

Effiziente Dynamikkonzepte unter schärfsten Abgasvorschriften

Concepts for Efficient Dynamics with respect to the most stringent Emission Legislations

S. Neugebauer, J. Tonhauser^{a,1} und W. Maus, J. Diringer,
A. Schatz^{b,2}

^a BMW Group
Knorrstr.147, 80788 München, Deutschland

^b Emitec GmbH
Hauptstr. 128, 53797 Lohmar, Deutschland

Kurzfassung: Durch die Begrenzung der fossilen Energieträger werden immense Anstrengungen unternommen, den Kraftstoffverbrauch der Verbrennungsmotoren weiter zu reduzieren. Gleichzeitig muss jedoch den Kundenwünschen zu sicheren Fahrzeugen mit steigenden Fahrleistungen genügt werden.

Verbesserter Kraftstoffverbrauch kann neben neuen Brennverfahren auch beispielsweise durch eine Vermeidung des Katalysatorschutzes durch Gemischanreicherung erzielt werden. Dazu müsste die Entwicklung der vergangenen Jahre, den Katalysator so motornah wie möglich zu verbauen, umgekehrt werden. Es werden Berechnungsergebnisse vorgestellt, die die neuesten Entwicklungen zum Katalysatorträger berücksichtigen und alternative Katalysatorposition vorstellen. Auch die elektrische Beheizung des Katalysators als alternatives Katalysatorsystem wird dabei diskutiert.

In der BMW Group spielt die effiziente Dynamik eine wesentliche Rolle in der Fahrzeugentwicklung. Das Management aller Energieflüsse kann neben den Motormaßnahmen den Kraftstoffverbrauch zusätzlich spürbar reduzieren. So kann z.B. der Motor in Leerlaufphasen ausgeschaltet werden. Einflüsse auf das Abgasnachbehandlungssystem werden diskutiert.

¹E-mail: Stephan.Neugebauer@BMW.de, URL: www.BMW.com
Johann.Tonhauser@BMW.de

²E-mail: Wolfgang.Maus@emitec.com, URL: www.emitec.com
Joachim.Diringer@emitec.com
Axel.Schatz@emitec.com

1. Einleitung

Mobilität ist ein Schlüsselfaktor für Wachstum und Beschäftigung und trägt im hohen Maße zur persönlichen Freiheit und damit zur Lebensqualität der Menschen bei. Unter Berücksichtigung der Bedürfnisse von Mensch und Umwelt muß die Mobilität deshalb auch für die nachfolgenden Generationen erhalten bleiben. Die fossilen Energieträger sind begrenzt, weshalb neue Wege gefunden werden müssen, die Menschen davon unabhängiger zu machen.

Die Verbrennungsmotoren bleiben wegen der Summen ihrer günstigen Eigenschaften noch langfristig die dominierende Antriebsquelle. Für die ständige Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und gleichzeitig der Abgasemissionen werden immense Anstrengungen unternommen, die zu immer höheren Entwicklungsaufwendungen führen. Gleichzeitig erwartet der Kunde aber ein weiterhin bezahlbares Automobil mit verbesserten Fahrleistungen, höherer Sicherheit, vergrößertem Raumangebot sowie mehr Komfort und Sicherheit.

In der Fahrzeugentwicklung der BMW Group heißt ein Entwicklungsziel: „ Effiziente Dynamik „ [1]. Damit wird der scheinbare Widerspruch zwischen Verbrauchs- und Emissionsreduzierung einerseits und Fahrleistung und Agilität andererseits aufgehoben. Die Anforderungen an Emissionen, Umweltverträglichkeit und Verbrauch dürfen dementsprechend nicht isoliert betrachtet werden, sondern immer im engen Zusammenspiel von Gesetzgebung, gesellschaftlicher Akzeptanz und Kundenbedürfnissen.

2. Herausforderung

Mit aktuellen Entwicklungen wie z.B. der Valvetronic ist es gelungen, die spezifischen Leistungen auf nahezu 65 kW/dm^3 zu steigern, den Verbrauch um 10% abzusenken und die schärfsten Emissionsanforderungen zu erfüllen [2].

Strahlgeführte DI-Brennverfahren setzen mit einer mageren, geschichteten Verbrennung Verbrauchspotentiale bis zu 20% gegenüber einem konventionellen Ottomotor um. In Kombination mit der Turboaufladung können die Potentiale zur Leistungs- und Drehmomentsteigerung voll genutzt werden und dabei die dadurch üblichen Verbrauchsverschlechterungen vermieden werden [3].

Um darüber hinaus Reduzierungen im Kraftstoffverbrauch zu erzielen, muß das gesamte Energiesystem des Fahrzeugs betrachtet werden. Erst wenn alle Wirkzusammenhänge der einzelnen Energieflüsse richtig verstanden werden, ergeben sich neue Lösungsansätze [4].

Läuft beispielsweise der Verbrennungsmotor im Leerlauf, wird mechanische Energie erzeugt, auch wenn diese gar nicht benötigt wird. Steht das Fahrzeug, so kann durch Abschalten des mechanischen Pfads die eingesetzte Energie eingespart werden, Abb. 1.

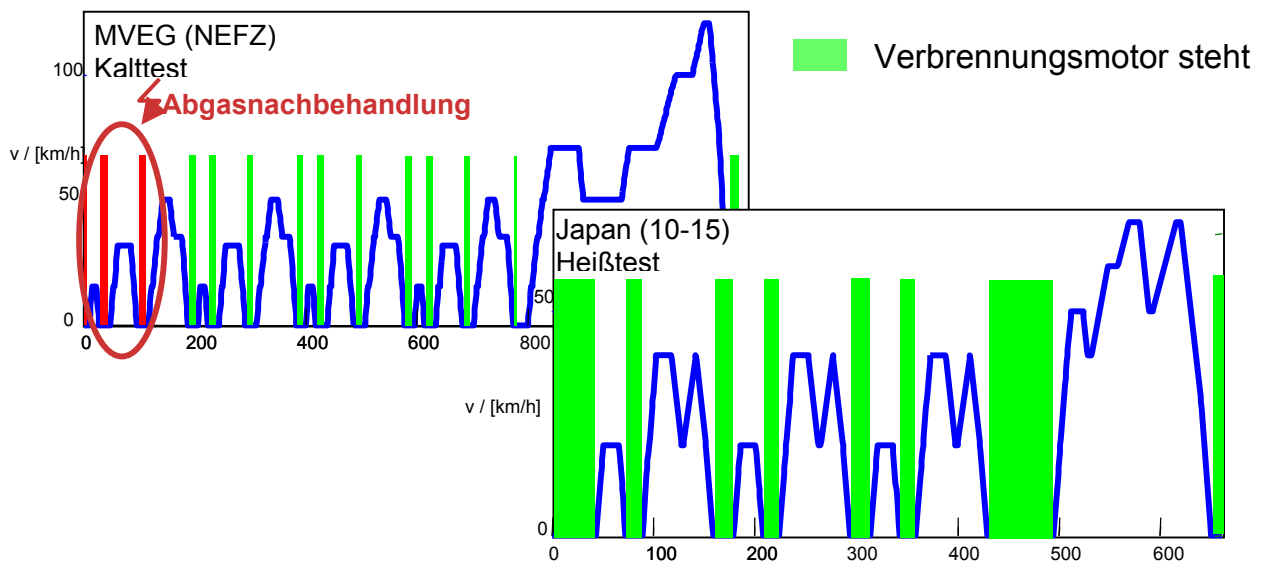


Abbildung 1: Potential mechanischer Energie

Abhängig vom Leerlaufverbrauch und dem Fahrprofil sind deutliche Verbrauchseinsparungen erreichbar (Tab. 1). Fahrzeuge mit Automatikgetriebe bieten hier wegen zusätzlicher Verluste im Leerlauf das höchste Einsparpotential. Spürbaren Verbrauchseinfluss hat die Abgasnachbehandlung im Warmlauf: eine Reduktion der mechanischen Verluste kann erst realisiert werden, wenn der Katalysator warm ist. Deshalb könnte beispielsweise der erste Motorstop im Europazyklus erst nach dem ersten Stadtzyklus erfolgen und damit das volle Verbrauchspotential nicht erschließen. Der Japantest zeigt ein wesentlich höheres Verbrauchsreduktionspotential.

VERBRAUCHSPOTENTIALE	EUROPA	JAPAN
Handschalter	3 %	6 %
Automatik	4 %	8 %

Tabelle 1: Einsparpotentiale durch Motorstop

Moderne Abgassysteme, die seit Jahren mit Erfolg motornah eingesetzt werden, haben den Vorteil, sehr schnell aufgeheizt und katalytisch aktiv zu sein und damit die schärfsten Abgasnormen zu erfüllen. Jedoch sind sie wegen des kurzen Abstands zum Brennraum extremen Temperaturen ausgesetzt. Dadurch sind bedarfsorientierte Schutzmaßnahmen durch Gemischanreicherung notwendig, die wiederum zu Kraftstoffmehrverbrauch führen.

In diesem Beitrag werden Konzeptuntersuchungen speziell zum Spannungsfeld zwischen Ansprungsverhalten und einer moderaten Maximaltemperatur der Katalysatoren beschrieben und Konzeptanalysen vorgestellt. Es wird zur Systemlösung auch speziell das Wärmemanagement der Abgasanlage betrachtet

und die Frage untersucht, ob neueste Entwicklungen wie z.B. turbulente Katalysatoren mit geringerer Wärmekapazität und die in den Katalysator integrierte Lambdasonde eine größere Distanz zwischen Motor und Abgasanlage erlauben.

3. Berechnung

Das Anspringen des Katalysators wird in erster Linie durch den Temperaturgradienten vor dem Katalysator, der Wärmekapazität und der Wärmetauscherfläche bestimmt. Deshalb wurden verschiedene Designvarianten konzipiert und auf ihr Light-Off Verhalten berechnet. Die Position des Kats wurde zuerst um 500 mm, dann um 1000 mm verschoben, so dass der Abstand zum Zylinderkopf 900 mm („mittlere Position“) bzw. 1400 mm („ Unterflur Position“) betrug. Die Eingangstemperaturen wurden entsprechend des Abstands reduziert. Als Maß des Anspringens wird die HC- Emission betrachtet.

Den Berechnungen zugrundegelegt wurden im MVEG Zyklus gemessene Daten eines BMW Vierzylinderversuchsmotors.

3.1 Randbedingungen

Das Programm KatProg wurde bei Emitec für die Berechnung des Kaltstartverhaltens von Katalysatorsystemen entwickelt. Es basiert auf einem zweidimensionalen Temperaturfeldberechnungsprogramm, das durch Routinen zur Berechnung der Katalysatorgeometrie und des Konvertierungsverhaltens ergänzt wurde. Das Katalysatorsystem wird dabei durch ein Netz von 10 konzentrischen Matrixmaschen in radialer Richtung sowie maximal 20 Maschen in axialer Richtung dargestellt. Die Anzahl der Maschen wird durch die Länge des Katalysators bestimmt. Außerdem existieren in radialer Richtung Maschen für Innenmantel, Luftspalt bzw. Lagermatte bei keramischen Trägern sowie Außenmantel (Abb. 2).

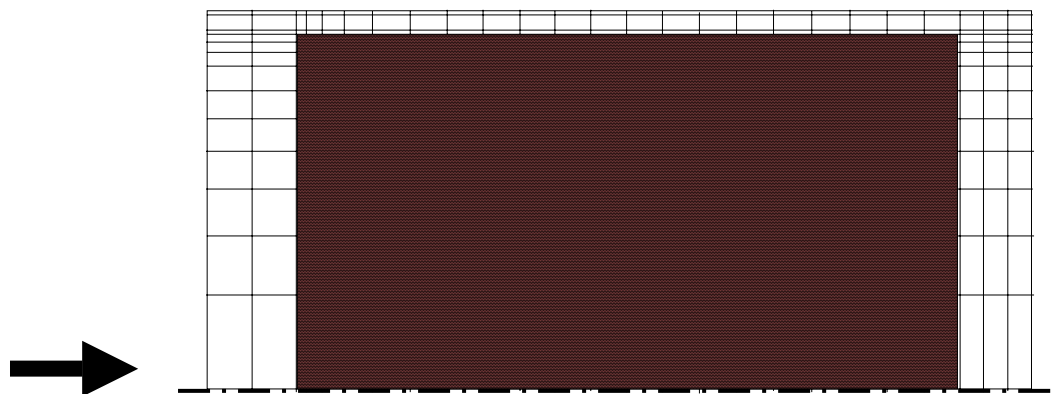


Abbildung 2 : Maschenmodell (radiale Hälfte) von Katprog

Zur Berechnung der Temperaturverteilung im Katalysator und des Konvertierungsverhaltens benötigt das Programm zunächst die Geometriedaten des zu berechnenden Systems wie z.B. Durchmesser, Länge, Zelldichte etc. sowie Eingabedaten bzgl. Rohemissionen, Massenstrom und Temperatur vor Katalysator, die in einem speziellen Datenfile eingegeben werden. Die Ergebnisausgabe erfolgt in Form einer Datenliste, mit Temperaturen, Emissionswerten sämtlicher Maschen etc.

Hieraus werden dann die interessierenden Werte, wie z.B. kumulierter Verlauf der HC-Emissionen für verschiedene Katalysatorsysteme nach dem Kaltstart des Motors, grafisch generiert.

Als Input werden die zeitlichen Verläufe des Massendurchsatzes, der Eintrittstemperatur in den Katalysator sowie der HC- und CO-Konzentrationen benötigt. In Abbildung 3 ist die in den folgenden Berechnungsbeispielen hinterlegte Light-Off Kurve einer stabilisierten Beschichtung für die Kohlenwasserstoffe gezeigt.

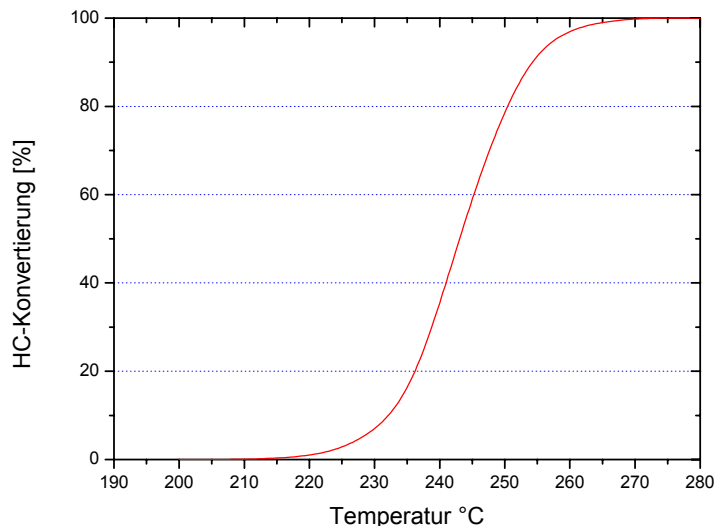


Abbildung 3: Light-Off Kurve als Grundlage der Kaltstartberechnung

3.2 Einfluß des Katalysatorposition

In passiven Systemen wird der Katalysator allein durch das Abgas der Motoren erhitzt. Dabei spielen die Wärmekapazität und die Wärmetauscherfläche eine entscheidende Rolle. Da eine Temperatur von ca. 220 bis 280 °C (abhängig von den Beschichtungseigenschaften) notwendig ist, entstehen bereits ca. 80% der Emissionen während des Kaltstarts. Um diese Emissionen zu reduzieren wurden in den letzten Jahren die Katalysatoren nahe des Motors angebracht. Dies ermöglicht ein schnelleres Aufheizen, so dass die Light –Off Temperatur in Verbindung mit Katheizmaßnahmen wie z.B. Spätzündung bereits nach wenigen Sekunden erreicht werden kann.

Ein Nachteil der Positionierung nahe des Motors (close coupled converter, CCC) ist, dass im betriebswarmen Zustand des Katalysators Temperaturen von bis über 1000°C erreicht werden können, die für einen dauerhaften Betrieb des Katalysators sowie anderer Fahrzeugkomponenten nicht mehr geeignet sind. Um den Katalysator zu schützen wird bei Lastzuständen nahe Vollast das Luft-Kraftstoff-Gemisch angereichert, um somit für eine innere Kühlung der Komponenten zu sorgen.

Erfahrungswerte zeigen, dass eine Anreicherung von 3 % eine Absenkung der Temperatur von 15 – 20 K bewirkt. Um diesen Mehrverbrauch an Kraftstoff zu

reduzieren oder ganz zu neutralisieren wäre wiederum eine Positionierung des Kats in Richtung Unterboden vonnöten. Um das Ziel der Reduzierung des Kraftstoffmehrverbrauchs bei gleichzeitiger Erhaltung der Emissionen zu verwirklichen, wurden an einem 4-Zylinder Ottomotor die Temperaturen vor Gaseintritt des Katalysators sowie die HC, CO-Emissionen und der Massenstrom gemessen. Die Verschiebung des Katalysators in Richtung Unterboden hat einen Temperaturverlust im betriebswarmen Zustand von 1 K / cm zur Folge. Beim Kaltstart erhöht sich dieser Wert auf bis zu 3 K/cm.

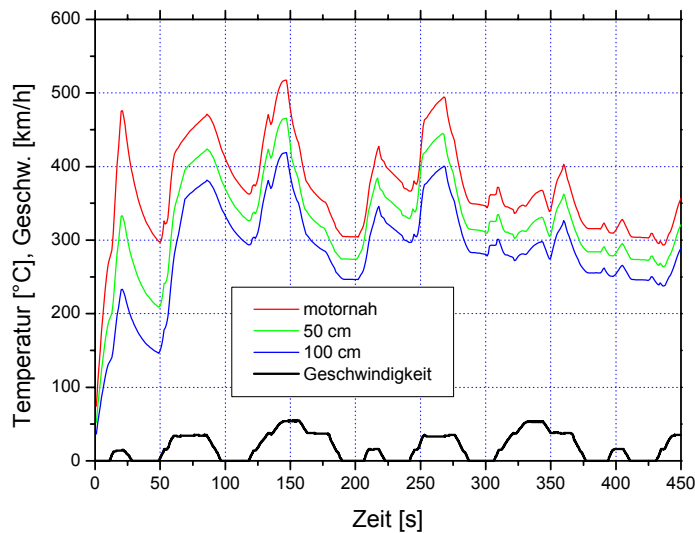


Abbildung 3: Verlauf der Abgastemperatur

Der Temperaturverlauf am Gaseintritt des Katalysators beim Durchfahren der ersten 450 s des MVEG Zyklus ist in Abb. 3 dargestellt. Die Dimension des Katalysators beträgt $\varnothing 105 * 150$ mm, 400 cpsi / 40 μ m. Während in motornaher Position die angenommene Anspringtemperatur von 220-280°C bereits nach wenigen Sekunden erreicht ist, wird dafür in der Unterflurlage bereits annähernd 60 sek benötigt. Damit können die schärfsten Abgasgrenzwerte natürlich nicht mehr erreicht werden.

Im Folgenden wird berechnet, wie sich die Verringerung der Wärmekapazität und / oder Erhöhung der Wärmetauscherfläche auf das Anspringverhalten des Katalysators an den verschiedenen Positionen auswirkt.

3.3 Designvariation des Katalysatorträgers

Durch die Verschiebung der Katalysatorposition in Richtung Unterboden ist es zwar möglich, die Gemischanreicherung zu reduzieren bzw. ganz zu vermeiden. Um jedoch die Emissionen wieder auf das Niveau der motornahen Anordnung zu bringen, ist ein verbessertes Thermomanagement des Katalysators erforderlich. Die reduzierte Katalysator Eintrittstemperatur führt zu einer signifikanten Erhöhung der HC Emissionen während des Kaltstarts beim MVEG Zyklus (Abb 4). Nach ca. 13 s hat der motornah positionierte Kat seine benötigte Starttemperatur erreicht und nach ca. 70 s ist kein nennenswerter Anstieg mehr zu beobachten. Das Verhalten der weiter im Unterboden angeordneten Katalysatoren ist entsprechend der Temperatur

verzögert. Dort erreicht der Katalysator seine Funktionsfähigkeit erst nach ca. 23 sek bzw. 60 sek der motorentferntesten Variante. Das verspätete Anspringen der weiter hinten positionierten Katalysatoren spiegelt sich auch in den berechneten Gesamtemissionen wider.

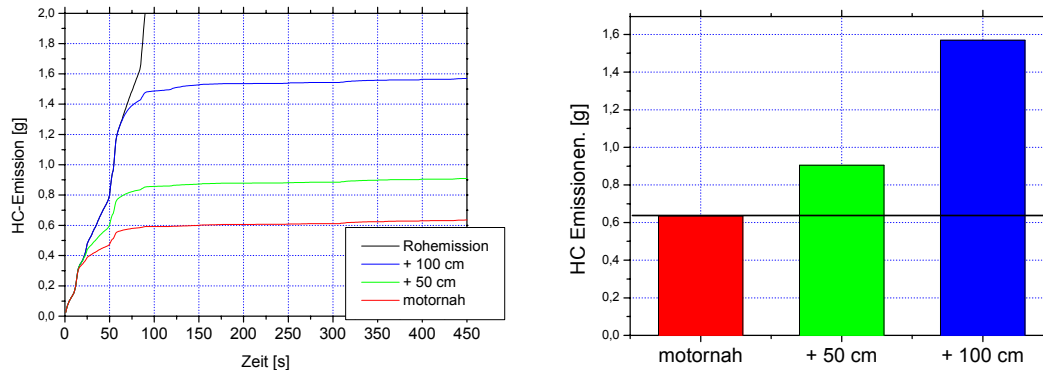


Abbildung 4: HC – Emission in verschiedenen Katalysatorpositionen

In den nachfolgenden Ausführungen ist das HC-Ergebnis der motornahen Position jeweils als Zielwert für die Designkonzepte vorgegeben.

Während des Aufheizens wirkt der Katalysator als Wärmesenke und folgt den Regeln eines Wärmetauschers [5]. Zu Einem hängt die Aufheizgeschwindigkeit von der Masse und der spezifischen Wärmekapazität ab. Zum Anderen ist die Zeit bis Light-Off dadurch bestimmt, wie effektiv die vom Motorabgas übertragene Wärme genutzt werden kann. Dies wiederum ist neben dem Wärmeübergang von der geometrischen Oberfläche des Katalysators abhängig (Zeldichte).

3.3.1 Thermische Masse

Eine Möglichkeit, die Light- Off Temperatur schneller zu erreichen, ist die Reduzierung der Folienstärke als geeignetes Mittel, um die spezifische Wärmekapazität C_p zu senken. Dabei ist zu beachten, dass die Washcoatmasse konstant bleibt und somit bei geringer werdender Gesamtmasse einen steigenden prozentualen Anteil darstellt.

ZELLDICHTE [cps]	400	400	400
Folienstärke [µm]	40	30	20
C_p [J/K]	642	552	461

Tabelle 2: Spezifische Wärmekapazität verschiedener beschichteter Katalysatorträger mit konstanter Washcoatbeladung 220 g/l

Die Reduzierung der Folienstärke von 40 µm auf 20 µm reduziert die Wärmekapazität um 28%, wodurch die Kaltstartphase des Katalysators entsprechend

verkürzt wird und ein schnelleres Durchheizen des Katalysators erfolgt [Abb. 5]. Dadurch, dass die übertragbare Wärmemenge im wesentlichen auch durch die Temperaturdifferenz zwischen Abgas und Träger bestimmt wird, ist der Einfluß in der mittleren Position ausgeprägter (-22% HC-Minderung gegenüber -9,5 % im UF-Position).

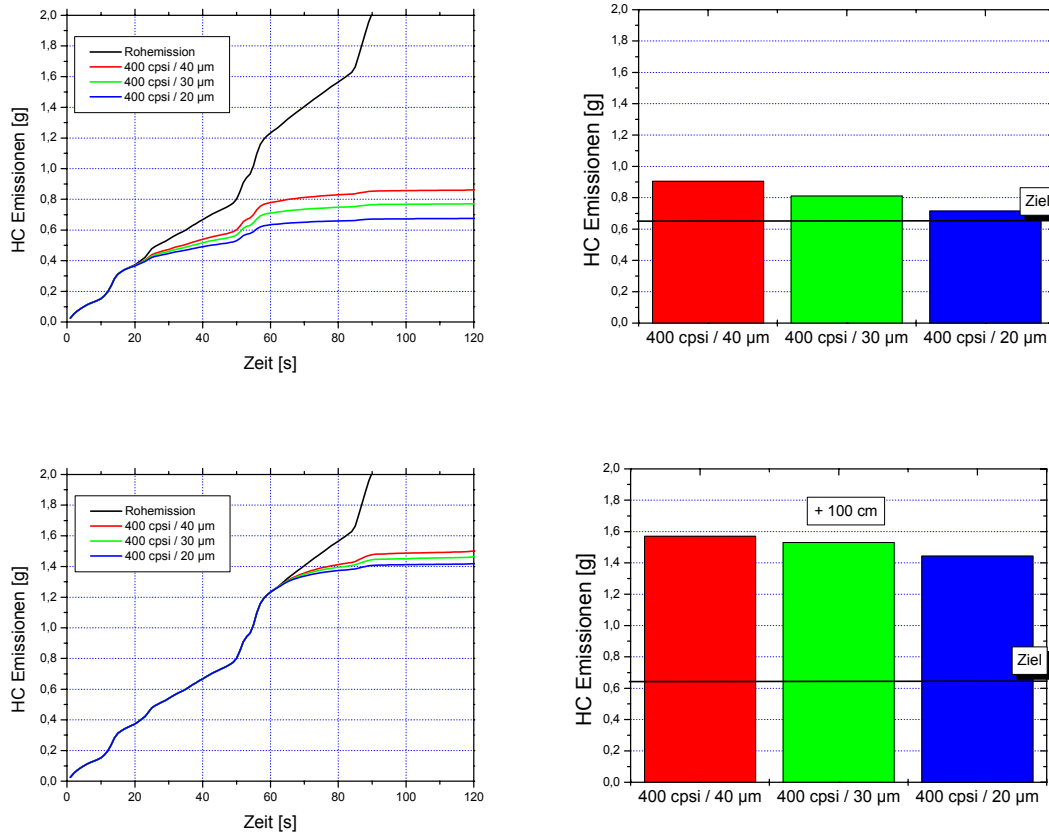


Abbildung 5: Kaltstartverhalten als Funktion der Wärmekapazität

Eine weitere Möglichkeit die thermische Masse des Katalysatorträgers zu beeinflussen ist der Einsatz eines sogenannten turbulenten Trägers mit perforierter Folie. Dabei werden die glatten und gewellten Lagen des Metaliten mit 8 mm großen Löchern versehen und danach aufgewickelt. Dieses Design erlaubt einen radialen Strömungsausgleich zwischen den Kanälen gemäß den einzelnen Druckunterschieden. Die durch die Lochung nach dem Wickelprozeß entstehenden Kavernen bewirken Mischungseffekte und erzeugen in regelmäßigen Abständen Turbulenzen beim erneuten Einströmen in die Kanäle.

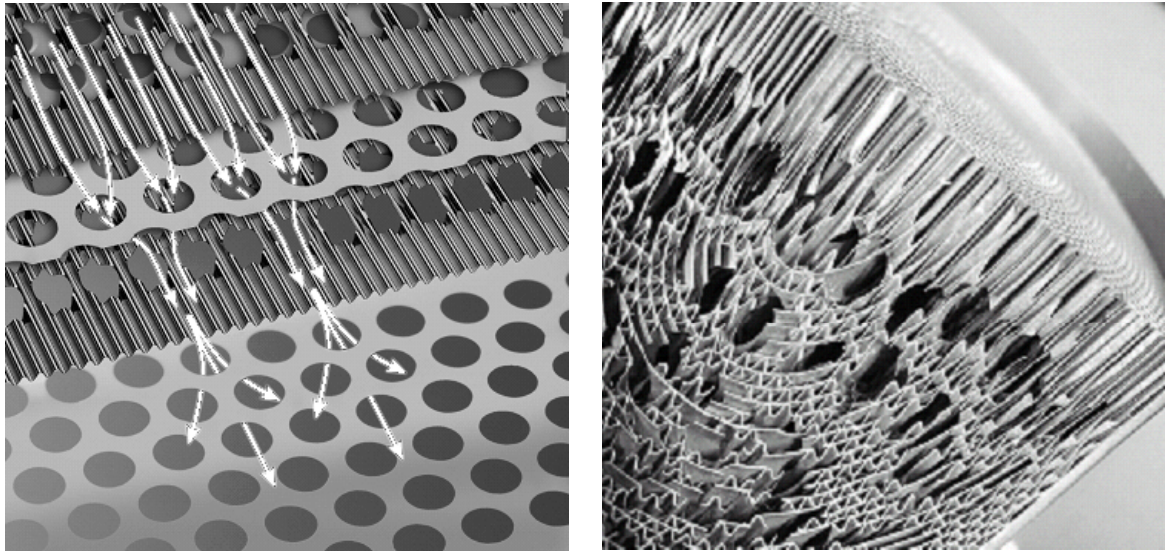


Abbildung 6: Metalit mit perforierten Folien (PE-Design)

Die Lochung bewirkt somit nicht nur eine Effizienzsteigerung bei gleichzeitig reduziertem Druckverlust wie in [6, 7] beschrieben, sondern senkt auch durch seine Porosität von ca. 38% die thermische Masse des Trägers [Tab. 3]. Außerdem wird die auf turbulente Katalysatorträger angepasste Washcoatmasse ebenfalls um den gleichen Betrag vermindert.

ZELLDICHTE [cpsi]	400	400	400 PE	400 PE
Folienstärke [µm]	40	20	30	20
Cp [J/K]	642	461	355	295

Tabelle 3: Einfluß der Perforierung auf die thermische Masse

Die kontinuierliche Verminderung der Wärmekapazität wirkt sich positiv auf das Startverhalten des Katalysators aus, so dass die Kombination 400PE mit 30µm Folie bereits das gleiche HC Ergebnis wie die motornahen Variante trotz einer 500 mm entfernten Lage erreicht. In der Unterflurposition wird das Aufheizverhalten zwar auch weiter positiv beeinflusst, kann jedoch den eminenten Nachteil der geringeren Eintrittstemperatur nicht egalieren.

Zur Verdeutlichung dieses Effekts wurde auch noch eine Variante mit 20µm Folie und PE berechnet, die das absolute Minimum an herstellbarer thermischer Masse darstellen würde. Fertigungstechnisch ist ein solches System jedoch noch nicht zur Serie freigegeben worden.

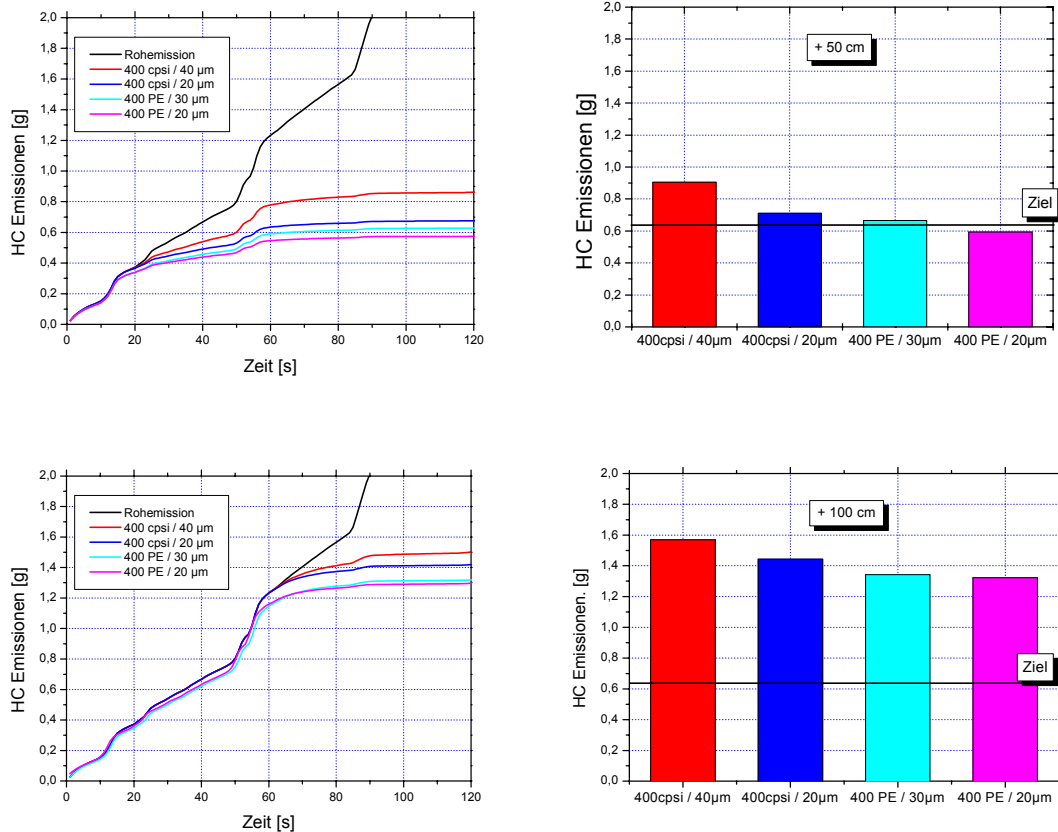


Abbildung 7: Einfluß der Perforierung der Folien auf das Kaltstartergebnis

3.3.2 Zelldichte

Die Steigerung der auf den Katalysator übertragenen Wärmemenge ist eng mit der geometrischen Oberfläche des Trägers verknüpft. In den vergangenen Jahren sind die Zelldichten bis zu 1200 cpsi für SULEV Systeme kontinuierlich erhöht worden. In jüngster Zeit kann man allerdings wieder eine Reduktion der Zelldichten durch verbesserte motorische Heizmaßnahmen beobachten. Somit ist ihre Effizienzsteigerung, die mit einer beträchtlichen Erhöhung des Gegendrucks einhergeht und damit kontraproduktiv zur angestrebten Verbrauchsreduktion ist, nicht mehr in diesem Maße notwendig.

Trotzdem wurde rechnerisch der Einfluß von 600 cpsi untersucht, da wie oben erwähnt mit Hilfe der Perforierung deutliche Absenkungen des Gegendrucks veröffentlicht sind (Tab. 4).

ZELLDICHTE [cps]	400 PE	400 PE	600 PE	600 PE
Folienstärke [µm]	30	20	30	20
Cp [J/K]	355	295	389	320
Dp [mbar]	120	111	155	142

Tabelle 4: Vergleich von Systemen unterschiedlicher Zelldichte

Abbildung 8 macht deutlich, dass die Steigerung der Oberfläche (600 PE gegen 400 PE) trotz einer 10 %igen Erhöhung der Wärmekapazität Vorteile bietet. In der angenommen mittleren Katalysatorposition kann man dieser Maßnahme bereits ein um ca. 20% verbessertes Emissionsergebnis gegenüber der motornahen Position erzielt werden. Im Unterflur jedoch liegt das Ergebnis um etwa einen Faktor 2 über dem Zielwert.

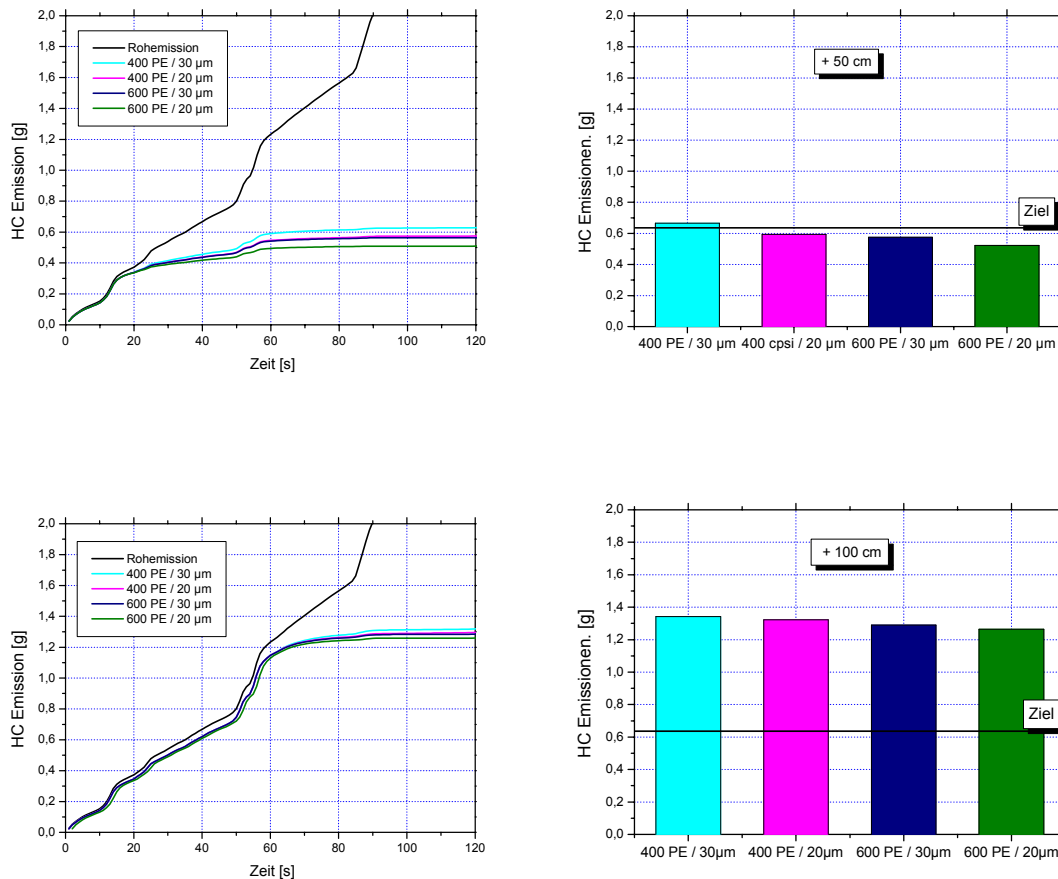


Abbildung 8: Erhöhung der Zelldichte / Wärmetauscherfläche steigert die Effektivität

3.4 Isolationsmaßnahmen / Thermomanagement

Zur Erreichung bestmöglicher Emissionsergebnisse ist eine Optimierung des Abgasanlagensystems unabdingbar. Ziel muß sein, beim Aufheizvorgang nach dem Motorstart Temperaturverluste vor dem Katalysator zu minimieren. Dazu ist ein möglichst gerader Verlauf sowie geringe innere Oberfläche der gasführenden Bauteile anzustreben. Die Masse von Krümmer und Rohren sowie Isolationsmaßnahmen sind in dieser Phase noch nicht dominierend.

Während des Kaltstarts hat auch eine Verringerung der Wandstärke des Trägermantels wegen abnehmender thermischer Masse einen ausgeprägten Einfluß. Während die übliche Bauweise einen Trägermantel von 1,5mm als integralen Bestandteil der Abgasanlage aufweist, kann ein Mantel von nur 0,5mm Stärke die Temperaturverluste im Randbereich in der Aufheizphase deutlich reduzieren

Nach dem Aufheizen des Systems sind im weiteren Verlauf des Abgastests bzw. im realen Fahrbetrieb bei Fahrprofilen mit geringen Geschwindigkeiten, wie Stop-and-Go und hohem Leerlaufanteil, durch geeignete Isolation Wärmeverluste zu vermeiden. Bei niedrigem Temperaturniveau unter 400°C im Katalysator ist ein Luftspalt vorteilhaft, weil dieser als guter Isolator gegen den hier vorherrschenden Übertragungsweg der Wärmeleitung funktioniert. Systematische Untersuchungen verschiedener Isolationssysteme zeigten auch bei Isolation der Ein- und Auslasskonen den zusätzlichen Vorteil gegenüber Auskühlen des Katalysators bei Motorstillstand [8]. Diese Maßnahmen sind unabdingbar für das Wärmemanagement des Katalysators bei Start-Stop-Systemen sowie Hybridbetrieb.

Bei ausgeführten Isolationen wird jedoch oft nicht bedacht, dass durch geeignete Maßnahmen die isolierenden Eigenschaften weiter verbessert werden können. Frühere Untersuchungen weisen aus, dass durch die Verwendung geeigneter Aussenmantelmaterialien der Wärmeverlust verringert werden konnte. In [9] wird gezeigt, dass austenitisches Material ein geringeres Wärmeemissionsverhalten besitzen als ferritische Materialien, sofern die Strahlung überwiegt.

Alle diese Betrachtungen wurden bei weiteren Berechnungen für die Optimierung des Katalysatorsystems eingesetzt. Während der Abstand Katalysator zur Isolierung sowie das Mantelmaterial direkt im Berechnungsprogramm einfließt, muss für die Isolierung der Vorrohre eine Temperaturerhöhung des Abgases von bis zu 20-30 °C angenommen werden [10]. Abb. 9 zeigt das Ergebnis der Emissionsberechnungen mit Standard-Isolierung, wie sie bisher in unserem Modell angenommen wurde, sowie eine optimiertes System. Dazu gehörten die Maßnahmen

- Manteldicke 0,5mm
- Vergrößerung des Luftspaltes auf 6mm
- Isolierung der Vorrohre
- Isolierung der Ein-/Austrittskonen

Die HC-Emissionen der Variante 600 PE / 20µm konnten um bis zu 20 % bei der Unterflur Position herabgesetzt werden. In dieser Position ist das Wärmemanagement von größerer Bedeutung als in Positionen mit deutlich höheren Temperaturgradienten.

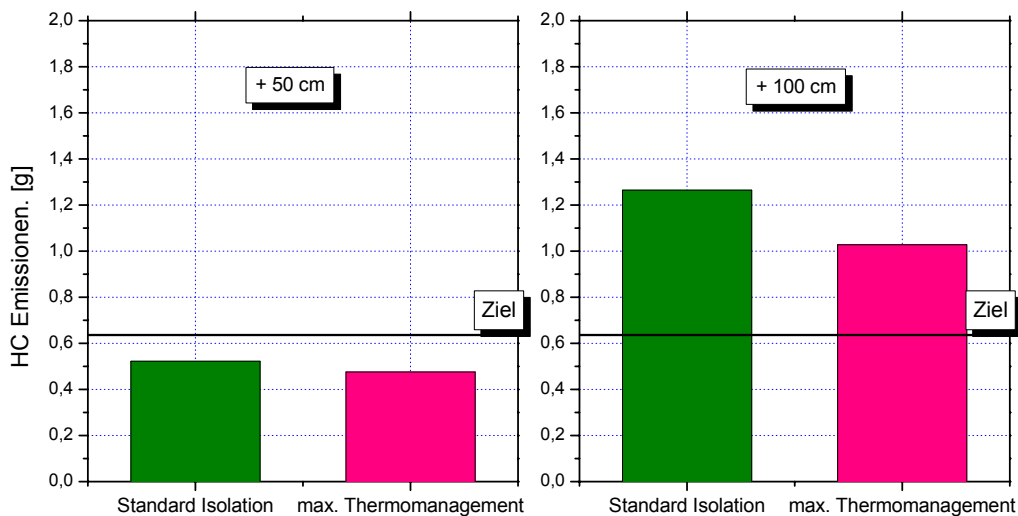


Abbildung 9: HC-Emission für unterschiedliche Isolationsmaßnahmen

3.5 Zusätzliche elektrische Heizmaßnahmen

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die Verschlechterung der Emissionen durch die Verschiebung der Katalysatorposition von der originalen motornahen Position um 50 cm durch den Einsatz von Katalysatoren mit geringerer Wärmekapazität C_p (reduzierte Folienstärke, PE-Struktur) und einer größeren geometrischen Oberfläche (Zelldichte) kompensiert bzw. sogar verbessert wurde. Diese Überkompensation ist möglich für Positionen bis zu 50 cm hinter der originalen Anordnung.

Für Positionen, die sich weiter im Unterflur befinden, ist es schwer, ähnliche Effektivitäten wie motornah zu erzielen. Hier kann nur der Einsatz von zusätzlichen motorischen Maßnahmen (jedoch mit Verbrauchsnachteilen) oder eines beheizbaren Katalysators Abhilfe schaffen. Aktive Katalysatorsysteme bieten im Falle zu geringer Temperaturen eine Alternative zu herkömmlichen System, da dieser Nachteil durch den Einsatz von Energie kompensiert werden kann. Ein solches Konzept [11] wurde vor Jahren erfolgreich für einen BMW 12-Zylindermotor in Serie [12,13] gebracht. In [13] konnte dabei durch den Einsatz einer separaten Batterie für die Bestromung des EHC, die nachrangig zur normalen Bordnetzatterie geladen wurde, eine Lasterhöhung für den Motor während der emissionskritischen Heizphase vermieden werden.

Für den Vergleich eines aktiven Katalysatorsystems mit den oben beschriebenen passiven System wurde ebenfalls ein Katalysator mit einem Durchmesser von 105 mm und einer Länge von 150 mm gewählt. Hinzu kommt eine Heisscheibe gleichen Durchmessers und einer Länge von 12 mm, mit einer Zelldichte von 600 cpsi und 20 μm .

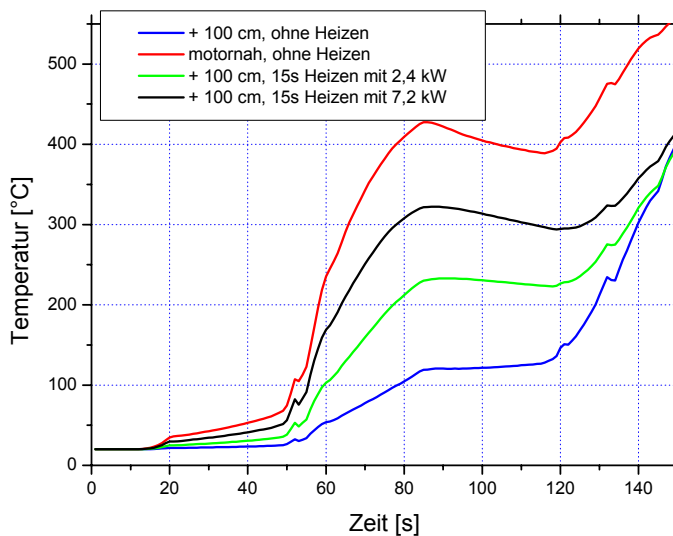


Abbildung 10: Katalysatoraustrittstemperaturverlauf als Funktion der Heizleistung

Durch die Beheizung während der ersten 15 s ergeben sich zeitversetzt die in Abb. 10 dargestellten Verläufe erhöhter Austrittstemperaturen. Dies zeigt, dass ein großer Volumenanteil des Trägers frühzeitig auf ein Temperaturniveau oberhalb Light-Off gebracht wird. Durch die demgegenüber niedrigere Eintrittstemperatur findet im weiteren Verlauf nach der kurzen Heizzeit ein Abkühleffekt statt und eine Vergleichsmäßigung der Austrittstemperaturen für alle betrachteten Fälle im Unterboden nach 150 Sekunden. Zum Vergleich zusätzlich eingetragen die Austrittstemperatur ohne Beheizung für den motornahen Einbau.

Die Berechnungen zeigen, daß dieser Emicat bei einer Bordspannung von 24 V und einer Leistung von 2,4 bzw. 7.2 kW in der Lage ist, einem Katalysator in Unterbodenposition (hier wiederum berechnet als eine Verschiebung der Katalysatorposition vom motornahen Einbau um 100 cm) genügend schnell Energie zuzuführen, um ein frühzeitigeres Light-Off zu erreichen [Abb 11]. Im Falle einer Heizleistung von 2,4 kW reicht eine Heizdauer von etwa 15 s aus um die HC – Emissionen auf die Hälfte zu reduzieren. Bei einem Betrieb um weitere 5s wird das Emissionsniveau des passiven motornah eingesetzten Katalysatorsystems erreicht. Bei einem Einsatz von 7,2 kW Heizleistung ist dieses Niveau schon nach 13 s erreicht.

In zukünftigen Betrachtungen von Systemen mit elektrisch beheizten Katalysatoren müssen anhand einer Energiebilanz die Vor- bzw. Nachteile einer aktiven Beheizung gegenüber den üblichen Katheizmaßnahmen konventioneller motornaher Katalysatoren ermittelt werden. In diesen Vergleich sollte dann ebenfalls die Kraftstoffeinsparung durch den nicht benötigten Katalysatorschutz an der Vollast mit einbezogen werden.

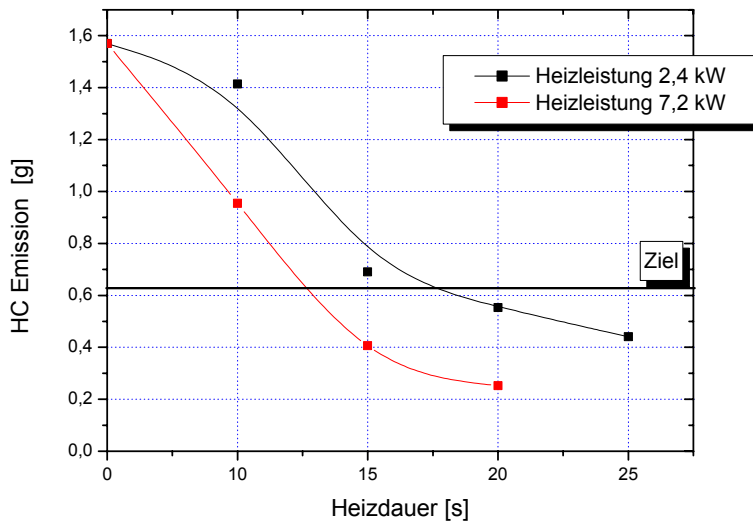


Abbildung 11: Berechnete HC-Ergebnisse als Funktion von Heizdauer / Heizleistung

Während die genannte Heizleistung von 2,4 kW auch von einem 12 V Bordnetz zur Verfügung gestellt werden kann, würde eine wesentlich höhere Heizleistung problemlos beim Vollhybrid bereitgestellt werden können; hier mit der Option, dass bereits vor dem Start des Verbrennungsmotors im rein elektrischen Fahrzeugbetrieb ein Vorheizen erfolgen kann. In Verbindung der in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Isolationsmaßnahmen kann so ein Niedrigstmissionskonzept erreicht werden.

Die in [14] genannten Einzelmaßnahmen zur Wirkungsgradoptimierung im Rahmen der Gesamtenergiearchitektur lassen durch Elektrifizierung von Nebenaggregaten und intelligenter Generatorregelung Potentiale zu einer verbrauchsneutralen aktiven Abgasnachbehandlung mittels elektrisch beheizbarem Kat erkennen.

4. Aufheizverhalten während des Motorstop Betriebs

Wie in der Einleitung in Abb. 1 beschrieben, wird der kundennahe Verbrauch durch Motorstop in den Leerlaufphasen entscheidend beeinflusst. Bedingt durch die Wärmekapazität der Abgasnachbehandlung kann die Motorstopstrategie (MSA) nicht ab Motorstart eingesetzt werden. So kann die Verbrauchseinsparung nicht bereits in den ersten beiden Leerlaufphasen nach dem ersten Berg des europäischen Fahrzyklus genutzt werden.

Die folgenden Berechnungen mit bezüglich Wärmekapazität optimierten Trägern mit 600PE/20 μ in motornaher Position zeigen die beiden Fälle, in denen die Aktivierung der MSA ab drittem bzw. erstem LL nach dem ersten Beschleunigungsvorgang verglichen wurden. Den Berechnungen lag die „best case“ Annahme zugrunde, dass durch optimale Isolation der Vorrohre die Eintrittstemperatur beim Motorstop – Massendurchsatz gleichzeitig für die Dauer der Leerlaufphase zu Null gesetzt - auf dem jeweils letzten Wert konstant gehalten wurde. Ein weiterer Ansatz war, dass Emissionsspitzen beim Motorneustart vermieden werden können.

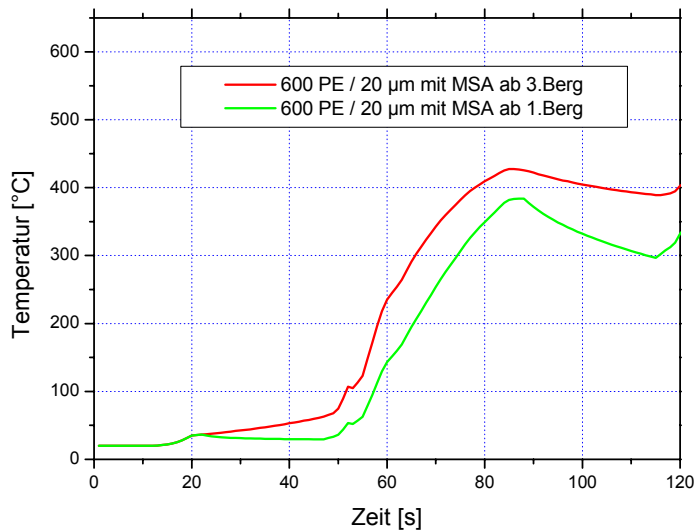


Abbildung 12: Katalysatoraustrittstemperaturen für unterschiedliche MSA Strategien

Aus Abbildung 12 ist ersichtlich, dass die frühere Aktivierung der MSA eine stärker abfallende Austrittstemperatur während der Motorstandzeit zur Folge hat. Dies ist erklärlich durch die Wärmeverluste des Katalysators an die Umgebung.

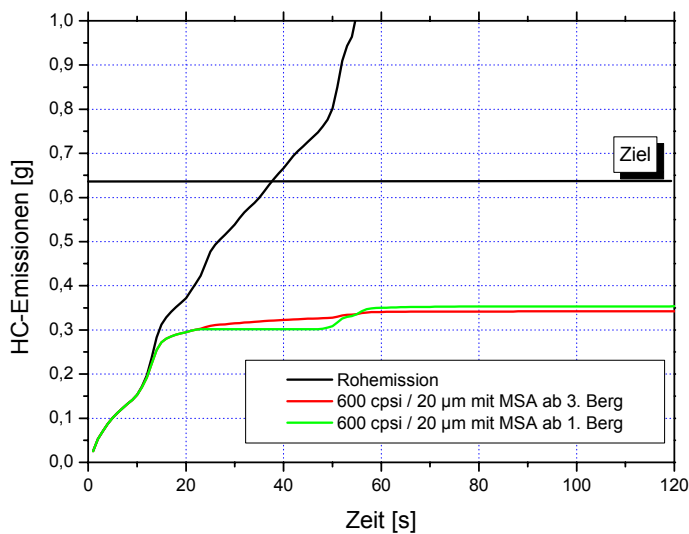


Abbildung 13: HC-Emissionen für unterschiedliche MSA Strategien

Durch die Festlegung der Randbedingungen bleibt der kumulierte HC Wert beim ersten Motorstop konstant, d.h. etwas unter dem ansteigenden Verlauf mit späterer MSA Aktivierung (Abb. 13). Beim Losfahren in den zweiten Beschleunigungsvorgang findet, bedingt durch den in Abb.12 ersichtlichen Temperatureffekt, dann eine leichte Erhöhung statt, so dass nach Sekunde 120 etwa gleiches Niveau erreicht wird. Mit diesem Konzept liegen die kumulierten Werte deutlich unter dem in Abbildung 4 gezeigten Zielwert für Standardträger in motornaher Position.

Es bleibt festzuhalten, dass mit einem in der thermischen Masse optimierten Katalysatordesign eine emissionsneutrale, durch früheren Beginn der Motorstop Strategie einhergehende Auslegung möglich ist. Die in Tabelle 1 genannten Einsparpotentiale erhöhen sich in diesem Fall um ca. 1 % im EU Zyklus

5. Zusammenfassung

Die zunehmenden Zielkonflikte zwischen Fahrleistung, Verbrauch und Emissionen lassen sich in Zukunft nur durch den verstärkten Einsatz von Innovationen lösen. Das Entwicklungsziel „Effiziente Dynamik“ zur Steigerung der Dynamik bei gleichzeitiger Verbesserung der Effizienz gibt eine Orientierung für zukünftige Weiterentwicklung.

Potentiale zur Reduktion des kundenrelevanten Kraftstoffverbrauchs lassen sich durch den Einsatz innovativer Katalysatorlösungen erschließen. Dazu wurden Konzepte aufgezeigt, die thermische Masse eines Katalysators so weit zu senken, dass motorferne Einbaupositionen möglich werden und damit verbrauchsintensive Maßnahmen wie eine Anfettung des Kraftstoff-Luft Gemischs vermieden werden können.

Der Einsatz von beheizten Katalysatoren kann hier ebenfalls eine dominante Rolle spielen, wenn es gelingt, beispielweise die Bremsenergie rekuperativ zu nutzen und damit die Energie für die aktive Beheizung zur Verfügung zu stellen.

Zusätzlich wird durch eine Motorstop Funktion ein konsequentes Energiemanagement ermöglicht, dessen maximaler Verbrauchseffekt ebenfalls eng mit dem Startverhalten der Katalysatoren verknüpft ist.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Borgmann. Klaus, Klüting. Manfred, 2006: Effiziente Dynamik als Lösung des Zielkonflikts Kundenwunsch – Gesetzesanforderung, München
- [2] Borgmann. Klaus, 2004: Der BMW Reihensechszylinder Ottomotor mit Magnesium-Kurbelgehäuse und VALVETRONIC, Steyr
- [3] Klüting. Manfred, Missy. Stephan, Schwarz. Christian, 2005: Potentiale des Strahlgeführten Benzin-DI-Brennverfahrens in Verbindung mit Aufladung, Coburg
- [4] Liebl. Johannes, 2005: Effiziente Dynamik – Ein Schlüssel für den Markterfolg,
- [5] Maus. Wolfgang, Brück. Rolf, 1997: Motornahe Katalysatorkonzepte: Neue technische Herausforderungen, Wien
- [6] Ganz. M, Hackmayer. S, Kruse. C, Reck. A., 2004: Innovatives Katalysatorsystem für den Audi RS6, 8-Zyl, 4,2 ltr, 331 kW mit LEV Zertifizierung, Wien
- [7] Dahlgren. J, Laurell. M, Bruck. R, 2005: Der Lambdasondenkatalystor; ein neues Konzept für kompakte Hochleistungs-Katalysatorsysteme, Aachen
- [8] Breuer. J, Brück. R, Diewald. R, Hirth. P, 1997: Temperature Examinations on a Metal Catalyst System, SAE Detroit
- [9] Bauer. H, Haldenwanger. H-G, Hirth. P, Brück. R, 1999: Thermal Management of Close Coupled Catalysts, SAE Detroit
- [10] Kishi. N, Kikuchi. S, Seki.Y, 1998: Development of the High Performance L4 Engine ULEV System, SAE Detroit
- [11] Pfalzgraf.B, Otto.E, Wirth.A, Küper, P, Held. W, 1995: The System Development of Electrically Heated Catalyst [EHC] for LEV and EU-III Legislation, SAE Detroit
- [12] Hanel.F-J., Otto. E, Brück. R, 1996: Electrically Heated Catalytic Converter (EHC) in the BMW Alpina B12 5.7 Switch-Tronic, SAE Detroit
- [13] Kiefer. W, Ehmman.P, Plodek.B, Feldwisch.R, Diringer.J, 1998: BMW 750i mit elektrisch beheiztem Katalysator, MTZ
- [14] Göschel. B, 2006: Quo vadis Hybrid, Wien