

K. J. Thomé-Kozmiensky

Michael Beckmann

Energie

aus

Abfall

K

Band 12

Karl J. Thomé-Kozmiensky
Michael Beckmann

Energie aus Abfall

Band 12

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 12

ISBN 978-3-944310-18-3 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 2015
Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,
M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Dr.-Ing. Stephanie Thiel
Erfassung und Layout: Ginette Teske, Sandra Peters, Berenice Gellhorn, Cordula Müller,
Carolin Bienert, Janin Burbott

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München 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.

SNCR-Lösungen für steigende Anforderungen in unterschiedlichen Feuerungsanlagen

Bernd von der Heide

1.	Anlagentechnik für 17. BImSchV	394
2.	Voraussetzungen für die Funktion von SNCR-Verfahren	397
3.	Lösungsmöglichkeiten.....	399
3.1.	Anpassung der SNCR-Anlage an die vorhandenen Dampferzeuger und deren Betriebsweise	399
3.2.	Kühlung der Abgase mit zusätzlichem Wasser	399
4.	Neuere Methoden der Abgasentstickung.....	401
4.1.	Selektive Kühlung der Abgase	401
4.2.	TWIN-NO _x -Verfahren – Kombination von Harnstofflösung und Ammoniakwasser.....	402
4.3.	Optimierung von SNCR und Feuerung durch aufeinander abgestimmte Maßnahmen	405
5.	Zusammenfassung und Ausblick.....	409
6.	Literatur.....	409

Die ersten SNCR-Anlagen wurden ab etwa 1990 zumeist für Abfallverbrennungsanlagen eingesetzt, in denen nur eine moderate NO_x-Abscheidung von vierzig bis fünfzig Prozent gefordert wurde, was auch bei den in diesen Feuerungen üblichen Temperaturschief lagen kein unlösbares Problem darstellte. Für höhere Abscheidegrade wurde das SNCR-Verfahren damals als nicht geeignet beurteilt, sodass hierfür in der Regel SCR-Verfahren vorgesehen wurden.

Nach der Jahrtausendwende wurden die Anforderungen schrittweise erhöht. Je nach Standort waren die Grenzwerte der 17. BImSchV (NO_x < 200 mg/Nm³ und NH₃-Schlupf < 30 mg/Nm³) immer häufiger nicht mehr genehmigungsfähig. Zudem wurde der Ruf nach Senkung der NO_x-Grenzwerte auf < 100 mg/Nm³ immer lauter.

Dies führte dazu, dass das Bundesministerium für Umwelt (BMU) in Fachkreisen die Meinung vertrat, die neuen Grenzwerte für die Abgasbehandlung seien mit SCR-Technik in der Regel relativ problemlos möglich, wogegen dies nicht für die SNCR-Technologie gelte. Daher sei es insbesondere im Falle von anstehenden Neuinvestitionen anzuraten, auf die SCR-Technik zu setzen [1].

Dieser Beitrag beschreibt, dass das SNCR-Verfahren trotz dieser Aussagen eine attraktive Alternative zur SCR-Technik bietet, zumal die Ergebnisse und Erfahrungen, die inzwischen gesammelt, ausgewertet, angewendet und weiter entwickelt wurden, belegen, dass die SNCR-Technologie die hohen Anforderungen schon seit mehreren Jahren erfüllt.

1. Anlagentechnik für 17. BImSchV

Für SNCR-Verfahren besonders gut 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_x -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.

Das vereinfachte Verfahrensfliessbild (Bild 1) zeigt die Funktion und den Lieferumfang einer typischen SNCR-Anlage für Harnstofflösung als Reduktionsmittel, wie sie für Verbrennungsanlagen gemäß der gültigen 17. BImSchV mit NO_x -Abscheidegraden bis zu 60 Prozent betrieben wird. Diese Anlagen werden je nach Anforderungen mit ein oder zwei Eindüsebenen ausgerüstet, die gegebenenfalls abhängig von der Last- und/oder der Abgastemperatur umgeschaltet werden können.

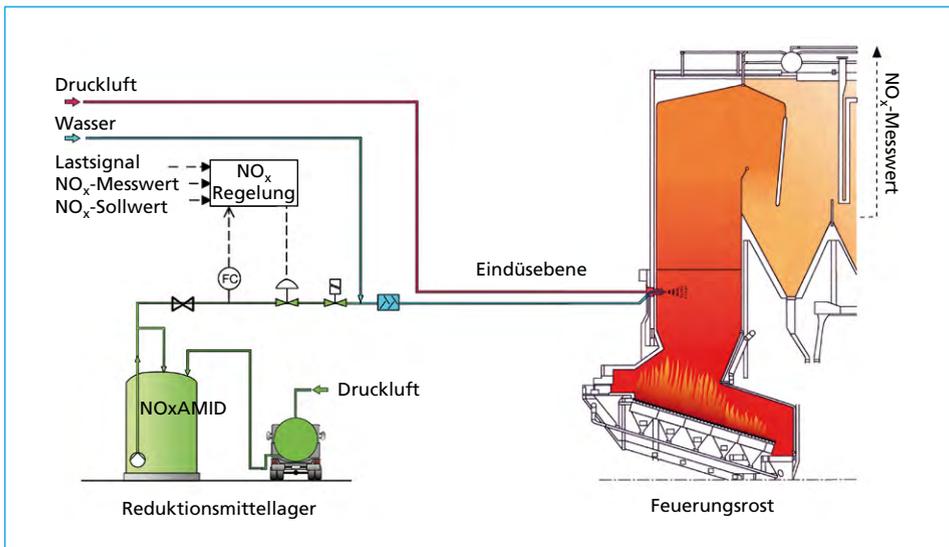


Bild 1: Verfahrensfliessbild einer einfachen SNCR-Anlage

Mit diesem Konzept können NO_x -Grenzwerte von 120 bis 150 mg/Nm^3 und einem NH_3 -Schlupf von $< 30 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ verlässlich eingehalten werden, wenn die Eindüsenlanzen 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 Eindüseebenen bewährt, die abhängig von der gemittelten Dampferzeugerdeckentemperatur umgeschaltet werden. Unter günstigen Betriebsbedingungen, wie sie bei der Verbrennung homogener Brennstoffe und konstanter Dampferzeugerlast vorzufinden sind, sind mit diesem Konzept auch NO_x -Reingaswerte $< 100 \text{ mg/Nm}^3$ möglich, wobei abhängig von Schieflagen der Abgastemperaturen und -strömungen hinsichtlich des NH_3 -Schlupfes und des Reduktionsmittelverbrauchs mit Einschränkungen zu rechnen ist.

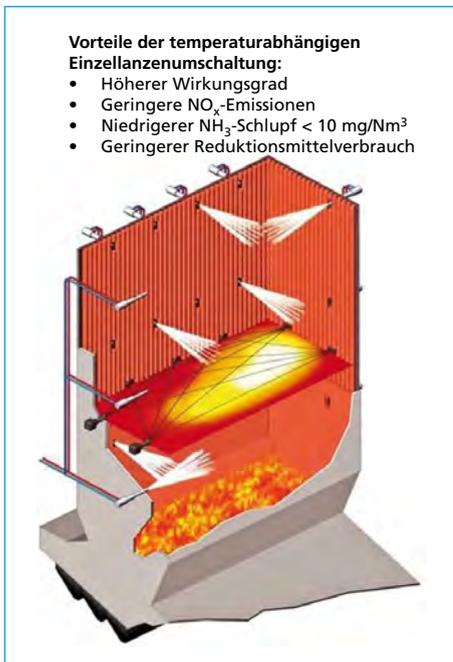


Bild 2: Temperaturgesteuerte Einzellanzenumschaltung

Damit in allen möglichen Betriebsfällen das Reduktionsmittel immer in den Bereich des Temperaturfensters eingedüst wird, der hinsichtlich der NO_x -Abscheidung, des NH_3 -Schlupfes und des Reduktionsmittelverbrauchs am wirksamsten ist, werden in modernen Anlagen die Eindüslanzen abhängig von den Abgastemperaturen an den jeweiligen Eindüsstellen geschaltet.

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 NO_x -Abscheidegrad, NH_3 -Schlupf und Reduktionsmittelverbrauch immer im optimalen Bereich fährt (Bild 2).

Die im Dauerbetrieb erzielten Messergebnisse an mehreren Verbrennungsanlagen belegen, dass NO_x -Reingaswerte $< 100 \text{ mg/Nm}^3$ bei einem NH_3 -Schlupf $< 10 \text{ mg/Nm}^3$ dauerhaft einzuhalten sind und sogar Werte, die deutlich darunter liegen, erreicht werden.

In Deutschland, Schweden und Holland werden schon seit mehreren Jahren SNCR-Anlagen betrieben, die für NO_x -Grenzwerte von $< 100 \text{ mg/Nm}^3$ ausgelegt wurden und die die garantierten Werte im Dauerbetrieb verlässlich einhalten. Von den neueren Anlagen zeichnen sich diejenigen durch besonders niedrige NO_x -Reingaswerte und geringen NH_3 -Schlupf aus, die mit einer akustischen Temperaturmessung (agam) und drei Eindüseebenen ausgerüstet sind, wo jede einzelne Lanze umgeschaltet werden kann.

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 (NO_x -Abscheidung von etwa 330 bis 350 mg/Nm^3 auf $< 60 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ und NH_3 -Schlupf $< 10 \text{ mg}/\text{Nm}^3$) sind drei Eindüsenebenen 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).

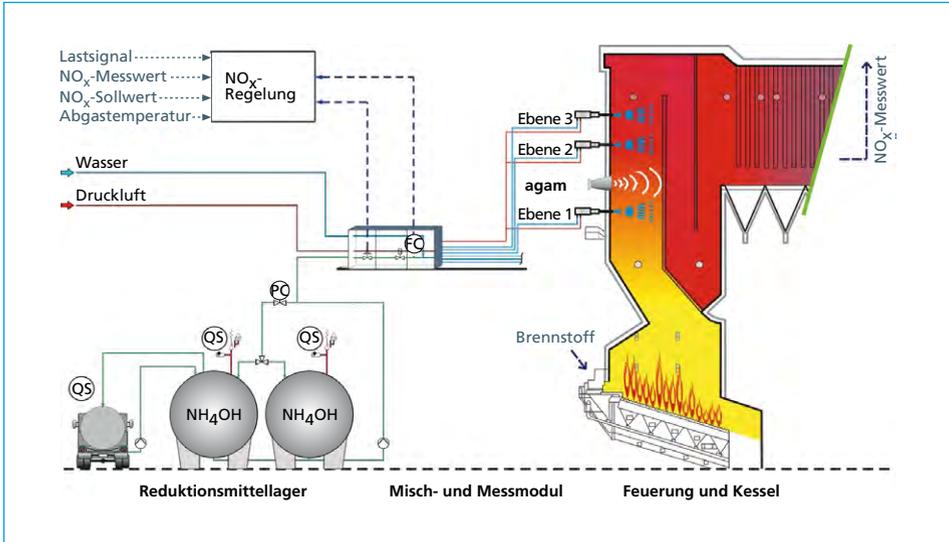


Bild 3: Verfahrensfließbild für SNCR-Anlage mit agam und drei Eindüsenebenen

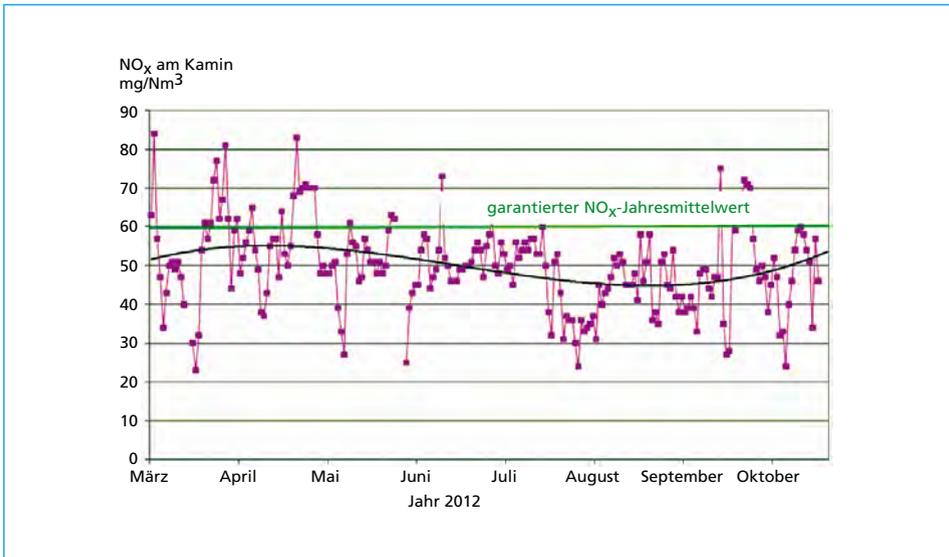


Bild 4: Langzeitergebnisse der MVA Wijster – Tagesmittelwerte

In Bild 4 sind die 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 NO_x -Jahresmittelwert von $< 50 \text{ mg/Nm}^3_{\text{tr}}$, bezogen auf elf Prozent O_2 erreicht worden. Das ist vergleichbar mit der SCR-Anlage, deren NO_x -Jahresmittelwert bei 45 mg/m^3 lag.

Nach dem Umbau der anderen beiden Linien werden auch hier die garantierten NO_x -Reingaswerte sicher erreicht. Bemerkenswert ist, dass der NH_3 -Schlupf deutlich unter den Erwartungen liegt. Daher halten sich auch nach der Inbetriebnahme der beiden anderen Verbrennungslinien die NH_3 -Werte im Nebenprodukt aus der Abgasreinigung in vertretbaren Grenzen, sodass die vorgesehene Nachrüstung einer Anlage zum Strippen des Ammoniaks aus dem Abwasser nicht erforderlich war.

Neben dem Bau von neuen SNCR-Anlagen ist es inzwischen erforderlich geworden, die bestehenden Anlagen, die z.T. schon vor mehr als zehn Jahren gemäß den Anforderungen der 17. BImSchV ausgelegt wurden, nachzurüsten, damit in Zukunft die neuen Grenzwerte von $< 150 \text{ mg/Nm}^3$ eingehalten werden können. In den meisten Fällen reicht es, zusätzliche Eindüseebenen bzw. -lanzen nachzurüsten und jeden Abgang mit separaten Kugelhähnen auszurüsten. Ggf. müsste ja nach NO_x -Rohgaswerten ein Temperaturmesssystem installiert werden, um die temperaturabhängige Einzellanzenumschaltung zu ermöglichen (Bild 5).

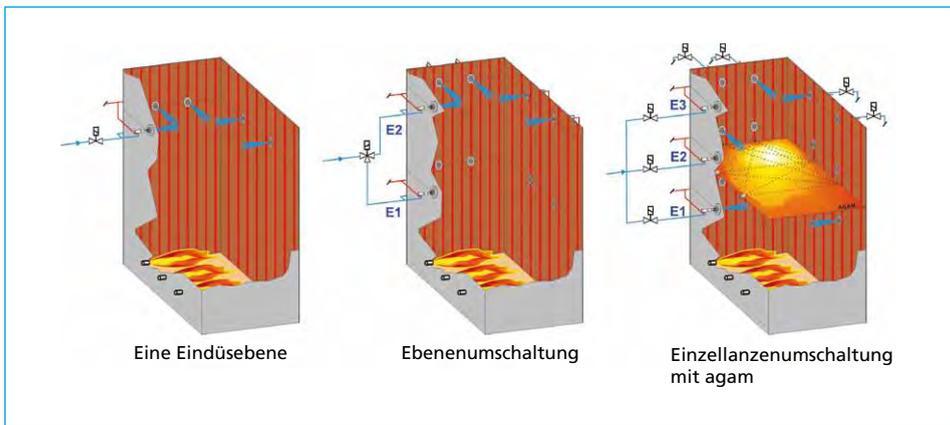


Bild 5: Maßnahmen zur Erhöhung des NO_x -Abscheidegrads in SNCR-Anlagen

2. Voraussetzungen für die Funktion von SNCR-Verfahren

Entgegen der weit verbreiteten Auffassung genügt es nicht, die Reduktionsmittel gleichmäßig innerhalb des geeigneten Temperaturfensters in den Abgasen zu verteilen und gründlich zu vermischen. Abgesehen davon, dass der optimale Temperaturbereich mit etwa 50 K relativ klein ist und die genaue Lage dieses Fensters von der Abgaszusammensetzung abhängt, sind u.a. die Temperaturverteilung, die NO_x -Verteilung, die

Abgasgeschwindigkeiten und die Strömungsrichtungen an den Eindüststellen wichtige Kriterien für die Wirksamkeit des Verfahrens. Diese Kriterien müssen bei der Auslegung einer SNCR-Anlage berücksichtigt werden, sind aber oft schwer zu erfassen bzw. abzuschätzen und werden im Wesentlichen beeinflusst durch:

- die Bauform der Dampferzeuger und Feuerung/Brennkammer,
- die Anordnung der Wärmetauscher,
- die Konzeption der Brenner und ggf. Mühlen,
- die Betriebsbedingungen im Dampferzeuger,
- das Reduktionsmittel – Harnstofflösung oder Ammoniakwasser,
- die Art des Brennstoffs.

Im Kraftwerksbereich sind die Probleme, die von den Anbietern von SNCR-Anlagen gelöst werden müssen, schon allein wegen der Größe deutlich komplexer als es z.B. für Rostfeuerungen der Fall ist. Zumeist sind die Temperaturen in den von Einbauten freien Bereichen, insbesondere bei Volllast, zu heiß (Bild 6), so dass die Reduktionsmittel zu NO_x verbrennen. Die für die Reaktion günstigen Temperaturen liegen abhängig von der Dampferzeugerbauweise und der Konzeption der Feuerung häufig in Bereichen der Wärmetauscher, die für die Eindüsung der Reduktionsmittel gar nicht oder nur schwer zugänglich sind. Zusätzlich erschweren Temperaturschiefen, die aufgrund der unterschiedlichen Konfigurationen und Betriebsweisen der Brenner auftreten, die Auslegung und die Regelung der SNCR-Anlagen erheblich. Darüber hinaus sind Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen nur schwer abzuschätzen bzw. zu messen.

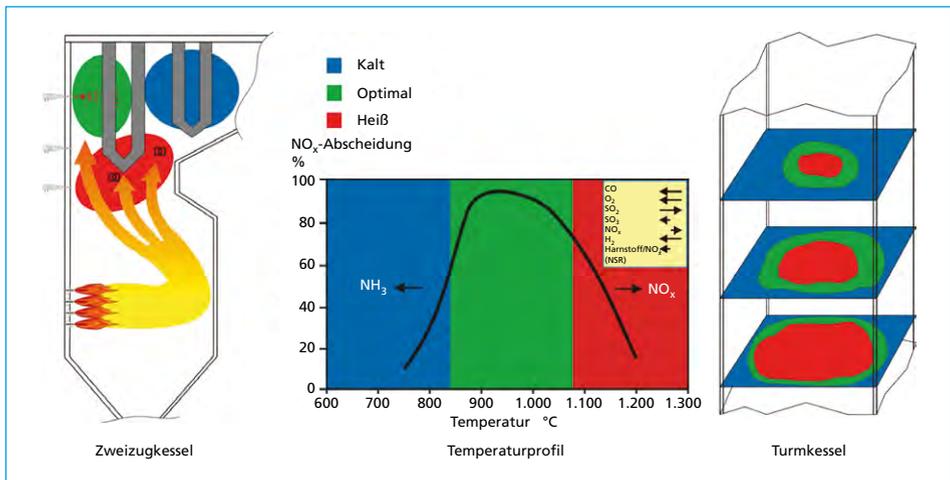


Bild 6: NO_x -Abscheidung in Abhängigkeit von der Temperatur

Bei Turmkesseln ist der Bereich mit optimalen Reaktionstemperaturen nur schwer zu erreichen. Nahe der Dampferzeugerwände liegen die zu kalten Bereiche, während zur Mitte hin die Temperaturen ansteigen und im Dampferzeugerzentrum zu heiß sind.

3. Lösungsmöglichkeiten

Für die Lösung der o.g. Probleme bzw. zur Optimierung bieten sich grundsätzlich die nachfolgend beschriebenen Vorgehensweisen an.

- Umbau der Dampferzeugeranlagen für SNCR-freundlichen Betrieb bzw. Einschränkung der Dampferzeugerleistung,
- Anpassung der SNCR-Anlage an die vorhandenen Dampferzeuger und deren Betriebsweise,
- Kühlung der Abgase.

Wenn im freien Raum, d.h. dem Bereich ohne Einbauten, die Abgastemperaturen zu hoch sind, muss in dem für die NO_x -Abscheidung geeigneten Temperaturfenster genügend Platz für die Eindüsung und Reaktion der Reduktionsmittel geschaffen werden. Dies bedeutet, dass Wärmetauscher versetzt bzw. gespreizt werden müssen, was in der Regel nur mit hohem Kostenaufwand zu realisieren ist. Im Gegensatz dazu kann in neuen Dampferzeugern mit vertretbarem Aufwand ausreichend Platz zur Verfügung gestellt werden, wenn dies bereits bei der Planung eines Projekts berücksichtigt wird.

Wenn ein Umbau nicht möglich ist und besonders, wenn mehrere Dampferzeugeranlagen parallel betrieben werden, ist es unter Umständen ein gangbarer Weg, die Maximallast der Dampferzeuger so weit zu beschränken, dass die Abgastemperaturen am Austritt der Feuerung noch innerhalb des für die NO_x -Abscheidung geeigneten Temperaturfensters liegen.

3.1. Anpassung der SNCR-Anlage an die vorhandenen Dampferzeuger und deren Betriebsweise

Zunächst sollte angestrebt werden, die SNCR-Anlagen an die Betriebsbedingungen der vorhandenen Dampferzeugeranlagen anzupassen und nicht umgekehrt die Dampferzeuger an die SNCR.

Sofern genügend Platz für die Eindüsung der Reduktionsmittel und ausreichend Verweilzeit für die Reaktionen vorhanden ist, stellen die mehr oder weniger stark auftretenden Temperaturschief lagen kein Problem mehr dar. Seit der Einführung der temperaturabhängigen Einzellanzumschaltung kann heute zuverlässig sichergestellt werden, dass die Reaktionen an jeder Stelle über den Querschnitt der Feuerung im optimalen Temperaturbereich stattfinden können. Dieses Verfahren mit den entsprechenden Betriebsergebnissen bei unterschiedlichen Feuerungsanlagen wurde mehrfach vorgestellt, sodass hier nicht im Einzelnen darauf eingegangen werden soll.

3.2. Kühlung der Abgase mit zusätzlichem Wasser

Weiteres Entwicklungspotential besteht heute im Wesentlichen für Feuerungsanlagen, in denen die Abgastemperaturen in den zugänglichen Bereichen zu heiß für das SNCR-Verfahren sind. Das Ziel ist hier, die notwendigen Betriebsbedingungen zu schaffen, d.h. die Abgase so weit abzukühlen, dass eine 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 nicht 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 Dampferzeugerfahrweise 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 7).

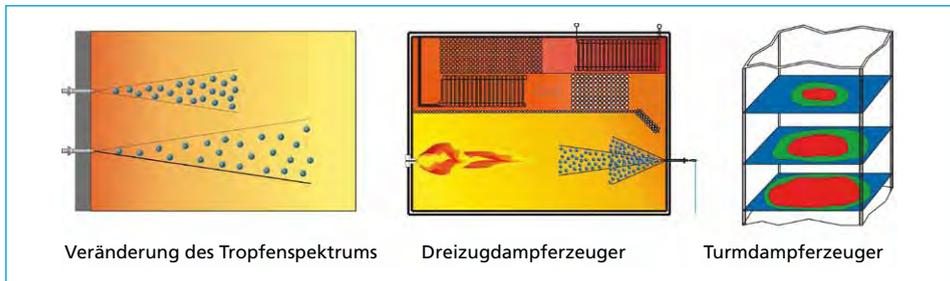


Bild 7: Kühlung von Abgasen durch Erhöhung der Verdünnungswassermenge

In Dreizugdampferzeugern gehört die Regelung der Wassermenge abhängig von der Dampferzeugerlast bzw. -temperatur seit vielen Jahren zum Standard. Bei diesen Anlagen kommen die o.g. Nachteile nicht zum Tragen, da immer gegen die Abgasströmung eingedüst wird, und die Wurfweiten bewusst verändert werden, um den Temperaturwechseln zu folgen.

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

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 Temperaturschiefagen unter Umständen Bereiche gekühlt werden, in denen die Abgastemperaturen optimal sind, was dann zu einem erhöhten NH_3 -Schlupf führen kann.

Die Methode ist deshalb vorzugsweise für Verbrennungsanlagen geeignet, die nicht ständig in Temperaturbereichen betrieben werden, in denen eine Zusatzkühlung der Abgase notwendig ist oder in denen ein gleichmäßiges Temperaturprofil vorliegt. Durch Zu- bzw. Abschalten der Kühlung mit Wasser kann in vielen Fällen eine Eindüseebene für Reduktionsmittel entfallen. In der auf Bild 8 gezeigten Anlage die nur sehr selten unter Volllast betrieben wird, konnte man so auf die Nachrüstung eines Katalysators verzichten. Allein durch Zugabe des Kühlwassers konnte eine Reduzierung des NO_x -Reingaswertes von 380 auf 180 mg/Nm^3 erreicht werden. Die Rohgaswerte (NO_x ohne SNCR) betragen etwa 400 mg/Nm^3 .

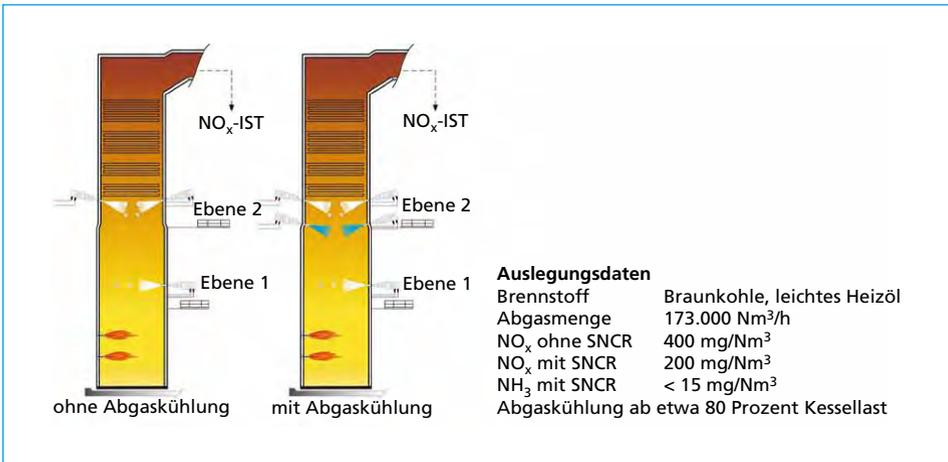


Bild 8: Kohlegefeuerter Dampferzeuger mit und ohne Abgaskühlung

4. Neuere Methoden der Abgasentstickung

4.1. Selektive Kühlung der Abgase

Die konsequente Weiterentwicklung der oben beschriebenen Methode der Abgaskühlung ist die *Selektive Kühlung*. Ähnlich wie das oben beschriebene Verfahren wird auch hier eine zusätzliche Eindüsebene für Kühlwasser unterhalb der oberen Eindüsebene installiert. Damit die Temperaturschichtlagen berücksichtigt und nur die Zonen gekühlt werden, die zu heiß sind, wird bei Bedarf nur eine einzelne bzw. eine Gruppe von Kühllanzen abhängig vom Temperaturprofil aktiviert.

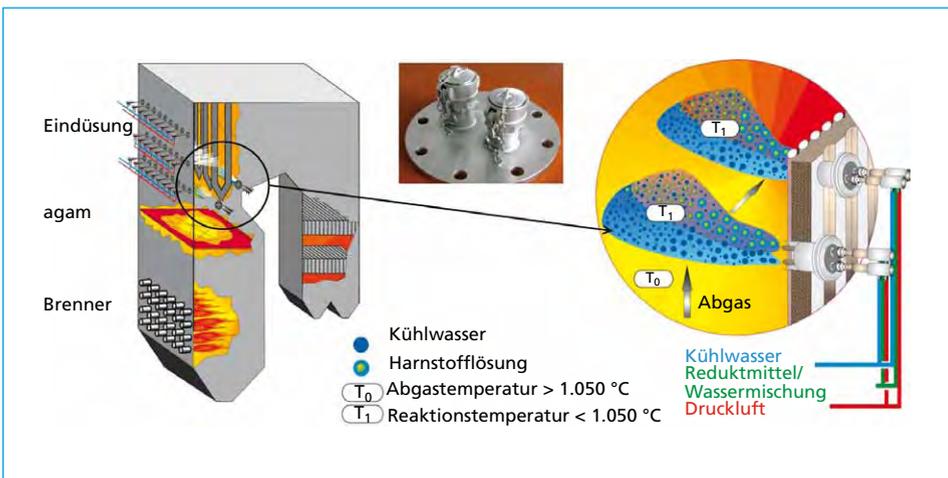


Bild 9: Selektive Abgaskühlung für kohlegefeuerten Dampferzeuger

Dieses Konzept bietet wesentliche Vorteile für Dampferzeugeranlagen, die bei wechselnden Lasten betrieben werden und mit einer SNCR-Anlage ausgerüstet sind, in der die einzelnen Lanzen basierend auf einer kontinuierlichen Messung des Temperaturprofils – wie z.B. einer akustischen Temperaturmessung (agam) – umgeschaltet werden (Bild 9).

4.2. TWIN-NO_x-Verfahren – Kombination von Harnstofflösung und Ammoniakwasser

Bei der Suche nach verfahrenstechnischen Verbesserungen im MKV Fenne wurden unter gleichen Betriebsbedingungen in einem Kurzversuch die Reduktionsmittel Harnstoff und Ammoniak gegenüber gestellt (Bild 10).

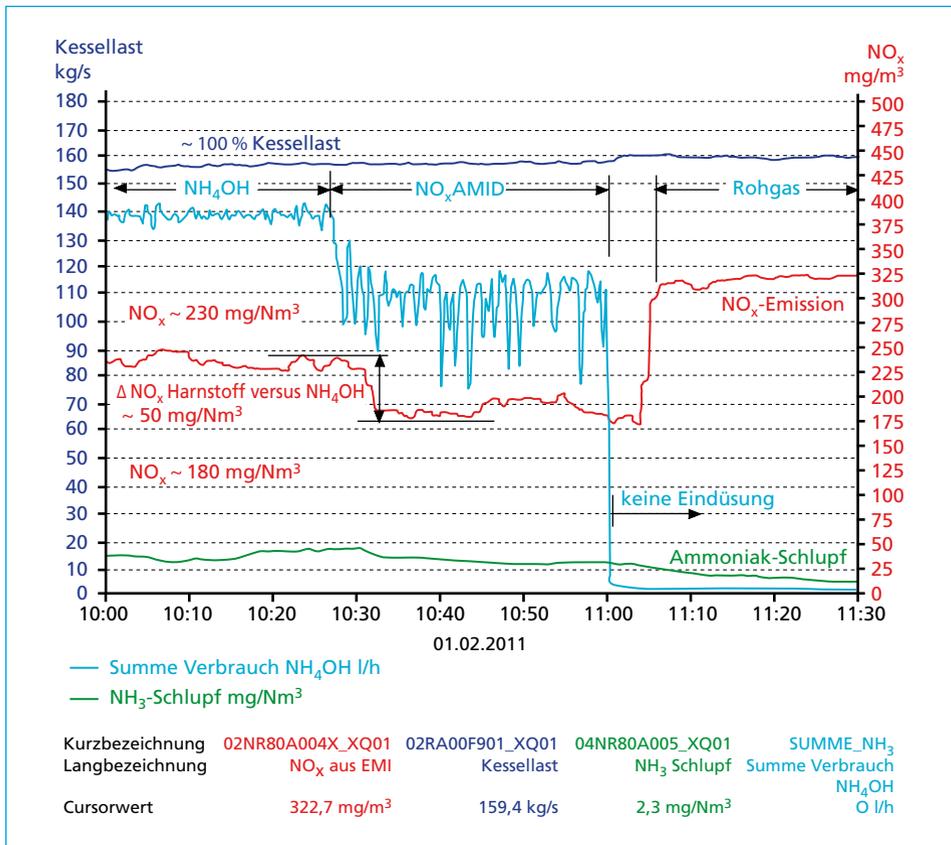


Bild 10: Wechselweise Eindüsung von Ammoniakwasser und Harnstofflösung

Die Ergebnisse dieses Versuchs zeigten, dass unmittelbar nach der Eindüsung von Harnstofflösung die NO_x-Reingaskonzentration um etwa 50 mg/Nm³ sank und der Verbrauch von Reduktionsmitteln deutlich sank. Schon auf den ersten Blick wurde also deutlich, dass bei dieser Dampferzeugerbauweise unter Vollast mit Harnstofflösung bessere Ergebnisse als mit Ammoniakwasser zu erzielen sind.

Grundsätzlich wurde mit den Versuchen auch bestätigt, dass schwer flüchtige, auf Harnstoff basierende Reduktionsmittel (NO_x AMID) erst am Ende der Tropfen-Flugbahn freigesetzt werden, während leicht flüchtige Reduktionsmittel (NH_3) in der Nähe der Düsen und nahe den Dampferzeugerwänden verdampfen (Bild 11). Zusätzliche Tests zeigten darüber hinaus, dass das Verfahren weiter verbessert werden kann, indem die Reduktionsmittel in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen gewechselt werden.

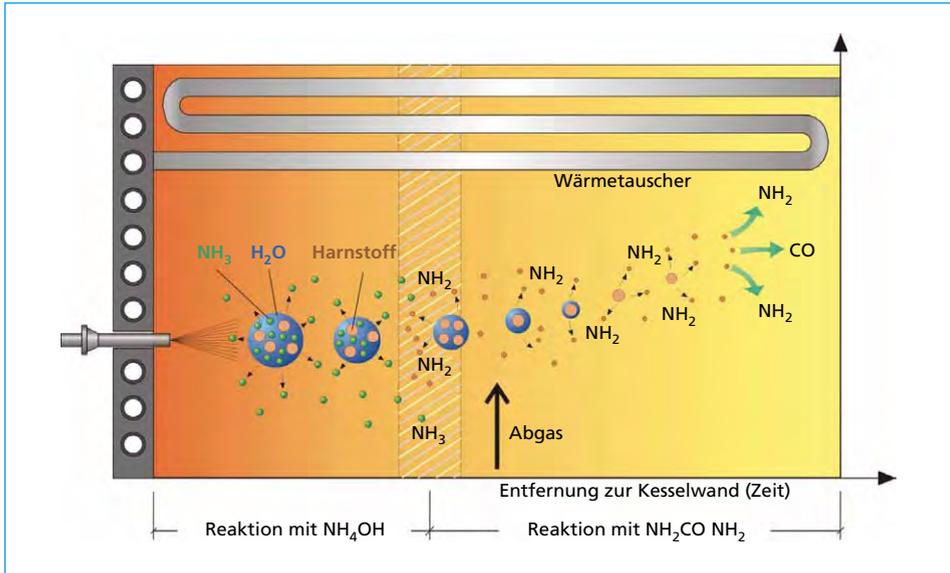


Bild 11: TWIN- NO_x – Mischen von Ammoniakwasser und Harnstofflösung

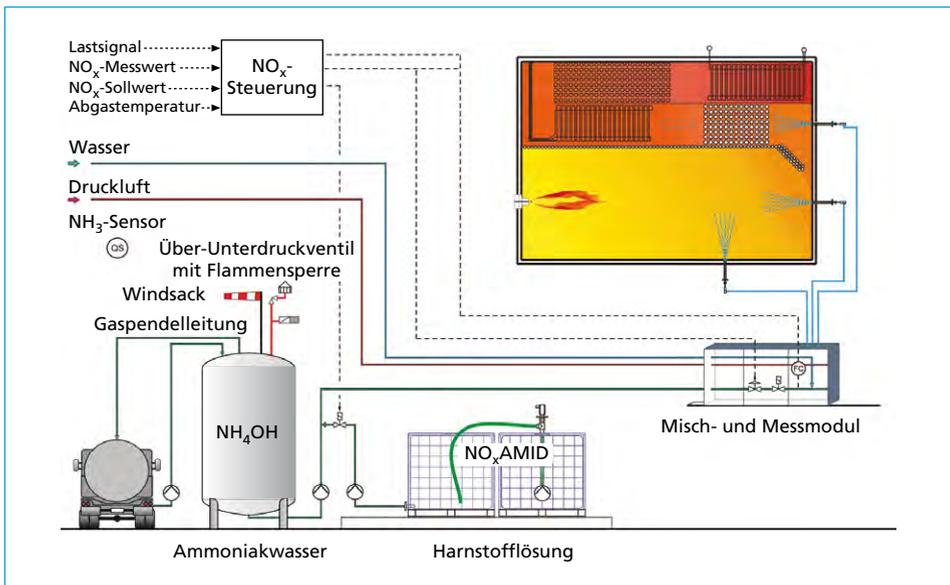


Bild 12: TWIN- NO_x -Verfahrensfließbild für einen mit Leichtöl gefeuerten Dampferzeuger

Optimal lassen sich die positiven Effekte beider Mittel nutzen, wenn beide Reduktionsmittel gleichzeitig eingedüst werden und das Mischungsverhältnis je nach den Betriebsbedingungen den Erfordernissen angepasst wird.

Das neue Verfahren, das aus diesen Erfahrungen heraus entwickelt wurde, ist unter dem Markennamen TWIN-NO_x registriert.

Bild 12 zeigt ein typisches Verfahrensflißbild einer SNCR-Anlage für einen mit Leichtöl gefeuerten Dampferzeuger. Die Anlage wurde ursprünglich für den Betrieb mit Ammoniakwasser gebaut. Als sich zeigte, dass bei Vollast die garantierten NO_x-Reingaswerte < 180 mg/Nm³ wegen zu hoher Temperaturen in der Brennkammer nicht erreicht werden konnten, wurde die Anlage für den zusätzlichen Betrieb mit Harnstofflösung umgerüstet. Betriebsdaten des ersten kommerziellen Einsatzes des TWIN-NO_x-Verfahrens im Jahr 2010 sind Bild 13 zu entnehmen.

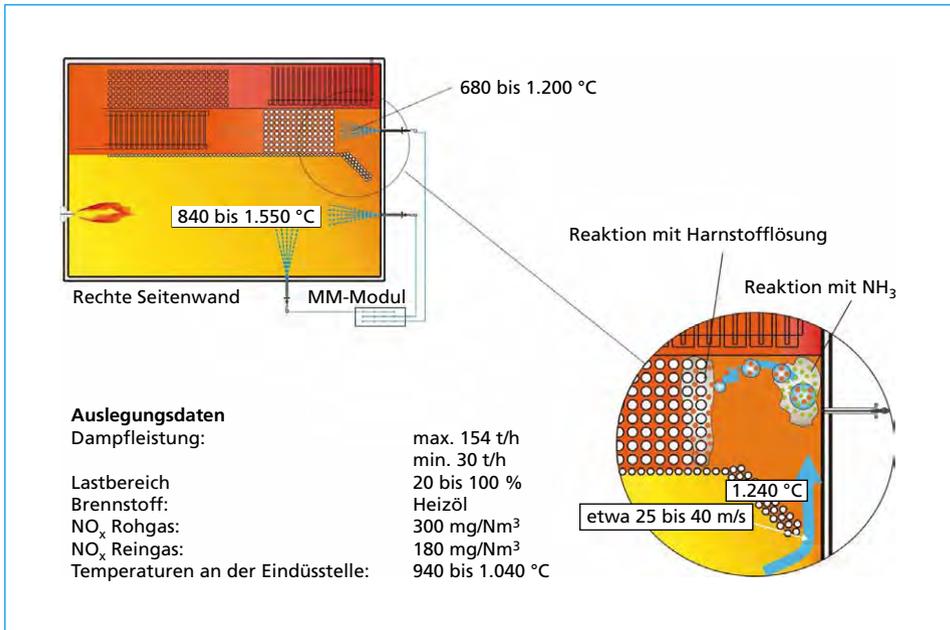


Bild 13: Reaktionen von Harnstofflösung und Ammoniakwasser in einem Flammrohrdampferzeuger

An einem kohlegefeuerten Dampferzeuger (Bild 14) wurde 2009 eine mit Ammoniakwasser betriebene SNCR-Anlage nachgerüstet. Die gültigen NO_x-Grenzwerte von 300 mg/Nm³ werden in allen Lastbereichen seit der Inbetriebnahme nicht nur eingehalten, sondern sogar deutlich unterschritten. Für die Zukunft ist jedoch bereits geplant, Kohle mit höheren Stickstoffgehalten zu verbrennen, was wiederum zu deutlich höheren NO_x-Rohgaswerten führen würde. Darüber hinaus wird damit gerechnet, dass ab 2015 die NO_x-Grenzwerte von 400 mg/Nm³ auf 200 mg/Nm³ gesenkt werden. Diese Werte sind mit dem jetzigen Konzept nicht mit allen Kohlequalitäten über den gesamten Lastbereich einzuhalten.

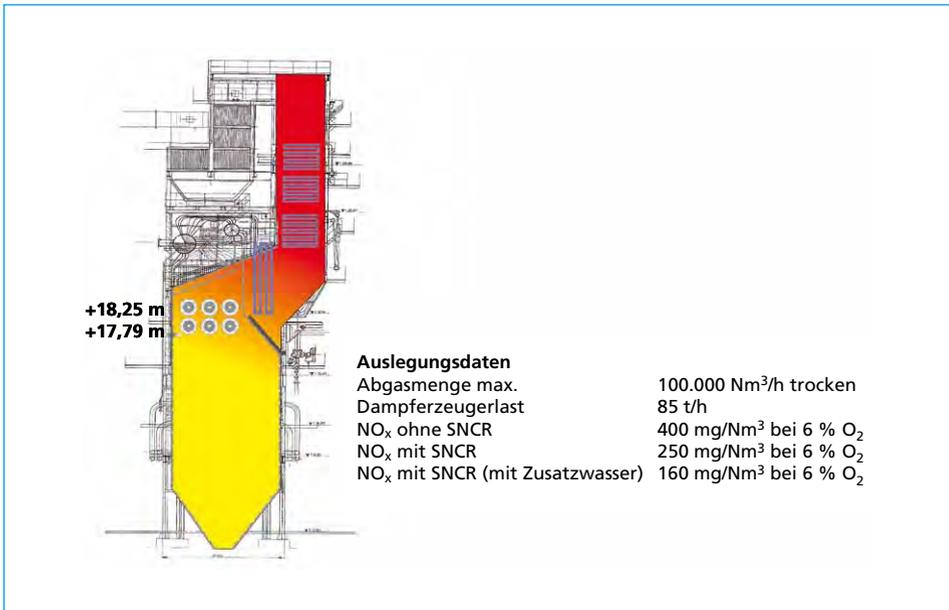


Bild 14: Kohlegefeuerter Dampferzeuger – Nachrüstung einer mit Ammoniakwasser betriebenen SNCR-Anlage

Abhängig von der Dampferzeugerlast, den Brennern in Betrieb und den Zyklen der Rußbläser treten häufig Temperaturverteilungen und Strömungszustände auf, die kaum reproduzierbar sind. Um die Gegebenheiten des Dampferzeugers im Eindüsiskonzept angemessen berücksichtigen zu können, werden seit Frühjahr 2014 Temperaturmessungen mit Absaugpyrometern durchgeführt. Darüber hinaus werden mit dem TWIN-NO_x-Verfahren Versuche bei schwierigen Betriebszuständen gefahren, um belastbare Informationen zu bekommen, ob und ggf. wie die SNCR-Anlage so ertüchtigt werden kann, dass NO_x-Reingaswerte < 200 mg/Nm³ sicher eingehalten werden.

Die bisherigen Ergebnisse sind überzeugend: Mit Harnstoff bzw. der Mischung aus Harnstoff und Ammoniakwasser sind auch bei kritischen Betriebszuständen die NO_x-Reduktionen um etwa 50 mg/Nm³ höher als mit Ammoniakwasser allein.

4.3. Optimierung von SNCR und Feuerung durch aufeinander abgestimmte Maßnahmen

Obwohl der Prozess weitgehend in der Feuerung stattfindet, wo die Verbrennung noch nicht abgeschlossen ist, werden SNCR-Anlagen als Sekundärmaßnahmen zur NO_x-Abscheidung betrachtet und können im Endergebnis nur so gut sein wie es die Feuerung zulässt.

Deshalb sollte es auch das Ziel von Primärmaßnahmen sein, optimale Bedingungen für die SNCR-Technik zu schaffen. Dazu gehört im Wesentlichen, die NO_x-Bildung schon während des Verbrennungsprozesses weitgehend zu unterdrücken sowie möglichst

homogene Abgasströmungen und gleichmäßige Temperaturverteilungen zu schaffen. In der Kombination mit dem SNCR-Verfahren sind NO_x -Reingaswerte zu erzielen, die mit einer Maßnahme allein nicht möglich wären.

In der praktischen Anwendung müssen Kompromisse zwischen der technischen Machbarkeit und den Auswirkungen auf die Kosten und das Betriebsverhalten gefunden werden, da beide Maßnahmen Vor- und Nachteile haben. In der Feuerung kann es u.a. aufgrund von Sauerstoffmangel Materialauszehrungen geben. Beim SNCR-Verfahren führt ein überhöhter NH_3 -Schlupf zur Bildung von Ammoniumsalzen, die im weiteren Abgasweg Probleme verursachen können. Dazu gehören z.B.: Ablagerungen von Ammoniumsalzen in den Wärmetauschern, Belastung der Flugasche sowie der Nebenprodukte aus der Abgasreinigung durch NH_3 sowie Belastung des Abwassers aus der Abgasreinigung durch NH_3 .

Wie Versuchsergebnisse in verschiedenen Kraftwerken in Polen am gleichen Dampferzeugertyp (OP 650) belegen, hat die Anordnung der Brenner einen entscheidenden Einfluss auf die Abgasströmungen und die Temperaturverteilung und damit auf die Wirksamkeit des SNCR-Verfahrens (Bild 15). Die bei Weitem besten Ergebnisse mit Abscheidegraden bis zu 58 Prozent wurden im Kraftwerk Polaniec erzielt, in dem die Brenner in den Ecken angeordnet sind. Gegenüber anderen Brennerkonfigurationen wird mit diesem Konzept eine Drehbewegung der Abgase erzeugt. Dies führt zu niedrigeren Temperaturen der Abgase am Eintritt in die Berührungsheizflächen, zu deutlich verminderter Bildung von Strähnen und weniger ausgeprägten Temperaturschiefen als z.B. bei Front- oder Boxerfeuerungen.

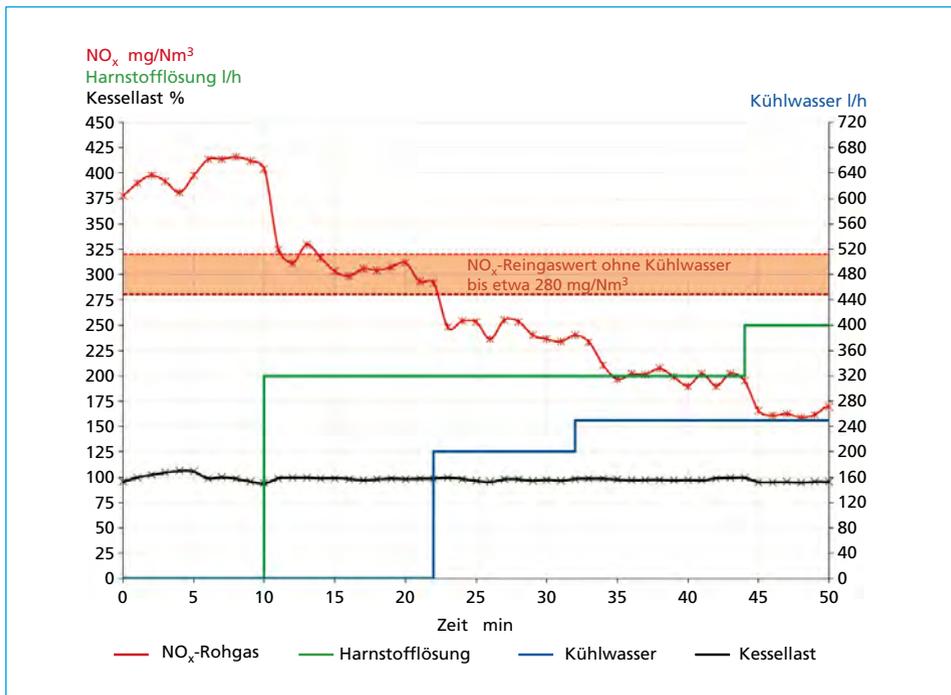


Bild 15: Erhöhung der NO_x Abscheidung durch Abgaskühlung mit Zusatzwasser

Mit Computersimulationen kann man heute die für das Verfahren maßgeblichen Betriebsbedingungen wie Temperatur- und Strömungsverhältnisse aber auch die Verteilung der Komponenten im Abgas, wie NO_x , CO , CO_2 usw., relativ genau darstellen. Die sich daraus ergebenden Möglichkeiten müssten nur noch konsequenter genutzt werden.

An einem anderen Kraftwerksstandort in Polen, im Kraftwerk Jaworzno, sind sechs kohlegefeuerte Dampferzeuger des Typs OP 650 mit Frontfeuerung in Betrieb. Nach der Erneuerung der Brenner wurde zunächst in einem dieser Dampferzeuger eine kommerzielle SNCR-Anlage eingebaut. Die Erfahrungen aus den Testläufen an dem oben genannten Dampferzeuger wurden dabei berücksichtigt (Bild 16).

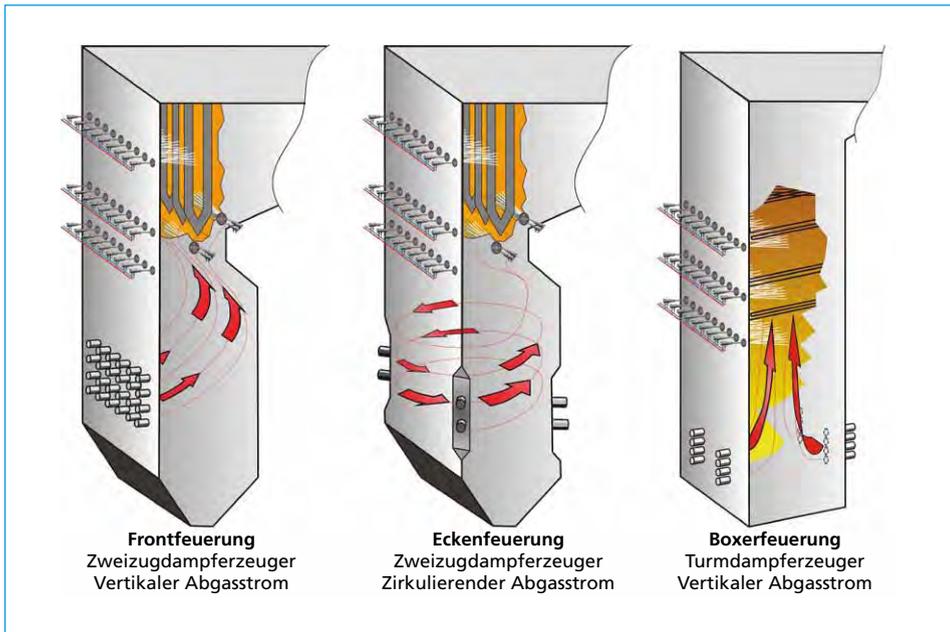


Bild 16: Auswirkung der Brenneranordnung auf die Abgasströmung

Für die Eindüsung des Reduktionsmittels Harnstofflösung wurden drei Eindüseebenen mit Einzellanzenumschaltung vorgesehen, mit denen auf Lastwechsel bzw. Temperaturänderungen reagiert werden kann. Wegen der extrem großen Temperaturschiefen bis etwa 200 K, die zu Beginn der Planungsphase der SNCR-Anlage gemessen wurden, wurde ein akustisches Temperaturmesssystem (agam) mit zwei Ebenen installiert. Die zweite Ebene wird für eine noch präzisere Temperaturmessung der Abgastemperaturen in der Nähe der Eindüslanzen eingesetzt sowie zur Ermittlung des Temperaturgradienten zwischen den zwei agam-Ebenen.

Die SNCR-Anlage wurde im März 2012 erfolgreich in Betrieb genommen und wenig später dem Betreiber übergeben. Der kommerzielle Betrieb läuft seitdem reibungslos und sehr zur Zufriedenheit des Betreibers. Ein zweiter Dampferzeuger wurde im September 2012 übergeben und ein dritter im November 2013. Der vierte Dampferzeuger wird voraussichtlich Ende 2014 übergeben (Bild 17).

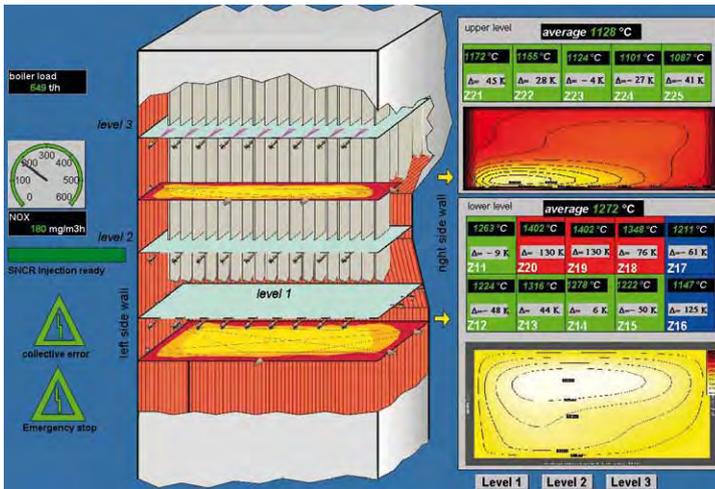


Bild 17: Kohlegefeuerter Dampferzeuger – Anzeige von Betriebsdaten und Temperaturprofilen in zwei Ebenen



Bild 18: Zeitschiene der SNCR Inbetriebnahmen im Kraftwerk Jaworzno III, Polen

Da sich bei der Inbetriebnahme des ersten Dampferzeugers herausstellte, dass die Abgastemperaturen unter Vollast höher waren als erwartet, wurde die obere Eindüsebene im zweiten Dampferzeuger etwas weiter nach oben verschoben, wo die Temperaturen niedriger sind. Obwohl im ersten Dampferzeuger alle Garantiewerte erreicht wurden, wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Hersteller der Brenner die Ergebnisse analysiert, weitere Optimierungsmöglichkeiten entwickelt und Schritt für Schritt angewendet.

Außerdem wurden beträchtliche Schwankungen und Schief lagen der NO_x -Rohgaskonzentration gemessen. Um die Leistung der SNCR-Anlage zu optimieren, wurden drei NO_x -Regelventile installiert. Hierdurch konnte ein niedrigerer Ammoniakschlupf, sowohl im Abgas wie auch in der Asche erzielt, und der Verbrauch von Ammoniakwasser gesenkt werden.

In Verbindung mit Primärmaßnahmen werden die geforderten NO_x -Grenzwerte bei allen drei Dampferzeugern von $< 200 \text{ mg/Nm}^3$ unter allen Betriebsbedingungen eingehalten (Bild 18). Die mittlere NH_3 -Belastung in der Flugasche betrug z.B. im Zeitraum vom 01. Januar 2013 bis 30. Juli 2013 54 mg/kg nach Dampferzeuger.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In kleineren Verbrennungsanlagen, die z.B. Abfall oder Biomasse verbrennen, bestimmt das SNCR-Verfahren schon seit Jahren den Stand der Technik. Inzwischen liegen aber auch für Großfeuerungsanlagen mit einer Leistung von $> 200 \text{ MW}_{el}$ mehrjährige Betriebserfahrungen vor, die belegen, dass die in der EU ab 2016 geltenden NO_x -Grenzwerte $< 200 \text{ mg/Nm}^3$ sicher und verlässlich eingehalten werden können.

Anfangsergebnisse mit neueren Techniken wie der Einzellanzenumschaltung, dem TWIN- NO_x -Verfahren, der Selektiven Abgaskühlung und der zielgerichteten Kombination mit Primärmaßnahmen weisen darauf hin, dass das Potenzial noch längst nicht ausgeschöpft worden ist. Die neue Zielrichtung sind Anlagen für Dampferzeuger mit Leistungen von etwa 300 bis 500 MW_{el} .

6. Literatur

- [1] Lahl, U.: Neue Anforderungen an die Abgasreinigung – die 37. BImSchV. Thomé-Kosmiensky, K.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Band 4. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kosmiensky, 2008, S. 153 – 162
- [2] Moorman F., von der Heide B., Stubenhöfer C.: Umrüstung der Abfallverbrennungsanlage Wijster/Niederlande von SCR auf SNCR. In: Thomé-Kosmiensky, K.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Band 10. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kosmiensky, 2013, S. 683 – 702
- [3] von der Heide, B.: Advanced SNCR Technology for Power Plants. Power-Gen International, Las Vegas, Dezember 13 bis 15, 2011
- [4] von der Heide, B.: SNCR-Verfahren der Zukunft für Großfeuerungsanlagen – Konzepte, Erfahrungen, TWIN- NO_x -Verfahren. In: Beckmann, M.; Hurtado, A. (Hrsg.): Kraftwerkstechnik – Sichere und nachhaltige Energieversorgung – Band 4. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kosmiensky, 2012, S. 623 – 635