

# New Diesel – Effizienzsteigerung von NFZ-Dieselmotoren

FFG-Projekt Nr. 825410

## 1 Einleitung

### 1.1 Aufgabenstellung

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. 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.

In diesem Projekt sollte daher ein integratives numerisches Gesamtmodell aus Motor und Abgasnachbehandlung erstellt werden, das das reale Systemverhalten abbildet und Aussagen über den Einfluss verschiedener Modifikationen des Motorprozesses und der Abgasanlage ermöglicht. Es sollte zudem eine Optimierung des Gesamtsystems ermöglichen und so weitere Potenziale zur Verbrauchs- und Emissionsabsenkung erschließen.

### 1.2 Schwerpunkte des Projekts

Zum Erreichen der formulierten Ziele wurde ein aus Motor, Aufladeeinrichtung und Abgasanlage bestehendes numerisches Gesamtmodell in GT-Suite™ aufgebaut. Dieses Modell beinhaltet u. a. ein prädiktives Verbrennungsmodell und ein reaktionskinetisches Modell des SCR-Katalysators. Die Modellgüte wurde mit Messdaten vom Motorprüfstand in stationären Kennfeldpunkten und transienten Messzyklen abgesichert. Zu diesem Zweck wurde der Motor D2066 LUH als Versuchsträger definiert und am Prüfstand des Instituts für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik (IFA) der Technischen Universität Wien aufgebaut. Mit dem abgeglichenen numerischen Modell wurden Variantenuntersuchungen durchgeführt (Motorprozess, Aufbau Abgasanlage) und im Hinblick auf den Kraftstoffverbrauch und die Stickoxid-Emissionen bewertet.

Für die Optimierung wurde ein sogenanntes Mean Value Model aus dem detaillierten Modell abgeleitet, das deutlich kürzere Rechenzeiten ermöglicht. Es wurden Untersuchungen mittels Design-of-Experiments (DoE) durchgeführt, die die verbrauchsoptimale

Abstimmung des Motors bestätigten und Potenziale zur verbrauchsneutralen Reduzierung der Stickoxid-Emissionen aufzeigten.

### **1.3 Einordnung in das Programm**

Das Vorhaben adressierte den Themenpunkt „Energieeffiziente Fahrzeugkomponenten und -systeme“. Primäres Entwicklungsziel war die Verbrauchsabsenkung zukünftiger Antriebssysteme für Nutzfahrzeuge um 5 %.

Durch die zukünftigen strengen Anforderungen an die Schadstoffemissionen ist dies nur möglich, wenn zum einen die einzelnen Teilfunktionen des Motors und der Abgasanlage thermodynamisch optimiert werden und zum anderen eine schlüssiges Gesamtkonzept erarbeitet wird, das die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen den Teilfunktionen berücksichtigt und eine Optimierung des gesamten Prozesses im Hinblick auf Verbrauch, die Rohemissionen und die Abgasnachbehandlung ermöglicht. Die Methodik zum Erreichen dieser Ziele bestand in der Erstellung eines Simulationsmodells mittels der Software GT-Suite™, das sowohl ein physikalisches Motormodell als auch ein Abgasnachbehandlungsmodell umfasst.

### **1.4 Aufbau der Arbeit**

Die anspruchsvolle Modellierung des aufgeladenen Dieselmotors und der 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 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.

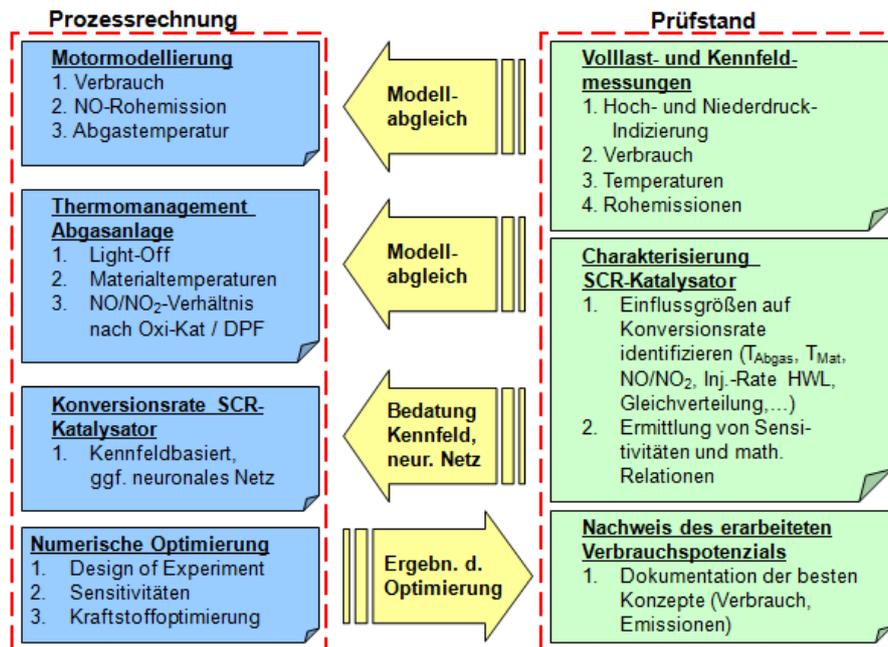


Abbildung 1: Methodik zur Gesamtsystem-Modellierung und -Optimierung

## 2 Inhaltliche Darstellung

### 2.1 Motorentscheidung und Prüfstandsaufbau

Zunächst war ein Aggregat auszuwählen, das im Hinblick auf die Abgasnachbehandlung Weiterentwicklungspotenzial aufweist und zudem messtechnisch mit der am IFA verfügbaren Infrastruktur vermessen werden kann. Die Entscheidung fiel auf den D2066 LUH, der vorwiegend in Stadt- und Überlandbussen verbaut wird und deshalb häufig im Bereich niedriger Lasten betrieben wird. Daraus ergeben sich für diese Anwendungen hohe Anforderungen an das Thermomanagement der Abgasanlage, was in guter Übereinstimmung mit den Zielen dieses Projekts war. Die technischen Spezifikationen sind aus Tabelle 1 ersichtlich.

Tabelle 1: Motordaten D2066LUH

Arbeitsprinzip	4-Takt Dieselmotor mit Direkteinspritzung
Hubraum	10,52 l
Bohrung/Hub	120/155 mm
Zylinderanordnung und -anzahl	R6, 4 Ventile pro Zylinder
Nennleistung	206 kW bei 1900 U/min
Maximales Drehmoment	1300 Nm von 1000 bis 1400 U/min
Aufladung	2-stufig
Einspritzsystem	Common Rail, Bosch EDC17
Spez. Kraftstoffverbrauch	193 g/kWh
Abgasnachbehandlung	DOC, CRT-PM, SCR
Abgasnorm	EURO VI

Der beschriebene Versuchsmotor wurde an einer Wirbelstrombremse betrieben. Für die Untersuchungen wurde folgende Messtechnik appliziert:

- Zylinder- und Ladeluft-Indizierung zur Charakterisierung der Verbrennung und des Ladungswechsels
- Luftmassenmessung mittels Heißfilm-Technik
- Kraftstoffmessung nach dem Coriolisprinzip
- Nichtdispersive Infrarotspektroskopie zur Bestimmung des CO<sub>2</sub>-Anteils im Saugrohr und der AGR-Rate (Abgasrückführung)
- Fouriertransformierte Infrarotspektroskopie zur Analyse des Rohabgases
- Smokemeter zur Erfassung der ausgestoßenen Partikelmasse
- Chemolumineszenzdetektoren zur Bestimmung der Umsatzraten des SCR-Katalysators
- Zahlreiche Temperatur- und Druckaufnehmer zur Bestimmung von Gasdrücken, sowie Gas- und Materialtemperaturen in den Ladeluft- und Abgasleitungen

Zum Abgleich des Prüfstandsbaus mit den Ergebnissen beim Projektpartner MAN sowie zur Abstimmung der Modelle im weiteren Projektverlauf wurden über das gesamte Motorkennfeld verteilte, stationäre Betriebspunkte ausgewählt. Als Basis wurden die Betriebspunkte gemäß European Stationary Cycle (ESC) und Worldwide Harmonized Stationary Cycle (WHSC) definiert.

Darüber hinaus wurden in bestimmten stationären Betriebspunkten Parametervariationen durchgeführt (Luftverhältnis, Einspritzbeginn) und ein transienter Zyklus, der weitgehend dem Worldwide Harmonized Transient Cycle (WHTC) entsprach, wurde ins Messprogramm aufgenommen. Der Zyklus wurde geringfügig angepasst, um die Kompatibilität mit der eingesetzten Prüfstandstechnik zu gewährleisten. Die Modifikation betraf in erster Linie die Phasen des Zyklus, in denen der Motor angetrieben werden muss (Simulation des Schubbetriebs). Dies war mit der eingesetzten Wirbelstrombremse nicht möglich.

## **2.2 Modellierung und Abstimmung der Verbrennung**

Die Verbrennungs- und Emissionsmodellierung basierte auf einem Ladungswechselmodell des Motors, das zu Beginn des Projekts von der Fa. MAN Truck & Bus AG an das Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik übergeben wurde. Die Modellierung erfolgte mit der Simulations-Software GT-Suite™ [1].

Der betrachtete Motor war mit einer Doppeleinspritzung bestehend aus Vor- und Haupteinspritzung appliziert. Es wurde ein Strahlmodell nach Hiroyasu eingesetzt [2], 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 berechnet [3]. Es wurden

umfangreiche Untersuchungen zur Abstimmung der zahlreichen Parameter der einzelnen Submodelle anhand der stationären Messergebnisse durchgeführt.

In Abbildung 2 ist ein Ergebnis des abgestimmten Modells zu sehen. Im unteren Diagramm ist der Einspritzverlauf für den Betriebspunkt  $n = 900 \text{ min}^{-1}$  –  $M_d = 824 \text{ Nm}$  dargestellt (grüne Kurve) sowie die Brennverläufe, die aus dem gemessenen Zylinderdruckverlauf (schwarze Kurve) abgeleitet und aus dem prädiktiven Verbrennungsmodell berechnet (rote Kurve) wurden. Das obere Diagramm zeigt einen Vergleich des gemessenen (schwarze Kurve) mit dem berechneten (rote Kurve) Zylinderdruckverlauf.

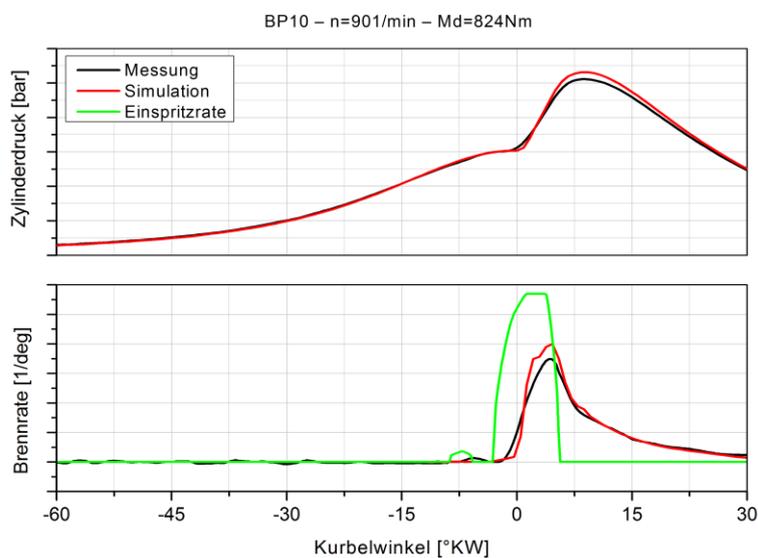


Abbildung 2: Kalibrierungsergebnis prädiktives Verbrennungsmodell

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 (Abbildung 3) als auch für die NO-Rohemissionen (Abbildung 4).

Zur weiteren Modellvalidierung wurden Variationen des Spritzbeginns (start of injection, SOI) und der Luftzahl  $\lambda$  durchgeführt (Abbildung 5 und Abbildung 6). Die Simulation gibt den Trend steigender NO-Emissionen mit steigender Luftzahl gut wieder und auch der vergleichsweise geringe berechnete Einfluss der Luftzahl auf den Verbrauch wurde durch die Messergebnisse bestätigt.

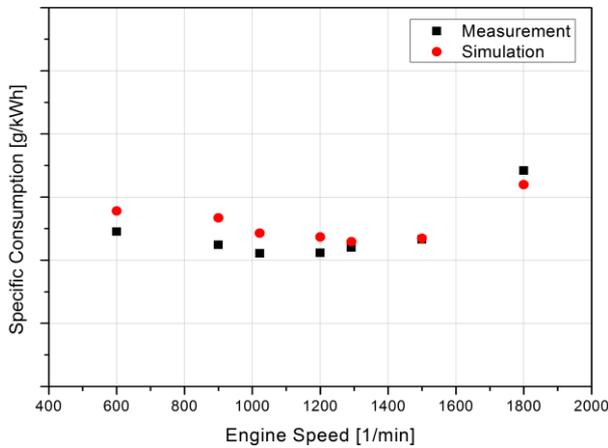


Abbildung 3: Spezifischer Verbrauch bei 50 % Last

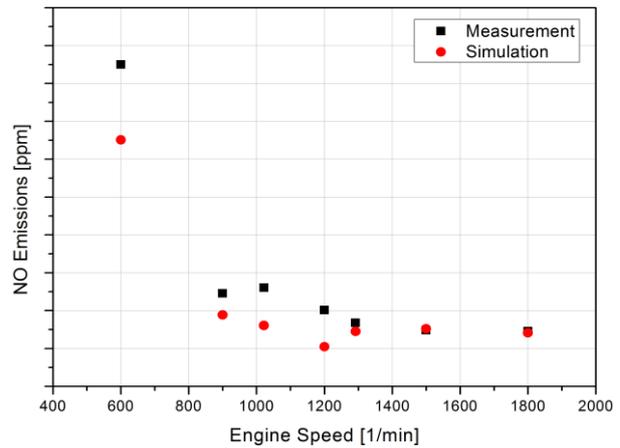


Abbildung 4: NO-Emissionen bei 50 % Last

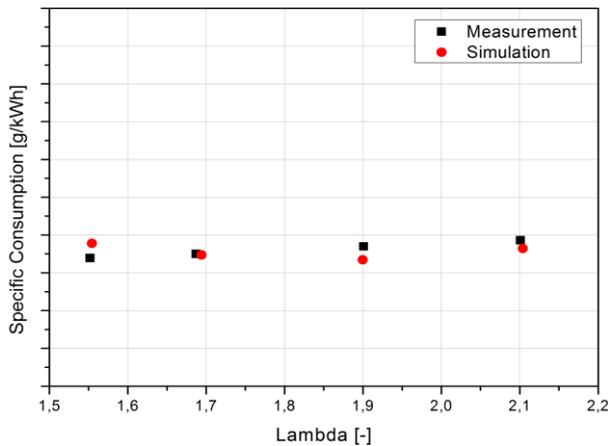


Abbildung 5: Spezifischer Verbrauch über Lambda bei definiertem Betriebspunkt

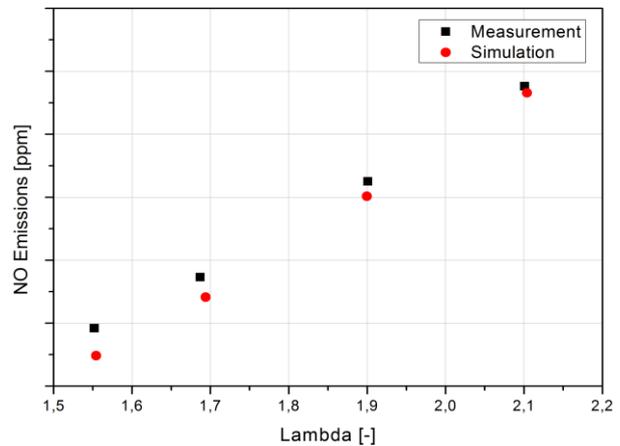


Abbildung 6: NO-Emissionen über Luftzahl bei definiertem Betriebspunkt

## 2.3 Modellierung und Abstimmung der Abgasnachbehandlung

In Abbildung 7 ist der Aufbau des Abgasnachbehandlungssystems dargestellt. Es besteht 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 reaktionskinetische Modellierung des SCR-Systems. Es wurde zudem das thermische Verhalten der Rohre, Trichter und Substrate modelliert, um das transiente Aufheizen der Abgasanlage, das wesentlich für die Umsatzraten der Katalysatoren ist, abzubilden.

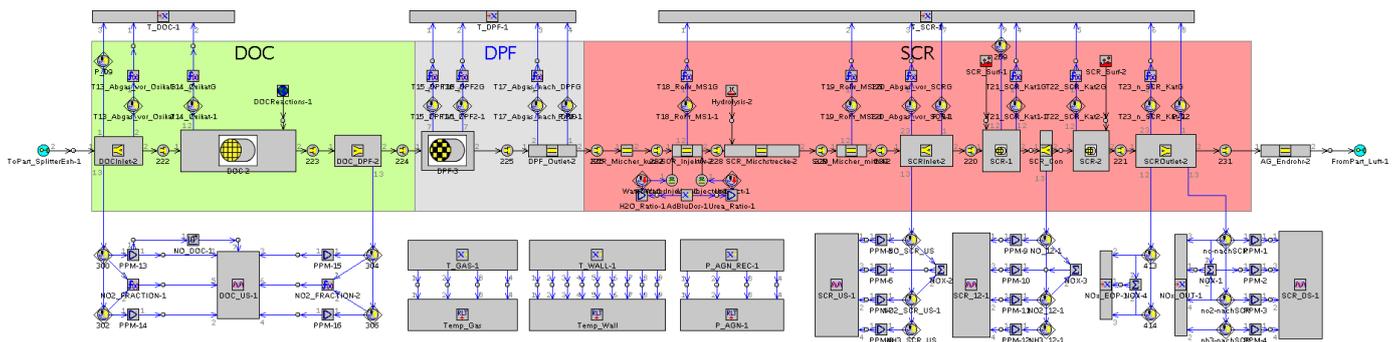
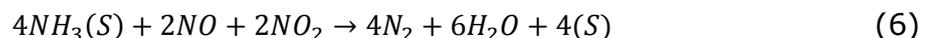
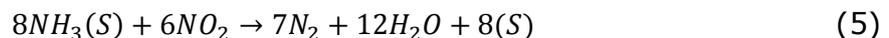
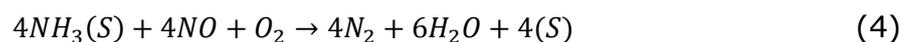
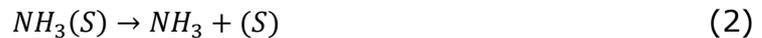


Abbildung 7: Aufbau Abgasnachbehandlungsanlage

Das Modell des SCR-Systems besteht aus der Mischstrecke mit dem Injektor für die Harnstoff-Wasser-Lösung (HWL) und einem Reaktionskinetik-Objekt, das die Thermolyse und die Hydrolyse berechnet, sowie einem Monolith und einem weiteren Reaktionskinetik-Objekt, das sowohl die eigentlichen Katalyse-Reaktionen als auch die  $NH_3$ -Speichervorgänge berücksichtigt.

Nachfolgend sind die chemischen Reaktionen aufgeführt, die zur Beschreibung des SCR-Systems verwendet wurden [4], [5]. Dabei bedeutet (S) ein aktives Zentrum auf der Katalysatoroberfläche, (S) in einer Summenformel bedeutet, dass das entsprechende Molekül adsorbiert ist.



Von großer Bedeutung ist die schnelle SCR-Reaktion (6), die vor allem bei niedrigen Temperaturen hohe Umsatzraten ermöglicht. Dabei sollten NO und  $NO_2$  günstigstenfalls in gleichen Mengen vorhanden sein, d.h. ein  $NO_2/NO_x$ -Verhältnis von 0,5 vorliegen. Die wichtige Oxidation von NO zu  $NO_2$  in der Abgasanlage wurde mit einem einfachen Reaktionsmechanismus auf Basis experimenteller Untersuchungen im DOC-Modell implementiert.

Zur Kalibrierung des beschriebenen Abgasnachbehandlungsmodells wurden stationäre Betriebspunkte am Prüfstand vermessen, siehe [Abbildung 8](#). Dargestellt sind die Konversion der Stickoxide im SCR-Katalysator nach dem Eindüsen der wässrigen Harnstoff-

Lösung (unteres Diagramm) und der Durchbruch des Ammoniaks (oberes Diagramm). Die Wiedergabe der Messwerte mit den reaktionskinetischen Modellen ist sehr gut.

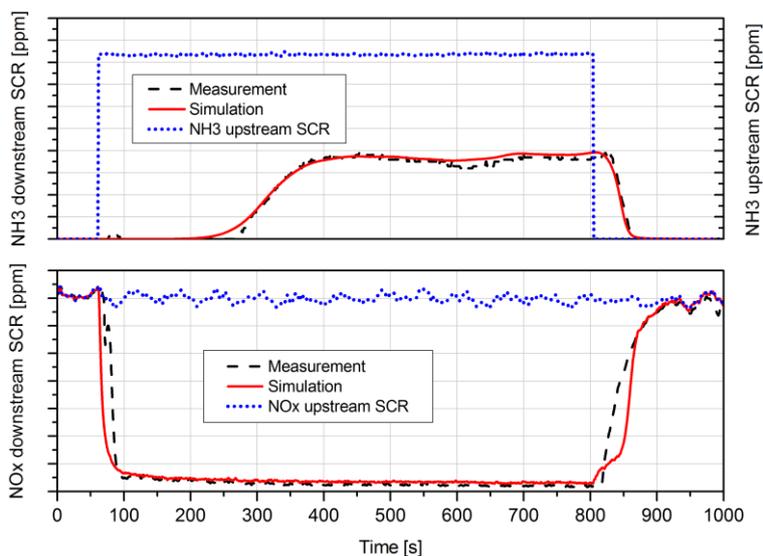


Abbildung 8:  $\text{NH}_3$ -Schlupf und  $\text{NO}_x$ -Konversion im SCR-Katalysator

In Abbildung 9 sind die Berechnungsergebnisse im letzten, für die  $\text{NO}_x$ -Konversion relevanten Teil des transienten Messzyklus dargestellt.

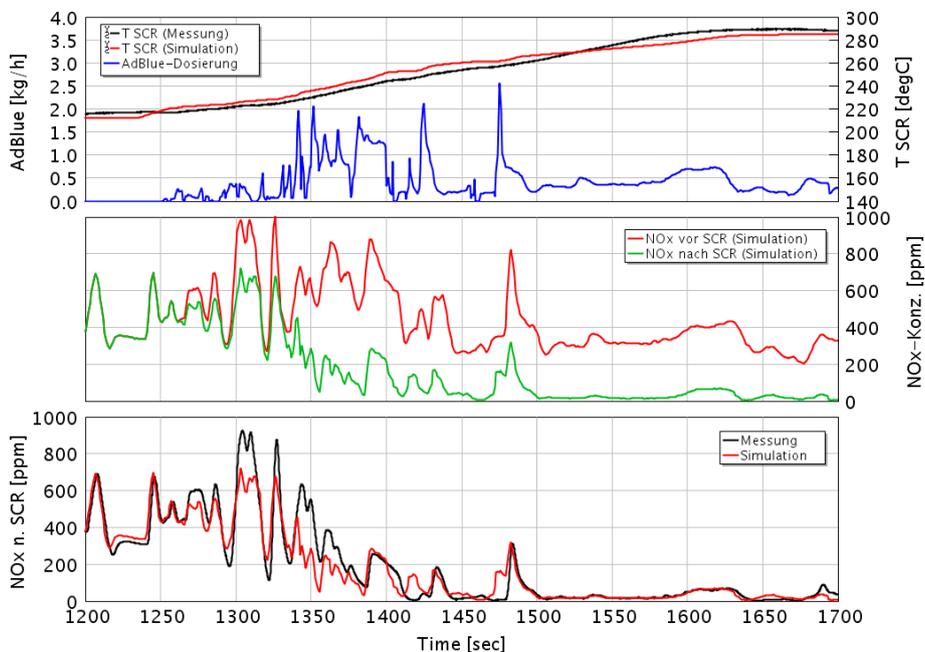


Abbildung 9: Transienter Zyklus; SCR-Temperatur, HWL-Dosierung,  $\text{NO}_x$ -Konversion

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. Im mittleren Diagramm ist ein Vergleich

der  $\text{NO}_x$ -Konzentration vor und nach SCR-Katalysator – jeweils Simulationsergebnisse – zu sehen. Im unteren Diagramm sind die Messungen der  $\text{NO}_x$ -Konzentration nach dem Katalysator den Simulationsergebnissen gegenübergestellt. Auch hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung der berechneten Konversionsrate mit den Messdaten.

## 2.4 Modellintegration

Die beschriebenen Modelle für den Motorprozess und die Abgasnachbehandlung wurden über eine Schnittstelle (Circuit Splitter) gekoppelt, die eine separate numerische Behandlung beider Teilbereiche ermöglicht. Dies ist erforderlich wegen der unterschiedlichen zeitlichen Diskretisierung der Verbrennung und der Reaktionskinetik. Mit dem Gesamtmodell wurde eine Berechnung des transienten Messzyklus durchgeführt. Die Abbildungen 10 bis 12 zeigen den spezifischen Verbrauch und die  $\text{NO}_x$ -Roh- und Tailpipe-Emissionen im zeitlichen Verlauf des Zyklus.

Der Zyklusverbrauch des Simulationsmodells zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Die kumulierten  $\text{NO}_x$ -Emissionen stimmen im ersten Teil des Zyklus ebenfalls gut überein, im letzten Teil mit hohem Lastkollektiv wird der Anstieg der Stickoxid-Emissionen überschätzt. Der Grund hierfür waren etwas zu geringe Abgasrückführaten (AGR) in diesen Lastbereichen und die hohe Sensitivität des Emissionsmodells auf diesen Parameter. Gleichzeitig wird die Konversionsrate des SCR-Katalysators überschätzt. Parametervariationen, auf die im Folgenden noch genauer eingegangen wird, haben jedoch gezeigt, dass trotz dieser Abweichungen im Absolutwert die Tendenz zwischen den einzelnen Varianten gut wiedergegeben wird.

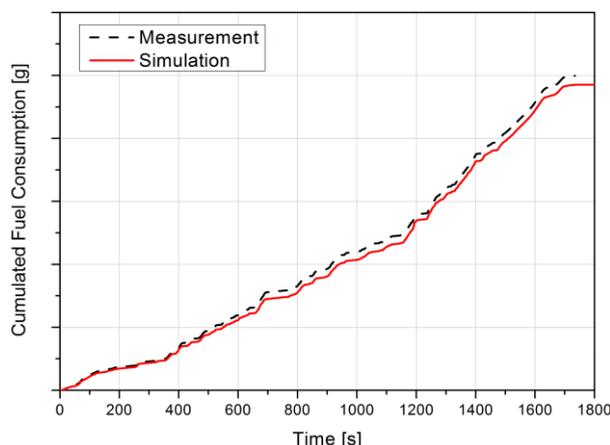


Abbildung 10: Kumulierter Zyklusverbrauch

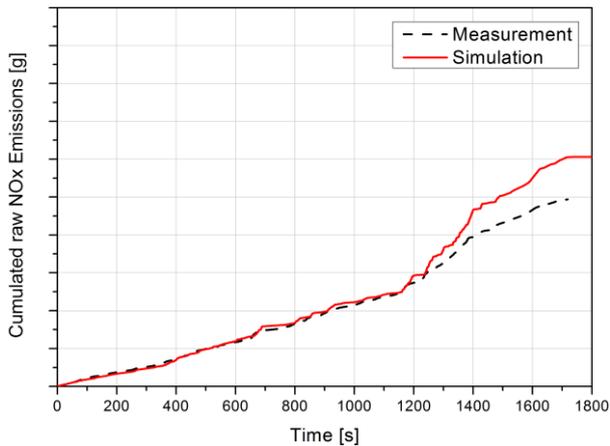


Abbildung 11: Kumulierte zyklische NO<sub>x</sub>-Emissionen (roh)

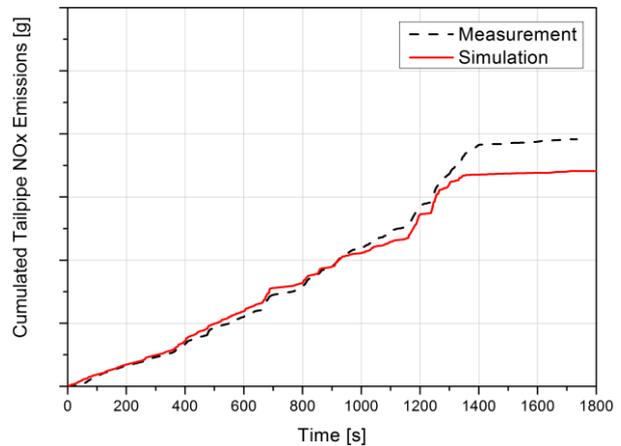


Abbildung 12: Kumulierte NO<sub>x</sub>-Emissionen (tailpipe)

Die Abbildungen 13 bis 15 zeigen eine Variation der Luftzahl (und damit auch der AGR-Rate). Die Luftzahl wurde verändert, indem das Lambda-Sollwertkennfeld mit dem Faktor 1,3 multipliziert wurde. Ziel war, ein mögliches Potenzial der Lambda-Erhöhung und damit einer verringerten AGR-Rate hinsichtlich Verbrauchseinsparung zu erschließen.

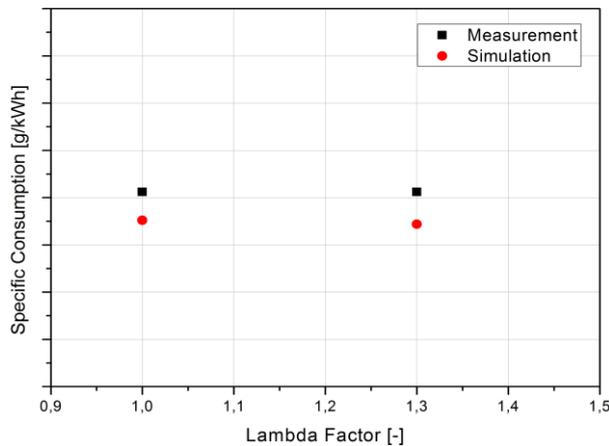


Abbildung 13: Lambdavarisation im Zyklus; spezifischer Verbrauch

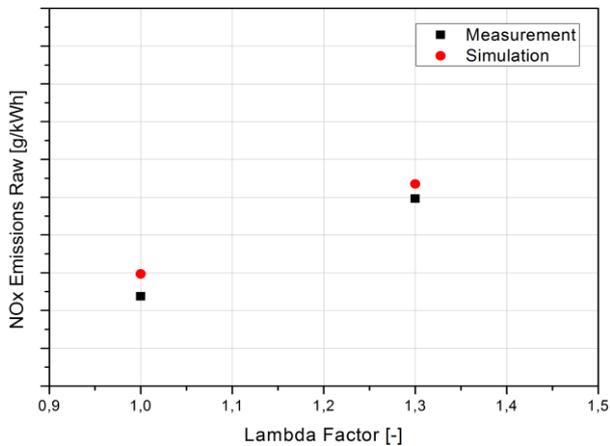


Abbildung 14: Lambdavarisation im Zyklus; spezifische NO<sub>x</sub>-Emissionen (roh)

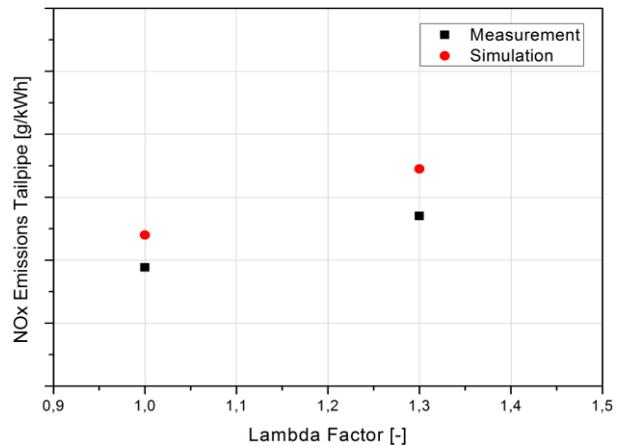


Abbildung 15: Lambdavarisation im Zyklus; spezifische NO<sub>x</sub>-Emissionen (tailpipe)

Wie bereits bei den Stationärergebnissen beobachtet, zeigt sich ein vernachlässigbarer Einfluss auf den Verbrauch und ein Anstieg der NO<sub>x</sub>-Emissionen bei steigender Luftzahl (=sinkende AGR-Rate) wegen der höher Sauerstoff-Konzentration und den damit verbundenen höheren Spitzentemperaturen. Das Ausmaß der Veränderungen wird vom Modell gut wiedergegeben.

## 2.5 Systemoptimierung

Zur Modelloptimierung mit numerischen Methoden, wie zum Beispiel Design-of-Experiments (DoE) oder heuristischen Algorithmen sind auf Grund der Modelltiefe die Rechenzeiten des Gesamtmodells deutlich zu hoch. Aus diesem Grund werden der Detaillierungsgrad des Modells reduziert und die Motorfunktionen stattdessen durch neuronale Netze beschrieben (Mean Value Modeling).

Die Geometrie der Strömungskomponenten des Mean Value Models wurde wesentlich vereinfacht und die physikalischen Zylindermodelle durch einen mittleren Zylinder ersetzt. Die charakteristischen Eigenschaften des Motors wurden durch neuronale Netze wiedergegeben, die definierte Eingangsgrößen wie Einspritzmenge, Einspritzzeitpunkt, Temperatur Einlasskanal, Drücke Ein- und Auslasskanal, AGR-Rate und Drehzahl mit einzelnen Zielgrößen, wie in diesem Fall u.a. dem indizierten Mitteldruck oder den NO<sub>x</sub>-Emissionen mathematisch verknüpfen [6]. Zum Trainieren – d.h. zum Bedaten – der neuronalen Netze wurden insgesamt 15.000 stationäre Betriebspunkte mit dem Vollmodell gerechnet. Der Berechnungsprozess zur Darstellung des Verbrennungsprozesses im Zylinder ist in Abbildung 16 schematisch dargestellt.

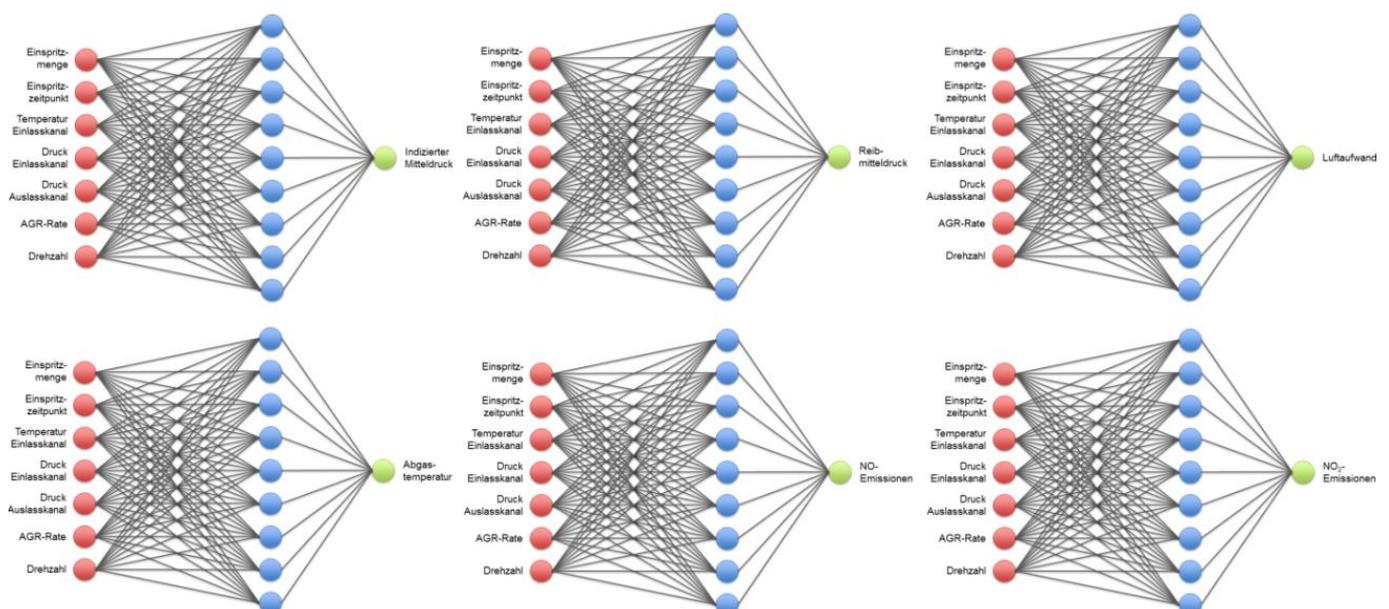


Abbildung 16: System der neuronalen Netze

Die Rechenzeit verkürzt sich durch diesen Ansatz deutlich. Der WHTC-Zyklus mit 30 Minuten Länge, dessen Berechnung mit dem detaillierten Modell 15 Stunden benötigt, wird vom Mean Value Model in 45 Minuten berechnet, also annähernd in Echtzeit. Dadurch lässt sich die für Optimierungsverfahren erforderliche Anzahl an Berechnungen in vertretbaren Zeiträumen bewältigen.

Mit dem aufgebauten Mean Value Model wurde zur Validierung ein transienter, WHTC-basierter Zyklus berechnet. Die Ergebnisse wurden dann den Messergebnissen gegenübergestellt (Abbildungen 17 bis 19). Im Vergleich zwischen Mean Value Model und Messergebnissen zeigte sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung.

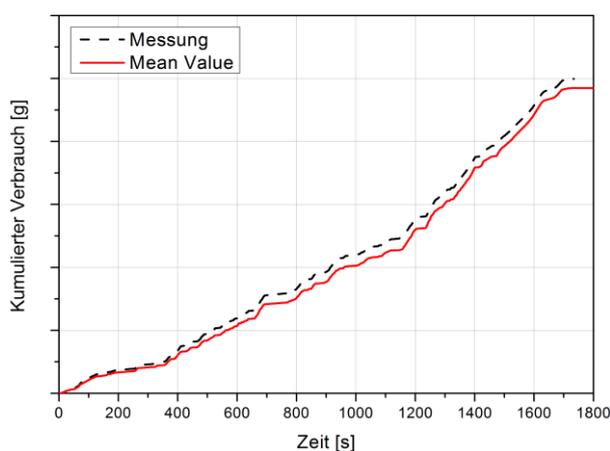


Abbildung 17: Vergleich zwischen Mean Value Model und Messergebnissen im transienten Zyklus, kumulierter Verbrauch

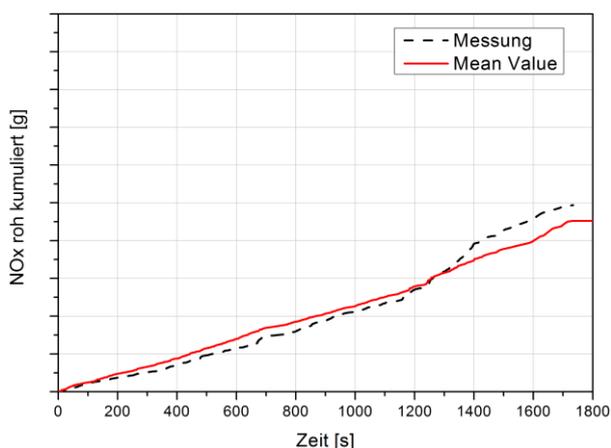


Abbildung 18: Vergleich zwischen Mean Value Model und Messergebnissen im transienten Zyklus, NO<sub>x</sub>-Emissionen (roh)

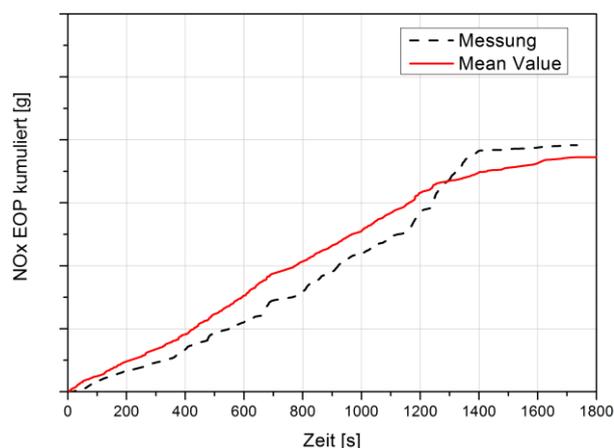


Abbildung 19: Vergleich zwischen Mean Value Model und Messergebnissen im transienten Zyklus, NO<sub>x</sub>-Emissionen (tailpipe)

Zur Optimierung des Gesamtsystems wurde die Design-of-Experiment-Methode angewendet. Als zu variierende Parameter wurden mit Einspritzung, Luftverhältnis und Ladedruck die für den Motorprozess wichtigsten Einflussgrößen ausgewählt. Für die Einspritzung wurden der Spritzbeginn im Kaltstart zur Beeinflussung der Dauer des Kaltstartbetriebs und der Spritzbeginn im Normalbetrieb zur optimalen Einstellung der

Verbrennungsschwerpunktslage in die Optimierung aufgenommen. Damit ergaben sich folgende unabhängige Variablen:

- Spritzbeginnverstellung im Kaltstartbetrieb
- Spritzbeginnverstellung im Normalbetrieb
- Lambdamultiplikator im Normalbetrieb
- Ladedruckmultiplikator

Die erste Optimierung wurde mit der Zielgröße Verbrauch unter der Randbedingung, dass die  $\text{NO}_x$ -Emissionen nicht verschlechtert werden dürfen, durchgeführt. Hier konnten keine Verbesserungen erzielt werden, was darauf schließen lässt, dass die aktuelle Abstimmung bereits im oder sehr nahe beim Verbrauchsoptimum liegt.

Eine weitere Optimierung wurde durchgeführt, bei der sowohl der Verbrauch als auch die  $\text{NO}_x$ -Emissionen als Zielgröße definiert wurden. Das Ergebnis wurde in erster Linie über eine Erhöhung des Luftverhältnisses erreicht und zeigte eine geringe Verbesserung im Verbrauch, während die  $\text{NO}_x$ -Emissionen anstiegen. Auch unter diesen Randbedingungen weist das Optimierungsergebnis auf die bereits vorhandene verbrauchsoptimale Abstimmung hin, was der nur äußerst geringe Einfluss der Parameter auf den Verbrauch zeigt. Aus diesem Grund wurde eine Sensitivitätsanalyse auf Basis der Optimierungsergebnisse durchgeführt. Abbildung 21 zeigt die Antwortfunktionen der Optimierung für den spezifischen Verbrauch (rot) und die  $\text{NO}_x$ -Emissionen (blau). In jedem der vier Diagramme wird eine unabhängige Variable variiert, während die anderen drei im Mittelwert ihres jeweiligen Variationsbereiches festgehalten werden. In jedem Diagramm ist der Basiswert der Variable (Kreis) und der Ergebniswert der Optimierung (Raute) aufgetragen.

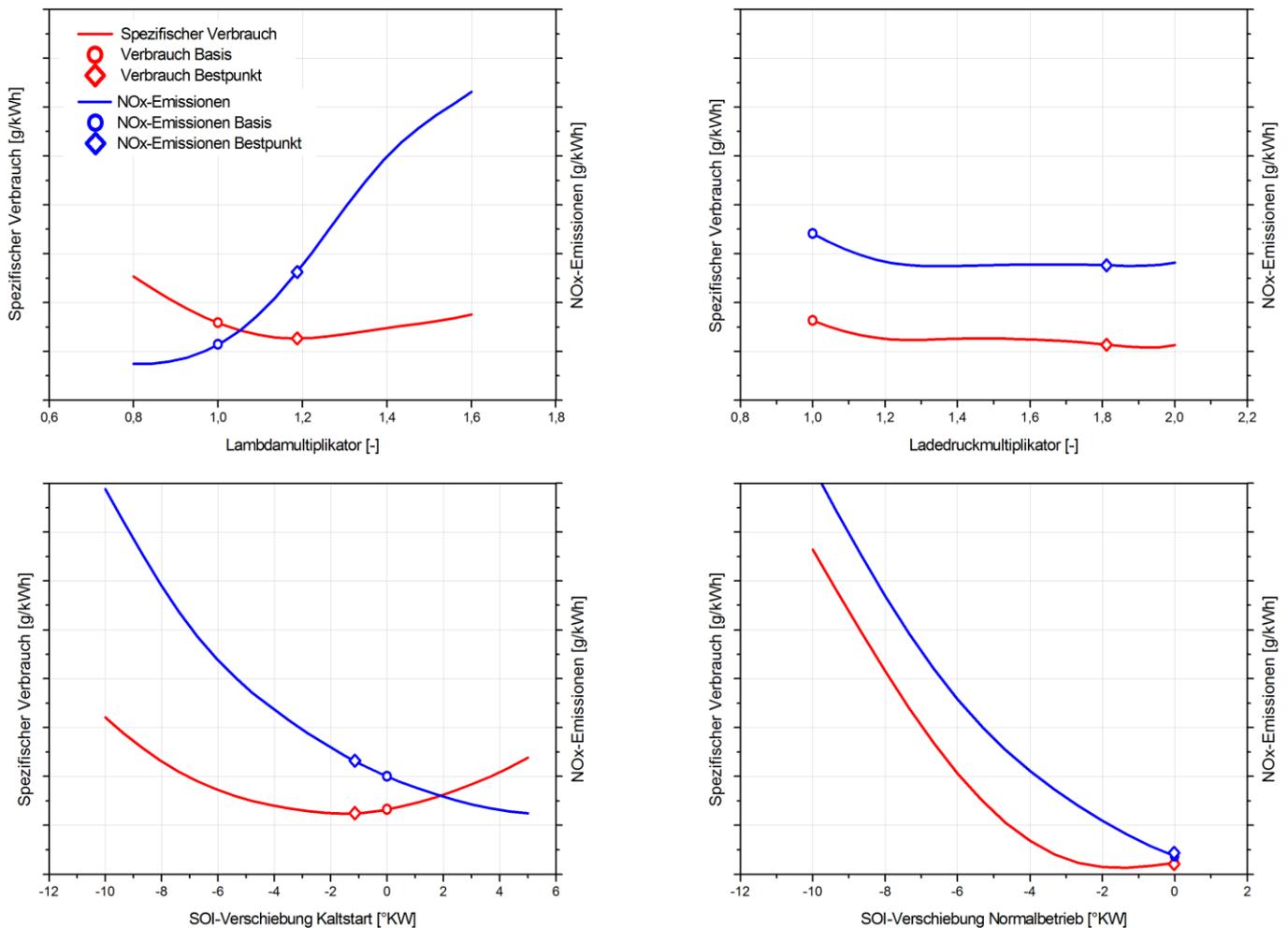


Abbildung 20: DoE Antwortfunktionen für Verbrauch und NO<sub>x</sub>-Emissionen

Es ist deutlich zu erkennen, dass alle Maßnahmen außer dem Einspritzzeitpunkt (SOI) nur geringen Einfluss auf den Verbrauch haben, jedoch sensitiv im Hinblick auf die Stickoxid-Emissionen sind. Die Erhöhung der Luftzahl bedeutet etwa, wie an anderer Stelle beschrieben, eine Reduktion der AGR-Rate und der Spritzbeginn beeinflusst wesentlich die Spitztemperatur des Verbrennungsprozesses. Beide Effekte wirken sich deutlich auf die Stickoxidemissionen aus.

### 3 Zusammenfassung

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.

Das mit dem Software-Code GT-Suite™ erstellte Modell beinhaltet ein detailliertes physikalisches Motormodell mit einem prädiktiven Verbrennungsmodell. Dieses Motormodell wurde 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 Spritzbeginn, Lambda und Ladedruck im transienten Zyklus variiert. Es konnte einerseits bestätigt werden, dass der Motor verbrauchsoptimal betrieben wird, andererseits konnten Möglichkeiten zur verbrauchsneutralen Absenkung der Stickoxid-Emissionen aufgezeigt werden.

## **4 Ausblick und Empfehlungen**

Aufbauend auf das entwickelte Motormodell können erweiterte Konzeptuntersuchungen durchgeführt werden. Denkbar ist etwa die Optimierung der Aufladeeinrichtung und des Ladungswechsels (z. B. variable Ventilsteuerzeiten).

Weitere Forschungsaktivitäten in den Bereichen der Rohemissionen (CO, HC, Ruß) und der Abgasnachbehandlung auf Basis reaktionskinetischer Konzepte sind zudem angedacht, um den Gültigkeitsbereich der Modellergebnisse weiter zu steigern.

## **5 Literaturverzeichnis**

- [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 NOx 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] G. Merker und C. Schwarz, Grundlagen Verbrennungsmotoren, 4. Hrsg., Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.

- [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] I. 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.