



Kohlenmonoxid

Die neue Emissionsherausforderung für Diesel-Pkw

Durch die intensiven Anstrengungen zur Verbrauchsreduktion bei gleichzeitig verschärften NO_x -Grenzwerten gerät die Abgaskomponente Kohlenmonoxid (CO) zunehmend in den Fokus der Entwickler von Dieselmotoren. Die IAV GmbH analysierte die Einzeleinflüsse auf die CO-Emissionen nach Abgasanlage und beschreibt hier anhand von Simulation und Motorversuch Lösungsansätze durch gezielte Applikationsmaßnahmen.

1 Einleitung

Dieselmotoren weisen prinzipbedingt sehr geringe CO-Rohemissionen auf. Durch den Einsatz von Diesel-Oxidationskatalysatoren (DOC) konnten die Emissionsgrenzwerte bisher unterschritten werden. Aktuelle Trends, dargestellt in **Bild 1**, führen jedoch zu einem Anstieg der CO-Rohemissionen und einem verringerten Katalysatorwirkungsgrad im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ). Zwar bleiben die CO-Grenzwerte mit Einführung der Euro-5-Norm unverändert bei 0,5 g/km; allerdings stellen diese Trends, zusammen mit den verschärften Anforderungen nach Dauerhaltbarkeit der emissionsmindernden Einrichtungen, eine wachsende Herausforderung dar.

2 Motorische Entstehung von CO

Die Teiloxidation der C-Atome im Dieseldraftstoff zu CO ist ein elementarer Zwischenschritt der Kohlenwasserstoffverbrennung. Im weiteren Verbrennungsverlauf erfolgt die Oxidation zu CO₂, hauptsächlich mittels in der Verbrennungszone gebildeten OH-Radikalen. Hierfür sind neben einem ausreichenden Sauerstoffangebot hohe Temperaturen (T > 1200 bis 1500 K) erforderlich.

In Zonen lokalen Sauerstoffmangels mit einem Luft-Kraftstoff-Verhältnis $\lambda < 1$, zum Beispiel bei ungenügender Gemischbildung in Verbindung mit hohen AGR-Raten, und durch Einfrieren der CO-Oxidation in Bereichen niedriger Temperaturen, zum Beispiel bei wandnaher Verbrennung, kann das innermotorisch gebildete CO nicht weiteroxidiert werden [3]. Allerdings wird die CO-Konzentration durch

Ladungsbewegungen in sauerstoffreiche Zonen verringert, da bei stöchiometrischen Bedingungen die bereits beschriebene CO-Oxidation ablaufen kann.

3 Abgasnachbehandlung mit Dieseloxidationskatalysatoren

Zur Nachoxidation von CO- und HC-Emissionen, unter Ausnutzung des Restsauerstoffs im Abgas, werden in Diesel-Pkw serienmäßig DOC eingesetzt. Entscheidend für die Oxidation der Abgasbestandteile sind die katalytisch aktiven Edelmetalle, zumeist aus der Platingruppe (Pt, Pd), welche chemisch auf einem porösen Substrat fixiert werden. Besondere Anforderungen für DOC-Applikationen sind hohe spezifische Konvertierungsraten und ein frühes Ansprungsverhalten (Light-off) bei niedrigen Abgastemperaturen (T < 180 °C).

Dies ist vor allem von der Edelmetallbeladung und -dispersion abhängig. Dabei führt der Kostendruck auf die Hersteller durch die hohen Edelmetallpreise zu einem gesteigerten Entwicklungs- und Optimierungsbedarf. Thermische Alterung durch Sinterung und Vergiftung der aktiven Zentren zum Beispiel infolge von Sulfatbildung reduzieren die Aktivität des DOC im Fahrzeugbetrieb.

4 Versuchsaufbau und Basisvermessung

Ausgangspunkt dieser Studie ist ein Common-Rail-Dieselmotor der 2-l-Hubraumklasse mit zweistufiger Aufladung, der die Euro-5-Grenzwerte erfüllt. Er wird in einem Fahrzeug mit einer Schwungmasseklasse von 3500 lbs verwendet, an dem

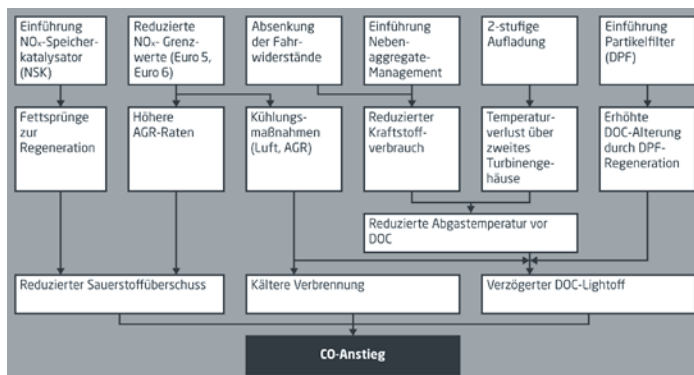


Bild 1: Wirkpfade der CO-Erhöhung

Die Autoren



Dipl.-Ing. Dirk Neumann ist Projektingenieur Applikation Dieselmotoren im Geschäftsbereich Powertrain Mechatronik der IAV GmbH in Berlin.



Dipl.-Ing. Friedemann Schrade ist Projektingenieur Abgasnachbehandlung Dieselmotoren im Geschäftsbereich Powertrain Mechatronik der IAV GmbH in Berlin.



Dipl.-Ing. Norbert Basse ist Teamleiter Applikation Dieselmotoren im Geschäftsbereich Powertrain Mechatronik der IAV GmbH in Berlin.



Dipl.-Ing. Jochen Schöffner ist Teamleiter Abgasnachbehandlung Dieselmotoren im Geschäftsbereich Powertrain Mechatronik der IAV GmbH in Berlin.



Dipl.-Ing. Wolfgang Tschiggfrei ist Leiter Applikation Dieselmotoren im Geschäftsbereich Powertrain Mechatronik der IAV GmbH in Berlin.



Dr. rer. nat. Lutz Krämer ist Leiter Abgasnachbehandlung Dieselmotoren im Geschäftsbereich Powertrain Mechatronik der IAV GmbH in Berlin.

ein Nebenaggregate-Management zur Verbrauchsreduktion eingesetzt wird. Als Abgasanlage wird ein motornahes „Close coupled“-System bestehend aus DOC und Dieselpartikelfilter (DPF) verwendet.

Das Nebenaggregate-Management ergibt einen beträchtlichen Verbrauchsvorteil von 3 bis 5 % im NEFZ. Jedoch führt diese Maßnahme bereits zu einem massiven Anstieg der CO-Emissionen nach Abgasanlage (Tailpipe) von 25 % durch die geringe Absenkung der Abgastemperaturen um 5 bis 10 K in der Phase bis DOC-Light-off und damit zur Überschreitung des CO-Grenzwerts für Euro 5. In **Bild 2** sind die Temperaturen vor DOC und die kumulierten CO-Emissionen vor und

nach DOC für eine Serienapplikation mit gealterter Abgasanlage dargestellt. Mit dem Nebenaggregate-Management (Basis) zeigt der DOC nur eine CO-Konvertierung von 45 %, die im Vergleich dargestellte Variante ohne Nebenaggregate-Management erreicht dagegen 54 %.

Im Folgenden sollen mittels Applikation – unterstützt durch die Simulation des Abgasstrangs – verbrauchsneutrale Maßnahmen zur CO-Reduzierung im NEFZ aufgezeigt werden, welche nicht die verbrauchssenkenden Maßnahmen des Nebenaggregate-Managements zunichte machen. Um eine gute Vergleichbarkeit der Versuche ohne Fahrer- beziehungsweise Fahrzeuginflüsse und eine schnelle

Konditionierung zu erreichen, wird der NEFZ über eine Drehzahl-Drehmoment-Vorgabe am dynamischen Motorprüfstand umgesetzt. Damit sind bei sehr guter Wiederholbarkeit bis zu acht NEFZ-Messungen pro Tag möglich [1].

5 Applikative Maßnahmen zur CO-Reduzierung

Grundsätzlich kann zwischen zwei Pfaden der CO-Reduzierung mit neun Maßnahmen unterschieden werden:

1. Absenkung der CO-Rohemissionen durch:
 - 1.1 Optimierung der Voreinspritzmengen
 - 1.2 Verkürzung der Voreinspritzabstände
 - 1.3 Optimierung des Raildrucks
 - 1.4 Erhöhung der Luftmasse.
2. Erhöhung der Abgastemperatur zur Verbesserung der CO-Konvertierung durch:
 - 2.1 Spätverstellung der Haupteinspritzung
 - 2.2 Absenkung des Raildrucks
 - 2.3 Aufteilung der Haupteinspritzung auf zwei Einspritzungen (so genanntes Split Main)
 - 2.4 Aktivierung der Drosselklappe im Schub
 - 2.5 Aktivierung der Abgasrückführung im Schub (inklusive der Drosselklappe aufgrund der Kopplung zum Tastverhältnis des AGR-Ventils).

5.1 Absenkung der CO-Rohemissionen

Bild 3 zeigt anhand eines DoE-Modells (Design of Experiments) die Einzeleinflüsse auf die CO-Rohemissionen für zwei unterschiedliche Kühlwassertemperaturen (T_{kw}) bei einer Konstantfahrt von 32 km/h. Vor allem die Menge und der Abstand der zeitlich ersten Voreinspritzung (PI2) beeinflussen die CO-Rohemissionen stark, während der Einfluss von Raildruck, Haupteinspritzbeginn und AGR-Rate bei der gewählten Variationsbreite geringer ist.

Es fällt auf, dass die Wirkung einer AGR-Raten-Absenkung auf die CO-Rohemissionen für den kalten Motor geringer ist als für den warmen Motor. Ursache ist die Bypassierung des AGR-Kühlers in der Aufwärmphase, die zu einer verbesserten CO-Oxidation führt.

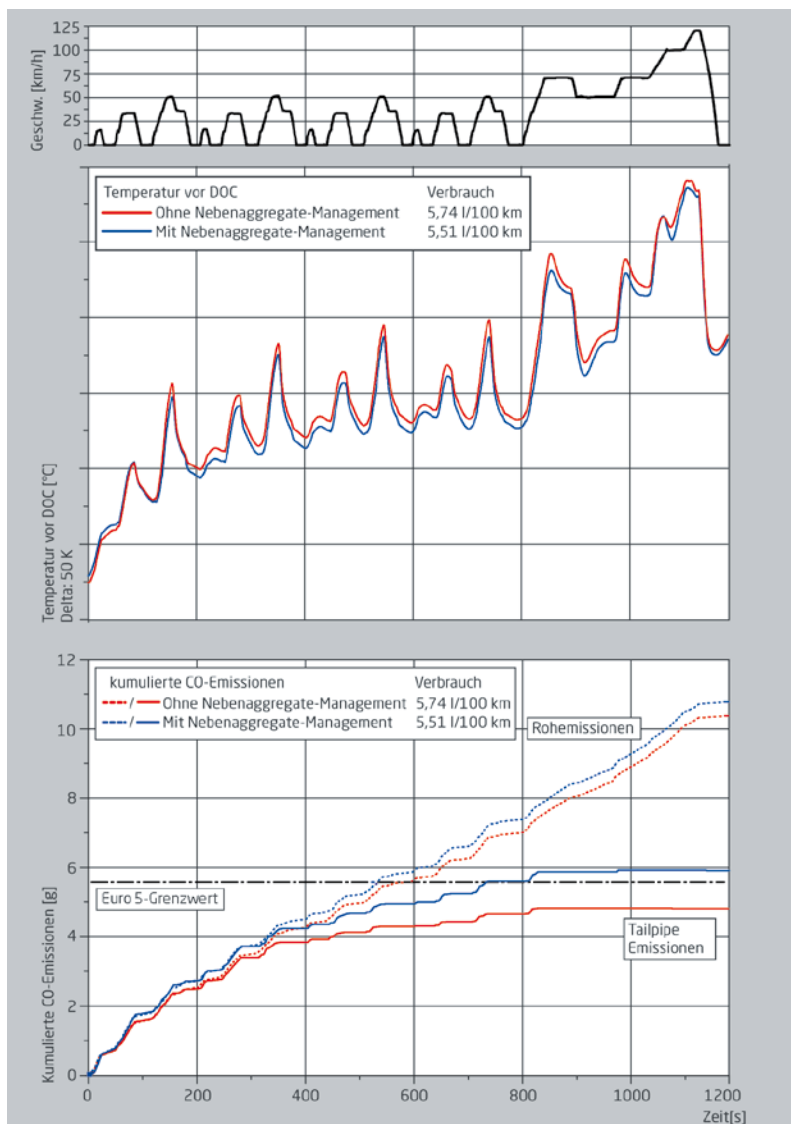


Bild 2: Einfluss des Nebenaggregate-Managements auf die CO-Emissionen und die Abgastemperatur vor DOC

Die in den Maßnahmen 1.1 bis 1.4 beziehungsweise 2.1 bis 2.2 aufgeführten Variationen sind mit den Randbedingungen Euro 5, Geräusch etc. in ihrem Potenzial sehr beschränkt. Die Parameter Voreinspritzmenge und -abstand liegen bereits im Bereich geringer CO-Emissionen.

5.2 Erhöhung der Abgastemperatur

Zunächst lässt sich mit Hilfe der Simulation der Einfluss der Abgastemperatur auf den Wirkungsgrad des DOC aufzeigen und geeignete Maßnahmen zum Aufheizen des Systems vorselektieren. Hierzu wird zunächst die NEFZ-Messung mit Nebenaggregate-Management mittels eines 1D-Ansatzes mit dem Simulationstool AxiSuite modelliert [2]. Für die weitergehenden Simulationsstudien wird eine Modellgenauigkeit von $\Delta T = \pm 10 \text{ K}$ in der Temperaturantwort und $\pm 5 \%$ bei den kumulierten Emissionen vorausgesetzt.

In Bild 4 (links) ist eine Potenzialanalyse für den innerstädtischen Teil des NEFZ dargestellt. Wie die Berechnungen zeigen, können bereits geringe Steigerungen der mittleren Abgastemperatur um 20 bis 30 K

zu einer Erhöhung der CO-Konvertierung um bis zu 70 % im Gesamtzyklus führen. Diese starke Temperaturabhängigkeit der Konvertierungsrate ist auf den Betrieb im Bereich der Light-off-Temperatur zurück-

zuführen. Deshalb ist es neben einem frühen Aufheizverhalten erforderlich, die DOC-Temperatur über der Light-off-Temperatur zu halten. Für den Fall einer inhomogenen DOC-Anströmung kann ferner

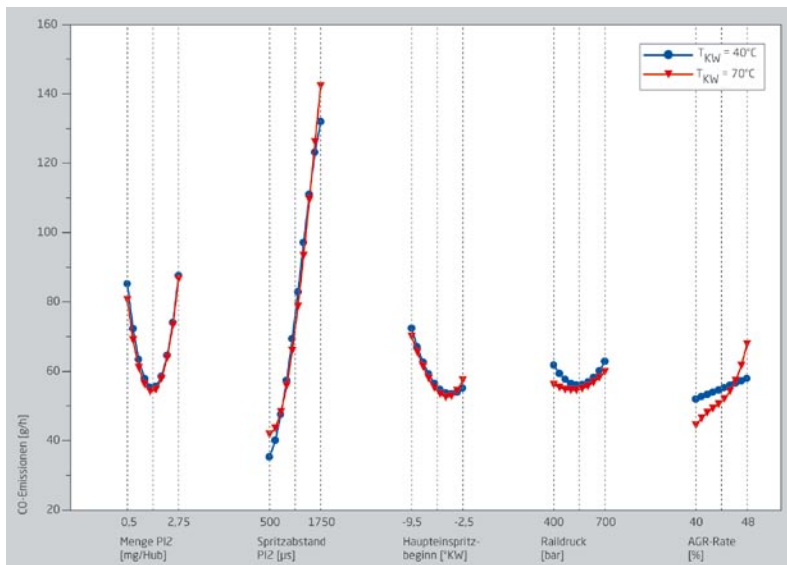


Bild 3: DoE-Modellierung von Einzeleinflüssen auf die CO-Rohemissionen

EXHAUSTAFTERTREATMENT SYSTEMSMODELING

www.exothermia.com

Exothermia SA, a spin-off company of Aristotle University Thessaloniki offers software tools and simulation services to the automotive community. Its modular software platform *axisuite*® is an integrated exhaust line simulation tool, already successfully applied by major OEM's and suppliers.

axisuite						
module	principl	TWC	DOC	LNT	SCR	DPF
axi ^{cat}	flow-through	✓	✓	✓	✓	—
axi ^{trap}	wall-flow	✓	✓	✓	✓	✓
axi ^{foam}	deep-bed	✓	✓	✓	✓	✓
axi ^{heat}	exhaust pipe	single-wall / double-wall / insulating material/ reacting flow				



EXOTHERMIA S.A. ENGINEERING SOFTWARE APPLICATIONS
 21, Antoni Tritsi str., P.O. Box 22461, 551 02 Thessaloniki, Greece
 Tel.: +30 2310 804 930, Fax: +30 2310 804 810
 E-mail: info@exothermia.com

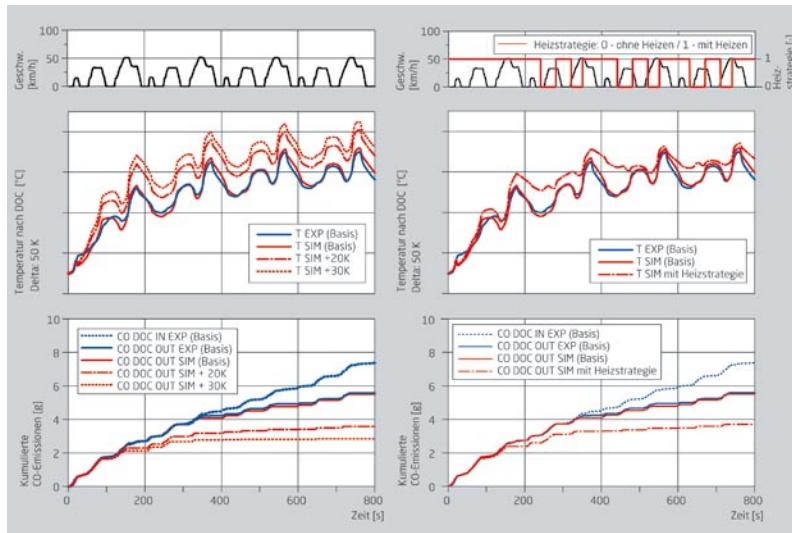


Bild 4: Untersuchung des Temperatureinflusses auf die CO-Tailpipe-Emissionen im NEFZ mittels Simulation

zur korrekten Abbildung des Light-off eine mit CFD gekoppelte, dreidimensionale Simulation verwendet werden.

In einem nächsten Schritt wird eine Heizstrategie erarbeitet, welche eine Temperaturerhöhung ohne Verbrauchsnachteile und ohne Erhöhung der NO_x-Emissionen bewirken soll. Diese Variante ist in Bild 4 (rechts) dargestellt und zeigt deutlich, dass ein Heizen in den Schub- und Leerlaufphasen kombiniert mit einem raschen Aufheizen des Systems die erwünschte Anhebung der Temperatur bewirkt. Dahingegen ergibt eine Heizstrategie, welche nur auf die Beschleunigungsphasen wirkt, zwar höhere Spitzentemperaturen, doch kann das Auskühlen des DOC nicht verhindert werden (in Bild 4 nicht dargestellt).

5.3 Applikative Umsetzung

Die durch die Simulation beschriebene Heizstrategie wird im Folgenden mit den Maßnahmen 2.3 bis 2.5 applikativ umgesetzt. Die Eignung der Maßnahmen für den Fahrzeugbetrieb wird bewertet, **Bild 5**.

5.3.1 Maßnahmen 2.3, 2.4 und 2.5

Durch die Aufteilung der Haupteinspritzung auf zwei Einspritzungen in Maßnahme 2.3 ist ein Anstieg der Abgastemperaturen von 10 bis 15 K möglich. Um den zu erwartenden Mehrverbrauch gering zu halten, wird diese Maßnahme auf den Light-off-Bereich beschränkt (Abschaltung Split Main nach 630 s). Bei konstanten NO_x-Emissionen ergibt sich ein Anstieg der CO-Konvertierung auf 57 %. Jedoch ist der resultierende Verbrauchsnachteil von 3 % nicht akzeptabel.

Durch die Aktivierung der Drosselklappe im Schub in Maßnahme 2.4 ist ein Anstieg der DOC-Temperatur um 10 bis 15 K vor allem in den Schubphasen zu verzeichnen. Bei unveränderten Rohemissionen erreicht die CO-Konvertierung 56 %. Hierdurch wird der gesetzliche Grenzwert bereits sicher unterschritten. Diese Maßnahme zeigt bezüglich des Verbrauchs und damit auch der CO₂-Emissionen keine Verschlechterung im Vergleich zur Basismessung. Jedoch führt die Androsselung der Ansaugluft zu einem Absinken des Systemdrucks, welcher aufgrund von Bauteilgrenzen limitiert ist.

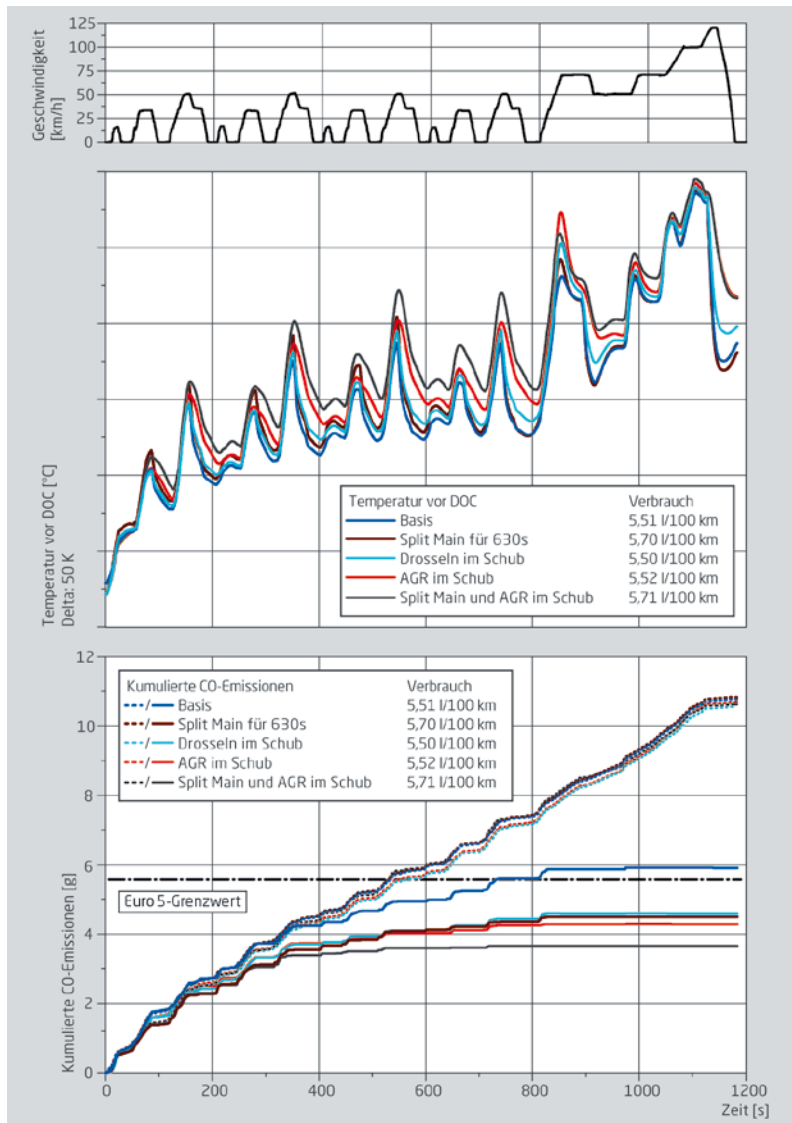


Bild 5: Applikative Maßnahmen zur Senkung der CO-Tailpipe-Emissionen

Wird wie in Maßnahme 2.5 das AGR-Ventil im Schub geöffnet und (durch die AGR-Regelstrategie) die Drosselklappe teilweise geschlossen steigen die Temperaturen im DOC um 20 bis 25 K an. Dadurch ergibt sich eine CO-Konvertierung von 60 %. Diese Maßnahme ist ebenfalls verbrauchsneutral.

5.3.2 Kombination der Maßnahmen 2.3 und 2.5

Durch die Kombination der beiden Maßnahmen 2.3 und 2.5 kann unter Nichtberücksichtigung des Mehrverbrauchs eine Potenzialabschätzung hinsichtlich der maximalen Temperatursteigerung im DOC durchgeführt werden. Die Aufteilung der Haupteinspritzung auf zwei Einspritzungen in Kombination mit AGR und Drosselklappe im Schub bewirkt einen Temperaturanstieg von 30 K; die CO-Konvertierung steigt auf 66 %.

Die Aktivierung der AGR im Schub oder der Drosselung im Schub kann die CO-Tailpipe-Emissionen in ausreichendem Maße absenken. Da diese Maßnahmen verbrauchsneutral sind scheinen sie das Mittel der Wahl. Es ist jedoch zu beachten, dass zur Erhaltung der Agilität, des Ansprechverhaltens und der Regelbarkeit der AGR weitere Schritte nötig sind. Durch geeignete Applikation und Funktionsentwicklung können die eventuell negativen Effekte minimiert werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Identifikation und Umsetzung geeigneter CO-mindernder, aber verbrauchsneutraler Maßnahmen für Dieselmotoren werden im Entwicklungsprozess der IAV GmbH sowohl applikative als auch simulative Methoden eingesetzt, **Bild 6**. Hier wurden verschiedene Ansätze aufgezeigt, die das Absinken der Abgastemperaturen als Folge von verbrauchsreduzierenden Maßnahmen verhindern und die Einhal-

tung der Euro-5-Grenzwerte sicherstellen. Bei der Einführung vermeintlich „applikationsneutraler Maßnahmen“ (zum Beispiel durch ein Nebenaggregate-Management) muss berücksichtigt werden, dass bereits eine geringfügige Temperaturabsenkung im Light-off-Bereich des Diesel-Oxidationskatalysatoren (DOC) zu einer erheblichen Verschlechterung der CO-Tailpipe-Emissionen führen kann. Der abgebildete Entwicklungsprozess kommt auch für Euro-6-Applikationen zur Anwendung, für die sich der dargelegte Zielkonflikt noch verstärkt.

Um das DOC-System während der gesamten Fahrzeuglebensdauer effizient nutzen und vor allem alterungsbedingte Änderungen der DOC-Konvertierungsfähigkeit detektieren zu können, werden darüber hinaus Ansätze zur Light-off-Erkennung im realen Fahrzeugbetrieb verfolgt und in Steuerungs- und Regelungsstrategien umgesetzt.

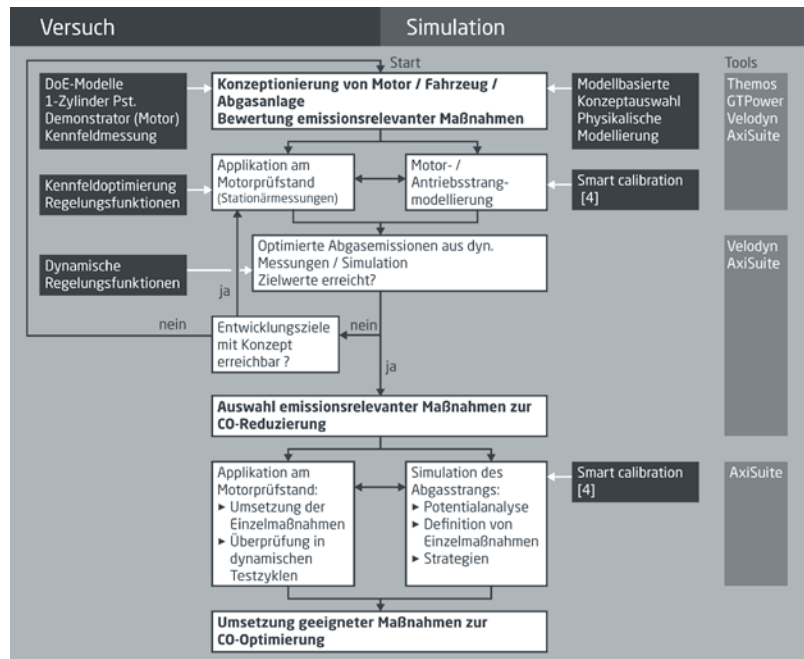


Bild 6: Zusammenspiel von Applikation und Simulation im IAV-Entwicklungsprozess

Literaturhinweise

- [1] Basse, N.; Behnk, K.; Manns, J.; Mylidakis, E.; Tschiggfrei, W.: Emissionsoptimierungsprozess für Dieselmotoren am dynamischen Motorprüfstand. In: MTZ 65 (2004), Nr. 12, S. 988-995
- [2] Stamatelos, A. M.; Pattas, K. N.; Koltsakis, G. C.; Kandydas, I. P.; Pontikakis, G.: Computer-Aided Engineering in the Development of Diesel Exhaust Aftertreatment Systems. In: SAE 1999-01-0458, USA, 1999
- [3] Merker, G.; Schwarz, C.; Stiesch, G.; Otto, F.: Verbrennungsmotoren. Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung. B.-G.-Teubner-Verlag, Wiesbaden, 2006
- [4] Heimlich, F.; Krämer, L.; Schäffner, J.; Gratzke, R.; Behnk, K.; Koltsakis, G. C.; Haralampous, O.: Modellbasierte Optimierung der Belastungsgrenze katalytbeschichteter Diesel-Partikelfilter. FAD e. V., Dresden, 2006

Download des Beitrags unter
www.MTZonline.de

MTZ

Read the English e-magazine.
Order your test issue now:
SpringerAutomotive@abo-service.info



Welt der Dichtungstechnik • www.kaco.eu

Verantwortung schafft Vorsprung