

This article is part of the

**Proceedings of the 16th Minisymposium Verfahrenstechnik and 7th Partikelforum  
(TU Wien, Sept. 21/22, 2020)**

**Title:**

Lastpunktverschiebung durch Hybridantriebe zur Light-off Unterstützung von  
Fahrzeugkatalysatoren

**Corresponding author:**

Lukas Möltner (TU Wien/MCI), lukas.moeltner@mci.edu

**Date of submission:**

10.02.20

**Date of revision:**

19.11.20

**Date of acceptance:**

19.11.20

**Chapter ID:**

MoV1-(01)

**Length:**

4 pages

**License:**

This work and all the related articles are *licensed* under a [CC BY 4.0 license](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/):



**Download available from (online, open-access):**

<http://www.chemical-engineering.at/minisymposium>

**ISBN (full book):**

978-3-903337-01-5

*All accepted contributions have been peer-reviewed by the Scientific Board of the 16. Minisymposium Verfahrenstechnik (2020):* Bahram Haddadi, Christian Jordan, Christoph Slouka, Eva-Maria Wartha, Florian Benedikt, Markus Bösenhofer, Roland Martzy, Walter Wukovits



**ICEBE**  
IMAGINEERING  
NATURE



**octapharma**  
For the safe and optimal use of human proteins



# Lastpunktverschiebung durch Hybridantriebe zur Light-off Unterstützung von Fahrzeugkatalysatoren

Thomas Steiner<sup>1</sup>, Verena Schallhart<sup>1</sup>, Lukas Moeltner<sup>1,2\*</sup>

1: Department of Technology and Life Science, MCI Innsbruck, Austria

2: Institute for Powertrains and Automotive Engineering, Vienna University of Technology, Austria

\* Corresponding author: lukas.moeltner@mci.edu

**Keywords:** Abgasmachbehandlung, SCR-Katalyse, Dieselmotor, Hybridantrieb, Emissionsminderung

## KURZFASSUNG

Für Abgaskatalysatoren von Dieselmotoren ergeben sich aufgrund immer höherer Wirkungsgrade zunehmend Schwierigkeiten im Aufheizverhalten. Zur wirkungsvollen Entstickung des Motorabgases hat sich die selektive katalytische Reduktion (SCR) als geeignet erwiesen, jedoch muss dafür eine Mindestkatalysatortemperatur von ca. 200 °C gewährleistet werden.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde eine Methodik zur thermischen Abbildung von Abgasanlagen entwickelt, die neben dem Aufheizen der gesamten Abgasanlage durch das heiße Abgas auch den Wärmeein- bzw. Wärmeeustrag durch chemische Reaktionen berücksichtigen kann. In einer durchgeführten Variantenrechnung mit einem rein dieselmotorischen Antrieb als Referenz, konnten die Auswirkungen verschiedener Hybrid-Funktionalitäten untersucht werden. Besonders eindrucksvoll zeigte sich eine entwickelte Betriebsstrategie, die auf ein schnelles Aufheizen der Abgasanlage hin optimiert wurde und darüber hinaus sogar noch wesentliche Vorteile im Kraftstoffverbrauch bewirkte.

## EINLEITUNG

Verbrauchsgünstige Mobilität ist eine wesentliche Grundlage des modernen Güterverkehrs, wobei sich der aufgeladene Dieselmotor aufgrund seiner hohen Effizienz und konkurrenzlosen Reichweite als Antriebsquelle von schweren Nutzfahrzeugen mit einer Antriebsleistung zwischen 150 kW und 500 kW durchgesetzt hat und somit zu einem verantwortungsbewussten Umgang mit begrenzten Rohstoffressourcen beiträgt [1].

Der motorische Verbrennungsprozess ist stark durch die zunehmend restriktiveren Abgasbestimmungen herausgefordert. Vor allem die zulässigen Emissionen von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) wurden in der Vergangenheit stark reglementiert und werden voraussichtlich auch weiterhin zunehmend restriktiver begrenzt, siehe Abbildung 1. In der Europäischen Union wurde 2013 die aktuell gültige Norm EURO VI eingeführt, seither dürfen maximal 400 mg/kWh NO<sub>x</sub> ausgestoßen werden [2]. Um diese Grenzwerte einhalten zu können, müssen sowohl innermotorische Maßnahmen zur Verbrennungsoptimierung als auch komplexe Anlagen zur Abgasreinigung eingesetzt werden. Die so genannte SCR-Technologie, die eine Nachbehandlung der Stickoxide unter Einbringung eines Reduktionsmittels realisiert (32,5 %-ige Harnstoff-Wasserlösung), hat sich für Nutzfahrzeuge durchgesetzt [3, 4].

Die Effizienz der Abgasmachbehandlung, insbesondere eines SCR-Systems, ist wesentlich von der Temperatur der Abgasanlage abhängig. Eine Mindesttemperatur von ca. 200 °C des Katalysators ist zwingend erforderlich um eine effiziente Emissionminderung gewährleisten zu können. Betriebsstrategien zum schnellen Aufheizen der Abgasmachbehandlungssysteme (fast light-off) bzw. zum Halten der Temperatur im Katalysator (z.B. im Haltestellenbetrieb eines Nahverkehrsbusse) erfordern teilweise den Betrieb der Verbrennungskraftmaschine in verbrauchsgünstigen Kennfeldbereichen.

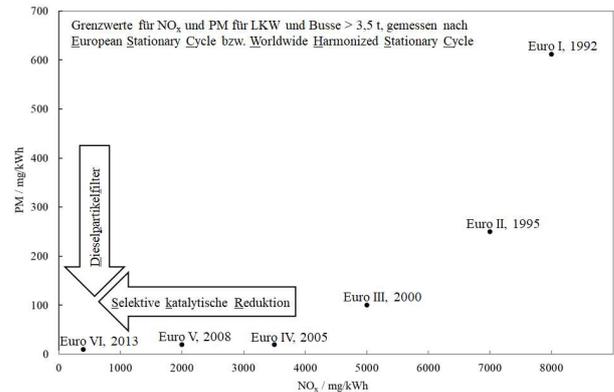


Abbildung 1: Chronologische Entwicklung der Abgasgrenzwerte für NO<sub>x</sub> und Partikelmasse (PM) nach der Euro-Gesetzgebung.

Dieser Trade-Off zwischen zunehmend komplexer Abgasmachbehandlung und verbrauchsgünstigem Motorbetrieb erfordert einen systemübergreifenden Entwicklungsansatz, der moderne Simulations- und Messmethoden einschließt [5, 6]. Das explizite Ziel des gegenständlichen Forschungsvorhabens ist es, eine Entwicklungsmethodik (Simulation und anschließende Validierung im Versuch) zu generieren, welche die Abgasmachbehandlung eines Nahverkehrsbusses thermisch beschreiben kann. In weiterer Folge soll eine prädiktive Aussage der Auswirkungen unterschiedlicher Leistungsstufen und Betriebsstrategien einer Hybridisierung des Antriebsstrangs möglich sein, um so optimale Lösungen im Spannungsfeld zwischen effizienter Abgasmachbehandlung und rohstoffsparendem Motorbetrieb zu finden.

## METHODIK

### Erfassung und Verarbeitung motorischer Daten

Der Versuchsträger entspricht einem bereits im Serieneinsatz befindlichen Reihensechszylinderdieselmotors, der dank seiner liegenden Bauweise vorwiegend in Bussen zum Einsatz kommt. Um die Eigenschaften der, dem Motor nachgeschalteten, Abgasmachbehandlungsanlage korrekt darstellen zu können, wurde eingangs eine Basisvermessung an Versuchsmotor auf einem Motorprüfstand durchgeführt.

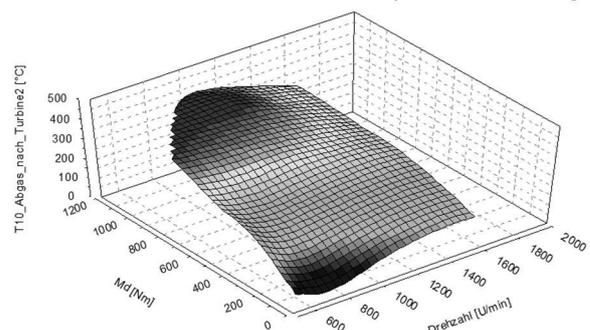


Abbildung 2: Abgastemperatur dargestellt über der Motordrehzahl und dem Drehmoment.

Dabei wurden 33 im gesamten Motorkennfeld gleichmäßig verteilte Betriebspunkte angefahren und alle relevanten Daten wie z.B. Temperaturen, Drücke und Konzentrationen von Emittenten aufgezeichnet. Anhand der auf diese Art und Weise gewonnenen Daten wurden durch Interpolation Kennfelder für jede Größe generiert, welche die Datenbasis für das Simulationsmodell bilden. Abbildung 2 zeigt exemplarisch ein solch ermitteltes Kennfeld für die Abgastemperatur nach der Expansionsturbine des zweiten Turboladers.

### Thermische Beschreibung des Abgassystems

Die untersuchte Abgasanlage, deren Beschreibung Ziel dieses Forschungsvorhabens ist, besteht aus zwei seriell angeordneten Abgasturboladern (ATL), einer Motorstauklappe, einem Oxidationskatalysator (DOC), einem Dieselpartikelfilter (DPF) und zwei SCR-Katalysatoren, siehe Abbildung 3.

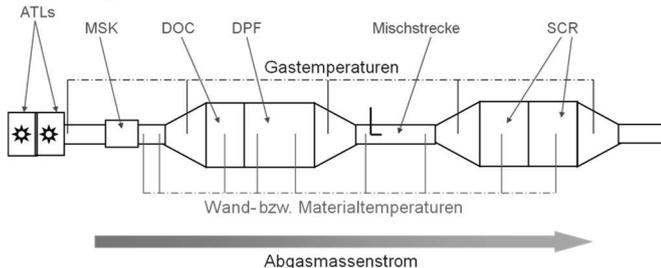


Abbildung 3: Anordnung der Komponenten der Abgasanlage und Darstellung der Messstellen für Gastemperaturen und Materialtemperaturen.

Um die Temperaturen der Katalysatoren zu jedem Zeitpunkt und bei jedem Betriebszustand exakt berechnen zu können, ist es notwendig die Wärmekapazitäten aller Komponenten der Abgasanlage zu bestimmen. Dabei wird die Abgasanlage bei einem konstanten Abgasmassenstrom und einer erhöhten Abgastemperatur aufgeheizt, bis ein stationärer Zustand erreicht ist. Das bedeutet, dass keine zeitliche Temperaturänderung in den einzelnen Bauteilen (Messstellen siehe Abbildung 3) auftritt. Durch eine anschließende abrupte Lastwegnahme und damit einhergehende Änderung der Abgastemperatur - einen sogenannten Temperatursprung - ergibt sich für jede Komponente eine charakteristische Abkühlkurve, die je nach Wärmekapazität des Bauteils einen bestimmten Verlauf aufweist. Abbildung 4 zeigt die Abkühlkurve des kombinierten Bauteils Oxidationskatalysator und Dieselpartikelfilter während eines solchen Temperatursprungs.

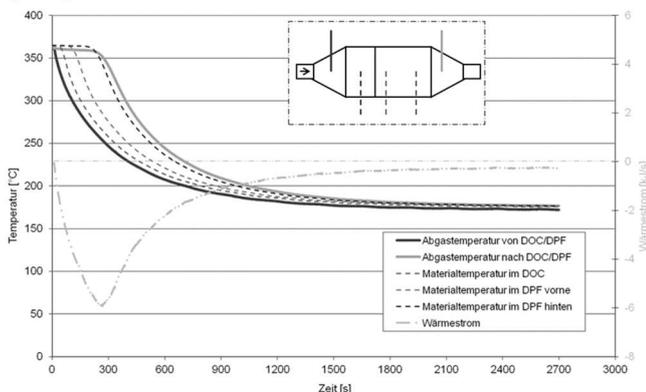


Abbildung 4: Darstellung einer Abkühlkurve und der daraus berechneten ausgetauschten Wärmemenge während eines Temperatursprungs für die Bauteilkombination DOC und DPF.

Durch die bauliche Ausführung aller Bauteile mit einer Luftspaltisolierung als wärmedämmender Maßnahme und der abgekapselten Einbauposition des Antriebsaggregats wird der

Wärmeverlust vernachlässigt. Bedingt durch diese Tatsache und die verhältnismäßig großen Wärmeströme des Abgases wird die Verlustwärme in weiteren Betrachtungen vernachlässigt. Anhand der auf diese Art und Weise erfassten Daten lassen sich Energiebilanzen für jedes Bauteil erstellen, siehe Gl. 1.

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q}_{zu} - \dot{Q}_{ab} + \dot{Q}_{Reaktion} - \dot{Q}_{Verlust} \quad \text{Gl. 1}$$

$\dot{Q}_{zu}$  durch das Abgas zugeführte Wärmemenge  
 $\dot{Q}_{ab}$  durch das Abgas abgeführte Wärmemenge  
 $\dot{Q}_{Reaktion}$  Reaktionswärmeleistung

Es wird jedoch ein Quell- bzw. Senkterm bedingt durch Reaktionswärme in die Bilanz miteingeschlossen, da beispielsweise im Oxidationskatalysator die Oxidation von Kohlenmonoxid (CO) und unverbrannten Kohlenwasserstoffen ( $C_xH_y$ ) durchaus nennenswerte Wärmeleistungen erbringen können, siehe Gl. 2. Die Auswirkung einer derartigen Reaktionswärme zeigt Abbildung 4. Nach erfolgter Abkühlung der DOC/DPF-Kombination stellt sich wieder ein thermisches Gleichgewicht ein, allerdings liegt die Temperatur nach der Bauteilkombination etwas höher als davor. Diese konstante Wärmequelle ist auf die exotherme Reaktion von CO und  $C_xH_y$  im Oxidationskatalysator zurückzuführen.

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2) + (-\Delta H_R) \cdot k \cdot c^n - \dot{Q}_{Verlust} \quad \text{Gl. 2}$$

$\dot{m}$  Abgasmassenstrom  
 $c_p$  Wärmekapazität des Abgases  
 $T_1$  Abgastemperatur vor dem Bauteil  
 $T_2$  Abgastemperatur nach dem Bauteil  
 $\Delta H_R$  Reaktionsenthalpie  
 $k$  Reaktionsgeschwindigkeitskonstante  
 $c$  Konzentration  
 $n$  Reaktionsordnung

Im abschließenden Schritt wird nach Gl. 3 die zeitliche Änderung der Wärmemenge aufsummiert und unter Kenntnis der Temperaturen vor und nach dem Temperatursprung die Wärmekapazität von jedem Bauteil der Abgasnachbehandlungsanlage bestimmt.

$$C = \frac{Q}{T_1 - T_2} \quad \text{Gl. 3}$$

$C$  Wärmekapazität des Bauteils  
 $Q$  Ausgetauschte Wärmemenge  
 $T_1$  Bauteiltemperatur vor dem Temperatursprung  
 $T_2$  Bauteiltemperatur nach dem Temperatursprung

Mithilfe der Daten aus der Basisvermessung und der ermittelten Wärmekapazitäten ist es möglich, die Materialtemperaturen für beliebige Lastprofile vorherzubestimmen. Um möglichst exakte Voraussagen treffen zu können, werden in der Berechnung der Materialtemperaturen auch Temperaturänderungen durch Reaktionswärmen in Abhängigkeit der jeweiligen Gaskonzentrationen berücksichtigt.

### DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Als Vergleichsszenario für den untersuchten Antrieb und die Abgasnachbehandlungsanlage wurde ein vereinfachter Fahrzyklus gewählt, der innerhalb von 30 Minuten ein stufenweises Fahrprofil mit verschiedenen Betriebspunkten und Standpausen beinhaltet. In der Standardkonfiguration verfügt das virtuelle Fahrzeug über keine Start-Stopp-

Automatik, das heißt, im Stillstand läuft die Verbrennungskraftmaschine im Leerlauf weiter. Abbildung 5 zeigt das Fahrprofil in Form einer Bedarfsleistung, die Abgastemperatur nach dem Turbolader (entspricht der Abgastemperatur vor dem Eintritt in die Abgasnachbehandlungsanlage), die Materialtemperaturen im kombinierten Oxidationskatalysator/ Dieselpartikelfilter und im SCR-Katalysator.

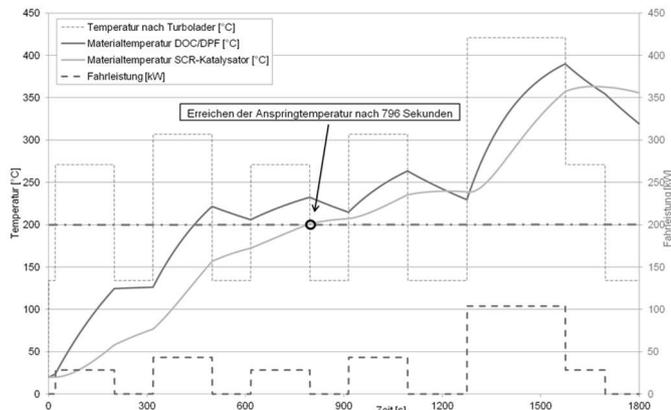


Abbildung 5: Darstellung des zeitlichen Aufheizverhaltens des DOC/DPF, des SCR-Katalysators und der Anspringtemperatur des SCR-Katalysators (200°C) für den rein dieselmotorischen Betrieb.

Für diesen willkürlich gewählten Fahrzyklus würde die Materialtemperatur im SCR-Katalysator den Schwellwert von 200 °C erst nach 796 Sekunden erreichen, was eine effiziente Reduktion von Stickoxiden zuvor unmöglich macht. Der Oxidationskatalysator springt aufgrund der näher am Motor liegenden Position wesentlich früher an, zumal mit vermehrtem Einsatz von Platin die Anspringtemperatur auch noch deutlich unter 200 °C liegen kann.

Die Beaufschlagung der Abgasnachbehandlungsanlage in den Standzeiten des Fahrzeugs (Leerlauf des Motors) mit geringen Abgastemperaturen führt für die untersuchte Abgasanlage zu keinen Nachteilen im Aufheizverhalten des SCR-Katalysators. Neben dem thermischen Verhalten der Abgasanlage bei dieser standardmäßigen Antriebskonfiguration wurde auch der Kraftstoffverbrauch ermittelt, der für die untersuchten Hybridantriebe als Referenz gilt.

### Variantenrechnung für Hybridisierungen

Der Begriff Hybridantrieb gilt allgemein für einen bivalenten Fahrzeugantrieb, im Speziellen für die Kombination einer Verbrennungskraftmaschine und eines Elektroantriebs. Der Elektroantrieb kann dabei sowohl motorisch zur Unterstützung bzw. Ersatz der Verbrennungskraftmaschine betrieben werden, als auch als Generator zum Laden der Fahrzeugbatterien. Je nach Leistung der Elektromaschine in Bezug auf das Fahrzeuggewicht werden verschiedene Hybridisierungsarten unterschieden, wovon zwei im Folgenden behandelt werden [7].

#### Micro-Hybrid / Start-Stopp-Automatik

Das Micro-Hybrid-Szenario umfasst in diesen Betrachtungen lediglich eine Start-Stopp-Automatik. Diese Funktion stellt die Verbrennungskraftmaschine bei Stillstand des Fahrzeuges ab und startet bei entsprechendem Fahrerwunsch (meist Betätigung des Gaspedals) wieder vollautomatisch. Weitere Funktionalitäten eines Micro-Hybridantriebs, wie z.B. ein optimierter Generatorbetrieb, werden mangels Relevanz für die Abgastemperatur nicht behandelt. Der Nutzen eines derartigen Hybridantriebs liegt in einer deutlichen Verbrauchseinsparung, da der Motor bei Stillstand des Fahrzeuges nicht in einem wenig effizienten Betriebspunkt läuft, sondern abgestellt wird. Diese Verbrauchseinsparung liegt entsprechender Literatur zufolge bei ca. 5% [8].

Abbildung 6 zeigt in gleicher Weise wie Abbildung 5 den gewählten Fahrzyklus und die entsprechenden Temperaturen. Bei gleicher Anfangstemperatur (20 °C) ist erkennbar, dass das Referenzszenario ohne Hybridantrieb im Leerlauf, bzw. bei Stillstand des Fahrzeuges eine Abgastemperatur von ca. 135 °C nach dem Abgasturbolader liefert, dagegen der Micro-Hybridantrieb vorerst bei Umgebungstemperatur verharft. Im weiteren Verlauf des Fahrzyklus ist erkennbar, dass die Phasen mit abgestelltem Motor bei Fahrzeugstillstand zu einem langsameren Aufheizen der Abgasnachbehandlungsanlage führen. Der Schwellwert von 200 °C wird somit erst nach 915 Sekunden erreicht, was einer prozentualen Veränderung der Aufheizzeit von 15 % entspricht.

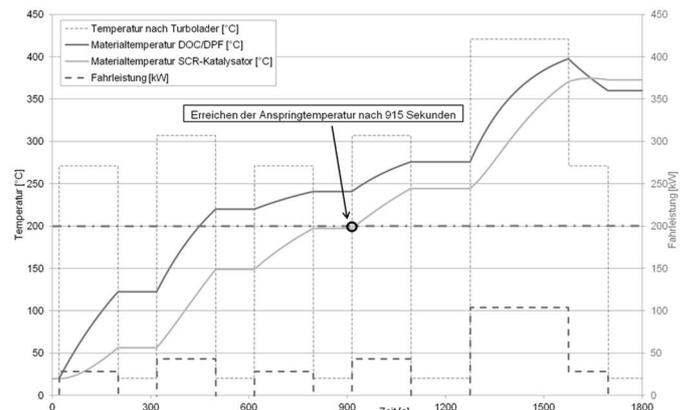


Abbildung 6: Darstellung des zeitlichen Aufheizverhaltens des DOC/DPF, des SCR-Katalysators und der Anspringtemperatur des SCR-Katalysators (200 °C) für den rein dieselmotorischen Betrieb, mit Start-Stopp-Automatik.

Der Vorteil der Start-Stopp-Automatik liegt, wie erwähnt, in einer Verbrauchsenkung. Für den gewählten Fahrzyklus beträgt die berechnete Verbrauchseinsparung gegenüber dem konventionellen, rein dieselmotorischen Antrieb 6,2 % und korreliert somit sehr gut mit Werten aus einschlägiger Literatur [9 - 11].

#### Mild-Hybrid optimiert auf Fast-Light-Off

Ein Mild-Hybrid-Antrieb beinhaltet im Vergleich zur Micro-Hybrid-Variante umfassendere Funktionalitäten. Neben einer ebenfalls vorhandenen Start-Stopp-Automatik wird dabei die Elektromaschine auch zum Fahrzeugantrieb, dem so genannten Boosten, verwendet. Weitere im realen Fahrzeugeinsatz implementierbare Funktionen sind ein optimierter Generatorbetrieb und die Rekuperation von Bremsenergie. Diese Rekuperation wird aufgrund der Komplexität hier nicht behandelt, zumal auch deren Einfluss primär das Verbrauchsverhalten betrifft und keine direkten Auswirkungen auf den thermischen Haushalt der Abgasnachbehandlung hat.

Als Rahmenbedingung wurde eine elektrische Antriebsleistung von 70 kW angenommen. Eine weitere Auflage um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten ist, dass der Energiespeicher zu Beginn des Fahrzyklus und an dessen Ende den gleichen Ladezustand aufweist. Die Betriebsstrategie des Hybridantriebs wurde dahingehend optimiert, dass zu Beginn des Fahrzyklus durch eine hohe Last des Dieselmotors eine hohe Abgastemperatur entsteht, die das Aufheizen der Abgasnachbehandlungsanlage beschleunigt. Die nicht für den Antrieb des Fahrzeugs benötigte überschüssige Leistung wird durch die Elektromaschine im Generatorbetrieb elektrifiziert und eingespeichert. Zu einem späteren Zeitpunkt, nach dem Erreichen der Anspringtemperatur kann dann die Elektromaschine sukzessive motorisch betrieben werden und

ermöglicht so entweder einen unterstützenden Betrieb für den Dieselmotor, oder sogar rein elektrisches Fahren.

Abbildung 7 zeigt den Fahrzyklus und die berechneten Temperaturen des Abgases und einzelner Komponenten der Abgasmachbehandlungsanlage. Deutlich erkennbar ist, dass innerhalb der ersten Fahrphase die vom Dieselmotor gelieferte Leistung den Fahrleistungsbedarf übersteigt. Dieser Überschuss wird im elektrischen Energiespeicher eingelagert. Durch diese hohe Motorlast wird eine entsprechend hohe Abgastemperatur realisiert, die zu einem Überschreiten des Schwellwertes von 200 °C nach bereits 316 Sekunden führt. Dies entspricht einer Verbesserung um 60 % gegenüber dem Referenzantrieb ohne jegliche Hybridfunktionalität. Im Vergleich mit dem Micro-Hybridantrieb mit Start-Stopp-Automatik ergibt sich sogar eine Verkürzung der Aufheizzeit um 65 %. Die Optimierung dieser Hybrid-Betriebsstrategie erfolgte unter der Prämisse, den Verbrauchsvorteil eines Micro-Hybridantriebs zu erhalten. Der berechnete Verbrauch liegt für die Mild-Hybrid-Variante 6,8 % unter dem Referenzantrieb und somit sogar um 0,6 % unter dem Verbrauch des Micro-Hybrids. Eine weitere Steigerung der Systemeffizienz kann noch durch die Nutzung der Bremsenergie erreicht werden, die im Rahmen der bisherigen Untersuchungen nicht betrachtet wurde.

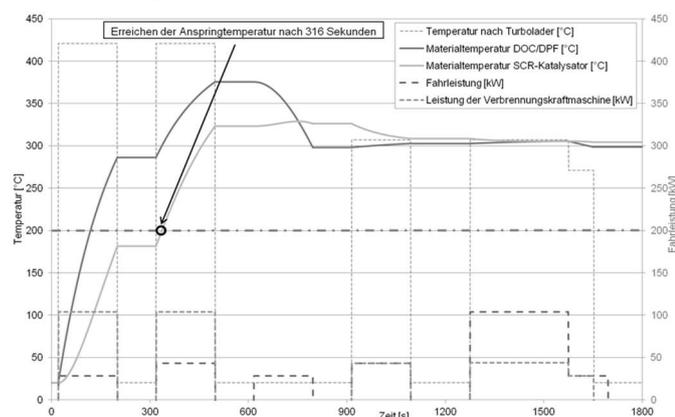


Abbildung 7: Darstellung des zeitlichen Aufheizverhaltens des DOC/DPF, des SCR-Katalysators und der Anspringtemperatur des SCR-Katalysators (200 °C) für einen Mild-Hybridantrieb, optimiert auf ein schnelles Anspringen der Katalysatoren mit Start-Stopp-Automatik.

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass eine semi-empirische Entwicklung eines Simulationsmodells zur Beschreibung der Bauteile einer Abgasmachbehandlungsanlage möglich ist und zur Potenzialabschätzung innovativer Antriebssysteme herangezogen werden kann. Insbesondere die erarbeitete Methodik zur Bestimmung der Wärmekapazitäten erwies sich als wirkungsvoll und konnte für alle Bauteile in mehreren Temperaturbereichen verifiziert werden.

Die Berücksichtigung von Wärmesenken bzw. Wärmequellen, hervorgerufen durch chemische Reaktionen, vervollständigt das Simulationsmodell und zeigt, dass bei relevant vorliegenden Konzentrationen der unvollständigen Verbrennungsprodukte CO und C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> durchaus eine Beschleunigung des Aufheizverhaltens möglich wäre. Im Rahmen der empirischen Bestimmung der Wärmekapazitäten konnte in einem Betriebspunkt mittlerer Last eine Temperaturanhebung von ca. vier Grad Celsius verzeichnet werden. Inwieweit dieses Verhalten, jenes durch schlechtere Gemischaufbereitung begünstigt werden kann, mit den Entwicklungszielen hoher Motorleistung und Effizienz vereinbar ist, bedarf weiterer Abklärung.

Der Einsatz des erstellten Modells für die Beurteilung

verschiedener Hybridisierungsarten zeigte anschaulich deren Auswirkung auf das Aufheizverhalten der Abgasanlage.

Grundsätzlich ist die Problematik der langen Aufheizzeit ohne katalytische Aktivität klar erkennbar, im Falle von Hybridfunktionalitäten sogar von großem Interesse. Die im Allgemeinen als verbrauchsenkende Einrichtung bekannte Start-Stopp-Automatik zeigte in der durchgeführten Variantenrechnung negative Auswirkungen auf das Aufheizverhalten der Abgasanlage. Für andere Hybridisierungsarten ergeben sich jedoch durch die Entkopplung der Verbrennungskraftmaschine vom tatsächlichen Fahrleistungsbedarf neue Freiheitsgrade, die neben Verbrauchseinsparungen auch für ein beschleunigtes Aufheizen der Fahrzeugkatalysatoren nutzbar sind. Durch entsprechende Anpassung von Betriebsstrategien ist es möglich, die Zeitspanne vom Motorstart bis zum Erreichen der Anspringtemperatur des Katalysators drastisch zu reduzieren und darüber hinaus noch deutliche Verbrauchseinsparungen und Emissionsminderungen zu ermöglichen.

## LITERATUR

- [1] Merker G., Schwarz C., Stiesch G., Otto F., (2006), *Verbrennungsmotoren: Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung*, Vieweg+Teubner Verlag, 3, 165 ff, DOI: 10.1007/978-3-8351-9069-6.
- [2] Commission Regulation (EC) No 595/2009, (2009), *Type-approval of motor vehicles and engines with respect to emissions from heavy duty vehicles (Euro VI) and on access to vehicle repair and maintenance information* (Online), <https://eur-lex.europa.eu/>, [Zugriff am 30.01.2020].
- [3] DIN 70070:2005-08, (2005), *Dieselmotoren – NO<sub>x</sub>-Reduktionsmittel AUS 32 - Qualitätsanforderungen*, DOI: 10.31030/9646285.
- [4] Echlitz H., et al., (2010), *Optimierung der Selektiven Katalytischen Reduktion mittels numerischer Methoden*, *Motorentechnische Zeitschrift*, 71, 736-741, DOI: 10.1007/BF03225617.
- [5] Burman S., (2010), *Prospects for Alternative Drive Trains*, 63. IAA Nutzfahrzeuge, Hannover, 23.-30. September 2010.
- [6] Maierhofer B., (2010), *MAN Lion's City Hybrid*, 63. IAA Nutzfahrzeuge, Hannover, 23.-30. September 2010.
- [7] Kersch S., Hipp E., Lexen G., (2005), *Effizienter Hybridantrieb mit Ultracaps für Stadtbusse*, *Tagungsband des 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*, 1-17.
- [8] Geringer B., et al., (2010), *Neue Ansätze und Entwicklungsmethoden zur Minimierung der NO<sub>x</sub>-Emissionen von Dieselmotoren*, *Fortschritt-Berichte VDI*, 12: 716, 374 ff.
- [9] Moeltner L., Hohensinner M., Steiner T., Schallhart V., (2016), *Experimental and Numerical Analysis of the Low Temperature NO<sub>x</sub> Conversion in Urban Busses*, *SAE Technical Paper 2016-01-8076*, SAE Int., DOI: 10.4271/2016-01-8076.
- [10] Moeltner L., Hohensinner M., Schallhart V., (2018), *Aging Effects of Catalytic Converters in Diesel Exhaust Gas Systems and Their Influence on Real Driving NO<sub>x</sub> Emissions for Urban Buses*, *SAE Int. J. Commer. Veh.*, 11:3, DOI:10.4271/02-11-03-0014.
- [11] Schallhart V., Auer C., Denifl D., Moeltner L., (2020), *Active Heating of Catalytic Converters – A Possibility to Mitigate Cold-Start Emissions*, *ASME 2020 Internal Combustion Fall Technical Conference ICEF*, Denver.