

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 109 (1991)  
**Heft:** 49

**Artikel:** Rauchgas-Entstickung in Kehrichtverbrennungsanlagen  
**Autor:** Luder, Jürgen / Stücheli, Alexander  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-86065>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 14.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Rauchgas-Entstickung in Kehrichtverbrennungsanlagen

## Einleitung

Bei den durch die EWI (Elektrowatt Ingenieurunternehmungen AG) dem Bundesrat vorgeschlagenen Massnahmen

VON JÜRGEN LUDER UND  
ALEXANDER STÜCHELI,  
WINTERTHUR

zur Reduktion der Luftverschmutzung haben die rund 40 schweizerischen KVA's (Kehrichtverbrennungsanlagen) ein bedeutendes NO<sub>x</sub>-Minderungspotential. Der NO<sub>x</sub>-Ausstoss dieser schweizerischen KVA's betrug im Jahr 1988 rund 4800 t. Der Schadstoffausstoss der Kehrichtverbrennungsanlagen soll sich in den nächsten Jahren drastisch reduzieren.

Zur Verbrennung einer Tonne Kehricht werden etwa 5600 m<sup>3</sup> Luft benötigt. Dabei fallen rund 300 kg Schlacke und 7000 Nm<sup>3</sup> Rauchgas an. Das Rauchgas enthält 20–30 kg Flugasche, 6–10 kg Salzsäure (HCl), 1–2 kg Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), 0,2–0,4 kg Kohlenwasserstoffe (übliche Bezeichnung HC), 0,05 kg Flussäure (HF), 50 g Blei- und Zinkoxid (PbO,ZnO) und etwa 2 g Quecksilber (Hg). Der Gehalt an Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) schwankt zwischen 1,5 kg und 2,5

kg. Zur Reduzierung dieser Schadstoffe werden inzwischen Rauchgasreinigungsanlagen geplant oder installiert, welche die KVA-Rauchgas-Emissionen entsprechend den Anforderungen der LRV (Luftreinhalte-Verordnung) weitgehend erfüllen.

Massgebend für den NO<sub>x</sub>-Anteil von 200 bis 400 mg/Nm<sup>3</sup> Rauchgas (gasförmiges NO<sub>x</sub> als NO<sub>2</sub> immer bezogen auf 11 Vol.-% O<sub>2</sub>, 273 K, 1013 hPa, trockenes Abgas) sind vorwiegend die Oxidation des Stickstoffes der Verbrennungsluft bei hohen Temperaturen im Ofenbrennraum und der Stickstoffanteil im Kehricht. Die gebildeten Stickoxide bestehen aus ca. 95% NO und ca. 5% NO<sub>2</sub>. Der Stickoxidausstoss wird von bereits bestehenden RGR (Rauchgasreinigungsanlagen) nur sehr wenig beeinflusst. Der heutige Grenzwert (LRV vom 16.12.85) für NO<sub>x</sub> mit 500 mg/Nm<sup>3</sup> ist derart grosszügig bemessen, dass technische Massnahmen gegen den NO<sub>x</sub>-Ausstoss nicht zwingend sind. Will man jedoch den vom BUWAL im «Entwurf vom März 1990 zur Änderung der LRV» vorgeschlagenen Grenzwert von 80 mg/Nm<sup>3</sup> einhalten, so muss man sich heute schon Gedanken machen, mit welchen technischen Verfahren die vorgeschriebene NO<sub>x</sub>-Reduzierung zu realisieren sei.

## Technologische Möglichkeiten zur NO<sub>x</sub>-Reduktion

Zur Reduktion der NO<sub>x</sub>-Emission kann direkt in den Verbrennungsvorgang mit sogenannten Primärmassnahmen eingegriffen werden, wie

- kontrollierte Feuerung mit tieferer Verbrennungstemperatur,
- Verbrennung mit geringerem Luftüberschuss,
- Rauchgas-Rückführung,
- Verbrennung durch gestufte Zugabe der Luft oder des Brenngutes.

Diese Massnahmen führen zu einer Absenkung der NO<sub>x</sub>-Werte, sind aber wegen der wechselnden Bedingungen, die in einer KVA-Feuerung herrschen, nicht ohne weiteres zu realisieren und führen nicht zum angestrebten Emissionswert von 80 mg/Nm<sup>3</sup>. Das Reduktionspotential beträgt etwa 10 bis 20% beim heutigen Stand der Technik. Nähere Angaben zum Entwicklungsstand der verschiedenen Primärmassnahmen können der Fachliteratur entnommen werden.

Die heute erfolgreichen Massnahmen sind die sog. Sekundärmassnahmen und beziehen sich auf eine zusätzliche Behandlung des Rauchgases, aus dem das NO<sub>x</sub> abgetrennt oder in harmlose Stoffe umgewandelt werden kann. Die technologischen Möglichkeiten zur NO<sub>x</sub>-Emissionsminderung umfassen folgende Verfahren:

- SNCR-Verfahren: die selektive nicht-katalytische Reduktion (engl. Selective Non-Catalytic Reduction) ist eine thermische Reduktion von NO (Stickoxid) mit NH<sub>3</sub> (Ammoniak), NH<sub>3</sub>-Wasserlösung (Salmiakgeist) oder CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> (Harnstoff) bei 800–900 °C, nach dem Exxon-Verfahren [5].
- SCR-Verfahren, die selektive katalytische Reduktion (engl. Selective Catalytic Reduction) von NO mit NH<sub>3</sub> oder Harnstoff bei 260 bis 350 °C.
- Nassverfahren: Oxidation des NO mit Peroxiden, Ozon usw. zu in Wasser gut löslichem NO<sub>2</sub> und anschliessende Absorption in geeigneten Waschlösungen. In der Lösung dann Reduktion zu N<sub>2</sub> nach Lit. oder Oxidation zu Nitrat [8].
- Oxidation des NO in Gegenwart von H<sub>2</sub>O und NH<sub>3</sub> durch Elektronenstrahlen mit trockener Abscheidung von Ammoniumnitrat, nach den Elektronenstrahl-Verfahren.

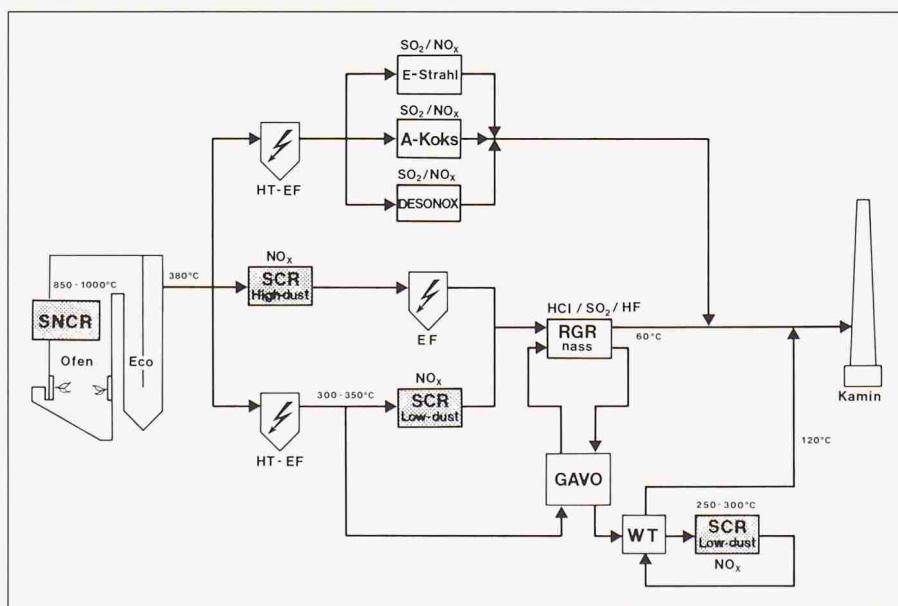


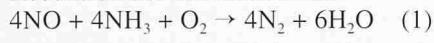
Bild 1. Technologische Möglichkeiten zur NO<sub>x</sub>-Reduzierung aus KVA-Abgasen: SNCR Selektive nicht-katalytische Reduktion, SCR Selektive katalytische Reduktion, Eco Economiser, HT-EF Hochtemperatur-Elektrofilter, EF Elektrofilter, GAVO Gasvorwärmer, RGR Rauchgas-Reinigungsanlage

Diese Massnahmen wandeln das Stickstoffmonoxid im Rauchgas durch Reduktion zu elementarem Stickstoff oder durch Oxidation zu einer Nitrit-Nitrat-Verbindung um. Teilweise ist eine gleichzeitige Entschwefelung möglich. Die Anordnung dieser Verfahren in einem Verbrennungsprozess ist in Bild 1 dargestellt und unterscheidet sich besonders im benötigten Temperaturniveau. Der Entwicklungsstand der Verfahren ist sehr unterschiedlich. Grosstechnisch haben sich auf breiter Front nur das SCR- und das SNCR-Verfahren durchgesetzt. Sie bieten den Vorteil der  $\text{NO}_x$ -Reduktion in der Gasphase sowie kein Anfall von Nebenprodukten, die separat noch zu entsorgen sind.

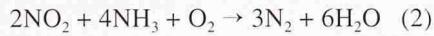
### Das SNCR-Verfahren

Bei diesem thermischen Entstickungsverfahren wird das Reduktionsmittel (Ammoniak, Ammoniak-Wasserlösung oder Harnstoff) direkt in den Nachbrennraum des Verbrennungsofens eingedüst, Bild 2. Die Eindüsung erfolgt auf mehreren Ebenen des Verbrennungsraumes in einem Rauchgas-Temperaturbereich von 850–1000 °C. Dabei treten folgende Reaktionen auf:

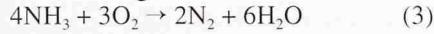
Reduktion des Stickstoffoxids:



Reduktion des Stickstoffdioxids:



Verbrennung des Ammoniaks:



Bildung von Stickoxid:



Die chemischen Reaktionen gemäss Gl. (1) und (2) sind der gewünschte Vorgang. Die Umsetzungen nach Gl. (3) und (4) sind unerwünschte Nebenreaktionen, die bei Temperaturen über 1000 °C zunehmen. Liegt die Temperatur an der Eindüsstelle zu tief, so läuft die Reaktion zu langsam ab, so dass mit einem etwa dreifachen stöchiometrischen  $\text{NH}_3$ -Überschuss gefahren wird. Außerdem beeinflussen Calciumoxide, Sulfate und Silikate im Flugstaub den Reduktionsmittelverbrauch durch Dekomposition.

Das nicht reagierte, im Rauchgas verbleibende Ammoniak verteilt sich auf dem weiteren Rauchgas-Strömungsweg auf die an der KVA anfallenden Stoffströme. Der grösste Teil an Ammoniak gelangt in das Abwasser des Nasswäschers; kleinere Teile in den Elektrofilterstaub, in die Schlacke und in den Kamin (5 ppm Grenzwert). Durch Strippen des Abwassers aus dem Nasswässcher kann, wie nach Variante A in Bild 2 schematisch dargestellt, das Ammoniak zurückgewonnen und erneut dem Ver-

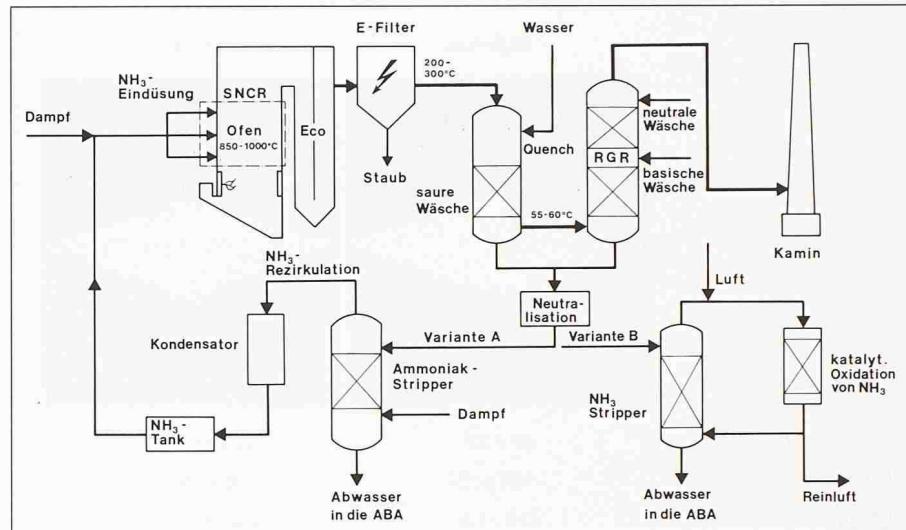


Bild 2. Schema zum SNCR-Verfahren mit Variante A: Ammoniak-Rezirkulation und Variante B: Ammoniak-Entsorgung durch Strippen und katalytische Oxidation

brennungsprozess zugeführt werden. Zum Einsatz kommt eine zweistufige Stripperkolonne. Im Abtriebsteil wird das Abwasser im Gegenstrom mit Dampf beaufschlagt, um das  $\text{NH}_3$  auszutreiben. Im Verstärkungsteil findet eine Aufkonzentrierung von  $\text{NH}_3$  statt. Das anfallende  $\text{NH}_3$ -haltige Kondensat wird in einem Lagertank gespeichert. Für kleine Rauchgasmengen oder wenn sich die Rückgewinnung nicht lohnt, kann  $\text{NH}_3$  oxidativ reduziert werden. Die Entsorgung kann dann nach Variante B erfolgen. Die Kombination von Strippanlage

mit Oxidationsreaktor beseitigt den Ammoniak durch katalytische Oxidation mit Luftsauerstoff zu Stickstoff und Wasserdampf. Diese Behandlung ist notwendig, weil Ammoniak ein Fischgift ist und kantonale Anforderungen an Einleitbedingungen in Gewässer erfüllt werden müssen.

Mit dem SNCR-Verfahren können Entstickungsgrade von 70–80% erreicht und damit der vorgesehene LRV-Grenzwert von 80 mg  $\text{NO}_x/\text{Nm}^3$  knapp eingehalten werden. Als Vorteile gelten die

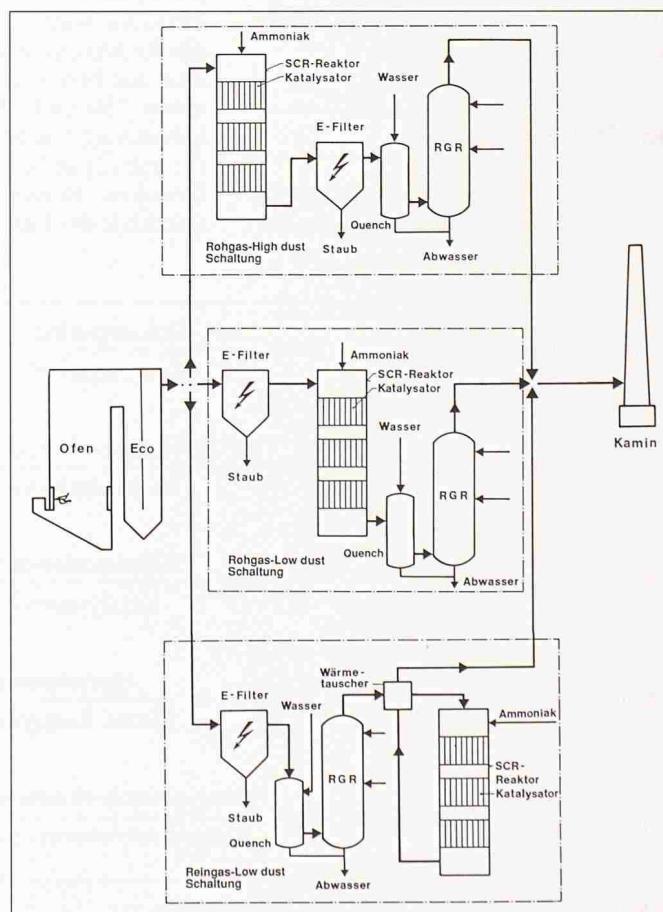


Bild 3. Übersicht der Schaltungsvarianten zum SCR-Verfahren in Kehrichtverbrennungsanlagen

Katalysator-Typ	High-dust	Low-dust
Zellenteilung	--	20 x 20
Querschnitt	mm	150 x 150
Länge	m	0.6 - 1.3
Pitch	mm	7.4 - 7.0
Oberfläche	$\text{m}^2/\text{m}^3$	430 - 470
Temperatur	°C	320 - 400
Standzeit	Jahre	4 - 6
		35 x 35
		150 x 150
		0.6 - 1.3
		4.2
		750
		250 - 350
		8 - 12

Bild 4. SCR-Katalysatoren aus Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ) mit den aktiven Metalloxiden Vanadiumpentoxid ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) und Wolframtrioxid ( $\text{WO}_3$ ): Vergleich der technischen Daten

gute Eignung als Nachrüstungsverfahren und die niedrigeren Investitionskosten. Als Nachteile der SNCR-Technik gelten der enge Temperaturbereich, der höhere Ammoniakverbrauch und das zum SCR-Verfahren geringere Reduktionspotential. Mit diesem Verfahren wurden einige bestehende Betriebsanlagen in Deutschland erfolgreich nachgerüstet.

### Das SCR-Verfahren

Bei den SCR-Verfahren erfolgt die Reduktion von  $\text{NO}_x$  mittels  $\text{NH}_3$  oder Am-

moniak-Wasser katalytisch im Rauchgas bei tieferen Temperaturen. Die  $\text{DeNO}_x$ -Katalysatoren bilden die Schlüsselkomponente des Verfahrens. Der SCR-Reaktor ist ein vertikal durchströmter Kanalreaktor mit mehreren, aus wabenförmigen Elementen aufgebauten Katalysatorebenen, Bild 3. Dem Rauchgasstrom wird vor den Katalysatoren das Reduktionsmittel Ammoniak eingeästzt, um bereits bei Temperaturen zwischen 250 und 350 °C die chemische Umsetzung von Stickoxid nach den Gl. (1) und (2) zu Stickstoff und Wasser zu bewirken. Beides sind natürliche Bestandteile der Luft.

Die SCR-Verfahren haben sich bis heute vor allem bei der katalytischen Entstinkung von Rauchgasen aus Kraftwerksfeuerungen in Japan und der BRD durchgesetzt. Je nach Lage – vor oder nach dem Elektrofilter – der Entstinkungsanlage wird von einer High-dust-respektive Low-dust-Anordnung gesprochen. Zusätzlich wird auch unterschieden, ob das Rauchgas von den sauren Komponenten  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{SO}_2$  usw. gereinigt worden ist oder nicht. Im Falle eines nicht gereinigten Rauchgases spricht man von einer Rohgas- $\text{DeNO}_x$ , nach der Reinigung lautet die Bezeichnung auf Reingas- $\text{DeNO}_x$ . Dieser konzeptionelle Sachverhalt ist in Bild 3 schematisch dargestellt.

Erfolgt die SCR-Installation hinter einer Rauchgasreinigungsanlage (RGR), so muss das abgekühlte Rauchgas auf ein für den Katalysator geeignetes Temperaturniveau gebracht werden. Mit diesem Aufheizsystem verbunden sind höhere Betriebskosten, weshalb diese Variante nur bei einer Nachrüstung angewandt wird oder es andere verfahrenstechnische Gründe verlangen. Hingegen ist der Aktivitätsabfall der SCR-Katalysatoren bei der Reingasschaltung gering und der  $\text{NO}_x$ -Umsetzungsgrad maximal. Ein wesentlicher Grund dafür ist der richtige Staubanteil der Rauchgase hinter der RGR, was die Standzeit der Katalysatoren (heute 5–8 Jahre) wesentlich verlängert.

Die eingesetzten Katalysatoren unterscheiden sich sowohl in ihrer chemischen Zusammensetzung als auch in ihrer geometrischen Form. Durch das Zusammenspiel von Verfahrens- und Katalysatortechnik kann man die Parameter des Systems (Strömungsgeschwindigkeit, Temperatur, chemische Zusammensetzung und Katalysatorgeometrie) so variieren, dass für jeden Anwendungsfall die optimale Anlage konzipiert werden kann. Als etabliert gelten heute Vanadiumpentoxid/Titandioxid-Systeme nach japanischen Patenten aus den frühen 70er Jahren, welche in Wabenform mit mehr oder weniger grossen Kanalöffnungen extrudiert werden. Der Katalysator (Bild 4) mit seinen parallelen Kanälen besteht hauptsächlich aus oberflächenaktivem Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ) als Trägermaterial, in dem die aktiven Metalloxide Vanadiumpentoxid ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) und Wolframtrioxid ( $\text{WO}_3$ ) homogen verteilt sind. Es gibt auch Hersteller, die inaktive Keramikwaben, wie sie bei Autokatalysatoren üblich sind, mit Vanadiumpentoxid-Beschichtungen versehen oder solche, die das Prinzip der Vollkörperextrusion beibehalten, aber andere Katalysatorrezepturen wie Eisenoxid oder Zeolithen verwenden.

Molverhältnis	$x = \frac{\text{NH}_3\text{-Konzentration}}{\text{NO}_x\text{-Konzentration}}$
$\text{NO}_x$ -Umsatz	$X = \frac{(\text{NO}_x\text{-Eintritt} - \text{NO}_x\text{-Austritt}) \times 100\%}{\text{NO}_x\text{-Eintrittskonzentration}}$
Raumgeschwindigkeit	$\text{SV-Wert} = \frac{\text{Gasvolumenstrom in } \text{Nm}^3/\text{h}}{\text{Katalysatorvolumen in } \text{m}^3}$
Katalysatorbelastung	$\text{AV-Wert} = \frac{\text{Gasvolumenstrom in } \text{Nm}^3/\text{h}}{\text{Geom. Katalysatoroberfläche in } \text{m}^2}$
spez. Katalysatoroberfläche	$a = \frac{\text{Katalysatoroberfläche in } \text{m}^2}{\text{Katalysatorvolumen in } \text{m}^3}$

Tabelle 1. Kenngrössen in der Katalysatortechnik

Angesichts der NH<sub>3</sub>-Durchbruchs-Gefahr am Ausgang des SCR-Reaktors wird Ammoniak in der Regel unterstöchiometrisch dosiert. Vor dem Reaktor stellt sich die schwierige Mischaufgabe, eine sehr kleine NH<sub>3</sub>-Menge in einen grossen Rauchgasvolumenstrom gleichmässig zu verteilen. Neben der homogenen Konzentrationsverteilung von Ammoniak und Stickoxiden vor dem Eintritt in den Katalysator ist auch ein gleichmässiges Temperaturprofil von Bedeutung.

Der statische Gasmischer von Sulzer ist ein bewährter Apparat, der für den Einsatz in DeNO<sub>x</sub>-Anlagen weiterentwickelt und mit einem speziellen Dosiersystem ergänzt wurde. Damit erzielt man ein homogenes Konzentrations- und Temperaturprofil über dem Reaktorquerschnitt. Solche sogenannte DeNO<sub>x</sub>-Mischer sind bereits mit Erfolg im Einsatz für thermische Kraftwerke, Heizkraftwerke und Kehrichtverbrennungsanlagen.

Die SCR-Technik hinter Kehrichtverbrennungsanlagen wurde in Europa kommerziell erstmals in der MVA Wien-Spittelau zum Einsatz gebracht [9]. Die MVA München-Süd und MVA Stuttgart sowie die beiden Kehrichtverbrennungsanlagen der Stadt Zürich haben sich ebenfalls für eine Entstickung mittels SCR entschieden und stehen gegenwärtig in unterschiedlichem Stand der Realisierung.

#### **DeNO<sub>x</sub>-Pilotversuche an KVA-Rauchgasen**

Um Betriebserfahrungen zur Entstickung von Rauchgasen zu gewinnen, hat Sulzer-Chemtech eine DeNO<sub>x</sub>-Pilotversuchsanlage für unterschiedlichste Fabrikate von SCR-Katalysatoren an der KVA Zürich Josefstrasse nach der Sprühabsorption und dem Elektrofilter in sogenannter Reingas-Schaltung installiert und im Teilstrom während über 3000 Stunden betrieben. Zusätzliche Erfahrungen zur Entstickung von Rauchgas in der Rohgas-Schaltung sind mit der mobilen Pilotanlage an der KVA Mittelthurgau in Müllheim gemacht worden. Bild 5 zeigt eine Ansicht des DeNO<sub>x</sub>-Reaktor-Containers an der KVA Müllheim.

Die Pilotanlage wurde für 4000 Nm<sup>3</sup>/h und maximal 400 °C Reaktionstemperatur ausgelegt und besteht im wesentlichen aus den Reaktoren mit SCR-Katalysatoren, der Ammoniakdosierung und den erforderlichen Mess- und Regelungseinrichtungen. In Bild 6 ist das Rohrleitungs- und Instrumentierungsschema dargestellt. Das Rauchgas wird im Nebenstrom der Rauchgasleitung

Bild 5. Ansicht der DeNO<sub>x</sub>-Pilotversuchsanlage an der KVA Müllheim zur Entstickung von Rohgas mit mehr als 120 mg Staub/Nm<sup>3</sup>



entnommen und im Wärmetauscher aufgeheizt. Ein statischer Mischer besorgt bei geringem Druckverlust und kurzer Weglänge die homogene Verteilung des zudosierten Ammoniaks im Rauchgasstrom. Ein Verteiler trennt den Rauchgasstrom in drei Teilströme für die drei parallel angeordneten Reaktoren (im Schema ist nur ein Reaktor dargestellt). Jeder Reaktor besteht aus einer regelbaren Heizung und vier parallelen Katalysatorkanälen mit vorgeschaltetem statischem Mischer. Damit kann jeder Reaktor mit der gewünschten Temperatur und verschiedenen Katalysator-Typen gefahren werden. Im vertikal durchströmten Festbettreaktor sind die Katalysatoren in drei übereinanderliegenden Stufen untergebracht. Nach der Passage durch die Teststrecken werden die Rauchgasströme wieder zusammengeführt und passieren den Wärmetauscher, wo sich das entstickte Rauchgas im Kreuzstrom mit dem nicht entstickten Rauchgas abkühlt. Der Saugzugventilator überwindet den in der Anlage entstehenden Druckverlust und führt das Rauchgas dem Kamin der Kehrichtverbrennungsanlage zu.

Aufgrund der Problemstellung zum Einsatz von SCR-Verfahren in KVA ergab sich die Erfordernis eines Untersuchungsprogrammes, aus dessen Ergebnis

nissen Beurteilungskriterien für die Auslegung und den Betrieb von Grossanlagen abzuleiten sind. Die Schwerpunkte des Programmes betrafen neben der Ermittlung der erreichbaren NO<sub>x</sub>-Reduktion die Untersuchung von Katalysatoren verschiedener Hersteller und Typen bezüglich Aktivität, Erosion und Verschmutzung. Im Vordergrund stand dabei die Evaluation handelsüblicher Katalysatoren, die unter den gegebenen KVA-Rauchgasverhältnissen ein Maximum an Gasdurchsatz und Lebensdauer bei möglichst geringem Druckverlust aufweisen. Weitere Auswahlkriterien sind Austauschbarkeit, Verfügbarkeit und Preis.

Die Aktivität der DeNO<sub>x</sub>-Katalysatoren wird durch die chemische Zusammensetzung, die Strömungsgeschwindigkeit und die Betriebstemperatur des Rauchgases beeinflusst.

In Bild 7 ist aus Messungen an der KVA Zürich Josefstrasse der NO<sub>x</sub>-Umsatz dargestellt, der in den mit verschiedenen Katalysatoren bestückten Reaktoren gemessen wurde. Die Messresultate zeigen, dass unter Reingasbedingungen und Rauchgasgehalten von 250–350 ppm NO<sub>x</sub> (400–500 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup>) mit guten Katalysatoren Entstickungsgrade von 90% und mehr, bei Raumgeschwin-

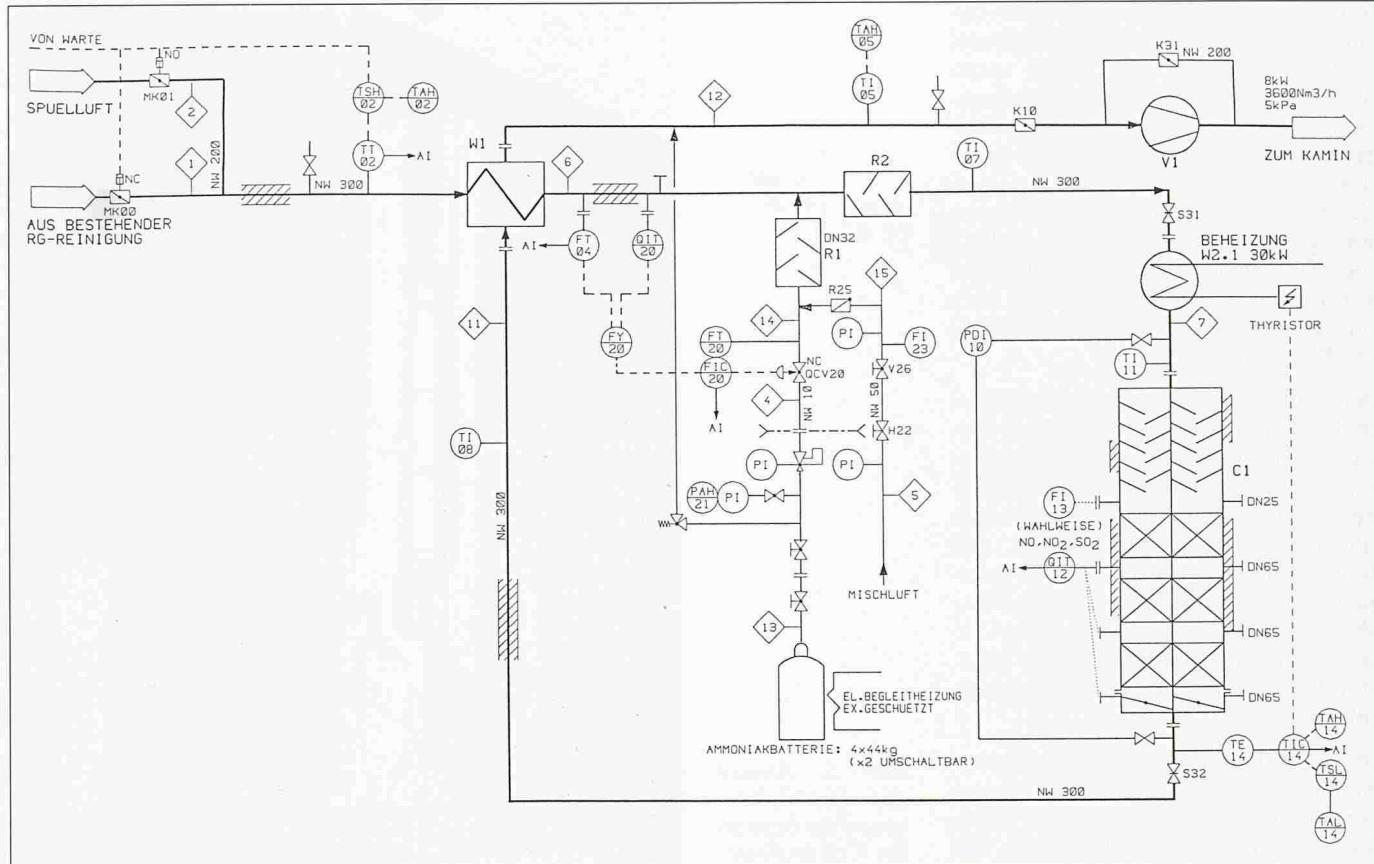


Bild 6. Verfahrensfließbild der DeNO<sub>x</sub>-Pilotversuchsanlage mit Mess-, Steuer- und Regelungstechnik

digkeiten von 8000 h<sup>-1</sup> und mehr sowie bei NH<sub>3</sub>-Ausgangskonzentrationen von 5 ppm (oder 3,8 mg/Nm<sup>3</sup>) und weniger erreicht werden können. In einem sogenannten Runplot (Bild 8) sind die periodisch gemessenen Entstickungsgrade eines SCR-Katalysators im Laufe der Betriebszeit bei unterschiedlichen Raumgeschwindigkeiten und NO<sub>x</sub>-Eingangskonzentrationen aufgetragen. Bei zeitweise hohen Raumgeschwindigkeiten (SV-Wert) von über 10 000 1/h werden 90% Umsatz erreicht.

Die Messungen an der KVA Müllheim unter extremen Rohgasbedingungen mit einer Staubbelastung >120 mg/Nm<sup>3</sup> ergeben tiefere NO<sub>x</sub>-Umsatzwerte: Sie liegen im Bereich von 80%, Bild 9. Grund für diese tiefere Aktivität des Katalysators ist die durch den hohen Anteil von Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>: 350–450 mg/Nm<sup>3</sup>), Salzsäure (HCl: 800–900 mg/Nm<sup>3</sup>) und Wasser H<sub>2</sub>O: 7–10 Vol%) im Rauchgas begünstigte Ablagerung von Staub.

Reaktionstemperaturen von weniger als 250 °C sind betriebstechnisch interessant – DeNO<sub>x</sub>-Katalysatoren neuerer Entwicklung [10] gestatten Umsätze von 90% bei 120 °C –, doch bilden sich unterhalb dieser Temperatur bei der Rohgas-Anordnung bereits signifikante Mengen von Ammoniumhydrogensulfat (NH<sub>4</sub>)HSO<sub>4</sub>, Ammoniumsulfat (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sowie Ammoniumchlorid

NH<sub>4</sub>Cl, welche die Porenstruktur des Katalysators abdecken und somit die Aktivität reduzieren. Die Ablagerung von Ammoniumsalzen bei geringer SO<sub>2</sub>-Konzentration (<40 mg/Nm<sup>3</sup>) erfolgt so langsam, dass mit ausreichend hohen Katalysator-Standzeiten gerechnet werden kann. Niedergeschlagene Ammoniumsalze können durch Ausheizen des Katalysators bei etwa 380 °C wieder verdampft werden.

Staubablagerungen im SCR-Reaktor werden im wesentlichen von der Anströmung, der Strömungsgeschwindigkeit, der Korngrößen-Verteilung des Staubes sowie der Menge des Flugstaub beeinflusst. Durch eine gerichtete Anströmung der Katalysatoren kann die Ablagerung von Flugstaub selbst bei hoher Konzentration vermieden werden. Staubablagerungen treten vornehmlich in strömungstoten Zonen auf. Der Beginn der Ablagerungen auf den Katalysatoren tritt, ausgelöst durch abplatzende Staubanhäufungen von den Reaktorinnenwänden, bevorzugt in den Randbereichen der Katalysatoren auf. Aufgrund der Staubprobleme an den Katalysatoren ist der Einsatz von Staubblasern oder Staubsaugern unverzichtbar.

Bei fachgerechter Katalysatordimensionierung und Anordnung werden NO<sub>x</sub>-Anteile von unter 50 mg/Nm<sup>3</sup> erreicht. Der Restanteil an NO<sub>x</sub> im Rauchgas von weniger als den geforderten 80 mg/Nm<sup>3</sup>

kann somit garantiert werden. Zu rechnen ist mit 1 m<sup>3</sup> Katalysatorvolumen pro 6000–8000 Nm<sup>3</sup> Rauchgas pro Stunde.

Die DeNO<sub>x</sub>-Versuche boten Gelegenheit, die von Sulzer-Chemtech entwickelten DeNO<sub>x</sub>-Katalysatoren mit Kreuzkanalstruktur zu testen (Bild 10). Ziel der Entwicklung ist die Verbesserung des Stoffaustausches und die Reduzierung des Ammoniakdurchbruches.

Die Metallstruktur ist mit einer katalytisch aktiven, porösen keramischen Beschichtung versehen. Diese Katalysatoren haben einen quadratischen Querschnitt von 150×150 mm und sind 220 mm hoch. Beim Druchströmen der Kreuzkanalstruktur bewirkt der sich ergebende Mischeffekt einen radialen Ausgleich von Temperatur, Konzentration und Geschwindigkeit über dem Reaktorquerschnitt. Turbulenzen in den sich kreuzenden Katalysatorkanälen bringen die Reaktanden an die katalytisch wirksame Oberfläche. Dies bewirkt eine bessere Katalysatornutzung durch verstärkten Stoffaustausch bei einem kleinen Druckverlust. Konkret bedeutet dies eine Verkleinerung des Reaktorvolumens im Vergleich zu den Parallelkanalstrukturen (Bild 4) bei gleichem Reduktionsgrad. Im Grossversuch konnten Laborergebnisse bestätigt werden. Die Kompaktbauweise, das einfache Handling gehören wie die Unempfindlichkeit gegen Vibratoren zu den weite-

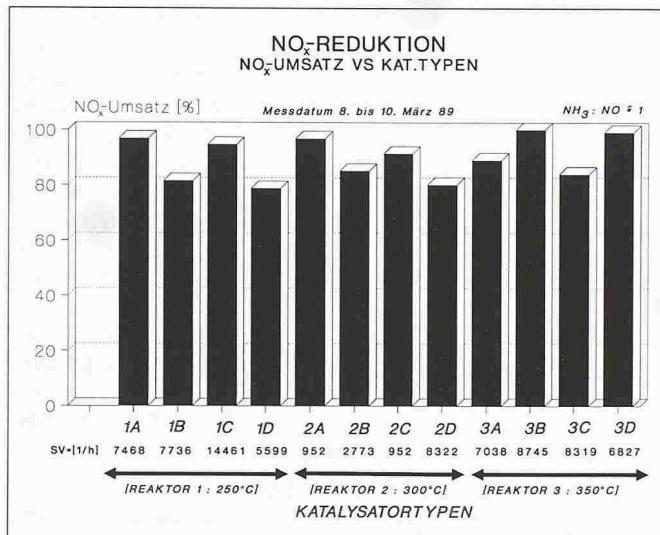


Bild 7. Entstickung von Rauchgas der KVA

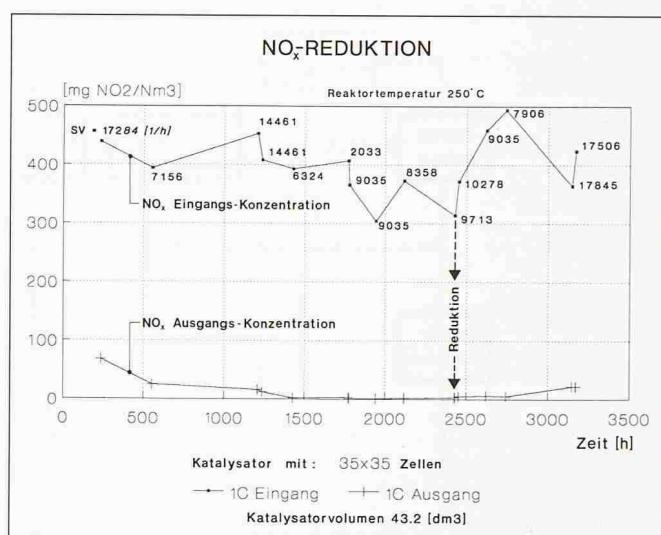
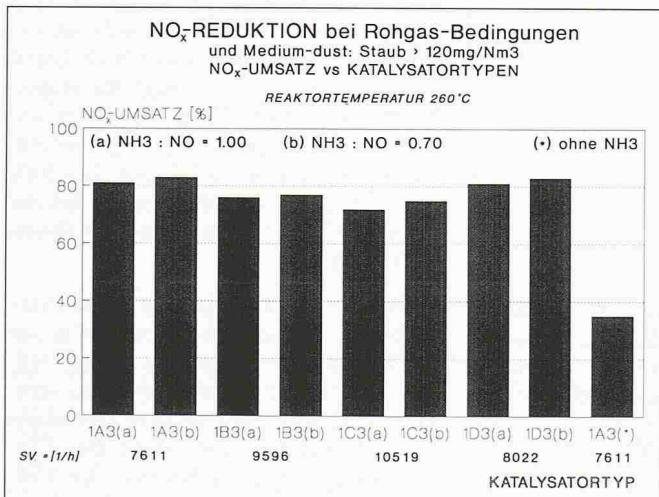


Bild 8. Runplot der Rauchgas-Entstickungsmessungen an der KVA Zürich-Josefstrasse mit einem SCR-Katalysator über eine Versuchsdauer von etwa 3000 Stunden

Bild 9. Entstickung von Rauchgas aus der KVA Müllheim unter Rohgas-Bedingungen: NO<sub>x</sub>-Umsatz von verschiedenen Katalysatortypen, ermittelt aus Halbstundenmittelwerten

ren Merkmale von Katapak-Katalysatoren.

### NH<sub>3</sub> - Lagerung und Sicherheit

Richtlinien für den sicheren Umgang mit Ammoniak sind für den Betrieb von Kühlhäusern und Kunsteisbahnen bekannt. Eine Neuorientierung für DeNO<sub>x</sub>-Anlagen ist daher nicht notwendig. Ammoniak wird der Giftklasse 2 zugeordnet, also ein Stoff mittlerer Giftigkeit. Der MAK-Wert beträgt 50 ppm bzw. 35 mg/Nm<sup>3</sup> Luft und der Geruchsschweltenwert liegt bei 5 ppm bzw. 3,5 mg/Nm<sup>3</sup> und ist daher leicht zu identifizieren. Ein besonderes Materialproblem bei Behältern zur Lagerung von flüssigem Ammoniak betrifft die Spannungsrisskorrosion. Niedrige Lagertemperaturen und geringe Temperaturschwankungen des gelagerten Ammoniaks verringern diese Gefahr.

Die unterschiedlichen Siedetemperaturen zeigen (Tabelle 2), dass sich eine

25%ige Ammoniaklösung bei Umgebungsdruck flüssig lagern lässt. Ein Überdruck im Tank, wie er bei reinem Ammoniak entsteht, entfällt. Hingegen besteht ein markanter Unterschied im Energiebedarf für die vollständige Verdampfung in die Gasphase. Für die Ammoniaklösung muss mit dem 7fachen Energieaufwand gerechnet werden. Nach [11] ist ein negativer Einfluss auf Funktion und Lebensdauer der Katalysatoren durch Wasserdampf nicht zu erwarten. Ein Grundfließbild der Ammoniaklagerung ist in Bild 11 dargestellt.

Im wesentlichen besteht ein Ammoniaklager aus einer Entladestation, einem oder mehreren Ammoniaktanks, einer Kompressorstation und einem Abwassersammelbehälter. Die Wahl des geeigneten Reduktionsmittels richtet sich stark nach den örtlichen Gegebenheiten und den verfahrenstechnischen Gesichtspunkten.

### Einige spezielle Aspekte

Die chemischen Vorgänge bei der Bildung von NO<sub>x</sub> und bei der Reduktion

Eigenschaft von		Ammoniak	Ammoniaklösung 25%
Siedetemperatur	°C	-33,3	+37,7
Dampfdruck (20° C)	bar	8,57	0,483
Dichte (Normzustand)	kg/m <sup>3</sup>	0,771	907,1
Energiebedarf für die			
vollständige Verdampfung	kJ/kg	1370	2510

Tabelle 2. Technische Eigenschaften von Ammoniak als Reduktionsmittel

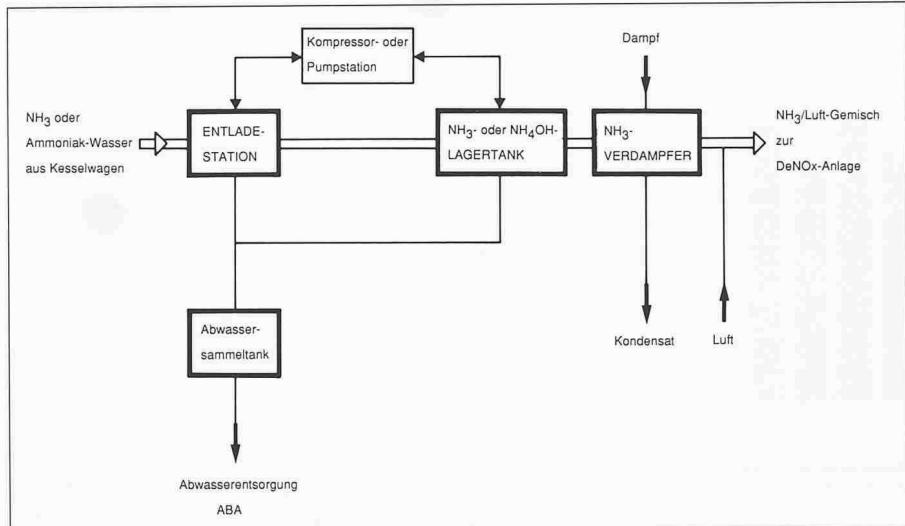


Bild 11. Grundfließbild der Ammoniak-Lagerung

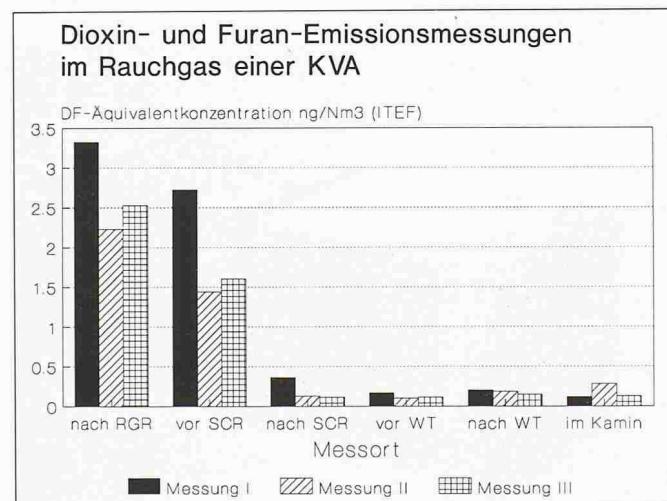
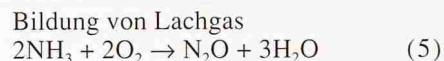


Bild 12. Reduktion der Dioxin- und Furanverbindungen nach dem SCR-Katalysator in einer KVA

von NO<sub>x</sub> zu N<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O sind sehr komplex, und der Einfachheit halber beschäftigt man sich nicht mit Nebenreaktionen. Es ist aber hinreichend bekannt [12], dass bei der Verbrennung auch Lachgas N<sub>2</sub>O, ein Treibhaus- und Ozondestruktionsgas, gebildet wird. Je nach Brennmaterial und Verbrennungsart werden 5–25% N<sub>2</sub>O von 100% NO<sub>2</sub> gebildet, besonders ausgeprägt bei Anwesenheit von NH<sub>3</sub> im Überschuss. Zusätzlich ist heute nicht geklärt, wieviel bei höheren Temperaturen, d.h. über 750° C, die vor allem für die selektive nichtkatalytische Reduktion (SNCR) unerwünschte Reaktion



zur N<sub>2</sub>O-Bildung beiträgt [13]. Bei den SCR-Verfahren wird wegen der tieferen Temperaturen bei den meisten Katalysatoren kein N<sub>2</sub>O nachgewiesen, jedoch aber bei den Drei-Weg-Katalysatoren von Kraftfahrzeugen! Dem N<sub>2</sub>O-Anteil wird in Verbrennungs- und Rauchgas-Reinigungsanlagen keine Beachtung geschenkt, d.h. er wird gar nicht gemessen. Richtigerweise müsste dieser zum NO/NO<sub>2</sub>-Anteil dazugezählt werden, um die echte DeNO<sub>x</sub>-Effizienz eines Verfahrens zu beurteilen.

Zur Problematik der Dioxin- und Furanzverbindungen und den Techniken zur Dioxin- sowie Furanzminimierung fanden 1990 in der BRD Tagungen statt. Dessen Dokumentation [14] gibt einen guten Überblick zum Stand der Entwicklung in diesem Bereich der Umwelttechnik. Es gibt DeNO<sub>x</sub>-Katalysatoren für die SCR-Technik, die in hohem Masse eine Reduktion von Dioxin- und Furanzverbindungen bewirken. Bei entsprechender Dimensionierung des Katalysators können simultan zur Entstörung Dioxin/Furan-Äquivalent-Konzentrationen erreicht werden, die unter dem Grenzwert von 0,1 ng/Nm<sup>3</sup> (ITEF-Äquivalent) liegen [15, 16]. Dies gelingt im unteren Arbeitstemperaturbereich des SCR-Katalysators (etwa 280° C) und unter Einhaltung der gesetzlich erlaubten NH<sub>3</sub>-Durchbruchskonzentration. Dieser Sachverhalt ist in Bild 12 grafisch dargestellt.

## Literatur

- [1] Stücheli A.: Siedlungsabfallaufkommen, Kehrichtverbrennung und Luftschadstoffbelastung. Umwelttechnik 23 (1989) 5, S. 5/7
- [2] Schuster H.: VDI-Bericht (1984) Nr. 495, S. 143/151
- [3] Necker P.: Proc. NO<sub>x</sub>-Symposium, 21.–22.2.1985, Univ. Karlsruhe (TH), S. D1/D44
- [4] Kremer H., Schulz W.: VDI-Bericht (1984) Nr. 495, S. 133/144
- [5] Siddiqi A., Tenini J.: Hydrocarbon Process, Oct. (1981) S. 115/124
- [6] Ando J.: Proc. NO<sub>x</sub>-Symposium, 21.–22.2. 1985, Univ. Karlsruhe (TH), S. A7/A22
- [7] Heiting B.: Brennst.-Wärme-Kraft 36 (1984), S. 411/419
- [8] Bechthold H.: VDI-Ber. (1984) Nr. 495, S. 159/163
- [9] Hackl A.E.: Strategien und Technik für die zweite Nachrüstung der MVA Wien-Spittelau, Müllverbrennung und Umwelt 3, S. 313, EF-Verlag, Berlin 1989
- [10] Curry-Hyde H.E., Musch H. and Baiker A.: Selective catalytic reduction of nitric oxide over amorphous and crystalline chromia. Applied Catalysis, 65 (1990), 211–223. Elsevier Science Publisher B.V., Amsterdam

- [11] Fritz P., Schumacher B. und Schnieder K.: Anwendung wässriger Ammoniaklösung bei katalytischen DeNO<sub>x</sub>-Anlagen. VGB Kraftwerkstechnik 70 (1990) 2, S. 122/125
- [12] De Soete G.: Seminar 11.7.1991, Kolloquium für Technische Wissenschaften, ETH Zürich
- [13] Stringaro J.P.: Modellierung der Kinetik der selektiven katalytischen Reduktion von Stickoxid mit Ammoniak an einem oxidischen Katalysator. Diss. ETH 6900, 1981
- [14] Autorenkollektiv: Dioxin- und NO<sub>x</sub>-Minimierungstechniken, VDI-Bildungswerk-Handbuch, September 1990
- [15] Hackl A.E.: Stand und Tendenzen der Rauchgasreinigung nach der Abfallverbrennung, Müllverbrennung und Umwelt 3, Seite 265, EF-Verlag, Berlin 1989
- [16] Lange M.: Minimierung der Dioxin- und Furanzemissionen aus Abfallverbrennungsanlagen, Luftreinhaltung 1991, E35–E40

## Zusammenfassung und Ausblick

Obgleich der Vollzug der Luftreinhaltungsverordnung noch nicht abgeschlossen ist, steht bereits eine Verschärfung der Grenzwerte bevor. Kehrichtverbrennungsanlagen sind lokal starke Stickoxid-Quellen. Aus einer Anzahl verschiedener Entstickungsverfahren für Rauchgase aus Kohlekraftwerken haben sich grosstechnisch nur die «Selektive katalytische Reduktion» und fallweise

die «Selektive nicht-katalytische Reduktion» durchgesetzt. Bei Rauchgasen aus Kehrichtverbrennungsanlagen wurde das SCR-Verfahren zur NO<sub>x</sub>-Reduktion mit Erfolg getestet und kann als beherrschbare Technik bezeichnet werden. Es bietet die Vorteile der Reduktion des Stickoxids in der Gasphase sowie des Wegfalls der Entsorgung.

Es ist technisch möglich, mit dem selektiv katalytischen Verfahren 50 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> zu erreichen, was einem Reduktionsgrad von 90% gegenüber dem Wert der LRV 1986 entspricht. Damit kann

der anvisierte NO<sub>x</sub>-Grenzwert von 80 mg/Nm<sup>3</sup> unterschritten werden. Die schweizerische Emission aus allen KVA von heute mit 5000 t NO<sub>x</sub> könnte damit auf etwa 1000 t NO<sub>x</sub> pro Jahr reduziert werden. Die SCR-Technik umfasst für die Entstickung als auch für die Dioxin/Furan-Reduktion ein Leistungspotential, das den strengen gesetzlichen Anforderungen entsprechen kann. Bis Mitte der 90er Jahre kann vor allem in Ballungsgebieten eine deutliche Verminderung der NO<sub>x</sub>-Belastung erreicht werden. Diese positive Perspektive ist mög-

lich geworden durch das Zusammenwirken von Gesetzgeber und Behörden mit der Entwicklung in der Umwelt-Verfahrenstechnik.

Adressen der Verfasser: Dr. Alexander Stücheli, Leiter Prozess- und Umwelttechnik, Sulzer-Chemtech, 8401 Winterthur. Dr. Jürgen Luder, Misch- und Reaktionstechnik, Sulzer-Chemtech, 8401 Winterthur.

## Wettbewerbe

### Thurbrücke Lütisburg SG

Das Baudepartement des Kantons St. Gallen veranstaltete einen Projektwettbewerb unter acht eingeladenen Ingenieurbüros für die neue Thurbrücke bei Lütisburg als Bestandteil der Staatsstrasse N 13 Wil–Wattwil. Ergebnis:

1. Preis (20 000 Fr. mit Antrag zur Weiterbearbeitung): H.H. Sallenbach, Wildhaus

2. Preis (12 000 Fr.): Schällibaum AG, Ebnet-Kappel

3. Preis (12 000 Fr.): Grünenfelder + Keller, Wil

4. Preis (10 000 Fr.): Wepf-Wepf, Flawil

5. Preis (6000 Fr.): Steiner Jucker Blumer AG, Herisau; Mitarbeiter: Prof. E. Gehrig, Zürich; Wäger + Partner, Ing., Bütschwil

6. Preis (5000 Fr.): Frei + Krauer, Rapperswil

7. Preis (5000 Fr.): Menig AG, St. Gallen; Mitarbeiter: Brunner Kunz Meile, Ing., St. Gallen

8. Rang: Böhler + Partner AG, Wattwil

Jeder Teilnehmer erhielt eine feste Entschädigung von 30 000 Franken. Fachpreisrichter waren: D. Pfister, Kantonsingenieur, St. Gallen; H. Bleiker, Architekt, St. Gallen; N. Letta, Kant. Brückingenieur, St. Gallen; Prof. Dr. U. Oelhofen, Rapperswil; Fachexperten waren: A. Köppel, Buchs; E. Naef, Heerbrugg; B. Züblin, Abt. Brückenbau und -unterhalt, Kanton St. Gallen.

### Dorfzentrum Neuenegg BE

Die Einwohnergemeinde Neuenegg veranstaltete einen öffentlichen Ideenwettbewerb für das Dorfzentrum. Teilnahmeberechtigt waren Architekten mit Wohn- oder Geschäftssitz seit dem 1. Januar 1990 im Amtsbezirk Laupen. Es wurden sechs Projekte eingereicht und beurteilt. Ergebnis:

1. Preis (21 000 Fr.): Arbeitsgemeinschaft Markus Jenni, Neuenegg; Ueli Riesen, Neuenegg; Mitarbeiter: Max Jungo, Ruth Schär, Beat Kipfer, Sybille Linder; Spezialisten: Aarplan, Bern, Atelier für Verkehrs-

und Raumplanung; Interplan Energietechnik AG, Laupen; BeyelerIngenieure AG, Neuenegg

2. Preis (20 000 Fr.): Bisäth + Linke, Meiringen

3. Preis (9000 Fr.): AAP, Bern, Atelier für Architektur und Planung; Willy Aepli, H.P. Liechti, Albert Anderegg, Markus Ammon

4. Preis (5000 Fr.): Fuchs & Guggisberg AG, Bern; Bearbeitung: Gerhard Fuchs, Kurt Mäder, Heinz Niederhauser, Andreas Zenger

5. Preis (3000 Fr.): Jörg + Sturm, Bern

6. Preis (2000 Fr.): Gasser + Müller AG, Neuenegg

Fachpreisrichter waren K. Aellen, Bern; F. Geiser, Bern; J. Althaus, Bern; B. Dähler, Bern.

### Werkhof in Mels SG

Der Gemeinderat Mels SG veranstaltete einen öffentlichen Projektwettbewerb für einen Werkhof. Teilnahmeberechtigt waren alle Architekten, die seit mindestens dem 1. Januar 1991 ihren Wohn- oder Geschäftssitz in der Politischen Gemeinde Mels haben. Zusätzlich wurden fünf auswärtige Architekten zur Teilnahme eingeladen. Es wurden zehn Projekte beurteilt. Ein Entwurf musste wegen Verletzung von Programmbestimmungen von der Preiserteilung ausgeschlossen werden. Ergebnis:

1. Preis (11 000 Fr.): Daniel Ackermann, Mels

2. Preis (10 000 Fr.): Ernest Grob, Sargans; Mitarbeiter: K. Kaufmann

3. Preis (8000 Fr.): Herbert Saladin, Sargans

4. Preis (4000 Fr.): Architekta Sargans, J. Lutz, R. Margsthaler, R. Wohlwend Architekten

5. Preis (3000 Fr.): Richard A. Müller, Heiligkreuz

Entschädigung (6000 Fr.): Hobi & Schwarzmüller, Flums

Das Preisgericht empfahl dem Veranstalter, die Verfasser der Projekte in den ersten drei

Rängen sowie des mit einer Entschädigung ausgezeichneten Projektes zu einer Überarbeitung einzuladen. Fachpreisrichter waren R. Abrecht, Kant. Hochbauamt, St. Gallen, W. Heeb, St. Gallen, H. Oberholzer, Rapperswil, K.P. Trunz, Niederuzwil.

### Oberstufenzentrum Waldkirch-Bernhardzell SG

Die Sekundarschulgemeinde Waldkirch-Bernhardzell SG veranstaltete einen öffentlichen Projektwettbewerb. Teilnahmeberechtigt waren Architekten, die seit dem 1. Januar 1990 ihren Wohn- oder Geschäftssitz in einem der Bezirke Gossau, Untertoggenburg, St. Gallen oder Rorschach haben. Es wurden 28 Entwürfe eingereicht und beurteilt. Ein Projekt musste wegen Verletzung von Programmbestimmungen von der Preiserteilung ausgeschlossen werden. Ergebnis:

1. Preis (13 000 Fr. mit Antrag zur Weiterbearbeitung): Othmar Baumann, St. Gallen

2. Preis (11 000 Fr.): Thoma und Fischer, St. Gallen

3. Preis (9000 Fr.): Loesch Isoz Benz, St. Gallen

4. Preis (7000 Fr.): Gebr. Kürsteiner, St. Gallen

5. Preis (6000 Fr.): Kaderli und Wehrli, St. Gallen; Mitarbeiter: M. Steger, D. Kalita, M. Lipcyzk, P. Michel

6. Preis (4000 Fr.): Milan Augustin, Abtwil, Peter Buschor, Goldach

Fachpreisrichter waren Arnold Bamert, Kantonsbaumeister, St. Gallen; Herbert Oberholzer, Rapperswil; David Eggenberger, Buchs.

### Kantonales Verwaltungszentrum an der Aa, Zug

Die Baudirektion des Kantons Zug (Hochbauamt) veranstaltete einen öffentlichen Projektwettbewerb für die zweite Bauetappe des Verwaltungszentrums an der Aa in Zug. Teilnahmeberechtigt waren Architekten, die ihren Geschäfts- und/oder Wohnsitz seit mindestens dem 1. Januar 1990 im Kanton Zug haben oder hier heimatberechtigt sind. Zusätzlich wurden fünf auswärtige Büros zur Teilnahme eingeladen. Es wurden 21 Pro-