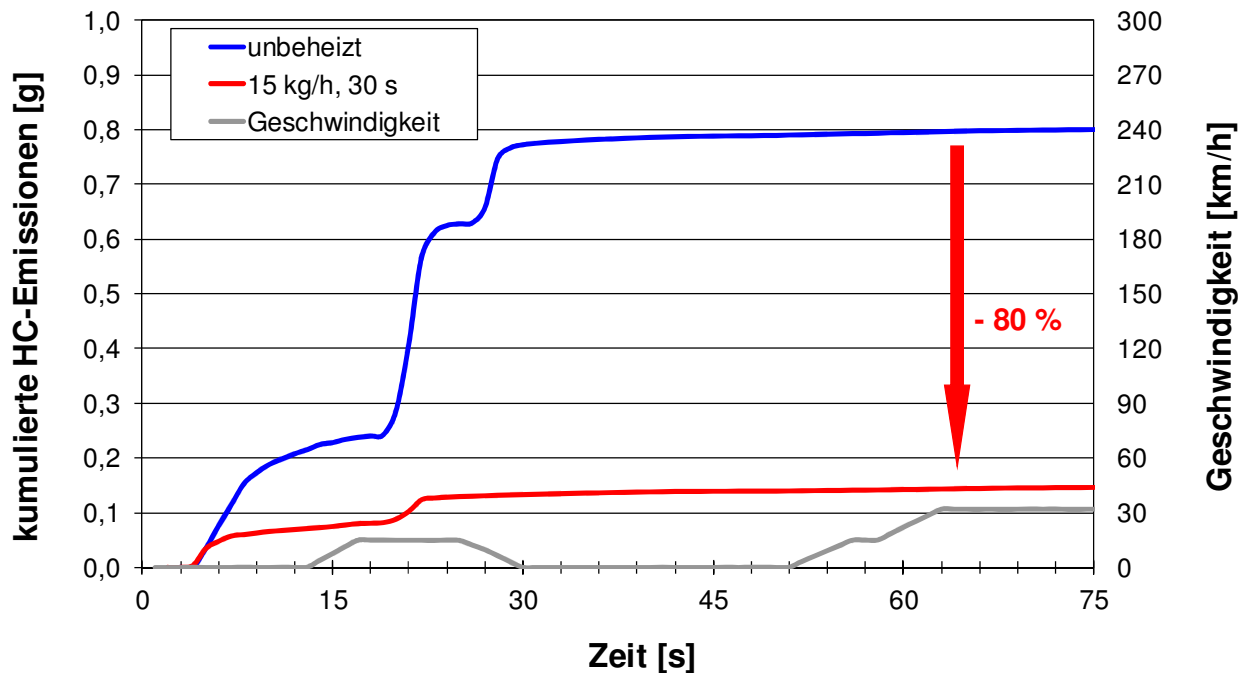


Abbildung 12: Einfluss der Vorheizstrategie auf die HC-Emission im Kaltstart des NEFZ

Figure 12: The effect of the pre-heating strategy on HC emissions in NEDC cold start

Betrachtet man den Verlauf der HC-Rohemissionen mit der Vorheizstrategie 15 kg/h / 30 s in Abbildung 13, so erkennt man, dass die noch verbleibenden Emissionen im Wesentlichen durch zwei HC-Peaks verursacht werden, die, zum einen direkt bei Motorstart, zum anderen beim Übergang von der Beschleunigung in die konstante Geschwindigkeit verursacht werden.

Während der erste Peak durch den Startvorgang verursacht wird, bei dem der Motor aus einer relativ geringen Startdrehzahl über den Start der Verbrennung auf die Leerlaufdrehzahl hochgefahren wird, resultiert der zweite Peak aus den dynamischen Lastanforderungen, deren optimale Abstimmung vor allem bei kaltem Motor hohe Anforderungen stellt. Stellt man sich nun den Betrieb des Verbrennungsmotors im Umfeld eines Range-Extender-Fahrzeuges vor, so ergeben sich mögliche Betriebsarten, die ein Potential zur signifikanten Absenkung dieser Restemissionen böten. So wäre es z.B. denkbar, den Motor beim Startvorgang mittels des Elektromotors bereits auf die vorgesehene Betriebsdrehzahl zu schleppen und mittels eines ‚sanftes‘ Zuschaltens der Einspritzung und Zündung die Last langsam hochzufahren. Damit wären die beiden kritischen Betriebszustände, die in erster Linie für die Kaltstartemissionen verantwortlich sind, deutlich entschärft. Weitere Untersuchungen in dieser Richtung sollen das diesbezügliche Potential aufzeigen, um in Verbindung mit dem Range-Extender-Katalysator das Ziel ‚Null-Emission‘ zu realisieren.

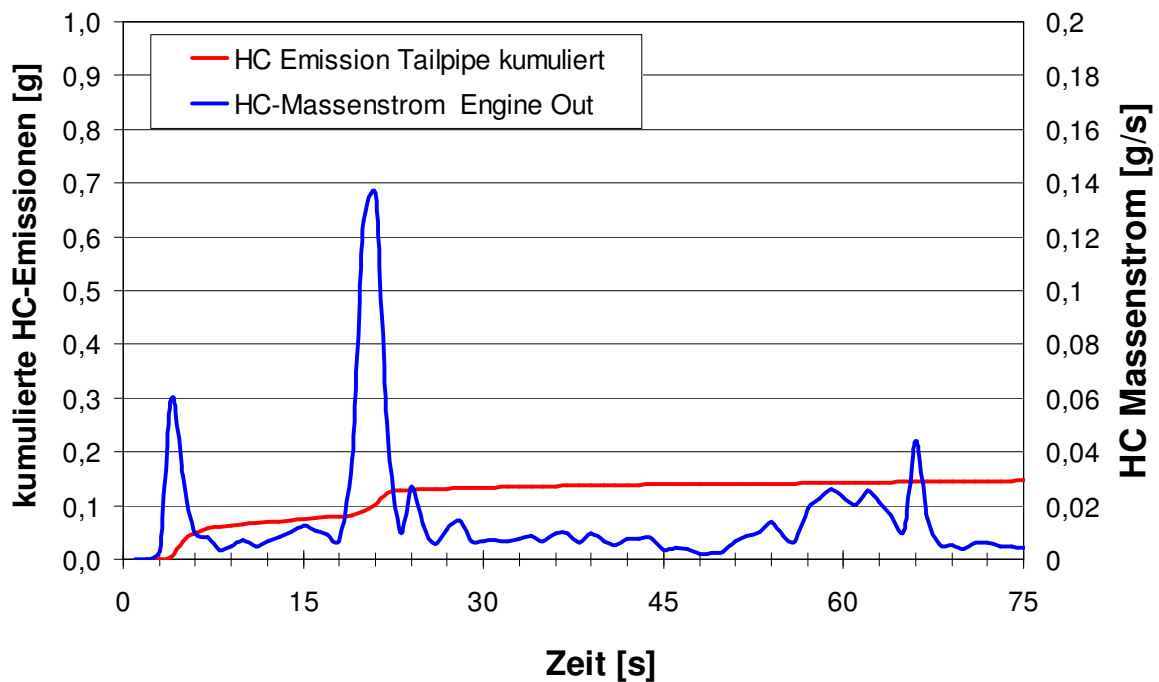


Abbildung 13: Verlauf der HC-Rohemission beim konventionellen Motorkaltstart mit der Vorheizstrategie 15 kg/h / 30 s

Figure 13: HC raw emission during conventional engine coldstart with pre-heating (15 kg/h / 30 s)

5. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung und die Optimierung eines neuen Katalysatorkonzeptes, des Range-Extender-Katalysators, dessen Auslegungskriterien und Auswirkungen auf die Endrohrmissionen insbesondere beim Einsatz bei Ottomotoren. Der Vorteil von elektrifizierten Antriebssträngen im rein elektrischen Betrieb liegt darin, dass sie in der Lage sind, lokal und im begrenzten Umfang tatsächlich als Null-Emissionsfahrzeuge zu funktionieren. Dies erfordert jedoch eine Abgasnachbehandlung des im Fahrzeugsystemverbund noch vorhandenen Verbrennungsmotors, die eine nahezu vollständige Umsetzung der gesetzlich limitierten Schadstoffe gewährleistet. Typische, aus den denkbaren Betriebsarten eines als Range-Extender arbeitenden Verbrennungsmotors abgeleiteten Anforderungen an das Nachbehandlungssystem sind insbesondere das Aufheizen des Katalysators bereits vor Motorstart, welches zum Beispiel durch das Vorhandensein einer Katalysator-internen elektrischen Heizfunktion umgesetzt werden kann. Darüber hinaus ist es mindestens ebenso wichtig, das Auskühlen des Katalysators bei längeren Motorstillstandszeiten durch eine optimierte Isolation so lange wie möglich zu verzögern.

Als Annäherung an eine Lösung dieser Aufgaben wurde das Range-Extender-Katalysatorkonzept vorgestellt, das sowohl eine elektrische Vorheizfunktion umfasst als auch seitens des Designs dahingehend optimiert ist, nur minimale Wärmeabflüsse an die Umgebung zuzulassen und somit das Katalysatorsystem fast doppelt so lange wie ein nicht isoliertes System auf Betriebstemperatur zu halten.

Es konnte sowohl rechnerisch simuliert als auch durch korrelierende Messungen nachgewiesen werden, dass es Optima bzgl. der beim Vorheizen des Katsystems

herrschenden Randbedingungen Luftmassenstrom und Heizdauer gibt, die dann jeweils zu minimalen Emissionsergebnissen führen. Sowohl in der Messung als auch in der Simulation konnte die Kaltstartemission mittels eines vorgeheizten E-Katsystems um 80 bis 90% reduziert werden.

Somit wurde ein Grundkonzept aufgezeigt, das nach weitergehender Verfeinerung und Optimierung ein großes Potential aufweisen könnte, als Katalysatorkonzept für zukünftige Range-Extender-Antriebskonzepte zu dienen.

Quellenverzeichnis

- [1] D. Zetsche; Daimler AG: „Auf dem Weg zur emissionsfreien Mobilität ? Möglichkeiten und Grenzen des elektrischen Fahrens.“; Aachener Motorenkolloquium 2009
- [2] J. Hadler; Volkswagen AG: „Gegenwärtige und zukünftige Antriebstechnologien im Spannungsfeld globaler Anforderungen“; Aachener Motorenkolloquium 2009
- [3] R. Forst; Adam Opel AG: „Elektromobilität bei Opel - Die Zukunft des Verkehrs“; Aachener Motorenkolloquium 2010
- [4] G. Zikoridse; HTW Dresden: „Konzeptstudie zur Realisierung einer Abgasnachbehandlung beim Betrieb eines Range-Extenders“; Innovationsforum Feinstaubarmes Fahrzeug, Klettwitz 2011
- [5] W. Maus, R. Brück; Emitec GmbH: „Verbrennungsmotor kontra Elektromobilität: Rekuperation als Schlüsseltechnologie“; 14. Int. Jahreskongress der Automobilindustrie 2010, Zwickau
- [6] U. Höpfner; IFEU GmbH: „TREMODO-Energieverbrauch und Emissionen aus dem Verkehr in Deutschland“; Workshop im Statistischen Bundesamt; Berlin 2004
- [7] B. Blum-Oeste: „Entwicklung des Stromverbrauchs in Deutschland“; Göttingen, September 2010
- [8] Umweltbundesamt, FG I 2.5., Stand: März 2010
- [9] European Association for Battery Electric Vehicles: “CO₂-energy electric vehicles 5_0 draft.doc”
- [10] Kraftfahrtbundesamt: „Bestand an Personenkraftwagen in den Jahren 2006 bis 2010 nach Kraftstoffarten“; www.kba.de
- [11] Germany Trade & Invest: „Dänemark setzt auf rasche Verbreitung von Elektroautos“; Artikel vom 27.11.2009; www.gtai.de

- [12] B. Hartmann; RWTH Aachen, C. Renner; Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen, Aachen: "Autark, Plug-in oder Range-Extender? Ein simulationsgestützter Vergleich aktueller Hybridfahrzeugkonzepte"; 18. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik, 2009
- [13] P. Spurk, W. Müller; Umicore AG; C. Beidl, P. Weickgenannt; TU Darmstadt; G. Hohenberg; IVD Darmstadt: "Abgasnachbehandlung bei Hybridfahrzeugen – Welche Anforderungen ergeben sich daraus?"; 31. Int. Wiener Motorensymposium 2010
- [14] W. Maus, R. Brück, P. Hirth; Emitec GmbH: „Motornahe Katalysatorkonzepte; Neue technische Herausforderungen“; 18. Int. Motorsymposium, Wien 1997
- [15] P.-F. Küper; Porsche AG; W. Maus, H. Swars, R. Brück, F.-W. Kaiser; Emitec GmbH: „ Ultra-Low Power Electrically Heated Catalyst System“; SAE 940465; 1994
- [16] F.-J. Hanel, Alpina, E. Otto, BMW, R. Brück; Emitec GmbH: "Electrically Heated Catalytic Converter (EHC) in the BMW Alpina B12 5,7 Switch Tronic", SAE 960349, 1996
- [17] F.-J. Hanel, Alpina, E. Otto, BMW, R. Brück, T. Nagel, N. Bergau; Emitec GmbH: "Practical Experience with the EHC System in the BMW Alpina B12 ", SAE 970263, 1997
- [18] H. Bauer, H.-G. Haldenwanger; Audi AG, P. Hirth, R. Brück; Emitec GmbH: „Thermal Management of Close Coupled Catalysts“; SAE 991231, 1999
- [19] J. Breuer, R. Brück, R. Diewald, P. Hirth; Emitec GmbH: "Temperature Examinations on a Metal Catalyst System"; SAE 971028, 1997