

## **Plasma-katalytischer Abbau von NO<sub>x</sub> im Sauerstoffüberschuss mit Kohlenwasserstoff-SCR**

(Plasma-Catalytic Abatement of NO<sub>x</sub> in Oxygen Excess with Hydrocarbon – SCR)

H. Miessner, K.-P. Francke, R. Rudolph

Institut für Umwelttechnologien GmbH  
Volmerstr. 9b, D 12489 Berlin-Adlershof  
Fax: +49-30-6392 4831, E-mail: hm@iut-berlin.com

### **Zusammenfassung**

Die oxidierende Wirkung eines nicht-thermischen Plasmas in einem Motorenabgas mit Sauerstoffüberschuss führt zu einer effektiven Umwandlung des NO zu NO<sub>2</sub>, das in synergetischer Weise mit geeigneten Katalysatoren in einer selektiven katalytischen Reduktion mit Kohlenwasserstoffen (HC-SCR) zu molekularem Stickstoff abgebaut werden kann. Die Kombination von SCR und kaltem Plasma beschleunigt die Gesamtreaktion und ermöglicht einen effektiven Abbau von NO<sub>x</sub> bei vergleichsweise geringen Temperaturen. Als geeignete Katalysatoren haben sich v.a. bestimmte Modifikationen des Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> erwiesen. Mit einem Energieaufwand in der elektrischen Entladung von ca. 30 eV/NO-Molekül, einer Temperatur von 300 °C und einer Belastung von 20 000 h<sup>-1</sup> am Katalysator lassen sich 500 ppm NO in einem Abgas mit Sauerstoffüberschuss auf die Hälfte abbauen.

Die synergetische Kombination von nicht-thermischem Plasma und HC-SCR konnte beim NO<sub>x</sub>-Abbau von Diesellabgas unter realen Bedingungen verifiziert werden.

### **Abstract**

The oxidative potential of a non-thermal plasma in off-gases from engines with oxygen excess results in an effective conversion of NO to NO<sub>2</sub>, that can be converted synergistically to molecular nitrogen with appropriate catalysts in a selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub> with hydrocarbons (HC-SCR). The combination of SCR and cold plasma enhances the overall reaction and allows an effective removal of NO<sub>x</sub> at relatively low temperatures. Certain modifications of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> have been found to be effective as catalysts in this reaction. With an energetic supply of ca. 30 eV/NO-molecule, a temperature of 300 °C and a space velocity of 20 000 h<sup>-1</sup> at the catalyst, it is possible to reduce 500 ppm NO in oxygen excess by halves.

The synergistic combination of non-thermal plasma and HC-SCR has been verified under real conditions with the  $\text{NO}_x$ -abatement in diesel exhaust.

## **Einführung**

Die Beseitigung von  $\text{NO}_x$  in Motor-Abgasen mit Sauerstoffüberschuss ist bislang unzureichend gelöst und wird daher weltweit intensiv bearbeitet. Sowohl  $\text{NH}_3$  als auch Kohlenwasserstoffe werden als zusätzliche Reduktionsmittel untersucht (SCR-Selective Catalytic Reduction), ohne dass bisher eine befriedigende technische Lösung für mobile Systeme erreicht wurde [1-2]. Aus Gründen der Verfügbarkeit wäre die Nutzung von Kohlenwasserstoffen (HC-SCR) von besonderem Interesse. Nach dem gegenwärtigen Entwicklungsstand können an speziellen Katalysatoren bis zu 60% des  $\text{NO}_x$  bei Temperaturen  $> 450^\circ\text{C}$  abgebaut werden [3-4].

Es gibt andererseits seit ca. 10 Jahren Untersuchungen, das  $\text{NO}_x$  in einem nicht-thermischen Plasma (NTP: Corona-Entladung, dielektrisch-behinderte Entladung) in einer reinen Gasphasenreaktion abzubauen. Energiereiche Elektronen reagieren hierbei mit den Gasphasenmolekülen und erzeugen reaktive Spezies (Radikale, angeregte Moleküle), die ihrerseits weiterreagieren. Die eingekoppelte elektrische Energie wird nur den Elektronen mitgeteilt, Ionen und Moleküle verbleiben im wesentlichen bei der Umgebungstemperatur, so dass das Gas nicht aufgeheizt wird (kalte Entladung). Der Energieaufwand ist daher vergleichsweise gering und entspricht bei den hier untersuchten Systemen einer adiabatischen Temperaturerhöhung des Gases von weniger als  $100^\circ\text{C}$ . In den Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass ein effektiver Abbau von  $\text{NO}_x$  selbst in Gegenwart von Reduktionsmitteln wie  $\text{NH}_3$  oder Kohlenwasserstoffen nur in einer sauerstofffreien Atmosphäre möglich und somit in der Praxis nicht realisierbar ist [5-7].

In jüngster Zeit sind durch die Kombination der Gasphasenreaktion im kalten Plasma mit geeigneten Katalysatoren in Gegenwart von Reduktionsmitteln ermutigende Ergebnisse erzielt worden. So ermöglicht die plasma-gestützte  $\text{NH}_3$ -SCR eine effektive  $\text{NO}_x$ -Minderung in sauerstoffhaltigem Abgas bereits bei  $100 - 200^\circ\text{C}$  [8-12]. Auch für die Kohlenwasserstoff-SCR ist über den positiven Effekt eines NTP in Kombination mit geeigneten Katalysatoren auf den  $\text{NO}_x$ -Abbau im Sauerstoffüberschuss berichtet worden [7, 13-15].

Mit dem vorliegenden Beitrag werden eigene Ergebnisse zu dieser Thematik vorgestellt. Es wird gezeigt, dass ein dem Katalysator vorgeschaltetes nicht-thermisches Plasma in synergetischer Weise den  $\text{NO}_x$ -Abbau durch HC-SCR fördert.

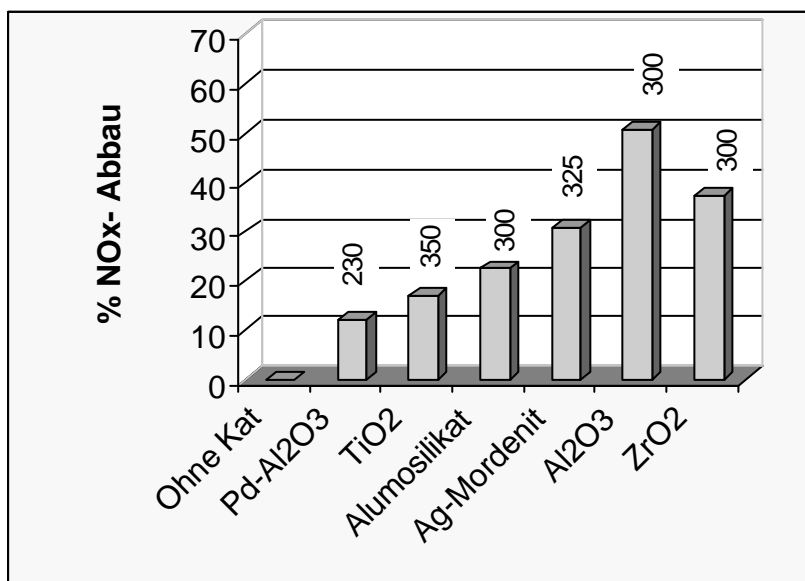
## Experimentelles

Das Plasma wird in einem koaxialen Reaktor durch eine dielektrisch behinderte Entladung erzeugt, wobei die Glaswand des Reaktors das Dielektrikum zwischen einer Scheiben-Hochspannungselektrode innerhalb und einer Masselektrode außerhalb des Reaktors bildet. Für praxisrelevante Versuche mit Dieselabgas wurde ein Keramikrohr als Dielektrikum benutzt. Die elektrischen Entladungen werden mit einem Hochspannungs-Impulsgenerator (ca. 20 kV, Wiederholungsrate bis  $500 \text{ s}^{-1}$ ) erzeugt. Der Katalysator ist in einer separaten, beheizbaren Reaktorzone hinter dem Entladungsbereich bzw. in einem nachgeschalteten katalytischen Reaktor angeordnet. Die Analytik erfolgte mit einem  $\text{NO}/\text{NO}_x$ -Gerät (Chemilumineszenz), einem FTIR Spektrometer mit Gas-Langwegküvette und einem  $\text{CO}/\text{CO}_2$ -Gerät (NDIR).

Die Versuche mit Dieselabgasen erfolgten in der Abgasprüfstelle Berlin-Adlershof mit einem Multicar (M25-10, Baujahr 1989, 1997 ccm Diesel, ohne Katalysator) auf dem Rollenprüfstand unter Nutzung eines Abgas-Analysensystems (Horiba) mit zwei unabhängigen Kanälen zur Realisierung von Vergleichsmessungen.

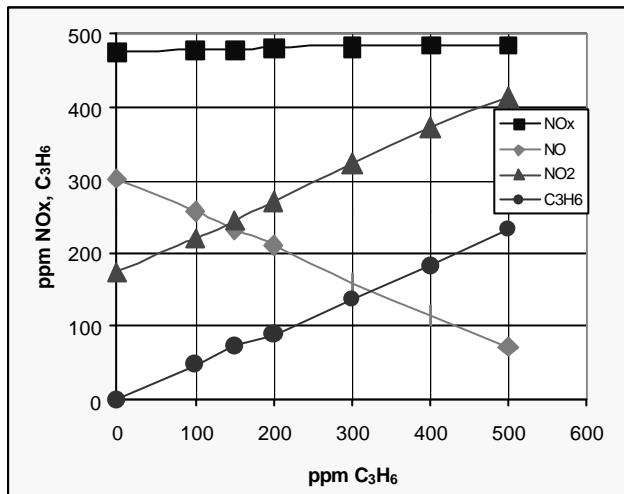
## Ergebnisse und Diskussion

Abb. 1 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung verschiedener Katalysatoren auf ihre



**Abb. 1**

Abbau von 500 ppm  $\text{NO}$  in  $13\% \text{O}_2/\text{N}_2$  in Gegenwart von 1000 ppm  $\text{C}_3\text{H}_6$ ; Belastung:  $20\,000 \text{ h}^{-1}$ , Energiedichte der elektrischen Entladung:  $13\text{-}14 \text{ Wh/m}^3$ ; die Zahlen im Diagramm geben die Temperatur ( $^\circ \text{C}$ ) mit dem maximalen Umsatz an.

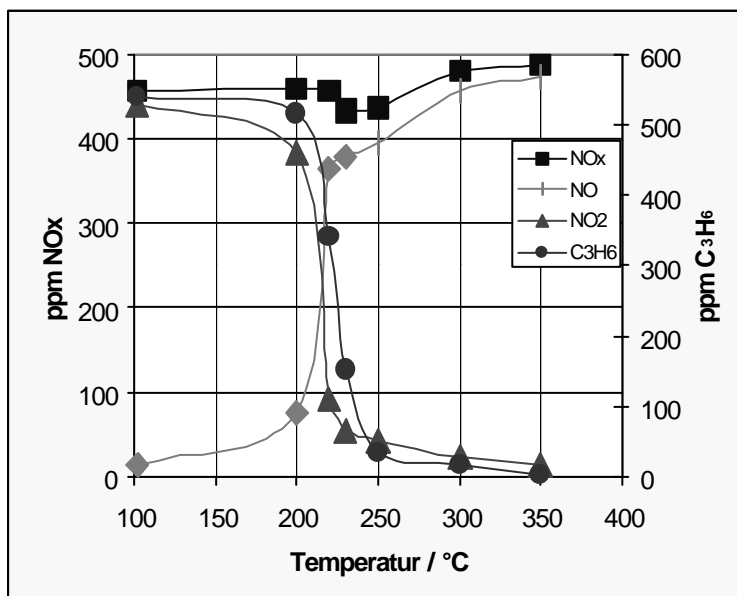


**Abb. 2**

Abbau von 500 ppm NO in 13% O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, ohne Katalysator, 100 °C, Energiedichte des NTP: 25 Wh/m<sup>3</sup>,

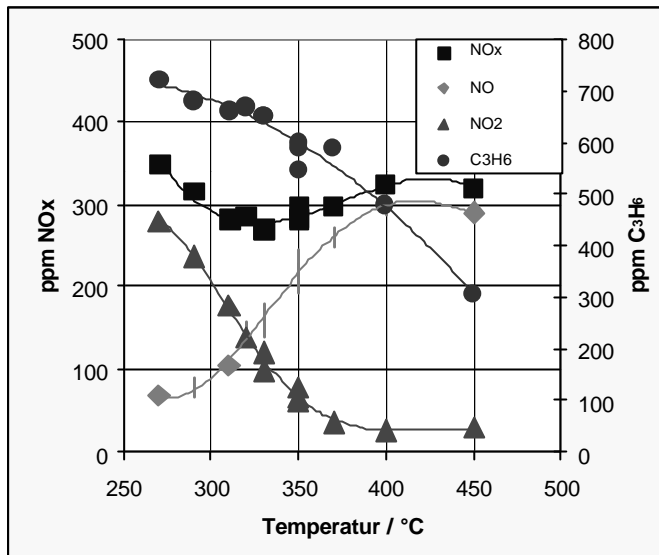
Wirksamkeit in der plasma-katalytischen HC-SCR von NO<sub>x</sub>. Ohne Katalysator lässt sich mit der elektrischen Entladung allein kein NO<sub>x</sub>-Abbau erzielen. Eine Analyse der einzelnen Reaktionspartner in Abhängigkeit von der zugefügten C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> – Menge (Abb. 2) zeigt, dass das NO in der elektrischen Entladung im Sauerstoffüberschuss lediglich zu NO<sub>2</sub> oxidiert wird, wobei das Propen diese Oxidation fördert. Dieser Befund ist auch von anderen Gruppen berichtet und näher diskutiert worden [5-7]. Das Propen wird unter diesen Bedingungen teilweise zu CO<sub>2</sub>, CO und HCHO abgebaut.

Bei der Kombination mit einem nachgeschalteten Katalysator erweisen sich die für den rein katalytischen Abbau aktiven Systeme wie z.B. Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und Ag/Mordenit als weniger geeignet. Abb. 3 zeigt eine Analyse der Reaktionsprodukte in Abhängigkeit von der Temperatur für den Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Katalysator. Es wird deutlich, dass der Kohlenwasserstoff bereits bei 200-250 °C verbrannt wird und für die Reaktion mit dem NO<sub>x</sub> bei höheren



**Abb. 3**

Abbau von 500 ppm NO in 13% O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> in Gegenwart von 1000 ppm C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, Katalysator: Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Belastung: 20 000 h<sup>-1</sup>, Energiedichte des NTP: 25 Wh/m<sup>3</sup>



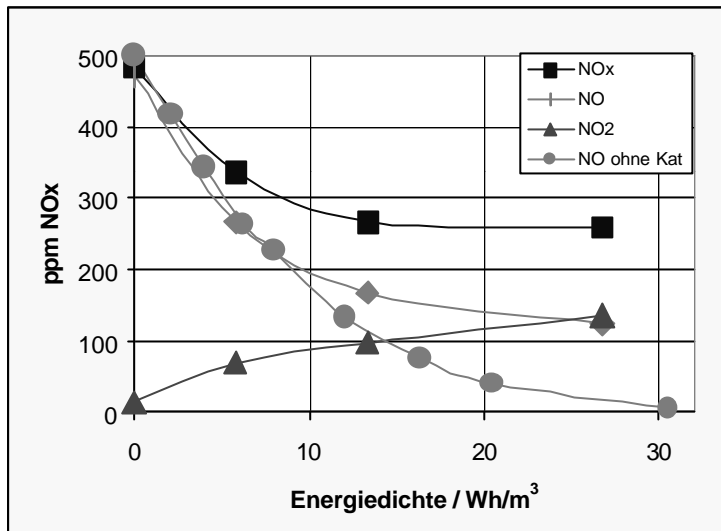
**Abb. 4**

Abbau von 500 ppm NO in 13% O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> in Gegenwart von 1000 ppm C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, Katalysator: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Belastung: 20 000 h<sup>-1</sup> Energiedichte des NTP: 25 Wh/m<sup>3</sup>

Temperaturen nicht mehr zur Verfügung steht. Gleichzeitig erfolgt eine Umwandlung von NO<sub>2</sub> zurück zu NO, wodurch der Effekt des Plasmas wieder aufgehoben wird. In ähnlicher Weise aktivieren redox-aktive Katalysatoren wie Ag/Mordenit, Mn-haltige Katalysatoren oder Cu-ZSM-5 die Rückreaktion von NO<sub>2</sub> zu NO, was letztlich zu einem unbefriedigenden NO<sub>x</sub>-Abbau führt.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> scheint dagegen ein geeigneter Kandidat für die Reaktion zu sein. Bei einer Energiedichte von < 15 Wh/m<sup>3</sup> in der elektrischen Entladung, einer Temperatur von 300 °C und einer Belastung von 20 000 h<sup>-1</sup> am Katalysator lassen sich 500 ppm NO in einem Abgas mit Sauerstoffüberschuss auf die Hälfte abbauen. Diese Ergebnisse entsprechen den mit speziell optimierten Katalysatoren bei ca. 450 °C erreichten Werten bei der HC-SCR ohne Plasmaunterstützung [3-4]. Die Analyse der Reaktionsprodukte in Abhängigkeit von der Temperatur am Katalysator (Abb. 4) veranschaulicht den Unterschied im Vergleich zum vorigen Beispiel:

bis zu 250 °C kommt es nur zu einer geringen Totaloxidation des Propens, bei 300 °C sind noch 70% vorhanden. Bis über 300 °C überwiegt das NO<sub>2</sub> gegenüber dem NO im Gasgemisch. Damit stehen sowohl der Kohlenwasserstoff als auch das NO<sub>2</sub> für die SCR-Reaktion zur Verfügung, und es kommt insgesamt zu einem effektiven Abbau von NO<sub>x</sub>. In ähnlicher Weise bewirken auch ZrO<sub>2</sub> und TiO<sub>2</sub> einen effektiven Abbau von NO<sub>x</sub>. Um weitere Informationen über den Mechanismus der plasma-katalytischen Reaktion zu erhalten, wurde die Energiedichte in der elektrischen Entladung variiert. Abb. 5 zeigt die Abhängigkeit des plasma-katalytischen NO<sub>x</sub>-Abbaus an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> von der eingekoppelten Energie der elektrischen Entladung. Der Abbau von NO<sub>x</sub> zeigt bis zu einer Energie-



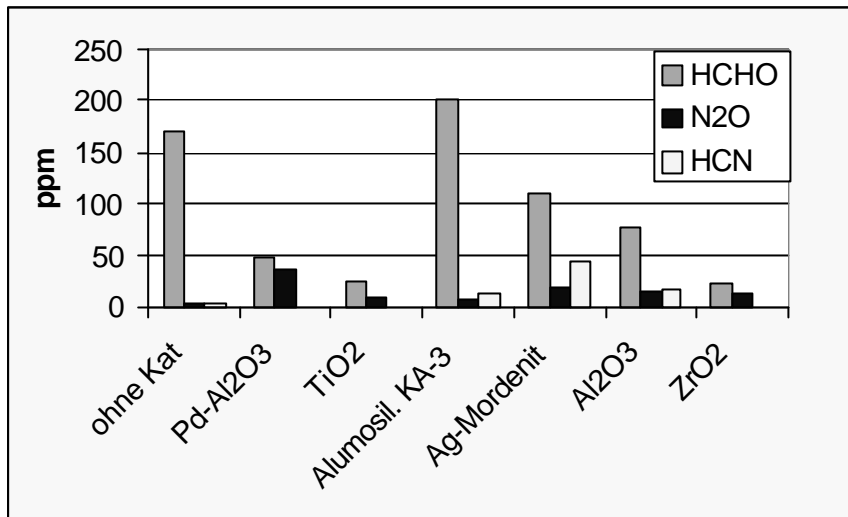
**Abb. 5**

Abbau von 500 ppm NO in 13% O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> in Gegenwart von 1000 ppm C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, Katalysator: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 330 °C, Belastung: 20 000 h<sup>-1</sup>

dichte von ca. 15 Wh/m<sup>3</sup> (ca. 50 J/l) eine deutliche Abhängigkeit, aus der sich eine Energieeffizienz von ca. 30 eV/NO-Molekül ableiten lässt. Der Energieaufwand entspricht einer adiabatischen Temperaturerhöhung des Gases um etwa 45 K. Eine weitere Erhöhung der Energiedichte bewirkt keinen zusätzlichen NO<sub>x</sub>-Abbau. Der Vergleich mit der ebenfalls angeführten nichtkatalytischen Umsetzung des NO in der elektrischen Entladung zeigt, dass bei dieser Energiedichte der größte Teil des NO zu NO<sub>2</sub> oxidiert ist (vgl. auch Abb. 2) und für die Reaktion mit dem Kohlenwasserstoff zur Verfügung steht. Die Wirkung des Plasmas besteht demzufolge in der intermediären Oxidation des NO zu NO<sub>2</sub> in der Gasphase und die Wirkung des Katalysators in der heterogenkatalytischen Reaktion des NO<sub>2</sub> mit dem Kohlenwasserstoff unter Bildung Nhaltiger Spezies auf der Katalysatoroberfläche und deren Weiterreaktion mit NO<sub>2</sub> zu molekularem Stickstoff.

Über die aktiven Zentren des Katalysators und deren spezifische Wirkung besteht noch keine Klarheit. Ein Vergleich verschiedener Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Muster (überwiegend  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, mit Oberflächen von 100 – 500 m<sup>2</sup>/g) zeigt deutliche Unterschiede im NO<sub>x</sub>-Abbau von 20-50%, ohne dass ein einfacher Zusammenhang mit der spezifischen Oberfläche oder dem Porenvolumen erkennbar ist. Offensichtlich spielen andere Faktoren wie z.B. die aciden (Brönsted- und/oder Lewis-Acidität) oder auch basischen Eigenschaften des Katalysators eine entscheidende Rolle.

Zu ähnlichen Schlussfolgerungen gelangen auch Balmer u.a. [15], die ebenfalls verschiedene Katalysatoren auf ihre Wirksamkeit in der plasma-katalytischen HC-SCR getestet haben. Im Unterschied zu unseren Ergebnissen haben sie für ZrO<sub>2</sub> keine Wir-

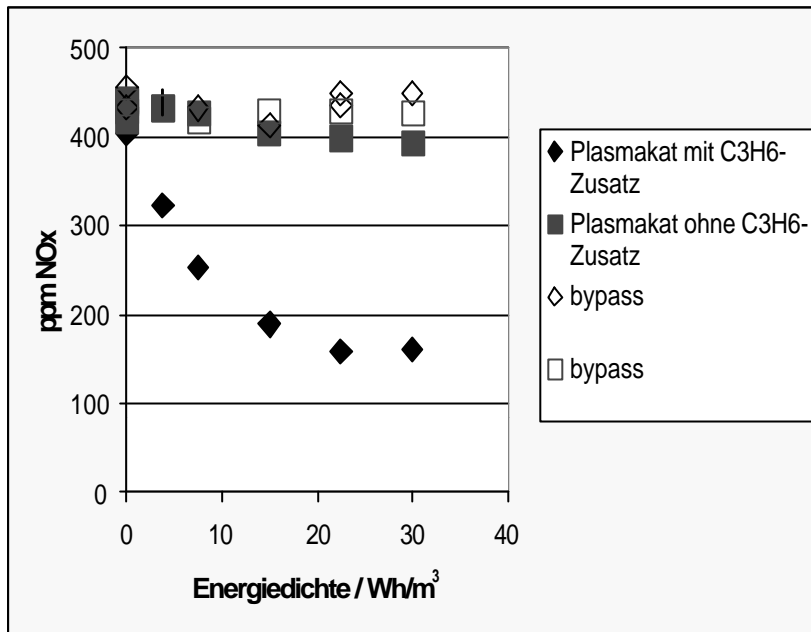


**Abb. 6**  
Nebenproduktbildung beim Abbau von 500 ppm NO und 1000 ppm C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> in 13%O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, Belastung: 20 000 h<sup>-1</sup>, Entladung: ca. 13-14 Wh/m<sup>3</sup>

kung auf den NO<sub>x</sub>-Abbau gefunden und das von Ihnen verwendete TiO<sub>2</sub> war nur bei direkter Anregung des Katalysators in der Entladungszone katalytisch aktiv. Von den zwei von Balmer u.a. untersuchten γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Mustern verschiedener Herkunft und verschiedener Oberfläche war nur der mit der geringeren Oberfläche plasma-katalytisch aktiv.

Bei der HC-SCR von NO<sub>x</sub> treten üblicherweise eine Reihe von Nebenprodukten auf, die entweder aus der unvollständigen Oxidation des Kohlenwasserstoffes (CO, Formaldehyd) oder aus der ungenügenden Selektivität der Reaktion der N-haltigen Spezies (HCN, N<sub>2</sub>O) herrühren [13-14]. Für die plasmakatalytischen Untersuchungen wurde daher der Bildung der Nebenprodukte und der C-Bilanz in Abhängigkeit von den verwendeten Katalysatoren und den experimentellen Bedingungen besondere Bedeutung beigemessen. Abb. 6 zeigt die Ergebnisse für einige der von uns untersuchten Systeme. Es zeigt sich, dass das Problem der Nebenproduktbildung nicht zu vernachlässigen ist, und durch geeignete Maßnahmen gelöst werden muss. Eine Möglichkeit ist die Kombination mit einem nachgeschalteten Oxidationskatalysator. Entsprechende Versuche unter Verwendung handelsüblicher Katalysatoren haben gezeigt, dass hiermit die Nebenprodukte effektiv entfernt und darüber hinaus die überschüssigen Kohlenwasserstoffe zum CO<sub>2</sub> oxidiert werden können.

Die Ergebnisse zur plasmagestützten HC-SCR wurden in Zusammenarbeit mit der Abgasprüfstelle Berlin-Adlershof GmbH unter realen Bedingungen verifiziert. Hierzu wurde ein Dieselmotor (Multicar M25-10, Baujahr 1989, 1997 ccm) verwendet, der ohne Katalysator bei mittlerer Last ein Abgas mit 400-500 ppm NO<sub>x</sub>, 200-300 ppm CO und einigen ppm Restkohlenwasserstoffe erzeugt (vgl. die in Tabelle 1 angeführte Zusammensetzung ohne Behandlung).



**Abb. 7**

Plasma-katalytischer Abbau von NO<sub>x</sub> in Dieselaabgas mit und ohne Zugabe von Propen. Bedingungen s. Tab. 1 Die bypass-Werte für das unbehandelte Abgas wurden aus einer parallel zu den plasma-katalytischen Versuchen entnommenen Abgasprobe bestimmt (vgl. Experimentelles).

Dieser Abgasstrom wurde in einem plasma-katalytischen Reaktorsystem, bestehend aus einem Plasmareaktor gefolgt von einem katalytischen Reaktor mit 2 Katalysatoren (je 60 ml DENO<sub>x</sub>- und Oxi-Kat) behandelt. Wahlweise wurde Propen dem Abgas vor dem Plasmareaktor zugeführt.

Abbildung 7 zeigt den Einfluss der elektrischen Entladung auf den NO<sub>x</sub>-Abbau. Ohne Propenzusatz führt die plasma-katalytische Behandlung nur zu einer geringfügigen NO<sub>x</sub>-Minderung mit steigender Energiedichte (vgl. auch Tab. 1, Plasma-Kat ohne C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>). Die rein katalytische HC-SCR (Energiedichte 0 Wh/m<sup>3</sup>) mit Propen als zugesetztem Reduktionsmittel bewirkt mit den verwendeten Katalysatoren unter den gegebenen Bedingungen (250 °C) keinerlei NO<sub>x</sub>-Abbau (vgl. auch Tab. 1, nur Katalysator). Mit Unterstützung der elektrischen Entladung lässt sich dagegen unter diesen Bedingungen ein effektiver NO<sub>x</sub>-Abbau realisieren. Ähnlich wie in den Laborversuchen besteht bis ca. 15 Wh/m<sup>3</sup> eine signifikante Abhängigkeit von der Energiedichte. Wir gehen demzufolge davon aus, dass auch unter realen Bedingungen die Wirkung des Plasmas in der intermediären Oxidation des NO zu NO<sub>2</sub> besteht, und dass dieser Prozess bei einer Energiedichte von 15 Wh/m<sup>3</sup> weitgehend vollständig ist.

Tabelle 1 fasst die Abgaswerte des Dieselmotors in den verschiedenen experimentellen Anordnungen zusammen.

**Tabelle 1** Gemittelte Abgaszusammensetzung eines Dieselmotors (Multicar M25-10, Baujahr 1989, 1997 ccm) ohne und mit plasma-katalytischer Reinigung. Behandelter Abgasstrom: ca. 600 NI/h, Energiedichte der elektrischen Entladung: 15 Wh/m<sup>3</sup>, Katalysatortemperatur: 250 °C, Propenzugabe: 1,2 NI/h.

	ppm CO	% CO <sub>2</sub>	ppm HC (C <sub>1</sub> )	% O <sub>2</sub>	ppm NO <sub>x</sub>
Ohne Behandlung	249	8,3	13	9,5	434
Nur Katalysator	0	8,2	0	9,4	428
Plasma-Kat ohne C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	0	7,2	0	10,7	404
Plasma-Kat mit C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	0	7,9	0	9,7	190

Aus den Werten wird deutlich, dass der Oxidationskatalysator unabhängig von der elektrischen Entladung das CO und die Restkohlenwasserstoffe vollständig oxidiert. Das NO<sub>x</sub> wird dagegen nur mit Unterstützung des Plasmas und der zusätzlichen Zugabe von C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> auf weniger als die Hälfte abgebaut.

### Ausblick

Die Effektivität der plasmagestützten Kohlenwasserstoff-SCR für den NO<sub>x</sub>-Abbau in Motorenabgasen mit Sauerstoffüberschuss konnte für einige Katalysatoren nachgewiesen werden. Für die Aufklärung der für die Reaktion relevanten aktiven Zentren und deren Wirkmechanismen und damit für die weitere Optimierung des Prozesses sind offensichtlich weitere systematische Untersuchungen erforderlich. Das gleiche trifft auch für die Minimierung der anfallenden Nebenprodukte und deren Beseitigung zu.

### Danksagung

Die Untersuchungen wurden durch das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 13N7192/0 gefördert. Die Autoren danken der Alcoa Industrial Chemicals, der CONDEA Chemie GmbH, der Degussa AG, der S. Goldmann GmbH Bielefeld, der SCW GmbH Berlin-Adlershof und der Südchemie AG für die Bereitstellung und dem ACA Institut für Angewandte Chemie Berlin-Adlershof für die Bereitstellung und Charakterisierung von Katalysatormustern.

### Literatur

[1] R. Burch, Pure Appl. Chem. 68 (1996) 377.

- [2] A. Fritz, V. Pitchon, *Applied Catalysis B, Environmental* 13 (1997) 1-25.
- [3] H.W. Jen, *Catalysis Today* **1998**, (42): 1-2.37-44.
- [4] M. C. Kung, P. W. Park, D. W. Kim, H. H. Kung, *Journal of Catalysis* **1999**, (181): 1.1-5.
- [5] M. A. Tas, R. van Hardeveld, E. M. van Veldhuizen, *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 1997, (17): 4.371-391.
- [6] W. Niessen, O. Wolf, R. Schruft, M. Neiger, *J. Phys. D: Applied Physics* 31 (1998) 542-550.
- [7] B. M. Penetrante, R. M. Brusasco, B. T. Merritt, W. J. Pitz, G. E. Vogtlin, M. C. Kung, H. H. Kung, C. Z. Wan, K. E. Voss, SAE-Paper 982508 (1998).
- [8] T. Hammer, S. Broer, SAE paper no. 982428 (1998)
- [9] T. Hammer, T. Kishimoto, H. Miessner, R. Rudolph, SAE paper no. 1999-01-3632 (1999)
- [10] S. Bröer, T. Hammer, *Applied Catalysis B: Environmental*, 28 (2000) 101-111.
- [11] H. Miessner, R. Rudolph, K. P. Francke, *Chemical Communications*, 1998, 24.2725-2726.
- [12] K.-P. Francke, H. Miessner, R. Rudolph, *Catalysis Today* 2000, (59): 3-4. 411-416.
- [13] J. Hoard, M. L. Balmer, SAE-Paper 982429 (1998).
- [14] M. L. Balmer, R. Tonkyn, A. Kim, S.; Yoon, D. Jimenez, T. Orlando, S. E. Barlow, J. Hoard, SAE-Paper 982511 (1998).
- [15] M. L. Balmer, R. Tonkyn, S. Yoon, A. Kolwaite, S. E. Barlow, G. Maupin, J. Hoard, SAE-Paper 1999-01-3640.