

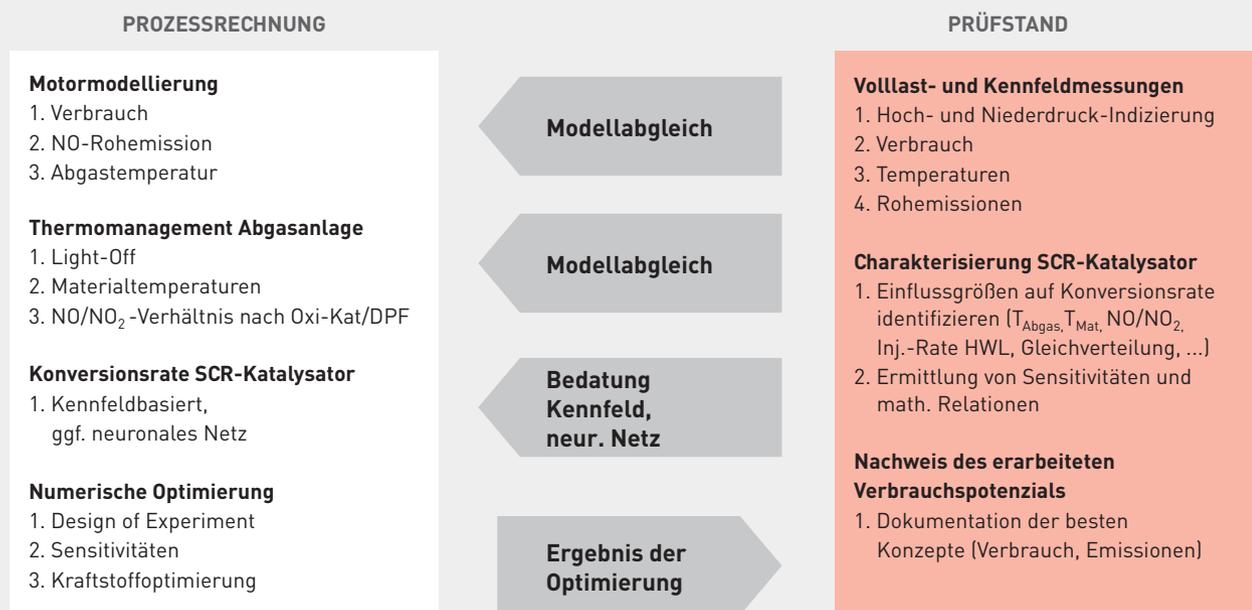


Projektleitung: THOMAS LAUER

Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik
Technische Universität Wien

Methodik zur Gesamtsystem-Modellierung und -Optimierung

ABBILDUNG 1



New Diesel

Effizienzsteigerung von Nutzfahrzeug-Dieselmotoren

Einleitung

Moderne Antriebssysteme für Nutzfahrzeuge müssen hohe Anforderungen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit erfüllen. Die Europäische Emissionsstufe EURO VI und die amerikanische EPA 2010 sehen insbesondere eine weitere signifikante Reduzierung der Stickoxidemissionen vor. Maßnahmen zur Erfüllung der gesetzlichen Auflagen dürfen andererseits die TCO (Total Cost of Ownership) des Fahrzeugs und damit den Kraftstoffverbrauch nicht erhöhen. **Diese Forderungen bedingen immer komplexere Motoren mit einer steigenden Anzahl von Freiheitsgraden. Dies führt zu einem hohen Applikationsaufwand bei der rein experimentellen Systemabstimmung, insbesondere in Anbetracht der Betriebs- und Prüfstandskosten bei Nutzfahrzeugmotoren.**

Zielsetzung und Methodik

Es war das Ziel des Projekts ein integratives numerisches Gesamtmodell aus Motor und Abgasnachbehandlung zu erstellen, das das reale Systemverhalten im Hinblick auf den Kraftstoffverbrauch und die Stickoxid-Emissionen abbildet und Aussagen über den Einfluss verschiedener Modifikationen des Motorprozesses und der Abgasanlage erlaubt. Es sollte zudem eine Optimierung des Gesamtsystems ermöglichen und so weitere Potenziale zur Verbrauchs- und Emissionsabsenkung erschließen. Da die CO₂-Emissionen dem Kraftstoffverbrauch proportional sind, konnten durch diese Zielsetzung die Förderbedingungen des Klimafonds erfüllt werden.

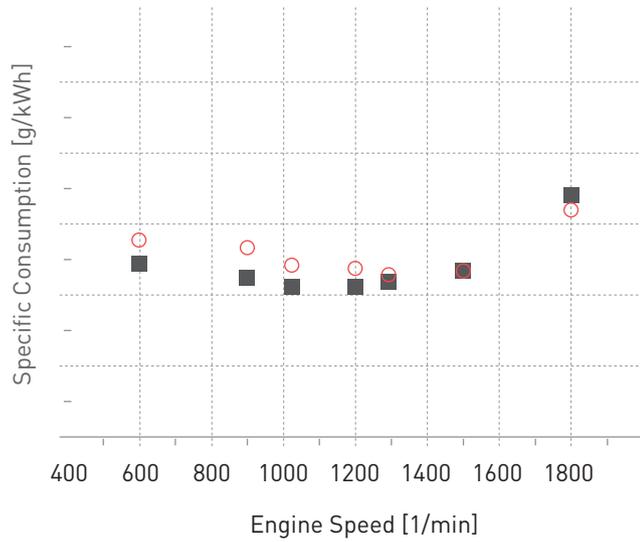
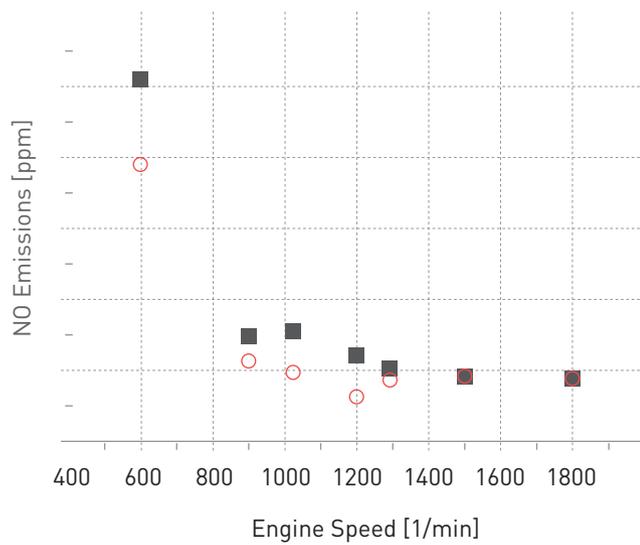
Als Demonstrator für die beschriebenen Forschungsarbeiten wurde von den Projektpartnern ein MAN

D2066 LUH-Aggregat ausgewählt, das vorwiegend in Stadt- und Überlandbussen verbaut wird und deshalb häufig im Bereich niedriger Lasten betrieben wird. Es ergeben sich daraus für diese Anwendungen hohe Anforderungen an das Thermomanagement der Abgasanlage, was in guter Übereinstimmung mit den Zielen dieses Projekts war. Der D2066 LUH ist ein 6-Zylinder NFZ-Dieselmotor mit 10,5 Liter Hubraum, 2-stufiger Abgasturboaufladung und einer Nennleistung von 206 kW. Die Abgasnachbehandlung erfüllte die Abgasnorm EURO VI und bestand aus Diesel-Oxidationskatalysator, Diesel-Partikelfilter und SCR-System.

Die anspruchsvolle Modellbildung für den aufgeladenen Dieselmotor und die Abgasnachbehandlung wurde durch eine Kombination aus Modellierung und Verifizierung mittels experimenteller Untersuchungen durchgeführt. Das prinzipielle methodische Zusammenwirken von Prüfstand und numerischer Simulation ist in Abbildung 1 grafisch dargestellt. Die einzelnen Teilaufgaben waren die Modellierung der Verbrennung, das Aufheizverhalten der Abgasanlage (Light-Off) und die Stickoxid-Konversion im SCR-Katalysator. Sämtliche Daten, die zur Abstimmung und Validierung der Modelle erforderlich waren, wurden in stationären und transienten Messungen am Prüfstand des Antragstellers generiert. Nach der erfolgreichen Modellerstellung wurden wiederum die erarbeiteten Lösungen am Prüfstand überprüft, sofern keine wesentlichen Hardware-Änderungen notwendig waren. Ein zielgerichteter und ressourcenschonender Projektablauf war so gewährleistet.

Spezifischer Verbrauch bei 50 % Last

ABBILDUNG 2

**NO-Emissionen bei 50 % Last**

Modellierung des Motors und der Abgasanlage

Die Modellbildung erfolgte mit der Simulations-Software GT-Suite, die bei beiden Projektpartnern eingesetzt wird¹. Es konnte bei Projektbeginn ein Ladungswechselmodell vom Partner MAN an den Antragsteller übergeben werden, wodurch die Projektarbeit auf die wesentlichen Inhalte konzentriert werden konnte.

Der betrachtete Motor war mit einer Doppelspritzung bestehend aus Vor- und Haupteinspritzung appliziert. Es wurde ein Strahlmodell nach Hiroyasu eingesetzt², das die Tropfenverdampfung, die Luftbeimischung, die Verbrennung und die Schadstoffbildung umfasst. Die Einspritzverläufe wurden vom Partner mittels eines abgestimmten Modells der Einspritzdüse, die NO-Emissionen mittels Zeldovich-Mechanismus berechnet³. Zu diesem Zweck wurden umfangreiche Messungen zur Modellverifizierung durchgeführt. Neben den stationären Betriebspunkten des WHSC (World Harmonised Stationary Cycle) wurden in weiterer Folge auch komplette Fahrzyklen auf Basis des WHTC (World Harmonised Transient Cycle) vermessen.

In den folgenden Diagrammen ist ein Vergleich zwischen den Messdaten in einigen stationären Motorbetriebspunkten und den entsprechenden Simulationsergebnissen dargestellt. Die Diagramme zeigen die einzelnen Betriebspunkte für 50% Motorlast über der Motordrehzahl. Man erkennt die gute Übereinstimmung von Mess- und Berechnungsergebnissen sowohl für die Verbrauchsdaten als auch für die NO-Rohemissionen, siehe Abbildung 2⁴.

Das Abgasnachbehandlungssystem bestand aus Diesel-Oxidationskatalysator (DOC), Diesel-Partikelfilter (DPF) und SCR-System (Selective Catalytic Reduction). Während DOC und DPF auf Basis der gemessenen Emissionswerte empirisch bedatet wurden, erfolgte eine detaillierte reaktionskinetische Modellierung des SCR-Systems. Es wurden zudem die thermischen Eigenschaften der Rohre, Trichter und

Substrate modelliert, um das transiente Aufheizen der Abgasanlage, das wesentlich für die Umsatzraten der Katalysatoren ist, abzubilden.

Das Modell des SCR-Systems bestand zum einen aus der Mischstrecke mit dem Injektor für die Harnstoff-Wasser-Lösung (HWL) und kinetischen Modellen, die die Thermolyse- und die Hydrolyse-Reaktion berechneten. Damit wurden die wesentlichen Konversionsschritte vom flüssigen Harnstoff zum gasförmigen Reduktionsmittel Ammoniak berücksichtigt. Zum anderen wurde ein Modell des eigentlichen SCR-Katalysators entwickelt, das die NH₃-Speichervorgänge und die heterogene Katalyse der Stickoxide zu unschädlichem Stickstoff abbildet⁵.

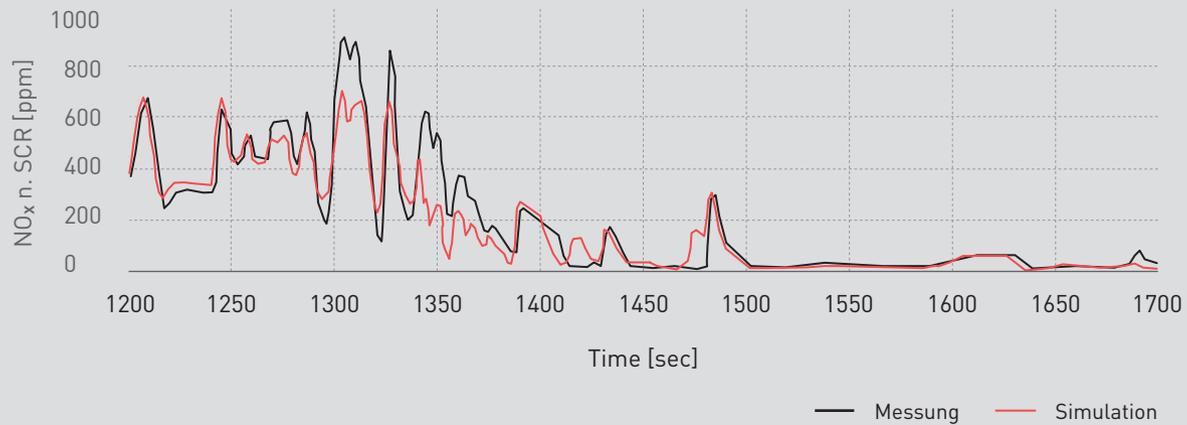
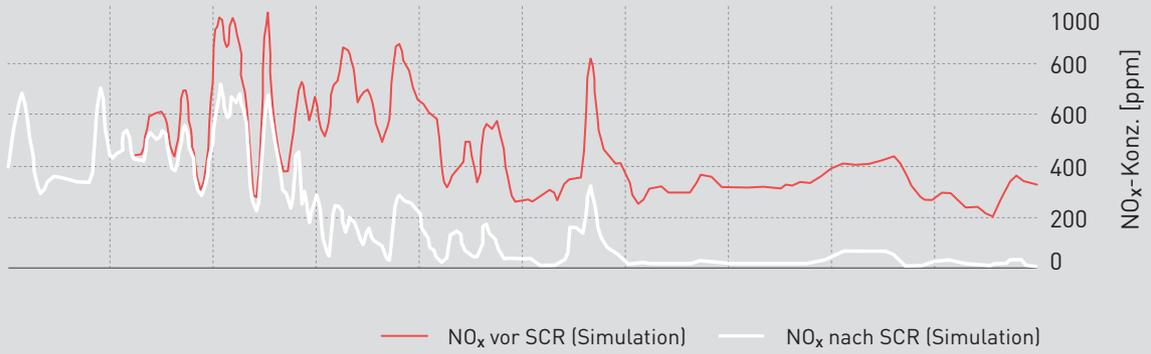
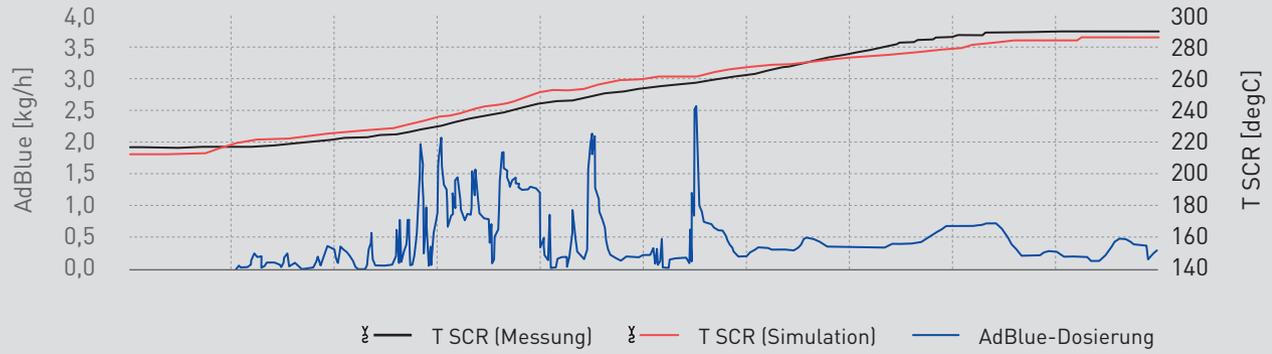
In Abbildung 3 sind die Berechnungsergebnisse im letzten, für die NO_x-Konversion relevanten Teil des transienten WHTC-Messzyklus dargestellt⁶.

Das obere Diagramm zeigt einen Vergleich der Materialtemperatur des SCR-Katalysators zwischen Messung und Simulation mit guter Übereinstimmung. Die blaue Kurve zeigt den gemessenen Massenstrom der HWL-Eindüsung. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Eindüsung erst bei einer Materialtemperatur von ca. 220 °C erfolgt, da der SCR-Katalysator bei niedrigeren Temperaturen nur einen schlechten Wirkungsgrad hat und ein Durchbruch des toxischen Ammoniaks erfolgt. Im mittleren Diagramm ist ein Vergleich der NO_x-Konzentration vor und nach SCR-Katalysator – jeweils Simulationsergebnisse – zu sehen. Im unteren Diagramm sind die Messungen der NO_x-Konzentration nach dem Katalysator den Simulationsergebnissen gegenübergestellt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der berechneten Konversionsrate mit den Messdaten.

Damit waren die Einzelsysteme Motor und Abgasanlage modelltechnisch charakterisiert, die anschließend in ein Gesamtmodell integriert wurden. Die Einzelheiten der Modellintegration finden sich in⁷.

Transienter Zyklus. SCR-Temperatur, HWL-Dosierung, NO_x-Konversion.

ABBILDUNG 3



„Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile. Nur wer die Zusammenhänge innerhalb eines Systems versteht, wird alle Potenziale nutzen können. So ist auch die Weiterentwicklung gut bekannter Technologien möglich.“ PROJEKTLEITER THOMAS LAUER



Systemoptimierung

Nach Erstellung des Systemmodells waren in einem nächsten Schritt optimale Betriebszustände im Hinblick auf Verbrauch und Emissionen aufzuzeigen. Zur Modelloptimierung mit numerischen Methoden, wie zum Beispiel Design-of-Experiments (DoE) oder heuristischen Algorithmen waren die Rechenzeiten des Gesamtmodells deutlich zu hoch. Aus diesem Grund wurde der physikalische Detaillierungsgrad stark reduziert und die spezifischen Eigenschaften des Ladungswechsels und der Verbrennung stattdessen in neuronalen Netzen mathematisch beschrieben (Mean Value Modeling)⁸. Zum Trainieren – dh. zum Bedaten – dieser neuronalen Netze wurden insgesamt 15.000 stationäre Betriebspunkte mit dem detaillierten Modell gerechnet, was etwa ein Wochenende Rechenzeit in Anspruch nahm.

Die Rechenzeit verkürzt sich durch diesen Ansatz dramatisch, da wesentliche Größen des Modells nicht mehr berechnet müssen sondern aus den neuronalen Netzen ausgelesen werden können. Der WHTC-Zyklus mit 30 Minuten tatsächlicher Länge, dessen Berechnung mit dem detaillierten Modell 15 Stunden benötigte, wurde vom Mean Value Model in 45 Minuten

berechnet, also annähernd in Echtzeit. Dadurch ließ sich die für Optimierungsverfahren erforderliche Anzahl an Berechnungen in vertretbaren Zeiträumen bewältigen. Von den zahlreichen folgenden Optimierungen und Studien sollen zwei wesentliche Effekte kurz beschrieben werden, nämlich der Einfluss der Isolierung der Abgasanlage und der Abgasrückführung.

Wie bereits früher beschrieben ist eine Light-Off Temperatur des SCR-Systems notwendig, um eine effiziente Konversion von Stickoxiden zu ermöglichen. Experimente am Motorenprüfstand zeigten, dass aufgrund der thermischen Trägheit der Abgasanlage erst im letzten Drittel des transienten WHTC-Messzyklus mit der Eindüsung der wässrigen Harnstofflösung und damit mit einer effizienten Stickoxid-Nachbehandlung begonnen werden konnte. Es wurden zahlreiche Modifikationen der Abgasanlage berechnet, die zum Ziel hatten, das Potenzial von Isolierungsmaßnahmen und Materialeinsparungen aufzuzeigen. Insgesamt konnte so rechnerisch eine Reduzierung der Stickoxid-Emissionen von bis zu 20% durch schnelleres Light-Off nachgewiesen werden.

Die Rückführung gekühlten Abgases ist Bestandteil moderner Dieselmotoren. Das dem Zylinderinhalt beigemischte Inertgas senkt die Spitzentemperaturen ab und führt so zu geringeren Stickoxid-Rohemissionen. Mit dem hier beschriebenen Gesamtmodell konnte jedoch nachgewiesen werden, dass zwar die Rohemissionen durch diese Maßnahme tatsächlich abgesenkt werden können, jedoch das kritische Light-Off der Abgasanlage durch tendenziell kühleres Abgas weiter verschärft wird, so dass unter dem Strich die Stickoxid-Emissionen des Fahrzeugs nicht abnehmen. Die quantitative Beurteilung dieser Zusammenhänge war nur durch den gesamtheitlichen Ansatz möglich. **Schlussendlich konnte mit den Optimierungen gezeigt werden, dass durch Isolierungsmaßnahmen an der Abgasanlage Freiräume für eine verbrauchs-optimalere Verbrennung geschaffen werden können, so dass eine Verbrauchsabsenkung von ca. 2% bei einer gleichzeitigen Absenkung der Stickoxid-Emissionen von ca. 4% rechnerisch dargestellt werden konnten⁴.**

Zusammenfassung und Ausblick

Moderne Antriebssysteme für Nutzfahrzeuge müssen hohe Anforderungen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit erfüllen. Diese Forderungen bedingen immer komplexere Motoren mit einer steigenden Anzahl von Freiheitsgraden. In diesem Projekt sollte daher ein integratives numerisches Gesamtmodell aus Motor und Abgasnachbehandlung erstellt werden, das eine Optimierung des Systems im Hinblick auf Kraftstoffverbrauch und Stickoxid-Emissionen ermöglicht.

Es wurde ein detailliertes physikalisches Motormodell mit einem Abgasnachbehandlungsmodell gekoppelt, das sowohl das thermische Verhalten als auch die für die Stickoxidreduktion relevante Reaktionskinetik im SCR-Katalysator abbildet. Die Abstimmung des Modells erfolgte mit stationären und transienten Messdaten vom Motorprüfstand. Die transienten Messungen wurden in einem transienten Zyklus auf Basis des Worldwide Harmonized Transient Cycle (WHTC) durchgeführt.

Um die Rechenzeit zu minimieren und damit die Basis für die numerische Optimierung zu schaffen, wurde das beschriebene Gesamtmodell mittels neuronaler Netze reduziert. Dadurch konnten die Rechenzeiten für das Modell bis nahezu auf Echtzeit reduziert werden.

Mit Hilfe der Design-of-Experiments (DoE) Methode wurden zahlreiche Motorparameter im transienten Zyklus variiert. Es konnten Möglichkeiten zur Verbrauchs- und Stickoxid-Absenkung durch Isolierungsmaßnahmen der Abgasanlage aufgezeigt werden.

Aufbauend auf die Projektergebnisse können erweiterte Konzeptuntersuchungen durchgeführt werden. Denkbar ist etwa die Optimierung der Aufladeeinrichtung und des Ladungswechsels (zB. variable Ventilsteuerzeiten). Weitere Forschungsaktivitäten in den Bereichen der Rohemissionen (CO, HC, Ruß) und der Abgasnachbehandlung auf Basis reaktionskinetischer Konzepte sind sinnvoll, um den Gültigkeitsbereich der Modellergebnisse weiter zu steigern.



Referenzen

- ¹ T. Morel, R. Keribar, J. Silvestri und S. Wahiduzzaman, „Integrated Engine/Vehicle Simulation and Control,“ SAE Technical Paper Series, Detroit, MI, 1999
- ² T. Yoshizaki, K. Nishida und H. Hiroyasu, „Approach to Low NO_x and Smoke Emission Engines by Using Phenomenological Simulation,“ SAE Technical Paper Series, Detroit, MI, 1993
- ³ G. Merker, C. Schwarz, G. Stiesch und F. Otto, Verbrennungsmotoren, 3. Hrsg., Wiesbaden: B. G. Teubner, 2006
- ⁴ Forsthuber, F.; Krenek, T.; Marinitsch, F.; Lauer, T.; Raup, M.; Schatzberger, T.; Weiß, J.: Investigations on the Tail-Pipe Emissions of Commercial Engines with Advanced One-Dimensional Simulation Methods. SAE Technical Paper 2013-01-1117
- ⁵ D. Chatterjee, T. W. M. Burkhardt, I. Nova, A. Grossale und E. Tronconi, „Numerical Simulation of Zeolite- and V-Based SCR Catalytic Converters,“ SAE Technical Paper Series, Detroit, MI, 2007
- ⁶ Lauer, T.; Fischer, S.; Forsthuber, F.: Numerische Simulation der Ammoniak-Aufbereitung und Stickoxid-Konversion in modernen SCR-Systemen. In: Motortechnische Zeitschrift MTZ 02/2013, S. 166 - 171
- ⁷ Forsthuber, F.; Lauer, T.; Geringer, B.: Optimization of a Heavy Duty Engine by Integrated Numerical Models. In: 6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012), Wien, 2012
- ⁸ Papadimitriou, M. Warner, J. Silvestri, J. Lennblad und S. Tabar, „Neural Network-Based, Fast-Running Engine Models for Control-Oriented Applications,“ SAE Technical Paper Series, Detroit, MI, 2005

DREI GUTE GRÜNDE FÜR DAS PROJEKT

- Bei aller berechtigten Aufmerksamkeit für alternative Technologien darf die Diversität der möglichen Lösungswege und dabei vor allem die Weiterentwicklung konventioneller Technologien nicht aus den Augen verloren werden. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf die nächsten 10 Jahre. Das Projekt zeigte, dass durch methodische Weiterentwicklung Potenziale gehoben werden können.
- Es wurde die Zusammenarbeit zwischen der Technischen Universität Wien und der österreichischen Industrie weiter intensiviert. Bis zum heutigen Tag bestehen Kooperationen zwischen dem Antragsteller und der MAN Group (inzwischen innerhalb des VW Konzerns).
- Das Projekt lieferte einen wesentlichen Beitrag zur Ausbildung hochqualifizierter Fachkräfte, also in die Zukunft des Wirtschaftsstandorts Österreich. Es waren insgesamt 3 Dissertanten an diesem Projekt beteiligt.

