

## Aus der Forschung in die Praxis: Saubere Dieselmotoren dank Stickoxid-Umwandlung mit Harnstoff

Die Gruppe Abgasnachbehandlung am Paul Scherrer Institut (PSI) entwickelte zusammen mit dem Institut für Mess- und Regeltechnik der ETH Zürich ein Harnstoff-System, das es erlaubt, bei minimaler Grösse etwa 90% der Stickoxide aus dem Abgas von Dieselfahrzeugen zu entfernen. Das Projekt-Team wurde Preisträger des Swiss Technology Award 2005 und gewann den Sonderpreis der ABB Schweiz AG in der Kategorie «Ressourcen schonen».

### Selektive katalytische Reduktion mit Hilfe von Harnstoff

Weil Dieselmotoren ihren Treibstoff effizienter nutzen als Benzinmotoren, gelten sie als vergleichsweise ökonomisch und umweltfreundlich. Doch die Dieselerbrennung hat auch gravierende Nachteile: Sie produziert grosse Mengen Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) und Russ, die sich negativ auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit auswirken. Bereits 2005/2006 werden deshalb die Abgasnormen für Nutzfahrzeuge europaweit massiv verschärft (Euro4-Abgasnorm). Weitere Senkungsschritte sind bereits für 2008 (Euro5) geplant.

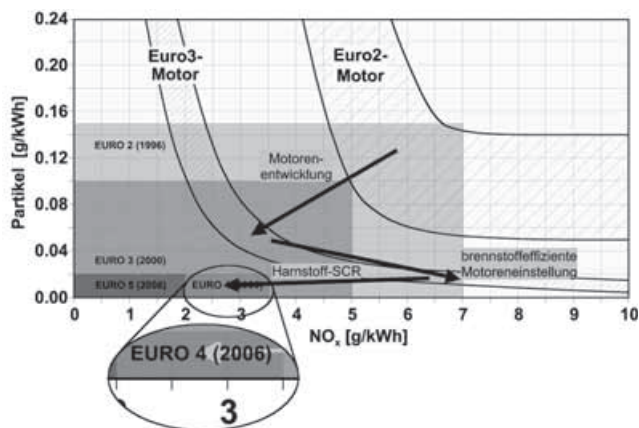
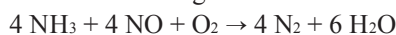


Abb. 1. Trade-off zwischen  $\text{NO}_x$ - und Partikelemissionen bei Dieselmotoren. Die gezeigten Kurvenverläufe sind typisch für die Abhängigkeit von Partikel- und  $\text{NO}_x$ -Emissionen eines Dieselmotors. Die Pfeile zeigen die Strategie zur Einhaltung der Euro4-Grenzwerte: Durch die Motorenentwicklung konnten sämtliche Emissionen vom Euro2- zum Euro3-Motor reduziert werden. Durch Brennstoff-effiziente Einstellung des Motors können die Partikelgrenzwerte eingehalten werden. Die dadurch erhöhten Stickoxidemissionen werden schliesslich durch die Anwendung von Harnstoff-SCR auf Euro4-Niveau gesenkt. Zusätzlich werden durch die Anwendung des SCR-Verfahrens auch die Partikelemissionen um weitere 30–40 % abgesenkt.

Da die vorgeschriebenen strengen Grenzwerte allein durch die Weiterentwicklung der Motoren kaum eingehalten werden können, setzen die Nutzfahrzeug-Hersteller für die zukünftigen Fahrzeuggenerationen auf die Abgasnachbehandlungstechnik *Harnstoff-SCR* (Selective Catalytic Reduction). Diese nutzt eine ungiftige Harnstofflösung zur Umwandlung der Stickoxide in Luftstickstoff mit Hilfe eines Katalysators. Der Harnstoff ( $\text{H}_2\text{N-CO-NH}_2$ ) zersetzt sich dabei zunächst zu Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), der das eigentliche Reduktionsmittel in der SCR-Reaktion darstellt:



Auf dem SCR-Katalysator reagiert der so freigesetzte Ammoniak mit  $\text{NO}$  gemäss der Reaktionsgleichung:



Mit Einführung von Harnstoff-SCR in Europa fällt ein grosser Teil der Stickoxidemissionen der neu in Verkehr gebrachten Fahrzeuge weg: Heute sind über 40% der gesamten Stickoxidemissionen auf Dieselmotoren (besonders Nutzfahrzeuge) zurückzuführen. Die Anwendung von Harnstoff-SCR erlaubt zudem eine Brennstoff-effizientere Einstellung der Motoren. So sind relativ zur Euro3-Einstellung Dieseleinsparungen und damit auch  $\text{CO}_2$ -Reduktionen bis zu 8% möglich. Eine effizientere Einstellung der Dieselmotoren bedeutet im Wesentlichen eine frühere Einspritzung, bei der zwar mehr  $\text{NO}_x$ , aber auch weniger Russ entsteht. In Kombination mit dem SCR-Verfahren führt dies dazu, dass neben der Stickoxidminderung auch weniger Partikel in die Atmosphäre gelangen (Abb. 1).

Harnstoff wird als Stickstoffdünger weltweit im Millionen-Tonnen-Massstab aus Ammoniak und Kohlendioxid hergestellt. Zurzeit wird von den Harnstoffherstellern eine Europa-weite Infrastruktur für die Verteilung des Harnstoffs aufgebaut. Der Harnstoff kommt dabei als eine 32,5%ige Lösung unter dem Namen AdBlue® in den Handel; der Preis wird bei ca. 50 Euro-Cent pro Liter liegen. Ein typischer Lastwagen verbraucht etwa 2 Liter Harnstofflösung auf 100 km.

### Pioniere am PSI

Manfred Koebel gehörte 1989 weltweit zu den Ersten, die Harnstoff-SCR erforschten, und die Gruppe Abgasnachbehandlung hat durch kontinuierliche Forschungstätigkeit bis heute ein grosses Know-how in diesem Fachgebiet

aufgebaut: Überprüfung der grundsätzlichen Tauglichkeit des Verfahrens, Entwicklung einer Analytik zur detaillierten Detektion und Quantifizierung sämtlicher Haupt- und Nebenprodukte, Verständnis der Funktionsweise von SCR-Katalysatoren, Entwicklung eines hochaktiven SCR-Katalysators, Wahl des besten Reduktionsmittels, Verbesserung der Tief- und Hochtemperaturaktivität usw.

### Demonstrations-Projekt Mobil-SCR

In einem vom Bundesamt für Energie finanzierten dreijährigen Demonstrations-Projekt wurde ein praxistaugliches SCR-System für ein Nutzfahrzeug entwickelt. Neben dem Paul Scherrer Institut waren die ETH Zürich sowie die Industriepartner Liebherr Machines Bulle SA (CH) und die Oberland Mangold GmbH (D) am Projekt beteiligt. Das PSI war für die Entwicklung des SCR-Katalysators verantwortlich (Abb. 2). Die Firma Oberland Mangold GmbH lieferte die notwendigen Katalysatorträger und übernahm den Einbau der Katalysatormodule in die Gehäuse. Der PSI-Katalysator ist so aktiv, dass als Katalysatorvolumen nur etwa das doppelte Hubvolumen des Dieselmotors notwendig ist. Deshalb passt das gesamte System problemlos in das Gehäuse eines herkömmlichen Schalldämpfers, so dass kein Neudesign des Fahrzeugs bzw. der Maschine notwendig wurde.

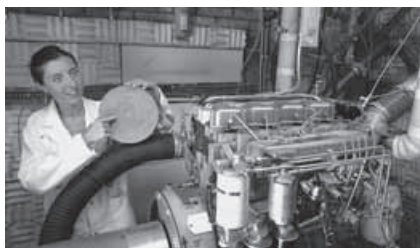


Abb. 2. SCR-Katalysator. Die Chemiedoktorandin Gaia Piazzesi zeigt den wabenförmigen SCR-Katalysator, der mehr als 90 Prozent der Stickoxide aus dem Abgasstrom entfernt. Rechts zu sehen ist der Dieselmotor des Teststands am Paul Scherrer Institut (Bild: Roland Keller, PSI).

Die Firma Liebherr Machines Bulle SA entwickelt und produziert Dieselmotoren für Baumaschinen und Mobilkrane. Im Rahmen des Projekts wurden von Liebherr das Anforderungsprofil für ein SCR-System aus

dem Blickwinkel eines Geräteherstellers definiert, ein Motorenprüfstand zur Verfügung gestellt und vielfältige technische Unterstützung gewährt. Die besonderen Herausforderungen bei der Anwendung von Harnstoff-SCR im Fahrzeug bestanden darin, das System auf kleinstem Raum unterzubringen und die Harnstofflösung zu jedem Zeitpunkt in der exakt richtigen Menge zu dosieren. Dies ist deshalb so schwierig, weil der dynamische Motorbetrieb zu ständig wechselnden Abgasvolumenströ-

men, -temperaturen und  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen führt. Zur Lösung dieses Problems entwickelte das Institut für Mess- und Regeltechnik der ETH Zürich ein Regelsystem, das sehr hohe Entstickungsgrade ermöglicht, ohne dass Ammoniak entweicht. Für die Auslegung der Regelstrategie ist die Vermessung von nur drei charakteristischen Kennfeldern und die Aufzeichnung einiger dynamischer Experimente nötig. Ein Highlight ist ein spezieller elektronischer Filter, der es erlaubt, den  $\text{NO}_x$ -Sensor auch zur Ammoniakmessung einzusetzen. So kann man mit nur einem einzigen Sensor sowohl die  $\text{NO}_x$ - als auch die Ammoniakkonzentrationen hinter dem Katalysator bestimmen und zur Regelung des Systems verwenden. In verschiedenen Motorenprüfstandsversuchen, auch für hochdynamische Testzyklen wie der Europäische Transientenzyklus (ETC), wurden mit dem geregelten SCR-System ca. 90% der Stickoxide bei einem mittleren Ammoniakschluss von ca. 10 ppm (d. h. 10 Ammoniakmoleküle auf 1 Mio. Luftmoleküle) in Stickstoff und Wasserdampf umgewandelt.

### Swiss Technology Award 2005

Die erzielten Ergebnisse überzeugten auch die Jury des Swiss Technology Award, so dass das PSI und die ETH Zürich für diese Technologieentwicklung Preisträger des Swiss Technology Award 2005 wurden. Das Projekt kam sogar in die Endrunde der besten Vier. Auch wenn es nicht ganz zum Hauptpreis reichte, gewann das Projekt noch den Sonderpreis der ABB Schweiz AG in der Kategorie *Resourcen schonen*.

### Wie geht es weiter?

Harnstoff-SCR ist die beste bekannte Technologie zur Entfernung von Stickoxiden aus Dieselaabgasen und wird mit Inkrafttreten der EURO4- und EURO5-Grenzwerte hunderttausendfach auf den Markt kommen. Das Projekt wurde bis in das Demonstrationsstadium entwickelt, d. h. die Funktionstüchtigkeit des Systems wurde an einem dynamischen Motorenprüfstand unter Beweis gestellt. Dank diesem *Proof of Concept* ist in nächster Zukunft die industrielle Umsetzung dieser Technologie mit vertretbaren Risiken machbar. Im Rahmen eines Technologie-Transfers wurde das Katalysator-Know-how des PSI an die Wacker-Chemie GmbH in München (D) in nicht-exklusiver Lizenz verkauft, die auf dieser Basis die nächste Generation von SCR-Katalysatoren entwickeln und vermarkten wird.

Dr. Oliver Kröcher, Labor für Verbrennungsforschung, Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen-PSI, oliver.kroecher@psi.ch