

K. J. Thomé-Kozmiensky

Michael Beckmann

Energie

aus

Abfall

K

Band 13

Karl J. Thomé-Kozmiensky  
Michael Beckmann

# Energie aus Abfall

Band 13

**K**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Michael Beckmann (Hrsg.):  
**Energie aus Abfall, Band 13**

ISBN 978-3-944310-24-4 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky  
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2016  
Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,  
Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky  
Erfassung und Layout: Sandra Peters, Ginette Teske, Janin Burbott-Seidel, Anne Kuhlo,  
Carolin Bienert  
Druck: Universal Medien GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk- sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

# Neue Entwicklungen für ein effizientes SNCR Überwachungs- und Regelungssystem unter Auswertung des NO<sub>x</sub> Massenstrom-Profiles

Bernd von der Heide

1.	Entwicklungsschritte der SNCR-Technik .....	319
1.1.	Kühlung der Abgase durch Erhöhung der Prozesswassermenge .....	324
1.2.	Kühlung der Abgase mit zusätzlicher Kühlwassereindüsung .....	325
1.3.	Selektive Kühlung der Abgase .....	326
1.4.	Adaptive Kühlung der Abgase .....	327
1.5.	Bestimmung und Einbindung des NO <sub>x</sub> Massenstrom-Profiles .....	328
2.	Prozessregelung .....	331
3.	Zusammenfassung und Ausblick .....	332
4.	Literatur .....	332

Seit einigen Jahren werden mit dem nichtkatalytischen Verfahren (SNCR) in Abfallverbrennungsanlagen verlässlich NO<sub>x</sub>-Abscheidegrade erreicht, die vorher nur mit dem wesentlich aufwändigeren SCR-Verfahren möglich waren, sodass der *Stand der Technik* für rostgefeuerte Verbrennungsanlagen unter Kosten-Nutzen-Gesichtspunkten heute durch das SNCR-Verfahren bestimmt wird.

NO<sub>x</sub>-Reingaswerte < 100 mg/Nm<sup>3</sup> können heute bei vertretbarem NH<sub>3</sub>-Schlupf sicher eingehalten werden. Trotz erheblicher Fortschritte ist der Schwachpunkt noch immer, dass der NH<sub>3</sub>-Schlupf abhängig von den Betriebsbedingungen nicht immer unter Kontrolle gehalten werden kann, was u.U. die Verwertung und Entsorgung der Flugasche erschwert.

Dieser Beitrag beschreibt Lösungsmöglichkeiten wie der NO<sub>x</sub>-Abscheidegrad, der NH<sub>3</sub>-Schlupf und der Reduktionsmittelverbrauch gesenkt bzw. der Wirkungsgrad weiter erhöht werden können.

## 1. Entwicklungsschritte der SNCR-Technik

Besonders gut für SNCR-Verfahren geeignet sind Verbrennungsanlagen, in denen der erste Zug frei von Einbauten ist und die Abgasgeschwindigkeiten so gering sind, dass die Abgase im Feuerungsraum so weit abkühlen, dass die Reaktionen zur

NO<sub>x</sub>-Abscheidung schon vor dem Eintritt in die Berührungsheizflächen abgeschlossen sind. Dies ist z.B. der Fall bei Rostfeuerungen wie in Verbrennungsanlagen für Abfall, Biomasse, Kohle, aber auch bei Wirbelschichtfeuerungen sowie kleineren Kohlekesseln wie sie z.B. in Heizkraftwerken betrieben werden.

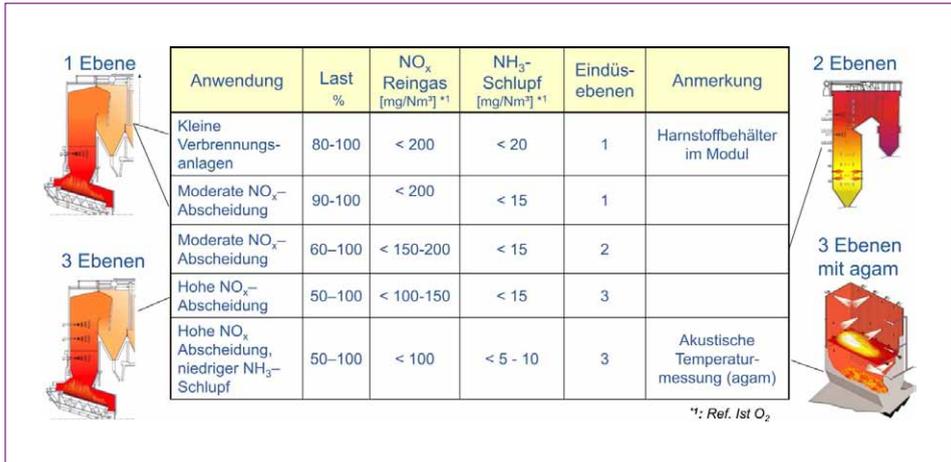


Bild 1: SNCR-Konzepte für unterschiedliche Anforderungen

Bild 1 zeigt die Funktion und die Entwicklungsschritte typischer SNCR-Anlagen für Harnstofflösung oder Ammoniakwasser als Reduktionsmittel. Anlagen, wie sie für Verbrennungsanlagen gemäß der gültigen 17. BImSchV mit NO<sub>x</sub>-Abscheidegraden bis zu 60 Prozent betrieben werden, sind je nach Anforderungen mit ein oder zwei Eindüsenebenen ausgerüstet, die gegebenenfalls abhängig von der Last- und/oder der Abgastemperatur umgeschaltet werden.

Mit diesem Konzept können NO<sub>x</sub>-Grenzwerte von 120 bis 150 mg/Nm<sup>3</sup> und einem NH<sub>3</sub>-Schlupf von < 30 mg/Nm<sup>3</sup> verlässlich eingehalten werden, wenn die Eindüsenanlagen so angeordnet sind, dass die Eindüsung innerhalb des relativ weit gefassten Temperaturfensters erfolgt. Temperaturschwankungen und -schieflagen, die an einer Stelle zu geringerer Abscheidung führen, werden hier durch höhere Abscheidegrade an einer anderen Stelle ausgeglichen.

Um größeren Temperaturschwankungen und -schieflagen, die sich während des Betriebes ergeben, entgegenzuwirken, haben sich zwei Eindüsenebenen bewährt, die abhängig von der gemittelten Kesseldeckentemperatur umgeschaltet werden. Unter günstigen Betriebsbedingungen, wie sie bei der Verbrennung homogener Brennstoffe und konstanter Kessellast vorzufinden sind, sind mit diesem Konzept auch NO<sub>x</sub>-Reingaswerte < 100 mg/Nm<sup>3</sup> möglich, wobei abhängig von Schieflagen der Abgastemperaturen und -strömungen hinsichtlich des NH<sub>3</sub>-Schlupfes und des Reduktionsmittelverbrauchs mit Einschränkungen zu rechnen ist.

Damit in allen möglichen Betriebsfällen das Reduktionsmittel immer in den optimalen Bereich des Temperaturfensters eingedüst wird, der hinsichtlich der  $\text{NO}_x$ -Abscheidung, des  $\text{NH}_3$ -Schlupfes und des Reduktionsmittelverbrauchs am wirksamsten ist, werden in modernen Anlagen die Eindüslanzen abhängig von den Abgastemperaturen an den jeweiligen Eindüsstellen geschaltet (Bild 2).

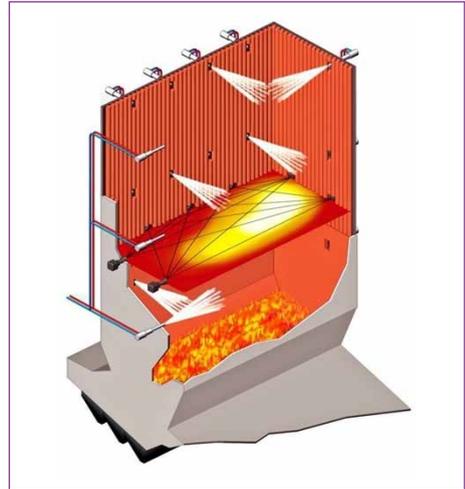


Bild 2: Temperaturabhängige Einzellanzumschaltung

Das ermittelte Temperaturprofil wird in Sektionen aufgeteilt und kann einzelnen Lanzen oder Lanzengruppen zugeordnet werden, die dann abhängig von der gemessenen Abgastemperatur umgeschaltet werden können. Hierdurch wird sichergestellt, dass das Reduktionsmittel auch bei schnell wechselnden Abgastemperaturen an die für die Reaktion wirkungsvollsten Stellen gelangt und die SNCR-Anlage bezüglich  $\text{NO}_x$ -Abscheidegrad,  $\text{NH}_3$ -Schlupf und Reduktionsmittelverbrauch immer im optimalen Bereich fährt.

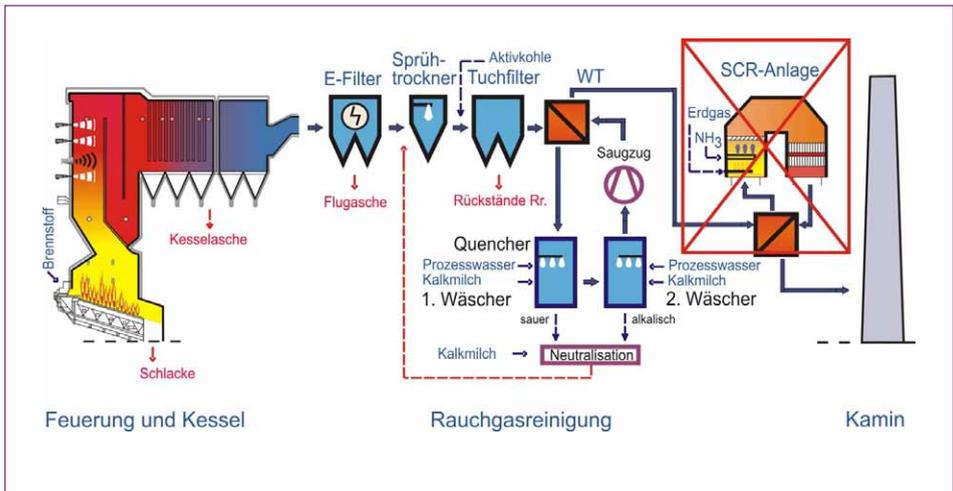


Bild 3: Verfahrensfließbild für SNCR-Anlage MVA Wijster – SCR wird durch SNCR ersetzt

Die im Dauerbetrieb erzielten Messergebnisse an mehreren Verbrennungsanlagen belegen, dass  $\text{NO}_x$ -Reingaswerte  $< 100 \text{ mg/Nm}^3$  bei einem  $\text{NH}_3$ -Schlupf  $< 10 \text{ mg/Nm}^3$  dauerhaft einzuhalten sind und sogar Werte, die deutlich darunter liegen, erreicht werden.

In den Niederlanden z. B. wurden in der Abfallverbrennungsanlage Wijster die drei Reaktoren der SCR-Anlage außer Betrieb genommen und durch SNCR-Anlagen ersetzt. Wegen der hohen Anforderungen –  $\text{NO}_x$ -Abscheidung von etwa  $330 - 350 \text{ mg/Nm}^3$  auf  $< 60 \text{ mg/Nm}^3$  und  $\text{NH}_3$ -Schlupf  $< 10 \text{ mg/Nm}^3$  – sind drei Eindüsebenen mit jeweils 6 Lanzen installiert worden. Hierbei wird jede einzelne Lanze abhängig von der jeweiligen Zonentemperatur so angesteuert, dass das Ammoniakwasser immer in den optimalen Temperaturbereich in der Feuerung eingedüst werden kann (Bild 3).

In Bild 4 sind die  $\text{NO}_x$ -Tagesmittelwerte der ersten Anlage aufgezeichnet. Es ist deutlich zu sehen, dass die Emissionsanforderungen immer eingehalten werden. In den ersten sechs Monaten ist mit dem SNCR-Verfahren ein  $\text{NO}_x$ -Jahresmittelwert von  $< 50 \text{ mg/Nm}^3$  tr. bezogen auf 11 Prozent  $\text{O}_2$  erreicht worden. Das ist vergleichbar mit der SCR-Anlage, deren  $\text{NO}_x$ -Jahresmittelwert bei  $45 \text{ mg/m}^3$  lag.

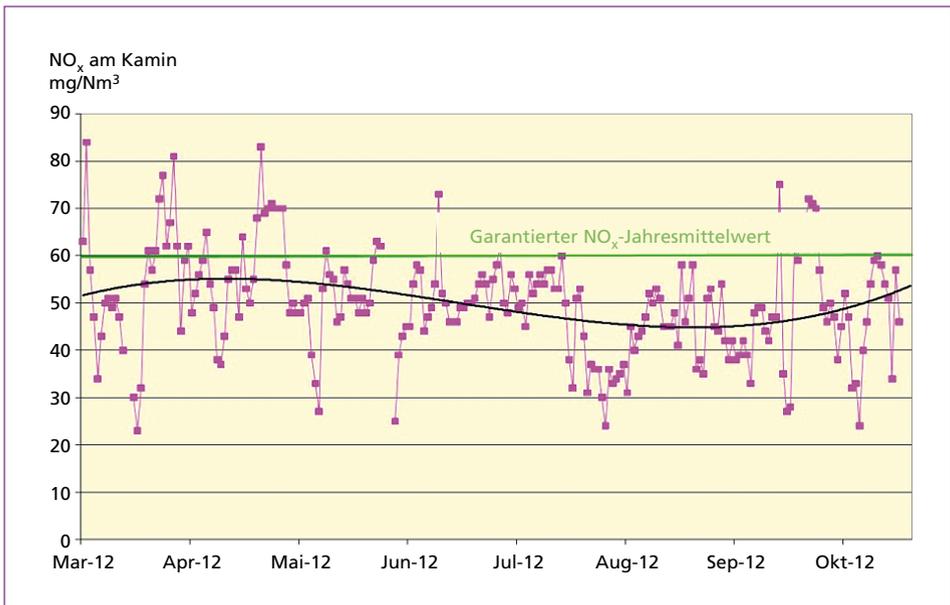


Bild 4: Langzeitergebnisse der MVA Wijster – Tagesmittelwerte

Nach dem Umbau der anderen beiden Linien werden auch hier die garantierten  $\text{NO}_x$ -Reingaswerte sicher erreicht. Bemerkenswert ist, dass der  $\text{NH}_3$ -Schlupf deutlich unter den Erwartungen liegt. Daher halten sich auch nach der Inbetriebnahme der beiden anderen Verbrennungslinien die  $\text{NH}_3$ -Werte im Nebenprodukt aus der Abgasreinigung in vertretbaren Grenzen, sodass die vorgesehene Nachrüstung einer Anlage zum Strippen des Ammoniakwassers aus dem Abwasser nicht erforderlich war. Um den Verbrauch von Ammoniakwasser einzuschränken wurde der  $\text{NO}_x$ -Sollwert nach der Inbetriebnahme für alle drei Anlagen auf  $60 \text{ mg/Nm}^3$  erhöht.

Die SCR-Anlage in Wijster war nach einer nassen Abgasreinigungsanlage installiert. Der Druckverlust über die Wärmetauscher, den Mischer, die Abgaskanäle und die Katalysatorelemente betrug etwa 25 mbar. Zur Überwindung des Druckverlustes war eine Gebläseleistung von etwa 250 KW pro Verbrennungslinie notwendig. Diese entfallen beim Einsatz der SNCR-Anlage. Der Temperaturverlust – Grädigkeit – des Abgases betrug etwa 30 K. Die zur Wiederaufheizung erforderliche Energie wurde in Form von 2.200.000 m<sup>3</sup>/a Erdgas pro Anlage über Gasbrenner wieder zugeführt. Nach Wegfall der drei Katalysatoren sank die Abgastemperatur vor Kamin von 150 °C auf etwa 95 °C.

Obwohl aufgrund der verfahrensbedingt geringeren Umsetzung des Ammoniaks der Verbrauch und damit die Betriebskosten für Reduktionsmittel für die SNCR-Anlagen höher sind als für die SCR-Anlagen, sind die Betriebskosten für die SNCR-Anlagen insgesamt deutlich geringer.

Auch aus Umweltgesichtspunkten ergibt sich für die SNCR-Technik ein positives Bild, weil durch den zusätzlichen Energiebedarf der SCR-Anlage zusätzliche Emissionen wie CO<sub>2</sub> erzeugt werden. Wie die Betriebsdaten belegen, liegen die mit der SNCR-Technik erreichten NO<sub>x</sub>-Reingaskonzentrationen im Bereich der SCR-Technik (Tabelle 1).

Dagegen wird allein durch den höheren Energiebedarf für jede SCR-Anlage eine um etwa 15.000 t/a erhöhte CO<sub>2</sub> Fracht freigesetzt, die aus der Erdgasverbrennung in den Kanalbrennern und für die Stromerzeugung zur Abdeckung der höheren Gebläseleistung herrühren.

Die Anforderungen an NO<sub>x</sub>-Minderungsmaßnahmen sind in den letzten Jahren bereits deutlich gestiegen und werden vermutlich noch weiter steigen, sodass auch die Leistungsfähigkeit der SNCR-Technik erhöht werden muss. Für eine Standard-Abfallverbrennungsanlage, wie sie z. B. oben beschrieben ist, reicht die temperaturabhängige Umschaltung der Eindüslanzen aus, da sich das wirksame Temperaturfenster bei allen Betriebszuständen schon im ersten Abgaszug, der frei von Einbauten ist, befindet.

Parameter	Einheit	SCR NH <sub>4</sub> OH 24,5 %	SNCR NH <sub>4</sub> OH 24,5 %
Abfalldurchsatz	t/h	25	25
Abgasvolumenstrom	Nm <sup>3</sup> /h, tr.	100.000	100.000
Betriebsstunden	h/a	8.000	8.000
NO <sub>x</sub> -Rohgaskonzentration	mg/Nm <sup>3</sup>	330	330
NO <sub>x</sub> -Reingaskonzentration	mg/Nm <sup>3</sup>	45	50
NO <sub>x</sub> -Abscheidung je Linie	kg/h	28,5	28
NO <sub>x</sub> -Abscheidung (drei Linien)	t/a	684	672
Ammoniakwasser 24,5 % (drei Linien)	t/a	800	4.000
CO <sub>2</sub> (drei Linien)	t/a	12.000	
Verbrauch Druckluft inklusive agam	Nm <sup>3</sup> /h		500
Verbrauch Demiwasser	m <sup>3</sup> /h		1,2
Mehrverbrauch Saugzug-Gebläse	MWh/a	6.100	
Erdgas Verbrauch	Nm <sup>3</sup> /a	6.600.000	

Tabelle 1:

Vergleich SCR mit SNCR (je Linie)

In Verbrennungsanlagen, die im Überlastbereich bzw. mit hochkalorischen Ersatzbrennstoffen betrieben werden, sind die idealen Bedingungen oft nicht gegeben, da in bestimmten Betriebszuständen, wie z.B. Volllastbetrieb und fortgeschrittener Reisezeit, sich die idealen Abgastemperaturen im zweiten Zug oder schon zwischen den Wärmetauschern befinden.

Wenn im freien Raum, d. h. dem Bereich ohne Einbauten, die Abgastemperaturen zu hoch sind, muss in dem für die  $\text{NO}_x$ -Abscheidung geeigneten Temperaturfenster genügend Platz für die Eindüsung und Reaktion der Reduktionsmittel geschaffen werden. Dies bedeutet, dass bei bestehenden Verbrennungsanlagen Wärmetauscher versetzt bzw. gespreizt werden müssen, was in der Regel nur mit hohem Kostenaufwand zu realisieren ist. In neuen Kesseln kann dagegen mit vertretbarem Aufwand ausreichend Platz zur Verfügung gestellt werden, wenn dies bereits bei der Planung eines Projekts berücksichtigt wird.

Unter bestimmten Voraussetzungen ist es auch vertretbar, die Maximallast der Kessel so weit zu beschränken, dass die Abgastemperaturen am Austritt der Feuerung noch innerhalb des für die  $\text{NO}_x$ -Abscheidung geeigneten Temperaturfensters liegen.

Aus verfahrenstechnischer Sicht ist die lokale Abkühlung der Abgase auf die Reaktionstemperatur, wie im Folgenden beschrieben, eine wirkungsvolle Alternative, die sich in der Praxis in einigen Anlagen bewährt hat.

### 1.1. Kühlung der Abgase durch Erhöhung der Prozesswassermenge

Sofern genügend Platz für die Eindüsung der Reduktionsmittel und ausreichend Verweilzeit für die Reaktionen vorhanden ist, stellen die mehr oder weniger stark auftretenden Temperaturschiefen kein Problem mehr dar. Seit der Einführung der temperaturabhängigen Einzellanzenumschaltung kann heute zuverlässig sichergestellt werden, dass die Reaktionen an jeder Stelle über den Querschnitt der Feuerung im optimalen Temperaturbereich stattfinden können.

Das größte Entwicklungspotenzial besteht heute darin, in Feuerungsanlagen, in denen die Abgastemperaturen in den zugänglichen Bereichen zu heiß für das SNCR-Verfahren sind, die optimalen Bedingungen zu schaffen, d.h. die Abgase so weit abzukühlen, dass eine  $\text{NO}_x$ -Abscheidung in allen Lastfällen möglich ist.

Hierzu bietet sich an, die Menge des Verdünnungswassers zu erhöhen. Dies hat aber folgende Nachteile, weshalb dieser Weg nur mit Einschränkungen empfehlenswert ist:

- Das Tropfenspektrum und damit Tropfengröße und Eindringtiefe wird mit unterschiedlichen Wassermengen verändert.
- Die Konzentration des Gemisches aus Reduktionsmittel und Wasser wird verändert, wodurch der Reduktionsbereich verschoben wird.

Die ständige Kesselfahrweise mit erhöhter Wassermenge ist jedoch nur in Ausnahmefällen akzeptabel, da für die Verdampfung des Wassers viel Energie verloren geht, wodurch sich der Anlagenwirkungsgrad zu sehr verschlechtert (Bild 5).

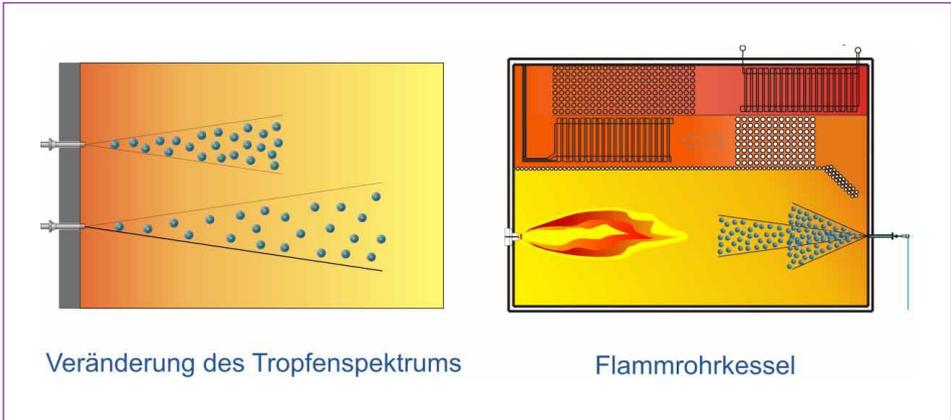


Bild 5: Kühlung von Abgasen durch Erhöhung der Verdünnungswassermenge

In Dreizugkesseln gehört die Regelung der Wassermenge abhängig von der Kesselast bzw. Kesseltemperatur seit vielen Jahren zum Standard. Bei diesen Anlagen kommen die o.g. Nachteile nicht zum Tragen, weil immer gegen die Abgasströmung eingedüst wird, und die Wurfweiten bewusst verändert werden, um den Temperaturwechseln zu folgen. Da diese Feuerungsanlagen sehr selten im Volllastbereich betrieben werden, hält sich der Wirkungsgradverlust wegen der Verdampfung des zusätzlichen Wassers in vertretbaren Grenzen.

### 1.2. Kühlung der Abgase mit zusätzlicher Kühlwassereindüsung

Bei größeren Kesseln, in denen die Reduktionsmittel praktisch immer quer zur Abgasströmung eingebracht werden, hat sich die Installation einer zusätzlichen Eindüsebene, die im Bedarfsfall nur mit Kühlwasser betrieben wird, im Dauerbetrieb bewährt.

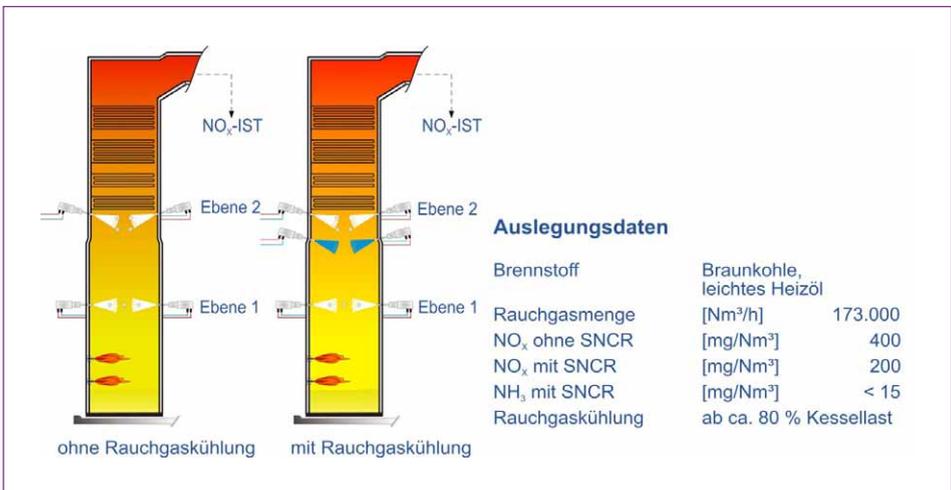


Bild 6: Kohlegefeuerter Kessel mit und ohne Abgaskühlung

Mit diesem Konzept wird das Kühlwasser nur bei hohen Temperaturen eingesetzt und bei sinkenden Temperaturen wieder abgeschaltet, wodurch das Tropfenspektrum nicht verändert wird. Der Nachteil ist, dass bei Temperaturschieflagen die Bereiche zu weit abgekühlt werden, in denen die Abgastemperaturen bereits optimal sind. Eine Wasserzugabe in diese Bereiche würde die Abgase unterhalb der Reaktionstemperatur abkühlen, was dann die  $\text{NO}_x$ -Abscheidung und den  $\text{NH}_3$ -Schlupf beeinträchtigen würde.

Die Methode ist deshalb vorzugsweise für Verbrennungsanlagen geeignet, in denen ein gleichmäßiges Temperaturprofil vorliegt und die nicht ständig in Temperaturbereichen betrieben werden, in denen eine Zusatzkühlung der Abgase notwendig ist. Durch Zu- bzw. Abschalten der Kühlung mit Wasser kann in vielen Fällen eine zweite oder dritte Eindüsebene für Reduktionsmittel entfallen. In der auf Bild 6 gezeigten Anlage, die nur sehr selten unter Volllast betrieben wird, konnte man mit diesem Konzept auf die Nachrüstung eines Katalysators verzichten. Durch Zugabe des Kühlwassers bei Volllast wird eine Reduzierung des  $\text{NO}_x$ -Reingaswertes von 400 auf  $< 200 \text{ mg/Nm}^3$  erreicht.

### 1.3. Selektive Kühlung der Abgase

Ähnlich wie das oben beschriebene Verfahren wird auch hier eine zusätzliche Eindüsebene für Kühlwasser unterhalb der oberen Eindüsebene installiert. Damit bei Temperaturschieflagen nur die Zonen *selektiv* gekühlt werden, die zu heiß sind, wird bei Bedarf nur eine einzelne bzw. eine Gruppe von Kühllanzen abhängig vom Temperaturprofil gezielt aktiviert, wodurch der Kühlwasserverbrauch und damit der Wärmeverlust im Kessel deutlich gesenkt und der  $\text{NH}_3$ -Schlupf niedrig gehalten wird (Bild 7 und Bild 8).

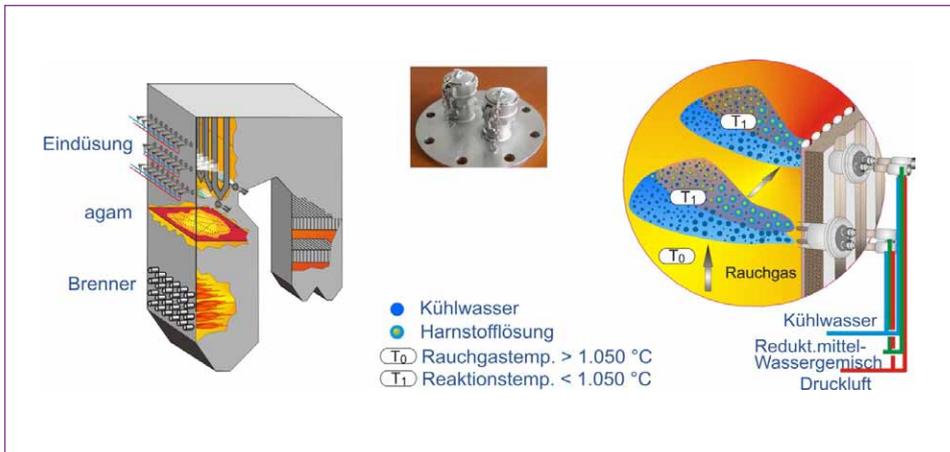


Bild 7: Selektive Abgaskühlung

Dies bietet sich an für Kesselanlagen, die im oberen Lastbereich betrieben werden und mit einer SNCR-Anlage ausgerüstet sind, in der die einzelnen Lanzen abhängig von der kontinuierlichen Messung des Temperaturprofils umgeschaltet werden.

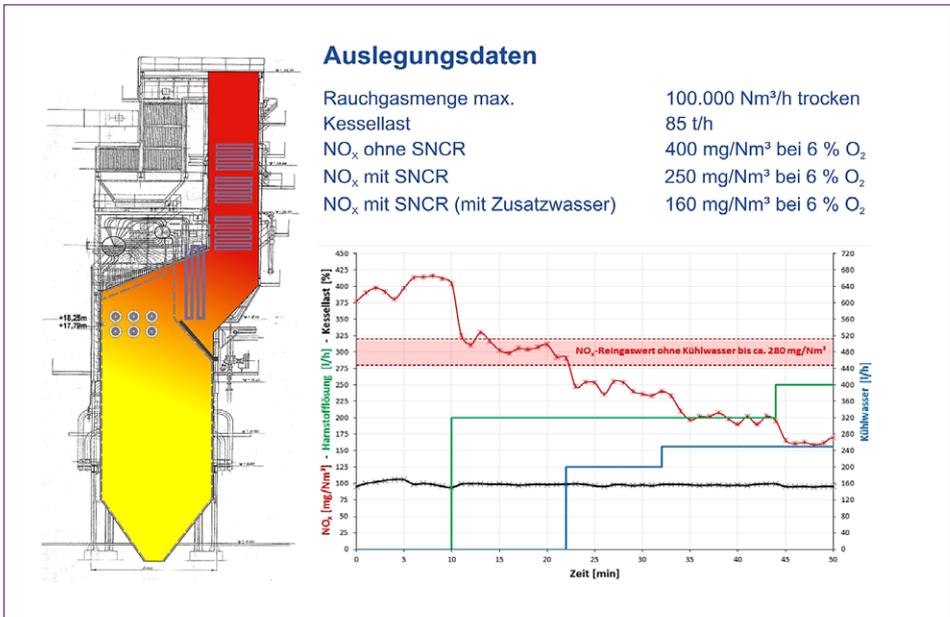


Bild 8: Selektive Kühlung – Nachrüstung einer mit Harnstoff betriebenen SNCR Anlage

## 1.4. Adaptive Kühlung der Abgase

Mit der temperaturabhängigen Einzellanzenumschaltung und der selektiven Abgaskühlung wurden bereits erhebliche Verbesserungen sowohl bei der NO<sub>x</sub>-Abscheidung als auch der Minimierung des NH<sub>3</sub>-Schlupfes im Abgas, des Nebenprodukts aus der Abgasreinigung, und in der Flugasche erreicht.

Gute Erfolge wurden inzwischen auch mit der Anwendung des TWIN-NO<sub>x</sub> Verfahrens erzielt. Hier werden die Vorteile der beiden Reduktionsmittel Harnstofflösung und Ammoniakwasser so kombiniert, dass das wirksame Temperaturfenster praktisch erweitert wird. D.h. in niedrigen Lastbereichen wird das hochvolatile Ammoniakwasser eingesetzt, wobei das Ammoniak sofort freigesetzt wird und mit dem NO<sub>x</sub> reagieren kann. Bei Harnstofflösung verzögert sich die Reaktion, weil die NO<sub>x</sub>-Reduktionen erst stattfinden können, wenn das Prozesswasser verdampft ist und die Harnstoffmoleküle zu reaktionsfähigen NH<sub>2</sub> Radikalen und CO zerfallen sind.

Die Wassereindüsung zur Kühlung der Abgase bietet den erheblichen Vorteil, dass man auf aufwändige und kostenintensive Kesselumbauten verzichten kann. Dies hat aber auch den gravierenden Nachteil, dass je nach Abgastemperaturen und Betriebsstunden, in denen der Kessel im oberen Lastbereich betrieben wird, der Energieverlust für die Wasserverdampfung zu hoch ist. Ziel der *adaptiven Kühlung* (Bild 9) ist es deshalb, die Kühlwassermenge an den Eindüsstellen so zu dosieren, dass die Wassermenge auf ein Minimum beschränkt wird und kein oder nur wenig NH<sub>3</sub>-Schlupf entstehen kann.

Hierzu werden über der obersten Eindüsebene die diversen Temperaturprofile

- ohne Eindüsung von Reduktionsmittel,
- mit Eindüsung von Reduktionsmittel,
- mit Eindüsung von Reduktionsmitteln und Kühlwasser

über den Feuerraumquerschnitt gemessen, die dann in mehrere Temperaturzonen aufgeteilt werden, denen wiederum einzelne Lanzen oder Lanzengruppen zugeordnet sind.

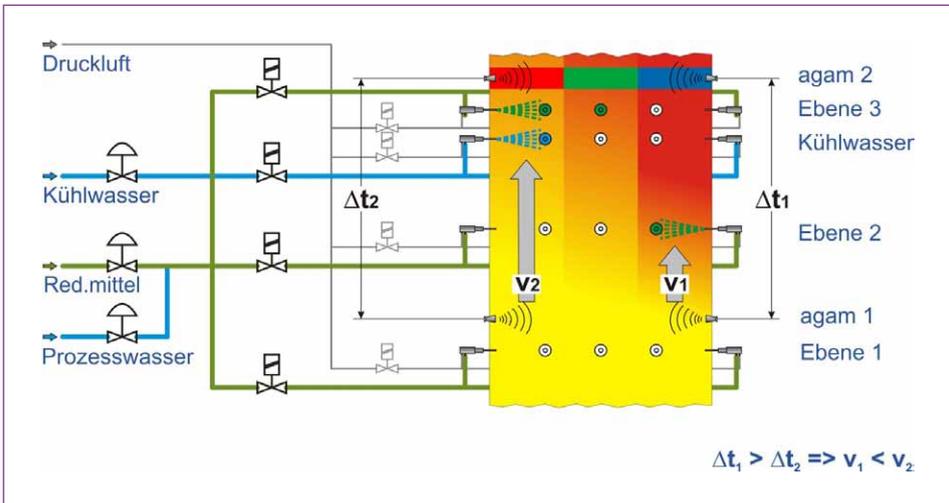


Bild 9: Prinzip der adaptiven Abgaskühlung

Während der Inbetriebnahme-Phase werden in den einzelnen Zonen der oberen Ebene, die nicht mehr in einen kälteren Temperaturbereich geschaltet werden können, die Durchschnittstemperaturen ermittelt, in denen die besten Abscheidegrade erreicht werden. Diese Temperaturen werden dann als Sollwert für die Wassereindüsung in das Regelungssystem eingegeben. Die optimalen Kühlwassermengen werden mittels Regelventilen in den einzelnen Zonen soweit zu dosiert bis die vorgegebenen Abgastemperaturen erreicht sind.

Die Kühlwassermenge wird auf diese Weise im Hinblick auf Kesselwirkungsgrad,  $\text{NO}_x$ -Abscheidung und  $\text{NH}_3$ -Schlupf geregelt und optimiert. Der Temperaturanstieg des Abgases im Verlauf der Betriebszeit bei gleicher Kessellast gibt darüber hinaus Aufschluss, inwieweit die Wärmetauscher durch Ascheablagerungen verschmutzt sind und wann das Ende der Reisezeit erreicht bzw. ggf. Rußblasen erforderlich ist.

### 1.5. Bestimmung und Einbindung des $\text{NO}_x$ Massenstrom-Profiles

Mit den oben beschriebenen Alternativen sind die Möglichkeiten der temperaturabhängigen Eindüsung der Reduktionsmittel in den Abgasstrom weitgehend erschöpft. Dass es aber noch weitere Einflussgrößen gibt, von denen die Wirkung des SNCR-Verfahrens abhängt, wird dabei kaum oder gar nicht beachtet.

Bisher werden die meisten SNCR-Anlagen last- und temperaturgeführt ausgelegt, wobei der Einfachheit halber angenommen wird, dass die  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen und die Abgasgeschwindigkeiten über den gesamten Kesselquerschnitt nahezu homogen sind. Das ist aber nicht der Fall. Ähnlich der Temperaturverteilung bilden sich auch für die Komponenten im Abgas wie z.B.  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$  und  $\text{NO}$  sowie für die Abgasgeschwindigkeiten und -richtungen inhomogene Verteilungen bzw. Profile heraus (Bild 10).

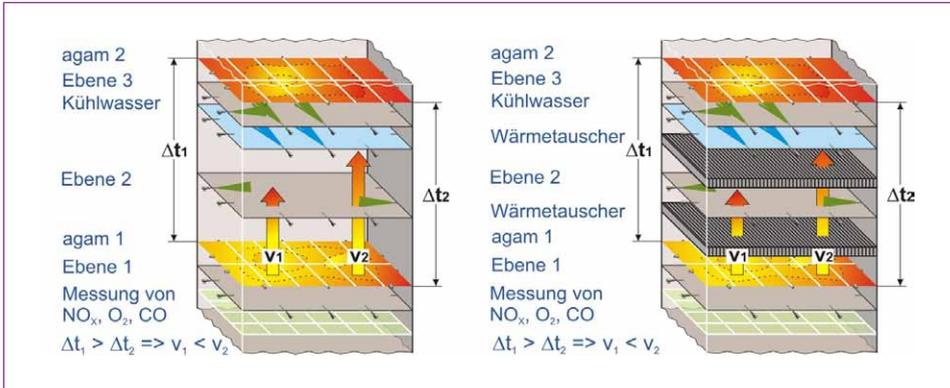


Bild 10: Adaptive Abgaskühlung – Ableitung der Abgasgeschwindigkeiten aus Temperaturdifferenzen

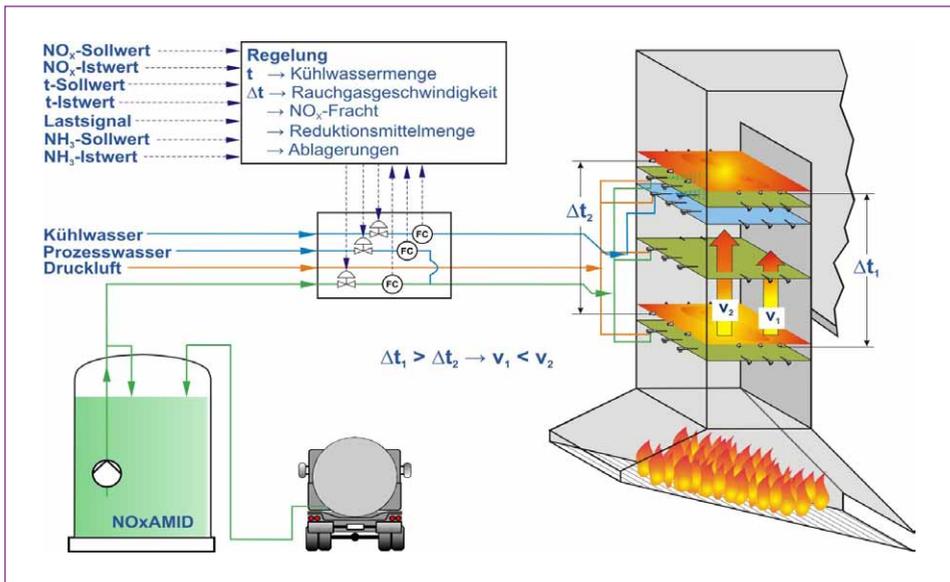


Bild 11: Regelprinzip für SNCR-Anlagen unter Einbeziehung der Abgasgeschwindigkeitsprofile

Während des Betriebs der Feuerungsanlagen können die Abgasströmungen und die  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen nicht mit vertretbarem Aufwand gemessen werden, so dass für die Regelung der SNCR-Anlagen ebenfalls eine homogene  $\text{NO}_x$ -Verteilung

und ein gleichmäßiges Strömungsprofil angenommen wird. Dies kann dazu führen, dass stellenweise zu viel oder auch zu wenig Reduktionsmittel eingedüst wird, was bei niedrigen Abscheidegraden zu vernachlässigen ist, bei niedrigen  $\text{NO}_x$ -Grenzwerten zu höherem  $\text{NH}_3$ -Schlupf und Verbrauch an Reduktionsmitteln führt.

Eine geringere Abgasgeschwindigkeit würde bei gleicher  $\text{NO}_x$ -Konzentration und gleicher Reduktionsmittelmenge zu einer Überdosierung und damit zu einem höheren  $\text{NH}_3$ -Schlupf an dieser Stelle führen, wogegen in Bereichen mit höherer Abgasgeschwindigkeit zu wenig Reduktionsmittel eingedüst würde. Um dies zu vermeiden, muss in den entsprechenden Eindüslanzen die Dosierung der Reduktionsmittelmenge entsprechend angepasst oder ggf. ganz gestoppt werden (Bild 11).

Zur Abschätzung des Geschwindigkeitsprofils wird analog zur oberen Eindüsebene über der unteren Eindüsebene ebenfalls eine Temperaturmesseinrichtung installiert, mit der die Abgase

- ohne Eindüsung von Reduktionsmitteln und
- mit Eindüsung von Reduktionsmitteln

gemessen werden.

Durch Vergleich der Temperaturen der übereinander liegenden Messebenen, kann man den Temperaturabfall berechnen.

Da heißeres Abgas einen größeren Auftrieb hat und langsamer strömendes Abgas an den Kesselwänden bzw. in den Wärmetauschern stärker abgekühlt wird, weist eine größere Abkühlung zwischen den Zonen der beiden Messebenen auf eine geringere Abgasgeschwindigkeit hin als in den Zonen, in denen die Abkühlung weniger stark ist.

In welcher Größenordnung die Geschwindigkeiten relativ zueinander liegen oder ob sogar eine Rückströmung vorliegt, lässt sich durch Berechnungen bzw. Computersimulation für typische statische Betriebsfälle hinreichend genau extrapolieren und im Programm der Prozessregelung hinterlegen, wo die Zwischenwerte unter Betriebsbedingungen interpoliert werden. Die ermittelten Daten dienen dann als Führungsgröße, um die Reduktionsmittelzufuhr zu einzelnen Lanzen oder Gruppen von Lanzen zu regeln. Da der  $\text{NH}_3$ -Schlupf im niedrigen Temperaturbereich entsteht, kann es bei hohem  $\text{NH}_3$ -Schlupf sinnvoll sein die Lanzen, die in die Abgase mit den tiefsten Temperaturen eindüsen, komplett abzuschalten.

Die heute erhältlichen akustischen und optischem Messsysteme liefern hinreichend genaue Informationen, die für die Optimierung der SNCR-Technik zunehmend genutzt werden.

#### **Gastemperatur Messsysteme liefern:**

- Abgastemperaturen ohne SNCR,
- Abgastemperaturen mit SNCR,
- Abgastemperaturen mit SNCR und selektiver Kühlung.

#### **Temperaturinformation wird verwendet für:**

- Reduktionsmitteleindüsung in Bereichen mit optimalen Temperaturen,

- Abgaskühlung in Bereichen, die zu heiß sind für SNCR,
- Kontrolle der Prozesswassermenge, um die Eindringtiefe und das Sprühbild der Reduktionsmitteleindüsung zu variieren,
- Steuerung des Kühlwassers,
- Steuerung des Ammoniakschlupfes,
- Abgasgeschwindigkeiten können aus den Temperaturgradienten abgeleitet werden.

### Ergebnisse

- Höhere Effizienz ( $\text{NO}_x$ -Reduktion),
- Niedriger Ammoniakschlupf,
- Weniger Wasserverbrauch,
- Geringer Reduktionsmittelverbrauch.

Welche Korrelation es zwischen anderen Betriebsparametern noch gibt, ist noch nicht hinreichend bekannt. Es ist aber anzunehmen, dass das  $\text{NO}_x$ -Profil von der  $\text{O}_2$  Konzentration abgeleitet werden kann, denn bei einem Sauerstoffüberschuss und hohen Verbrennungstemperaturen wird die Bildung von thermischen  $\text{NO}_x$  begünstigt.

## 2. Prozessregelung

Bei SNCR-Verfahren sind verfahrensbedingt keine zeitgleichen Messungen der Roh- und Reingaswerte möglich. Weil die Messungen erst im kälteren Abgas nach Kessel durchgeführt werden können, kann der  $\text{NO}_x$ -Gehalt nur alternativ mit oder ohne Reduktionsmitteleindüsung gemessen werden. Aufgrund der Zeitverzögerung, die sich zwischen der Eindüsung in die Feuerung über die  $\text{NO}_x$ -Messung nach Kessel, die Probennahme, die Analyse und den Weg der neu eingestellten Konzentration des Reduktionsmittels vom Regelventil zu den Lanzen ergibt, wird die Reduktionsmittelmenge in Abhängigkeit von der Kessellast grob vorausgerechnet, um den wechselnden Betriebsbedingungen so schnell wie möglich folgen zu können.

Dies erfolgt mit Hilfe eines Lastsignals, dem festgelegten  $\text{NO}_x$ -Reingaswert und der sich daraus ergebenden  $\text{NO}_x$ -Fracht. Abhängig vom tatsächlich gemessenen  $\text{NO}_x$ -Reingaswert wird die Menge dann ständig korrigiert. Damit die Reduktionsmittelmengen nicht zu extrem schwingen können, wird abhängig von der zu erwartenden Betriebsweise eine konstante Sockelmenge vorgewählt, die nicht unterschritten wird. Vielfach ist es sinnvoll, die Regelcharakteristik zu dämpfen.

Bei Abfallverbrennungsanlagen, die mit Erdgas gezündet und mit Stützbrennern betrieben werden, die zudem relativ wenig  $\text{NO}_x$  erzeugen, empfiehlt es sich, die SNCR-Anlage erst zuzuschalten, wenn die  $\text{NO}_x$ -Rohgaswerte nach der Brennstoffzugabe auf den Rost, nahezu den Sollwert erreicht haben. Auf diese Weise kann eine Überdosierung von Reaktionsmitteln und ein damit verbundener hoher  $\text{NH}_3$ -Schlupf während der Anfahrphase vermieden werden.

Beim Abfahren der Verbrennungsanlage erfolgt die Abschaltung der SNCR-Anlage sinngemäß einige Minuten nach Abschaltung der Brennstoffzugabe auf den Rost und/oder wenn die Stützbrenner wieder eingeschaltet werden.

Das Einschalten der SNCR-Anlagen und ggf. das Umschalten der Eindüseebenen oder der einzelnen Lanzen erfolgt ansonsten abhängig von der Feuerraumtemperatur in den Sektionen, die mit dem Temperaturmesssystem ermittelt wurden, und denen einzelne Lanzen zugeordnet sind. Die Prozessregelung erfolgt über eine autarke SPS, kann aber auch über das Prozessleitsystem der Gesamtanlage realisiert werden. Eine Visualisierung wird über eine Busanbindung mit der Warte hergestellt, wie es insbesondere bei größeren Verbrennungsanlagen dem Standard entspricht.

Diese Vorgehensweise wird im Grundsatz auch in Anlagen angewendet, in denen die  $\text{NO}_x$ -Frachten in den einzelnen Zonen berechnet und in die Regelung mit einbezogen werden. Allerdings ist die Programmierung deutlich aufwändiger, da die entsprechenden Formeln hinterlegt werden müssen, um von gemessenen Betriebstemperaturen möglichst korrekte Abgasgeschwindigkeiten und  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen zu erhalten.

### 3. Zusammenfassung und Ausblick

In kleineren Verbrennungsanlagen, die z.B. Abfall oder Biomasse verbrennen, bestimmt das SNCR-Verfahren schon seit Jahren den Stand der Technik.  $\text{NO}_x$ -Reingaswerte  $< 100 \text{ mg/Nm}^3$  werden für diese Verbrennungsanlagen sicher und verlässlich eingehalten.

Anfangsergebnisse mit neueren Techniken wie der Einzellanzenumschaltung, dem TWIN- $\text{NO}_x$ -Verfahren, der Selektiven Abgaskühlung und der zielgerichteten Kombination mit Primärmaßnahmen weisen darauf hin, dass das Potenzial noch längst nicht ausgeschöpft worden ist.

Zunehmender Bedarf besteht derzeit für Abfallverbrennungsanlagen, die für die neuen Grenzwerte ertüchtigt werden und wo ein niedriger Ammoniakslupf eingehalten werden muss. Ein großes Potenzial besteht darüber hinaus für Anlagen mit Kesseln, deren Leistungen zwischen etwa 300 bis 500  $\text{MW}_{\text{el}}$  liegen und wo  $\text{NO}_x$ -Grenzwerte  $< 150 \text{ mg/Nm}^3$  und  $\text{NH}_3$ -Schlupf  $< 5 \text{ mg/Nm}^3$  gefordert sind.

### 4. Literatur

- [1] Moorman, F.; von der Heide, B.; Stubenhöfer, C.: Umrüstung der Abfallverbrennungsanlage Wijster/Niederlande von SCR auf SNCR. In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 10. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013, S. 683-702
- [2] von der Heide, Bernd: Ist das SNCR-Verfahren noch Stand der Technik? In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 4. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2008, S. 275-293
- [3] von der Heide, Bernd: SNCR-Verfahren der Zukunft für Großfeuerungsanlagen – Konzepte, Erfahrungen, TWIN- $\text{NO}_x$ -Verfahren. In: Beckmann, M.; Hurtado, A. (Hrsg.): Kraftwerkstechnik, Sichere und nachhaltige Energieversorgung, Band 4. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012, S. 623-635