

Techniken und Entwicklungspotentiale zur Minderung von Stickstoffoxiden im Abgas von Abfallverbrennungsanlagen – Leistungsfähigkeit, Kosten und Energieverbrauch –

Michael Beckmann, Tao Wen und Markus Gleis

1.	Bilanzierung der betrachteten Verfahrenskonzepte	592
2.	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	594
2.1.	Investitionskosten der Entstickungsanlagen	594
2.2.	Betriebsmittelkosten	595
3.	Zusammenfassung	597
4.	Literatur.....	598
5.	Symbolverzeichnis	598

Bei der weiteren Entwicklung der Immissionsrichtlinien werden unter anderem auch die NO_x -Grenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke abgesenkt. Es ist vorgesehen, dass bei den Anlagen zur Verbrennung und Mitverbrennung von Abfällen mit einer Feuerungsleistung von mehr als 50 MW, die nach dem 31.12.2012 erstmals in Betrieb genommen oder nach diesem Zeitpunkt einer wesentlichen baulichen Änderung unterzogen werden, ab diesem Zeitpunkt ein Jahresmittelwert von 100 mg/Nm^3 tr. NO_x (angegeben in NO_2 , bezogen auf 11 Vol.-% O_2) nicht überschritten werden darf.

Es zeigt sich, dass Erkenntnisse aus Forschung und industrieller Praxis es gestatten, nach über zwanzig Jahren über eine Fortschreibung der emissionsbegrenzenden Anforderungen bei Abfallverbrennungsanlagen zu diskutieren. Deutschland ist dazu u.a. auch durch die neuen Europäischen Vorgaben mit der höheren Verbindlichkeit der BVT-Merkblätter und der Berücksichtigung des fortgeschrittenen Standes der Technik verpflichtet.

Vor diesem Hintergrund wurde in einem Gutachten [1] geprüft, inwieweit und mit welchem Aufwand bei Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken mit modernen NO_x -Minderungsmaßnahmen, ein Tagesmittelwert von 100 mg/Nm^3 tr. einzuhalten ist, ohne dabei einen deutlich erhöhten Ammoniakchlupf auszulösen.

Um die Einflüsse der Absenkung von NO_x -Grenzwerten auf die Bilanzen und Kosten der Abgasreinigung in Abfallverbrennungsanlagen darzustellen, wird eine Abfallverbrennungsanlage mit zwei ausgewählten Abgasreinigungskonzepten jeweils für SNCR- und SCR-Technik für unterschiedliche NO_x -Grenzwertanforderungen bilanziert.

Zusammenfassend werden die Ergebnisse der Massen- und Energiebilanzen sowie der daraus abgeleiteten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Folgenden dargestellt.

Durch umfangreiche Literaturrecherchen und Aussagen von Herstellern von Entstickungsanlagen kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass der vorhin genannte Grenzwert

bei Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken sowohl mit SCR-Technik als auch mit der modernen SNCR-Technik bei vertretbarem Ammoniakschlupf ($10 \text{ mg/Nm}^3 \text{ tr.}$) sicher unterschritten werden kann.

Es sei doch hingewiesen, dass es bei der Ermittlung der Folgenabschätzung bei einer Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen im Bereich der Stickstoffoxidminimierung Einzelfallprüfungen bedarf, da die technischen Rahmenbedingungen in den verschiedenen Anlagen stark variieren und von dem im Gutachten [1] dargestellten Beispielen abweichen können.

1. Bilanzierung der betrachteten Verfahrenskonzepte

Ziel der Studie war es nicht, alle in der Praxis üblichen Abgasreinigungssysteme einer Bilanzierung und Bewertung im Hinblick auf die Eignung und den Vergleich von SNCR- und SCR-Verfahren zur NO_x -Minderung zu unterziehen. Neben verschiedenen Verfahrenskonzepten wären dann auch unterschiedliche Rohgaskonzentrationen usw. einzubeziehen. Vielmehr geht es in dem hier gesteckten Rahmen um die Frage der prinzipiellen Eignung der beiden Verfahren (SNCR und SCR) sowie um eine beispielhafte Bilanzierung, um zu zeigen, welche Aspekte bei einem konkreten Vergleich zu beachten sind.

Für die Bilanzierung des SNCR-Verfahrens wurde die folgende Anlagenvariante aus [2] ausgewählt (Bild 1). In diesem Konzept wird anstatt des Verdampfungskühlers ein zusätzlicher Economiser hinter dem Kessel eingesetzt, um das Abgas auf die gewünschte Betriebstemperatur abzukühlen (Natriumbicarbonat als Additiv). An dieser Stelle besteht auch die Möglichkeit, das in der Anlage anfallende Prozesswasser einzudüsen. Die Leistung des Economisers muss dann durch eine entsprechende Regelung angepasst werden. Die restliche Abgaswärme nach der Abgasreinigung kann über den Wärmeübertrager hinter dem Gewebefilter für die Fernwärmeproduktion genutzt werden. Die Reingastemperatur beträgt somit 135 °C vor dem Kamin.

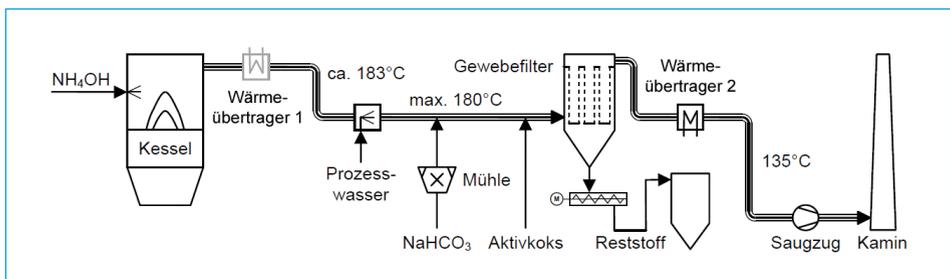


Bild 1: Vereinfachtes Verfahrensließbild für eine Abfallverbrennungsanlage mit SNCR-Verfahren und Trockensorptionsverfahren mit Natriumbicarbonat

Quelle: Beckmann, M.; Karpf, R.; Dütge, V.; Wen, T.: Vergleichende ökonomische Betrachtung verschiedener Einsatzstoffe bei Trockensorptionsverfahren zur Abgasreinigung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 8. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011, S. 583-631

Für das SCR-Verfahren ist eine Abfallverbrennungsanlage zu bilanzieren, deren Abgasreinigungskette aus dem Trockensorptionsverfahren mit Natriumbicarbonat und Tail-End-SCR besteht (Bild 2). Dank der hohen Betriebstemperatur des Verfahrens (um 180 °C , Natriumbicarbonat als Additiv) und des Einsatzes von Niedertemperaturkatalysatoren kann

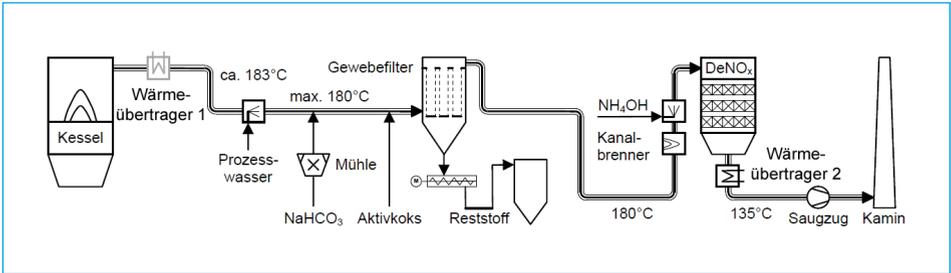


Bild 2: Vereinfachtes Verfahrensfliessbild für eine Abfallverbrennungsanlage mit Trockensorptionsverfahren mit Natriumbicarbonat und Tail-End-SCR-Verfahren

Quelle: Beckmann, M.; Karpf, R.; Dütge, V.; Wen, T.: Vergleichende ökonomische Betrachtung verschiedener Einsatzstoffe bei Trockensorptionsverfahren zur Abgasreinigung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 8. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011, S. 583-631

eine kontinuierliche Abgaswiederaufheizung entfallen. Eine regelmäßige Regeneration der Katalysatoren ist jedoch immer erforderlich, um die an der Katalysatoroberfläche anhaftenden Ammoniumsalze zu entfernen. Diese erfolgt über die Aufheizung des Abgasstroms auf 320 °C bei einer verminderten Kesselleistung von 60 % mit Kanalbrennern, die mit Erdgas befeuert werden. Laut [2] werden acht Reinigungsgänge pro Jahr für den SCR-Katalysator, der für die dargestellte Abfallverbrennungsanlage ausgelegt ist, in der Berechnung angesetzt und jeder Reinigungsgang soll sechs Stunden dauern.

Für beide Anlagenkonzepte wird festgelegt, dass die Austrittstemperatur des Abgases im Kessel 200 °C beträgt. Da die Eindüsung des Ammoniakwassers im Feuerraum Einfluss auf den Kesselwirkungsgrad hat, muss außer der Abgasreinigung noch die Feuerung im Kesselbereich bei der Bilanzierung mit betrachtet werden.

Bei der Bilanzierung wird die Rohgaskonzentration von NO_x mit 400 mg/Nm^3 tr. angenommen. Je nach Leistungsgrenzen beider Entstickungsverfahren sind folgende NO_x -Konzentrationen im Reingas festgelegt.

Tabelle 1: Bilanzierungsvarianten für SNCR- und SCR-Verfahren in Abhängigkeit von unterschiedlichen NO_x -Reduktionsanlagen

NO_x -Konzentration Rohgas: 400 mg/Nm^3 tr.		Einheit	Bilanzierungsvariante		
SNCR-Verfahren	NO_x -Reingas	mg/Nm^3 tr.	200	150	100
	NO_x -Reduktionsgrad	%	50	62,5	75
SCR-Verfahren	NO_x -Reingas	mg/Nm^3 tr.	150	100	50
	NO_x -Reduktionsgrad	%	62,5	75	87,5

Die Grenzwerte in der 17. BImSchV sind auf den Normzustand (273,15 K, 1,01325 MPa) sowie auf einen Bezugssauerstoffgehalt von 11 Vol.-% trocken bezogen. Für die Stoffe, deren Emissionen durch Abgasreinigungseinrichtungen gemindert und begrenzt werden, dürfen nach § 12 der 17. BImSchV die Messwerte nur für die Zeiten umgerechnet werden, in denen der gemessene Sauerstoffgehalt über dem Bezugssauerstoffgehalt liegt. D.h. bei Unterschreitung des Bezugssauerstoffgehaltes müssen dennoch – ohne Umrechnung – die genannten Grenzwerte eingehalten werden [3].

Da der Sauerstoffgehalt im Abgas bei Abfallverbrennungsanlagen in der Regel unterhalb von 11 Vol.-% liegt, dürfen die Emissionswerte nicht umgerechnet werden. Die oben genannten NO_x -Konzentrationen beziehen sich deshalb auf den trockenen Abgasvolumenstrom nach der Verbrennungsrechnung im Normzustand und den betrieblichen Sauerstoffgehalt.

Ein Vergleich zwischen SNCR- und SCR-Verfahren ist in dieser Studie nicht vorgesehen, da die Massen- und Energiebilanzen sowie die daraus resultierende wirtschaftliche Betrachtung von den gesamten Abgasreinigungskonzeptionen abhängig sind. Die Betriebstemperaturen einzelner Verfahren und ihre Anforderungen an die Abgasqualität beeinflussen die anderen Reinigungsstufen in der Verfahrenskette. Für Vergleichsbeispiele ist auf [2] zu verweisen. Je nach Kombination von Entschwefelungs- und Entstickungsverfahren sowie den Schaltungsvarianten des SCR-Verfahrens ergeben sich mehrere Abgasreinigungskonzepte für Abfallverbrennungsanlagen. Neben den Kosten müssen aber noch andere Parameter wie z.B. die Flexibilität des Verfahrens gegenüber Lastschwankungen und Schadstoffspitzen, die Betriebsstabilität, die Leistungsgrenzen usw. berücksichtigt werden.

Für die Details der Bilanzierung bzw. deren Ergebnisse ist auf das vom Umweltbundesamt beauftragten Gutachten [1] zu verweisen.

2. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

2.1. Investitionskosten der Entstickungsanlagen

Die Preise der Entstickungsanlagen, die hierbei betrachtet werden, basieren auf den Kostangaben von Anlagenherstellern und aus der Literatur. In Tabelle 2 werden die Investitionskosten je nach Verfahren und Grenzwertanforderung angegeben.

Tabelle 2: Investitionskosten von SNCR- und SCR-Anlagen ohne Reduktionsmittellager für unterschiedliche Grenzwertanforderungen

NO_x -Konzentration Rohgas: 400 mg/Nm ³ tr.		Einheit	Wert		
SNCR-Verfahren	NO_x -Reingaskonzentration	mg/Nm ³ tr.	200	150	100
	Investitionskosten	EUR	265.000	280.000	525.000
SCR-Verfahren	NO_x -Reingaskonzentration	mg/Nm ³ tr.	150	100	50
	Investitionskosten	EUR	2.280.000	2.308.000	2.365.000

Quelle: Anlagenhersteller

Die Baukosten von SNCR-Anlagen unterscheiden sich hauptsächlich wegen der Anzahl der Eindüsebenen und Eindüsungsanlagen sowie der Kosten des akustischen Gastemperaturmesssystems. Für die Einhaltung des Grenzwertes von 100 mg/Nm³ tr. NO_x als Tagesmittelwert ist ein agam-System erforderlich. Die Investitionskosten steigen entsprechend an und betragen nahezu doppelt so viel wie für eine Standardanlage mit 200 mg/Nm³ tr. NO_x als Grenzwert.

Bei dem SCR-Verfahren erhöhen sich die Baukosten aufgrund des zunehmenden Katalysatorvolumens bzw. der Anzahl der Katalysatorlagen und dementsprechend des größeren Stahlgehäuses der Anlage. Die hierbei vom Hersteller angegebenen Preise basieren auf

Kosten bereits ausgeführter Projekte. Dabei sind die Kosten der Regenerationsbrenner bereits mit kalkuliert. Der Investitionsaufwand des Wärmeübertragers zur Abgaskühlung hinter dem SCR-Katalysator ist in den Preisen nicht enthalten.

2.2. Betriebsmittelkosten

Anhand der Ergebnisse der erstellten Massen- und Energiebilanzen hat sich herausgestellt, dass sich die einzelnen Prozessstufen gegenseitig beeinflussen. Beispielhaft zeigt es sich beim SNCR-Verfahren, dass die im Kessel ausgekoppelte Wärmemenge weiter abnimmt, je mehr Ammoniakwasser bzw. Verdünnungswasser in den Feuerraum eingedüst wird. Der erhöhte Abgasvolumenstrom aufgrund der Eindüsung fordert am Saugzug ebenfalls einen höheren elektrischen Energiebedarf. Bei der Berechnung der Betriebsmittelkosten werden deshalb die Gesamtabgasreinigungslinien berücksichtigt.

Die in dem Kessel abgegebene Wärme wird in die Kostenbetrachtung nicht einbezogen. Dennoch ist es anzumerken, dass die Wassereindüsung in den Feuerraum zu einer Kesselwirkungsgradabsenkung führt. Bei dem SNCR-Verfahren beträgt der für die Wasserverdampfung erforderliche Wärmestrom etwa 0,5 MW. Dies sind etwa 0,625 % von der Nennleistung des betrachteten Kessels (80 MW).

Für die Ermittlung der Betriebsmittelkosten werden die in [2] und [4] angegebenen Werte für die spezifischen Werte übernommen (Tabelle 3).

Tabelle 3: Spezifische Werte für die Berechnung von Betriebsmittelkosten

Parameter	Einheit	Preis
Strom (elektrische Energie)	EUR/kWh	0,05
Natriumbicarbonat (98 Ma.-% NaHCO ₃)	EUR/t	230
Aktivkoks (AK)	EUR/t	420
Ammoniakwasser (25 Ma.-% NH ₃)	EUR/t	100
Verdünnungswasser (Deionat)	EUR/t	4,000
Druckluft (tr.)	EUR/Nm ³	0,030
Reststoff zur Entsorgung	EUR/t	135,000
Erdgas H (h _u = 10,0 kWh/Nm ³)	EUR/Nm ³	0,600
Wärme zur Dampferzeugung (Economiser)	EUR/kW	-0,010
Fernwärme	EUR/kWh	-0,026

Quellen:

Beckmann, M.; Karpf, R.; Dütge, V.; Wen, T.: Vergleichende ökonomische Betrachtung verschiedener Einsatzstoffe bei Trockensorptionsverfahren zur Abgasreinigung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 8. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011, S. 583-631

Kersting, M.: Beispielhafte Kostenrechnung für den Einsatz einer katalytischen und nichtkatalytischen Entstickungsanlagen für eine Abfallverbrennungsanlage mit einer Kapazität von 200.000 t/a. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 4. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2008, S. 341-350

Aus den spezifischen Werte und den Bilanzierungsergebnissen [1] ergeben sich dann die Betriebsmittelkosten für die beiden Abgasreinigungskonzepte. In Bild 3 und 4 sind Vergleiche der errechneten Betriebsmittelkosten für die betrachteten Abgasreinigungsketten mit SNCR- und SCR-Verfahren bei unterschiedlichen NO_x-Reduktionsgraden dargestellt.

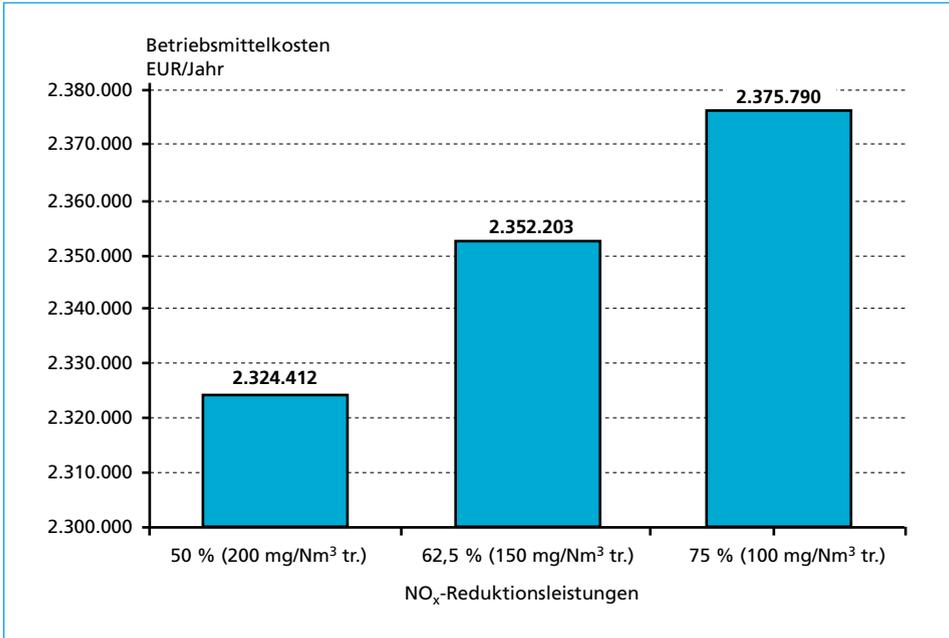


Bild 3: Vergleich der Betriebsmittelkosten für die Abgasreinigung mit SNCR-Verfahren für unterschiedliche NO_x-Reduktionsleistungen

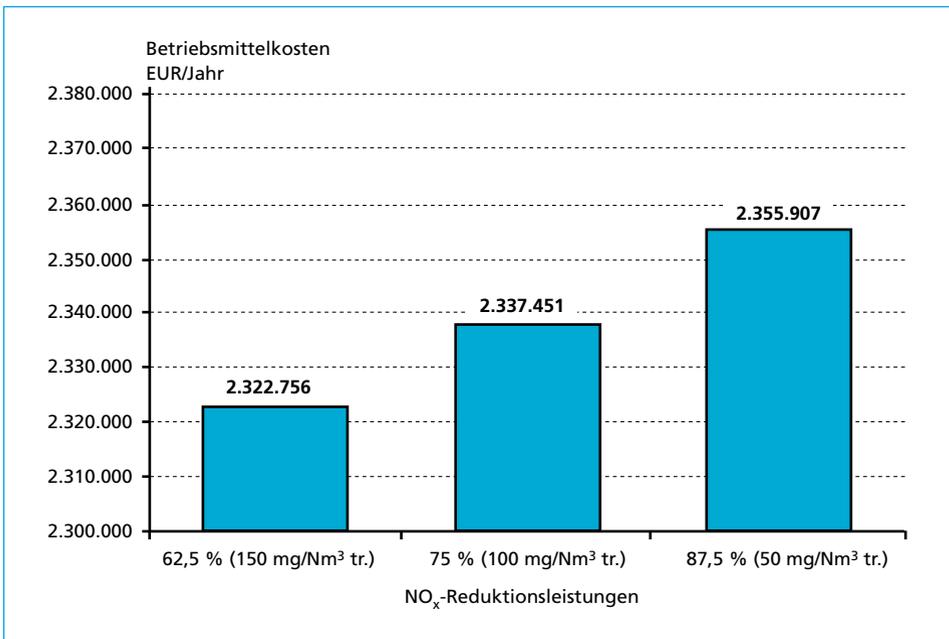


Bild 4: Vergleich der Betriebsmittelkosten für die Abgasreinigung mit SCR-Verfahren für unterschiedliche NO_x-Reduktionsleistungen

3. Zusammenfassung

Die für die Bilanzierung benötigten Betriebsdaten bzw. -vorgaben wurden von den Anlagenherstellern zur Verfügung gestellt. Aus den Ergebnissen ist zu erkennen, dass die weitere Grenzwertabsenkung auf $100 \text{ mg/Nm}^3 \text{ tr. NO}_x$ als Tagesmittelwert keine signifikante Wirkung auf die Betriebsmittelkosten hat. Die Investitionskosten für eine 100/10-fähige SNCR-Anlage sind doppelt so hoch wie die Kosten für eine Anlage, die den Grenzwert der 17. BImSchV einhalten muss. Bei dem SCR-Verfahren erhöhen sich sowohl die Investitionskosten als auch die Betriebsmittelkosten aufgrund der Grenzwertabsenkung nur unwesentlich.

Die aus den Massen- und Energiebilanzen errechneten Betriebsmittelkosten für die beiden hier betrachteten Abgasreinigungskonzepte liegen annähernd in gleicher Größenordnung. Bei der gleichen Reduktionsleistung, mit der die weiter abgesenkten Grenzwerte 100/10 eingehalten werden können, liegen die Investitionskosten (ohne Reduktionsmittellager) einer SCR-Anlage erwartungsgemäß höher als die einer SNCR-Anlage. Das SNCR-Verfahren benötigt hingegen aufgrund der überstöchiometrischen Dosierung mehr Reduktionsmittel und damit auch größere Mengen an Druckluft. Das bei der Eindüsung zugeführte Verdünnungswasser verringert die auskoppelbare Wärmeleistung des Kessels. Bei dem SCR-Verfahren ist aber der elektrische Energiebedarf aufgrund des Druckverlustes im Katalysator höher. Hinsichtlich der NO_x -Reduktionsleistung ist die Entstickung mit Katalysator weiterhin die führende Technik.

Eine Empfehlung für ein bestimmtes Entstickungsverfahren kann anhand der Bilanzierung dieser Studie nicht abgeleitet werden, da eine Entstickungsanlage immer Teil einer Gesamtanlage ist, in die sie sinnvoll integriert werden soll. Die Massen- und Energiebilanzen, sowie die daraus resultierende Kostenbetrachtung werden von den gesamten Abgasreinigungskonzeptionen beeinflusst. Je nach Kombination von Entschwefelungs- und Entstickungsverfahren, sowie den Schaltungsvarianten des SCR-Verfahrens ergeben sich mehrere Abgasreinigungskonzepte für Abfallverbrennungsanlagen. Die Betriebstemperaturen einzelner Verfahren und ihre Anforderungen an die Abgasqualität beeinflussen die anderen Reinigungsstufen in der Verfahrenskette. Wenn zum Beispiel als Entschwefelungsstufe Nasswäscher eingesetzt werden, bietet sich eine Low-Dust-Variante mit Elektrofilter an, da das Abgas vor den Wäschern unbedingt entstaubt werden muss. Die Kosten für den Elektrofilter sollen daher nicht der Entstickungsstufe angerechnet werden.

Neben den Kosten müssen aber noch andere Parameter, wie z.B. die Flexibilität des Verfahrens gegenüber Lastschwankungen und Schadstoffspitzen, die Betriebsstabilität, die Leistungsgrenzen usw. berücksichtigt werden.

Laut der deutschen BImSchV dürfen die gemessenen Konzentrationen von den Schadstoffen, deren Emissionen durch Abgasreinigungseinrichtungen, d.h. Sekundärmaßnahmen, gemindert und begrenzt werden, nur für die Zeiten umgerechnet werden, in denen der gemessene Sauerstoffgehalt über dem Bezugssauerstoffgehalt liegt. Da der Sauerstoffgehalt im Abgas bei Abfallverbrennungsanlagen in der Regel unterhalb von 11 Vol.-% liegt, werden die Emissionswerte nicht umgerechnet. In anderen europäischen Ländern, wie z.B. in der Niederlande, Österreich usw., wo der NO_x -Grenzwert $70 \text{ mg/Nm}^3 \text{ tr.}$ beträgt, beziehen sich dagegen die Messwerte der Schadstoffkonzentrationen nach Abgasreinigungseinrichtungen in der Regel auf den Bezugssauerstoffgehalt (11 Vol.-% O_2). Dieser NO_x -Emissionswert scheint dann strenger als der in Deutschland angegebene Emissionswert. Eigentlich liegt er aber aufgrund der Umrechnung auf gleichem Niveau wie der Wert in Deutschland, der auf der Basis des gemessenen betrieblichen Sauerstoffgehaltes ermittelt wird. In der Zukunft sollte eine einheitliche Regelung für den Bezug der Grenzwerte in der EU gefunden werden.

4. Literatur

- [1] Beckmann, M.; Wen, T.: Sachverständigengutachten: Beschreibung unterschiedlichen Techniken und deren Entwicklungspotentiale zur Minderung von Stickstoffoxiden im Abgas von Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken hinsichtlich Leistungsfähigkeit, Kosten und Energieverbrauch. Auftraggeber: Umweltbundesamt (UBA), 03/2011
- [2] Beckmann, M.; Karpf, R.; Dütge, V.; Wen, T.: Vergleichende ökonomische Betrachtung verschiedener Einsatzstoffe bei Trockensorptionsverfahren zur Abgasreinigung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 8. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011, S. 583-631
- [3] Löschau, M.; Thomé-Kozmiensky, K. J.: Reinigung der Abgase aus Abfallverbrennungsanlagen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 7. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010, S. 730-752
- [4] Kersting, M.: Beispielhafte Kostenrechnung für den Einsatz einer katalytischen und nichtkatalytischen Entstickungsanlagen für eine Abfallverbrennungsanlage mit einer Kapazität von 200.000 t/a. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 4. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2008, S. 341-350

5. Symbolverzeichnis

- h_u Heizwert (unterer)
N Normzustand ($T_N = 273,15 \text{ K}$ und $p_N = 1 \text{ bar}$)
tr. trockene