K. J. Thomé-Kozmiensky
Michael Beckmann



Energie aus Abfall

Band 6

TK

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Energie aus Abfall – Band 6
Karl J. Thomé-Kozmiensky, Michael Beckmann.
– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009
ISBN 978-3-935317-39-9

ISBN 978-3-935317-39-9 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 2009
Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky und Dr.-Ing. Stephanie Thiel
Erfassung und Layout: Petra Dittmann, Martina Ringgenberg und Andreas Schulz
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 Funksendung, 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.

Inhaltsverzeichnis

Strategien

Zielkonflikt Emissionen und Energieeffizienz am Beispiel der 37. BImSchV
Michael Beckmann, Uwe Gampe,
Sebastian Grahl und Stefan Hellfritsch 3

Energie aus Abfall – preiswert, ressourcenschonend und klimaneutral
Martin Brunner 35

Strom- und Fernwärmeversorgung durch Abfallverbrennung
Michael Pförtner und Andreas Kräuter 45

Verbrennung von Siedlungsabfällen und Ersatzbrennstoffen

Das Betriebskonzept von Wheelabrator für Abfallverbrennungsanlagen
Gary Aguinaga und Amedeo Vaccani 65

Das Baumgarte Konzept für Abfälle
– Rost und Kessel als Einheit –
Jörg Eckardt und Gerald Grüner 79

Die Martin Trockenentschlackung mit integrierter Klassierung
Johannes J. E. Martin, Eva-Christine Langhein,
Dragutin Brebric und Michael Busch 97

Trockener Schlackenaustrag
– ungenutzte Potentiale in der Abfallverwertung –
Daniel Böni 109

Kopplung einer modernen Feuerungsregelung
mit einem modellbasierten System
– praxistauglich und praxisrelevant?
Martin Zwiellehner, Ragnar Warnecke,
Volker Müller und Martin Weghaus 125

**Reststoffverwertung in der Papierindustrie
am Beispiel des Heizkraftwerkes Wörth der Papierfabrik Palm
– Konzept, Realisierung, Inbetriebnahme und erste Betriebserfahrungen –**
Joachim Sommer, Rüdiger Trumpf und Andreas Haas 155

Kosten der Ersatzbrennstoffverbrennung in Monoverbrennungsanlagen
Werner Schumacher und Günter Nebocat 185

Fernwärme und -kälte durch Siedlungsabfallverbrennung

**Abfallverbrennung und Wärmeverwertung
– Optimierung der Energieeffizienz –**
Christoph Müller 223

**Entwicklung der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
am Beispiel der Städtischen Werke AG in Kassel**
Karl-Heinz Schreyer und Norbert Tanner 239

Bau und Betrieb von Fernkälte in Wien
Alexander Wallisch 275

Immissionsschutz

Leistungsfähigkeit der trockenen und quasitrockenen Abgasbehandlung
Klaus-Axel Riemann 283

**Praxiserfahrungen bei Einsatz der konditionierten Trockensorption
hinter Ersatzbrennstoffkraftwerken und Abfallverbrennungsanlagen**
Rüdiger Margraf 313

**Ökologischer Vergleich der Sorptionsmittel
Calciumhydroxid und Natriumhydrogencarbonat**
Christian Pacher, Mario Mocker,
Gabriele Weber-Blaschke und Martin Faulstich 331

Anlagentechnik für die verschärften NO_x-Grenzwerte Grundlagen – Konzepte – Ausführungsbeispiele
Christian Fuchs 359

Erste Erfahrungen mit 100/10 SNCR-Anlagen
Thomas Reynolds 377

Sichere Einhaltung der Emissions-Grenzwerte beim An- und Abfahren von Abfallverbrennungsanlagen
Jutta Ansorg, Martin Horeni und Matthias Walther 385

Bromgestützte Quecksilberabscheidung aus Abgasen der Abfall- und Kohleverbrennung
Bernhard W. Vosteen 403

Korrosionsdiagnose

Methoden der Korrosionsdiagnose bei der Verbrennung schwieriger Brennstoffe
Michael Beckmann, Sascha Krüger, Kathrin Gebauer, Martin Pohl, Wolfgang Spiegel und Wolfgang Müller 443

Korrosionsmonitoring in Abfallverbrennungsanlagen – Einsatz einer Korrosionssonde der Corrmoran GmbH –
Barbara Waldmann, David Schrupp-Heidelberger, Bernhard Stöcker, Ferdinand Haider, Siegfried R. Horn, Simone Maisch, Ragnar Warnecke und Volker Müller 461

Zum Verhalten von Schwefel in Abfallverbrennungsanlagen
Jörg Krüger 479

Cladding(ge)schichten – Erfahrungen als Grundlage für Qualitätsanforderungen
Thomas Herzog und Jörg Metschke † 505

Korrosionsminderung durch Schutzschichten

Acht Jahre hinterlüftetes Plattensystem – JuSys Air
Markus Horn, Franz Schuierer, Josef Drexler und Hans-Georg Beul 519

Korrosionsschutz von Kesselrohrwänden
– Keramische Feuerfestsysteme und metallische Beschichtungssysteme –
Karl-Ulrich Martin und Franz W. Albert 547

Cladding auf Nickelbasis
Wolfgang Hoffmeister 565

Erfahrungen mit thermisch gespritzten Schichten als Korrosionsschutz auf Wärmetauscherflächen in reststoffbefeuerten Dampferzeugern
Werner Schmidl 593

Thermische Spritzschichten – ein wirkungsvoller Korrosions- und Erosionsschutz in Energieanlagen und Abfallverbrennungsanlagen
Rüdiger Schülein und Steffen Höhne 613

Nickelbasislegierungen im heißen Teil des Dampferzeugers
– Erfahrungen in der Abfallverbrennungsanlage Stapelfeld –
Heino Sinn 637

Strategien der Betreiber für Korrosionsminderung

Erfahrungen mit Abfallverbrennungsanlagen am Standort Friesenheimer Insel
Uwe Zickert 653

Anwendung sensorischer Prozessinformationen am Beispiel der Korrosionsfrüherkennung
Wolfgang Spiegel, Thomas Herzog, Renate Jordan, Gabi Magel, Wolfgang Müller und Werner Schmidl 669

Sonderabfallverbrennung

Aufgabesysteme für die Sonderabfallbehandlung
Donat Bösch 687

Sonderabfallverbrennung in Drehrohröfen
Karl J. Thomé-Kozmiensky 709

Dank 781

Autorenverzeichnis 785

Inserentenverzeichnis 801

Schlagwortverzeichnis 811

Strategien

Zielkonflikt Emissionen und Energieeffizienz am Beispiel der 37. BImSchV

Michael Beckmann, Uwe Gampe, Sebastian Grahl und Stefan Hellfritsch

1. Die 37. BImSchV und ihre Auswirkungen auf die Kraftwerkstechnik 4

2. Bildung, Abbau und Minderung von NO_x 6

2.1. NO_x-Bildungsmechanismen 6

2.2. NO_x-Abbaumechanismen 7

2.3. Primärmaßnahmen 7

2.4. Sekundärmaßnahmen 8

3. Technische Konzepte zur Erfüllung der 37. BImSchV 9

3.1. Biomasse- und Abfallverbrennungskraftwerke 9

3.2. Braunkohlekraftwerke 13

3.3. Steinkohlekraftwerke 15

3.4. Anwendbarkeit der 37. BImSchV auf zukünftige CCS-Technologien 16

3.5. Gasturbinenkraftwerke 16

4. Auswirkungen der Minderungsmaßnahmen auf die Energieeffizienz 23

4.1. Biomasse- und Abfallverbrennungskraftwerke 23

4.2. Konventionelle Kohlekraftwerke 26

4.3. Gasturbinenkraftwerke 28

5. Zusammenfassung 31

6. Referenzen 31

Die 37. BImSchV zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes, in der Fassung vom 25. April 2008, sieht für Kraftwerksneubauten im Bereich der Feuerungs- und Gasturbinenanlagen einschließlich Gasturbinenanlagen zum Antrieb von Arbeitsmaschinen sowie für Verbrennungs- und Mitverbrennungsanlagen eine weitreichende Reduzierung der Stickoxid-Emissionen vor.

Zur Minderung von Stickoxiden sind selbstverständlich zuerst die Primärmaßnahmen weiter auszuschöpfen. Lassen sich die Grenzwerte jedoch nicht allein dadurch sicher einhalten, so müssen Sekundärmaßnahmen eingesetzt werden. Die Absenkung der Emissionen, insbesondere bei Anwendung von Sekundärmaßnahmen, hat in der Regel einen zusätzlichen Aufwand an Energie zur Folge, das heißt, der Wirkungsgrad der Energieumwandlung sinkt und die spezifischen Emissionen – zum Beispiel Kohlenstoffdioxid – steigen.

Im vorliegenden Beitrag wird nach einer Beschreibung der technischen Grundlagen der Primär- und Sekundärmaßnahmen zur NO_x-Minderung für Biomasse- und Abfallverbrennungsanlagen, für Kohlekraftwerke und für Gasturbinen anhand von Modellrechnungen untersucht, inwieweit sich durch die Absenkung der NO_x-Emissionen gemäß der 37. BImSchV ein Zielkonflikt zwischen Emissionen und Energieeffizienz ergibt.

1. Die 37. BImSchV und ihre Auswirkungen auf die Kraftwerkstechnik

Als Stickoxid-Emissionen werden explizit Stickstoffmonoxid (NO) sowie Stickstoffdioxid (NO_2) benannt und in der 37. BImSchV weiter als Stickstoffdioxid angegeben [1].

Die beschlossenen Emissionsgrenzwerte beziehen sich auf einen Jahresmittelwert, der stets zu unterschreiten ist. Mit diesen Vorgaben wird das Ziel verfolgt, den Anlagenbetreibern eine Rechts- und Planungssicherheit für ab 2013 in Betrieb gehende Anlagen zu gewährleisten und dabei die auf europäischer Ebene festgesetzten Reduzierungsziele bis 2020 einzuhalten. Mit dieser Regelung soll insbesondere auf den erwarteten Zubau von fossilen Kraftwerken und neuen *Carbon Capture and Storage*-Technologien (CCS) Einfluss genommen werden [2].

Die dafür vereinbarten neuen Stickoxid-Grenzwerte sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Die Reduzierung von Schadstoffen in Kraftwerksprozessen ist – zumindest bei Anwendung von Sekundärmaßnahmen – mit einem zusätzlichen Energieaufwand verbunden, der zu einer Erhöhung des Eigenbedarfs führt oder zumindest mit einem zusätzlichen Energiebedarf bei der Herstellung und dem Transport, zum Beispiel von Additiven, behaftet ist. Legt man diesen Zusatzbedarf auf die Energieerzeugung aus fossilen Brennstoffen um, erhöht sich die insgesamt ausgestoßene Emissionsmenge und ergibt somit nur eine relative Schadstoffminderung. Dies hat zur Folge, dass nicht nur die jeweils zu reduzierende Substanz selbst eine relative Minderung erfährt, sondern zugleich andere Emissionen zwangsläufig zunehmen. Dieser Zusammenhang muss somit bei der Festlegung von Emissionsgrenzwerten, unter Berücksichtigung der besten verfügbaren Technologie,

Tabelle 1: Grenzwerte der 37. BImSchV

Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid, angegeben als Stickstoffdioxid, bei Einsatz von		Grenzwert
a)	festen oder flüssigen Brennstoffen sowie Abfällen und ähnlichen brennbaren Stoffen, ausgenommen bei ausschließlichem Einsatz von Biobrennstoffen gemäß § 2 Nr. 4 der Verordnung über Großfeuerungs- und Gasturbinenanlagen, in	
	1. Anlagen zur Herstellung von Zementklinker oder Zementen sowie Anlagen zum Brennen von Kalk, ausgenommen Anlagen zum Brennen von Kalk in Drehrohröfen mit Rostvorwärmer	200 mg/m³
	2. Anlagen zum Brennen von Kalk in Drehrohröfen mit Rostvorwärmer	350 mg/m³
	3. Anlagen zur Verbrennung und Mitverbrennung von Abfällen mit einer Feuerungswärmeleistung von mehr als 50 Megawatt	100 mg/m³
	4. anderen Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von	
	50 Megawatt bis 100 Megawatt	250 mg/m³
	mehr als 100 Megawatt	100 mg/m³
b)	Gasen der öffentlichen Gasversorgung und einer Feuerungswärmeleistung von mehr als 100 Megawatt in	
	1. Gasturbinenanlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung mit einem Gesamtwirkungsgrad von mindestens 75 Prozent	50 mg/m³
	2. Gasturbinenanlagen mit Kombibetrieb mit einem elektrischen Gesamtwirkungsgrad im Jahresdurchschnitt von mindestens 55 Prozent	50 mg/m³
	3. Gasturbinenanlagen zum Antrieb von Arbeitsmaschinen	50 mg/m³
	4. sonstigen Gasturbinenanlagen	35 mg/m³
	Heraufsetzung des Emissionsgrenzwertes bei erdgasgefeuerten Gasturbinen im Solobetrieb, deren Wirkungsgrad mehr als 35 % beträgt, entsprechend der prozentualen Wirkungsgraderhöhung bis auf maximal	50 mg/m³
	jeweils ab einer Last von 70 Prozent, unter ISO-Bedingungen (Temperatur 288,15 Kelvin, Druck 101,3 Kilopascal, relative Luftfeuchte 60 Prozent)	

mit in die Entscheidungsfindung einfließen. Ist in Zukunft beispielsweise eine katalytische Entstickung für Kohlekraftwerke zwingend erforderlich erhöht sich dadurch der Eigenenergiebedarf, was die Effizienz dieser Kraftwerke senkt und damit bei gleicher elektrischer Anschlussleistung zusätzliche Emissionen wie Schwefeldioxid und vor allem Kohlenstoffdioxid verursacht. Somit ist eine NO_x-Minderung in vielen Fällen an eine Erhöhung des CO_2-Ausstoßes gekoppelt.

In der Entstickung hat sich Ammoniak als Hilfsstoff durchgesetzt, was einerseits mit einem gewissen Herstellungsaufwand verbunden ist und andererseits Korrosionen hervorrufen oder einen erhöhten *Schlupf* zur Folge haben kann. Weiterhin besteht in Kraftwerksprozessen bei Anwesenheit von Schwefeloxiden und niedrigen Abgastemperaturen die Gefahr der Salzablagerung mit Bildung von Ammoniumsulfat sowie Ammoniumhydrogensulfat, die wiederum die Wirksamkeit von Entstickungskatalysatoren, die vor die Abgasentschwefelungsanlage geschaltet sind, mindern. Ebenso wird die Verwendbarkeit der Flugasche durch Anlagerung von Ammoniakverbindungen beeinträchtigt. Statt Ammoniak kann auch Harnstoff zum Einsatz kommen, bei dessen Zersetzung jedoch gleichfalls Ammoniak und des Weiteren CO_2 entstehen. Ferner unterliegt der Ammoniakschlupf selbst einem Emissionsgrenzwert, den es einzuhalten gilt.

2. Bildung, Abbau und Minderung von NO_x

2.1. NO_x-Bildungsmechanismen

Die NO_x-Bildung ist im Wesentlichen von der Temperatur des Verbrennungsprozesses und der Zusammensetzung des Brenngases abhängig. Bei den üblichen Verbrennungstemperaturen in konventionellen Feuerungen ist es in der Regel ausreichend die Entstehung von Stickstoffmonoxid zu betrachten, da Stickstoffdioxid in größeren Mengen erst bei tieferen Temperaturen, zumeist erst außerhalb der Brennkammer, gebildet wird. Die NO-Entstehungsmechanismen können wie in Bild 1 dargestellt nach Stickstoffquelle und Entstehungsort des Stickoxids eingeteilt werden. Genauere Erläuterungen dazu können beispielsweise den Veröffentlichungen von Thomé [4] und Scholz et al. [5] entnommen werden.

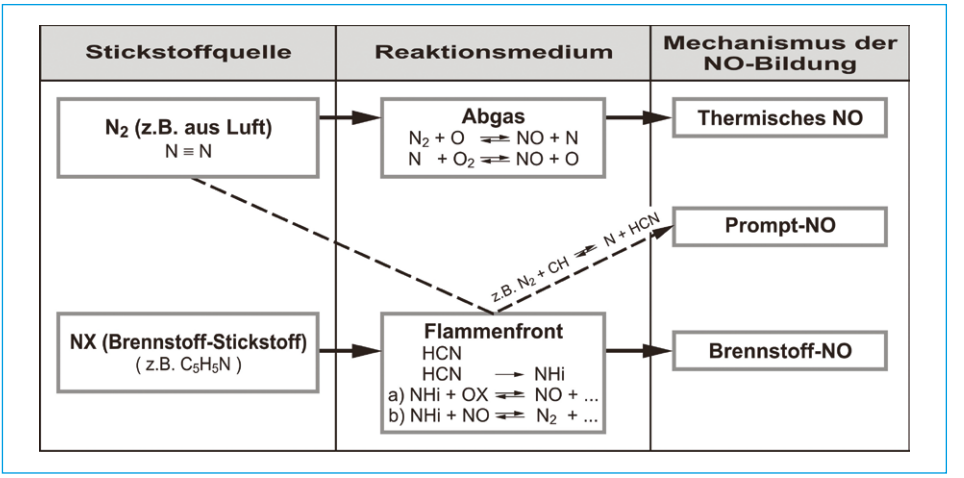

Bild 1: NO_x-Bildungsmechanismen in Abhängigkeit der Gastemperatur

Quelle: De Soete, G.: Physikalisch-chemische Mechanismen bei der Stickstoffoxidbildung in industriellen Flammen. Gas Wärme International 30, Nr. 1, 1981, S. 15-23

Aus der in Bild 1 ersichtlichen Einteilung ergeben sich somit die folgenden drei Mechanismen der Stickoxidbildung:

- Brennstoff-NO,
- thermisches NO und
- promptes NO.

Durch die Verbrennung gebildetes NO wandelt sich nur sehr langsam [4] und unter Energiezufuhr wieder in andere Stickstoffverbindungen um. Die Verweilzeit im sich an die Brennkammer anschließenden, zunehmend kühleren Abgaskanal reicht im Allgemeinen nicht für Rückreaktionen. Bei der Verbrennung in Dampferzeugern wird so meist weniger als 5 % des Stickstoffmonoxids in Stickstoffdioxid umgewandelt. In der Atmosphäre oxidiert das verbleibende NO dann über einen längeren Zeitraum zu NO_2.

2.2. NO_x-Abbaumechanismen

Grundsätzlich wird bei der NO_x-Reduzierung in zwei Kategorien unterschieden, die primären und die sekundären Maßnahmen. Primäre Maßnahmen zielen darauf ab die Entstehung von thermischem NO weitestgehend zu verhindern, indem auf die wesentlichen Bildungsmechanismen, nämlich Sauerstoffangebot, Flammen- beziehungsweise Verbrennungstemperatur sowie die Verweilzeit im Bereich hoher Temperaturen, Einfluss genommen wird. Praktisch angewandt wird dies durch Oxidationsmittelstufung, Brennstoffstufung oder Abgasrückführung. Sekundärmaßnahmen beinhalten alle Abscheideverfahren, die bereits entstandene und somit im Abgas enthaltene Stickoxide mindern und unschädlich machen. Die NO_x-Abbaumechanismen lassen sich in oxidative und reduktive Verfahren einteilen. Zur Verfügung stehen dabei sowohl die Absorption durch Eindüsen von geeigneten Waschmitteln als auch die Reduktion, die wiederum in selektive katalytische und selektive nicht-katalytische Entstickung unterteilt werden kann. Während die Reduktion sowohl bei den Primär- als auch bei den Sekundärverfahren Anwendung findet, sind oxidative NO-Abbaumechanismen nur als Sekundärmaßnahmen anwendbar. Aufgrund der Vielzahl der sich so ergebenden Verfahren werden die in der Kraftwerkstechnik genutzten NO-Reduktionsmechanismen in den folgenden zwei Kapiteln, unterteilt nach Primär- und Sekundärmaßnahmen, nur kurz erläutert.

2.3. Primärmaßnahmen

Aus Kapitel 2.1. geht hervor, dass die NO_x-Entstehung vor allem von den folgenden Faktoren abhängt:

- Sauerstoffkonzentration (atomar und molekular); bei promptem und Brennstoff-NO abhängig von der Luftzahl,
- Flammen- und Verbrennungstemperatur,
- Verweilzeit in der Reaktionszone sowie
- Konzentration von Stickstoff in der Verbrennungsluft sowie Stickstoffverbindungen im Brennstoff.

Primärmaßnahmen für NO_x-arme Feuerungen können grundsätzlich hinsichtlich ihrer Wirkungsweise in Maßnahmen zur Vermeidung der Bildung von NO – betrifft im Wesentlichen thermisches NO – und in solche zur Reduktion von bereits gebildetem NO unterteilt werden.

Ausgehend von den oben genannten Feuerungsparametern, den Eigenschaften der Brennstoffe und den Wirkungsweisen ergeben sich im Wesentlichen die folgenden drei wirksamen Primärmaßnahmen zur Stickoxidminderung, die auch miteinander kombiniert einsetzbar sind:

- Luftstufung bzw. Oxidationsmittelstufung,
- Brennstoffstufung sowie
- Abgasrückführung.

Weitere Ausführungen dazu sind beispielsweise bei Scholz et al. [5] zu finden.

2.4. Sekundärmaßnahmen

Wie im vorangegangenen Kapitel erwähnt, ist die Wirksamkeit der Primärmaßnahmen von den Brennstoffeigenschaften und den Feuerungsparametern abhängig. Da diese als Randbedingungen für den jeweiligen Prozess gleichzeitig die möglichen Maßnahmen zur Stickoxidminderung limitieren, ist eine Einhaltung der Emissionsgrenzwerte damit nicht immer gegeben. Daraus resultiert die Forderung nach Verfahren, die bereits entstandene Stickoxide nachträglich, also sekundär, reduzieren, wobei die Reaktionsprodukte entweder unschädlich für die Umgebung in diese abgegeben oder einer weiteren Verwendung zugeführt werden können.

Der Abbau von NO durch Sekundärmaßnahmen ist wie bereits erwähnt über zwei unterschiedliche Wege möglich. Zum einen über Oxidation und zum anderen über Reduktion. Bei der Oxidation entsteht zunächst NO_2, das mit Wasser zu

Tabelle 2: Anwendungsgrenzen für die SCR- und SNCR-Technologie unter technischen, ökonomischen sowie ökologischen Gesichtspunkten

Anwendungsgrenzen der SCR	
Temperaturen	Taupunktunterschreitungen können zur Bildung von Ammoniumchlorid, Ammoniumhydrogensulfat, Ammoniumsulfat sowie Alaunen führen. Ein unterer Grenzwert für eine ausreichende Reaktivität ist notwendig.
Katalysatormaterial	Bypass zur Verhinderung von Katalysatorbrand bei zu hoher CO-Konzentration im Abgas bzw. zu hoher Abgastemperatur notwendig. Reaktionen mit Bestandteilen des Abgases, vor allem Metallen wie Blei, sind möglich.
Schadstoffe für Anlagenkomponenten	Entstehung von SO_3 im Katalysator kann die Bildung von Ammoniumhydrogensulfat fördern, was Verklebungen und Korrosionen an nachgeschalteten Anlagenteilen verursacht.
Wirkungsgrad/ Wirtschaftlichkeit	Der energetische Aufwand für hohe Entstickungsgrade bei niedrigen NO_x-Ausgangskonzentrationen steigt exponentiell, der anlagentechnische Aufwand vergrößert sich ebenfalls stark.
Anwendungsgrenzen der SNCR	
Temperaturen	Es können ebenfalls Ablagerungen und korrosives Verhalten durch die bei der SCR genannten Sekundärreaktionen (nahe Stöchiometrieverhältnis von 1) durch Taupunktunterschreitungen auftreten. Das ideale Temperaturfenster muss eingehalten werden, damit die Emissionsgrenzen für Ammoniak und Stickoxide garantiert werden können.
Feuerraumgröße und -geometrie	Der entsprechende Impuls für die jeweils notwendige Eindringtiefe muss wie die homogene Verteilung über großen Querschnitten gewährleistet werden, da eine schlechte Durchmischung zu einem hohen Ammoniakschlupf führen würde [8]. Möglicherweise ergeben sich Versperrungen im Feuerraum, beispielsweise durch Strahlungsheizflächen.
Umweltverträglichkeit (Ammoniakschlupf)	Der zu erreichende Entstickungsgrad wird unter anderem durch einen unzulässig hohen Ammoniakschlupf bei Unterschreitung des optimalen Temperaturbereichs und gleichzeitig hohem Stöchiometrieverhältnis begrenzt. Harnstoff darf gemäß Wasserhaushaltsgesetz nicht in das Grundwasser gelangen.
Wirkungsgrad/Wirtschaftlichkeit	Siehe SCR.

salpetriger Säure und Salpetersäure beziehungsweise zu Nitriten und Nitraten bei Anwesenheit von alkalisch reagierenden Substanzen, wie Ammoniak oder Calciumhydroxid aus der Abgasentschwefelungsanlage, reagiert. Die Nitrite lassen sich durch Oxidation in Nitrate überführen. Durch Trocknung und Filterung können die entstandenen Nitrate abgeschieden und entweder als Düngemittel weiterverwendet oder in Kläranlagen durch Bakterien zu molekularem Stickstoff abgebaut werden. Die Reduktion von NO hingegen führt über atomaren direkt zu molekularem Stickstoff, der problemlos wieder an die Umgebung abgegeben werden kann. Ausführliche Erläuterungen zu reduktiven und oxidativen Verfahren finden sich bei Thomé [4], Krüger [7] und von der Heide [8]. Während sich von den oxidativen Verfahren bislang keines in der Praxis der Kraftwerkstechnik durchgesetzt hat, zählen

- die selektive nicht-katalytische Reduktion (SNCR) und
- die selektive katalytische Reduktion (SCR)

bereits zum Stand der Technik. Aus den technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Randbedingungen, die an die Sekundärmaßnahmen SCR und SNCR gestellt werden, ergeben sich bestimmte Anwendungsgrenzen für den Einsatz (Tabelle 2).

Weiter sei erwähnt, dass auch

- die Reduktion durch das SCONO$_x$-Verfahren (vgl. [9]) und
- die Reduktion durch nasse Abgasreinigungsverfahren (EDTA)

Möglichkeiten zur sekundären NO$_x$-Minderung darstellen, worauf hier jedoch aufgrund der geringen praktischen Relevanz nicht näher eingegangen wird.

3. Technische Konzepte zur Erfüllung der 37. BImSchV

Die Grenzwerte der 37. BImSchV gelten sowohl für Feuerungsanlagen, Gasturbinenanlagen und solchen zum Antrieb von Arbeitsmaschinen, als auch für Verbrennungs- und Mitverbrennungsanlagen [1]. Unter der Vorgabe *Emissionen und Energieeffizienz* werden in dieser Veröffentlichung lediglich zur Energieversorgung genutzte Anlagen berücksichtigt, da für industrielle Anwendungen oder Verbrennungsanlagen keine Effizienz im herkömmlichen Sinne angesetzt werden kann. Deshalb wird unterteilt in

- Biomasse- und Abfallverbrennungskraftwerke,
- konventionelle Kohlekraftwerke – Braunkohle, Steinkohle – sowie
- Gasturbinenkraftwerke.

3.1. Biomasse- und Abfallverbrennungskraftwerke

Abfallverbrennungsanlagen (MVA) wurden zusätzlich in die 37. BImSchV aufgenommen und damit den konventionellen Kohlekraftwerken gleichgestellt. Der Grenzwert für Stickoxidemissionen halbiert sich somit ebenfalls auf 100 mg/Nm³.

Für Biomasse- und Abfallverbrennungsanlagen kommen in der Praxis überwiegend das SCR-Verfahren sowie das SNCR-Verfahren zum Einsatz. Wie aus Bild 2 ersichtlich, können sowohl mit der SCR- als auch mit der SNCR-Technik die Anforderungen aus der neuen Verordnung eingehalten werden. Es sind jedoch zunächst erst einmal die möglichen Primärmaßnahmen zur NO_x-Minderung (siehe Kapitel 2.3. bzw. [5] und [10]) auszuschöpfen. Als Beispiel kann hier der Einfluss einer Abgasrückführung im Bereich der Sekundärluft erwähnt werden. Mit deren Ersatz durch rückgeführtes Abgas verringert sich einerseits der Abgasmassenstrom (am Kamin) und andererseits werden bei richtiger Auslegung der Injektorstrahlen durch intensive Vermischung gleichzeitig Temperaturspitzen in der Nachverbrennung vermieden, was zu einer verminderten thermischen NO-Bildung führt. Beispielhaft ist der Einfluss der Abgasrückführung in den Nachverbrennungsprozess einer Abfallverbrennungsanlage in Bild 3 dargestellt [11]. Dabei wurde die Abgasrückführung durch die Zufuhr von Stickstoff (Inertgas) simuliert. Die vom Rost kommenden Abgase werden bei einem hohen Inertgasverhältnis mit Injektorstrahlen durchmischt, die kaum Sauerstoff enthalten. Damit können hohe Temperaturspitzen vermieden werden. Insgesamt erhält man so eine Absenkung der NO_x-Konzentration. Die über dem Inertgasverhältnis gleichbleibend niedrige CO-Konzentration zeigt, dass bei einer ausreichend ausgelegten Durchmischungsleistung der CO-Umsatz im vorliegenden Fall nicht unmittelbar vom Sauerstoffangebot abhängt.

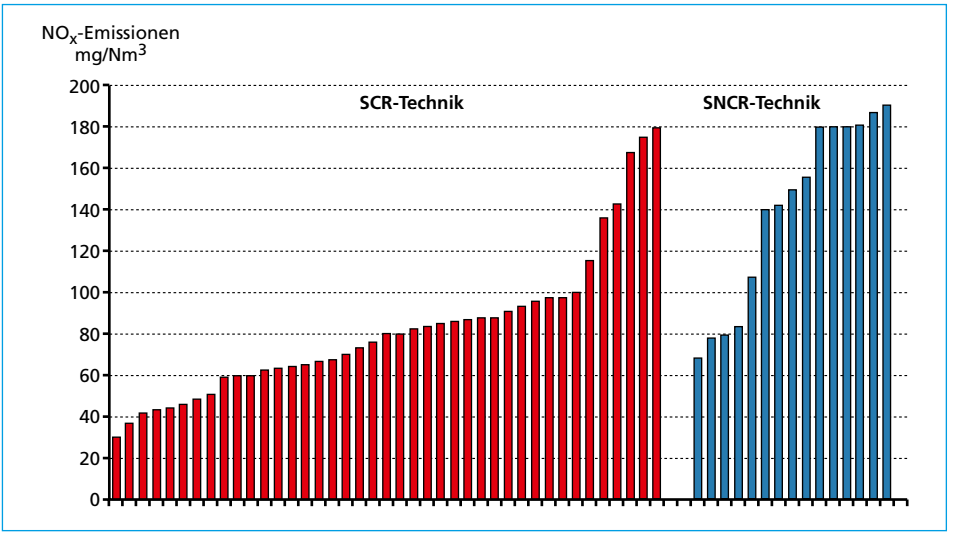

Bild 2: NO_x-Emissionen beim Einsatz von SCR- und SNCR-Technik in der Abfallverbrennung

Quelle: Lahl, U.: Neue Anforderungen an die Abgasreinigung – die 37. BImSchV. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall. Band 4, Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2008, S. 153-162

Durch die Anwendung der Primärmaßnahmen zur NO_x-Minderung wird der Aufwand, der mit den Sekundärmaßnahmen – SCR und SNCR – zur Grenzwerteinhaltung noch erforderlich ist, herabgesetzt.

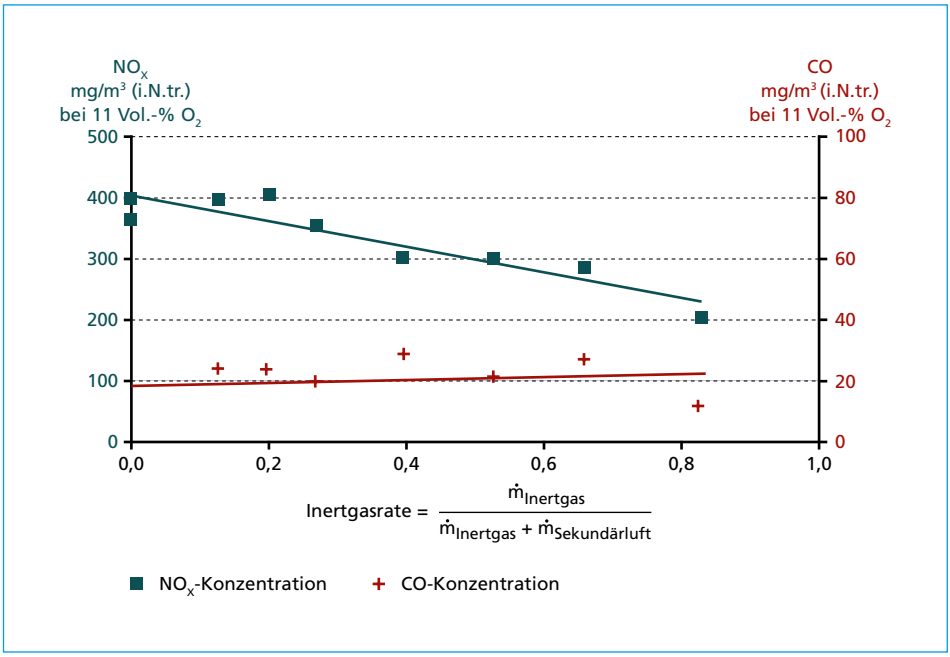

Bild 3: NO_x- und CO-Rohgaskonzentration in Abhängigkeit von der Inertgasrate in der Nachverbrennungszone

Quelle: Scholz, R.; Beckmann, M.; Horn, J.; Busch, M.: Thermische Behandlung von stückigen Rückständen – Möglichkeiten der Prozessführung im Hinblick auf Entsorgung oder Wertstoffrückgewinnung. In: Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK)/TÜ/Umwelt-Special 44, Nr. 10, 1992

In Anlagen die mit SCR-Technik ausgestattet sind, lassen sich Entstickungsgrade bis zu 90 % erreichen und es können alle drei in Bild 4 dargestellten Schaltungsvarianten eingesetzt werden. Durch die Hersteller der Katalysatoren wurden zu Beginn der Verwendung von SCR-Anlagen Betriebstemperaturen über 300 °C für alle Schaltungsvarianten vorgeschrieben, um eine Kondensation von Ammoniumsulfat beziehungsweise Alaunen auszuschließen sowie eine genügend große Reaktivität zu gewährleisten [7]. Die Reingasschaltung am kalten Ende (*Tail End*) ist mit einem höheren Energiebedarf für die Wiederaufheizung des Abgases bei gleichzeitig größeren Investitionskosten benachteiligt gegenüber den anderen SCR-Schaltungsmöglichkeiten. Aus diesem Grund wurde zur Verringerung der Betriebskosten die staubbeladene Rohgasschaltung (*High Dust*) mit dem Nachteil der verminderten Lebensdauer des Katalysators eingesetzt und später zur Verbesserung der Standzeiten auch die warme Reingasschaltung (*Low Dust*) mit niedrigeren zulässigen Abgastemperaturen im Katalysator angewendet. Abhängig ist die jeweils eingesetzte Variante vor allem vom Staub- und Schwermetallgehalt des Abgases, was zu Verstopfungen und Deaktivierung von Katalysatorelementen führen kann. Generell ist die Abgasreinigung für den größten Teil der Kraftwerke speziell zugeschnitten und auch die individuelle Brennstoffzusammensetzung führt dazu, dass kaum ein einheitliches Konzept existiert. Als aktives Katalysatormaterial werden meist Metalle, beispielsweise Vanadiumpentoxid

(V_2O_5), verwendet. Diese besitzen den Vorteil bereits bei geringen Mengen von etwa 1 % an Sauerstoff im Abgasstrom – die stets vorhanden sind – die Reaktion ablaufen zu lassen.

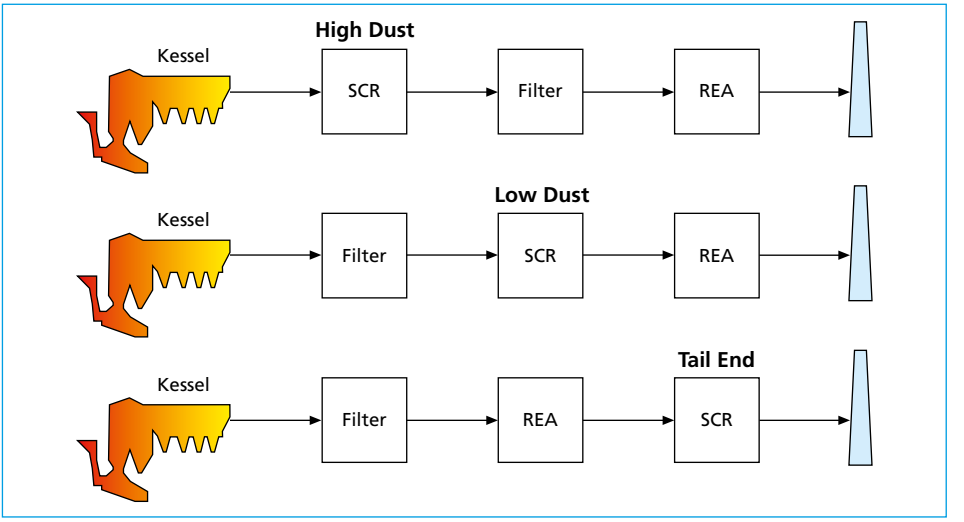

Bild 4: Varianten der SCR-Schaltung in der Abgasreinigung

Quelle: Schu, R.; Seiler, U.: HOK- und reststofffreie Abgasreinigung im Jahr 2013; In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall. Band 4, Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2008, S. 185-221

Die heutigen SNCR-Anlagen besitzen typische Entstickungsgrade von etwa 60 %, verwenden Ammoniakwasser oder Harnstofflösung als Reduktionsmittel und können NO_x-Grenzwerte von 120 bis 150 mg/Nm³ bei einem Ammoniakschlupf von 10 bis 15 mg/Nm³ sicher einhalten [8].

Um die Anforderungen der 37. BImSchV hinsichtlich der NO_x-Emissionen erfüllen zu können, müssen einerseits die Verbrennungsbedingungen durch Primärmaßnahmen vergleichmäßigt werden – Vermeidung von Temperaturschwankungen, Strähnenbildung usw. –, andererseits lassen sich durch Temperaturmessungen in einer oder mehreren Feuerraumebenen (Bild 5) sowie zusätzliche Düsenebenen größere Freiheitsgrade zur Optimierung der SNCR erreichen. Messungen an mehreren Verbrennungsanlagen im Dauerbetrieb zeigten, dass bei optimierter Prozessführung und SNCR-Einsatz die NO_x-Reingaswerte – bei einem Ammoniakschlupf von weniger als 10 mg/Nm³, teilweise auch deutlich darunter [13] –, eingehalten werden können.

Tabelle 3 gibt einen Überblick über derzeit erreichte Reingas-NO_x-Konzentrationen mit den zugehörigen Rohgaskonzentrationen, in Abhängigkeit des Typs der eingesetzten Sekundärmaßnahme und gegebenenfalls der Gastemperatur im Katalysator.

Von der Heide [8] und Kersting [14] haben Wirtschaftlichkeitsvergleiche für SCR und SNCR mit Harnstoff beziehungsweise Ammoniak für Abfallverbrennungsanlagen durchgeführt. Für die dort gewählten Beispiele zeigt sich, dass die SNCR gegenüber der SCR Vorteile in der Wirtschaftlichkeit aufweist.

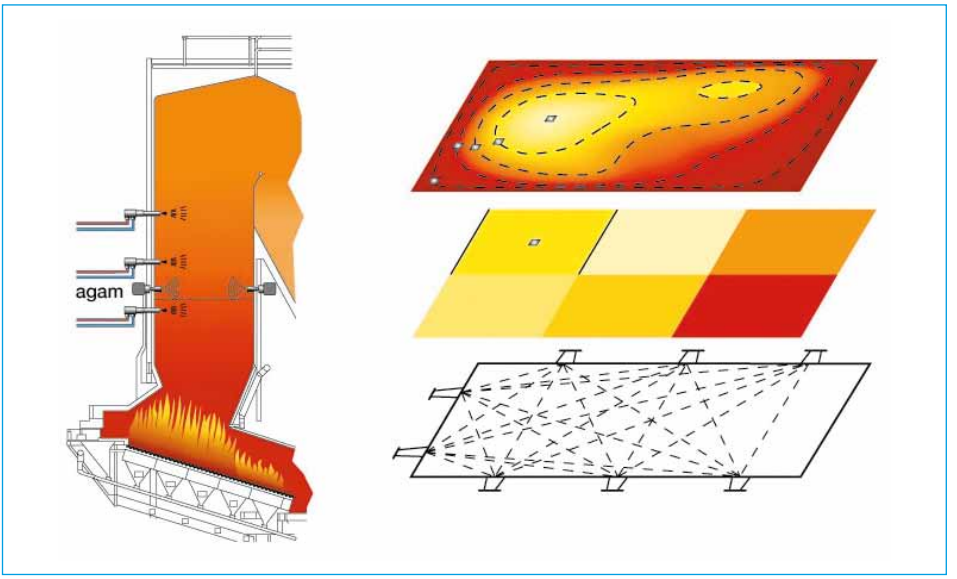

Bild 5: Akustische Gastemperaturmessung (agam)

Quelle: Von der Heide, B.: 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

Tabelle 3: Auswahl an Rohgas- und Reingas-Konzentrationen für unterschiedliche Technologien zur NO_x-Minderung

Anlage	Arbeits-temperatur Katalysator	Schaltung	Rohgas-NO_x-Konzentration	Reingas-NO_x-Konzentration	Reingas-NH_3-Konzentration
	°C		mg/Nm³	mg/Nm³	mg/Nm³
MVA Würzburg	250	High Dust	180	70	< 1
KVA Basel	300	Low Dust	unbekannt	~ 40	~ 1
MKW Schwandorf	210	Tail End	300 – 400	~ 60	unbekannt
AVI Amsterdam	–	SNCR	unbekannt	< 70	< 5

3.2. Braunkohlekraftwerke

Für bestehende Braunkohlekraftwerke wurden in der Vergangenheit Emissionsgrenzwerte für NO_x von 200 mg/Nm³ genehmigt (13. BImSchV). Diese Vorgabe lässt sich durch Kombination von Primärmaßnahmen erreichen:

- Luftstufung mit bis zu zwei Ausbrandluftebenen,
- Verringerung der Gesamtluftzahl,
- Vergrößerung der Höhe des Brennergürtels, zusätzliche Brüdenbrenner – Brennstoffstufung –,
- große Brennkammerhöhen – lange Verweilzeiten – sowie
- optimierte Kohlestaubbrenner – Luftstufung bereits am Brenner, selten bei Braunkohle.

Schlagwortverzeichnis

A

Abfahrbetrieb 388
Abfall
  biogener Anteil 46
  gefährlicher 709
  gipshaltiger 486
  Kunststoff 190
  -aufkommen 709
  -bunker 198, 248
  -mangelverlustarbeit 658
  -preis
    kritischer 655
      Einflussfaktoren 657
  -verbrennungsanlagen
    siehe auch MVA
    Einbindung in ein kohlegefeuertes Kraftwerk 59
    mittlerer energetischer Gesamtnutzungsgrad 52
    US-Markt 65
  -verbrennungskapazitäten
    der großen Energieversorgungsunternehmen in Deutschland 50
  -verbrennungsmarkt
    Überkapazitäten 50
Abgas
  Reduktion des Sauerstoffgehalts 524
  -behandlung
    Leistungsfähigkeit der trockenen und quasitrockenen 28
  -geschwindigkeiten 656, 661
  -reinigung 200, 385
    quasitrockene 28, 283, 289
    trockene 28, 167, 234, 283, 314, 332
  -rückführung 7, 10, 230
  -verluste 230
  -wärme
    Nutzung 235
Abnutzungsreserven
  vollständige Ausnutzung 662
Absorbentien 285, 339
Absorption 284
Absorptionskälteanlage 255
Absorptionskältemaschinen 275
  Effektivität 262
Abzehrrate 464, 469
Abzehrung 469, 642, 663
  durch Rußbläser-Einwirkung 682
  dynamische 643
  flächige 603
  lokal invasive 605
  selektive 603
Additiv ChlorOut 484
Additivzugabe
  gestufte 316
Adsorbentien 285
Adsorption 284
Adsorptionskälteanlage 257
Advanced Process Control (APC) 127
Aktivkohlen
  halogenierte 436
Aktivkomponenten 575
Akzeptanzprobleme
  der Abfallwirtschaft 49
Alkalisalze 536
Altholz 194
  Aufkommen 195
  -kraftwerke 194
Altpapier 158
  -aufbereitung 194
  -verwertung
    Abfälle 192
Altreifen 195
Aminradikale 379
Ammoniak 5, 379
  -schlupf 5, 8, 12, 360, 377
    Temperaturabhängigkeit 380
Ammoniumhydrogensulfat 5
Ammonium-Salze 393
Ammoniumsulfat 5, 8
  Desublimationstemperatur 364
  Minderung von Korrosionen 484
Anfahrbetrieb 388
Anfahrvorgang
  Dauer 389
Anlagenverfügbarkeit 662
APC 127
Asche-Salz-Proportionen 449, 671
Ascheschmelzverhalten 449
ASP 449, 671
Aufgabesystem 687
  Anforderungen 689
Aufmischungen 505, 583, 615
Auftragsschweißen
  siehe Cladding und Schweißplattierung
Ausbrandrate
  der Schlackenteilchen 112
Ausfallrisiken 662
Ausmauerung 88
  feuerfeste 88, 519, 679
  Standzeiten 541

B

Baumgarte Boiler Systems GmbH 79
Baustellenplattierung 580
Begrenzungsregler 129
Beläge 498, 509, 644
  salzige
    auf Katalysatoroberflächen 362
Belags
  -bildung 443, 670
  -monitor 449, 671
  -reifung 671
  -sensoren 671
    zur Erprobung von Additiven 683
  -sonde 449, 671
Beschichtungsverfahren
  thermische 594
Beschickung 137, 689
Beste Verfügbare Techniken 292
Beton
  selbstfließender 552
  -abkleidungen
    Standzeiten 541
BImSchV, 37. 3
  Auswirkungen auf die
    Kraftwerkstechnik 4
  Zusatzenergiebedarf zur Einhaltung 23
Biomasse 443
  -anteil
    des Abfalls 46
  -kraftwerke 194
  -verbrennung 645
Bioschlamm
  thixotrope Eigenschaften 176
Bleichlorid 644
Bleisalze 645
Braunkohlekraftwerke
  NO_x-Minderung 13
Brenner
  NO_x-arme 14
  Ultra-Low NO_x 20
Brennstoff
  schwieriger 443, 669
  -ausnutzungsgrad 251
  -beschaffung 188
  -charakterisierung
    von biogenen Brennstoffen 453
  -liefervertrag
    Preisgleitungen 189
  -stufung 7
  -zusammensetzung 141
Brom 405
BVT 292

C

Calciumhydroxid 285
  Herstellungsprozess 336
  ökologische Bewertung 332
  Stöchiometriefaktoren 339
carbamin 379
CCS-Technologien
  Anwendbarkeit der 37. BImSchV 16
Charakterisierung
  von Brennstoffen 445
  von Ersatzbrennstoffen 453
CheMin GmbH 672
Chlor
  anorganisch gebundenes 446
  organisch gebundenes 446
  -bindungsform 446
ChlorOut-Additiv 484
Cladding 505, 558, 614, 640
  Abzehrungen 643
  auf Nickelbasis 565
  Entmischungseffekt 615, 646
  manuelles 505
  -werkstoffe
    Betriebserfahrungen 643

    siehe auch Schweißplattierung

CMT-Schweißtechnik 578
Coefficient of Performance 262
Cold Metal Transfer 578
Combate (Feuerungsmodell) 133
Control Performance Monitoring 130
COP 262
Corrmoran GmbH 461
Currenta GmbH & Co. OHG 404

D

Dampferzeugerbauform 87, 200
Dampf
  -nässe
    am Turbinenaustritt 233
  -parameter
    Anhebung 233, 656, 667
Dampfstrahl
  -kältemaschinen 254
  -verdichter 235, 254
Deacon-Reaktion 482
DEC-Anlage 258
Deinking-Schlämme 159, 192
Delamination 605
Dentriten 615

Desublimation
fraktionierte 498
Detonationsspritzen 621
Dickschichtvernickelung 561
Dioxin-Emission
während der An- und Abfahrphase 396
Draht-Flammspritzen 560, 620
Drehrohrofen 709
Düsenboden
offener 164

E

Economiser 90
Taupunktsunterschreitung 498
-Trickschaltung 398
Eigenenergiebedarf
Erhöhung durch weitergehende Schadstoffreduzierung 5
Einspeisevergütung
kostendeckende 224
Eisen-Aufmischung 505, 583, 615
Emissionen
spezifische 395
versus Energieeffizienz (Zielkonflikt) 3
Emissionsminderung in MVA
Möglichkeiten beim An- und Abfahren 396
Optimierungspotenzial 386
EnBW 50, 56
Endüberhitzer 661
Energie
aus Abfall 35
erneuerbare 46
Energieeffizienz 55, 444, 461
Optimierung 223
Wirkung verschiedener energietechnischer Maßnahmen 230
Wirkung verschiedener prozesstechnischer Maßnahmen 236
Spannweite der deutschen MVA 56
versus Emissionen (Zielkonflikt) 3
Energienutzung
der MVA in der Schweiz 226
Energieverordnung
der Schweiz 224
Energieversorger 49
Entlüftungsbypass 397
Entmischung
von Chrom und Nickel 615
Entnahme-Kondensationsanlagen 249
Entschlacker 85, 99, 110
Entstickung 5, 359
Grundlagen 360
wirksame Temperaturfenster 380
Entstickungsgrad 11
in Abhängigkeit von der Anzahl der Katalysatorebenen und der NO_x-Rohgaskonzentration 16
E.ON 50
E.ON Energy from Waste 637
Erosionsschutz 566, 613
Ersatzbrennstoffe
Aufbereitungsgrad 188
aus Aufbereitungsanlagen 187
aus Gewerbeabfällen 187
aus Siedlungsabfällen 187
Beschaffung 186
Risiken 195
Kosten der Monoverbrennung 185
Lieferanten
Bewertung 196
Markt 187
Zuzahlungen 189, 213
Ersatzbrennstoff-Kraftwerke 186
Betriebskosten 208
Brennstoffannahme und -lagerung 198
Einsatz von Klärschlamm 193
Einsatzbereiche der verschiedenen Feuerungssysteme 199
elektrischer Eigenbedarf 209
für die Papierindustrie
ersparte Entsorgungskosten 192
Investitionskosten
am Beispiel von Rostfeuerung und Wirbelschicht 204
Platzbedarf 198
Stromerlöse 210
Wärmeauskopplung 210
Wirtschaftlichkeitsberechnung
für eine Beispielanlage mit Rostfeuerung 214
für eine Beispielanlage mit Wirbelschichtfeuerung 216

F

Fallhammerklopfanlage 93
Fallnahtschweißung 506, 575, 583
Falschluft 100, 112
Fangstoffe 159
Faserfangstoffe 159
Feinschlackenaufbereitung 117

Fernkälte
Bau und Betrieb in Wien 275
-netz 42, 275
-zentrale 275
Fernwärme 226
Erhöhung des Sommerabsatzes 265
zur Kälteerzeugung 265
-aufheizung
mehrstufige 235
-netz 275
Ausbau
Fördermöglichkeiten 52
notwendige Investitionen 52
-versorgung 45
in Kassel 244
Feuerfest
-auskleidungen 89, 520, 664
-betone 552, 664
-komponenten 89
-platten 664
-revision 542
-systeme 664
-zustellung 549
Feuerlage 677
Feuerlagen-Sensor 671, 678
Feuerleistungsregelungen 125, 660
Feuerungen
NO_x-arme 7
Feuerungsmodell Combate 132
Filtermembrane
Verblockung 664
Filterschicht
adsorptive 284
Filterstäube aus dem Gewebefilter
durchschnittliche Zusammensetzung 390
Flachbunker 198
Flammbeschichtung 648
Flammspritzen 594
Flingernsches Korrosionsdiagramm 474
Friesenheimer Insel 663
Frischdampfdruck
Erhöhung 233, 656, 667
Frischdampftemperatur
Erhöhung 233, 665, 667
Füllstandsgeber 169
Fuzzy-Regelungskonzepte 131

G

Gain Scheduling 129
Gasturbinenanlagen 16
Nettowirkungsgrade 17
Gemeinschaft für thermisches Spritzen 594
Genehmigungsverfahren
für ein Reststoff-Heizkraftwerk 158
Generalunternehmer 204
Gesamtenergienutzungsgrad 225
Gewebefilter 284, 390, 664
Gefahr des Verklebens 390
Gewebefilteraufheizung
direkt mit einem Gasbrenner 397
indirekt durch Wärmeeinkopplung
über den Economizer 398
indirekt mit Dampf oder
elektrischer Energie 397
Gewebefilter-Bypass 396
Gießmassen 89
gipshaltige Abfälle 486
Granulatoren 700
Griffin-Reaktion 482

H

H_2SO_4-Taupunkt der Abgase
Bestimmung 490
Harnstoff 5, 379
Heizflächen
siehe Kesselheizflächen
Heizkraftwerk Wörth 155
Heizwert 46
Heizwertänderungen 659
Hinterlüftung
mit Spülluft 524
Hochgeschwindigkeits-
Flammspritzen 560, 594, 618,
Hochtemperaturkorrosion 90, 483, 530,
643, 654, 659, 667
Hochtemperatur-SCR 367
Homogenisierung
von Sonderabfällen 694
Horizontalkessel 200
HVOF-Verfahren
siehe Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen
Hybrid-Regler 131

I

Inconel 625 569, 597, 614, 641, 643
Inconel 686 615, 641, 646
Infrarottemperaturüberwachung
der Schlackenoberflächentemperatur 114

Instandhaltung 209
Instandhaltungskonzepte 667
Investitionskosten
  Wirbelschichtfeuerung im Vergleich zur Rostfeuerung 199
Isopropylalkohol-Methode (IPA-Methode) 501

J

Jünger+Gräter 523
JuSys Air 519

K

Kaltblasen 451
Kälte 42
  aus Fernwärme 265
  -anlagen 251
    energetische Betrachtungen 261
    Übersicht 252
  -bedarf
    verschiedener Branchen 261
  -erzeugung 251
  -erzeugungstechnologien
    Primärenergiefaktoren 277
  -falle 90, 644
  -leistung 262
  -maschinen 276
  -versorgung 266, 275
  -zentrale Spittelau 275
Kaltgasspritzen 621
Kaltwassersysteme 253
Kassel
  Kraftwerksstandorte 241
Katalysatoren 324
  Brände 8, 393
  Bypass 396
  Material und Ausführung 11, 360
  Regenerierung 367
  Vergiftung 361
    durch Schwermetalle 390
  Versalzung 362
  Verstopfungen und Deaktivierung 11
Kesselaustrittstemperaturen 363
Kesselbauweise 87, 200
Kesselheizflächen
  Reinigungshäufigkeit 665
  Reinigungssysteme 90, 662
  Standzeiten 641
KEV 224
Klärschlamm
  Annahme- und Transport-einrichtungen 193
  Aufkommen 193
  Entsorgungskosten in Abhängigkeit des Entsorgungsweges 194
  Entsorgungswege 193
  entwässerter 193
  getrockneter 193
  Verbrennung 193, 413
    Mitverbrennung 193
    Monoverbrennung 193
Klimakälte
  Vor- und Nachteile von Sorptionsanlagen 259
Klimaschutz 36
Klopfeinrichtungen 90, 662
  mechanische 93
  pneumatische 93
Koch Rost 82
Kohlekraftwerke
  Integration einer MVA 58
  NO_x-Minderung 13
Kohlenstoffgehalte
  biogene 46
Kohleverbrennung 403
Kompressionskälteanlage 252, 275
Kondensation
  kontrollierte 501
Kondensationsbetrieb 248
Konvektionsheizflächen 90
Korrosion 443, 461, 519, 548, 654, 669
  aktive Risikominderung 674
  Eisensulfide auf den Membranwänden 14
  Glas-Keramik-Schutzschicht 648
  im Verdampferbereich 605
  muldenförmige 605
  Temperaturabhängigkeit 471
  von thermischen Spritzschichten 603
  wannenförmige 643
Korrosions
  -beläge 539
  -diagnose
    Methoden 443
  -diagramm 473
  -front 471
  -früherkennung 669, 673
  -gefahr 233
  -geschwindigkeit 462
  -leitwert 466
  -minderung
    Einsatz von Additiven 682
  -monitoring
    in Abfallverbrennungsanlagen 461
  -neigung 661

Korrosions *(Fortsetzung)*
-potential 446, 673
-prozesse
Ursachen 670
-rate 466
-schutz 505, 525, 547, 566, 593, 613, 645, 661
durch hinterlüftetes Plattensystem 531, 542
durch thermisch gespritzte Schichten 593
-sonde 461
-strom 464
Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung 239
Kraft-Wärme-Kopplung 51, 241, 249
Anstrengungen zum Ausbau 52
Förderung 52
mit einer Entnahme-Kondensations-anlage 250
Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz 2009 212
Zuschläge 212
Krananlage
mit Zweischalengreifern 172
Kranüberstieg 181
Kugelrotor-Umlenkreaktor 286
Kühlfallen 90, 644
Kunststoffabfälle 190
Kurzlichtbogenprozess 578

L

Lanzen
-einzelregelung 381
-gruppenregelung 381
Laserspritzen 621
Lastschwankungen 660
Lichtbogenspritzen 594, 619
Lieferzeiten ausgewählter Anlagen-Komponenten 168
Lochfraß
punktförmiger 643
Luft
-reinhalteverordnung Schweizer 387
-stufung 7
-verdrallung 85
-vorwärmung
durch trockenen Schlackenaustrag 112
LÜHR FILTER 321

M

Mager-Vormisch-Verbrennung 17
Martin GmbH für Umwelt- und Energietechnik 97
Massenverlustring 463
Memorielegierungen 118
Metallentfrachtung der Schlacke 116
Metallrückgewinnung 97
Methan 36
MIG/MAG-Schweißverfahren 569
Mischer
für Sonderabfall 702
Mitverbrennung 403
model predictive control, MPC 132
Molybdän 646
MPC-Regelungen 132
Müllkraftwerk Schwandorf Betriebsgesellschaft (MSB) 480
MVA
Hamm 295
Hannover 298
Kassel 243
Linköping (S) 378
Mannheim 663
SATOM Monthey (CH) 103
Schwandorf 480, 520
Stapelfeld 516, 637
Stuttgart-Münster 58
Zorbau 301
MVV 50
MVV Umwelt GmbH 653

N

NaBr-Lösung 405
Nachbrennkammer 709
Abgasgeschwindigkeit 89
Nachcladden 508
händisches 643
Nachverbrennung 112
im Trockenentschlacker 114
Nass
-entschlacker 110
-schlacke 115
-wäscher 393
Natriumhydrogencarbonat 285
ökologische Bewertung 332
Stöchiometriefaktoren 339
Neutrec-Verfahren 286

New Integrated Desulphurization 288
NH_3-Schlupf 5, 8, 12, 360, 377
Nickelbasislegierungen 558, 596, 637, 661
NID-Verfahren 288
Niedertemperatur-SCR 369
NO_x-
-Abbaumechanismen 7
-Bildungsmechanismen 6
-Minderung
Auswirkungen auf die Energieeffizienz 23
Rohgas- und Reingas-Konzentrationen für unterschiedliche Technologien 13

siehe auch Stickoxide

O

Öffentlichkeitsarbeit 158
Ökobilanz
der Sorptionsmittel
$Ca(OH)_2$ und $NaHCO_3$ 333
Override Control 129
Oxidationsmittelstufung 7

P

Papierfabrik Palm 155
Papierindustrie
Reststoffverwertung 155
Pinch-Analyse 228
Plasmaspritzen 560, 594, 619
Plattensysteme
Anreicherung von Chlor 531
Austauschflächen und Austauschraten 526
chemische Beladung 530
hintergossene 554, 664
hinterlüftete 519, 542, 555, 664
Wärmeübertragung 524
Standzeiten 541
vermörtelte oder geklebte 553
Plattenbandentschlacker 85
Polarisationsleitwert 464
Precoating 397
Pressentschlacker 85
Primärluft
Sauerstoffanreicherung 233
Projektmanagement 203
Prozessführung
gehobene Methoden 127
Pulverflammspritzen 560

Q

Quasitrockenverfahren 28, 283, 289
Quecksilber 403
Abscheidung
bromgestützte 403
chlorgestützte 418
Bromierung 421
Chlorierung 421
Durchbruch 412

R

Reaktordeponien 109
Recladding 508, 643
Reduktion
selektive katalytische *siehe SCR*
selektive nichtkatalytische *siehe SNCR*
Reduktionsmittel 379
-dosierung 381
Regelbetrieb 388
gestörter 388
Regelkessel 640
Regelung
ablösende 129
von Rostfeuerungsprozessen 125
Regelungsverfahren
gehobene 127
Regenerierung
von Katalysatoren 367
Reingasschaltung
der SCR 11
Reingaswerte
technisch sinnvoll erreichbare 387
Reinigungsstillstände
Vermeidung 665
Reisezeiten
Verlängerung 662
Rejekte 192
REMONDIS 50
RESH
Verwertung 121
Rohgas
-konzentrationen
typische bei der Verbrennung von Hausmüll 387
-schaltung
der SCR 11
-werte
HCl, SO_2 302
Rohrreißer 641

Rost
Lage des Feuers 677
-bahn 81
-belagskühlung 82
-blockaden 659
-geschwindigkeit 139
-modul 83
-stab 81
luftgekühlter 83
wassergekühlter 82
-systeme 450
-wärmenutzung 82
Rotorreißer 700
Rotorschere 700
für Aufgabesysteme 701
Rückschub-Rost 104
Rußbläser 93, 662, 682

S

Salz
-ablagerungen 659
auf Auskleidung und Rohrwand 536
-frachten 659
-schmelzen 625, 645
-schmelzenkorrosion 508, 530
Sauerstoff
-anreicherung
der Primärluft 233
-mangel
in der Verbrennung 483
Säure
-korrosion 90
-taupunktunterschreitung 389
Schichtdickenmessung 604
magnetinduktive 600
Schichthöhe
des auf dem Rost liegenden Abfalls 127
Schichthöhenregelung 127
Schieflagen-Sensor 671, 676
Schlacken 109
maximale Metallentfrachtung 110
Nachverbrennungsprozess 112
trockener Austrag 97, 111
-abkühlung 112
-aufbereitung 110, 121
-feinsortieranlage 112
-kühlung
mit Tertiärluft 112
-qualität
Verbesserung durch Nachverbrennung im Trockenaustrag 113
Vergleich zwischen Trocken- und Nassschlacke 114
-sand 121
-staub 99
-wasser
korrosives 112
Schmiermassen 549
Schneckenförderer 696
Schneckenzerkleinerer 700
mit integriertem Mischer 697
Schottenüberhitzer 630
Schredderleichtfraktion 190
Elementarzusammensetzung und Schadstoffgehalte 191
Schredderrückstände 190
Annahmepreise 190
Schredding, Mixing, Pumping 698
Schutzgase 575
Schwefel
Verhalten in MVA 479
Schwefelsäuretaupunkt
Unterschreitung 480, 498
Schwefeltrioxid 659
Schweißplattierung 505, 566, 614, 641
Einflussgrößen auf die Qualität 580
einlagige 577
einlagig/zweilagige 577
in Fallnahtposition 506, 575, 583
in Wannenlage 583
zweilagige 577

siehe auch Cladding

Schweißposition 575, 583
Schweißtechniken 576
Schweiz 109
Schwermetallsalze 536
SCONOX-Verfahren 17
SCR 200, 339, 377, 390,
Anwendungsgrenzen 8
Betriebstemperaturen
in Abhängigkeit der SO_x-Konzentration 362
Entstickungsgrade 11
Schaltungsvarianten 11, 367
-Bypass 396
-Nachrüstung
bei einem Braunkohlekraftwerk
Auswirkungen auf Energiebilanz und Emissionen 28
SCR versus SNCR 377
Wirtschaftlichkeitsvergleiche 12
SCS 89
Sekundärluftsystem 84

Shell-Verfahren 501
Shower Cleaning System 89
SiC
-Hütchen 520
-Masse 520
Standzeiten 541
-Mörtel 523
-Platten 522
Siedekühlung 252
Siedlungsabfall
biogener Abfallanteil 46
SMP-System 698
SNCR 200, 339, 377
Anwendungsgrenzen 8
Entstickungsgrade 12
mit NH_3-Abscheidung 325
Verdüsungssystem 379
SO_2/SO_3-Verhältnis 481
Konvertierung – Gleichgewichts-kurven 482
SO_2 und SO_3
Bildung
physikalisch-chemische Grundlagen 481
Verhalten in MVA 481
SO_3
-Brenner 484
-Konzentrationen im Rohgas 481
-Mangelsituationen 483
Soda-Herstellung 334
Soft Sensor 131
Sonderabfall 709
Sonderabfallbehandlung
Aufgabesysteme 687
Homogenisierung 694, 702
Zerkleinerung 693, 700
Sonderabfallverbrennungsanlage 406, 709
Sorbens-Rezirkulation 284
Sorptionsanlagen
zur Klimakälteerzeugung 254
Sorptionsmittel
ökologischer Vergleich von $Ca(OH)_2$ und $NaHCO_3$ 331
Speisewasser
minimal zulässige Temperatur 480
-vorwärmung 480
Sperrluft 524
Spitzenlastabdeckung 247
Sprengreinigung 662, 666
Spritzmassen
Betriebserfahrungen 643
Spritzschichten 663
thermische 593, 613
Applikation 595
Beschichtungsautomaten 598
Einsatzbereiche 597
Elementgehalte 596
Handbeschichtung 598
Korrosion 603
optimale Schichtdicke 595
Werkstoff 596
zerstörende Prüfung 603
zerstörungsfreie Prüfung 600
Spritzverfahren
thermische 560
vergleichende Gegenüberstellung 621
Überblick 594
Sprühabsorber 317
Spuckstoffe 158, 192
Spülluft 524
Städtische Werke AG Kassel 240
Stampfmassen 89, 549
Beulenbildung 679
status-nascendi-Reaktionsfähigkeit 342
Steinkohlekraftwerke
NO_x-Minderung 15
Stickoxide 377
Bildungsmechanismen 6

siehe auch NO_x

Stickoxidminderung 3
Primärmaßnahmen 7
Sekundärmaßnahmen 8
Stickstoffmonoxid 6
Stöchiometriefaktor
bei $Ca(OH)_2$ 339
bei $NaHCO_3$ 339
Stopfschnecke 697
Störgrößenaufschaltung 130
Stößel-Entschlacker 98, 111
Strahlungszüge 89
Strom
-erzeugung 49
aus regenerierbaren Energiequellen
Investitionskosten 35
-gestehungskosten
für Abfallverbrennungsanlagen 224
-nutzungsgrad 225
-versorgung 45
Stützbrenner 389
Sulfatisierungsreaktionen 482, 660
SUME BOIL 70C 628

T

Tail End-Kessel 86
Tail End-Schaltung
der SCR 11
Taillensteine 553
Taschengurtförderer 172
Taupunktsunterschreitungen 8, 90, 390, 480
Technikakzeptanz 49
Temperaturmessung
akustische 13, 381
Tertiärluft
Funktionen 112
Tetratubes 84, 589
Thixotropie 176
Tiefbunker 198
Tragluftförderer 170
Treibhausgase 36, 278
Trockenentschlackung 111
mit integrierter Klassierung 97
Trockenschlacke 116
Metallentfrachtung 116
Trockensorptionsverfahren 28, 234, 285, 314, 332
konditionierte 313
mehrstufige konditionierte 321
Vorteile 167
Trommelvorwärmer 90
Turboreaktor 290
Turbosorp-Verfahren 289

U

Überhitzer 557, 645
-heizflächen 661
-rohre 631
thermische Spritzschicht 598
Überkapazitäten
auf dem Abfallverbrennungsmarkt 50
Überlastungen
thermische 659
Überschüttung
des Rostes 127
Uhlig Rohrbogen 569
USA
Abfallverbrennungsmarkt 65

V

Verblocken
des Filters 664
Verbrennungsluft 141
Reduktion 524
-system 82
Verbrennungsrückstände 110
Verbrennungstemperatur
adiabate 89
Verdampferheizflächen 661
thermische Spritzschicht 598
Verdampfungskühler 314
Verfügbarkeit 444
Maßnahmen zur Verbesserung 658
Risiken 656
Vergabe
losweise 204
Vergiftung
von Katalysatoren 361, 390
Versalzung
von Katalysatoren 362
Verschmutzung 443, 659, 663
der Dampferzeuger 656
Vertikalzugkessel 86, 200
Volllastverfügbarkeit 658
Vormischverbrennung
trockene NO_x-arme 16
Vorschubrost 660
System Koch 80
Vosteen Consulting GmbH 404

W

Wannenlage 575
Wärme
-absatz
in den Sommermonaten 249
Erhöhung 265
-erzeugung 49
-fluss
Einfluss auf Abzehrung 644
-netze 55
-nutzung
anlageninterne Optimierung 226
-nutzungsgrad 225
-pumpen 42, 235
-stromdichte 656
-stromdichtemessung 671
-stromsensoren 449, 671, 675
-verwertung 223

Waste to Energy 49
Werksplattierung 580
Wheelabrator 65
Wien 275
Windsichtung
  zur Abtrennung von Feinschlacke
    und Schlackestaub 99
Wirbelschichtfeuerung 413
  stationäre 164
Wirkungsgrad
  Erhöhung 479
Wirtschaftlichkeit
  einer Abfallverbrennungsanlage 667
Wolfram 646

Z

Zerkleinerungsaggregate
  im Sonderabfallbereich 693, 700
Ziehmittelrückstände 574
Zöpfe 158
Zusatzbrennstoff 389
Zuzahlungen für Ersatzbrennstoffe 196, 213
  in Abhängigkeit vom
    Verwertungsweg 189
Zweckverband Müllverwertung
    Schwandorf 520
Zweischalengreifer 173
Zwischenüberhitzung 234