



**Ihr
LowNOx-
Partner**

Wir haben die Technik – Sie die Wahl

NOx-Reduktion vom Profi

ERC als einer der Markt- und Technologieführer bei DeNOx-Anlagen in Europa, entwickelt und produziert hocheffiziente, individuell zugeschnittene Entstickungssysteme für unterschiedliche Verbrennungsanlagen. Aus einem Bündel möglicher Maßnahmen entwickeln wir für Sie die individuell effizienteste Lösung:

- SNCR-Anlagen
- SCR-Anlagen
- Kombi-Anlagen nach dem ERC-plus Verfahren
- Optimale Verbrennung mit geringen Emissionen durch ERC-Verfahrenshilfsstoffe

Ihr Kontakt bei ERC:
Tel. 04181 216141 · E-Mail: office@erc-online.de

ERC GmbH · Bäckerstraße 13 · 21244 Buchholz i.d.N. · www.erc-online.de



Maßnahmen zur Minderung luftseitiger Emissionen unter besonderer Berücksichtigung von Quecksilber, Feinstaub und Stickoxiden

Margot Bittig und Stefan Haep

1.	Entwicklung der gesetzlichen Grenzwerte.....	542
2.	Beste verfügbare Technik.....	543
3.	Installierte Technik.....	544
4.	Maßnahmen zur Minderung von Quecksilber.....	546
5.	Maßnahmen zur Minderung von Feinstaub.....	553
6.	Maßnahmen zur Minderung von Stickoxiden.....	555
7.	Literatur.....	557

Das Problem des Abfalls und seiner Beseitigung ist so alt wie die Menschheitsgeschichte. Schon früh wurde *schlechte Luft* als ungesund bzw. der Gesundheit nicht zuträglich eingestuft. Im Mittelalter beschränkten sich Strategien zur Luftreinhaltung im Wesentlichen auf die Beseitigung von Gerüchen. So wurden z.B. geruchsintensive flüssige Abfallstoffe bevorzugt verdünnt, in dem sie in Flüsse eingeleitet wurden. Gewerbe mit übel riechender Abluft wurden in die Vorstädte verlegt. Die Maßnahmen dienten somit dem Schutz der Menschen, ein Bewusstsein im Sinne eines allgemeinen Umweltschutzes gab es nicht.

An der Strategie der Verlagerung hat sich auch bis in die Zeit der frühen Industrialisierung nichts geändert. Das erste Gesetz Europas zum Umweltschutz trat am 15.10.1810 in Frankreich in Kraft. Danach wurde für eine Vielzahl gewerblicher Tätigkeiten eine Genehmigungspflicht eingeführt und der Grad der Umweltbelastung festgestellt. Dieser konnte eine Verlagerung der Tätigkeiten an den *Rand von Wohngebieten* oder *außerhalb von Wohngebieten* zur Folge haben. Allerdings war die Festlegung erforderlicher Schornsteinhöhen bereits Gegenstand des Gesetzes. In den folgenden Jahren kamen Aspekte des Immissionsschutzes und der Sicherheit wie Brandschutz und Explosionsschutz hinzu. In Preußen waren die ersten Immissionsschutzgesetze Teil der Allgemeinen Gewerbeordnung vom 17.01.1845 [1].

1. Entwicklung der gesetzlichen Grenzwerte

Die erste Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) wurde am 8. September 1964 verabschiedet. Sie gehörte als allgemeine Verwaltungsvorschrift über genehmigungsbedürftige Anlagen zur Gewerbeordnung. Festgeschrieben wurden Immissionsgrenzwerte für Staubbiederschlag, Schwefeldioxid, Stickstoffoxide, Chlor und Schwefelwasserstoff. Die Immissionswerte für Stäube wurden unterschieden zwischen Staub mit Partikeldurchmessern $> 10 \mu\text{m}$ und $< 10 \mu\text{m}$. Emissionsbegrenzungen bezogen sich im Wesentlichen auf Stäube. Außerdem wurden Nomogramme zur Berechnung der Schornsteinhöhen vorgegeben.

Am 28. August 1974 trat die TA Luft 1974 als erste Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) in Kraft, welches kurz zuvor (15.03.1974) verabschiedet worden war. Darin geregelt waren Immissionsbegrenzungen für 8 gasförmige Stoffe und ein Jahresmittelwert (JMW) für Stäube $< 10 \mu\text{m}$ von $0,10 \text{ mg/m}^3$ oder alternativ für Gesamtstaub ein JMW von $0,20 \text{ mg/m}^3$. Ebenfalls wurden Emissionsgrenzen für zahlreiche staubförmige Stoffe bekanntgegeben (wie z.B. Schwermetalle). Organische Verbindungen, Stickstoffoxide und Schwefeldioxid galt es weitestgehend zu begrenzen, ein Grenzwert wurde jedoch nicht festgeschrieben.

In den 1980er Jahren rückte die Diskussion umweltschädlicher Auswirkungen von Industrieemissionen immer weiter in die öffentliche und politische Diskussion (Waldsterben und saurer Regen). Durch die dreizehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes – Verordnung über Großfeuerungsanlagen (13. BImSchV) vom 22. Juni 1983 wurden erstmals für Schwefeldioxid und Stickstoffoxide Grenzwerte festgeschrieben [2].

Tabelle 1: Entwicklung der Grenzwerte, Bezug im Normzustand trocken

17. BImSchV	1990		2003		2013		
	kontinuierliche Messung		kontinuierliche Messung		kontinuierliche Messung		
	TMW	HMW	TMW	HMW	TMW	HMW	
	mg/m^3						
Gesamtstaub	10	30	10	30	5	20	
Gesamt-C	10	20	10	20	10	20	
HCl	10	60	10	60	10	60	
HF	1	4	1	4	1	4	
SO _x	50	200	50	200	50	200	
NO _x	200	400	200	400	150	400	
			Hg	0,03	0,05	0,03	0,05
			CO	50	100	50	100
					NH ₃	10	15
Angabe als Mittelwert über Probenahme							
Hg	0,05						

Die TALuft wurde fortlaufend überarbeitet und an neue Erkenntnisse aus Wissenschaft und Technik angepasst (1983, 1986). Die jüngste Revision trat am 24. Juli 2002 in Kraft. Wesentliche Aufgaben der TA Luft sind unter anderem, die Anpassung an den *Stand der Technik* und die Vereinheitlichung der Anforderungen in Europa sicherzustellen.

Ergänzend zur TALuft werden die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen in der 17. BImSchV geregelt (Erstfassung vom 23. November 1990). Tabelle 1 zeigt einen Überblick über die Entwicklung der Emissionsgrenzwerte.

2. Beste verfügbare Technik

Bereits die TALuft 1964 formuliert als grundsätzliche Anforderung: *Die Anlagen müssen mit Einrichtungen zur Begrenzung der Emissionen ausgerüstet und betrieben werden, die dem Stand der Technik entsprechen.* [3]. Das Konzept des *Stand der Technik* hat sich dabei als ein zentrales Steuerungselement des Anlagenzulassungsrechts bewährt. Auf europäischer Ebene entspricht dies den *besten verfügbaren Techniken* (BVT). Getrennt nach Branchen werden die BVT von Vertretern der Mitgliedsstaaten, der Industrie und der Umweltverbände erarbeitet und in sog. BVT-Merkblättern oder Reference Document on the Best Available Techniques (BREF) dokumentiert. Entsprechend der sich stetig weiterentwickelnden Technik wird auch der Informationsaustausch kontinuierlich fortgeführt [4].

Durch die Richtlinie über Industrieemissionen 2010/75/EU vom 24.11.2010 wird die Bedeutung der BVT gestärkt. Danach werden aus den BVT-Merkblättern sog. Schlussfolgerungen entwickelt und verabschiedet und als eigenständige Rechtsdokumente im Amtsblatt der EU veröffentlicht [5].

Die Verfahren zur Minderung luftgetragener Schadstoffe lassen sich grob in filternde, adsorptive, absorptive und katalytische Verfahren einteilen.

Das Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration [6] nennt als filternde Abscheider (Multi-)Zyklone, Elektrofilter, Nasselektrofilter und Schlauch- bzw. Gewebefilter. Diese dienen zunächst der Abscheidung von Stäuben und damit auch der Abscheidung an Staub gebundener Schadstoffe. Dazu gehören vor allem die Schwermetalle (außer Quecksilber), die quantitativ nahezu vollständig mit dem Staub aus dem Abgas abgetrennt werden können.

Durch die Dosierung von Adsorbentien in den Abgasstrom ergibt sich die Möglichkeit, auch andere Schadstoffe an oder als Partikel zu binden und diese mit dem Staub abzuscheiden. Kohlenstoff basierte Adsorbentien (Aktivkohle oder Herdofenkoks) dienen der Abscheidung von Schwermetallen insbesondere Quecksilber und Dioxinen und Furanen. Calcium- und natriumbasierte Additive werden zur Abscheidung saurer Schadstoffe (Halogenide und Schwefeloxide) eingesetzt. Je nach dem in welcher Form das Additiv in den Abgasstrom eingebracht wird, wird in

- quasitrockene (Verdüsung von Kalkmilch über einen Sprühturm),
- konditioniert trockene (Verdüsung von Kalkhydrat in den Abgasstrom bei gleichzeitiger Dosierung von Wasser) und
- trockene Verfahren (Verdüsung von Kalkhydrat oder Natriumbicarbonat in den Abgasstrom) unterschieden. Als Staubabscheider kommen i. d. R. Schlauchfilter zum Einsatz, weil die sich auf dem Gewebe aufbauende Schicht aus Staub und Adsorbens zu einer Erhöhung der Kontaktzeit zwischen Schadstoff und Additiv führt.

Ein weiteres BVT-Verfahren zur Abscheidung saurer Schadstoffe ist die Abgaswäsche. Als Neutralisationsmittel bzw. Reaktionspartner für die Schadstoffe werden Kalkmilch oder Natronlauge eingesetzt. Aufgrund der guten Löslichkeit von zweiwertigem Quecksilber in wässrigen Lösungen kann die Wäsche auch als Quecksilbersenke dienen. Die Dosierung speziell für die Quecksilberabscheidung entwickelter Fällungsmittel kann zu einer erheblichen Verbesserung der Quecksilberabscheidung im Wäscher führen. Eine weitere Option zur Quecksilber- als auch Dioxinabscheidung ist die Zudosierung von Aktivkohle in den Wäscher, was ebenfalls eine Steigerung der jeweiligen Abscheideleistung bewirkt.

Die Verfahren zur Abscheidung von Stickstoffoxiden aus dem Abgas basieren auf der Reaktion der Stickstoffoxide mit Ammoniak und Sauerstoff zu den lufteigenen Bestandteilen Stickstoff und Wasser. Diese Reaktion erfolgt natürlich im Temperaturfenster zwischen 850 °C und 1.050 °C. Das Verfahren der *Selektive Non Catalytic Reduction* (SNCR) sieht deshalb die Dosierung von Ammoniakwasser oder Harnstoff in den 1. Kesselzug bei den entsprechenden Temperaturen vor. Nach Abkühlung der Abgase kann die Reaktion durch Einsatz eines Katalysators (Selektive Catalytic Reduction – SCR) auch innerhalb der Abgasreinigungsanlage erfolgen. Die für die katalytische Reduktion üblichen Temperaturen liegen zwischen 230 °C und 320 °C. Als Co-Benefit hat sich gezeigt, dass an den SCR-Katalysatoren Dioxine und Furane zerstört werden können. Außerdem kommt es am Katalysator zur Oxidation von elementarem zu zweiwertigem Quecksilber. Je nach Platzierung des Katalysators in der Reinigungskette kann dies zur Verbesserung der Abscheidung der genannten Schadstoffe führen.

Das BREF-Papier *Waste Incineration* geht ausführlich auf die möglichen Ausführungen der Verfahren sowie auf die Vor- und Nachteile ein [6].

3. Installierte Technik

Deutschland gilt als ein Land, in dem durch die Gesetzgebung hinter Verbrennungsprozessen ein hoher technischer Standard zum Erreichen der Umweltschutzziele eingehalten wird. Im Folgenden wird eine Übersicht über die in Deutschland hinter Abfallverbrennungsanlagen installierte Technik gegeben, ausgewertet wurden 73 Anlagen. Tabelle 2 zeigt eine Übersicht über die Anlagen zur Abscheidung saurer Schadstoffe.

Tabelle 2: Übersicht über die in Deutschland installierten Anlagen zur Abscheidung saurer Schadstoffe

Abscheidung saurer Schadstoffe				
Wäsche		Sprühtrockner mit Kalkmilch	konditioniert trocken und trocken	
einstufig	mehrstufig		Kalkhydrat	Bicar
4	39	12	19	10

In 43 Anlagen werden die sauren Schadstoffe mit Hilfe einer Wäsche abgeschieden. In zwei dieser Anlagen wird zusätzlich Kalkmilch über einen Sprühtrockner bzw. Kalkhydrat trocken vor Gewebefilter dosiert.

Nach Einführung der 17. BImSchV galt die Wäsche als zwingend notwendig zur Einhaltung der verschärften Grenzwerte, inzwischen können auch mit quasitrocken und trocken betriebenen Anlagen die Grenzwerte sicher eingehalten werden. So werden inzwischen 30 der 73 ausgewerteten Anlagen ohne Wäsche betrieben. Die Verfahren teilen sich wie folgt auf:

- 5 Anlagen mit Sprühtrockner und Kalkmilcheindüsung (quasitrocken),
- 6 Anlagen quasitrocken mit zusätzlicher trockener Adsorbenseindüsung und
- 19 Anlagen mit trockener Adsorbendosierung.

An 3 Anlagen werden sowohl Kalkhydrat als auch Natriumbicarbonat eingesetzt, an einer davon in der Kombination mit Sprühtrockner und Kalkmilch.

In Tabelle 3 wird eine Übersicht über die installierten Filteranlagen gegeben:

Tabelle 3: Übersicht über die in Deutschland installierten Filteranlagen

Filteranlagen							
Vorentstauber			Entstauber hinter Sprühtrockner und Additivdosierung			Polizeifilter	
Zyklon	E-Filter	Gewebefilter	Zyklon	E-Filter	Gewebefilter	Gewebefilter	Festbettfilter
6	26	2	1	10	41	23	15

Aus der Übersicht geht hervor, dass Zyklone als Vorentstauber und nur selten eingesetzt werden. Zur Vorentstaubung kommen bevorzugt Elektrofilter zum Einsatz. Für trockene und quasitrockene Verfahren werden Gewebefilter verwendet, weil der auf den Schläuchen liegende Filterkuchen zur Erhöhung der Kontaktzeit zwischen Abgas und Adsorbens führt und damit Bestandteil des Verfahrens ist. In den mit einem Wäschersystem ausgerüsteten Anlagen findet sich die Verfahrensschaltung

- Elektrofilter – Wäscher 28 mal und
- Gewebefilter – Wäscher 14 mal.

Darüber hinaus wurden 32 der 43 mit Wäscher betriebenen Anlagen mit einer nachgeschalteten Feinreinigungsstufe in Form eines Gewebefilters mit Additivzugabe (Polzeifilter) oder eines Festbettfilters ausgerüstet. In 6 Anlagen wird ein kohlenstoffbasiertes Additiv vor den vorgeschalteten Gewebefilter dosiert.

Bei der Entstickung überwiegt der Einsatz von Katalysatoren im Low-Dust-Betrieb, vergleiche Tabelle 4. Die High-Dust-SCR konnte sich im Bereich der Abfallverbrennungsanlagen nicht durchsetzen. Der Anteil der Anlagen mit SNCR liegt bei 40 %. Zusätzlich zu den 44 SCR-Anlagen wird ein weiterer Katalysator hinter einer SNCR im High-Dust-Bereich betrieben.

Entstickung			
	gesamt	tail-end	in Kombination mit high-dust SCR
SCR	44	43	
SNCR	29		1

Tabelle 4:

Übersicht über die in Deutschland installierten Anlagen zur Entstickung

4. Maßnahmen zur Minderung von Quecksilber

Die Abscheidung von Quecksilber aus dem Abgas ist eine vergleichsweise schwierige Aufgabe.

- Quecksilber kann in unterschiedlichen Oxidationsstufen vorkommen,
- die unterschiedlichen Oxidationsstufen zeigen unterschiedliche adsorptive und absorptive Verhalten,
- die Oxidationsstufen können innerhalb der Abgasreinigung wechseln,
- während Schwermetalle im Allgemeinen am Flugstaub adsorbieren und deshalb quantitativ durch die Abscheidung der Stäube aus dem Abgas entfernt werden können, ist Quecksilber bei den für Elektro- und Gewebefilter üblichen Betriebstemperaturen ($> 140\text{ °C}$) nur zu einem geringen Teil an Partikel gebunden,
- bei niedrigen Temperaturen neigt Quecksilber dazu, auf freien Oberflächen zu adsorbieren,

Im Gas hinter Kessel kann Quecksilber als elementares Quecksilber $\text{Hg}(0)$ in der Oxidationsstufe 0 und als zweiwertiges Quecksilber $\text{Hg}(II)$ in der Oxidationsstufe 2 auftreten. Die Zusammensetzung des Gases im Feuerraum hat entscheidenden Einfluss auf die Oxidationsstufe und die Verbindungspartner der zweiwertigen Form. Die Anwesenheit von Halogeniden begünstigt die Oxidation, das Vorkommen von Schwefeloxiden hemmt diese. In Abgasen mit hohen Schwefelkonzentrationen wie z.B. hinter Kohlekesseln ist der Anteil des elementaren Quecksilbers groß, hinter Hausmüllfeuern ist die dominierende Quecksilberkomponente HgCl_2 , da dort Chloride im Vergleich zu den Schwefeloxiden und zu den anderen Halogeniden in deutlich höheren Konzentrationen enthalten sind.

Das Vorkommen von einwertigem Quecksilber, das sog. Kalomel Hg_2Cl_2 , wird immer wieder vermutet bzw. auf Basis von Versuchen prognostiziert, der tatsächliche Nachweis konnte bisher jedoch nicht erbracht werden.

It you talk about
environmental
and industrial
say **HOK®**.

And it's okay.

**HOK® Herdofenkoks. Adsorbens und Katalysator.
Erste Wahl bei der Gasreinigung in Verbrennungs-
anlagen von Müll und Sondermüll sowie in der
Metallurgie.**

Signifikante Minderung von Dioxinen und Furanen.

**Manchmal reicht eine einzige, wohldurchdachte
Entscheidung um den Anforderungen Ihres Unter-
nehmens und den Forderungen nach einer gesunden
Umwelt gerecht zu werden.**

Die Lösung heißt HOK®. HOK® ist OK.



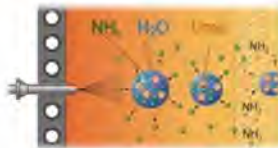
MEHLDAU & STEINFATH
UMWELTECHNIK

SNCR-Technologien der neuen Generation Einzellanzenumschaltung, TWIN-NO_x[®], Selektive Rauchgaskühlung

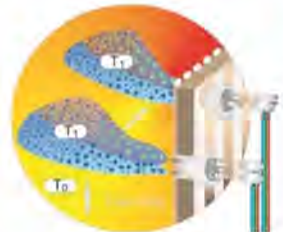
- Die **Einzellanzenumschaltung** ermöglicht höhere Flexibilität der SNCR-Anlage und erweitert deren Einsatzmöglichkeiten.
- Das **TWIN-NO_x[®]**-Verfahren vereint die Vorteile der Reduktionsmittel Ammoniak und Harnstoff und erzielt so beste Ergebnisse.
- Durch **selektive Kühlung** wird die Temperatur des Rauchgases im Eindüsbereich für das SNCR-Verfahren optimiert. Die NO_x-Abscheidegrade verbessern sich, die Reduktionsmittelverbräuche sinken weiter.



Einzellanzenumschaltung



TWIN-NO_x[®]-Verfahren



Selektive Rauchgaskühlung

- Niedrige Investitionskosten
- Geringe Reduktionsmittelverbräuche
- Leichte Nachrüstbarkeit
- Hohe Verfügbarkeit
- Hohe Entstickungsgrade
- Sichere Unterschreitung der gesetzlichen Grenzwerte



SNCR-Anlage in einem Kohlekraftwerk (225 MW_{el}), Polen

Hg(II) adsorbiert sehr gut an Kohlenstoff (Aktivkohle bzw. Herdofenkoks (HOK)), für die Adsorption von Hg(0) muss dieser imprägniert sein. Die Imprägnierung erfolgt z.B. mit Schwefel (gasförmig oder als Säure) oder mit den Halogeniden Bromid und Jodid. Inzwischen gibt es eine Vielzahl von gezielt für die Hg-Abscheidung entwickelten Adsorbentien mit unterschiedlichen Porenvolumen, inneren Oberflächen und Imprägnierungen.

Beim sog. Flugstromverfahren wird das Adsorbens in den Abgasstrom eingedüst und anschließend über einen Gewebefilter wieder aus dem Gas abgetrennt. Wesentlich für den Erfolg der Abscheidung ist eine sehr gute Vermischung des Adsorbens mit dem Gas und eine ausreichend lange Kontaktzeit. Die Dosierung kohlenstoffbasierter Adsorbentien zur Abscheidung von Quecksilber (und Dioxinen und Furanen) erfolgt sehr oft in Kombination mit calcium- bzw. natriumbasierter Adsorbentien zur Abscheidung der sauren Schadgase innerhalb der trockenen, halbtrockenen oder quasitrockenen Verfahren. Bei Dosierung der kohlenstoffbasierten Adsorbentien vor den ersten Gewebefilter innerhalb der Abgasreinigungskette stellt der Filterstaub die Haupt-Quecksilber-Senke dar.

Die Dosierung von Aktivkohle oder HOK vor Entstaubung ist eine leistungsstarke Maßnahme zur Quecksilberabscheidung, mit der in den meisten Fällen die gesetzlichen Emissionsgrenzwerte gehalten bzw. unterschritten werden können. Dennoch kommt es immer wieder zu Beispielen, bei denen diese Maßnahme nicht greift und auch der Wechsel auf alternative Adsorbentien keinen Erfolg hatte. Die Gründe dafür konnten bisher nicht aufgeklärt werden. Außerdem haben die Flugstromverfahren nur eine begrenzte Pufferkapazität. Unvorhergesehene Quecksilberkonzentrationspitzen können zu einem großen Teil die Abscheideeinheit passieren. Deshalb kommt der zur Regelung des Adsorbens installierten Messtechnik eine besondere Bedeutung zu. Um dem ungehinderten Durchgang von Quecksilberspitzen entgegen zu wirken, muss eine Hg-Rohgasmessung installiert werden.

Ebenfalls etabliert ist die Dosierung kohlenstoffbasierter Adsorbentien in den Abgasstrom vor einem nachgeschalteten Gewebefilter. Dieser Verfahrensschritt dient der Feinreinigung und wird oft als *Polizeifilter* bezeichnet. Als Feinreinigungsstufe kommen darüber hinaus auch Festbettfilter zum Einsatz.

Neben den adsorptiven Verfahren stellt die Abgaswäsche ein für die Abscheidung von zweiwertigem Quecksilber etabliertes Verfahren dar. Demgegenüber gilt Hg(0) als nahezu wasserunlöslich. Präziser betrachtet handelt es sich bei der Absorption von Quecksilber um ein Lösungsgleichgewicht zwischen Gas und Waschwasser. Da die Mengen der gelösten Quecksilberspezies gering sind, kann dieses Gleichgewicht gut mit Hilfe des Henry'schen Gesetzes beschrieben werden. Vor allem die Hg(II)-Halogenide aber auch Hg(0) gelten als *Henry-Komponenten*. Im Unterschied zum HgCl_2 ist der Dampfdruck des elementaren Quecksilbers über der Flüssigkeit jedoch so hoch, dass der quantitativ weitaus größte Teil im Gas verbleibt bzw. wieder in das Gas übergeht. Bild 1 veranschaulicht, welchen Reaktionswegen Quecksilber folgen kann.

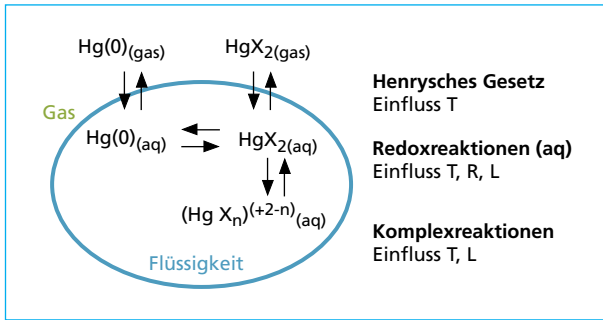


Bild 1:

Phasengleichgewichte und chemische Gleichgewichte bei der Hg-Absorption

Die in die flüssige Phase übergetretenen Quecksilberspezies unterliegen in der Waschflüssigkeit den dort ablaufenden chemischen Reaktionen, die wiederum die Lage des Lösungsgleichgewichtes beeinflussen. Bereits hier wird deutlich, dass die wechselwirkenden Reaktionen und die die Reaktionen beeinflussenden Parameter (Temperatur T, Redoxpotenzial R, Ligandenstärke L) gegenläufige Auswirkungen haben können.

Um nun die Quecksilberkonzentration in der Gasphase über der Flüssigkeit (bzw. im Abgas) zu minimieren, sollte zunächst die Reduktion von bereits abgeschiedenem zweiwertigem Quecksilber zu $\text{Hg}(0)$ unterdrückt und die Oxidation des in die flüssige Phase übergetretenen $\text{Hg}(0)$ zu $\text{Hg}(\text{II})$ unterstützt werden. Die unerwünschte Reduktion kann unterdrückt und die erwünschte Oxidation begünstigt werden z.B. durch genügend Sauerstoff oder eine niedrige Konzentration an Radikalfängern wie Jod.

Eine weitere Verbesserung der Quecksilberabscheidung im Wäscher wird durch eine Absenkung der Konzentration der ungeladenen Quecksilberspezies erreicht. Dabei hilfreich können die sog. Komplexreaktionen sein, die bei Anwesenheit eines entsprechenden Überschusses an Komplexbildnern, den Liganden ablaufen. Zu den wichtigsten Quecksilberliganden zählen die Halogenide Chlorid, Bromid, Iodid die aus dem Abgas als HCl , HBr und HI in den Absorber eingetragen werden. Läuft die Komplexreaktion weitgehend ab, entstehen die anionischen (d.h. negativ geladenen) $\text{Hg}(\text{II})$ -Komplexe HgX_3^- und HgX_4^{2-} . Die geladenen Spezies nehmen am Gas-Flüssig-Gleichgewicht nicht mehr teil. Damit wird durch die Komplexierung zum einen die Konzentration der ungeladenen $\text{Hg}(\text{II})$ -Spezies im Washwasser und über das Gleichgewicht zur Gasphase die $\text{Hg}(\text{II})$ -Konzentration im Gas abgesenkt. Gleichzeitig wird durch die Komplexierung die Aufnahmekapazität des Wäschers für Quecksilber weit über die reine *Gaslöslichkeit* hinaus erhöht. Deshalb sind Wäscher mit hoher Halogenidkonzentration hervorragend zum Puffern von ungeplanten und in der Höhe der Konzentration unerwarteten Quecksilbereinträgen geeignet.

Darüber hinaus beeinflussen die Komplexreaktionen in nicht zu unterschätzendem Ausmaß die Lage des Redoxgleichgewichtes $\text{Hg}(\text{II})/\text{Hg}(0)$ und damit die Reemission von bereits abgeschiedenem $\text{Hg}(\text{II})$ als $\text{Hg}(0)$. Wahrscheinlich sind sie sogar für die gelegentlich auftretende Nettoabscheidung von $\text{Hg}(0)$ verantwortlich.

Allerdings ist davon auszugehen, dass es entsprechend dem im Washwasser vorliegenden Ligandenangebot zu einer Umkomplexierung des in das Washwasser eintretenden HgCl_2 kommt. In der Reihe der Halogenide ist Chlorid der schwächste Ligand.

Damit wird es in der flüssigen Phase zur Bildung von HgBr_2 , HgI_2 und gemischter Komplexe wie z.B. HgBrI kommen. Ungünstiger Weise steigt die Flüchtigkeit der Quecksilberspezies mit der Ligandenstärke. HgI_2 ist um ein Vielfaches flüchtiger als HgCl_2 , so dass die Bildung von Quecksilberiodid zu einer Erhöhung des Dampfdrucks des zweiwertigen Quecksilbers im Wäscher führen kann. Außerdem ist die mit Abstand stabilste Hg-Spezies die neutrale. Daraus folgt, dass es eines sehr großen Überschusses an Liganden bedarf, bis es zur Bildung anionischer Komplexe kommt.

Auf Basis dieser im übertragenen Sinne komplexen Zusammenhänge resultieren Chancen und Grenzen für Maßnahmen zur Reduzierung der Quecksilberemissionen durch eine Wäsche:

- Bei mehrstufigen Wäschersystemen sind die Voraussetzungen für eine gute Quecksilberabscheidung primär im ersten Wäscher gegeben. Die Abscheidung der Halogenide erfolgt quantitativ im ersten Wäscher, so dass in vielen HCl-Wäschern ohne zusätzliche Maßnahmen ein für die Komplexierung günstiges Ligandenangebot vorliegt. Durch den üblicherweise niedrigen pH-Wert des Waschwassers wird eine SO_2 -Abscheidung unterdrückt. Die Gefahr der Reduktion des zweiwertigen Quecksilbers zu $\text{Hg}(0)$ ist dadurch gering. Das Waschwasser des nachgeschalteten SO_2 -Wäschers enthält demgegenüber nur eine geringe Konzentration an Halogeniden. Zusätzlich wird durch die SO_2 -Abscheidung und die daraus resultierende Sulfidkonzentration die Reduktion begünstigt, so dass es über SO_2 -Wäschern häufig zu Netto-Freisetzungen von Quecksilber als $\text{Hg}(0)$ kommt. Dabei muss die in den zweiten Wäscher eingetragene Quecksilberfracht nicht aus dem Gas stammen, sie kann auch aus Tropfenmitriss resultieren. Daraus folgt, dass bei mehrstufigen Systemen die Quecksilberabscheidung möglichst vollständig in der ersten Waschstufe erfolgen sollte und die zweite Waschstufe z. B. mit einer Maßnahme zur sehr schnellen Abtrennung des in die Stufe eingetragenen Quecksilbers, z.B. einer Fällungsmitteldosierung ausgestattet sein sollte.
- Die Erhöhung des Ligandenangebots kann zu einer deutlichen Erhöhung des Hg-Abscheidegrades führen. Dieser Maßnahme sollte immer eine genaue Analyse der Waschwasserverhältnisse vorausgehen. So kann z. B. eine hohe Konzentration an Gesamtjod dazu führen, dass die Erhöhung der Ligandenkonzentration nicht zu einer Absenkung des Quecksilberemissionswertes führen kann.
- Wäscher haben entsprechend ihres Ligandeninventars ein erhebliches Potenzial zur Abscheidung unvorhergesehener Quecksilberkonzentrationspitzen im Abgas. Ohne die zeitnahe und schnelle Absenkung der Quecksilberkonzentration im Waschwasser kann das Quecksilber aber auch entsprechend der Gleichgewichtslagen sukzessive wieder an das Gas abgegeben werden. Deshalb ist es zu empfehlen, die Hg-Konzentration im Waschwasser zu kontrollieren.
- Ein wesentlicher Aspekt bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Reduzierung der Quecksilberemissionen in Wäschern ist die Tatsache, dass die Abscheidung von Quecksilber nicht das primäre Ziel des Wäscherbetriebes ist. Maßnahmen, die der Verbesserung der Quecksilberabscheidung dienen, können nur umgesetzt werden, wenn sie die Abscheidung der Hauptschadstoffe nicht negativ beeinflussen.

- Entgegen dem BREF-Papier von 2005 ist die Einstellung eines sauren pH-Wertes im Waschwasser weder eine notwendige noch eine hinreichende Bedingung zur Sicherstellung einer guten Hg-Abscheidung. Der pH-Wert hat keinen direkten Einfluss auf die Quecksilberabscheidung, sondern beeinflusst diese nur indirekt über die Abhängigkeit zwischen Redoxpotenzial und pH-Wert.

Eine weitere zur Minimierung der Konzentration an zweiwertigem Quecksilber im Waschwasser häufig eingesetzte Maßnahme ist die Quecksilberfällung. Dazu wird ein kommerziell zu beziehendes Fällungsmittel in das Waschwasser dosiert und das gelöste Quecksilber in unlösliche Verbindungen überführt. Quecksilberfällungsmittel werden von mehreren Firmen und in unterschiedlichen Qualitäten angeboten. Einige Fällungsmittel wurden speziell zur Abscheidung von Quecksilber entwickelt, um die zu dosierende Menge nicht durch den Verbrauch durch andere Schwermetalle unnötig zu erhöhen.

Die Zugabe von Aktivkohle in das Waschwasser ist eine weitere Möglichkeit, Quecksilber direkt nach dem Übertritt in die flüssige Phase an die Aktivkohle zu binden und darüber dem Gas-Flüssig-Gleichgewicht zu entziehen.

Die der Wäsche nachgeschalteten Abwasseraufbereitungsanlagen haben die Aufgabe, die in der Wäsche abgeschiedenen Schadstoffe wieder aus dem Wasser zu entfernen. Denn zunächst leistet eine Wäsche nur die Reinigung des Gases durch Überführung der Schadstoffe in den Wasserpfad, aber nicht die endgültige Abtrennung dieser aus dem System. Bei unzureichender Aufbereitung der Abwässer resultiert daraus eine zusätzliche Belastung der Gewässer. Die Stärke abwasserfreier Anlagen (wie für Abfallverbrennungsanlagen nach 17. BImSchV gesetzlich vorgeschrieben) ist eine definierte Senke für alle Schadstoffe, auch für Quecksilber. Damit bleibt die Emission über das Abgas der einzige Quecksilbereintrag in die Umwelt, dessen weiterer Verbleib nicht kontrolliert werden kann. Die übrigen Reststoffe wie Schlacke, Flugstaub und Salze werden entweder verwertet oder unter Tage deponiert.

Neben den Maßnahmen zur Abscheidung von Quecksilber aus dem Abgas gibt es auch Verfahren zur Quecksilberoxidation innerhalb des Abgaspfades, mit dem Ziel, das schwerer abzuschiedende elementare Quecksilber in das deutlich besser abzutrennende zweiwertige Quecksilber zu überführen.

Die *bromgestützte Hg-Abscheidung aus den Abgasen von Verbrennungsanlagen* [7] ist dafür eine interessante Option. Durch Zugabe relativ kostengünstiger und unproblematischer Bromidsalze wie NaBr oder CaBr₂ zum Brennstoff oder in den Feuerraum entsteht im heißen Abgas die Wirksubstanz Br₂, das freie Brom. Dadurch wird der Oxidationsgrad von Quecksilber im Rohgas erhöht, so dass Quecksilber zu nahezu 100 % als zweiwertige Spezies nach Austritt aus dem Kessel vorliegt. Probleme mit überschüssigem Brom sind zumindestens in Anlagen mit Wäsche nicht zu erwarten, weil es ebenfalls abgeschieden und durch SO₂ zu Bromid reduziert wird. Das Verfahren eignet sich besonders für Kraftwerksanlagen mit einem vergleichsweise hohen Anteil an Hg(0) und konstanter Brenngutzusammensetzung. Auch der gezielte Einsatz in Sonderabfallverbrennungsanlagen kann sinnvoll sein.

Ebenfalls positiv auf die Oxidation von Quecksilber wirkt sich der Einsatz von Katalysatoren zur Entstickung aus. Am Katalysator wird das elementare Quecksilber oxidiert und verbindet sich mit dem abgaseigenen HCl zu HgCl_2 . Diese zunächst als Nebeneffekt beobachtete Reaktion hat dazu geführt, dass an der Verbesserung der Hg-Oxidation durch Entstickungs-Katalysatoren intensiv geforscht und dessen Entwicklung vorangetrieben wird.

5. Maßnahmen zur Minderung von Feinstaub

Unter dem Begriff *Feinstaub* werden alle Partikel zusammengefasst, die in der Luft fein verteilt sind und deren aerodynamischer Durchmesser¹ kleiner 10 μm beträgt (PM10). Dabei ist es unerheblich, aus welchen Verbindungen die Partikel bestehen, in welchem Aggregatzustand sie vorliegen oder welche Form sie besitzen. Der aerodynamische Durchmesser ist ein wichtiges Maß zur Charakterisierung von feinen Partikeln, weil er das Verhalten der Teilchen in der Luft beeinflusst. Die Aufenthaltsdauer sowie die Abscheidung der Partikel in der Umwelt und im Organismus hängen unter anderem von dieser Partikelgröße ab. Dementsprechend wird unterschieden in ultrafeine Partikel (UFP < 100 nm Durchmesser), PM1, PM2.5, PM5 und PM10. Als Maß zur Charakterisierung können die Partikelanzahl, die Oberfläche, das Volumen und die Masse herangezogen werden.

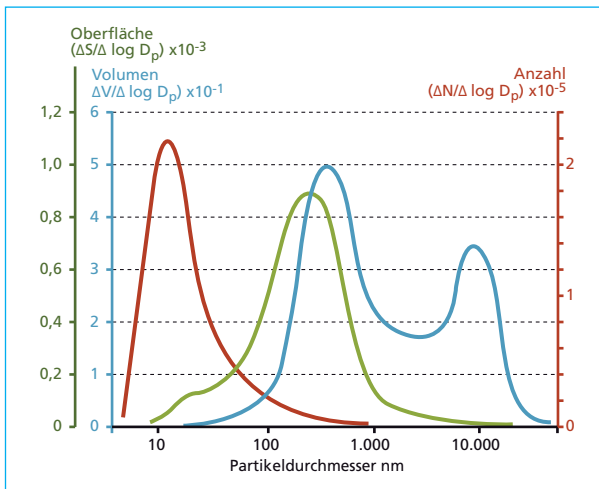


Bild 2:

Korngrößenverteilungen bei atmosphärischen Partikeln

Quelle: Bruckmann, P.; Gehrig, R.; Kuhlbusch, T.; Sträter, E.; Nickel, C.: Vorkommen von Feinstäuben und die Maßstäbe ihrer Bewertung. Statuspapier Feinstaub, September 2010

Bild 2 zeigt eine Korngrößenverteilung atmosphärischer Partikel. Die als ultrafein bezeichneten Partikel umfassen in der Atmosphäre fast immer > 90 % der Partikelanzahlkonzentration. Da Volumen und Masse in der dritten Potenz vom Durchmesser abhängen, tragen die UFP jedoch nur zu einem sehr kleinen Anteil zur Masse von PM10 bei. Dementsprechend sind für diese Partikel Angaben zu Anzahlkonzentrationen am aussagekräftigsten. [8]

¹ Aerodynamischer Durchmesser: Durchmesser, den eine Kugel mit der Dichte 1 g/m^3 haben müsste, um die gleiche Sinkgeschwindigkeit in Luft zu besitzen wie das betrachtete Partikel.

Im Bundesimmissionsschutzgesetz wird die Massenkonzentration als konservatives Maß verwendet, womit der Bezug zwischen Emission und daraus resultierender Immission grundsätzlich gewährleistet ist. Allerdings werden die Immissionsgrenzwerte für die Partikelgrößen PM_{2.5} und PM₁₀ gesondert festgeschrieben, während für die Emissionen der Gesamtschwebstaub (TSP, Partikel < 100 µm Durchmesser) begrenzt ist. Unter diesem Gesichtspunkt sind die Regularien nicht zielgerichtet.

Auf Basis des am Kamin online erfassten Emissionswertes für Gesamtstaub als massenbezogene Konzentration ist eine unmittelbare Beurteilung der in der Abgasreinigung installierten Minderungsmaßnahmen in Bezug auf Feinstaub jedoch nicht möglich. TSP beinhaltet zwar die Feinstaubfraktionen, auf diese wird jedoch nicht zugegriffen.

Da jegliche Maßnahme zur Minderung des TSP auch die Feinstaubfraktionen betreffen, kann davon ausgegangen werden, dass die zur Minderung des Gesamtstaubs installierten Techniken auch zur Minderung der Feinstaubemissionen einen Beitrag leisten. Ein messtechnischer Nachweis wurde jedoch nur in Einzelfällen erbracht, z.B. [9]. Demnach bestand der am Kamin emittierte Gesamtstaub (1,7 mg/m³_{i,N.tr.}) zu rund 8 % aus Partikeln mit Durchmessern > 10 µm; ca. 64 % lagen im Größenbereich < 2,5 µm. Der für PM_{2.5} ermittelte Abscheidegrad von 99,92 % entsprach dem des Gesamtstaubabscheidegrads von 99,93 %.

Einen Anhaltspunkt über die Feinstaubfraktionen liefern auch Veröffentlichungen über Fraktionsabscheidegrade der einzelnen Komponenten. Für Elektrofilter gilt ein Fraktionsabscheidegrad > 90 % für PM₁ als Stand der Technik. Für Partikel > 5 µm werden Fraktionsabscheidegrade von 99 % erzielt und ein Abscheidegrad von 99,9 % wird für Partikel > 20 µm erreicht [10].

Für Gewebefilter liegt der Fraktionsabscheidegrad für alle Partikel > 99 %. Bereits für Partikel > 5 µm werden Fraktionsabscheidegrade > 99,9 % angegeben [11]. Mit Gewebeatwicklungen aus Verbundwerkstoffen können inzwischen für Partikeldurchmesser > 5 µm Abscheidegrade > 99,99 % erreicht werden [12].

Eine weitere Entwicklung sind die sog. Hybridfilter [13], die aus einer Kombination aus Elektrofilter und Schlauchfilter bestehen. Das Hauptanwendungsgebiet ist die Erhöhung bestehender Elektrofilter. Dabei wird das existierende Filtergehäuse weiter genutzt, die ersten Elektrofilterfelder bleiben im Betrieb, die hinteren werden durch einen Schlauchfilter ersetzt. Damit werden die Vorteile der Elektrofiltration und die der Schlauchfiltration gleichermaßen genutzt, indem die weitaus größte Menge an Staub mit relativ geringem Energieaufwand abgeschieden wird, die Feinreinigung der kleineren Partikelfraktionen im Schlauchfilter erfolgt. Diese werden in der Zementindustrie erfolgreich eingesetzt.

Trotz dieser Erfolge bei der Staubabscheidung aus Abgasen hinter Verbrennungsprozessen bleibt die Tatsache bestehen, dass hohe Anteile der TSP-Emissionen im submikronen und teilweise auch im Größenbereich der UFP liegen können. Gerade die feinen und ultrafeinen Partikel können die meisten Abgasreinigungssysteme ungehindert passieren. Da ultrafeine Partikel direkt aus unvollständiger Verbrennung oder indirekt aus gasförmigen Vorläufersubstanzen entstehen, lässt sich die Diskussion

der Feinstaubabscheidung aus industriellen Prozessen nicht auf die Ertüchtigung der Feststoff-Staubabscheider reduzieren. Dieses zeigt eine im Rahmen des Umweltforschungsplans zum Vorhaben *Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung – PAREST* erstellte Studie [14]. Während die PM₁₀-Emission aus *Verbrennungsprozessen und Transformation: Kraftwerke, Fernwärme, Raffinerien (Energy transformation, SNAP 1)* mit nur 2 % kaum zur PM₁₀-Gesamtemission aus anthropogenen Quellen beiträgt, ist der Anteil dieser Verursacherguppe an der aus Vorläufersubstanzen (NO_x, SO₂ und NMVOC²) entstehenden PM₁₀-Belastungen deutlich größer. In ländlichen Gebieten beträgt er 16 %, in Ballungsräumen 15 %.

Wie nachgewiesen werden konnte [15], sind in Systemen mit Wäscher die ultrafeinen Partikel verantwortlich für die Bildung von Aerosolen mit festem Kern und flüssiger Hülle. Diese verbleiben jedoch im submikronen Partikelgrößenbereich und sind damit zu klein, um im Wäschersystem abgeschieden zu werden. Demgegenüber haben Untersuchungen an einem Nass-Elektrofilter gezeigt, dass Partikel PM₁₀ nahezu vollständig abgeschieden werden können. Der Abscheidegrad für Partikel PM_{2,5} liegt bei 80 % [16]. Unter Ausnutzung des Phänomens der Aerosolbildung, d.h. feine und ultrafeine Partikel dienen als Oberfläche zur Kondensation von Säure bildenden Gasen wie z.B. SO₃, können diese aufgrund des durch den Flüssigkeitsmantel vergrößerten Durchmessers abgeschieden werden.

In Deutschland ist bisher nur an einer Anlage der Wäsche ein Aerosolabscheider nachgeschaltet, an zwei Anlagen werden Nasselektrofilter eingesetzt.

6. Maßnahmen zur Minderung von Stickoxiden

Die durch die Verbrennung entstehenden Stickoxide bestehen zum weitaus größten Teil aus NO und zu einem geringen Teil aus NO₂. Bei den für Hausmüllverbrennungsanlagen üblichen Temperaturen stammt der Stickstoff aus dem Brennstoff. Thermisches und promptes NO entstehen erst ab etwa 1.200 °C.

Die Bildung von Stickoxiden ist von der Temperatur und dem Sauerstoffgehalt abhängig, so dass die Verbrennungsluftführung mit Primär- und Sekundärluft und dem Luftüberschuss λ Einfluss auf die Konzentration der sich bildenden Stickoxide hat. Deshalb beginnt eine optimierte NO_x-Reduzierung bereits im Kessel durch die sog. Primärmaßnahmen. Es hat sich gezeigt, dass durch eine Anpassung der Luftstufung und dem Einsatz von Abgasrezirkulation sich die Konzentration an NO_x deutlich absenken lässt [17].

Durch Verwendung von Luft aus dem Feuerraum als Mischluft im Bereich einer SNCR wird die Konzentration des NO erhöht, was zu einer verbesserten Umsetzung der Stickoxide zu N₂ führt [18].

Das Verfahren der SNCR ist limitiert durch das benötigte Temperaturfenster. Die für die Reaktion benötigte Menge an Reduktionsmittel im Überschuss und der daraus resultierende Ammoniakslupf sind ebenfalls von der Temperatur abhängig.

² NMVOC oder NMHC (Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe)

Damit hängt die Leistungsfähigkeit des Verfahrens davon ab, wie gut es gelingt, die Eindüsung des Ammoniaks im benötigten Temperaturbereich zu platzieren. Deshalb haben neuere Entwicklungen zur Optimierung des SNCR-Verfahrens zum Ziel, unter allen Betriebsbedingungen und über den gesamten Kesselquerschnitt eine gleichmäßige Verteilung des Reduktionsmittels zu gewährleisten.

Bei inhomogenen Brennstoffen wie Hausabfall schwanken entsprechend der wechselnden Zusammensetzung des Brennstoffs Heizwerte und Zündverhalten quasi kontinuierlich. Dazu kommt, dass sich je nach Verbrennungsführung und Kesselgeometrie innerhalb des Kessels Strömungsschiefen bilden können, es also keine homogene Verteilung des Abgases über den Kesselquerschnitt gibt. Erschwerend kommt hinzu, dass der Kessel über die Reisezeit verschmutzt und damit das Temperaturfenster mit zunehmendem Verschmutzungsgrad nach oben wandert. Um dennoch die SNCR-Technik auch für hohe NO_x -Umsatzraten und niedrigen NH_3 -Schlupf zu ertüchtigen, werden für die Zugabe des Reduktionsmittels mehrere Eindüsungsstellen über den Umfang und die Höhe des Kesselzuges verteilt. Die Anwahl der Dosierstellen erfolgt in Abhängigkeit von der Temperatur. Dazu müssen entsprechend leistungsstarke Temperaturmessungen installiert sein. Temperaturmessungen der neuesten Generation verwenden akustische Signale und simulationsgestützte Temperaturprofile [19].

Demgegenüber wird bei den SCR-Verfahren die für den Prozess optimale Temperatur durch den Einsatz von Wärmetauschern und Zusatzenergie anlagentechnisch sichergestellt. Letztlich sind der zu erreichende Reingasgehalt und der NH_3 -Schlupf eine Frage des Katalysatorvolumens und damit eine Frage der Investition und des Platzangebotes. Deshalb gelten Entwicklungen im Bereich der SCR mehr dem Ziel einer energetischen Optimierung. Dazu gehört auch der Einsatz der SCR-Technik bei tiefen Temperaturen [20].

Maßnahmen zur Minderung von NO_x -Emissionen sehen auch die Kombination aus SNCR und SCR vor. Erfolgreich eingesetzt wird eine High-Dust-SCR hinter Kessel mit SNCR. In diesem Fall kann die SNCR NO_x -optimiert im Bereich um $900\text{ }^\circ\text{C}$ betrieben werden. Der bei diesen Temperaturen vergleichsweise hohe NH_3 -Schlupf dient am Katalysator als Reduktionsmittel.

Ein weiterer interessanter Ansatz zur Minderung von NO_x -Emissionen sind katalytische Filtermedien. Diese können einfach und zeitnah in bestehende Schlauchfilteranlagen implementiert werden. Es konnte im Betrieb nachgewiesen werden, dass bei moderaten NO_x -Konzentrationen im Rohgas die katalytischen Filter zur Einhaltung des Reingaswertes ausreichend waren. Ein erhebliches Potenzial wird in der Kombination aus SNCR und katalytischem Filter gesehen auch in Hinblick auf ein hohes Maß an Betriebssicherheit [21].

Die vom Umweltbundesamt in Auftrag gegebene Studie [17] kommt zu dem Schluss, dass mit dem gegenwärtigen Stand der Technik sowohl mit dem SNCR-Verfahren als auch mit dem SCR-Verfahren ein NO_x -Reingasgehalt von $< 100\text{ mg/m}^3_{\text{i.N.tr}}$ problemlos eingehalten werden kann. Zur Verbesserung der Energieeffizienz sollten mögliche Primärmaßnahmen ausgeschöpft werden. Um eine weitere Absenkung der NO_x -Emission zu erreichen, kann die Kombination der unterschiedlichen Minderungsmaßnahmen (SNCR, SCR, katalytische Filter) wirtschaftliche und energetische Vorteile bieten.

7. Literatur

- [1] Rössert: Historie der Luftreinhaltung, Bayrisches Landesamt für Umwelt, Abt. 2, 13.10.2009
- [2] Vehlow, J.: Die Entwicklung der Abfallverbrennung, ITAD e. V., <http://www.itad.de/information/geschichte.html>
- [3] Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft vom 27. Februar 1986, Punkt 3.1.2
- [4] <http://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/beste-verfuegbare-techniken>
- [5] <http://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/beste-verfuegbare-techniken/industrieemissions-richtlinie>
- [6] Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, Edificio Expo, Sevilla, Spanien, 2005
- [7] Patent DE10233173B4, Verfahren zur Abscheidung von Quecksilber aus Rauchgasen, 2006
- [8] Bruckmann, P.; Gehrig, R.; Kuhlbusch, T.; Sträter, E.; Nickel, C.: Vorkommen von Feinstäuben und die Maßstäbe ihrer Bewertung. Statuspapier Feinstaub, September 2010
- [9] Warnecke, R.; Müller, V.; Nordsieck, H.: Particle measurement in flue gas cleaning. Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt, 2009, http://www.gks-sw.de/images/forschungsberichte/D2-6-27_Particle_measurements_in_flue_gas_cleaning_GKS_-_FIN.pdf
- [10] Fritz, W.; Kern, H.: Reinigung von Abgasen. Vogel Buchverlag, 1992
- [11] eine gemeinschaftliche Information der Firmen MikroPul GmbH & Co. KG und W. L. Gore & Associates GmbH: Moderne Entstaubungstechnik mit Oberflächenfiltern. <http://www.mikropul.de/downloads/MikroPul-Entstaubungstechnik-Oberflaechenfilter.pdf>
- [12] Freudenberg Filtration Technologies SE & Co. KG: Fallstudie *Energiesparpotential in einem Zementwerk*. http://www.freudenberg-filter.com/fileadmin/templates/downloads/CS/Zementwerk_CS_02_EC_201_Maerz_2013_D_low_2_.pdf
- [13] Harder, J.: Process filter trends in the cement industry. In: ZKG International, Special Filtration, No. 9-2009, (Volume 62)
- [14] Stern, R.: PM10-Ursachenanalyse auf der Basis hypothetischer Emissionsszenarien, Teilbericht zum F&E-Vorhaben *Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung – PAREST*, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Forschungskennzahl 206-43 200/01 UBA-FB 001524/ANH,21, September 2010, <http://www.uba.de/uba-info-medien/4535.html>
- [15] Brosig, G.: Untersuchung von HCl-Nebeln in technischen Gasreinigungsanlagen. Universität Duisburg-Essen, Dissertation, Duisburg, 2008
- [16] IGF-Forschungsvorhaben Nr. 16563N: Optimierung eines Kondensations-Nass-Elektro-Filters für Feinstaub und Aerosolabscheidung, http://www.iuta.de/files/schlussbericht_16563n_20130220.pdf
- [17] Beckmann, M.; Wen, T.: Beschreibung unterschiedlicher Techniken und deren Entwicklungspotentiale zur Minderung von Stickoxiden im Abgas von Verbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken hinsichtlich Leistungsfähigkeit, Kosten und Energieverbrauch. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, 2011
- [18] Gohlke, O.; Koralewska, R.: Feuerungstechnische Maßnahmen zur NO_x-Reduzierung in Abfallverbrennungsanlagen – Very Low NO_x-Verfahren –. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 9, Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012
- [19] Reynolds, T.: Können SNCR-Verfahren zukünftige Grenzwerte einhalten? In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 9, Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012
- [20] Frey, R.; Baur, M.: Katalytische Entstickung bei tiefen Temperaturen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 9, Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012
- [21] Ebert, J.: Umrüstung bestehender Verbrennungsanlagen zur Einhaltung strenger Emissionsanforderungen bei NO_x, NH₃ und Staub. VDI-Fachtagung *Emissionsminderung 2012*, Nürnberg, 19.-20. Juni 2012