



KIT SCIENTIFIC REPORTS 7680

Erweiterte Überlegungen zur integrativen Vermeidung von Umweltauswirkungen am Beispiel der Stickoxidemissionen aus Abfallverbrennungsanlagen

Ulf Richers, Vivien Günther

Ulf Richers, Vivien Günther

**Erweiterte Überlegungen zur integrativen Vermeidung
von Umweltauswirkungen am Beispiel der Stickoxidemissionen
aus Abfallverbrennungsanlagen**

Karlsruhe Institute of Technology
KIT SCIENTIFIC REPORTS 7680

Erweiterte Überlegungen zur integrativen Vermeidung von Umweltauswirkungen am Beispiel der Stickoxidemissionen aus Abfallverbrennungsanlagen

von

Ulf Richers und Vivien Günther *

Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)

* Brandenburgische Technische Universität Cottbus
Lehrstuhl Thermodynamik/Thermische Verfahrenstechnik

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover – is licensed under the
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License*

(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>



*The cover page is licensed under the Creative Commons
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):*

<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>

Print on Demand 2014

ISSN 1869-9669

DOI: 10.5445/KSP/1000042778

Kurzfassung

Die zukünftige Versorgung mit Energie sowie Rohstoffen und deren effiziente Verwendung stellen zurzeit wichtige Diskussionsthemen dar. Unabhängig davon kommt es im Umweltschutzbereich aufgrund der europäischen Richtlinie über Industrieemissionen zu Veränderungen. Unter anderem müssen zukünftig die sogenannten Referenzdokumente für die besten verfügbaren Techniken (BVT-Dokumente), in denen die leistungsfähigsten Umweltschutztechnologien europaweit aufgeführt sind, für Genehmigungsaufgaben verbindlich berücksichtigt werden. Aufgrund dieser Änderungen wurden in Deutschland die Emissionsgrenzwerte bei der Abfallverbrennung verschärft.

Eine Herabsetzung von Grenzwerten ist mit erweiterten Aufwendungen für die Verfahrenstechnik, höheren Betriebsmittelverbräuchen und zusätzlichem Energieaufwand verbunden. Im Zusammenhang mit der effizienten Nutzung von Energie und Rohstoffen ist somit die Frage zu klären, ob eine weitere Verschärfung der Emissionsgrenzwerte bei der Abfallverbrennung sinnvoll ist.

Diese Fragestellung wird in der vorliegenden Arbeit am Beispiel der Maßnahmen zur Minderung von Stickoxidemissionen an Abfallverbrennungsanlagen genauer betrachtet. An diesen Anlagen haben sich neben Primärmaßnahmen im Bereich der Feuerung als zusätzliche Möglichkeiten das selektive katalytische Verfahren (SCR) und das selektive nicht-katalytische Verfahren (SNCR) etabliert.

Aus den durchgeführten Arbeiten ergibt sich zunächst, dass die Stickoxidemissionen aus der Abfallverbrennung in Deutschland auch nach Herabsetzung der Emissionsgrenzwerte nur einen geringen Anteil an den gesamten Stickoxidemissionen ausmachen.

Ferner ergibt sich aus den durchgeführten Vergleichen, dass eine weitere Grenzwertabsenkung für die Stickoxidemissionen der Abfallverbrennung im Hinblick auf den Einsatz von Ressourcen nicht die optimale Lösung darstellt. Aufgrund von Nebenreaktionen erfordert das SNCR-Verfahren im Vergleich zum SCR-Verfahren eine größere Reduktionsmittelmenge. Dagegen kommt das SCR-Verfahren zwar ohne Reduktionsmittelüberschuss aus, aber aufgrund der üblichen Installation am Ende der Rauchgasreinigung entsteht durch die notwendige Rauchgasaufheizung ein erhöhter Energiebedarf.

Um einen besser an Energie- und Ressourceneffizienz ausgerichteten Umweltschutz zu erreichen, wird am Beispiel der Verfahren zur Stickoxidminderung ein sektorübergreifender Ansatz abgeleitet. An Stelle einer Aufrüstung der Entstickungsverfahren an Abfallverbrennungsanlagen ist die Nutzung der effizienteren Technik an Kraftwerken in Form einer Dienstleistung vorgesehen. Abschließend wird die mögliche Umsetzung des entwickelten sektorübergreifenden Ansatzes überprüft.

Danksagung:

Der Autor und die Autorin bedanken sich bei Herrn Dr. W. Walk für die kritischen Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge.

Abstract

The future supply of energy and raw materials as well as their efficient use represent important topics of current discussions in Germany. In addition, there are changes in the field of environmental protection caused by the new European directive on industrial emissions. Among others, the so-called reference documents on best available techniques (BAT-documents) describing the best environment protection technologies must be used as mandatory regulations in future. As a result of these developments, the legal emission limits of municipal solid waste incinerators (MSWI) were reduced in Germany.

A further reduction of emission limits is associated with enhanced process engineering, higher resource consumption and additional energy demand. In connection with the efficient use of energy and raw materials the question arises whether a further reduction of emission limit values for MSWI is advisable.

This question is investigated in the present work based on the example of measures to reduce nitrogen oxide emissions of MSWI. At these plants, the selective catalytic reduction technology (SCR) and the selective non-catalytic reduction technology (SNCR) are used in addition to primary measures in the furnace.

In this investigation it is shown that total emissions of nitrogen oxides generated by German MSWI contribute only a small proportion to the overall nitrogen oxides emissions. Therefore, a further decrease of emission values will not have any practical effect on the pollution reduction of the environment.

Complementary comparisons lead to the conclusion, that a further reduction of emission limit values for nitrogen oxide emitted from MSWI is not the optimal solution in reference to the consumption of resources. Due to side reactions, the SNCR technology requires a larger quantity of auxiliary chemicals in comparison with the SCR method. On the other hand, the SCR process implies a stoichiometric amount of auxiliary chemicals, but due to the usual installation at the end of the flue gas cleaning device the necessary reheating system causes an increased energy demand.

For a better energy- and resource-efficient environment protection, a trans-sectoral approach is suggested in context with the reduction of nitrogen oxide emissions. Instead of upgrading the technology for limiting nitrogen oxide emissions at MSWI, the use of the more efficient technology in power plants in terms of a service is suggested. Finally, possibilities for the implementation of the developed trans-sectoral approach are discussed.

Acknowledgment

The authors would like to thank Dr. W. Walk for his critical comments and suggestions.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Problemstellung.....	3
3	Rechtliche Grundlagen	4
3.1	Europäische Vorgaben.....	4
3.1.1	Die europäische Richtlinie über Industrieemissionen	4
3.1.2	BVT-Merkblatt "Waste Incineration"	7
3.1.3	Europäische Richtlinie über die Verbrennung von Abfällen	9
3.1.4	EU-Richtlinien zur Luftqualität.....	10
3.1.5	Emissionshöchstmengen in der EU	10
3.1.6	Die europäische Richtlinie über Abfälle	12
3.2	Deutsches Recht	13
3.2.1	Das Bundes-Immissionsschutzgesetz.....	13
3.2.2	Die 17. BImSchV	14
3.2.3	Weitere Rechtsvorschriften zum Bundes-Immissionsschutzgesetz ...	16
3.2.4	Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG).....	16
3.3	Diskussion Rechtliche Grundlagen	18
4	Grundlagen über Stickoxide	20
4.1	Stickstoffoxide.....	20
4.2	Stickoxide bei technischen Verbrennungsprozessen.....	22
5	Grundlagen großtechnischer Feuerungsanlagen.....	27
5.1	Abfallverbrennungsanlagen.....	27
5.2	Aufbau von Kohlekraftwerken	30
6	Technische Minderung von Stickoxidemissionen.....	32
6.1	Das SNCR-Verfahren	33
6.2	Das SCR-Verfahren.....	37
6.3	Wirtschaftliche Betrachtungen zur Minderung von Stickoxiden aus Abfallverbrennungsanlagen.....	40
6.4	Zusammenfassung zu Stickoxid-Minderungsverfahren	43
7	Detailliertere und ökologische Betrachtung von Stickoxidemissionen aus Abfallverbrennungsanlagen.....	44
7.1	Entwicklungen in der Vergangenheit	44
7.2	Beitrag der Abfallverbrennung zu den Stickoxidemissionen	48
7.3	Ökologischer Vergleich der Entstickungsverfahren.....	51
7.4	Zusammenfassung zur ökologischen Betrachtung	54
8	Vorschlag für eine effizientere Entstickung an Abfallverbrennungsanlagen.....	55
9	Zusammenfassung	58
10	Literatur	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Temperaturabhängigkeit der Stickoxidausbeute bei Synthese aus Luft [Riedel] [Holleman].	21
Abbildung 2:	Temperaturabhängigkeit der NO-Bildung [Khartchenko].	24
Abbildung 3:	N ₂ O-Konzentration im Rauchgas nach der Abgasausbrandzone als Funktion der Temperatur [Hunsinger].	25
Abbildung 4:	Schema einer Abfallverbrennungsanlage.	27
Abbildung 5:	Schematischer Aufbau eines Kohlekraftwerks.	30
Abbildung 6:	Übersicht über die Verfahren zur Entstickung von Rauchgasen.	32
Abbildung 7:	Reaktionsprinzip der Stickoxidreduktion für das SNCR-Verfahren.	33
Abbildung 8:	Temperaturfenster und chemische Reaktionen für das SNCR-Verfahren [Mineur] [Dittrich].	35
Abbildung 9:	Schematische Anordnung und Aufbau einer SNCR-Anlage an einer Abfallverbrennungsanlage mit Rostfeuerung.	35
Abbildung 10:	Schematischer Aufbau eines SCR-Katalysators [Baumbach] [Steinmüller] [VDI 3927-1].	38
Abbildung 11:	Schematische Darstellung der wichtigsten Schaltungsvarianten für das SCR-Verfahren.	38
Abbildung 12:	Schematischer Aufbau einer SCR-Anlage für Abfallverbrennungsanlagen in Low Dust Tail End-Schaltung.	39
Abbildung 13:	Schema zur Reihenschaltung von zwei Abscheidungsstufen zur Schadstoffabtrennung aus Rauchgasen.	46
Abbildung 14:	Rauchgasreinigungsanlage am Standort Bielefeld nach Anpassung an die 17. BImSchV [Lahl-4].	46
Abbildung 15:	NO _x -Emissionen großtechnischer Abfallverbrennungsanlagen [Lahl-3].	47
Abbildung 16:	NO _x -Gesamtemissionen aus Abfallverbrennungsanlagen und EBS-Kraftwerken als Funktion der NO _x -Konzentration im Reingas.	50
Abbildung 17:	Kumulierter Energieaufwand, bezogen auf die Entstickungsleistung, in Abhängigkeit verschiedener Emissionsgrenzwerte [Walk-1] [Walk-2].	52
Abbildung 18:	Ökologischer Vergleich der beiden Entstickungsverfahren nach Ecoindicator 99-Methode (ohne Gewichtung) [Walk-3].	53
Abbildung 19:	Veränderungen durch Übergang zu einem sektorübergreifenden Ansatz.	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht zum Aufbau der Richtlinie über Industrieemissionen (IED).	5
Tabelle 2:	Grundpflichten der Betreiber nach Artikel 11 IED [R 2010 75].	5
Tabelle 3:	Kriterien für die Ermittlung der besten verfügbaren Techniken (Anhang III, [R 2010 75]).	6
Tabelle 4:	Gliederung des BVT-Merkblatt "Waste Incineration" (ohne Vorspann)	8
Tabelle 5:	Emissionswerte für Abfallverbrennungsanlagen aus dem BVT-Merkblatt "Waste Incineration" (Auswahl, [BVT-WI]).	8
Tabelle 6:	Emissionsgrenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen [R 2000 76].	9
Tabelle 7:	Nationale Emissionshöchstmengen für SO ₂ , NO _x , VOC (ohne Methan) und NH ₃ , für das Jahr 2010 (aktueller Stand [R 2001 81]).	11
Tabelle 8:	Abfallhierarchie entsprechend der Richtlinie über Abfälle [R 2008 98].	12
Tabelle 9:	Emissionsgrenzwerte der aktuellen 17. BImSchV	15
Tabelle 10:	Ausgewählte Rechtsvorschriften zum BImSchG.	17
Tabelle 11:	Ausgewählte Verordnungen und Gesetze in Ergänzung zum KrWG.	18
Tabelle 12:	Stickstoffoxide.	20
Tabelle 13:	Übersicht zur Bildung der Stickoxide NO und NO ₂ [Lange] [Blank]	23
Tabelle 14:	Stickstoffoxid-Rohgasemissionen verschiedener Verbrennungsprozesse.	25
Tabelle 15:	N ₂ O-Emissionen aus stationären Feuerungen [Klein].	26
Tabelle 16:	Konzentrationsbereiche für verschiedene Schadstoffe im Rohgas von Hausmüllverbrennungsanlagen [BVT-WI].	28
Tabelle 17:	Einfluss von Feuerungstechnik und Abfallzusammensetzung auf die Schadstoffkonzentration im Rohgas von Abfallverbrennungsanlagen.	29
Tabelle 18:	Betriebstemperaturen für das SNCR-Verfahren.	34
Tabelle 19:	Betriebstemperaturen für den Katalysator bei Abfallverbrennungsanlagen. ..	40
Tabelle 20:	Anlagenteile für das SNCR-Verfahren und das SCR-Verfahren (Low-Dust-Tail-End) an Abfallverbrennungsanlagen.	41
Tabelle 21:	Investitionskosten von SNCR- und SCR-Anlagen für unterschiedliche Emissionsgrenzwerte [Beckmann-2].	41
Tabelle 22:	Kostenaufstellung für SNCR- und SCR-Entstickungsanlagen (Siehe Text) [Kersting].	42
Tabelle 23:	Emissionsgrenzwerte (Tagesmittelwerte) von ausgewählten Schadstoffen für Abfallverbrennungsanlagen, angegeben in mg/Nm ³	45
Tabelle 24:	Szenarien für die Abschätzung der NO _x -Emissionen aus der Abfallverbrennung.	49
Tabelle 25:	NO _x -Emissionen ausgewählter Sektoren [UBA-Daten1] (Siehe Text).	50

1 Einleitung

In Deutschland werden die aktuellen Diskussionen von der zukünftigen Energieversorgung beherrscht, denn insbesondere nach dem Kernenergieausstieg aufgrund des Unglücks in Fukushima (Japan) gibt es in diesem Bereich große Herausforderungen. Es stellt sich die Frage, wie die zukünftige Energieversorgung unter Berücksichtigung von Klimaschutz, wirtschaftlichen Aspekten und Versorgungssicherheit aussieht.

Ein weiteres Problemfeld stellt die Verfügbarkeit von Ressourcen dar, die zukünftig nicht mehr in dem heute bekannten Umfang zur Verfügung stehen werden. Entweder, weil es bestimmte Materialien nicht mehr gibt, oder der Einsatz aufgrund der Preisentwicklung zu teuer ist.

Im Vergleich zu diesen Diskussionen um die Energie- und Rohstoffversorgung kommt den aktuellen Änderungen in klassischen Umweltschutzbereichen wie der Abfallentsorgung oder den Emissionen in die Atmosphäre in der Öffentlichkeit eine geringe Aufmerksamkeit zu. Diese Veränderungen ergeben sich hauptsächlich aus der Neufassung von europäischen Richtlinien der Europäischen Union (EU), die in nationale Vorschriften umgesetzt werden müssen.

Im Mittelpunkt steht hier die neue europäische Richtlinie über Industrieemissionen (engl.: Industrial Emissions Directive - IED) [R 2010 75]. Diese Richtlinie ersetzt sowohl die Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU-Richtlinie) als auch mehrere Sektorrichtlinien, wie z.B. die Richtlinien über Abfallverbrennung und Großfeuerungsanlagen.

Einerseits werden die Anforderungen aus den Sektorrichtlinien in die Richtlinie über Industrieemissionen übernommen, auf der anderen Seite wird die Vorgehensweise für die Festlegung von Emissionsgrenzwerten geändert. Abweichend von der bisherigen Praxis müssen zukünftig die Anforderungen aus den "Best Available Techniques Reference Documents" (BREF-Dokumente) von den Genehmigungsbehörden verbindlich umgesetzt werden. Die BREF-Dokumente werden auf europäischer Ebene von Fachleuten aus der öffentlichen Verwaltung, Industrie und Umweltschutzverbänden erarbeitet und enthalten eine Zusammenstellung der besten verfügbaren Technik für Umweltschutzmaßnahmen.

In Folge der neuen Richtlinie über Industrieemissionen kam es in Deutschland auf Bundes- und Länderebene zu Aktivitäten für eine Verschärfung der Emissionsgrenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen [Euwid 2011 11] [Euwid 2011 30] [Euwid 2011 35] [Gohlke]. Zusätzlich unterstützt wurden diese Aktivitäten durch Überlegungen auf europäischer Ebene, in Analogie zum Emissionsrechtehandel für Treibhausgase ein ähnliches System für Schwefeldioxid (SO₂) und Stickoxide (NO_x) einzuführen [Euwid 2010 30].

Frühere Aktivitäten zur Herabsetzung von Emissionsgrenzwerten für Abfallverbrennungsanlagen standen im Zusammenhang mit der europäischen Richtlinie über nationale Emissionshöchstmengen [R 2001 81] oder zielten auf eine Akzeptanzsteigerung durch den Einsatz fortschrittlicherer Technologien [BMU-2007] [Euwid 2007 27] [Lahl-1] [Lahl-2].

Betrachtet man dagegen die Auseinandersetzung um Abfallverbrennungsanlagen, so hat die Tendenz zu Null-Emissionsanlagen in den 90er Jahren eigentlich nicht zu einer Akzeptanzverbesserung beigetragen. Interessant ist in diesem Zusammenhang der Baustopp während der Errichtung der MVA Velsen in den 90er Jahren, der auf einem Umstieg vom SNCR-Verfahren auf die leistungsfähigere SCR-Technologie beruht. [Claus] [LT Saarland]

Im Rahmen der Diskussionen um die Verschärfung der Grenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen wird allerdings oft übersehen, dass Umweltschutzanforderungen in der Vergangenheit zu einer deutlichen Entlastung der Umwelt geführt haben. Heute stehen sehr unterschiedliche und leistungsfähige Rauchgasbehandlungsmethoden zur Begrenzung der

Schadstoffemissionen aus Verbrennungsprozessen zur Verfügung, so dass bei Abfallverbrennungsanlagen die entsprechenden Grenzwerte nicht nur sicher eingehalten werden können, sondern zum Teil eine deutliche Unterschreitung möglich ist.

Moderne Abfallverbrennungsanlagen erreichen im Betrieb beispielsweise CO-Emissionen im Bereich um 10 mg/m^3 ; bei den HCl-Konzentrationen können 1 mg/m^3 erreicht werden. Die Grenzwerte liegen bei 50 bzw. 10 mg/m^3 [BMU-2005]. Die Leistungsfähigkeit der Rauchgasreinigungsanlagen wird auch bei der Abscheidung der viel diskutierten Dioxine deutlich. Waren Abfallverbrennungsanlagen in den achtziger Jahren als sogenannte "Dioxin-Schleudern" bekannt, so sind die Emissionen ab 1990 drastisch zurückgegangen. Heute wird nur noch ein Tausendstel der ursprünglichen Dioxinmenge emittiert [BMU-2005]. Aufgrund dieser Fortschritte wird bei Umweltschutzmaßnahmen heute davon ausgegangen, dass diese per se von Vorteil für die Umwelt sind.

Es muss allerdings beachtet werden, dass Rauchgasreinigungsverfahren neben den positiven Umweltauswirkungen durch Abtrennung von Schadstoffen andererseits die Umwelt auch negativ beeinflussen. Der Grund für diese auf den ersten Blick überraschende Aussage liegt im verfahrenstechnischen Aufwand für die Rauchgasreinigungsanlagen: Der Betrieb dieser Anlagen erfordert u.a. elektrische Energie für die installierten Fördereinrichtungen und Überwindung der internen Druckverluste. Außerdem werden Hilfsstoffe wie beispielsweise Calciumcarbonat (CaCO_3) für die Entschwefelung oder Ammoniak (NH_3) für die Entstickung der Rauchgase benötigt. Auch der Bau von Umweltschutzanlagen erfordert verschiedene Rohstoffe und kann mit einem Flächenverbrauch verbunden sein.

Ergänzend ist zu berücksichtigen, dass der verfahrenstechnische Aufwand mit den Abscheideraten nicht linear sondern überproportional ansteigt. Dieser Sachverhalt wird insbesondere an älteren Abfallverbrennungsanlagen deutlich. Sehr niedrige Emissionen von Chlorwasserstoff (HCl) und Schwefeldioxid (SO_2), die deutlich unter den gesetzlichen Grenzwerten liegen, wurden durch zusätzliche Rauchgasreinigungsstufen erreicht. Den Wäschern als Hauptabscheidestufen für HCl- und SO_2 wurden z.B. aufwändige Flugstromadsorber-Anlagen nachgeschaltet.

Folglich besteht im Bereich der Abfallverbrennung eine Konkurrenz zwischen möglichst geringen Emissionen und einem ressourcen- und energieeffizienten Betrieb. Eine effiziente Abfallverbrennungsanlage verbraucht selbst wenig Energie und kann folglich relativ viel Strom bzw. Wärme abgeben. Es ergeben sich ein hoher Wirkungsgrad und ein relativ großer Beitrag zum Klimaschutz durch reduzierte CO_2 -Emissionen. Eine effiziente Abfallverbrennungsanlage ist allerdings mit einer relativ einfachen Rauchgasreinigungsanlage ausgerüstet, die zwar die sichere Einhaltung der gesetzlich geforderten Emissionsgrenzwerte ermöglicht, aber keine weitgehende Unterschreitung.

An einigen japanischen Abfallverbrennungsanlagen führten sehr hohe Anforderungen an die Rauchgasreinigung in Kombination mit Schmelzverfahren für anspruchsvolle Rückstandseigenschaften dazu, dass die gesamte Stromproduktion als Eigenbedarf benötigt wurde [Gohlke].

Auf eine ähnliche Situation wird von Beckmann et al. [Beckmann-1] für Anlagen zur Stromerzeugung hingewiesen. Die Autoren untersuchten in Modellrechnungen die Auswirkungen von Nachrüstungen im Bereich der Rauchgasreinigung auf Braunkohlenkraftwerke und Gasturbinen. Es wurde nachgewiesen, dass die Nachrüstung einer Anlage zur Selektiven katalytischen Reduktion ("SCR-Anlage") zur Minderung der Stickoxidemissionen den Nettowirkungsgrad bei der Stromerzeugung um ca. 2 % reduziert.

2 Problemstellung

Aus der vorangegangenen Darstellung der aktuellen Situation ergibt sich einerseits, dass aufgrund von neuen Richtlinien der EU erneut Aktivitäten zur Herabsetzung von Emissionsgrenzwerten für Abfallverbrennungsanlagen initiiert wurden. Auf der anderen Seite wurde aufgezeigt, dass auch Umweltschutzmaßnahmen mit einem Energieverbrauch und Ressourcenbedarf verbunden sind.

Aus dieser Situation ergibt sich als erstes Ziel der vorliegenden Arbeit, den möglichen Beitrag von weiter reduzierten Emissionsgrenzwerten im Bereich der Abfallverbrennung allgemein zum Umweltschutz zu ermitteln. Für eine zuverlässige Aussage, welchen Beitrag niedrigere Emissionen bzw. zusätzliche Rauchgasreinigungsmaßnahmen an Abfallverbrennungsanlagen erbringen können, ist zunächst der aktuelle Anteil der Abfallverbrennungsanlagen an den gesamten Schadstoffemissionen aus allen Bereichen (Industrie, private Haushalte, Verkehr usw.) zu bestimmen.

Eine zweite Problemstellung betrifft die angewendeten Rauchgasreinigungstechnologien. Im Rahmen eines ökologischen Vergleichs ist der Frage nachzugehen, wie effizient die eingesetzten Rauchgasreinigungsverfahren an Abfallverbrennungsanlagen in Abhängigkeit von den Emissionsgrenzwerten sind. Zu untersuchen ist, ob die bisherigen oder zukünftigen Maßnahmen zum Umweltschutz an Abfallverbrennungsanlagen mit der Klimadebatte, dem Energiesparen und der Ressourcenschonung zu vereinbaren sind. In diesem Zusammenhang sind auch wirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen.

Für eine umfassende Beurteilung der Maßnahmen reicht ein Blick allein auf Abfallverbrennungsanlagen und die möglichen Auswirkungen niedrigerer Emissionsgrenzwerte allerdings nicht aus. Es ist außerdem die Frage zu beantworten, ob Optimierungsansätze existieren. Es ist zu analysieren, ob die möglichen positiven Effekte durch verschärfte Grenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen nicht auf anderen Wegen - mit geringeren Aufwendungen an Kosten, Ressourcen bzw. Energie - erreicht werden können.

Die aufgeführten Fragestellungen werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit allerdings nicht für alle Schadstoffe bearbeitet, die im Rauchgas von Abfallverbrennungsanlagen enthalten sind. Ausgewählt als Schadstoffe wurden Stickoxide, die nicht nur von Abfallverbrennungsanlagen, sondern auch von Kraftwerken und Produktionsanlagen wie der Zementindustrie emittiert werden. Darüber hinaus entstehen große Stickoxidmengen im Verkehrssektor durch den Betrieb von Kraftfahrzeugen.

Vorgehensweise

Für ein grundlegendes Verständnis über die Anforderungen an den Betrieb von Abfallverbrennungsanlagen und die geforderten Emissionsminderungsmaßnahmen werden zu Beginn die relevanten Rechtsvorschriften vorgestellt. Zuerst werden die Inhalte der wichtigsten europäischen Richtlinien und anschließend die maßgeblichen deutschen Gesetze und Verordnungen erläutert.

Anschließend wird auf die Stickoxide als ausgewählte Schadstoffgruppe und deren Bildungswege bei Verbrennungsprozessen genauer eingegangen. Weitere Kapitel beschreiben den Aufbau von Abfallverbrennungsanlagen und zusätzlich von Kraftwerken zur Stromerzeugung, die am Ende der vorliegenden Arbeit im Zusammenhang mit Optimierungsansätzen herangezogen werden. Ergänzt werden diese Anlagenbeschreibungen durch eine Vorstellung der etablierten Verfahren zur Minderung von Stickoxiden.

Im Rahmen von genaueren Betrachtungen zu den Stickoxiden aus Abfallverbrennungsanlagen wird zuerst der Beitrag aus dem Bereich der Abfallverbrennung mit den Gesamtemissionen aus allen Industriesektoren und dem Verkehrsbereich verglichen. Außerdem wird ein ökolo-

gischer Vergleich der an Abfallverbrennungsanlagen im technischen Maßstab eingesetzten Technologien zur Stickoxidminderung durchgeführt.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wird ein Vorschlag zur Optimierung der Minderung von Stickoxidemissionen aus Abfallverbrennungsanlagen erarbeitet und im Zusammenhang mit den aktuellen Rechtsvorschriften diskutiert. Abschließend werden alle Ergebnisse zusammengefasst.

3 Rechtliche Grundlagen

Die rechtlichen Vorschriften für den Betrieb von technischen Anlagen werden immer stärker durch die Europäische Union (EU) vorgegeben. In der Regel werden von der EU Richtlinien erlassen, die dann in nationale Rechtsvorschriften überführt werden müssen. Mit Blick auf die thermische Behandlung von Abfällen existieren Richtlinien, die sich entweder auf den Umgang mit Abfällen oder den Betrieb von Abfallverbrennungsanlagen beziehen. In Ergänzung existieren Vorschriften, die sich auf emittierte Schadstoffmengen oder die Qualität der Umgebungsluft beziehen und somit einen indirekten Bezug zu großtechnischen Anlagen aufweisen.

In den folgenden Abschnitten werden zuerst die wichtigsten europäischen Richtlinien vorgestellt, die für die Abfallverbrennung und Minderung von Stickoxiden aus entsprechenden Anlagen von Bedeutung sind. Anschließend wird auf ausgewählte deutsche Rechtsvorschriften eingegangen.

Die nachfolgenden Abschnitte in diesem Kapitel zielen allerdings nicht auf eine umfassende Darstellung von allen Details ab. Vielmehr soll eine Übersicht über die Inhalte der aktuellen Vorschriften aufgezeigt werden, ergänzt durch ausgewählte Entwicklungen in der Vergangenheit.

3.1 Europäische Vorgaben

3.1.1 Die europäische Richtlinie über Industrieemissionen

Die Richtlinie über Industrieemissionen [R 2010 75] (engl.: Industrial Emissions Directive - IED) wurde am 24. November 2010 verabschiedet und am 17. Dezember 2010 im Amtsblatt der Europäischen Union publiziert. Durch diese neue Richtlinie wurde einerseits die alte "Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung" (IVU-Richtlinie) [R 1996 61] abgelöst. Außerdem wurden insgesamt sechs weitere Richtlinien mit unterschiedlichen Übergangsfristen aufgehoben, die neben drei verschiedenen Industrieprozessen auch die Abfallverbrennung betreffen. Die Anforderungen der aufgehobenen Richtlinien an die entsprechenden Industrieprozesse wurden in die IED aufgenommen.

Einen groben Überblick über den Aufbau der IED und die eingeschlossenen Industrieprozesse erhält man aus den Kapitelüberschriften der IED, die in Tabelle 1 aufgeführt sind.

Die IED umfasst nicht nur die Emissionen aus den in Tabelle 1 erwähnten Industrieprozessen. Der Geltungsbereich erstreckt sich entsprechend Artikel 10 in Verbindung mit Anhang I auf eine große Anzahl industrieller Tätigkeiten, in Abhängigkeit von der jeweiligen Anlagengröße. Der IED-Richtlinie unterliegen beispielsweise die unterschiedlichen Prozesse der Energiewirtschaft, die Erzeugung und Verarbeitung von Metallen, Produktionsanlagen der chemischen Industrie oder Anlagen zur Herstellung von Baustoffen wie z.B. Zement. Im Bereich der Abfallbehandlung werden nicht nur Abfallverbrennungsanlagen von der IED

erfasst, sondern auch Abfalllager sowie Anlagen zur biologischen oder physikalisch-chemischen Behandlung.

Tabelle 1: Übersicht zum Aufbau der Richtlinie über Industrieemissionen (IED).

Kapitel 1	Allgemeine Bestimmungen
Kapitel 2	Vorschriften für die im Anhang 1 aufgeführten Tätigkeiten
Kapitel 3	Sondervorschriften für Feuerungsanlagen
Kapitel 4	Sondervorschriften für Abfallverbrennungsanlagen und Abfallmitverbrennungsanlagen
Kapitel 5	Sondervorschriften für Anlagen und Tätigkeiten, bei denen organische Lösemittel eingesetzt werden
Kapitel 6	Sondervorschriften für Titandioxid produzierende Anlagen
Kapitel 7	Übergangs- und Schlussbestimmungen usw.
Anhänge	

Ferner bezieht sich die IED wie die ursprüngliche IVU-Richtlinie entsprechend Artikel 1 auf die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung infolge industrieller Tätigkeiten. Entsprechend den Begriffsbestimmungen in Artikel 3 IED werden die Umweltkompartimente Luft, Wasser und Boden erfasst. Somit ist der Anwendungsbereich der europäischen Richtlinie über Industrieemissionen wesentlich umfangreicher, als es der Titel der Richtlinie und die verwendeten Abkürzungen, insbesondere im deutschen Sprachraum, erwarten lassen.

Der sehr breite Anwendungsbereich der IED kommt auch in Artikel 11 IED zum Ausdruck, in dem die allgemeinen Grundpflichten der Betreiber von technischen Anlagen aufgeführt sind. In Tabelle 2 sind die Grundpflichten zusammengestellt.

Tabelle 2: Grundpflichten der Betreiber nach Artikel 11 IED (Text gekürzt) [R 2010 75].

- Geeignete Vorsorge gegen Umweltverschmutzungen
- Anwendung der besten verfügbaren Techniken
- Keine Verursachung erheblicher Umweltverschmutzungen
- Vermeidung von Abfällen, sonst Wiederverwendung, Recycling, sonstige Verwertung oder Beseitigung
- Energieeffizienter Betrieb der Anlage
- Maßnahmen zur Verhinderung von Unfällen
- Bei Stilllegung von Anlagen müssen mögliche Umweltverschmutzungen vermieden werden

Die Zusammenstellung in Tabelle 2 zeigt, dass nicht nur die Emissionen oder der Umweltschutz allgemein von den Grundpflichten der IED erfasst werden, sondern darüber hinaus auch die Bereiche Energieeinsatz, Arbeitssicherheit und der Zeitraum nach Stilllegung der Anlage. Außerdem ergibt ein Vergleich, dass es bei den Grundpflichten inhaltlich keine Unterschiede zu der alten IVU-Richtlinie gibt.

Die in Tabelle 2 erwähnten Grundpflichten decken durch Forderungen nach Energieeffizienz und Abfallvermeidung indirekt Klimaschutzaspekte sowie die Schonung von Ressourcen ab. Gleichwohl beinhalten die sehr umfangreichen Grundpflichten einen Widerspruch, denn die besten verfügbaren Techniken weisen in der Regel einen höheren Energie- bzw. Ressourcenbedarf aus. Dieser Widerspruch wird bei den Kriterien zur Bestimmung der besten verfügbaren Techniken berücksichtigt (Siehe Tabelle 3, im Text unten).

Für die Gewährleistung eines hohen und in allen Ländern der EU gleichen Umweltschutzstandards wird in Artikel 13 der IED, wie bereits in der früheren IVU-Richtlinie, ein Informationsaustausch auf europäischer Ebene über Technologien zum Umweltschutz zwischen Mitgliedstaaten, Industrie und Umweltverbänden gefordert. Zuständig für diesen Informationsaustausch ist das "European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau" (EIPPCB), das zum europäischen "Institut for Prospective Technological Studies" (IPTS) mit Sitz in Sevilla (Spanien) gehört.

Im Rahmen des Informationsaustauschs werden in einem 2- bis 5-jährigen Prozess von Vertretern aus Behörden, Industrie und Umweltschutzverbänden unter der Führung des EIPPCB die Merkblätter über die "Beste verfügbare Techniken" (BVT-Merkblätter) erstellt. Diese Merkblätter werden auch als "Best Available Techniques Reference Document" (BREF-Dokument) oder als "BAT"-Dokument bezeichnet. Seit 1997 wurden für ca. 30 verschiedene Industriesektoren BVT-Merkblätter erstellt [Schoenberger].

Für die Festlegung der "Besten verfügbaren Techniken" bei der Erstellung der BVT-Merkblätter sind allerdings nicht nur die erreichten Emissionsminderungen maßgeblich. Zu den Auswahlkriterien gehören u.a. Energie- und Ressourceneffizienz sowie die Menge und Auswirkungen der jeweiligen Emissionen. In Tabelle 3 sind alle Kriterien der IED aufgeführt.

Tabelle 3: Kriterien für die Ermittlung der besten verfügbaren Techniken (Anhang III, [R 2010 75]).

1.	Einsatz abfallarmer Technologie.
2.	Einsatz weniger gefährlicher Stoffe.
3.	Förderung der Rückgewinnung und Wiederverwertung der bei den einzelnen Verfahren erzeugten und verwendeten Stoffe und gegebenenfalls der Abfälle.
4.	Vergleichbare Verfahren, Vorrichtungen und Betriebsmethoden, die mit Erfolg im industriellen Maßstab erprobt wurden.
5.	Fortschritte in der Technologie und in den wissenschaftlichen Erkenntnissen.
6.	Art, Auswirkungen und Menge der jeweiligen Emissionen.
7.	Zeitpunkte der Inbetriebnahme der neuen oder der bestehenden Anlagen.
8.	Für die Einführung einer besseren verfügbaren Technik erforderliche Zeit.
9.	Verbrauch an Rohstoffen und Art der bei den einzelnen Verfahren verwendeten Rohstoffe (einschließlich Wasser) sowie Energieeffizienz.
10.	Die Notwendigkeit, die Gesamtwirkung der Emissionen und die Gefahren für die Umwelt so weit wie möglich zu vermeiden oder zu verringern.
11.	Die Notwendigkeit, Unfällen vorzubeugen und deren Folgen für die Umwelt zu verringern.
12.	Von internationalen Organisationen veröffentlichte Informationen.

Wie bei den Grundpflichten der Anlagenbetreiber in Tabelle 2 zeigt eine Gegenüberstellung der Kriterien aus Tabelle 3 mit den entsprechenden Kriterien aus der alten IVU-Richtlinie keine Unterschiede.

Allerdings zeigte die Praxis in der Vergangenheit, dass der Vollzug der IVU-Richtlinie und die Berücksichtigung der BVT-Merkblätter in Genehmigungsverfahren in den einzelnen Staaten der EU nicht einheitlich gehandhabt wurden. Das Ziel, durch die IVU-Richtlinie bzw. durch die BVT-Merkblätter beim Betrieb großer Industrieanlagen ein annähernd gleiches Umweltschutzniveau und damit eine Vermeidung von unterschiedlichen Wettbewerbsbedingungen in Europa zu bewirken, wurde nicht erreicht [Waskov].

Folglich war eine stärkere Berücksichtigung der BVT-Merkblätter für den Betrieb großtechnischer Industrieanlagen in europäischen Rechtsvorschriften ein wichtiges Ziel bei der Erstellung der IED. Zu diesem Zweck fordert die IED, dass mit den BVT-Merkblättern ergänzend sogenannte "BVT-Schlussfolgerungen" erstellt werden. Neben dem aktuellen Stand der Technik in Europa enthalten die BVT-Schlussfolgerungen u. a. Spannbreiten für die Emissionen in die Luft.

Die BVT-Schlussfolgerungen werden nach einem in der IED festgelegten Abstimmungsprozess auch auf politischer Ebene beschlossen. Anschließend erfolgt eine Übersetzung in alle Sprachen der EU und die Publikation als separate Dokumente im Amtsblatt der EU.

Die BVT-Schlussfolgerungen sind entsprechend Artikel 15 Abs. 3 IED von der zuständigen Behörde bei der Festlegung von Emissionsgrenzwerten im Rahmen von Genehmigungen in der Weise zu berücksichtigen, *"dass die Emissionen unter normalen Betriebsbedingungen die mit den besten verfügbaren Techniken assoziierten Emissionswerte, wie sie in den Entscheidungen über die BVT-Schlussfolgerungen ... festgelegt sind, nicht überschreiten"*.

Auf diesem Weg werden die BVT-Merkblätter bzw. BVT-Schlussfolgerungen von der IED in eine rechtsverbindliche Ebene für den Vollzug überführt. In der alten IVU-Richtlinie war für die BVT-Merkblätter lediglich die Funktion einer (nicht rechtsverbindlichen) Erkenntnisquelle vorgesehen.

Zusätzliche Veränderungen durch die IED betreffen die Überwachung von industriellen Anlagen, die im Vergleich zu bisherigen europäischen Vorschriften anspruchsvoller geworden ist. Die zuständigen Behörden müssen Überwachungsprogramme erstellen, in denen die regelmäßige Kontrolle der Anlagen im Überwachungsbereich festgelegt wird. Außerdem sind vorliegende Genehmigungen nach bestimmten Vorgaben regelmäßig zu überprüfen und bei Änderungen in den BVT-Schlussfolgerungen innerhalb festgelegter Fristen anzupassen.

Für weitere Details der IED wird auf den Richtlinientext [R 2010 75] oder die Literatur [Epiney] [Gleis-1] [Kalmbach] [Waskow] verwiesen.

3.1.2 BVT-Merkblatt "Waste Incineration"

Das BVT-Merkblatt "Waste Incineration" [BVT-WI] wurde im Zeitraum von 2001 bis 2005 erarbeitet und im August 2006 publiziert. Entsprechend einer Entscheidung der Europäischen Kommission bezieht sich dieses BVT-Merkblatt nur auf Abfallverbrennungsanlagen (Siehe Abschnitt 5.1), die Mitverbrennung von Abfällen in Anlagen zur Zementherstellung oder Kraftwerken wird nicht berücksichtigt [Gleis-2].

Das nur in englischer Sprache veröffentlichte Merkblatt ist entsprechend der Standardgliederung der EU aufgebaut und umfasst ca. 600 Seiten (ohne Vorspann). In Tabelle 4 sind die Hauptkapitel aufgeführt.

Tabelle 4: Gliederung des BVT-Merkblatt "Waste Incineration" (ohne Vorspann)

Kapitel 1	Allgemeine Informationen zum Industriesektor
Kapitel 2	Angewandte Techniken
Kapitel 3	(Aktuelle) Emissions- und Verbrauchswerte
Kapitel 4	Techniken, die bei Bestimmung der Besten Verfügbaren Techniken zu berücksichtigen sind
Kapitel 5	Beste Verfügbare Techniken
Kapitel 6	Techniken in der Entwicklung
Kapitel 7	Abschließende Bemerkungen
	Literatur, Glossar

Entsprechend Tabelle 4 sind in dem BVT-Merkblatt "Waste Incineration" die Kapitel 4 und 5 von größter Bedeutung, denn dort werden die Besten Verfügbaren Techniken festgelegt. Ein Kapitel mit den in Abschnitt 3.1.1 der vorliegenden Arbeit erwähnten BVT-Schlussfolgerungen enthält das derzeit aktuelle BVT-Merkblatt nicht, denn das BVT-Merkblatt zum Sektor Abfallverbrennung basiert noch auf der alten IVU-Richtlinie.

Wichtige Daten aus dem BVT-Merkblatt zu den erreichbaren Emissionswerten von Abfallverbrennungsanlagen sind in Tabelle 5 zu finden. Einige dieser in Tabelle 5 aufgeführten Werte wurden von den Vertretern einzelner Mitgliedsstaaten nur als Abweichung vom Mehrheitsbeschluss akzeptiert. Für nähere Informationen und Erläuterungen zu den angegebenen Emissionswerten wird auf das BVT-Merkblatt [BVT-WI] verwiesen.

Tabelle 5: Emissionswerte für Abfallverbrennungsanlagen aus dem BVT-Merkblatt "Waste Incineration" (Auswahl, [BVT-WI]).

Schadstoff	Einzel- messung	Halbstunden- mittelwert [mg/m ³]	Tages- mittelwert [mg/m ³]
Staub		1 - 20	1 - 5
HCl		1 - 50	1 - 8
SO ₂		1 - 150	1 - 40
NOX SCR		40 - 300	40 - 100
NOX SNCR		30 - 350	120 - 180
TOC		1 - 20	1 - 10
CO		5 - 100	5 - 30
Hg	< 0,05 [mg/m ³]	0,001 - 0,03	0,001 - 0,02
PCDD/PCDF	0,01 - 0,1 [ng/m ³]		
NH ₃	< 10 [mg/m ³]	1 - 10	< 10

In Deutschland führte die Veröffentlichung des BVT-Merkblatts "Waste Incineration" im Jahr 2006 zu keinen gravierenden Veränderungen. Aufgrund der 1990 erstmals erlassenen 17. BImSchV [17. BImSchV], deren Anforderungen ab 1994 eingehalten werden mussten, kam es bei der Rauchgasreinigung von Abfallverbrennungsanlagen bereits früher zu umfangreichen Nachrüstungsmaßnahmen.

Weitere Informationen zum BVT-Merkblatts "Waste Incineration" findet man in [Gleis-2]. Eine Überarbeitung des BVT-Merkblatts ist ab 2014 vorgesehen [EIPPCB].

3.1.3 Europäische Richtlinie über die Verbrennung von Abfällen

Die europäische Richtlinie über die Verbrennung von Abfällen (Abfallverbrennungsrichtlinie) [R 2000 76] wurde, wie bereits in Kapitel 3.1.1 erwähnt, im Zusammenhang mit dem Erlass der Richtlinie über Industrieemissionen (IED) [R 2010 75] mit einer Übergangsfrist bis zum 7. Januar 2014 aufgehoben.

Mit der Verabschiedung der Abfallverbrennungsrichtlinie im Dezember 2000 kam es zu umfangreichen Veränderungen im Bereich der europäischen Vorschriften für die Abfallverbrennung, denn verschiedene ältere Richtlinien ([R 1989 369] [R 1989 429] [R 1994 67]) wurden abgelöst. Die neue Richtlinie erfasste Siedlungsabfälle und "gefährliche" Abfälle aus Industrie und Gewerbe, die in Deutschland umgangssprachlich als "Sonderabfälle" bezeichnet werden. Berücksichtigt wurden außerdem Anlagen zur Mitverbrennung von Abfällen, wie Kraftwerke oder Anlagen zur Zementherstellung. Die Tabelle 6 zeigt eine Auswahl der Emissionsgrenzwerte für große Abfallverbrennungsanlagen, die im Anhang V der Abfallverbrennungsrichtlinie festgelegt sind.

Tabelle 6: Emissionsgrenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen [R 2000 76]

Schadstoff		Tagesmittelwert	Halbstundenmittelwert
CO	mg/m ³	50	100
Gesamtkohlenstoff	mg/m ³	10	20
Staub	mg/m ³	10	30
SO ₂	mg/m ³	50	200
NO ₂	mg/m ³	200	400
HCl	mg/m ³	10	60
HF	mg/m ³	1	4
∑ Tl and Cd	mg/m ³	0.05*	
Hg	mg/m ³	0.05*	
∑ Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V	mg/m ³	0.5*	
PCDD/PCDF	ng/m ³	0.1*	

* Mittelwert über Zeitraum der Probenahme

Ein Vergleich der Grenzwerte aus der Abfallverbrennungsrichtlinie in Tabelle 6 mit den entsprechenden Vorgaben in der neuen Richtlinie über Industrieemissionen (IED) [R 2010 75] zeigt, dass es bei den Grenzwerten für Abfallverbrennungsanlagen keine Veränderungen gegeben hat. Eine Gegenüberstellung der Emissionsgrenzwerte in Tabelle 6 mit Anforderungen aus deutschen Vorschriften ergibt, dass die Grenzwerte in Tabelle 6 der ersten Fassung der deutschen "Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen" ([17. BImSchV], Siehe Kapitel 3.2.2) von 1990 entsprechen.

Neben den Emissionsgrenzwerten für Abfallverbrennungsanlagen enthält die Abfallverbrennungsrichtlinie Vorschriften für Ofenanlagen zur Zementherstellung, in denen Abfälle eingesetzt werden. Außerdem gibt es Vorgaben für den Abfalleinsatz in Feuerungsanlagen.

Auf diese relativ umfangreichen Vorgaben wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen und auf die Abfallverbrennungsrichtlinie [R 2000 76] und die Richtlinie über Industrieemissionen (IED) [R 2010 75] verwiesen.

3.1.4 EU-Richtlinien zur Luftqualität

Die Vorschriften der EU zielen nicht nur auf die Minderung von Emissionen ab, wie in den vorangegangenen Abschnitten dargestellt. Zusätzlich berücksichtigt die EU den Immissionschutz unmittelbar, der sich auf die Luftqualität, d.h. den Gehalt von Schadstoffen in der Umgebungsluft bezieht. Im Zusammenhang mit den Anforderungen an die Luftqualität ist die Quelle der Schadstoffe in der Luft bedeutungslos.

Die entsprechenden Vorschriften werden heute einerseits durch die "Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa" [R 2008 50] festgelegt, mit der insgesamt vier ältere Richtlinien aus dem Zeitraum von 1999 bis 2002 (Rahmenrichtlinie und drei sogenannte Tochterrichtlinien) abgelöst wurden. Die Richtlinie 2008/50/EG enthält die Vorgaben für Messmethoden, Probenahmestellen, Informationspflichten und das Erstellen von Luftqualitätsplänen. Ergänzend werden verschiedene Grenzwerte für die Schadstoffe CO, SO₂, NO_x, sowie für Blei, Ozon und Feinstaub (PM₁₀ und PM_{2,5}) festgelegt. Im Vergleich zu den abgelösten Richtlinien sind nur die separaten Vorgaben für PM_{2,5} neu hinzugekommen.

Außerdem existiert die "Richtlinie 2004/107/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Dezember 2004 über Arsen, Cadmium, Quecksilber, Nickel und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe in der Luft" [R 2004 107] mit entsprechenden Grenzwerten.

Die Vorgaben der Richtlinien für Konzentrationen der verschiedenen Schadstoffe in der Umgebungsluft müssen ab einem bestimmten Zeitpunkt eingehalten werden. In der Richtlinie 2008/50/EG gibt es als weitere Neuerung eine Möglichkeit zur Verlängerung von Fristen. Für die Inanspruchnahme einer Fristverlängerung müssen umfangreiche Unterlagen bei der EU zur Zustimmung eingereicht werden, aus denen die Gründe für die Überschreitung der Grenzwerte trotz Luftreinhaltemaßnahmen hervorgehen. Außerdem ist zu erläutern, mit welchen zusätzlichen Maßnahmen die Grenzwerte bis zum neuen Stichtag eingehalten werden sollen.

3.1.5 Emissionshöchstmengen in der EU

Weitere Anforderungen zur Begrenzung von Luftschadstoffen werden auf europäischer Ebene durch die "Richtlinie 2001/81/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2001 über nationale Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe" [R 2001 81] festgelegt; die Emissionshöchstmengen werden auch als "National Emission Ceilings" (NEC) bezeichnet.

Das Ziel der Richtlinie ist die europaweite Begrenzung der Emissionen versauernd bzw. eutrophierend wirkender Schadstoffe. Im Mittelpunkt der Richtlinie steht die Höchstmengensfestsetzung für Schwefeldioxid (SO₂), Stickstoffoxide (NO_x), flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (VOC) sowie Ammoniak (NH₃), die von den einzelnen Mitgliedsländern der EU in die Atmosphäre abgegeben werden dürfen.

Im Anhang I der Richtlinie [R 2001 81] sind die entsprechenden Höchstmengen der einzelnen Schadstoffe festgelegt, die von den einzelnen Mitgliedsstaaten der EU ab 2010 emittiert werden dürfen. Tabelle 7 enthält eine Zusammenstellung der entsprechenden Schadstoffmengen.

Im Zusammenhang mit den Vorschriften für die Emissionshöchstmengen müssen von den Mitgliedsstaaten nationale Programme und Berichte erstellt und bei der EU vorgelegt werden [UBA 36 07] [UBA 37 07].

Auf europäischer Ebene gibt es Planungen, die Anforderungen aus der Richtlinie 2001/81/EG zukünftig zu verschärfen [Ahrens].

Tabelle 7: Nationale Emissionshöchstmengen für SO₂, NO_x, VOC (ohne Methan) und NH₃, für das Jahr 2010 (aktueller Stand [R 2001 81]).

Land	SO ₂ [Kilotonnen]	NO _x [Kilotonnen]	VOC ohne CH ₄ [Kilotonnen]	NH ₃ [Kilotonnen]
Belgien	99	176	139	74
Bulgarien	836	247	175	108
Tschechische Republik	265	286	220	80
Dänemark	55	127	85	69
Deutschland	520	1 051	995	550
Estland	100	60	49	29
Irland	42	65	55	116
Griechenland	523	344	261	73
Spanien	746	847	662	353
Frankreich	375	810	1 050	780
Kroatien	70	87	90	30
Italien	475	990	1 159	419
Zypern	39	23	14	9
Lettland	101	61	136	44
Litauen	145	110	92	84
Luxemburg	4	11	9	7
Ungarn	500	198	137	90
Malta	9	8	12	3
Niederlande	50	260	185	128
Österreich	39	103	159	66
Polen	1 397	879	800	468
Portugal	160	250	180	90
Rumänien	918	437	523	210
Slowenien	27	45	40	20
Slowakei	110	130	140	39
Finnland	110	170	130	31
Schweden	67	148	241	57
Vereinigtes Königreich	585	1.167	1.200	297
EU 28	8.367	9.090	8.938	4.324

3.1.6 Die europäische Richtlinie über Abfälle

Die zentrale Vorschrift in Europa für den allgemeinen Umgang mit Abfällen stellte in der Vergangenheit die "Abfallrahmenrichtlinie" [R 1975 442] aus dem Jahr 1975 dar, die später mehrfach angepasst wurde (kodifizierte Fassung: [R 2006 12]). Als Neufassung wurde im November 2008 die europäische "Richtlinie über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien" (Abfallrichtlinie) [R 2008 98] verabschiedet. Mit dieser Richtlinie wurden zugleich zwei ältere Richtlinien über Altölbeseitigung und gefährliche Abfälle (Sonderabfälle) aufgehoben, um die abfallrechtlichen Vorschriften auf europäischer Ebene zu vereinfachen.

Im Mittelpunkt der neuen Abfallrichtlinie steht nach Artikel 1 das Ziel, den Schutz der Umwelt und der menschlichen Gesundheit durch entsprechende Maßnahmen im Bereich der Abfallwirtschaft zu gewährleisten. Außerdem wird eine Effizienzsteigerung bei der Ressourcennutzung als weiteres Ziel vorgegeben.

Unter den Geltungsbereich der Richtlinie fallen allerdings nicht alle Abfälle. Zu den ausgeschlossenen Abfällen gehören u.a. radioaktive Abfälle, ausgesonderte Sprengstoffe und nicht kontaminierte Böden. Außerdem sind Materialien ausgeschlossen, sofern bereits andere europäische Rechtsvorschriften existieren. Dazu gehören u.a. Abwässer und Rückstände, die beim Gewinnen und Aufbereiten mineralischer Ressourcen anfallen.

Einen wesentlichen Grund für den Erlass der neuen Abfallrichtlinie stellte das Ziel einer allgemein intensivierten Abfallverwertung dar. Zu diesem Zweck wurde die bisherige dreistufige Abfallhierarchie (Vermeidung, thermische/stoffliche Verwertung, Beseitigung) durch eine fünfstufige Prioritätenfolge (Artikel 4 Abfallrichtlinie) ersetzt, die in Tabelle 8 aufgeführt ist.

Tabelle 8: Abfallhierarchie entsprechend der Richtlinie über Abfälle [R 2008 98].

	[R 2008 98] deutsche Fassung	[R 2008 98] englische Fassung
a	Vermeidung	prevention
b	Vorbereitung zur Wiederverwendung	preparing for re-use
c	Recycling	recycling
d	sonstige Verwertung, z.B. energetische Verwertung	other recovery, e.g. energy recovery
e	Beseitigung	disposal

Die neue, fünfstufige Hierarchie enthält eine klare Abgrenzung zwischen dem Recycling, der energetischen Verwertung und der Beseitigung von Abfällen. Somit bekommt das Recycling, auch als stoffliche Verwertung bezeichnet, eindeutig eine höhere Priorität als die thermische Verwertung.

Die praktische Anwendung der fünfstufigen Abfallhierarchie soll nach Artikel 4 der Abfallrichtlinie so umgesetzt werden, dass insgesamt das beste Ergebnis unter dem Aspekt des Umweltschutzes erreicht wird. Ein Abweichen von der Abfallhierarchie ist möglich, wenn dies entsprechend einem "Lebenszyklusdenken" gerechtfertigt ist.

Ferner werden in der Abfallrichtlinie einige Begriffe, die für die Abfallwirtschaft von großer Bedeutung sind, exakter definiert. Dazu gehört auch der Abfallbegriff selbst, denn in der Vergangenheit gab es beispielsweise Abgrenzungsprobleme bei der Entsorgung von kontaminiertem Erdreich [Kopp-Assenb.].

Außerdem wird im Anhang II der Richtlinie das Verwertungsverfahren "Hauptverwendung als Brennstoff oder als anderes Mittel der Energieerzeugung" genau definiert. Bei dem sogenannten "R1-Kriterium" handelt es sich um eine Kennzahl, die nach einer im Anhang II angegebenen Formel berechnet wird und sich auf die Energieeffizienz der entsprechenden Abfallverbrennungsanlage bezieht.

Weitere Vorgaben der Abfallrichtlinie betreffen verbindliche Abgrenzungen zwischen Abfällen und Nebenprodukten sowie das Ende der Abfalleigenschaft. Abfallvermeidungsprogramme sollen zusätzlich eine Abnahme der insgesamt in den einzelnen europäischen Staaten anfallenden Abfallmengen bewirken.

Für umfassende Informationen zu der neuen Richtlinie über Abfälle wird auf den Richtlinienentwurf [R 2008 98] oder die Literatur [Epiney] [Kopp-Assenb.] [Simon; H.W.] [Thomé-K.-1] verwiesen.

3.2 Deutsches Recht

Allgemein hat der Umweltschutz in Deutschland eine große Bedeutung, die durch eine Änderung des Grundgesetzes [Grundgesetz] im Jahr 1994 weiter verstärkt wurde. Durch diese Änderung wurde der Umweltschutz als Staatsziel rechtlich auf den Rang der Verfassung gehoben. Nach § 20a des Grundgesetzes schützt der Staat "auch in Verantwortung für die künftigen Generationen die natürlichen Lebensgrundlagen und die Tiere im Rahmen der verfassungsmäßigen Ordnung durch die Gesetzgebung und nach Maßgabe von Gesetz und Recht durch die vollziehende Gewalt und die Rechtsprechung".

In Deutschland existieren für den Schutz der Umwelt und den Betrieb technischer Anlagen sehr umfangreiche Vorschriften, die nicht nur dem Umweltschutz dienen. In den folgenden Kapiteln wird auf die wichtigsten Gesetze und ergänzenden Rechtsvorschriften eingegangen, die den Betrieb von Abfallverbrennungsanlagen und die Problemstellung der vorliegenden Arbeit betreffen.

3.2.1 Das Bundes-Immissionsschutzgesetz

Das Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge - Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) [BImSchG] steht im Mittelpunkt der deutschen Rechtsvorschriften, die im Zusammenhang mit technischen Anlagen auf den Schutz der Umwelt ausgerichtet sind. Dieses Gesetz wurde 1974 erstmals erlassen [Kloepfer] [Hansmann] und seitdem mehrfach aktualisiert oder geändert. Wichtige Gründe für die letzten Änderungen im BImSchG stellten die Umsetzungen der europäischen IVU-Richtlinie und der Richtlinie über Industrieemissionen (IED) dar (Siehe Abschnitt 3.1.1).

Der sehr lange Titel des Gesetzes weist bereits auf eine sehr breite Anwendungsabsicht hin, die in § 1 BImSchG festgelegt ist. Danach ist es der Zweck des Gesetzes, "Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu schützen und dem Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen vorzubeugen".

Der Geltungskreis des Gesetzes erstreckt sich nicht nur auf den Bau und den Betrieb von technischen Anlagen, sondern erfasst beispielsweise auch Kraftfahrzeuge, Schienen-, und Wasserfahrzeuge sowie den Bau von Verkehrswegen. Ausgeschlossen von der Anwendung sind Flugplätze (teilweise) und kerntechnische Betriebsbereiche. Ferner gelten die Anforderungen aus dem BImSchG nicht, wenn wasserrechtliche oder ausgewählte andere Vorschriften existieren.

Entsprechend dem sehr breiten Anwendungsbereich des BImSchG ist das Gesetz in mehrere Teile gegliedert. Für den eigentlichen Betrieb von Industrieanlagen wie bei der Abfall-

verbrennung ist der zweite Teil des BImSchG von großer Bedeutung, der sich auf die Errichtung und den Betrieb von Anlagen bezieht. Nicht eingegangen wird an dieser Stelle auf die anderen Teile des BImSchG, die sich u. a. auf die Brennstoffbeschaffenheit, Betrieb von Fahrzeugen, Bau von Straßen, oder Lärminderung beziehen.

Die Bedeutung des BImSchG für Industrieanlagen wird durch die Bündelungswirkung des § 13 BImSchG deutlich. Danach schließt eine Genehmigung auf Basis des BImSchG andere behördliche Entscheidungen wie z.B. die Baugenehmigung ein.

Um die Ziele des Gesetzes zu erreichen, stellt das BImSchG in § 5 direkte Anforderungen an großtechnische Anlagen, zu denen auch Abfallverbrennungsanlagen gehören. Danach sind Anlagen u. a. so zu errichten und zu betreiben, dass schädliche Umwelteinwirkungen nicht entstehen können. Außerdem sind Vorsorgemaßnahmen gegen negative Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren zu treffen, die dem Stand der Technik entsprechen. In § 5 verlangt das BImSchG auch eine Reduzierung des Abfallaufkommens und eine sparsame und effiziente Nutzung von Energie.

Diese grundlegenden Anforderungen an den Bau und Betrieb von technischen Anlagen sind ebenfalls Bestandteil der IVU-Richtlinie [R 1996 61] und der IED [R 2010 75] (Siehe Tabelle 2, S. 5); im BImSchG sind die Vorgaben mindestens seit Mitte der 80 Jahre in ähnlichen Formulierungen verankert.

Darüber hinaus entspricht der Begriff "Stand der Technik" im BImSchG in seiner Definition den "besten verfügbaren Techniken" in der IED [R 2010 75], denn die Definition wurde im Rahmen der früheren Umsetzung der IVU-Richtlinie in die deutschen Regelwerke übernommen [Gleis-2]. Außerdem sind im BImSchG für den "Stand der Technik" die gleichen Kriterien festgelegt wie in der IED für die "besten verfügbaren Techniken" (Siehe Tabelle 3, S. 6).

Die weitgehend identischen Forderungen zum Anlagenbetrieb in § 5 BImSchG und der IED führen zwangsläufig zum gleichen Widerspruch zwischen Anwendungen entsprechend dem Stand der Technik und einer effizienten Energienutzung, der bereits bei der Vorstellung der IED in Abschnitt 3.1.1 erwähnt wurde. Analog zur IED wird diese Problematik bei Kriterien zur Bestimmung der besten verfügbaren Techniken berücksichtigt.

Die restlichen Grundpflichten der IED, aufgeführt in Tabelle 2 (S. 5) werden in Deutschland ebenfalls durch das BImSchG oder andere Rechtsvorschriften abgedeckt.

Weitere Inhalte des BImSchG betreffen die Voraussetzungen zur Erteilung der Genehmigung und das eigentliche Genehmigungsverfahren sowie die Ermittlung von Emissionen und sicherheitstechnische Prüfungen von Anlagen.

Das BImSchG enthält für den Betrieb technischer Anlagen keine Grenzwerte, Vorschriften zur Lärmbegrenzung oder Anforderungen an die Administration. Entsprechende Vorgaben sind in Verordnungen und Verwaltungsvorschriften zum BImSchG festgelegt, zu deren Erlass der Gesetzgeber durch das BImSchG entsprechend ermächtigt wird. Insbesondere die Verordnungen dienen auch der Umsetzung von europäischen Richtlinien.

3.2.2 Die 17. BImSchV

In Deutschland werden wesentliche Anforderungen für die Verbrennung von Abfällen in technischen Anlagen durch die "Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen - 17. BImSchV" [17. BImSchV] vorgegeben, die auf dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) [BImSchG] basiert. Diese Verordnung wurde in der ersten Fassung 1990 erlassen und stellte mit Anforderungen an Betrieb und Überwachung eine richtungsweisende Vorschrift dar, die erstmals Emissionsgrenzwerte für Dioxine und Furane enthielt. Die 17. BImSchV wurde später mehrfach geändert.

Eine Neufassung der 17. BImSchV vom 14. August 2003 diente der Umsetzung der Europäischen Richtlinie 2000/76/EG in nationales Recht und führte gegenüber der Erstauflage von 1990 insbesondere bei den Vorgaben für die Mitverbrennung von Abfällen, beispielsweise in Kraftwerken oder Anlagen zur Zementherstellung, zu größeren Veränderungen. Einerseits wurden für die Mitverbrennung feste Emissionsgrenzwerte vorgegeben. Auf der anderen Seite werden Ausgangswerte für die Mischungsrechnung zur Bestimmung der Emissionsgrenzwerte eingeführt. Übersteigt der Abfalleinsatz bei Mitverbrennungsanlagen bestimmte Anteile, müssen die gleichen Grenzwerte wie für die Monoverbrennung von Abfällen eingehalten werden.

Die Anforderungen der 17. BImSchV sind unabhängig von der verbrannten Abfallart; für die Hausmüllverbrennung und die Verbrennung von gefährlichen Abfällen gelten die gleichen Vorschriften. Außerdem ist eine Einstufung der Verbrennungsprozesse als thermischen Verwertung oder Beseitigungsverfahren ohne Bedeutung.

Für die technische Ausstattung und den Betrieb von Abfallverbrennungsanlagen enthält der 2. Abschnitt der 17. BImSchV (§ 3 bis § 12) umfangreiche Vorschriften, die u.a. die Anlieferung und Lagerung der Abfallstoffe sowie allgemeine Betriebsbedingungen, Temperaturen und Emissionsgrenzwerte der Abfallverbrennungsanlagen umfassen. Ausgewählte aktuelle Emissionsgrenzwerte (Stand Mai 2013) sind in der Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 9: Emissionsgrenzwerte der aktuellen 17. BImSchV (Tagesmittelwerte [17. BImSchV]).

Schadstoff	Konzentration	
Gesamtstaub	5	mg/m ³
organische Stoffe Angabe: Gesamtkohlenstoff	10	mg/m ³
gasförmige anorganische Cl-Verbindungen Angabe: Chlorwasserstoff (HCl)	10	mg/m ³
gasförmige anorganische F-Verbindungen Angabe: Fluorwasserstoff (HF)	1	mg/m ³
Schwefeldioxid und Schwefeltrioxid Angabe: Schwefeldioxid (SO ₂),	50	mg/m ³
Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid Angabe: Stickstoffdioxid (NO ₂),	150	mg/m ³
Quecksilber und seine Verbindungen Angabe: Quecksilber (Hg)	0,03	mg/m ³
Kohlenmonoxid (CO)	50	mg/m ³
Ammoniak (NH ₃)	10	mg/m ³

In Tabelle 9 sind die Grenzwerte enthalten, die seit der letzten Änderung der 17. BImSchV im Jahr 2013 eingeführt wurden. Neu festgelegt wurden u.a. die Tagesmittelwerte für Staub und NO_x, die von 10 auf 5 mg/m³ bzw. von 200 auf 150 mg/m³ abgesenkt wurden.

Die 17. BImSchV enthält Vorschriften, die über die Anforderungen der europäischen Richtlinien hinausgehen. Beispielsweise fordert die 17. BImSchV seit einer Aktualisierung im Jahr 1999 für Quecksilber einen schärferen Grenzwert (0,03 mg/m³) als die europäische IED [R 2010 75] (0,05 mg/m³).

Neben den Angaben in Tabelle 9 enthält die aktuelle 17. BImSchV Halbstundenmittelwerte und Jahresmittelwerte. Die Jahresmittelwerte für Hg und NO_x liegen mit 0,01 bzw. 100 mg/m³ unter den Tagesmittelwerten.

Außerdem sind in weiteren Abschnitten der 17. BImSchV die Anforderungen an die Emissionsüberwachung durch Vorgaben zu den Messplätzen sowie verschiedene Berichtspflichten festgeschrieben.

Für detaillierte Informationen über die Vorgaben aus der 17. BImSchV und deren Anwendungsbereiche wird auf den Verordnungstext [17 BImSchV] verwiesen.

3.2.3 Weitere Rechtsvorschriften zum Bundes-Immissionsschutzgesetz

Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) [BImSchG] wird, wie oben im Text bereits erwähnt, durch zahlreiche Rechtsvorschriften ergänzt. Dazu gehören einschließlich der 17. BImSchV ca. 30 Verordnungen und zahlreiche Verwaltungsvorschriften. In Tabelle 10 (Siehe S. 17) sind ausgewählte Verordnungen und andere Vorschriften aufgeführt, teilweise ergänzt durch kurze Erläuterungen zum Regelungsbereich. Die aufgeführten Rechtsvorschriften dokumentieren den Anwendungsbereich des BImSchG, der über die Begrenzung von Schadstoffemissionen aus Verbrennungsanlagen weit hinausgeht.

3.2.4 Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)

In Deutschland existiert seit über 40 Jahren ein zentrales Gesetz für den umweltverträglichen Umgang mit Abfällen; allerdings änderte sich im Lauf der Zeit der Titel des Gesetzes mehrfach. Das aktuelle Kreislaufwirtschaftsgesetz [KrWG] mit dem ausführlichen Titel "Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen" wurde im Jahr 2012 verabschiedet. Die älteren Gesetze wurden als "Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz [KrW/AbfG]", "Abfallgesetz" oder "Abfallbeseitigungsgesetz" bezeichnet. Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) dient, wie auch die Vorläufergesetze, der Umsetzung europäischer Richtlinien.

Zu den wichtigsten Inhalten in den deutschen Abfallgesetzen gehört die Festlegung der Abfallhierarchie, die bei dem Umgang mit Abfällen zu beachten ist. Die neue, fünfstufige Abfallhierarchie aus der europäischen Abfallrichtlinie als wichtiger Grundsatz für die Vermeidung und Bewirtschaftung von Abfällen wird im § 6 des KrWG festgelegt. Die Bezeichnungen der einzelnen Hierarchiestufen entsprechen exakt den Formulierungen in der europäischen Abfallrichtlinie [R 2008 98], die in Tabelle 8 (S. 12) aufgeführt sind.

Die Anforderungen an eine thermische Abfallverwertung werden analog zur europäischen Abfallrichtlinie über eine Energieeffizienz-Kennzahl festgelegt, deren Definition aus der europäischen Abfallrichtlinie übernommen wurde.

Außerdem regelt das KrWG wichtige Details aus dem Bereich der Abfallwirtschaft. Dazu gehören u.a. die Anwendung des Abfallrechts auf Nebenprodukte und eine genauere Definition bzw. Abgrenzung des Abfallbegriffs.

Im KrWG werden keine detaillierten Anforderungen an Abfallbehandlungsanlagen oder Deponien zur Ablagerung von Abfällen festgelegt, außerdem sind in dem Gesetz keine Vorschriften für bestimmte Abfallarten enthalten. Zu diesem Zweck wird das KrWG durch zahlreiche Rechtsvorschriften ergänzt. Dazu gehören u.a. Verordnungen und weitere Gesetze für ausgewählte Abfallarten. Eine Auswahl ist in Tabelle 11 (S. 18) aufgeführt.

Tabelle 10: Ausgewählte Rechtsvorschriften zum BImSchG.

Abkürzung	Titel (ggf. Erläuterung)
1. BImSchV	Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen
2. BImSchV	Verordnung zur Emissionsbegrenzung von leichtflüchtigen halogenierten organischen Verbindungen
4. BImSchV	Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen
9. BImSchV	Verordnung über das Genehmigungsverfahren
12. BImSchV	Störfall-Verordnung (Das Ziel ist der Schutz der Umwelt vor Auswirkungen von plötzlich auftretenden Störfällen in technischen Anlagen)
13. BImSchV	Verordnung über Großfeuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen (Große Kohlekraftwerke werden von dieser Verordnung erfasst)
18. BImSchV	Sportanlagenlärmschutzverordnung
25. BImSchV	Verordnung zur Begrenzung von Emissionen aus der Titandioxid-Industrie
35. BImSchV	Verordnung zur Kennzeichnung der Kraftfahrzeuge mit geringem Beitrag zur Schadstoffbelastung
39. BImSchV	Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen (Umsetzung der europäischen Richtlinie über Luftqualität und saubere Luft für Europa [R 2008 50] und der Richtlinie /EG über nationale Emissionshöchstmengen [R 2001 81])
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz.
TA Lärm	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz

Tabelle 11: Ausgewählte Verordnungen und Gesetze in Ergänzung zum KrWG.

Abkürzung	Titel
AVV	AVV - Abfallverzeichnis-Verordnung Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis
AbfKlärV	Klärschlammverordnung
AltholzV	Altholzverordnung - Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz
BioAbfV	Bioabfallverordnung - Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden
BiomasseV	Biomasseverordnung - Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse
GewAbfV	Gewerbeabfallverordnung - Verordnung über die Entsorgung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen
VerpackV	Verpackungsverordnung
BattG	Batteriegesetz - Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren
ElektroG	Elektro- und Elektronikgerätegesetz - Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten

3.3 Diskussion Rechtliche Grundlagen

Die kurze Vorstellung von ausgewählten europäischen und deutschen Rechtsvorschriften in den vorangegangenen Abschnitten belegt den Einfluss der europäischen Gesetzgebung auf nationale Vorschriften.

Mit Blick auf die Emissionen von Abfallverbrennungsanlagen oder Kraftwerken in die Atmosphäre existieren auf europäischer und folglich nationaler Ebene Vorschriften, die drei unterschiedliche Bereiche betreffen. Einerseits werden die Emissionen aus technischen Anlagen direkt durch Emissionsgrenzwerte reguliert. Der zweite Regelungsbereich ergibt sich durch die Festlegung von Höchstmengen für ausgewählte Schadstoffe, die einzelne europäische Staaten an die Atmosphäre abgegeben dürfen. Außerdem existieren Vorgaben für die Luftqualität, d.h. für die Schadstoffkonzentrationen in der Umgebungsluft.

Neben der Umsetzung der Anforderungen aus den europäischen Richtlinien haben die einzelnen Staaten der Europäischen Union die Möglichkeit, im Rahmen der nationalen Gesetzgebung zusätzliche Vorschriften zu erlassen. So existieren in einigen europäischen Staaten nationale Vorschriften zur Erhebung von Steuern auf die Emission einzelner Schadstoffe. Beispielsweise gilt dies in Dänemark und Schweden für Schwefeldioxid (SO₂) oder Stickoxide (NO_x)[Heiting].

Die europäischen Vorschriften werden regelmäßig überarbeitet und angepasst. Dabei gibt es Bestrebungen, durch das Zusammenführen von Richtlinien das europäische Vorschriften-system zu vereinfachen. Somit entsteht die Frage, ob in Deutschland durch eine Zusammenführung einzelner Verordnungen das System der Rechtsvorschriften vereinfacht und dadurch der Vollzug verbessert werden könnte. Beispielsweise könnte über eine Zusammenführung von einzelnen Verordnungen zum Kreislaufwirtschaftsgesetz, zu denen u.a. die

Klärschlammverordnung, Altholzverordnung, Bioabfallverordnung oder Biomasseverordnung gehören, nachgedacht werden.

Darüber hinaus lieferten die Arbeiten zu der Thematik der rechtlichen Grundlagen weitere Erkenntnisse, die aus der Vorstellung der einzelnen Richtlinien, Gesetze und Verordnungen nicht direkt zu entnehmen sind.

Offenbar ergeben sich Unstimmigkeiten bei den Vorstellungen zu dem europäischen Begriff der "besten verfügbaren Techniken" (BVT) und dem deutschen "Stand der Technik". Die ausgewählten Worte suggerieren, dass die "besten verfügbaren" Rauchgasreinigungstechniken einen höheren Standard bieten als der etablierte (veraltete) Stand der Technik. Erst ein genauer Vergleich der entsprechenden Definitionen in den Rechtsvorschriften zeigt, dass es keine Unterschiede gibt.

Ein konkretes Beispiel zu diesem Problem findet man in den Eckpunkten für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung [DBR]. Als Maßnahme zur Einführung von sauberen Kraftwerkstechnologien sollen modernste Emissionsminderungseinrichtungen entsprechend den besten verfügbaren Techniken (BVT) eingeführt werden. Dabei wurde übersehen, dass die entsprechende Verpflichtung eigentlich durch das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) bereits abgedeckt ist.

Außerdem zeigt eine Betrachtung der Inhalte der einzelnen Vorschriften, dass in der Vergangenheit ein auf Industriesektoren bezogenes Denken und Handeln entstanden ist.

Für den Abfallverbrennungssektor existieren in Zusammenhang mit den Emissionen auf europäischer Ebene eine Richtlinie und ein BVT-Dokument, auf nationaler Ebene wurden die Anforderungen an die Emissionen in die Luft in einer Verordnung festgelegt. Für den Sektor Stromerzeugung in Großkraftwerken gab es eine identische Struktur von Rechtsvorschriften und Richtlinien.

Dieses über viele Jahre entstandene Denken und Handeln in Industriesektoren bei der Erarbeitung und Aktualisierung von rechtlichen Vorschriften kann durchaus eine Ursache dafür sein, dass bisher keine Ansätze verfolgt worden sind, die verschiedene Industriesektoren berücksichtigen. Somit können diese Entwicklungen in der Vergangenheit als eine Ursache für die dieser Arbeit zugrunde liegende Problemstellung gesehen werden.

Auf europäischer Ebene wurde dieses Denken in Industriesektoren mit der neuen Richtlinie über Industrieemissionen [R 2010 75] (engl.: Industrial Emissions Directive -IED) zumindest teilweise aufgebrochen, denn neben den eher allgemeinen Umweltschutzziele der alten IVU-Richtlinie [R 1996 61] enthält die neue IED-Richtlinie auch die europäischen Anforderungen aus den älteren Richtlinien für die Abfallverbrennung und weitere Industriesektoren.

Ob es zukünftig aufgrund der neuen IED-Richtlinie zu einer umfassenderen Denkweise im Umweltschutzbereich kommt, die den Einsatz von Energie, Ressourcen und Kapital nicht mehr sektorbezogen sondern übergreifend zwischen verschiedenen Industriesektoren berücksichtigt, muss abgewartet werden.

4 Grundlagen über Stickoxide

In den nachfolgenden Abschnitten werden zunächst die unterschiedlichen Stickoxide vorgestellt. Anschließend wird auf die Stickoxide im Zusammenhang mit Verbrennungsprozessen näher eingegangen.

4.1 Stickstoffoxide

Unter Stickstoffoxiden, verkürzt auch als Stickoxide bezeichnet, werden verschiedene chemische Verbindungen verstanden, die aus den chemischen Elementen Sauerstoff und Stickstoff aufgebaut sind. Die wichtigsten Stickoxide sind in Tabelle 12 aufgelistet. Die relativ große Anzahl dieser Verbindungen in Tabelle 12 ergibt sich aus den möglichen Oxidationszahlen des Stickstoffs. Außerdem stehen einzelne Stickstoffoxide über unterschiedliche Reaktionsgleichgewichte (Dimerisierung, Oxidation) miteinander in Verbindung.

Tabelle 12: Stickstoffoxide.

Stickoxid Formel	Bezeichnung		Stickstoff Oxidations- zahl
	nach IUPAC-Regeln	alternativ	
N_2O	Distickstoffoxid	Stickstoff(I)-Oxid, Lachgas	+1
NO N_2O_2	Stickstoffmonoxid Distickstoffdioxid	Stickstoff(II)-Oxid Distickstoff(II)-Oxid	+2
N_2O_3	Distickstofftrioxid	Stickstoff(III)-Oxid	+3
NO_2 N_2O_4	Stickstoffdioxid Distickstofftetraoxid	Stickstoff(IV)-Oxid Distickstoff(IV)-Oxid	+4
N_2O_5	Distickstoffpentoxid	Distickstoff(V)-Oxid	+5

Im Zusammenhang mit den Emissionen aus Kraftwerken, Abfallverbrennungsanlagen und anderen Feuerungsanlagen bezieht sich der Begriff Stickoxide in der Regel nur auf Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2), denn nur diese Verbindungen werden bei den Emissionsgrenzwerten berücksichtigt (Siehe Abschnitt 3.2.2).

Die in Tabelle 12 aufgeführten Stickoxide weisen sehr unterschiedliche Eigenschaften auf. Bis auf N_2O_5 und N_2O_4 handelt es sich bei den genannten Stickoxiden um endotherme Verbindungen, d.h. die Verbindungen sind thermodynamisch instabil im Hinblick auf den Zerfall in die Elemente. Andererseits ist die Reaktionsgeschwindigkeit des Zerfalls sehr gering, so dass eine kinetische Stabilität vorliegt und kein spontaner Zerfall der Stickstoffoxide in die Elemente erfolgt. Die Zersetzung erfolgt beim Erwärmen aufgrund der Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit. [Binnewies] [Riedel].

Das Stickoxid N_2O mit der Oxidationsstufe +1 ist ein farbloses, relativ reaktionsträges Gas, das erst oberhalb von $600\text{ }^\circ\text{C}$ zerfällt. Die Bezeichnung als Lachgas ergibt sich aus der Wirkung beim Einatmen, denn es werden eine Lachlust und Halluzinationen hervorgerufen. [Holleman].

Darüber hinaus ist N_2O ein wichtiges klimawirksames Spurengas, denn das Treibhausgaspotenzial ist im Vergleich zu CO_2 etwa um den Faktor 310 größer. Zudem ist N_2O am Abbau der Ozonschicht beteiligt. [Stöhr] [Werther]

Die Zunahme der N_2O -Konzentration in der Atmosphäre geht u.a. auf landwirtschaftliche Aktivitäten zurück, denn Nitrate, enthalten in mineralischen Düngern, werden durch

mikrobiologische Vorgänge zu N_2O reduziert [Riedel]. Zusätzlich wird N_2O aus Abfalldeponien freigesetzt, in denen Rückstände aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung abgelagert wurden [Harborth].

Die Oxidationsstufe +2 ist den Stickoxiden NO und N_2O_2 zugeordnet. NO ist ein farbloses, giftiges Gas, das sich nur sehr wenig in Wasser löst. Aufgrund des Molekulaufbaus mit einem ungepaarten Elektron kann NO zu N_2O_2 dimerisieren. Diese Form liegt allerdings erst bei tiefen Temperaturen im flüssigen und festen Zustand vor; bei Raumtemperatur liegt das Gleichgewicht der Dimerisierungsreaktion auf der Seite von NO . [Hollemann]

Als endotherme Verbindung entsteht NO erst bei hohen Temperaturen aus den Elementen Sauerstoff und Stickstoff. Die Abhängigkeit der Stickoxidbildung von der Temperatur ist in Abbildung 1 dargestellt.

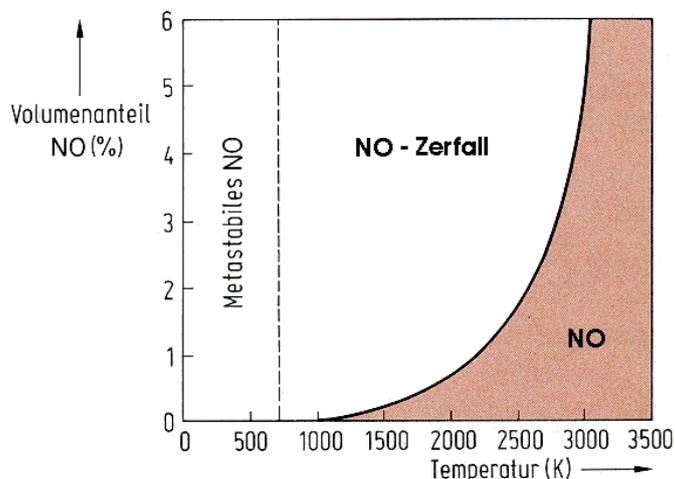


Abbildung 1: Temperaturabhängigkeit der Stickoxidausbeute bei Synthese aus Luft [Riedel] [Hollemann].

Die Kurve in Abbildung 1 beschreibt die Gleichgewichtskonzentration in Anhängigkeit von der Temperatur. Wird die Temperatur erniedrigt, so zerfällt NO bis die NO -Gleichgewichtskonzentration der niedrigeren Temperatur erreicht ist. Umgekehrt erfolgt bei Temperaturerhöhung eine Neubildung von NO . [Hollemann]

Durch schnelle Abkühlung, d.h. durch Abschreckung wird der Zerfall von NO weitgehend vermieden, denn es werden Temperaturbereiche mit langsamer Gleichgewichtseinstellung erreicht. Liegen die Temperaturen unterhalb von 700 K (427 °C), erfolgt praktisch kein Zerfall der metastabilen Substanz NO . [Hollemann]

NO reagiert sehr schnell mit Sauerstoff zu NO_2 (Siehe unten). Diese Reaktion ist exotherm, so dass mit steigender Temperatur das Reaktionsgleichgewicht zu NO verschoben wird, bis bei ca. 650 °C keine Reaktion mit Sauerstoff mehr erfolgt. [Hollemann]

In der Technik ist NO ein Zwischenprodukt bei der Salpetersäureherstellung, außerdem ist es im menschlichen Körper als Botenstoff bei der Kontrolle wichtiger physiologischer Prozesse wie Blutdruck oder Blutgerinnung beteiligt. Zu den umweltrelevanten Eigenschaften von NO zählt u. a. die Beteiligung am Abbau der Ozonschicht. [Riedel] [Binnewies]

Die Verbindung Distickstofftrioxid (N_2O_3) mit der Oxidationszahl +3 bildet sich bei der Abkühlung eines äquimolaren Gasmisches von NO und NO_2 . Das Oxid N_2O_3 ist nur bei tiefen Temperaturen als blaue Flüssigkeit beständig; bereits oberhalb von -30 °C zerfällt es in NO_2 und NO . [Binnewies]

Die beiden Gase NO_2 und N_2O_4 mit der Oxidationszahl +4 liegen nebeneinander vor, denn das braune Gas NO_2 dimerisiert zu der farblosen und gasförmigen Verbindung N_2O_4 . Beide Stickoxide sind giftig. Das Gleichgewicht und damit die Anteile an NO_2 bzw. N_2O_4 werden durch die Temperatur bestimmt. Bei $27\text{ }^\circ\text{C}$ liegt zu 80 % die dimere Form N_2O_4 vor, bei $140\text{ }^\circ\text{C}$ existiert nur noch die monomere Form NO_2 . [Hollemann]

NO_2 bildet sich, wie bereits erwähnt, durch Reaktion von NO mit Sauerstoff in einer exothermen Reaktion. Andererseits zerfällt NO_2 oberhalb von $150\text{ }^\circ\text{C}$ in NO und Sauerstoff. Bei $600\text{ }^\circ\text{C}$ ist NO_2 vollständig zerfallen [Riedel]. Aufgrund dieser leichten Sauerstoffabgabe sind NO_2 und N_2O_4 starke Oxidationsmittel [Hollemann].

Im technischen Bereich haben NO_2 bzw. N_2O_4 als weitere Zwischenstufe für die Salpetersäureherstellung große Bedeutung, denn die Reaktion von NO_2 mit Wasser führt zum gewünschten Produkt [Hollemann]. Für Details dieses Prozesses wird auf die Literatur (Siehe z.B. [Büchel]) verwiesen.

Das Stickstoffoxid mit der höchsten Oxidationsstufe +5 in Tabelle 12 ist Distickstoffpentoxid (N_2O_5). Die Verbindung bildet weiße, hygroskopische Kristalle, die leicht sublimieren und mit Wasser zu Salpetersäure (HNO_3) reagieren. Die Verbindung ist unbeständig und zerfällt beim Erhitzen in NO_2 und O_2 . [Hollemann] [Binnewies]

4.2 Stickoxide bei technischen Verbrennungsprozessen

Für technische Verbrennungsprozesse sind nur einige der im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Stickoxide von Bedeutung. Mit Beginn der Diskussion um eine verstärkte Luftreinhaltung standen zunächst NO und NO_2 im Mittelpunkt. Aufgrund der Klimadiskussion kommt heute zusätzlich dem N_2O eine größere Bedeutung zu.

Für die Bildung von Stickoxiden bei Verbrennungsprozessen existieren sehr unterschiedliche Wege, die maßgeblich vom Brennstoff, der eingesetzten Feuerungstechnik und den Temperaturverhältnissen bestimmt werden. Die wichtigsten Bildungsmechanismen von NO und NO_2 sind in Tabelle 13 (S. 23) zusammengefasst.

Die Entstehung von NO bei Verbrennungsprozessen ist nach Tabelle 13 auf drei verschiedene Reaktionsmechanismen zurückzuführen. Das "thermische" NO entsteht durch Oxidation von Anteilen des Stickstoffs (N_2) aus der Verbrennungsluft durch Sauerstoffradikale bei Temperaturen oberhalb von $1200\text{ }^\circ\text{C}$ [Schultess]. Diese Bildungsreaktion, die sowohl innerhalb als auch außerhalb des Flammenbereichs abläuft, nimmt oberhalb von $1500\text{ }^\circ\text{C}$ stark zu [Schultess]. Die Bildung von thermischem NO ist proportional zu der Konzentration an atomarem Sauerstoff [Schrod].

Der Sauerstoffpartialdruck, in der Feuerungstechnik direkt abhängig von der Luftzahl, hat für die Gleichgewichtskonzentration und die Bildungsraten von thermischen NO dagegen einen untergeordneten Einfluss [Scholz]. In [Warnatz] findet man nähere Informationen zur Reaktionskinetik der thermischen NO -Bildung, für die zuerst von Zeldovich [Zeldovich] ein Mechanismus vorgeschlagen wurde.

Tabelle 13: Übersicht zur Bildung der Stickoxide NO und NO₂ [Lange] [Blank].

Stickstoffoxid		Ort der Entstehung	Mechanismus/Reaktion	Haupteinflußgrößen
NO	thermisches	Flamme Nachreaktionszone	nach Zeldovic a) O ₂ -Überschuß $O + N_2 = NO + N$ (1) $N + O_2 = NO + O$ (2) b) Brennstoffüberschuß $N + OH = NO + H$ (3)	O-Atom-Konzentration aus der O ₂ -Dissoziation Verweilzeit, Temperatur > 1300 °C
	„promptes“	Flamme	nach Fenimore u. a. $CN + H_2 = HCN + N$ (4) $CN + H_2O = HCN + OH$ (5) $CN + N_2 = HCN + N$ (6)	O-Atom-Konzentration aus der Verbrennungsreaktion, Luftzahl
	aus Brennstoffstickstoff	Flamme	über CN-Verbindungen u. a. teilweise unbekannt	O ₂ -Konzentration (Luftzahl), Verweilzeit
NO ₂		Flamme	nach Fenimore $NO + HO_2 = NO_2 + OH$ (7)	schnelle Abschreckung der Verbrennungsreaktion (Gasturbinen)
		Rauchgaskanäle, Kamin	nach Bodenstein $2NO + O_2 = 2NO_2$ (8)	Temperatur < 650 °C, O ₂ -Konzentration, Verweilzeit
		freie Atmosphäre	$NO_2 + h \cdot \nu = NO + O$ (9) $O + O_2 + M = O_3 + M$ (10) $NO + O_3 = NO_2 + O_2$ (11)	O ₂ -Konzentration Lichtintensität (Sonne) Verweilzeit, Luftverschmutzung

Die Entstehung des sogenannten "prompten" NO stellt den zweiten Bildungsweg dar, der für technische Flammen von geringerer Bedeutung ist [Schrod] [Khartchenko] [Scholz]. Nach [Schrod] werden in sauerstoffarmen Flammen in einem ersten Reaktionsschritt Brennstoffradikale mit Stickstoff (N₂) aus der Verbrennungsluft in Cyanid-Verbindungen umgewandelt. Ein Mechanismus für diese Reaktion wurde von Fenimore 1979 postuliert [Warnatz]. Die Aufspaltung von molekularem Stickstoff erfolgt aufgrund der hohen Reaktivität der Brennstoffradikale [Scholz]. An der Flammenfront werden die gebildeten Cyanid-Verbindungen teilweise zu NO oxidiert [Schrod]. Die Aktivierungsenergie für den ersten Reaktionsschritt (Brennstoffradikal mit N₂) ist wesentlich kleiner als bei der thermischen NO-Bildung, so dass promptes NO bereits bei tieferen Temperaturen im Bereich um 1000 °C auftritt [Warnatz].

Eine weitere Möglichkeit für die Bildung von Stickoxiden bei Verbrennungsprozessen bildet die Umsetzung des Stickstoffs, der im Brennstoff enthalten ist. Der im gebildeten NO enthaltene Stickstoff stammt aus dem Brennstoff und nicht aus der zugeführten Verbrennungsluft. Es wird angenommen, dass der im Brennstoff chemisch gebundene Stickstoff während der Pyrolyse bzw. Entgasung des Brennstoffs zunächst in einfache Amine oder Cyanide zerfällt und anschließend mit Sauerstoffträgern zu NO reagiert [Mayr]. Der Reaktionsmechanismus lässt sich, obwohl es komplexe Vorschläge gibt, nicht vollständig beschreiben [Scholz]. Nähere Informationen zu Umwandlungen von in festen Brennstoffen enthaltenem Stickstoff findet man in [Glarborg].

Nach [Khartchenko] haben die folgenden Parameter auf die Brennstoff-NO-Bildung einen großen Einfluss:

- Stickstoffgehalt des Brennstoffs
- Gehalt des Brennstoffs an flüchtigen, stickstoffhaltigen Bestandteilen
- Sauerstoffkonzentration
- Möglichkeiten zur NO-Reduktion durch Restkoks oder Radikale

Der Einfluss der Temperatur auf die drei dargestellten Wege der NO-Bildung ist in Abbildung 2 dargestellt. Ähnliche Abbildungen findet man in [Blank] [Mayr] [Schultes] [Schrod].

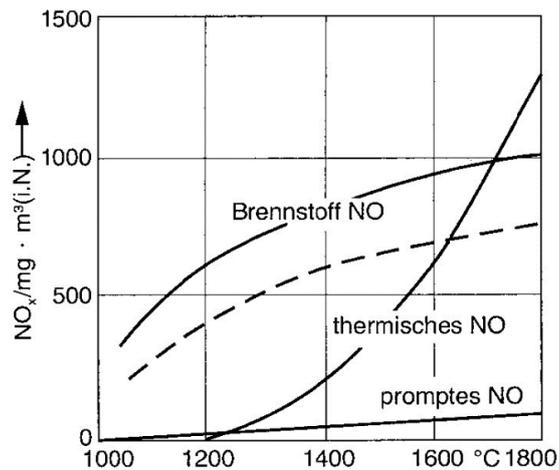


Abbildung 2: Temperaturabhängigkeit der NO-Bildung [Khartchenko].

Für die chemischen Prozesse bei der eigentlichen Verbrennung ist NO_2 im Vergleich zu NO entsprechend den in Tabelle 13 dargestellten Bildungswegen von Stickoxiden unbedeutend. Bei der Abgabe von Rauchgasen aus Feuerungsanlagen in die Atmosphäre bekommt NO_2 aber eine größere Bedeutung, denn bei der Abkühlung mit Luft erfolgt eine Reaktion von NO zu NO_2 [Walter].

Aufgrund der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Eigenschaften von NO_2 ist die in Tabelle 13 erwähnte NO_2 -Bildung z. B. in Rauchgaskanälen oder im Kamin nachvollziehbar: Bereits gebildetes NO reagiert mit Luftsauerstoff zu NO_2 . Allerdings reicht die Aufenthaltszeit in den Rauchgaskanälen in der Regel nicht aus, um eine nennenswerte Umwandlungsrate für NO zu erreichen [Schultes].

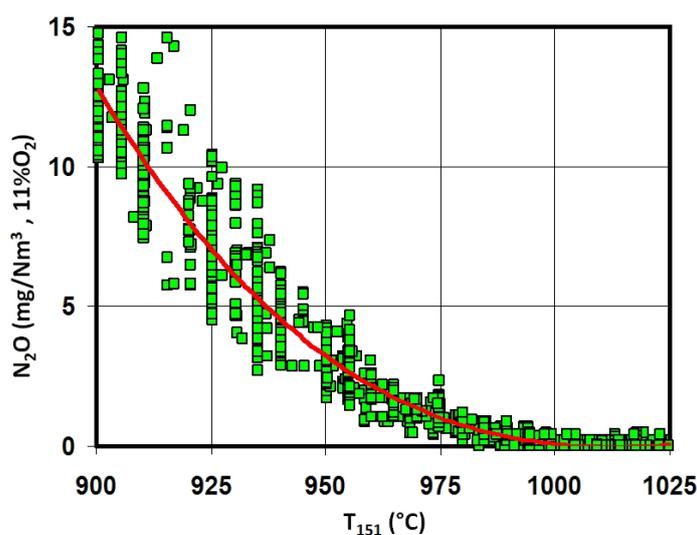
Nach Angaben in [VDI 3927-1] und [VDI 3460-1] liegt der NO_2 -Anteil an den Stickoxiden hinter Feuerungsanlagen unter 5 %. Reimann [Reimann] gibt einen NO_2 -Anteil von 5 bis 10 % für Abfallverbrennungsanlagen an. Nach Angaben von Stoffel [Stoffel] bestehen NO_x -Emissionen aus Abfallverbrennungsanlagen zu über 95 % aus NO mit geringen Anteilen an NO_2 . Bei Kraftwerken wird der NO_2 -Anteil im Rauchgas mit 2 bis 3 % abgegeben [Heiting].

Einen Überblick über die zu erwartenden Stickstoffoxid-Emissionen von verschiedenen Verbrennungsprozessen enthält Tabelle 14.

Tabelle 14: Stickstoffoxid-Rohgasemissionen verschiedener Verbrennungsprozesse

Verbrennungsprozess	Rohgaskonzentrationen NO _x als NO ₂ , [mg/m ³]	Bemerkungen	Literatur
Steinkohle Staubfeuerungen Schmelzkammerfeuerung	700 - 1800 1200 - 3000	ohne besondere Minderungsmaßnahmen	[Baumbach]
Steinkohle Staubfeuerungen	bis 500	mit feuerungstechn. Maßnahmen	[Hannes]
Braunkohle	600 - 1000	ohne besondere Minderungsmaßnahmen	[Baumbach]
Braunkohle	bis 250	mit feuerungstechn. Maßnahmen (Brennstoffstufung)	[Hannes]
PKW mit Ottomotor PKW mit Dreiwegekat.	1000 - 8000 40 - 400		[Baumbach]
PKW und LKW mit Dieselmotor	400 - 3000		[Baumbach]
Hausmüllverbrennung	250 - 500 300 - 400		[BVT-WI] [Reimann]

Neben den Stickoxiden NO und NO₂ kommt im Zusammenhang mit Verbrennungsprozessen dem Distickstoffoxid (N₂O) seit vielen Jahren eine steigende Bedeutung zu, denn wie oben im Text erwähnt, besitzt dieses Gas eine sehr hohe Relevanz im Zusammenhang mit dem Klimaschutz. Allgemein wird die Bildung von N₂O bei Verbrennungsprozessen sehr stark von der Temperatur beeinflusst [Bonn] [Gutierrez] [Werther]. Bei Temperaturen unterhalb von 900 °C entsteht aus dem Brennstoffstickstoff verstärkt N₂O, wobei HCN eine wichtige Vorläuferverbindung darstellt [Buser]. Den Einfluss der Temperatur auf die Bildung von N₂O im Rauchgas von Abfallverbrennungsanlagen dokumentiert auch Abbildung 3.

Abbildung 3: N₂O-Konzentration im Rauchgas nach der Abgasausbrandzone als Funktion der Temperatur [Hunsinger].

An Abfallverbrennungsanlagen werden die N₂O-Emissionen nur sehr selten messtechnisch erfasst [Dehoust]. Für die N₂O-Emissionen aus europäischen Abfallverbrennungsanlagen werden 1 bis 12 mg/m³ angegeben [Gutierrez]. Allerdings werden die N₂O-Emissionen von den Maßnahmen zur Minderung der Stickoxidemissionsminderung beeinflusst [Gutierrez]. Tabelle 15 enthält weitere Angaben zu N₂O-Emissionen aus verschiedenen Feuerungsanlagen. Ähnliche Konzentrationsangaben für Wirbelschichtfeuerungen findet man in der Literatur [Stöhr].

Tabelle 15: N₂O-Emissionen aus stationären Feuerungen [Klein].

Brennstoff	Feuerungstechnik	N ₂ O-Gehalt [mg/m ³]	Mittelwert N ₂ O [mg/m ³]
Erdgas		< 2	1
Erdöl		< 4	2
Steinkohle	Flammenfeuerung Wirbelschicht	2 - 15 20 - 470	5 210
Braunkohle	Flammenfeuerung Wirbelschicht	< 3 20 - 200	2 50
Krankenhausabfall	Rostfeuerung	< 4	2
Siedlungsabfall	Rostfeuerung Wirbelschicht	< 1 - 12 6 - 30	4 20
Klärschlamm	Rostfeuerung Wirbelschicht	100 - 200 90 - 1200	160 380

Die Angaben für die Verbrennung von Siedlungsabfall auf Rostfeuerungen in Tabelle 15 basieren auf durchgeführten Messungen mit zwei verschiedenen Analysemethoden an fünf großtechnischen Abfallverbrennungsanlagen [Klein].

Aufgrund des hohen Stickstoffgehalts von Klärschlämmen und der relativ geringen Verbrennungstemperatur im Bereich von 850 °C können bei der Verbrennung von Klärschlämmen N₂O-Konzentrationen im Bereich von 250 bis 700 mg/m³ entstehen [Werther]. Die Verbrennung von Holz, Torf oder Ölschiefer führt dagegen zu N₂O-Konzentrationen unterhalb von 60 von mg/m³ [Werther].

Für die Festlegung von Stickoxid-Grenzwerten hat sich der Summenparameter NO_x durchgesetzt, der die Stickoxide NO und NO₂ erfasst [Keller-R.] [Köser] [Muzio] [Schultes]. Stickstoffdioxid (NO₂) überwiegt bei niedrigen Temperaturen und wird deshalb als Hauptkomponente angesehen [Schultes]. Es ist heute üblich, die Konzentration von NO_x als NO₂ in mg/m³ zu beschreiben. Entsprechend werden in den deutschen Vorschriften zur Begrenzung der Emissionen von Großkraftwerken [13. BImSchV] oder Abfallverbrennungsanlagen [17. BImSchV] Emissionsgrenzwerte für "Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid, angegeben als Stickstoffdioxid" gefordert.

Für diese Angabe müssen die NO-Anteile im betrachteten Abgas auf NO₂ umgerechnet werden:

$$c(NO_x) = c(NO_2) + \frac{M(NO_2)}{M(NO)} \times c(NO)$$

In dieser Gleichung werden mit c die Konzentrationen von NO und NO₂ im Abgas in mg/m³ und mit M die Molmassen von NO bzw. NO₂ beschrieben.

5 Grundlagen großtechnischer Feuerungsanlagen

In den folgenden Abschnitten wird auf den Aufbau und die prinzipielle Funktion von großtechnischen Abfallverbrennungsanlagen und Kraftwerken eingegangen, soweit dies zum Verständnis der in dieser Arbeit behandelten Problemstellung notwendig ist. Die Ausführungen beziehen sich auf Anlagenkonzeptionen, die überwiegend in Deutschland eingesetzt werden. Im Fall der Abfallverbrennungsanlagen werden nur Anlagen mit Rostfeuerung erfasst, bei den Kraftwerken werden nur Kohlekraftwerke mit Staubfeuerung berücksichtigt.

5.1 Abfallverbrennungsanlagen

In Deutschland existieren heute an 68 Standorten [UBA-MVA2] großtechnische Anlagen für die Verbrennung von Hausmüll und ähnlichen Abfällen mit einer Gesamtkapazität im Bereich von 19,6 Mio. Tonnen pro Jahr. Allerdings variieren in publizierten Zusammenstellungen die Anzahl der Verbrennungsanlagen und die Gesamtkapazität, denn nicht immer gelingt eine eindeutige Abgrenzung von Verbrennungsanlagen, in denen andere Abfallarten als Hausmüll verbrannt werden [Richers].

Zu diesen anderen Abfallarten zählen insbesondere Rückstände aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung oder aufbereitete Gewerbeabfälle. Eingesetzt werden diese Abfälle in sogenannten Sekundärbrennstoffkraftwerken, die in Deutschland an 32 Standorten [UBA-SBK] errichtet wurden. Die Gesamtkapazität liegt im Bereich von 5,4 Mio. Tonnen pro Jahr [UBA-SBK]. An anderer Stelle [Thiel] werden 36 Standorte für Sekundärbrennstoffkraftwerke erwähnt.

Der prinzipielle Aufbau und Funktion von Hausmüllverbrennungsanlagen und Sekundärbrennstoffkraftwerken sind weitgehend identisch, denn in diesen Abfallverbrennungsanlagen überwiegt der Einsatz der Rostfeuerung als Verbrennungstechnologie. Der Aufbau entsprechender Verbrennungsanlagen mit Rostfeuerung ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

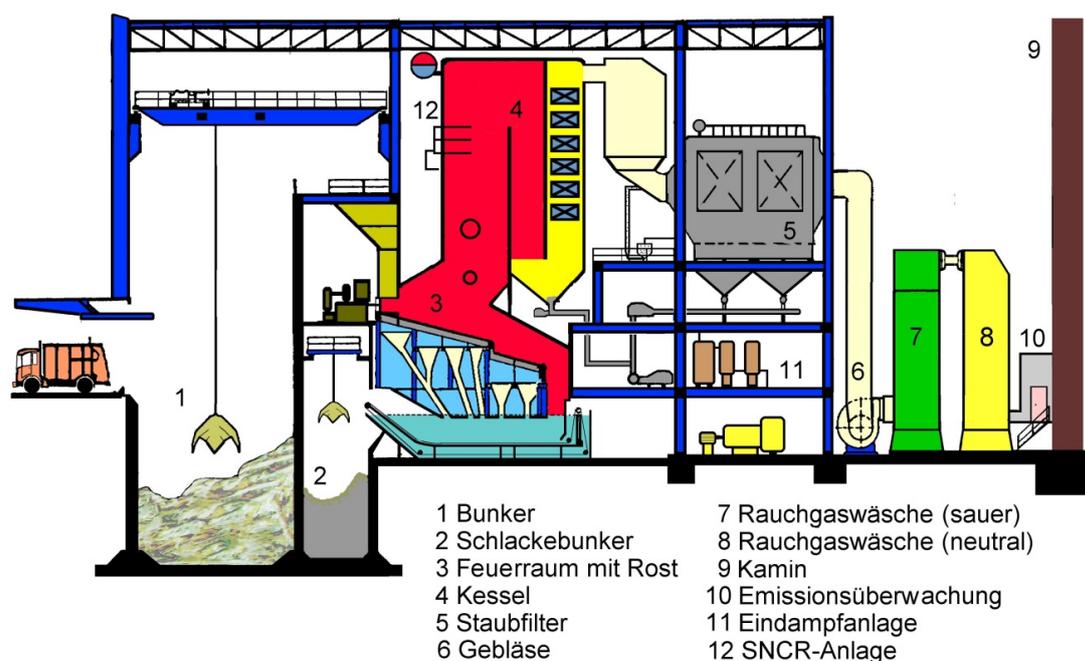


Abbildung 4: Schema einer Abfallverbrennungsanlage.

Zunächst werden die angelieferten Abfälle im Bunker (1) abgeladen. Mit einer Krananlage werden die Abfälle gemischt und anschließend über den Aufgabetrichter dem Feuerraum (3)

bedarfsgerecht zugeführt, in dem die Abfälle auf dem Rost bei Temperaturen im Bereich von ca. 1000 °C verbrennen. Die erforderliche Verbrennungsluft wird von unten durch den Rost zugeführt; durch Bewegung der Rostelemente wird der Verbrennungsprozess geschürt und der Abfall über den Rost transportiert. Die im Vergleich zu anderen thermischen Prozessen relativ niedrigen Verbrennungstemperaturen führen zu kleinen oder vernachlässigbaren Anteilen von thermisch gebildeten NO (Siehe Abschnitt 4.2) an den Stickoxidemissionen aus der Abfallverbrennungsanlage [Glarborg].

Der feste Verbrennungsrückstand, die Schlacke, gelangt am Rostende in ein Wasserbad und wird über eine Fördereinrichtung dem Schlackebunker (2) zugeführt.

Die bei der Verbrennung entstehenden Rauchgase verlassen den Feuerraum nach oben und geben ihre Wärmeenergie an die Heizflächen des Kessels (4) zur Dampferzeugung ab. Der erzeugte Dampf wird in Abhängigkeit vom Anlagenstandort zur Bereitstellung unterschiedlicher Energiearten genutzt. Im Fall der Hausmüllverbrennungsanlagen überwiegen die Stromerzeugung und die Fernwärmebereitstellung. Bei Sekundärbrennstoffkraftwerken dominiert die Energieversorgung für industrielle Produktionsprozesse (in Abbildung 4 nicht dargestellt).

Die aus dem Kessel austretenden Rauchgase enthalten neben Kohlendioxid und Wasser als gasförmige Verbrennungsprodukte verschiedene Schadstoffe. Die durchschnittlichen Schadstoffgehalte im Rohgas nach dem Kessel von Hausmüllverbrennungsanlagen zeigt Tabelle 16.

Tabelle 16: Konzentrationsbereiche für verschiedene Schadstoffe im Rohgas von Hausmüllverbrennungsanlagen [BVT-WI].

Schadstoff	Konzentrationsbereich	
Staub	1.000 - 5.000	mg/Nm ³
CO	5 - 50	mg/Nm ³
Schwefel als SO ₂	200 - 1.000	mg/Nm ³
Anorg. Chlorverb. als HCl	500 - 2.000	mg/Nm ³
Stickoxide als NO ₂	250 - 500	mg/Nm ³
Quecksilber	0,05 - 0,5	mg/Nm ³
Cadmium und Thallium	< 3	mg/Nm ³
PCDD/F	0,5 - 10ng	TEQ/Nm ³
N ₂ O	< 40	mg/Nm ³

Die Ursachen für die großen Schwankungsbreiten der Schadstoffkonzentrationen im Abgas liegen in der stark variierenden Zusammensetzung der eingesetzten Abfallbrennstoffe und der unterschiedlichen Feuerungstechnik (u.a. Rostkonstruktion, Luftzuführung). Einen Überblick über Einflussmöglichkeiten der Feuerungstechnik auf die Schadstoffkonzentrationen enthält Tabelle 17.

Tabelle 17: Einfluss von Feuerungstechnik und Abfallzusammensetzung auf die Schadstoffkonzentration im Rohgas von Abfallverbrennungsanlagen.

Großer Einfluss der Feuerungstechnik	Geringer Einfluss der Feuerungstechnik (Brennstoffabhängig)
Staub	SO ₂
C-gehalt im Staub	HCl
CO	HF
NO _x	Hg
Kohlenwasserstoffe *	Andere Schwermetalle

* Mit Kohlenwasserstoffen sind hier alle nicht verbrannten organischen Schadstoffe gemeint. Dazu gehören u.a. polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe, Dioxine und Furane.

Aufgrund der hohen Schadstoffkonzentrationen im Rohgas einerseits und den immer weiter abgesenkten Emissionsgrenzwerten (Siehe 17. BImSchV, Abschnitt 3.2.2) andererseits reichen feuerungstechnische Optimierungen bei Abfallverbrennungsanlagen schon seit vielen Jahren nicht mehr aus. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass die vorgegebenen Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV unabhängig von der eingesetzten Abfallart sind; die Anforderungen aus der 17 BImSchV gelten sowohl für Hausmüllverbrennungsanlagen als auch für Sekundärbrennstoffkraftwerke. Um die heutigen Emissionsgrenzwerte einhalten zu können, müssen Abfallverbrennungsanlagen folglich mit einer Rauchgasreinigungsanlage ausgestattet werden.

Für die Abscheidung der einzelnen Schadstoffe wurden in der Vergangenheit unterschiedliche Verfahren entwickelt, die in vielfältigen Kombinationen installiert werden können. Die in Abbildung 4 beispielhaft dargestellte Abfallverbrennungsanlage ist für die Abscheidung von Staub mit einem Gewebefilter (5) ausgerüstet. Die zusätzliche Dosierung von Koks ermöglicht die Abscheidung von Quecksilber und PCDD/F im Gewebefilter.

Die sauren Schadstoffe, überwiegend HCl und SO₂, werden in einem mehrstufigen Wäschesystem (7, 8) aus dem Rauchgas abgetrennt. Zur Neutralisation werden u.a. Ca(OH)₂, NaOH oder CaCO₃ eingesetzt. Eine Eindampfanlage (11) ist erforderlich, um einen abwasserfreien Betrieb zu gewährleisten. Für die Minderung der Stickoxide wird an der Anlage in Abbildung 4 das Verfahren der "Selective Non-Catalytic Reduction" (SNCR-Verfahren) angewendet (12). Bei dieser Technologie werden die Stickoxide im Kessel (3) mit NH₃ bei Temperaturen im Bereich um 1000 °C umgesetzt. Als Reaktionsprodukte entstehen Stickstoff und Wasser (Siehe Abschnitt 6.1).

Das Funktionsschema einer Abfallverbrennungsanlage in Abbildung 4 ist zwar für alle deutschen Abfallverbrennungsanlagen zutreffend, aber in der Realität unterscheiden sich die einzelnen Anlagen in der Konstruktion des Rostsystems, der Kesselform und Aufbau der Rauchgasreinigung.

Beispielsweise wird für die Minderung der Stickoxidemissionen an Abfallverbrennungsanlagen neben dem SNCR-Verfahren auch das Verfahren der „Selective Catalytic Reduction“ (SCR-Verfahren, siehe Abschnitt 6.2) angewendet. Die Reduktion der Stickoxide erfolgt ebenfalls mit NH₃, allerdings bei niedrigeren Temperaturen in Gegenwart eines Katalysators. Die SCR-Anlage wird an Abfallverbrennungsanlagen in der Regel nach Abscheidung der sauren Schadstoffe bzw. vor dem Kamin installiert. Entsprechende Abfallverbrennungsanlagen gibt es z.B. an den Standorten Böblingen [Söhndel] und Velsen [Pletscher].

Weitere Unterschiede zwischen den einzelnen Standorten ergeben sich durch die Anzahl der Verbrennungslinien. An einem Standort kann nur eine Verbrennungslinie, bestehend aus Feuerung, Dampfkessel und Rauchgasreinigung installiert sein, andererseits gibt es auch Standorte mit mehreren Verbrennungslinien. Am Standort Ludwigslust wird in Deutschland mit einer jährlichen Verbrennungskapazität im Bereich um 50.000 Tonnen [Napp] eine der kleinsten Verbrennungsanlagen in Deutschland betrieben. Auf der anderen Seite existieren große Anlagen mit mehreren Verbrennungslinien mit Jahreskapazitäten über 700.000 Tonnen [UBA-MVA2]. Nach [Fleck] ist die maximale Baugröße einzelner Verbrennungslinien aus technischen Gründen auf eine thermische Leistung von 110 bis 120 MW beschränkt, so dass sich ein maximaler Durchsatz im Bereich um 35 Tonnen pro Stunde ergibt.

5.2 Aufbau von Kohlekraftwerken

Als Kraftwerke werden allgemein technische Anlagen bezeichnet, in denen durch Umwandlung von Primärenergie wie Holz, Kohle, Erdöl, Sonnenlicht oder Wind elektrische Energie (Strom) erzeugt wird.

In Kohlekraftwerken erfolgt die Stromerzeugung in mehreren Stufen. Zuerst wird durch Verbrennung von Kohle Dampf erzeugt. Mit diesem Dampf wird eine Turbine angetrieben, die wiederum mit einem Generator zur Stromerzeugung verbunden ist. Als Kraftwerksblock wird ein technisch vollständiges Kraftwerk bezeichnet, aufgebaut aus Feuerung, Dampferzeuger, Turbinensatz und Generator.

Für die Stromerzeugung aus Kohle wurden in der Vergangenheit unterschiedliche Feuerungstechniken entwickelt. Heute werden in großen Kraftwerken überwiegend Staubfeuerungen eingesetzt, auf die sich die Ausführungen im Rahmen dieser Arbeit beschränken. Ein entsprechendes Kraftwerk ist in Abbildung 5 vereinfacht dargestellt.

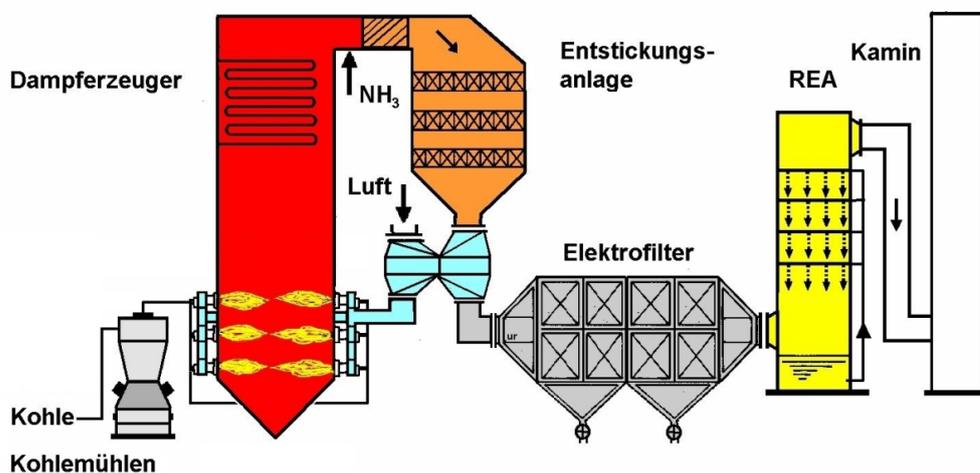


Abbildung 5: Schematischer Aufbau eines Kohlekraftwerks.

Zunächst wird die in Halden gelagerte Kohle zu den Kohlemühlen transportiert und staubfein zerkleinert. Die gemahlene Kohle wird anschließend gemeinsam mit der für die Verbrennung notwendigen Luft den Brennern am unteren Ende des Dampferzeugers zugeführt. Durch die Verbrennung entstehen heiße Rauchgase, die ihre Wärmeenergie an den Dampferzeuger abgeben. Mit dem erzeugten Dampf wird eine Turbine angetrieben, an die ein Generator zur Stromerzeugung angeschlossen ist (in Abbildung 5 nicht dargestellt).

Die entstandenen Rauchgase enthalten neben CO_2 und H_2O als Hauptverbrennungsprodukte auch Stickoxide, Schwefeldioxid und staubförmige Aschepartikel, so dass vor der Abgabe der Rauchgase an die Atmosphäre eine Abscheidung dieser Schadstoffe notwendig ist.

Die Rauchgasreinigungsanlage in Abbildung 5 ist für moderne Steinkohlenkraftwerke typisch und besteht aus einer Entstickungsanlage, einem Elektrofilter und einer Rauchgasentschwefelungsanlage (REA). Braunkohlenkraftwerke benötigen auf Grund anderer Verbrennungsbedingungen dagegen keine Entstickungsanlage, denn aufgrund der niedrigen Verbrennungstemperatur wird kein thermisches NO gebildet [Wagner].

Für die Entstickung der Rauchgase aus Kraftwerken hat sich das Verfahren der „Selective Catalytic Reduction“ (SCR-Verfahren) etabliert. Mit zugeführtem Ammoniak (NH_3) als Reaktionspartner und unter Einsatz eines Katalysators werden die Stickoxide im Rauchgas zu Stickstoff und Wasser umgesetzt (Siehe Abschnitt 6.2). Anschließend erfolgt die Abscheidung von Staub in einem Elektrofilter. Die letzte Rauchgasreinigungsstufe vor dem Kamin stellt die Rauchgasentschwefelungsanlage dar. Das SO_2 im Rauchgas wird mit einer Calcium-Verbindung als Neutralisationschemikalie aus dem Rauchgasstrom abgetrennt und als Gips aus der Rauchgasentschwefelungsanlage abgeführt.

Für die allgemeine Stromversorgung wurden in Deutschland im Jahr 2012 etwa 166,3 Mio. t Braunkohle verbraucht [Kaltenbach]. Steinkohle lieferte 2012 zur Stromerzeugung einen Energiebeitrag im Bereich von 40,1 Mio. t Steinkohleeinheiten (SKE) [Loo]. Geht man von dem für SKE festgelegten Steinkohleheizwert von 29,3MJ/kg [DIN 1301-3] aus, so wurden 2012 40,1 Mio.t Steinkohle für die Stromerzeugung eingesetzt.

In Deutschland existiert eine große Anzahl unterschiedlich großer Kohlekraftwerke, die nicht nur für die Stromversorgung, sondern auch von Industrieunternehmen zur eigenen Energieversorgung betrieben werden. Eine Auswertung des Umweltbundesamts [UBA-KW] zeigt, dass in Deutschland an ca. 60 Kraftwerksstandorten insgesamt ca. 120 Kraftwerksblöcke mit Stein- oder Braunkohle betrieben werden, deren elektrischen Bruttoleistung 100 MW übersteigt.

Die Größe der Kraftwerke hat in der Vergangenheit immer weiter zugenommen. In neueren Kraftwerken können mit einem Dampferzeuger elektrische Bruttoleistungen im Bereich von 750 bis 1100 MW erzeugt werden. Das neue Kraftwerk am Standort Neurath der RWE besteht aus zwei Dampferzeugern, die im Nennbetrieb eine elektrische Leistung von jeweils 1100 MV bereitstellen. Um die entsprechende thermische Leistung von 2293 MW aufbringen zu können, müssen jedem Dampferzeuger pro Stunde 820 Tonnen Braunkohle (Garantiekohle) zugeführt werden [RWE].

6 Technische Minderung von Stickoxidemissionen

Für den Umweltschutz wurden in der Vergangenheit viele Technologien entwickelt. Allerdings handelt es sich bei diesen Technologien weniger um neu entwickelte Verfahren, sondern um Optimierungen bestehender Anlagen mit Blick auf den Umweltschutz oder um den zusätzlichen Einsatz verfahrenstechnischer Grundoperationen, angepasst an die entsprechende Umweltschutzaufgabe.

Für die Minderung von Stickoxidemissionen zum Schutz der Umwelt stehen unterschiedliche Wege zur Verfügung, die in Primär- und Sekundärmaßnahmen eingeteilt werden können. Einen Überblick über die primären und sekundären Verfahren zur Rauchgasentstickung zeigt Abbildung 6.

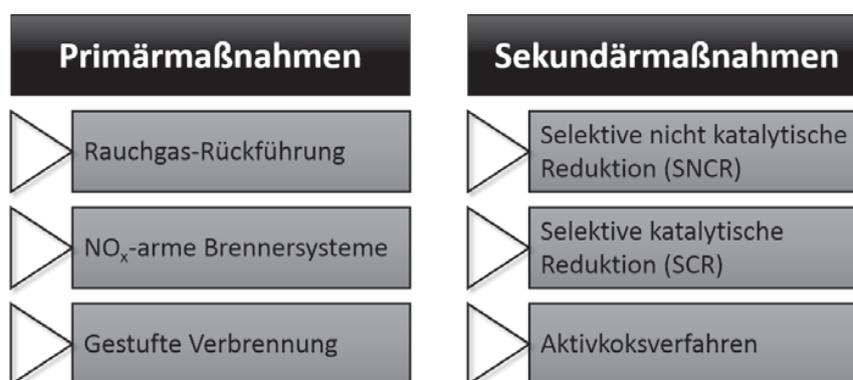


Abbildung 6: Übersicht über die Verfahren zur Entstickung von Rauchgasen

Mit Primärmaßnahmen wie eine Rauchgasrückführung oder eine gestufte Zuführung der Verbrennungsluft werden die Verbrennungsprozesse so optimiert, dass möglichst wenige Stickoxide entstehen. Diese Maßnahmen beruhen darauf, dass die Stickstoffemissionen einer Verbrennungsanlage im Wesentlichen von den Temperaturen, dem Sauerstoffangebot, dem Stickstoffgehalt des Brennstoffs und der Betriebsweise der entsprechenden Feuerung bestimmt werden. Begonnen haben diese Entwicklungen bereits Ende der siebziger Jahre, um die NO_x-Emissionen von Kraftwerken abzusenken [Hannes]. Primärmaßnahmen für Abfallverbrennungsanlagen werden zum Beispiel von Stoffel und Rüegg [Stoffel] oder Hunsinger [Hunsinger] beschrieben.

In vielen Fällen reichen diese Primärmaßnahmen nicht aus, so dass zusätzliche Sekundärmaßnahmen notwendig werden. Im großtechnischen Maßstab werden die "Selective Non-Catalytic Reduction" (SNCR-Verfahren) und die "Selective Catalytic Reduction" (SCR-Verfahren) eingesetzt. Im Zusammenhang mit dem SNCR- und dem SCR-Verfahren bedeutet selektiv, dass nicht alle Abgaskomponenten, sondern nur die Stickoxide reduziert werden.

Im Vergleich zum SNCR- und SCR-Verfahren werden das Aktivkoksverfahren oder andere Sekundärmaßnahmen nur sehr selten eingesetzt [Keller-R.] [Mayr]. Sowohl in der aktuellen VDI-Richtlinie 3460 "Emissionsminderung Thermische Abfallbehandlung" vom Februar 2014 [VDI 3460] als auch in der älteren Ausgabe (Stand März 2002) werden für die Minderung der Stickstoffoxid-Emissionen nur das SNCR- und das SCR-Verfahren berücksichtigt.

In den folgenden Abschnitten werden das SNCR-Verfahren und das SCR-Verfahren genauer beschrieben. Aufgrund der sehr geringen Bedeutung wird auf die anderen Sekundärmaßnahmen nicht eingegangen.

Die Primärmaßnahmen beziehen sich auf den feuerungstechnischen Anlagenbetrieb und stehen nicht im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit; für Details wird auf die Literatur [Bank] [Hannes] [Kolar] [Mayr] [Scholz] [Schrod] [Schultess] [Seifert] [Stoffel] verwiesen.

6.1 Das SNCR-Verfahren

Die Entwicklung für das Verfahren der Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR) begann in den 1970er Jahren in den USA, die großtechnische Erprobung war zu Beginn der 1990er Jahre abgeschlossen [Pachaly]. Diese weit verbreitete Technologie zur Minderung von Stickoxidemissionen wird im Bereich der Abfallverbrennung oft angewendet [Frank]. Andere Anwendungsgebiete sind die Zementerstellung in Drehrohröfen [Görtzen] oder kleine Industriedampferzeuger [Muzio]. Das SNCR-Verfahren hat in der Kraftwerkstechnik aufgrund der geringeren Abscheiderate und des systembedingten höheren Ammoniak-schlupfes eine geringe Bedeutung [Frank].

Im Mittelpunkt des SNCR-Verfahrens steht die chemische Reduktion von NO und NO₂. Das Reaktionsprinzip mit Ammoniak (NH₃) als Reduktionsmittel ist in Abbildung 7 dargestellt.

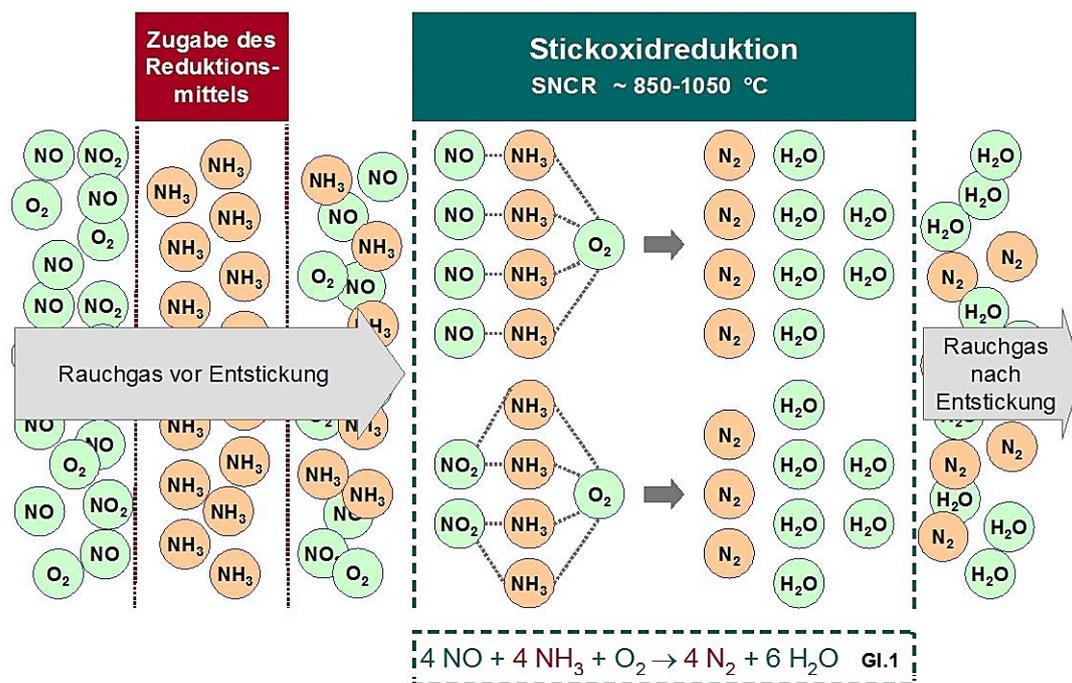


Abbildung 7: Reaktionsprinzip der Stickoxidreduktion für das SNCR-Verfahren

Das Reaktionsprinzip und die Bruttoreaktionsgleichung (Gl. 1) für das SNCR-Verfahren in Abbildung 7 stellen allerdings nur die maßgebliche Bruttoreaktion für NO in Feuerungsanlagen dar. Der tatsächliche Reaktionsmechanismus ist wesentlich komplizierter und verläuft über kurzlebige und reaktive Radikale. Für Details wird auf die Literatur [Blank] [Baumbach] [Schultes] [Sievers] [VDI 3927-1] verwiesen. Als Reaktionsprodukte entstehen beim SNCR-Verfahren lediglich Stickstoff und Wasser, die als natürliche Bestandteile der Luft keine schädlichen Emissionen darstellen.

Das Reduktionsmittel NH₃ wird in der großtechnischen Anwendung des SNCR-Verfahrens sowohl gasförmig als auch in Form einer wässrigen Lösung (NH₃-Lösung 25 %) eingesetzt. Der Einsatz von gasförmigem NH₃ ist mit relativ hohen technischen und organisatorischen Aufwendungen verbunden und nur sinnvoll, wenn große Reduktionsmittelmengen benötigt

werden. An Abfallverbrennungsanlagen hat sich der Einsatz der wässrigen NH_3 -Lösung durchgesetzt.

Neben NH_3 können für die chemische Reduktion der Stickoxide auch andere Stickstoffverbindungen eingesetzt werden [Keller-R.]. Sehr häufig findet Harnstoff-Lösung ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) Verwendung [BVT-WI] [VDI 3927-1], aber auch der Einsatz von Harnstoff in fester Form ist möglich [VDI 3460-1]. Harnstoff weist gegenüber Ammoniak eine problemlosere Handhabung, einen günstigeren Preis und eine geringere Toxizität auf [Schultes]. Allerdings kann der Einsatz von Harnstoff zu Problemen mit N_2O führen [BVT-WI] [Herrlander] [Koebel] [Schultes].

Der chemische Reduktionsprozess der Stickoxide ist stark temperaturabhängig und benötigt für einen optimalen Ablauf Temperaturen im Bereich um $1000\text{ }^\circ\text{C}$, denn die Aktivierungsenergie wird beim SNCR-Verfahren vollständig thermisch zur Verfügung gestellt [VDI 3927-1]. Mit Hilfe der hohen Temperaturen werden die für die Reaktion notwendigen Radikale aus den beteiligten Molekülen gebildet. Eine Zusammenstellung von Betriebstemperaturen aus der Literatur enthält Tabelle 18.

Tabelle 18: Betriebstemperaturen für das SNCR-Verfahren.

Temperaturbereich $^\circ\text{C}$	Reduktionsmittel	Quelle
950 - 1050	NH_3	[Wahl] [Mineur]
750 - 900	NH_3	[Reimann]
960 - 1040	Harnstoff	
900 - 1050	NH_3	[Görtzen]
900 - 1050	keine Angabe	[Schultes]
870 - 1150	keine Angabe NH_3 /Harnstoff	[Muzio] [Baumbach]
850 - 1000	NH_3	[Scholz] [Mineur]
850 - 1000	keine Angabe	[BVT-WI]
850 - 1050	keine Angabe	[Pachaly]
950 - 1000	NH_3	[VDI 3927-1]
900 - 950	Harnstoff	
850 - 950	keine Angabe	[VDI 3460]
850 - 1100, bevorzugt 950	keine Angabe	[VDI 3460-1]

Entsprechend den Angaben zu den Betriebstemperaturen in Tabelle 18 existiert für das SNCR-Verfahren ein Temperaturfenster. Liegen die Temperaturen unterhalb des Temperaturfensters, so ist die wichtige Radikalbildung unvollständig und zusätzlich verläuft die Reaktion relativ langsam. Das zugegebene Reduktionsmittel wird in diesem Fall nicht vollständig verbraucht (NH_3 -Schlupf). Bei zu hohen Temperaturen sind die Prozesse der Radikalbildung zwar ausreichend schnell, aber es kommt zu einer unerwünschten Nebenreaktion: Das Reduktionsmittel (NH_3 oder Harnstoff) wird durch den Restsauerstoff im Rauchgas zu NO oxidiert. In der Folge steigt der Reduktionsmittelbedarf überproportional an. [Görtzen] [Mineur] [VDI 3927-1].

Der Einfluss des Temperaturfensters ist in Abbildung 8 schematisch dargestellt. Eine ähnliche Abbildung findet man in [VDI 3927-1].

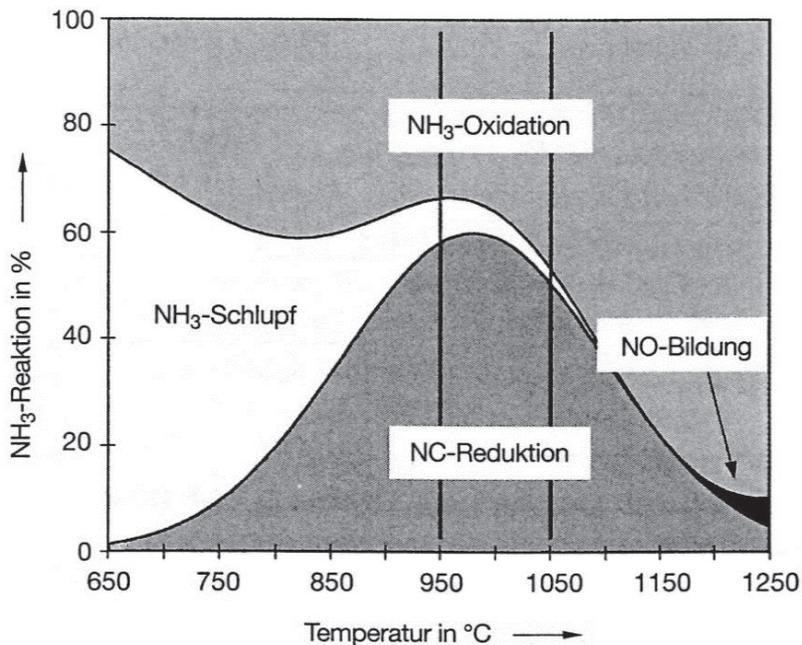


Abbildung 8: Temperaturfenster und chemische Reaktionen für das SNCR-Verfahren [Mineur] [Dittrich].

Die hohen Betriebstemperaturen, die entsprechend Tabelle 18 für den Betrieb von SNCR-Anlagen notwendig sind, bestimmen an Abfallverbrennungsanlagen den Einsatzort für die entsprechende Technik. Den schematischen Aufbau einer SNCR-Anlage mit Reduktionsmittelbevorratung und Düsenebenen zeigt Abbildung 9.

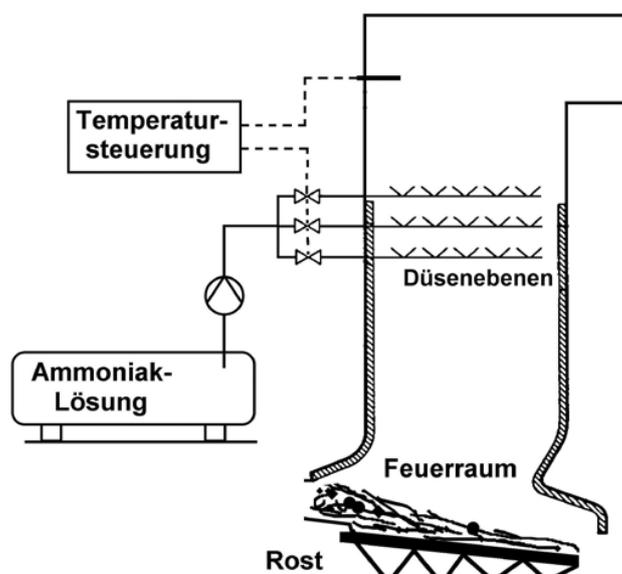


Abbildung 9: Schematische Anordnung und Aufbau einer SNCR-Anlage an einer Abfallverbrennungsanlage mit Rostfeuerung.

Der geforderte Temperaturbereich liegt entsprechend Abbildung 9 in Abfallverbrennungsanlagen im ersten Kesselzug oberhalb des Feuerraums (Siehe auch Abbildung 4, S. 27). In diesem Bereich sind mehrere Düsenebenen, bisher maximal fünf Ebenen [VDI 3927-1], für das Einbringen des Reduktionsmittels und Einrichtungen für die Temperaturmessung installiert. Die Auswahl der Düsenebene für die Reduktionsmittelzugabe wird mit einer Temperatursteuerung den schwankenden Temperaturverhältnissen so angepasst, dass eine Zugabe möglichst im oben erwähnten Temperaturbereich erfolgt. Eine andere Möglichkeit bieten bewegliche Düsen, deren Sprühhichtung dem Temperaturprofil im ersten Kesselzug angepasst werden kann. Das Know-how der SNCR-Technik liegt in der Anordnung der Düsenbatterien [VDI 3927-1]. Die relativ geringen Investitionskosten und der geringe Platzbedarf der Anlagentechnik gelten als Vorteile für das SNCR-Verfahren.

Neben der Temperatur stellen ausreichende Verweilzeiten und eine gute Durchmischung des Reduktionsmittels mit dem Rauchgas wichtige Voraussetzungen für eine hohe Minderung der Stickoxidkonzentrationen im Abgas dar [Abbas] [BVT-WI] [Mineur] [Sievers].

Die angeführten Forderungen nach einer optimalen Temperatur, guter Durchmischung und ausreichenden Verweilzeiten lassen sich in der Praxis meistens nicht erreichen [Sievers] [Baumbach]. Aus diesem Grund ist bei etwa stöchiometrischer Zugabe des Reduktionsmittels die NO-Reduktionsrate mit ca. 30 % gering [Steinmüller].

Für hohe NO-Reduktionsraten erfordert die selektive nicht katalytische Reduktion (SNCR) bei der Reduktionsmittelzugabe einen relativ großen Überschuss bezogen auf die NO_x-Konzentration im Abgas [Baumbach] [Herrlander]. Nach [Reimann] liegt der Überschuss im Bereich zwischen 2,5 und 3; nach [VDI 3927-1] beträgt der Überschussfaktor 2 bis 4. In [Sievers] wird für Minderungsraten über 50 % ein zwei- bis dreifacher Überschuss als durchaus notwendig angesehen. In [BVT-WI] wird ebenfalls ein zwei- bis dreifacher Überschuss erwähnt. Außerdem ist zu beachten, dass der Reduktionsmittelbedarf mit zunehmender Stickoxidreduktion nicht linear sondern exponentiell zunimmt [Dittrich].

Das SNCR-Verfahren besitzt bei vertretbarem Reduktionsmitteleinsatz keine allzu hohen Minderungsraten für Stickoxide [Baumbach]. Eine begrenzte Abscheideleistung von 60 bis 80 % wird auch in [Mayr] erwähnt. In der Praxis wird mit dem SNCR-Verfahren eine maximale Stickoxidsminderung im Bereich von 50 bis 70 % erreicht [VDI 3927-1].

Mit dem SNCR-Verfahren kann bei geringem Ammoniak schlupf (NH₃-Reingaskonzentration unter 5 mg/m³) ein Emissionsgrenzwert von 200 mg/m³ sicher eingehalten werden [VDI 3460-1]. Bei einem Stickoxidsminderungsgrad von 75 % liegt die Konzentration an nicht reagiertem Ammoniak im Rohgas hinter dem Kessel im Bereich von 10 bis 20 mg/m³ (Ammoniak schlupf) [VDI 3927-1].

Dieser Ammoniak schlupf kann zu Problemen in den nachfolgenden Rauchgasreinigungsstufen führen, indem das Betriebsverhalten oder die Werkstoffe beeinflusst werden. Außerdem können Rückstände aus der Rauchgasreinigung mit Ammoniak kontaminiert werden. [Sievers]

Die Entfernung von Ammoniak aus dem Rauchgas nach dem Kessel ist bei Einsatz von Wäschern zur Abscheidung von SO₂ und HCl (nasse Rauchgasreinigung) durch Absorption möglich. Mit Hilfe einer anschließenden Strippung kann der Ammoniak aus dem Wäscherablauf entfernt und der SNCR-Anlage als Reduktionsmittel wieder zugeführt werden. Diese Vorgehensweise ist jedoch mit zusätzlichem Aufwand und somit mit erhöhten Kapital- und Betriebskosten verbunden. [BVT-WI]

Der Ammoniak schlupf kann auch durch eine Kombination der SNCR-Technik mit dem SCR-Verfahren ("Selective Catalytic Reduction", Siehe Abschnitt 6.2) reduziert werden. Der SCR-Katalysator arbeitet lediglich als katalytische Nachreinigungsstufe, so dass nur ein geringes

Katalysatorvolumen notwendig ist [Pachaly]. Eine solche Kombination ist z.B. in der Abfallverbrennungsanlage am Standort Mainz installiert [Fischer].

Das Einhalten der neuen Stickoxidemissionsgrenzwerte, durch Neufassung der 17. BImSchV von 200 auf 100 mg/Nm³ abgesenkt, ist für Abfallverbrennungsanlagen mit SNCR-Technik nicht einfach [Mineur]. Sofern NO_x-Emissionen unter 100 mg/Nm³ gefordert werden, ist es im Bereich der Abfallverbrennung allgemein nicht üblich, dass SNCR-Verfahren einzusetzen [BVT-WI].

6.2 Das SCR-Verfahren

Das Verfahren der "Selective Catalytic Reduction" (SCR-Verfahren) wurde ursprünglich in Japan für die Minderung der Stickoxidemissionen aus Kraftwerken entwickelt [Schrod] [Muzio]. Für den Einsatz in deutschen Kraftwerken ab Mitte der 80er Jahre waren Anpassungen erforderlich, denn u. a. werden japanische Kraftwerke im Grundlastbereich betrieben und setzen im Vergleich zu deutschen Kraftwerken andere Kohlen als Brennstoffe ein [Schrod]. Der großtechnische Einsatz der SCR-Technik erfolgte in Deutschland ab 1985 [Schärer] [Lange]. Zu den weiteren Einsatzgebieten des SCR-Verfahrens gehören die Abfallverbrennung [BVT-WI] [VDI 3460] und die Zementproduktion [Haug].

In Analogie zum SNCR-Verfahren beruht das SCR-Verfahren auf einer chemischen Reduktion der Stickoxide mit Ammoniak (NH₃). Mit Hilfe eines Katalysators, der nicht Bestandteil der Ausgangsstoffe oder Produkte ist, wird die Aktivierungsenergie für die chemische Reaktion herabgesetzt. Es werden Betriebstemperaturen in einem Bereich zwischen 180 °C und 450 °C erreicht [BVT-WI].

Die Reaktionsgleichung für die chemische Reduktion von NO nach dem SCR-Verfahren zeigt Gl. 2 [Strauß]:



Die Reaktionsgleichung Gl. 2 entspricht Gl. 1 in Abbildung 7 (S. 33) für das SNCR-Verfahren. Allerdings verläuft die chemische Reaktion im Fall des SCR-Verfahrens nach einem anderen Reaktionsmechanismus ab, denn neben der Reaktion an der Katalysatoroberfläche sind Transportvorgänge durch Diffusion sowie Adsorptions- und Desorptionsprozesse zu berücksichtigen. Informationen zum Mechanismus der chemischen Reaktion können der Literatur [Köser] [Schultes] [Sievers] [VDI 3476-3] entnommen werden.

Als Katalysatoren für SCR-Entstickungsanlagen haben sich mit Waben- und Plattenkatalysatoren zwei verschiedene Typen etabliert [Herrlander] [VDI 3927-1]. Als Trägermaterial wird in der Regel Titandioxid (TiO₂) verwendet, das mit Vanadiumpentoxid (V₂O₅), Wolframoxid (WO₃) und anderen Schwermetalloxiden als katalytisch "aktive Zentren" dotiert wird [VDI 3927-1]. Weitere Informationen zu den Katalysatoren findet man in der Literatur [Baumbach] [Schultes]. Den Aufbau eines SCR-Katalysators zeigt Abbildung 10.

Entsprechend Abbildung 10 werden die einzelnen Katalysatorelemente in einem Korb zu einem Modul zusammengesetzt. Aus den Modulen werden dann Katalysatorebenen aufgebaut.

Für den Einbau der SCR-Anlage in die Rauchgasreinigungsanlagen existieren verschiedene Möglichkeiten. Die entsprechenden Schaltungen sind in Abbildung 11 vereinfachend (ohne Stoffströme, Wärmetauscher usw.) dargestellt. Aus Abbildung 10 und Abbildung 11 ist auch zu entnehmen, dass die SCR-Entstickung eine zusätzliche Verfahrensstufe in der Rauchgasreinigung darstellt. Im Vergleich zum SNCR-Verfahren sind Platzbedarf und Investitionskosten höher.

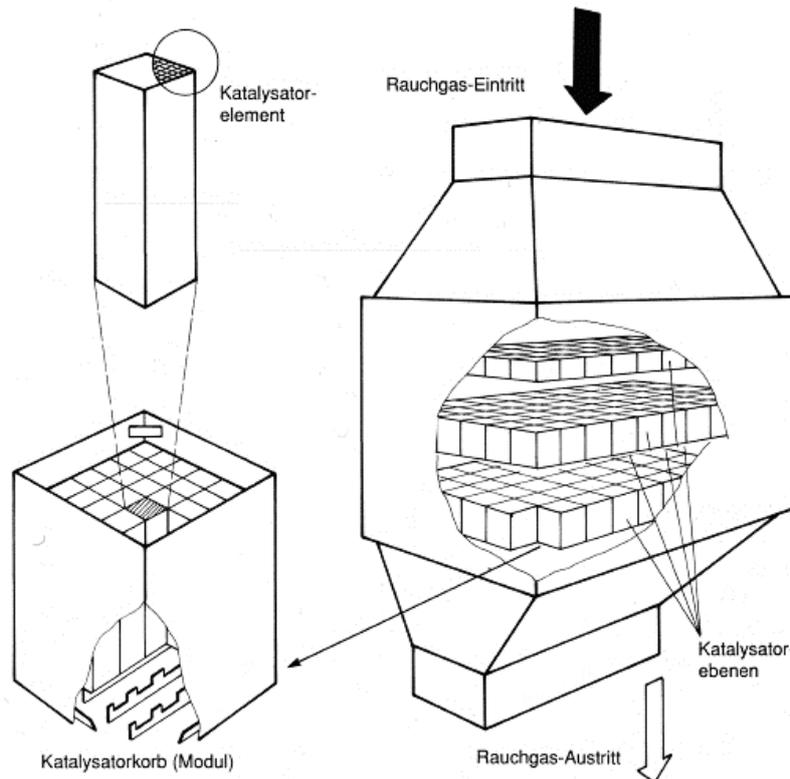


Abbildung 10: Schematischer Aufbau eines SCR-Katalysators [Baumbach] [Steinmüller] [VDI 3927-1].

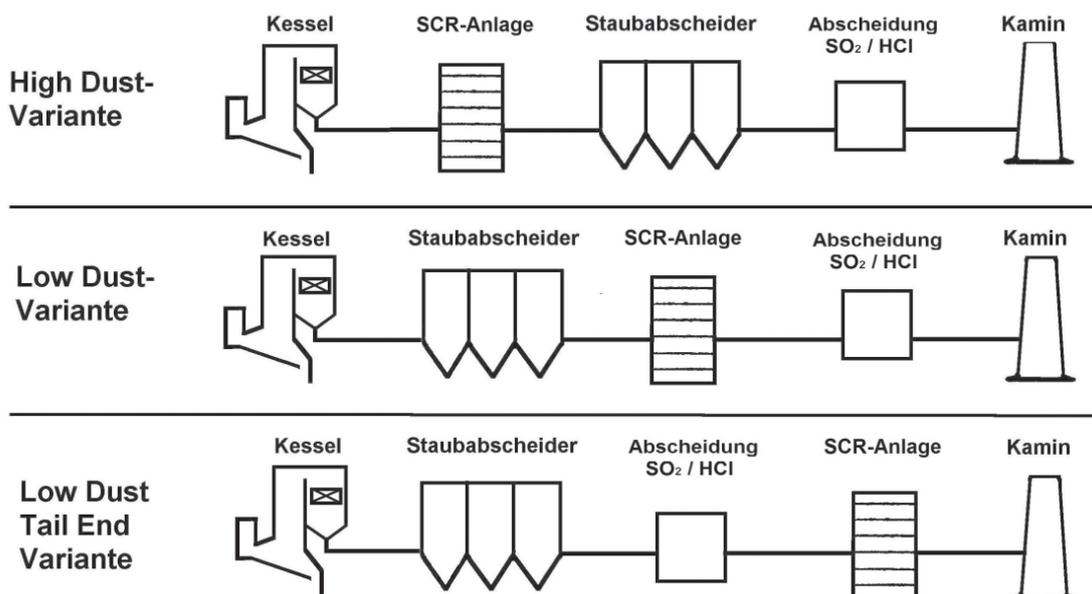


Abbildung 11: Schematische Darstellung der wichtigsten Schaltungsvarianten für das SCR-Verfahren.

Die in Abbildung 11 als High Dust-Variante bezeichnete Möglichkeit für die Installation der SCR-Anlage ist bei Kraftwerken üblich und in Abbildung 5 (S. 30) dargestellt. Das staubhaltige Rohgas aus dem Kessel wird direkt der SCR-Anlage als erste Rauchgasreinigungs-

stufe zugeführt. An Abfallverbrennungsanlagen ist die High Dust-Variante aufgrund von Deaktivierungsprozessen und Erosionsvorgängen für den Katalysator als problematisch anzusehen. Als wichtigen Vorteil für diese Variante ist anzuführen, dass zum Erreichen der Katalysatorbetriebstemperatur keine zusätzliche Energie bereitgestellt werden muss. [BVT-LCP] [Kleppmann] [VDI 3460-1][VDI 3927-1]

Im Fall der Low Dust-Variante ist die SCR-Anlage hinter dem Staubabscheider in der Rauchgasreinigungsanlage installiert, so dass höhere Standzeiten für den Katalysator zu erwarten sind [BVT-LCP]. Ein Betrieb des Staubabscheiders bei ausreichend hohen Temperaturen ermöglicht bei dieser Variante ebenfalls einen Verzicht auf eine Wiederaufheizung [VDI 3927-1] [BVT-LCP]. Bei der Aufrüstung von älteren Kraftwerken ist diese Variante oft unwirtschaftlich [BVT-LCP]. Außerdem besteht die Gefahr, dass sich durch Nebenreaktionen des Reduktionsmittels (NH_3) mit den sauren Rauchgasbestandteilen (SO_2) Ablagerungen im Rauchgassystem bilden [BVT-LCP]. Diese Schaltung einer SCR-Anlage wurde an der relativ neuen Abfallverbrennungsanlage bei Freiburg realisiert [EEW Breisgau] [Sotec].

Als dritte Variante zeigt Abbildung 11 für die Installation der SCR-Anlage im Bereich der Rauchgasreinigung die Low Dust Tail End-Schaltung. In den vorgeschalteten Rauchgasreinigungsstufen werden Flugstäube und saure Schadstoffe (HCl/SO_2) abgeschieden, so dass der Katalysator durch diese Rauchgasbestandteile nicht mehr belastet wird. Die Rauchgasreinigungsstufen vor der SCR-Anlage verursachen allerdings eine Abkühlung des Rauchgases, so dass eine Wiederaufheizung erforderlich wird.

Im Rahmen der Nachrüstung älterer Abfallverbrennungsanlagen zur Erfüllung der Anforderungen der 17. BImSchV wurde das SCR-Verfahren in der Regel am Ende der Rauchgasreinigungsanlage installiert, so dass sich die Low Dust Tail End-Variante als Stand der Technik etabliert hat [VDI 3460-1]. Den allgemeinen Aufbau einer SCR-Anlage für die Low Dust Tail-End-Schaltung zeigt Abbildung 12.

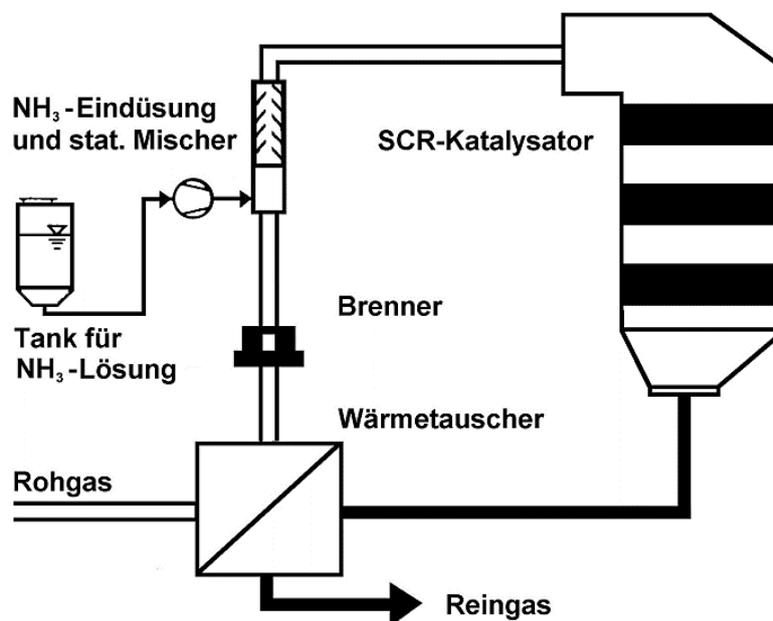


Abbildung 12: Schematischer Aufbau einer SCR-Anlage für Abfallverbrennungsanlagen in Low Dust Tail End-Schaltung.

Das zentrale Bauteil einer SCR-Anlage an Abfallverbrennungsanlagen stellt in Abbildung 12 das Katalysatorgehäuse dar, in dem die einzelnen Katalysatorebenen untergebracht sind. Vor

dem Katalysatorgehäuse ist ein statischer Mischer für eine homogene Verteilung der zugeführten NH_3 -Lösung installiert. Für die erforderliche Wiederaufheizung der Rauchgase ist im Schema der Abbildung 12 ein Wärmetauscher und nachfolgend ein Erdgasbrenner vorgesehen. Anstelle des Erdgasbrenners ist auch der Einsatz von Dampf aus dem Dampfsystem der Abfallverbrennungsanlage möglich.

Die Anzahl der Katalysatorebenen - in Abbildung 12 sind schematisch drei Ebenen eingezeichnet - richtet sich nach der erforderlichen Minderung der Stickoxide, der zu erwartenden Alterung der Katalysatoren und einer eventuell angestrebten Minderung der Dioxinmissionen [Schallert].

Die Betriebstemperatur für den Katalysator hängt von der Katalysatoraktivität und der Rauchgaszusammensetzung ab und liegt im Bereich zwischen 160 und 320 °C [Pletscher]. Der Betrieb von Katalysatoren bei niedrigen Temperaturen kann zu Salzablagerungen führen; eine Reinigung ist durch Waschprozesse oder Aufheizung möglich [Schallert] [VDI 3460-1]. Eine Zusammenstellung der Betriebstemperaturen für den Katalysator enthält Tabelle 19.

Tabelle 19: Betriebstemperaturen für den Katalysator bei Abfallverbrennungsanlagen

Jahr	Temperatur [°C]	Mittelwert [°C]	Quelle
1989	350 bis 400	375	[Reimann]
1991	300 bis 400	350	[Herrlander]
1994	320	320	[Ernst]
1996	320	320	[Schellenberger]
2001	170 bis 350	260	[Scholz]
2005	250	250	[Höling]
2007	260	260	[Von Roll Inova]
2014	180 bis 230	205	[VDI 3460-1]

Neben den Betriebstemperaturen werden durch die Katalyse bei dem SCR Verfahren auch die Stoffströme beeinflusst. Die erforderlichen Mengen an Reduktionsmittel werden beim SCR-Verfahren direkt von den zu reduzierenden NO-Mengen bestimmt. Die Zugabe von NH_3 erfolgt stöchiometrisch in Bezug auf die NO-Mengen; ein Überschuss wie bei dem SNCR-Verfahren ist nicht erforderlich [VDI 3927-1]. Für eine Optimierung der Reduktionsmittelzugabe werden auch Fuzzy Control-Systeme eingesetzt [Pawelka].

Mit der SCR-Technologie lassen sich in Abhängigkeit vom Katalysatorvolumen und der gewählten NH_3 -Stöchiometrie NO_x -Reduktionsraten im Bereich von 80 bis 90 % erreichen; das Molverhältnis NH_3/NO_x liegt dann im Bereich von 0,8 bis 0,9 [Mayr]. An Abfallverbrennungsanlagen, die mit einem SCR-Verfahren zur Entstickung ausgerüstet sind, können die neuen Stickoxidemissionsgrenzwerte (Tagesmittelwert 100 mg/Nm³) [17. BImSch] voraussichtlich ohne Probleme eingehalten werden [Mineur].

6.3 Wirtschaftliche Betrachtungen zur Minderung von Stickoxiden aus Abfallverbrennungsanlagen

Für einen industriellen Einsatz sind neben den technischen Eigenschaften die wirtschaftlichen Aspekte von großer Bedeutung, die durch Investitionskosten und Betriebskosten maßgeblich bestimmt werden. Einen sehr großen Einfluss auf die Investitionskosten hat der verfahrenstechnische Aufbau der Anlagen, der für das SNCR-Verfahren (Abbildung 9, S. 35) und die

SCR-Technologie (Abbildung 12, S. 39) sehr unterschiedlich ist. Eine einfache Auflistung der notwendigen Anlagenteile enthält Tabelle 20.

Tabelle 20: Anlagenteile für das SNCR-Verfahren und das SCR-Verfahren (Low-Dust-Tail-End) an Abfallverbrennungsanlagen.

Anlagenteil	SNCR	SCR
Lager für Reduktionsmittel	+	+
Pumpen und Rohrleitungen	+	+
Düsensystem zur Verteilung des Reduktionsmittels	+	+
Wärmetauscher Rohgas/Reingas	-	+
Wiederaufheizung durch Gasbrenner oder Dampf	-	+
Gehäuse mit Katalysator	-	+

Die Gegenüberstellung in Tabelle 20 dokumentiert, dass für das SCR-Verfahren in der Low Dust Tail End-Variante mehrere Anlagenteile notwendig sind, die für die SNCR-Technologie nicht benötigt werden. Folglich sind für das SCR-Verfahren höhere Investitionskosten und ein höherer Kapitaldienst notwendig. Außerdem ergeben sich durch die Wiederaufheizung der Rauchgase und die Überwindung zusätzlicher Druckverluste höhere Betriebskosten für die SCR-Technologie, so dass insgesamt für den Einsatz der SCR-Technologie wesentlich höhere Kosten zu erwarten sind als für das SNCR-Verfahren.

Einen Investitionskostenvergleich für die beiden Verfahren findet man bei Beckmann [Beckmann-2] [Beckmann-3]. Die ermittelten Kosten beruhen auf Angaben von Anlagenherstellern und sind in Tabelle 21 in Abhängigkeit von den Reingaskonzentrationen angegeben. Es wird von einer Abfallverbrennungsanlage mit einer jährlichen Verbrennungskapazität von 200.000 Tonnen und 400 mg/Nm³(tr.) als NO_x-Rohgaskonzentration ausgegangen.

Tabelle 21: Investitionskosten von SNCR- und SCR-Anlagen für unterschiedliche Emissionsgrenzwerte (* ohne Lager für Reduktionsmittel) [Beckmann-2].

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

Die Investitionskosten in Tabelle 21 steigen für das SNCR-System mit den Anforderungen an die Emissionsgrenzwerte an, denn die Anforderungen an die Mess- und Regeltechnik nehmen immer stärker zu. Im Fall der SCR-Technologie erfassen die Angaben den Regenerationsbrenner, aber nicht den Wärmeüberträger hinter dem SCR-Katalysator. Für niedrigere Grenzwerte ist ein größeres Katalysatorvolumen mit einem größeren Gehäusevolumen notwendig, so dass die Investitionskosten steigen. [Beckmann-2]

Ein weiteres Beispiel für die Kosten von Anlagen zur Minderung von Stickoxidemissionen findet man in [Kersting]. In diesem Fall wurde ebenfalls von einer Abfallverbrennungsanlage mit einer Kapazität von 200.000 Tonnen pro Jahr ausgegangen; als Emissionsgrenzwert wurden 100 mg/Nm³ gewählt. Im Rahmen der Berechnungen wurden bei dem SNCR-Verfahren drei Düsenebenen im Kessel mit einzeln ansteuerbaren und teilweise schwenkbaren Düsen sowie eine akustische Temperaturmessung angenommen. Für das SCR-Verfahren wurden neben dem Katalysator mit der Ammoniakwassereindüsung der Wärmetauscher und die Wiederaufheizung mit Dampf berücksichtigt. In Tabelle 22 sind die Investitionskosten, Betriebsmittelkosten und Jahresgesamtkosten aufgeführt.

Tabelle 22: Kostenaufstellung für SNCR- und SCR-Entstickungsanlagen (Siehe Text) [Kersting].

Investitionskosten		SNCR	SCR
Lager	EUR	540.000	540.000
Entstickungsanlage	EUR	470.000	2.520.000
Summe	EUR	1.010.000	3.060.000
Betriebsmittelkosten		SNCR	SCR
Ammoniakwasser	EUR/Jahr	177.000	67.000
Deionat	EUR/Jahr	22.000	-
elektrische Energie	EUR/Jahr	28.000	396.000
Summe	EUR/Jahr	227.000	463.000
Jahresgesamtkosten		SNCR	SCR
Betriebsmittel	EUR/Jahr	227.000	463.000
Instandhaltung	EUR/Jahr	30.000	92.000
Kapitalkosten	EUR/Jahr	104.000	315.000
Summe		361.000	870.000

Entsprechend Tabelle 22 ist der Betrieb einer SCR-Anlage pro Jahr mehr als doppelt so teuer wie ein SNCR-Verfahren. Andere Berechnungen in [Heide], die ebenfalls zu einem Betriebskostenvergleich für die betrachteten Entstickungsverfahren führen, zeigen für die Jahresgesamtkosten ähnliche Ergebnisse wie in Tabelle 22. Für eine kleinere Abfallverbrennungsanlage mit einem jährlichen Abfalldurchsatz von 117.000 Tonnen erfordert bei vergleichbaren Annahmen der Betrieb der SNCR-Anlage 154.830 EUR/Jahr, für das SCR-Verfahren wären 395.460 EUR/Jahr notwendig.

Außerdem ist zu beachten, dass sich die Verschärfung von Grenzwerten nicht nur auf die verfahrenstechnischen Anlagen zur Emissionsminderung auswirkt, sondern auch auf die Messtechnik zur Überwachung der Emissionen. Für die Eignungsprüfung und Kalibrierung der Messeinrichtungen sowie für die Durchführung der Messungen und die dazugehörige Qualitätssicherung existieren zahlreiche Vorschriften (Siehe z.B. [DIN EN 14181] [DIN EN 15259] [DIN EN 15267] [VDI 3950]). Folglich können an technischen Anlagen, wo die schärferen Grenzwerte bereits erfüllt werden, Anpassungen im Bereich der Überwachungsmesstechnik erforderlich werden, wodurch die Kosten für die Rauchgasentstickung weiter steigen.

Nach groben Schätzungen belaufen sich die Kosten für die Herabsetzung der Grenzwerte in Deutschland auf etwa 50 Mio. EUR pro Jahr [Lahl-2].

6.4 Zusammenfassung zu Stickoxid-Minderungsverfahren

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die "Selective Non-Catalytic Reduction" (SNCR-Verfahren) und die "Selective Catalytic Reduction" (SCR-Verfahren) zur Minderung von Stickoxidemissionen beschrieben. Diese zwei Verfahren haben sich am Markt etabliert und sind an zahlreichen Kraftwerken und Abfallverbrennungsanlagen seit vielen Jahren in Betrieb. Aufgrund der langjährigen Erfahrungen von Anlagenbauern und Betreibern stehen somit zwei erprobte Technologien für die Minderung von Stickoxiden aus Feuerungsanlagen zur Verfügung.

Andere Technologien, wie beispielsweise das Aktivkoksverfahren werden im Vergleich zum SNCR- bzw. SCR-Verfahren nur sehr selten eingesetzt und wurden aus diesem Grund in den vorangegangenen Abschnitten nicht behandelt.

Aus der durchgeführten Beschreibung der beiden Verfahren zur Minderung von Stickoxidminderung in Verbindung mit den erwähnten Betriebsdaten lassen sich die Vor- und Nachteile der Verfahren zusammenfassen, die auch in der Literatur [Mayr] [BVT-WI] aufgeführt sind.

Für das SNCR-Verfahren sprechen die umweltneutralen Reaktionsprodukte (N_2 und Wasser), die problemlos an die Atmosphäre abgegeben werden können. Als weitere Vorteile sind ein geringer Platzbedarf, geringe Investitionskosten und eine einfache Betriebsführung zu nennen. Außerdem ist ein SNCR-Verfahren an Altanlagen leicht nachzurüsten.

Gegen den Einsatz der SNCR-Technologie spricht der relativ hohe Verbrauch des Reduktionsmittels aufgrund der überstöchiometrischen Zugabe bei gleichzeitig relativ geringem Reduktionsgrad. Außerdem kann die überstöchiometrische Reduktionsmittelzugabe eine Kontamination der Flugasche und des Rauchgases mit NH_3 verursachen. Folglich können bei der Flugascheentsorgung oder im Betrieb der nachfolgenden Rauchgasreinigungsstufen verschiedene Probleme entstehen, insbesondere durch Bildung und Ablagerung von Ammoniumsalzen.

Als Vorteile für den Einsatz des SCR-Verfahrens sind eine relativ einfache Verfahrenstechnik und Konstruktion zu nennen, die mit einer großen Verfügbarkeit und geringen Wartungskosten verbunden sind. Auch bei diesem Verfahren entstehen mit N_2 und Wasser umweltneutrale Reaktionsprodukte. Durch einen geringen Reduktionsmittelverbrauch wird eine hohe Effizienz erreicht.

Zu den großen Nachteilen des SCR-Verfahrens gehören die hohen Investitionen. Der hohe apparative Aufwand mit Katalysatormodulen und Wärmetauschsystemen erfordert im Vergleich zu einer SNCR-Anlage ein deutlich höheres Investitionsvolumen.

An Abfallverbrennungsanlagen, wo die SCR-Anlage überwiegend in der Low Dust Tail End-Schaltung installiert ist, führt die notwendige Wiederaufheizung zu einem hohen Energieverbrauch und damit zusätzlich zu hohen Betriebskosten.

Ein weiteres Manko ist der große Platzbedarf für die aufwändigere SCR-Technik, denn im Gegensatz zur SNCR-Technologie stellt das SCR-Verfahren an Abfallverbrennungsanlagen eine eigenständige Rauchgasreinigungsstufe entsprechend einem Wäschersystem oder einem Staubabscheider dar. Der Platzbedarf ist nach Angaben in [Dittrich] für das SCR-Verfahren drei- bis viermal größer.

Durch die aufgezeigten Vor- und Nachteile ist mit Blick auf eine großtechnische Anwendung der weit verbreitete Einsatz des SCR-Verfahrens in High Dust Schaltung an Kraftwerken nachvollziehbar. Bedingt durch die Größe der Kraftwerke und die damit verbundenen Volumenströme werden mit einem stöchiometrischen und damit ressourcensparenden Einsatz des Reduktionsmittels NH_3 sowie das Vermeiden einer aufwändigen Wiederaufheizung der Rauchgase wichtige Vorteile für einen wirtschaftlichen Betrieb kombiniert.

Für Abfallverbrennungsanlagen ergibt sich dagegen kein eindeutiges Ergebnis. Das SCR-Verfahren ist zwar aufgrund des stöchiometrischen Einsatzes des Reduktionsmittels ressourcensparend, durch die notwendige Wiederaufheizung der Rauchgase gleichzeitig nicht energieeffizient. Das SNCR-Verfahren ist dagegen energieeffizient (keine Wiederaufheizung), auf der anderen Seite aufgrund des hohen Überschusses an Reduktionsmittel nicht ressourcenschonend.

Für Abfallverbrennungsanlagen ist nach [VDI 3460] bei der Auswahl des Verfahrens zur Minderung der Stickoxidemissionen eine Beurteilung unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen (Emissionsgrenzwert, Neu-/Altanlage, Platzverhältnisse, Abgasreinigung mit/ohne Abwasserabgabe, Entsorgung der Reaktions-/Restprodukte) notwendig.

Dagegen wird im aktuellen BVT-Merkblatt für die Abfallverbrennung [BVT-WI] allgemein das SCR-Verfahren als "Beste Verfügbare Technik" betrachtet, wenn die NO_x-Konzentrationen im Rauchgas hoch sind und niedrige Emissionskonzentrationen gefordert werden.

An anderer Stelle [Lahl-3] wird vor dem Hintergrund von neuen Emissionsgrenzwerten im Zusammenhang mit der NEC-Richtlinie (Siehe Abschnitt 3.1.5, S. 10) für Neuinvestitionen bei Abfallverbrennungsanlagen der Einsatz der SCR-Technik empfohlen.

Aus dem vorangegangenen Text in diesem Kapitel ergibt sich, dass eine endgültige Auswahl eines möglichst effizienten Verfahrens für die Stickoxidminderung an Abfallverbrennungsanlagen hinsichtlich möglichst geringer Umweltauswirkungen ohne eine genauere Betrachtung nicht möglich ist. In diesem Zusammenhang zählen zu den geringen Umweltauswirkungen neben geringen Stickoxidemissionen auch eine hohe Energie- und Ressourceneffizienz des ausgewählten Verfahrens.

Für eine Entscheidung sind u.a. genauere Informationen über den Beitrag der Stickoxidemissionen aus der Abfallverbrennung zu den gesamten Stickoxidemissionen aus allen relevanten Quellen notwendig. Diese Informationen werden im folgenden Kapitel bereitgestellt.

7 Detailliertere und ökologische Betrachtung von Stickoxidemissionen aus Abfallverbrennungsanlagen

Für ein besseres Verständnis über die Bedeutung der NO_x-Emissionen aus Abfallverbrennungsanlagen werden in diesem Kapitel zuerst die bisherigen Entwicklungen der vergangenen Jahrzehnte kurz aufgezeigt. Anschließend wird auf den Anteil der Stickoxidemissionen aus Abfallverbrennungsanlagen an den gesamten Stickoxid-Emissionen eingegangen. Gegenstand des letzten Abschnitts in diesem Kapitel ist ein ökologischer Vergleich der verschiedenen Verfahren zur Stickoxidminderung an Abfallverbrennungsanlagen.

7.1 Entwicklungen in der Vergangenheit

Allgemein ist der Betrieb von Feuerungsanlagen zur Abfallverbrennung, Strom- bzw. Wärmeerzeugung oder für die Herstellung von Baustoffen wie beispielsweise Zement mit Emissionen in die Atmosphäre verbunden. Das wachsende Bewusstsein um den Klimaschutz hat dazu u.a. geführt, dass heute auch die Emissionen aus Kraftwerken als problematisch angesehen werden. Allerdings sind nicht Schadstoffe wie Schwermetalle oder Stickoxide Gegenstand dieser Diskussionen, sondern überwiegend das klimaschädliche Kohlendioxid (CO₂).

Im Zusammenhang mit der Abfallverbrennung bildete dagegen die Freisetzung von Schadstoffen, insbesondere die Emissionen von Dioxinen und Furanen, den Mittelpunkt vieler Debatten. Es steht außer Frage, dass Abfallverbrennungsanlagen in den 60er und 70er Jahren aufgrund einer schlechten feuerungstechnischen Regelung und einfacher Rauchgasreinigung sehr hohe Emissionen verursacht haben. In den 80er und 90er Jahren wurde mit immer weiter verschärften Emissionsgrenzwerten und entsprechenden Nachrüstungen ein wesentlich verbesserter Umweltstandard erreicht. Einen maßgeblichen Anteil an diesen Verbesserungen hat die 17. BImSchV [17. BImSchV] (Siehe Abschnitt 3.2.2).

Auf den immer weiter herabgesetzten Grenzwerten baut eine im Jahr 1993 publizierte Aussage des Beirats der Bundesärztekammer über die Bedeutung der Emissionen aus Abfallverbrennungsanlagen auf. Danach kommt es durch moderne Abfallverbrennungsanlagen mit einer weitergehenden Rauchgasreinigung entsprechend den Anforderungen der 17. BImSchV zu keinem nennenswerten Beitrag zur Umweltbelastung [BK].

In Tabelle 23 sind aktuelle Grenzwerte (ausgewählte Tagesmittelwerte) aus der 17. BImSchV den Anforderungen aus älteren Rechtsvorschriften gegenübergestellt.

Tabelle 23: Emissionsgrenzwerte (Tagesmittelwerte) von ausgewählten Schadstoffen für Abfallverbrennungsanlagen, angegeben in mg/Nm³.

Schadstoff	TA Luft 1976	TA Luft 1986	Europäische Gemeinschaft 1992	17. BImSchV 1990	17. BImSchV 2013
Quelle	[Stegemann]	[Stegemann]	[Stegemann]	[Stegemann]	[17. BImSchV]
Staub	100	30	30	10	5
SO ₂	-	100	300	50	50
HCl	100	50	50	10	10
HF	5	2	2	1	1
NO _x	-	500	-	200	150
Schwermet. (Cd, Hg, Tl)		0,2 (Cd, Hg, Tl)	0,2 (Cd, Hg, Tl)	0,05 (Hg) 0,05(Cd, Tl)	0,03 (Hg) 0,05(Cd, Tl)

Eine stetige Herabsetzung der Emissionsgrenzwerte erfordert in der Regel Veränderungen an den entsprechenden technischen Anlagen. Diese Änderungen reichen von Optimierungen der vorhandenen Verfahrenstechnik bis zu aufwändigen Erweiterungen durch neue oder zusätzliche Rauchgasreinigungsaggregate. Außerdem ist es meist sehr einfach, eine Emission um 90 % zu verringern, weitere 9 % erfordern durchaus mehr Aufwand als die ersten 90 % [Kielburger]. Diese Aussage kann mit dem Schema in Abbildung 13 verdeutlicht werden.

In Abbildung 13 ist schematisch eine Reihenschaltung von zwei identischen Abscheidungsstufen mit einem Abscheidegrad von 90 % dargestellt. Die Reihenschaltung ermöglicht es, 99 % der ursprünglichen Schadstoffmenge aus dem Rauchgas abzutrennen. Allerdings würden die identischen Abscheidestufen 1 und 2 eine unterschiedliche Effizienz aufweisen: Aufgrund der zehnfach höheren Abscheidemenge würde Abscheidestufe 1 auch eine zehnfach höhere Effizienz bei Energie- und Materialeinsatz aufweisen.

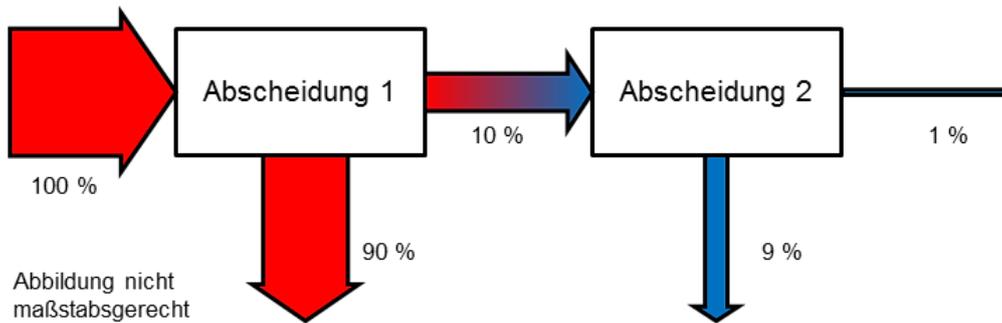


Abbildung 13: Schema zur Reihenschaltung von zwei Abscheidungsstufen zur Schadstoffabtrennung aus Rauchgasen.

Eine genauere Betrachtung der Rauchgasreinigung hinter Abfallverbrennungsanlagen zeigt, dass für deutlich unter den Grenzwerten der 17. BImSchV liegende Emissionskonzentrationen oft eine Reihenschaltung verschiedener Abscheideaggregate genutzt wurde. Ein Beispiel ist die Anlage am Standort Bielefeld, die ihren Betrieb im Jahr 1981 aufnahm [MVA B.H.]. Die Rauchgasreinigung bestand aus einem Elektrofilter zur Staubabscheidung und einem Wäschersystem zur Abscheidung der sauren Schadstoffe (überwiegend HCl und SO₂) [Thomé-K.-2]. In den 90er Jahren wurde die Rauchgasreinigungsanlage zur Einhaltung der Anforderungen der 17. BImSchV umfangreich umgebaut und erweitert [MVA B.H.][Lahl-4]. In Abbildung 14 ist die erweiterte Rauchgasreinigungsanlage schematisch dargestellt.

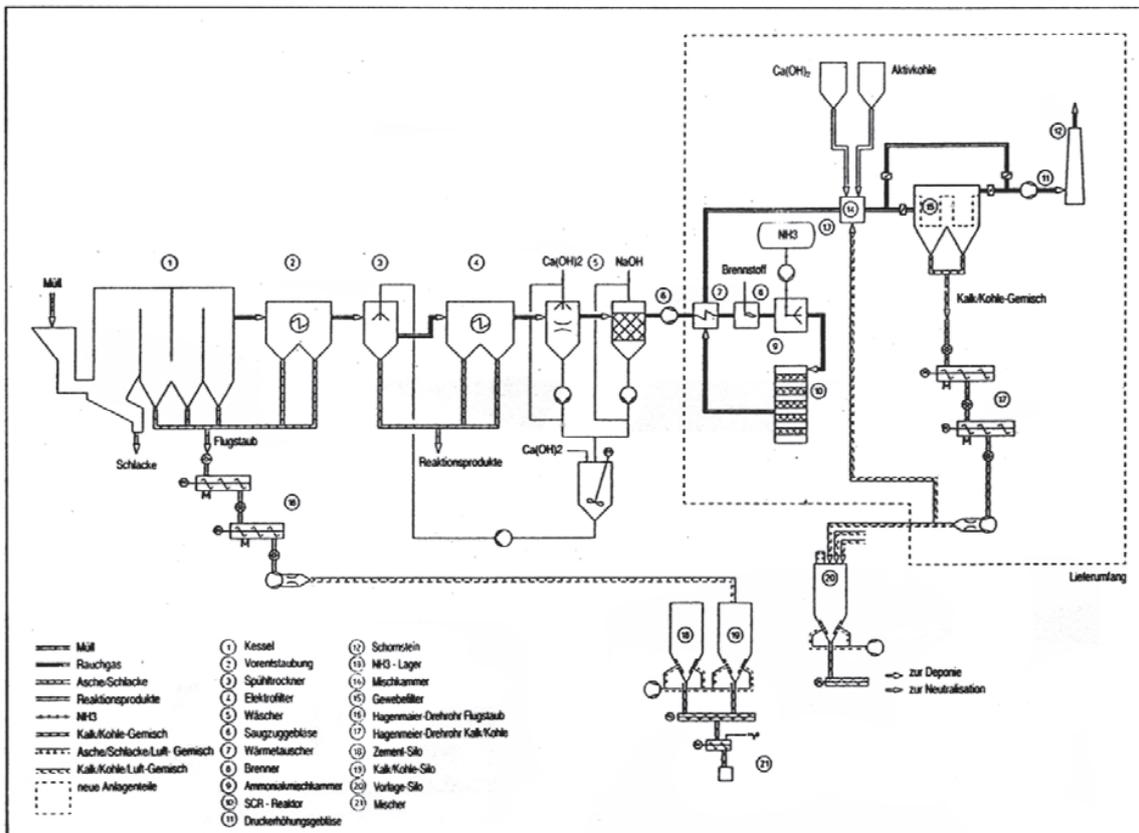


Abbildung 14: Rauchgasreinigungsanlage am Standort Bielefeld nach Anpassung an die 17. BImSchV [Lahl-4].

Die bisher aus drei Rauchgasreinigungsaggregaten (Elektrofilter, zwei Wäscher) bestehende Anlage am Standort Bielefeld umfasst nach dem Umbau entsprechend Abbildung 14 insgesamt 7 Stufen. Nach Austritt aus dem Kessel durchströmt das Rauchgas die folgenden Rauchgasreinigungsstufen: Elektrofilter, Sprühtrockner, Elektrofilter, zwei Wäscher, SCR-Anlage (Abbildung 14: "Katalysator") und abschließend ein Flugstromverfahren zur Feinreinigung (Abbildung 14: "Gewebefilter").

In den 90er Jahren wurden u.a. an den neuen Abfallverbrennungsanlagen in Köln und Burgkirchen Rauchgasreinigungsanlagen errichtet, die einen ähnlichen Umfang aufweisen. Am Standort Köln besteht die sechsstufige Rauchgasreinigungsanlage aus Sprühtrockner, Gewebefilter, zwei Wäschern, SCR-Anlage und Aktivkohlefilter [AVG Köln]. Zur Reinigung der Rauchgase am MHKW Burgkirchen wurden ein Elektrofilter, ein dreistufiger Wäscher, eine SCR-Anlage und abschließend ein Flugstromverfahren (Sechs Stufen) installiert [Englmaier]. Die Emissionen dieser Anlagen liegen ebenfalls deutlich unter den Vorgaben der 17. BImSchV.

Allerdings konnte in der Folgezeit die Akzeptanz von Abfallverbrennungsanlagen selbst durch die weitgehende Unterschreitung der Grenzwerte aus der 17. BImSchV, festgeschrieben in den Genehmigungsbescheiden der Abfallverbrennungsanlagen, nicht grundlegend verbessert werden.

Im Vergleich zu diesen älteren Abfallverbrennungsanlagen wurden später wesentlich einfachere Konfigurationen für die Reinigung der Rauchgase installiert. Aus wirtschaftlichen Gründen wurden die Anlagen nicht mehr für eine weitgehende Unterschreitung der Grenzwerte der 17. BImSchV ausgelegt, sondern nur für die sichere Einhaltung. In der Folge sanken die spezifischen Verbrennungspreise um ca. 50 % [Tabasaran].

Zu den Standorten mit diesen neueren Anlagen gehören u.a. Hannover (Lahe), Rothensee bei Magdeburg und Staßfurt. Die Abfallverbrennungsanlage in Hannover (Lahe), errichtet im Zeitraum 2002 bis 2005, weist hinter dem Kessel mit einem Sprühabsorber und einem Flugstromverfahren lediglich zwei Rauchgasreinigungsstufen auf. Die Abscheidung der Stickoxide erfolgt durch ein SNCR-Verfahren im Kessel [BKB Hannover] [EEW Hannover]. Eine ähnliche Rauchgasreinigungsanlage ist am MHKW Rothensee (Inbetriebnahme 2004) [Rothensee], am Standort Staßfurt (Inbetriebnahme 2007) [Fleschenberg] und am Ersatzbrennstoffkraftwerk in Heringen (Inbetriebnahme 2009) [Büchner] installiert.

Diese Entwicklungen werden auch bei NO_x-Emissionen von großtechnischen Abfallverbrennungsanlagen deutlich, die in Abbildung 15 vergleichend dargestellt sind.

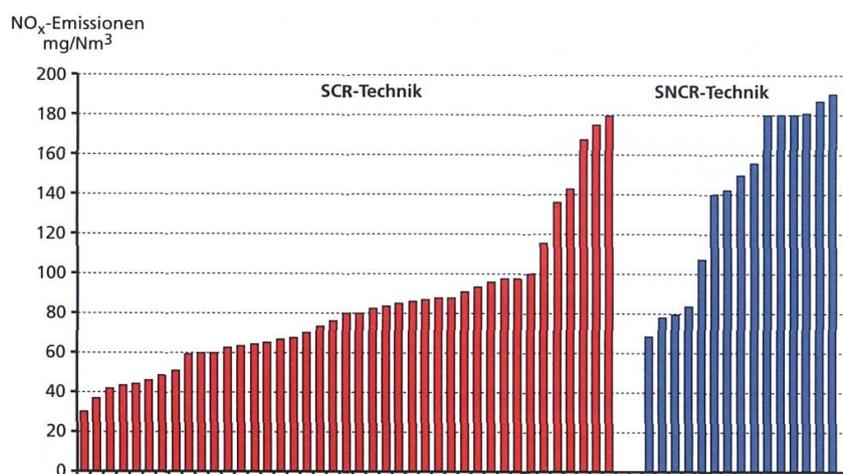


Abbildung 15: NO_x-Emissionen großtechnischer Abfallverbrennungsanlagen [UBA 16 08][Lahl-2][Lahl-3].

Aus Abbildung 15 geht hervor, dass die NO_x-Emissionen von Abfallverbrennungsanlagen einen sehr großen Schwankungsbereich aufweisen. Auf der einen Seite existieren Anlagen, die mit NO_x-Emissionen im Bereich um 180 mg/Nm³ die bisherigen Vorgaben der 17. BImSchV (Tagesmittelwert ehemals 200 mg/Nm³) sicher erfüllen. Andererseits ist entsprechend Abbildung 15 eine deutliche Unterschreitung der alten Vorgaben aus der 17. BImSchV, insbesondere bei Einsatz der SCR-Technik, problemlos möglich. Diese Minderungsmaßnahmen ermöglichen es heute, dass im gereinigten Rauchgas (Reingas) aus Abfallverbrennungsanlagen NO_x-Konzentrationen im Bereich um 40 mg/Nm³ erreicht werden können.

Diese technischen Möglichkeiten zur weitgehenden Unterschreitung der Emissionsgrenzwerte bei der Abfallverbrennung haben dazu geführt, dass die Emissionen aus Abfallverbrennungsanlagen bis heute Gegenstand von Auseinandersetzungen und politischen Aktivitäten geblieben sind. Im Fall der Stickoxide suggeriert der breite Konzentrationsbereich zwischen 40 und 180 mg/Nm³ für Stickoxide im Reingas von Abfallverbrennungsanlagen, dass eine weitere Herabsetzung der Grenzwerte eine große Entlastung für die Umwelt bringen würde.

In diesem Zusammenhang wird allerdings oft übersehen, dass in Abbildung 15 lediglich Emissionskonzentrationen aufgeführt sind, die keinen Rückschluss auf die in die Umwelt emittierten Stickoxidemengen gestatten. Aus diesem Grund werden im folgenden Abschnitt die aus Abfallverbrennungsanlagen in die Atmosphäre abgegebenen Stickoxidemengen mit den aus allen Bereichen (Industrie, Privathaushalte Verkehr) emittierten Stickoxidemengen verglichen.

7.2 Beitrag der Abfallverbrennung zu den Stickoxidemissionen

Für eine Bestimmung der aus deutschen Abfallverbrennungsanlagen emittierten Stickoxidemengen erscheint eine Auswertung der Einträge aus dem deutschen Schadstofffreisetzung- und -verbringungsregister möglich. Dieses Register wurde aufgrund der europäischen Verordnung über die Schaffung eines Europäischen Schadstofffreisetzung- und -verbringungsregisters [V 166 2006] eingerichtet. Die nationalen Rechtsgrundlagen wurden durch das Gesetz zur Ausführung des Protokolls über Schadstofffreisetzung- und -verbringungsregister [SchadRegG] geschaffen. Zuständig für die Einrichtung und Unterhaltung sowie die Weiterleitung der berichteten Daten an die EU ist das Umweltbundesamt in Dessau.

Der Zugang zum Schadstofffreisetzung- und -verbringungsregister ist öffentlich und kostenfrei über das Internet [thru.de] möglich, so dass sich die Einwohner über Schadstoffemissionen von Industriebetrieben in der Umgebung informieren können.

Eine Auswertung der in dem Register eingetragenen Daten zeigt allerdings, dass die beabsichtigte Ermittlung der Stickoxidemissionen aus Abfallverbrennungsanlagen nicht möglich ist. Bei kleineren Abfallverbrennungsanlagen liegen die Emissionen unter den sogenannten Schwellenwerten, so dass keine Daten im Register aufgeführt sind. Außerdem beziehen sich die Daten in dem Register nicht auf einzelne Anlagen bzw. Verbrennungslinien, sondern auf den gesamten Standort. Wird neben einer Abfallverbrennungsanlage noch ein Biomassekraftwerk betrieben, so werden die Emissionen der einzelnen Schadstoffe nur als Gesamtsumme für den Standort ausgewiesen.

Folglich müssen die Stickoxidemissionen aus den deutschen Abfallverbrennungsanlagen für die vorgesehene Bewertung berechnet werden. Der einfachste und gleichzeitig exakteste Ansatz führt über eine Bestimmung der jährlichen emittierten Stickoxidemengen der einzelnen Abfallverbrennungsanlagen und anschließende Summation über alle Standorte.

Die von einer Abfallverbrennungsanlage emittierte Stickoxidemenge lässt sich mathematisch relativ einfach aus den NO_x-Emissionskonzentrationen und Angaben zum Rauchgas-

volumenstrom errechnen. Während die NO_x-Emissionskonzentrationen den Emissionserklärungen der Abfallverbrennungsanlagen zu entnehmen sind, liegen in der Regel keine exakten Daten zu Rauchgasvolumenströmen und den entsprechenden Bezugszuständen (Normzustand, trocken, O₂-Gehalt) vor. Somit scheidet eine exakte Berechnung der Stickoxidemissionen auf Basis der Emissionen aus den einzelnen Abfallverbrennungsanlagen an der Datenverfügbarkeit.

Für einen Vergleich der Stickoxidemengen aus deutschen Abfallverbrennungsanlagen mit den insgesamt aus allen Bereichen emittierten Stickoxidemengen muss dementsprechend eine Abschätzung mit repräsentativen Mittelwerten herangezogen werden.

Für die Abschätzung der NO_x-Emissionen wird von den Abfallmengen ausgegangen, die in Abfallverbrennungsanlagen und Sekundärbrennstoffkraftwerken eingesetzt werden. Als jährliche Gesamtverbrennungskapazität der deutschen Abfallverbrennungsanlagen wird von 19,6 Mio. Tonnen ausgegangen, die zusätzliche Verbrennungskapazität der Sekundärbrennstoffkraftwerke (5,4 Mio. Tonnen/Jahr) wird [UBA-SBK] entnommen.

Das spezifische Rauchgasvolumen von Abfallverbrennungsanlagen wird mit 4500 bis 6000 m³/Tonne angegeben [BVT-WI], im Rahmen der Abschätzung erfolgt die Berechnung mit 5000 m³/Tonne.

Etwas schwieriger gestaltet sich die Bestimmung der durchschnittlichen NO_x-Konzentration, denn an großtechnischen Anlagen treten, wie in Abbildung 15 gezeigt, große Unterschiede auf. Um aus der Abschätzung sinnvolle Aussagen ableiten zu können, werden für die Abschätzung mehrere Szenarien betrachtet, die in Tabelle 24 aufgeführt sind. Die Ergebnisse der Abschätzung sind in Abbildung 16 (S. 50) dargestellt.

Tabelle 24: Szenarien für die Abschätzung der NO_x-Emissionen aus der Abfallverbrennung.

Szenario	NO _x -Konzentration im Reingas	Beschreibung
1	400 mg/m ³	keine Maßnahmen zur Stickoxidminderung
2	200 mg/m ³	bisheriger Tagesmittelwert der 17 BImSchV
3	150 mg/m ³	aktueller Tagesmittelwert der 17 BImSchV
4	100 mg/m ³	aktueller Jahresmittelwert der 17 BImSchV
5	50 mg/m ³	sehr niedrige Emissionen

Nach Abbildung 16 würden die deutschen Abfallverbrennungsanlagen und Sekundärbrennstoffkraftwerke zusammen ca. 50.000 Tonnen NO_x pro Jahr emittieren, wenn keine Maßnahmen zur Stickoxidminderung durchgeführt würden. Bei Konzentrationen im Reingas von 200 mg/m³ entsprechend dem alten Tagesmittelgrenzwert aus der 17. BImSchV würden ca. 25.000 Tonnen NO_x in die Atmosphäre gelangen; die Herabsetzung des Tagesmittelwerts auf 150 mg/m³ in der aktuellen Fassung der 17. BImSchV würde zu einer Abnahme auf ca. 19.000 Tonnen führen. Bewegt sich die Reingaskonzentration in einem Bereich zwischen 50 und 100 mg/m³, so würden jährlich insgesamt ca. 6000 bis 12.000 Tonnen NO_x aus den Abfallverbrennungsanlagen und Sekundärbrennstoffkraftwerken emittiert.

Für eine genauere Festlegung der realen NO_x-Emissionen aus der Abfallverbrennung können ergänzend die Angaben aus einer Studie von 2002 [Dehoust] herangezogen werden. Danach beträgt die mittlere NO_x-Konzentration von Abfallverbrennungsanlagen 94,09 mg/m³.

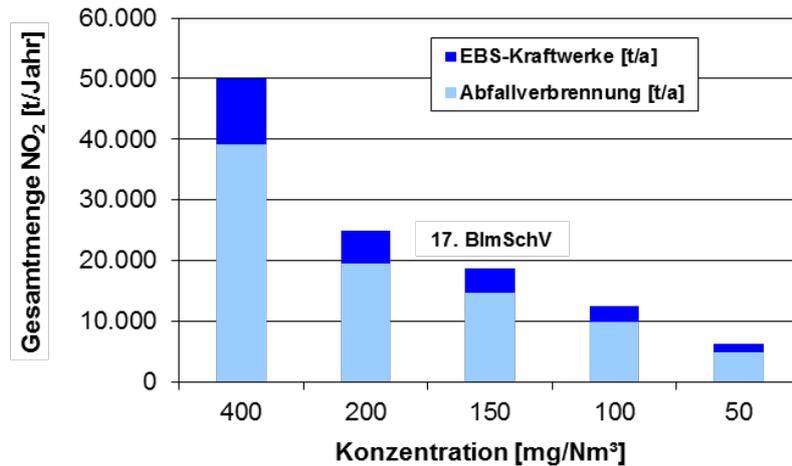


Abbildung 16: NO_x-Gesamtemissionen aus Abfallverbrennungsanlagen und EBS-Kraftwerken als Funktion der NO_x-Konzentration im Reingas.

Der Trend zu einfacheren und wirtschaftlicheren Rauchgasreinigungsanlagen führte in den letzten Jahren zu einer verstärkten Nutzung der SNCR-Technik mit etwas höheren NO_x-Emissionen. Bezogen auf das Jahr 2010 findet man in [Simon, F.G.] für die NO_x-Emissionen aus 57 Abfallverbrennungsanlagen einen Mittelwert von etwas über 100 mg/Nm³; für 6 Sekundärbrennstoffkraftwerke werden ca. 175 mg/Nm³ als Mittelwert erwähnt.

Somit ist heute davon auszugehen, dass die deutschen Abfallverbrennungsanlagen und Sekundärbrennstoffkraftwerke insgesamt zwischen 10.000 und 20.000 Tonnen NO_x pro Jahr emittieren.

Für einen Vergleich dieser Schadstoffmenge mit den NO_x-Gesamtemissionen aus allen Industriesektoren und dem privaten Bereich werden Angaben vom Umweltbundesamt herangezogen. Eine ausführliche Zusammenstellung mit Daten seit 1990, aufgeschlüsselt nach Sektoren, findet man in [UBA-Daten1]. In Tabelle 25 sind die größten Beiträge zu den NO_x-Emissionen in Deutschland aufgeführt; für weitere Details und genauere Erläuterungen zu den einzelnen Daten wird auf die Originalquelle [UBA-Daten1] verwiesen.

Tabelle 25: NO_x-Emissionen ausgewählter Sektoren [UBA-Daten1] (Siehe Text).

Emissionssektor	NO _x -Emissionen [Tonnen]
Energiewirtschaft	325.020
Verarbeitendes Gewerbe	86.460
Verkehr	538.230
davon Straßenverkehr	480.700
Übrige Feuerungsanlagen	125.480
davon Gewerbe, Dienstleistung	21.750
davon Haushalte	59.980
Industrieprozesse	88.480
Landwirtschaft	112.350

Für das Jahr 2011 wird in [UBA-Daten1] eine NO_x-Gesamtemissionen von 1.288.300 Tonnen mitgeteilt. Diese Angabe ist außerdem in [UBA CC 08 13] zu finden. Die größten Anteile an den Gesamtemissionen haben der Verkehrssektor und die Energiewirtschaft mit 538.230 bzw. 325.020 Tonnen pro Jahr.

Im Vergleich haben Abfallverbrennungsanlagen und Sekundärbrennstoffkraftwerke an den jährlichen NO_x-Emissionen nur einen geringen Anteil. Der im Rahmen einer Abschätzung ermittelte Mengenbereich zwischen jährlich 10.000 und 20.000 Tonnen entspricht lediglich 0,8 bis 1,6 % der gesamten NO_x-Emissionen. Interessant ist in diesem Zusammenhang außerdem, dass die deutschen Abfallverbrennungsanlagen und Sekundärbrennstoffkraftwerke bei Verzicht auf Minderungsmaßnahmen lediglich 3 bis 4 % der gesamten NO_x-Emissionen an die Atmosphäre abgeben würden.

Die durchgeführte Abschätzung zeigt, dass der Beitrag der Abfallverbrennungsanlagen und Sekundärbrennstoffkraftwerke zu den in Deutschland entstehenden NO_x-Gesamtemissionen sehr gering ist.

Dieses Ergebnis entspricht den Aussagen älterer Arbeiten, in denen etwas geringere Beiträge der thermischen Abfallbehandlung an den Gesamtemissionen erwähnt werden. Nach [Löschau] beträgt der Beitrag der Abfallverbrennungsanlagen zu den Gesamtemissionen 0,7 %; allerdings wurden Sekundärbrennstoffkraftwerke noch nicht berücksichtigt. Von Reimann [Reimann] wird 1989 für die Abfallverbrennungsanlagen ein Anteil von ca. 1 % mitgeteilt. Zu der Zeit wurden ca. 9,2 Mio. Tonnen Abfall in 48 Anlagen verbrannt [UBA-MVA1], aber die 17. BImSchV und deren Grenzwerte existierten noch nicht. In einer noch älteren Abschätzung [Reimer] wird für die Abfallverbrennung, bezogen auf 45 Anlagen mit einer Gesamtkapazität von 9 Mio. Tonnen Abfall pro Jahr, ein Anteil von 0,72 % an den gesamten Stickoxidemissionen errechnet. Auf den geringen Anteil der Abfallverbrennung an den Gesamtemissionen wird auch in [Huber] [Schmitt-T.] [Vehlow] und [Vogg] hingewiesen.

Ausgehend von den genannten Zahlen ist davon auszugehen, dass eine weitere Reduzierung der NO_x-Emissionen aus dem Bereich der thermischen Abfallbehandlung nicht zu nachweisbaren Verbesserungen beim Umweltschutz führt.

7.3 Ökologischer Vergleich der Entstickungsverfahren

Allgemein sind Umweltschutzmaßnahmen wie die Rauchgasreinigung an technischen Feuerungsanlagen mit einem zusätzlichen Aufwand verbunden, der neben zusätzlicher Anlagentechnik und Bedarf an Hilfsstoffen auch einen höheren Energieverbrauch umfasst. Dieser Aufwand steigt mit der Leistungsfähigkeit der Rauchgasreinigungsanlage, d.h. mit niedrigeren Emissionsgrenzwerten. Folglich müssen anspruchsvollere Emissionsgrenzwerte heute auch unter Berücksichtigung der Energie- und Ressourceneffizienz betrachtet werden.

Vor diesem Hintergrund werden im Zusammenhang mit den Stickoxidgrenzwerten bei der Abfallverbrennung die eingesetzten Minderungstechnologien verglichen. Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 6 werden in dem Vergleich das SNCR- und das SCR-Verfahren berücksichtigt, die sich im Bereich der Abfallverbrennung etabliert haben.

Mit Hilfe des relativ einfachen und kostengünstigen SNCR-Verfahrens, das insbesondere an neueren Abfallverbrennungsanlagen Verwendung findet, werden Stickoxide bereits im Feuerraum reduziert. Die bisher geforderten Grenzwerte können problemlos eingehalten werden. Das aufwändige SCR-Verfahren stellt eine eigenständige Stufe in der dem Kessel nachgeschalteten Rauchgasreinigungsanlage dar, bei dem die Stickoxide mit Hilfe eines Katalysators reduziert werden. Die Anwendung des SCR-Verfahrens wird bei niedrigen Emissionsgrenzwerten oder bei Anlagenneubauten empfohlen (Siehe Abschnitt 6.3).

Für einen ersten Vergleich des SNCR-Verfahrens mit dem SCR-Verfahren hinsichtlich des Energiebedarfs bietet sich der Kumulative Energieaufwand (KEA) an, der in einer VDI-

Richtlinie [VDI 4600] definiert ist. Der KEA erfasst den gesamten Primärenergieverbrauch, der für die Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines Produkts (bzw. Dienstleistung) notwendig ist; d.h. der gesamte Lebensweg wird erfasst.

Zur Berechnung des KEA stehen heute umfangreiche Softwaresysteme und Datenbanken zur Verfügung. Für den durchgeführten Vergleich der beiden Entstickungsverfahren wurde das Softwaresystem Umberto 5.5 benutzt; die erforderlichen Basisdaten für die Vorketten wie beispielsweise der Bereitstellung von Aggregaten oder elektrischer Energie wurden der Datenbank ecoinvent 1.3 entnommen. Ergänzend wurden zur Modellierung des SNCR- und SCR-Verfahrens Literaturdaten herangezogen.

In den erstellten Modellen für die beiden betrachteten Entstickungsverfahren wurden das Einbringen der Ammoniaklösung in den Rauchgasstrom, der Katalysator, der Wärmetauscher (Rauchgas/Rauchgas) und die mit Erdgas betriebene Rauchgasaufheizung berücksichtigt (Vergl. Abbildung 9, S. 35 und Abbildung 10 S. 38). Zusätzliche Veränderungen im Rauchgasstrom durch Volumenveränderung oder Druckverluste wurden durch eine Modellierung des Saugzuggebläses erfasst. Nicht berücksichtigt wurden eine eventuell vorliegende Ammoniakbelastung der Flugasche (Schlupf, nur bei SNCR) oder eine mögliche Abscheidung von Dioxinen (nur bei SCR). Als Vergleichselement wird der Umsatz einer bestimmten NO_x-Menge im Rauchgas, d.h. die Minderung einer entsprechenden NO_x-Menge (Mg NO_x) angesetzt. [Walk-1]

Die Ergebnisse aus den Berechnungen sind in Abbildung 17 als spezifischer Kumulierter Energieaufwand in Abhängigkeit von dem angestrebten Emissionsgrenzwert dargestellt.

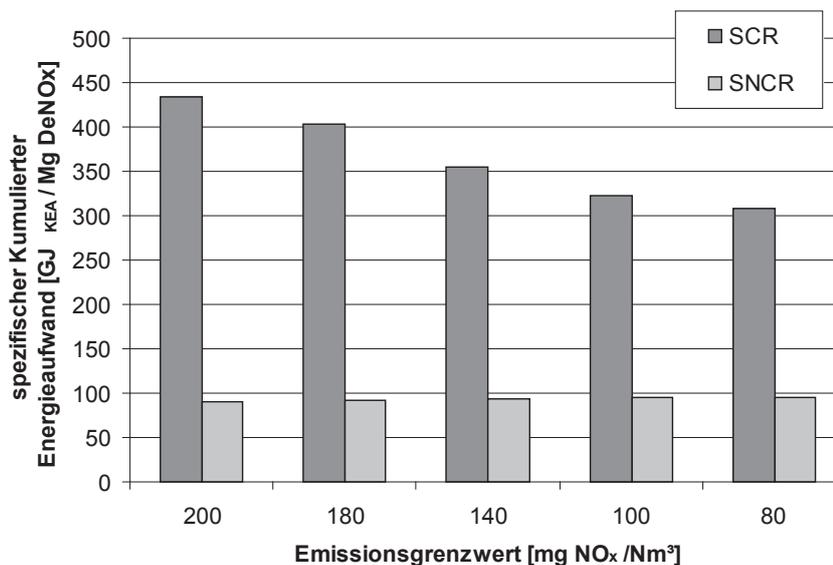


Abbildung 17: Kumulierter Energieaufwand, bezogen auf die Entstickungsleistung, in Abhängigkeit verschiedener Emissionsgrenzwerte [Walk-1] [Walk-2].

Abbildung 17 zeigt, dass der spezifische Kumulierte Energieaufwand im Fall des SCR-Verfahrens für alle berechneten Reingaskonzentrationen deutlich höher ausfällt als bei Einsatz der SNCR-Technik. Der errechnete spezifische KEA ist für das SCR-Verfahren drei- bis viermal höher als für das SNCR-Verfahren. Eine zusätzliche Abschätzung zeigte, dass der große Unterschied zwischen den beiden Verfahren überwiegend in der notwendigen Wiederaufheizung für das Rauchgas im Fall des SCR-Verfahrens begründet ist [Walk-1].

Entsprechend Abbildung 17 steigt im Fall des SNCR-Verfahrens der spezifische Kumulierte Energieaufwand mit abnehmenden Emissionsgrenzwerten geringfügig an, denn für das Erreichen geringerer Emissionsgrenzwerte wird ein immer höherer Neutralisationsmittelüberschuss benötigt. Dagegen sinkt der spezifische KEA für das SCR-Verfahren mit abnehmenden Emissionsgrenzwerten, denn an der relativ aufwändigen Verfahrenstechnik und der Aufheizung des Rauchgases ändert sich nichts.

Mit einer Betrachtung des Kumulierten Energieaufwands ist aufgrund seiner Definition ein detaillierter Vergleich der beiden Verfahren zur Minderung von Stickoxidemissionen unter Berücksichtigung ökologischer Aspekte allerdings nicht möglich.

Einen Ansatz für einen ökobilanziellen Vergleich bietet die Ecoindicator 99-Methode [Geoedekoop], die ursprünglich für das niederländische Umweltministerium entwickelt wurde, um eine umweltverträgliche Produktgestaltung zu bewerten. Bei dieser Methode werden drei unterschiedliche Umweltschadenskategorien berücksichtigt, die auch als Schutzgüter bezeichnet werden: Menschliche Gesundheit, Qualität der Ökosysteme und Ressourcen. Als Ergebnis liefert die Ecoindicator 99-Methode eine Punktzahl in Form einer aggregierten Kennzahl (Ecoindikator 99 Punkte). Die Belastung der Umwelt durch ein Produkt oder eine Dienstleistung steigt mit zunehmender Ecoindicator 99-Punktzahl; geringe Punktzahlen stehen für kleine Umweltbelastungen.

Als Basis für die Bewertung mit Hilfe der Ecoindicator 99-Methode wurden die gleichen Daten, Modelle und Softwareprogramme herangezogen, die für den Vergleich mit dem spezifischen Kumulierten Energieaufwand genutzt wurden. Die Ergebnisse der Berechnungen für das SNCR- und das SCR-Verfahren für 100 bzw. 200 mg NO_x als Grenzwerte sind in Abbildung 18 dargestellt.

Zu beachten ist, dass bei der Ecoindicator 99-Methode das ökologische Bewertungsergebnis entscheidend von der Gewichtung der drei Schutzgüter abhängt. Aus diesem Grund werden in Abbildung 18 keine Ecoindicator-Gesamtpunktzahlen dargestellt, sondern die nach den Schutzgütern aufgeschlüsselten Resultate.

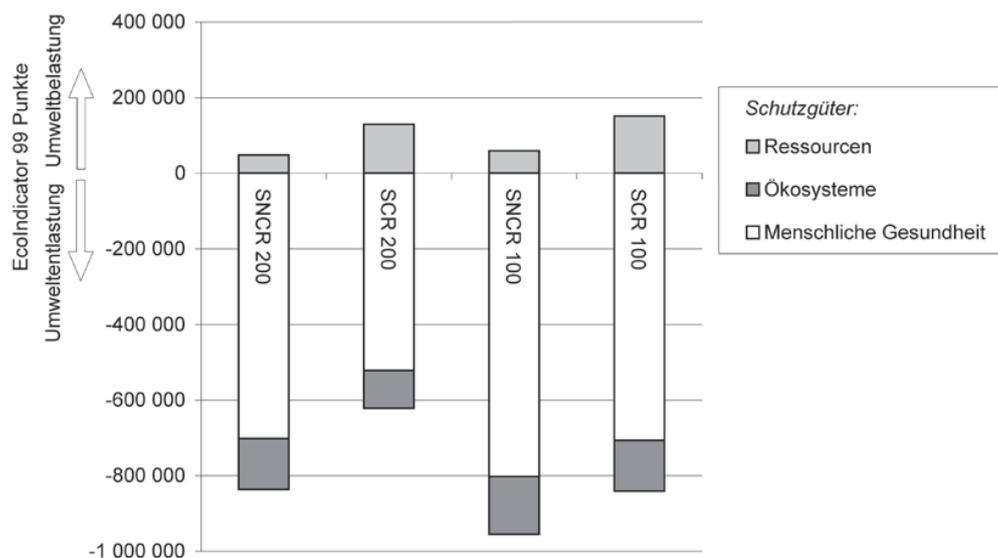


Abbildung 18: Ökologischer Vergleich der beiden Entstickungsverfahren nach Ecoindicator 99-Methode (ohne Gewichtung) [Walk-3].

Aus Abbildung 18 ist zu entnehmen, dass es durch die Entstickungsmaßnahmen an Abfallverbrennungsanlagen in den vier betrachteten Fällen zu einer Entlastung der Umwelt kommt. Die Umweltbelastungen der Entstickungsverfahren, bedingt durch die Nutzung von Ressourcen, den Energieeinsatz und die auftretenden Emissionen in den Vorketten, sind wesentlich geringer als die Umweltentlastung durch die verminderten Stickoxidemissionen aus Abfallverbrennungsanlagen. Außerdem zeigt der Vergleich in Abbildung 18, dass analog zum spezifischen Kumulierten Energieaufwand das SCR-Verfahren einen höheren Ressourcenverbrauch aufweist.

Als günstigste Variante der vier betrachteten Fälle weisen die Ergebnisse des Vergleiches entsprechend Abbildung 18 das SNCR-Verfahren mit einem Emissionsgrenzwert von 100 mg/Nm^3 mit einer Umweltentlastung im Bereich um 900.000 Ecoindicator-Punkten aus. Hier ist die Umweltbelastung durch den Ressourcenverbrauch gering und gleichzeitig die Umweltentlastung durch den Schutz der Ökosysteme und der menschlichen Gesundheit relativ groß. Allerdings wird auch hier eine mögliche Kontamination der Rückstände aus der Rauchgasreinigung mit Ammoniak durch Schlupf des Reduktionsmittels nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse des SCR-Verfahrens hängen insbesondere von der technischen Lösung der Rauchgasaufheizung ab.

7.4 Zusammenfassung zur ökologischen Betrachtung

Aus den vorangegangenen Abschnitten ergibt sich, dass die Stickoxidemissionen aus deutschen Abfallverbrennungsanlagen nur einen sehr geringen Anteil an den gesamten Stickoxidemissionen aufweisen. Der Anteil liegt lediglich bei 0,8 bis 1,6 %, so dass weitere Minderungen durch niedrigere Grenzwerte aus nationaler Sicht keine nachweisbare Verbesserung beim Umweltschutz in Form geringerer Schadstoffkonzentrationen in der Umgebungsluft erwarten lassen.

Für lokale Umweltwirkungen der Stickoxide, insbesondere Sommersmog, sind gegenüber bodennahen Emissionsquellen wie dem Autoverkehr die hohen weit streuenden Emissionsquellen der Abfallverbrennungsanlagen i.d.R. von untergeordneter Bedeutung. Von den 510 beim Umweltbundesamt erfassten Stickoxidmessstellen sind im 20 %-Quantil der höchsten Immissionswerte alle Messstellen als verkehrsbedingt klassifiziert, keine einzige als Hintergrundmessstelle oder Messpunkt für industriebedingte Immissionen [UBA-Daten2].

Außerdem haben Vergleiche der an Abfallverbrennungsanlagen im technischen Maßstab eingesetzten Entstickungsverfahren ergeben, dass die SNCR-Technologie Vorteile gegenüber dem SCR-Verfahren aufweist. Das SNCR-Verfahren erfordert einen geringeren Kumulierten Energieaufwand (KEA) und zeigt eine größere Umweltentlastung bei einem ökologischen Vergleich mit der Ecoindicator 99-Methode

Diese Ergebnisse führen in Verbindung mit den Ausführungen zu den Minderungsverfahren für Stickoxide in den Abschnitten 6.1 bis 6.3 zu der Erkenntnis, dass die oben im Text erwähnte Betrachtung der SCR-Technologie als "Beste Verfügbare Technik" im aktuellen BVT-Merkblatt für die Abfallverbrennung nicht nachvollziehbar ist.

Die SCR-Technologie an Abfallverbrennungsanlagen in Low Dust Tail End-Schaltung erweist sich im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen als kosten- und energieintensiv. Außerdem ist der Beitrag durch weiter abgesenkte Stickoxidemissionen zum Umweltschutz gering.

8 Vorschlag für eine effizientere Entstickung an Abfallverbrennungsanlagen

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die "Selective Non-Catalytic Reduction" (SNCR-Verfahren) und die "Selective Catalytic Reduction" (SCR-Verfahren) als etablierte Technologien für die Minderung von Stickoxiden an Abfallverbrennungsanlagen vorgestellt und verglichen.

Als Ergebnis ist festzustellen, dass es vor dem Hintergrund der aktuellen Diskussionen über effiziente Energienutzung und Ressourcenschonung kein optimales Verfahren für Abfallverbrennungsanlagen zur Minderung von Stickoxidemissionen gibt. Das SNCR-Verfahren weist einen überstöchiometrischen Reduktionsmittelverbrauch und somit einen erhöhten Ressourcenverbrauch auf. Im Fall des SCR-Verfahrens führt insbesondere die notwendige Wiederaufheizung der Rauchgase bei der an Abfallverbrennungsanlagen üblichen Low Dust Tail End-Schaltung zu einem relativ hohen Energiebedarf.

Somit entsteht die Frage, wie im Bereich der Abfallverbrennung neue Wege beschritten werden können, um mit möglichst geringen Kosten, einem niedrigen Ressourcenaufwand und geringem Energiebedarf einen möglichst geringen Eintrag von Stickoxiden in die Umwelt zu erreichen.

Nützlich ist im Zusammenhang mit dieser Fragestellung eine Betrachtung der Stickoxideminderung an großen Kraftwerken zur Stromerzeugung, die auf europäischer Ebene ebenfalls durch die IER geregelt ist. In diesem Bereich hat sich die SCR-Technologie durchgesetzt, denn aufgrund der Rauchgaseigenschaften kann bei Kraftwerken das SCR-Verfahren mit dem Katalysator direkt hinter dem Kessel installiert werden. An dieser Stelle liegen die Rauchgastemperaturen in dem für den Betrieb des SCR-Katalysators erforderlichen Bereich, so dass auf eine Wiederaufheizung und ergänzende Wärmetauscher verzichtet werden kann. Gleichzeitig kommt das SCR-Verfahren ohne einen überstöchiometrischen Reduktionsmittelverbrauch aus. Folglich stellt das SCR-Verfahren an Kraftwerken im Vergleich zu Maßnahmen an Abfallverbrennungsanlagen einen effizienteren und kostengünstigeren Weg zur Minderung von Stickoxidemissionen dar.

Vor diesem Hintergrund erscheint eine möglichst effiziente Minderung von Stickoxidemissionen an Abfallverbrennungsanlagen eine Erweiterung des Ansatzes aus der europäischen Richtlinie über Industrieemissionen [R 2010 75] bzw. der abgelösten "Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung" (IVU-Richtlinie) [R 1996 61] sinnvoll. Entsprechend dieser europäischen Richtlinien ist als integrierter Umweltschutz bei Betrieb einer technischen Anlage der gleichzeitige Schutz der Umweltkompartimente Luft, Wasser und Boden aufzufassen. Dies bedeutet, dass beispielsweise die Minderung von Rauchgasemissionen nicht zu einem Schadstoffeintrag in das Grundwasser führen darf.

Im Rahmen einer Erweiterung des grundlegenden Ansatzes aus den europäischen Richtlinien würde der bisher anlagenbezogene Umweltschutz verstärkt an Klimaschutz, Energieeffizienz und Ressourcenschonung ausgerichtet, in dem Umweltschutzmaßnahmen anlagenübergreifend betrachtet werden. Durch diese Vorgehensweise würde der Betrachtungsraum oder Bilanzraum erweitert. Neue Umweltschutzmaßnahmen oder insbesondere zusätzlichen Maßnahmen für die Einhaltung von niedrigen Grenzwerten werden an den Anlagen durchgeführt, wo dies am effizientesten möglich ist.

Dieser Grundgedanke führt von der bisherigen, sektoralen Betrachtung, die sich u.a. aus den bisherigen Rechtsvorschriften ergeben hat (Siehe Abschnitt 3.3), zu einer sektorübergreifenden Betrachtung. In Abbildung 19 ist dieser Grundgedanke am Beispiel von Kraftwerken und Abfallverbrennungsanlagen schematisch dargestellt.

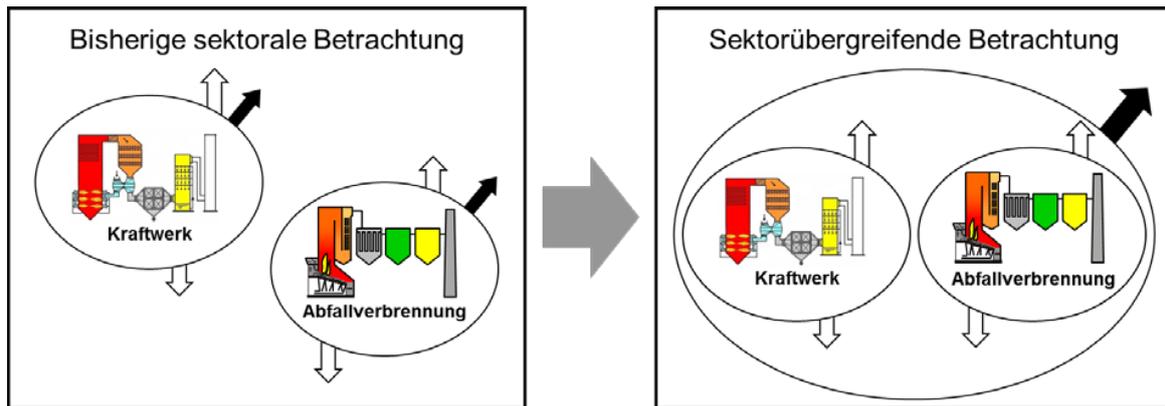


Abbildung 19: Veränderungen durch Übergang zu einem sektorübergreifenden Ansatz.

In Abbildung 19 symbolisieren die schwarzen Pfeile die Stickoxidemissionen, die weißen Pfeile stehen für die Emissionen anderer Schadstoffe (Schwefeldioxid usw.) sowie für die weiteren Rückstände aus dem Anlagenbetrieb (Schlacken, Abwässer usw.).

Im Fall der Stickoxidsminderung an Abfallverbrennungsanlagen könnten statt einer (weiteren) Absenkung von Emissionsgrenzwerten die effektivere SCR-Technik der Kraftwerke genutzt werden, in dem von den Kraftwerksbetreibern entsprechende und zu vergütende Dienstleistungen erbracht werden.

Dieser Weg erscheint insbesondere deshalb möglich, weil Abfallverbrennungsanlagen aufgrund ihrer wesentlich geringeren thermischen Leistung viel kleinere Rauchgasvolumenströme aufweisen als Kraftwerke. Folglich können äquivalente Stickoxidsmengen an Kraftwerken durch eine wesentlich geringere Absenkung der Emissionskonzentration abgedeckt werden als an Abfallverbrennungsanlagen.

Der vorgeschlagene, sektorübergreifende Ansatz ähnelt im Prinzip den im Kyoto-Protokoll der Vereinten Nationen zum Klimaschutz vorgesehen Möglichkeiten, durch Joint-Implementation- oder Clean-Development-Mechanism-Prozesse eine übergreifende Anrechnung von Klimaschutzmaßnahmen zu ermöglichen.

Neben den bereits erwähnten Vorteilen sind mit dem sektorübergreifenden Ansatz weitere Vorteile verbunden. Durch den geringeren Ressourcenbedarf bei der Stickoxidsminderung in Form von geringeren Reduktionsmittelverbräuchen würden weniger Transporte anfallen, verbunden mit einem reduzierten Handling von Gefahrstoffen. Außerdem könnten durch diesen sektorübergreifenden Ansatz bei älteren Anlagen eventuell notwendige Nachrüstungsmaßnahmen vermieden werden. Die verfahrenstechnischen und ressourcenbezogenen Aspekte sind mit finanziellen Vorteilen verbunden, die im Zeitalter der Globalisierung eine steigende Bedeutung erfahren.

Auf der anderen Seite existieren auch Nachteile. Der Verwaltungs- und Kontrollaufwand würde nicht nur für die Aufsichtsbehörden, sondern auch für die Betreiber der Abfallverbrennungsanlagen und Kraftwerke steigen. Aufgrund der heute zur Verfügung stehenden Informations- und Kommunikationstechnik und der bereits existierenden Berichtspflichten der Betreiber sollten aber relativ einfach umsetzbare Lösungen möglich sein.

Außerdem ist zu beachten, dass es neben Vorschriften für die Emissionen zusätzlich Limitierungen bei den Immissionen gibt, indem für ausgewählte Schadstoffe bestimmte Schadstoffkonzentrationen in der Umgebungsluft nicht überschritten werden dürfen.

Das größte Problem bei einer Umsetzung des sektorübergreifenden Ansatzes stellt allerdings die Definition von technischen Anlagen dar, die in der Richtlinie über Industrieemissionen [R 2010 75] in Artikel 3 (Begriffsbestimmungen) zu finden ist.

Danach beschreibt der Begriff "Anlage" *"eine ortsfeste technische Einheit, in der eine oder mehrere der in Anhang I oder Anhang VII Teil 1 genannten Tätigkeiten sowie andere unmittelbar damit verbundene Tätigkeiten am selben Standort durchgeführt werden, die mit den in den genannten Anhängen aufgeführten Tätigkeiten in einem technischen Zusammenhang stehen und die Auswirkungen auf die Emissionen und die Umweltverschmutzung haben können"*.

Eine ähnliche Definition existiert im deutschen Bundes-Immissionsschutzgesetz [BImSchG]. Nach § 3 Abs. 5 sind Anlagen *"1. Betriebsstätten und sonstige ortsfeste Einrichtungen, 2. Maschinen, Geräte und sonstige ortsveränderliche technische Einrichtungen sowie Fahrzeuge, ... , und 3. Grundstücke, auf denen Stoffe gelagert oder abgelagert oder Arbeiten durchgeführt werden, die Emissionen verursachen können, ausgenommen öffentliche Verkehrswege"*.

Dementsprechend ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt der sektorübergreifende Ansatz nicht umsetzbar, obwohl auf der anderen Seite die ebenfalls in [R 2010 75] und [BImSchG] enthaltenen Betreiberpflichten besser erfüllt werden könnten.

Zu beachten ist, dass der hier vorgeschlagene Ansatz, auch wenn derzeit aus rechtlichen Gründen keine Anwendung absehbar ist, nicht auf Stickoxidemissionen aus den Sektoren Abfallverbrennung und Kraftwerke zur Stromerzeugung begrenzt ist. Analoge Überlegungen und Ansätze sind für weitere Schadstoffe und Industriesektoren möglich. Beispielsweise könnte eine Übertragung von verstärkten Minderungen bei Emissionen von Schwefeldioxid (SO₂) von Abfallverbrennungsanlagen auf Kraftwerke sinnvoll sein. Die Rückstände aus der Rauchgasreinigung einer Abfallverbrennungsanlage werden in der Regel unter Tage abgelagert. In der Rauchgasreinigung der Kraftwerke wird dagegen Gips gewonnen, der in der Bauindustrie verwertet wird. Darüber hinaus bieten sich die Metallgewinnung oder die Herstellung von Basischemikalien als weitere Sektoren für den vorgeschlagenen Ansatz an.

9 Zusammenfassung

Im Bereich der Abfallverbrennung führen die Emissionen immer wieder zu Diskussionen. Einen aktuellen Grund stellen Anforderungen aus der neuen europäischen Richtlinie über Industrieemissionen dar. Ferner wird mit einem besseren Umweltschutzstandard, einer Gleichbehandlung der Abfallverbrennung mit anderen Industriesektoren und einer verbesserten Akzeptanz argumentiert. Die erforderliche Einhaltung der Anforderungen aus der Richtlinie über die nationalen Emissionshöchstmengen [R 2001 81] bildet ein weiteres Argument.

Allerdings darf nicht übersehen werden, dass es sich bei Umweltschutzmaßnahmen in der Regel um verfahrenstechnische Anlagen handelt, deren Bau und Betrieb Energie und Material, d.h. Ressourcen erfordert. Im Zusammenhang der Herausforderungen bei der Energie- und Rohstoffversorgung müssen zukünftig bei Umweltschutzmaßnahmen verstärkt der Aufwand und der Nutzen berücksichtigt werden.

Die vorliegende Arbeit zielt darauf ab, die Effizienz von Rauchgasreinigungsmaßnahmen bei der Abfallverbrennung genauer zu analysieren. Als Schadstoff wurden Stickoxide ausgewählt, denn diese Schadstoffe sind allgegenwärtig und werden u.a. bei der Stromerzeugung in Kraftwerken und vom Verkehrssektor in großen Mengen emittiert.

Rechtliche Grundlagen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden zunächst wichtige europäische und nationale Rechtsvorschriften vorgestellt, denn sie enthalten die vom Betreiber der technischen Anlagen einzuhaltenden Emissionsgrenzwerte und alle weiteren Vorgaben. Es wurde erwartungsgemäß deutlich, dass die nationalen Vorschriften in der heutigen Zeit sehr stark von Richtlinien der Europäischen Union (EU) mit drei unterschiedlichen Ansätzen beeinflusst werden. Neben Emissionsgrenzwerten für technische Anlagen und weiteren Betriebsvorschriften werden zur Gewährleistung der Luftqualität maximale Schadstoffkonzentrationen in der Umgebungsluft festgelegt. Die dritte Säule bildet die Festlegung von Emissionshöchstmengen für ausgewählte Schadstoffe, die von den Mitgliedsstaaten der EU jährlich emittiert werden dürfen.

Der Bau und Betrieb von großtechnischen Anlagen, von denen ein Gefahrenpotential für die Umwelt ausgeht, wird auf Europäischer Ebene durch die Richtlinie über Industrieemissionen (R 2010 75] (engl.: Industrial Emissions Directive -IED) maßgeblich bestimmt. Im Mittelpunkt dieser Richtlinie steht allgemein die Minderung von Emissionen in die Umwelt.

Einen Weg zum Erreichen dieses Ziels stellt der bereits im Rahmen der Vorgängerrichtlinie (IVU-Richtlinie (R 1996 61]) eingerichtete Informationsaustausch auf europäischer Ebene über Technologien zum Umweltschutz zwischen Mitgliedstaaten, Industrie und Umweltverbänden dar. Dieser Informationsaustausch führt zu Merkblättern über die "Beste verfügbare Techniken" (BVT-Merkblätter), die auch als "Best Available Techniques Reference Document" (BREF-Dokument) oder als "Best Available Technique" (BAT-Dokument) bezeichnet werden.

Mit der Verabschiedung der IED wird die Bedeutung dieser BVT-Merkblätter deutlich gestärkt, denn im Rahmen von Genehmigungsverfahren müssen zukünftig die BVT-Merkblätter und deren Anforderungen von den Behörden angewendet werden. Die Inhalte aus den BVT-Merkblättern sind somit zukünftig als Grenzwerte anzusehen.

Die wichtigste deutsche Rechtsvorschrift zur Umsetzung dieser Richtlinie stellt das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) (BImSchG] mit den entsprechenden Verordnungen dar. Das BImSchG enthält in Bezug auf den Bau und Betrieb technischer Anlagen Forderungen, durch die sehr unterschiedliche Umweltschutzaspekte abgedeckt werden. Neben der Vermeidung von schädlichen Umwelteinwirkungen und erheblichen Nachteilen für die

Allgemeinheit muss der Stand der Technik als Vorsorgemaßnahme gegen nachteilige Auswirkungen auf die Umwelt genutzt werden. Außerdem werden ein sparsamer und effizienter Einsatz von Energie sowie eine vorrangige Vermeidung bzw. Verwertung von Abfällen gefordert. Diese Forderungen sind auch in der IED enthalten.

Damit decken die IED-Richtlinie und das BImSchG indirekt Forderungen nach Ressourcen- und Klimaschutz ab. Auf der anderen Seite führen diese Basisanforderungen auch zu einem Widerspruch, denn das Erreichen von immer niedrigeren Emissionen ist an eine immer aufwändigere Verfahrenstechnik mit einem in der Regel höheren Energie- und Ressourcenbedarf gekoppelt. Berücksichtigt wird dieser Widerspruch bei den Kriterien, die im Rahmen der Festlegung des Standes der Technik im BImSchG anzuwenden sind.

Die Betrachtung der ausgewählten Rechtsvorschriften führte zu zwei Erkenntnissen. Bei der regelmäßigen Überarbeitung und Anpassung europäischen Vorschriften gibt es Bestrebungen, durch das Zusammenführen von Richtlinien eine Vereinfachung zu erzielen. Somit entsteht die Frage, ob auch in Deutschland - beispielsweise durch das Zusammenführen einzelner Verordnungen - Rechtsvorschriften vereinfacht und dadurch der Vollzug verbessert werden könnte.

Als zweite Erkenntnis ergibt sich, dass für die Beschränkung von Emissionen in die Atmosphäre ein gewisses "Schubladendenken" entstanden ist. Die einzelnen europäischen und deutschen Vorschriften betreffen nur einzelne Industriesektoren. Beispielsweise existierten sowohl für die Abfallverbrennung als auch für die Stromerzeugung in Kraftwerken auf europäischer Ebene jeweils eine Richtlinie (aufgegangen in der IED) und ein BVT-Merkblatt. In Deutschland wurden die Grenzwerte in zwei getrennten Verordnungen festgelegt.

Es bleibt abzuwarten, ob die IED durch Einbindung von bisher branchenbezogenen europäischen Richtlinien eine Abkehr vom Schubladendenken bringt, so dass es zu einer erweiterten integrierten Betrachtung über verschiedene Industriebranchen hinaus kommt.

Technische Grundlagen

In weiteren Abschnitten wurde der technische Aufbau von Abfallverbrennungsanlagen und für den späteren Vergleich zusätzlich von Kraftwerken zur Stromerzeugung beschrieben. Abfallverbrennungsanlagen sind aufgrund des sehr heterogenen Brennstoffinputs in der Regel mit einer Rostfeuerung und einer relativ aufwändigen Rauchgasreinigung ausgerüstet. Die Rauchgasreinigung dient der Abscheidung von Flugstaub, Hydrogenchlorid (HCl), Schwefeldioxid (SO₂), Stickoxiden, Schwermetallen und Kohlenwasserstoffverbindungen aus dem Rauchgas. Moderne Kohlekraftwerke nutzen die Technologie der Staubfeuerung; eine nachgeschaltete Rauchgasreinigung ist aufgrund der eingesetzten Regelbrennstoffe vorrangig nur für die Abtrennung von Stickoxiden, Flugstaub und Schwefeldioxid ausgelegt. Kraftwerke weisen im Vergleich zu Abfallverbrennungsanlagen eine wesentlich höhere thermische Leistung und folglich größere Material- und Rauchgasströme auf.

Aufgrund der Verbrennungstemperaturen und weiteren Betriebsbedingungen sind bei den erwähnten Anlagen von den verschiedenen Stickoxiden lediglich die Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) von Bedeutung. Diese beiden Stickoxide werden zusammen als "NO_x" bezeichnet. Existierende Grenzwerte beziehen sich in der Regel auf NO_x, werden aber als NO₂ angegeben, so dass im Rauchgas vorhandene NO-Anteile auf NO₂ umgerechnet werden müssen.

Die vielfältigen Auswirkungen der Stickoxide auf die Umwelt führten weltweit zu großen Anstrengungen, um die Emissionen zu reduzieren. Zunächst sind primäre und sekundäre Verfahren zu unterscheiden. Primärseitig wirkende Minderungsmaßnahmen beziehen sich auf den eigentlichen Verbrennungsprozess und bewirken eine geringere Stickoxidbildung.

Sekundäre Verfahren zielen dagegen auf die Reduzierung der im Verbrennungsprozess gebildeten Stickoxide ab.

Als sekundäre Verfahren zur Minderung von Stickoxidemissionen werden an Abfallverbrennungsanlagen die "Selective Non-Catalytic Reduction" (SNCR-Verfahren) und die "Selective Catalytic Reduction" (SCR-Verfahren) genutzt.

Das SNCR-Verfahren erfordert Temperaturen im Bereich um 950 °C und beruht auf einer chemischen Reduktion der Stickoxide mit Ammoniak (NH₃) oder Harnstoff (CH₄N₂O). Als Reaktionsprodukte entstehen Stickstoff und Wasser. Für die Nutzung des SNCR-Verfahrens wird das Reduktionsmittel in den Feuerraum der Abfallverbrennungsanlage oberhalb des Verbrennungsrostes so eingebracht, dass eine möglichst vollständige Vermischung mit dem heißen Rauchgasstrom im geforderten Temperaturbereich erreicht wird. Nebenreaktionen des Reduktionsmittels (Oxidation) erfordern eine überstöchiometrische Zugabe, die zu einer Kontamination der Rückstände aus der Rauchgasreinigung führen kann. Außerdem steigt der Reduktionsmittelverbrauch mit abnehmenden Emissionskonzentrationen nicht linear sondern exponentiell an.

Das SCR-Verfahren baut auf dem gleichen chemischen Vorgang auf wie das SNCR-Verfahren: Der Einsatz eines Katalysators reduziert heute die Betriebstemperaturen auf etwa 180 bis 230 °C; eine überstöchiometrische Zugabe des Reduktionsmittels ist nicht erforderlich. Aufgrund der im Rauchgas aus Abfallverbrennungsanlagen enthaltenen Bestandteile ist der SCR-Katalysator mit den notwendigen Bauteilen in der Regel am Ende der Rauchgasreinigung nach Abscheidung der sauren Schadstoffe (Low Dust tail End) installiert. Diese Anordnung als eigenständige Rauchgasreinigungsstufe erfordert eine energieintensive Aufheizung der Rauchgase auf die Betriebstemperatur des Katalysators.

Aufgrund des verfahrenstechnischen Mehraufwands sind die Investitions- und Betriebskosten für das SCR-Verfahren wesentlich höher. Aus der Literatur ergeben sich für das SCR-Verfahren bei Einhaltung eines Emissionsgrenzwerts von 100 Mg/Nm³ für Stickoxide die drei- bis fünffachen Investitionskosten; die jährlichen Betriebskosten liegen mehr als doppelt so hoch.

Vergleich NO_x aus Abfallverbrennung mit allen Branchen

Für eine Aussage zu der Frage, ob die Stickoxidemissionen aus deutschen Abfallverbrennungsanlagen einen relevanten Einfluss auf die Umwelt haben, ist ein Vergleich der aus Abfallverbrennungsanlagen emittierten Stickoxidmengen mit den Gesamtemissionen an Stickoxiden in Deutschland aus allen Bereichen notwendig.

Das Europäische Schadstofffreisetzungsregister konnte allerdings nicht verwendet werden, denn die dort aufgeführten emittierten Schadstoffmengen beziehen sich auf Standorte, die verschiedene Anlagen umfassen können. Es werden nur Schadstoffmengen erfasst, die bestimmte Mengen überschreiten. Außerdem scheiterte die exakte Berechnung durch Summation der emittierten Stickoxidmengen aus den einzelnen Abfallverbrennungsanlagen, an der Datenverfügbarkeit. Folglich musste eine Abschätzung mit typischen Betriebsdaten durchgeführt werden.

Im Rahmen der Abschätzung zu den aktuellen NO_x-Emissionen aus dem Bereich der Abfallverbrennung wurden ergänzend Sekundärbrennstoffkraftwerke berücksichtigt, deren grundlegender Aufbau (Feuerung, Rauchgasreinigung) dem der Abfallverbrennungsanlagen entspricht. Insgesamt wurde von 25 Mio. Tonnen/Jahr als zu verbrennende Abfallmengen ausgegangen. Davon entfallen 19,6 Mio. Tonnen auf Abfallverbrennungsanlagen und 5,4 Mio. Tonnen auf Sekundärbrennstoffkraftwerke.

Aus der Abschätzung ergab sich, dass die deutschen Abfallverbrennungsanlagen und Sekundärbrennstoffkraftwerke etwa 50.000 Tonnen NO_x pro Jahr emittieren würden, wenn

keine Rauchgasreinigungsmaßnahmen zur Stickoxidminderung durchgeführt würden. Aufgrund der unterschiedlichen Grenzwerte in den Genehmigungsbescheiden für die Abfallverbrennungsanlagen und Sekundärbrennstoffkraftwerke ist heute davon auszugehen, dass insgesamt zwischen 10.000 und 20.000 Tonnen NO_x pro Jahr an die Atmosphäre abgegeben werden.

Im Vergleich dazu ist in Deutschland die Summe der NO_x-Gesamtemissionen aus allen Bereichen einschließlich Verkehrssektor und die Energiewirtschaft mit jährlich 1.288.300 Tonnen wesentlich größer. Der abgeschätzte Mengbereich zwischen jährlich 10.000 und 20.000 Tonnen entspricht lediglich 0,8 bis 1,6 % der gesamten NO_x-Emissionen. Es ist davon auszugehen, dass niedrigere Emissionsgrenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen und der damit verbundene Mehraufwand nicht zu nachweisbaren Verbesserungen in der Umwelt beitragen.

Für eine genauere Beurteilung der Entstickungsverfahren an Abfallverbrennungsanlagen wurden zwei Vergleiche durchgeführt. Im Rahmen einer ersten Berechnung wurde der Kumulierte Energieaufwand (KEA), definiert durch eine VDI-Richtlinie [VDI 4600], für das SCR- und das SNCR-Verfahren in Abhängigkeit von der Reingaskonzentration berechnet. Für eine ergänzende Erfassung ökologischer Aspekte, die vom Aufgrund seiner Definition mit dem KEA nicht möglich ist, wurde ein ökobilanzieller Vergleich mit der Ecoindicator 99-Methode durchgeführt.

Als Basis für die Berechnungen wurden Teilmodelle zu den beiden Entstickungsverfahren erstellt, in denen die jeweils notwendige Verfahrenstechnik und Veränderungen im Rauchgas berücksichtigt wurden. Nicht erfasst wurde eine zusätzlich mögliche Minderung von Dioxin-Emissionen (nur SCR) und die Kontamination von Rauchgasreinigungsrückständen mit NH₃ (nur SNCR).

Als Ergebnis aus den Vergleichen ist festzuhalten, dass der KEA für das SCR-Verfahren drei- bis viermal höher ist als für das SNCR-Verfahren. Die Ursache liegt in der notwendigen Wiederaufheizung der Rauchgase bei der Low Dust Tail End-Schaltung des SCR-Verfahrens.

Der ökobilanzielle Vergleich mit der Ecoindicator 99-Methode zeigt zunächst, dass bei NO_x-Reingaskonzentrationen von 200 mg/Nm³ und 100 mg/Nm³ der Einsatz von beiden Verfahren Vorteile für die Umwelt erbringt. Eine direkte Gegenüberstellung der Ergebnisse für 200 mg/Nm³ bzw. für 100 mg/Nm³ als Reingaskonzentration ergibt Vorteile für das SNCR-Verfahren.

Als Ergebnis aus den durchgeführten Betrachtungen und Berechnungen ergibt sich, dass die oben im Text erwähnte Betrachtung der SCR-Technologie als "Beste Verfügbare Technik" im aktuellen BVT-Merkblatt für die Abfallverbrennung nicht nachvollziehbar ist. Ein Einsatz der SCR-Technologie in Low Dust Tail End-Schaltung würde zwar die Einhaltung sehr geringer Emissionsgrenzwerte ermöglichen, allerdings verbunden mit einem hohen Energieaufwand und sehr hohen Kosten. Große Beiträge zum Umweltschutz würden nicht erreicht.

Es ist zu beachten, dass die durchgeführten Berechnungen mit durchschnittlichen Betriebsdaten von großtechnischen Abfallverbrennungsanlagen durchgeführt wurden. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Anlagentechnik der einzelnen Abfallverbrennungsanlagen, der Heterogenität der eingesetzten Brennstoffe und der ungleichen Standorte können die Erkenntnisse nicht auf jede Abfallverbrennungsanlage uneingeschränkt übertragen werden. Es ist eine separate, standortbezogene Überprüfung notwendig.

Als ergänzende Erkenntnis aus den durchgeführten Arbeiten ist festzuhalten, dass es in der Literatur eigentlich keine "branchenübergreifenden" Arbeiten gibt, die eine einzige Umweltschutztechnik bzw. ein Umweltproblem in verschiedenen Branchen untersuchen. Beispielsweise wurden keine Ökobilanzen gefunden, die Rauchgasreinigungstechniken von verschiedenen Industriesektoren für ausgewählte Schadstoffe vergleichen.

Sektorübergreifender Ansatz - Ableitung einer erweiterten Betrachtung

Aufgrund der ermittelten Ergebnisse entstand die Frage, ob es für eine weitere Minderung von Stickoxidemissionen aus Abfallverbrennungsanlagen nicht Möglichkeiten zur Optimierung gibt. Hilfreich in diesem Zusammenhang ist eine Betrachtung der Stickoxidminderung an großen Kraftwerken zur Stromerzeugung. An diesen Anlagen wird bei Bedarf an sekundären Stickoxidminderungsmaßnahmen das SCR-Verfahren eingesetzt. Der Katalysator kann bei Kraftwerken aufgrund der Rauchgaseigenschaften direkt hinter dem Kessel installiert werden, wo die Rauchgastemperaturen im geforderten Bereich liegen. Eine Wiederaufheizung ist nicht notwendig (Siehe Abbildung 5, S. 30).

Vergleicht man diesen Weg zur Stickoxidminderung an Kraftwerken mit den beschriebenen SNCR- und SCR-Verfahren an Abfallverbrennungsanlagen, so ergeben sich eindeutige Vorteile für das SCR-Verfahren an Kraftwerken: Die energieaufwändige Wiederaufheizung entfällt, gleichzeitig ist ein Reduktionsmittelüberschuss nicht notwendig. Ergänzt werden die Vorteile durch wirtschaftliche Pluspunkte, denn der verfahrenstechnische Aufwand und die Betriebskosten sind niedriger.

Dieser Sachverhalt führt im Vergleich zur IVU-Richtlinie bzw. IED zu einem neuen Grundgedanken. Bisher bezogen sich die europäischen Richtlinien mit der integralen Betrachtungsweise auf den gleichzeitigen Schutz von Atmosphäre, Boden und Wasser. Diese integrale Betrachtungsweise war allerdings auf einzelne Industriesektoren begrenzt; beispielsweise existierten Richtlinien und BVT-Merkblätter jeweils für Abfallverbrennungsanlagen, Kraftwerke und weitere Industriesektoren.

Im Rahmen der neuen Denkweise erfolgt ein Übergang vom sektorbezogenen Ansatz zu einem sektorübergreifenden Ansatz. Neue oder insbesondere ergänzende Umweltschutzmaßnahmen mit weiter reduzierten Grenzwerten sollten in den Industriesektoren durchgeführt werden können, wo dies mit relativ geringen Kosten und gleichzeitig geringerem Energiebedarf und Ressourcenverbrauch möglich ist. Auf diese Weise würden zusätzliche Beiträge zum Umweltschutz geleistet.

Dieser erweiterte Ansatz würde es ermöglichen, an Stelle einer weiteren Minderung der Stickoxidemissionen aus Abfallverbrennungsanlagen mit Hilfe von Nachrüstungen oder anderen technischen Maßnahmen für die Abscheidung entsprechender Stickoxidemengen die an Kraftwerken installierten SCR-Anlagen als zu bezahlende Dienstleistung heranzuziehen.

Allerdings scheitert dieser sinnvolle Ansatz an den Definitionen in den entsprechenden Rechtsvorschriften. Entsprechend der IED und dem BImSchG müssen die Emissionsgrenzwerte und weitere Vorgaben stets von den einzelnen separaten Anlagen eingehalten werden.

Der abgeleitete sektorübergreifende Ansatz könnte nicht nur auf die für Stickoxidemissionen aus den Sektoren "Abfallverbrennung" und "Kraftwerke" angewendet werden. Möglichkeiten zur Übertragung auf weitere Schadstoffe oder andere Industriesektoren wurden aufgrund der erwähnten rechtlichen Probleme mit der Anlagendefinition im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter verfolgt.

Abschließend ist festzustellen, dass im Zusammenhang mit zukünftigen Umweltschutzmaßnahmen auch der Klimaschutz, der Energiebedarf und der Verbrauch an Ressourcen zu berücksichtigen sind. Aus dem sektorübergreifenden Ansatz, der im Rahmen der durchgeführten Arbeiten abgeleitet wurde, ergeben sich Möglichkeiten für Beiträge zur Energie- und Ressourceneinsparung.

Wenn diese Beiträge zukünftig genutzt werden sollen, so sind auf europäischer Ebene und nationaler Ebene die rechtlichen Voraussetzungen zu schaffen. Es bleibt abzuwarten, wie die im Rahmen dieser Studie ermittelten Ergebnisse zukünftig genutzt werden.

10 Literatur

- [13. BImSchV] 13. BImSchV - Verordnung über Großfeuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen Dreizehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. 2. Mai 2013.
- [17. BImSchV] 17. BImSchV - Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. 2. Mai 2013.
- [Abbas] Abbas, T.; Lockwood, F.C.; Dimitriou, D.: "Bildung und Reduzierung von NOx: Modellierung der SNCR. Zement Kalk Gips 60 (2007) Heft 8. S. 52-58.
- [Ahrens] Ahrens, R-H.: "EU legt Pläne für saubere Luft vor". VDI nachrichten (2014) Ausgabe 1 vom 10. Januar 2014.
- [AVG Köln] AVG Köln mbH: "Die Restmüllverbrennungsanlage Köln". Firmenschrift August 1995.
- [Baumbach] Baumbach, G.: "Luftreinhaltung". 3. Auflage. Springer Verlag, Berlin 1993.
- [Beckmann-1] Beckmann, M.; Gampe, U.; Grahl, S.; Hellfritsch, S.: "Zielkonflikt Emissionen und Energieeffizienz am Beispiel der 37. BImSchV". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall" Band 6. S. 3-32. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2009.
- [Beckmann-2] Beckmann, M.: "Beschreibung unterschiedlicher Techniken und deren Entwicklungspotentiale zur Minderung von Stickstoffoxiden im Abgas von Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken hinsichtlich Leistungsfähigkeit, Kosten und Energieverbrauch". Texte 71/2011. Umweltbundesamt, Dessau März 2011.
- [Beckmann-3] Beckmann, M.; Gleis, M.: "Techniken und Entwicklungspotentiale zur Minderung von Stickoxiden im Abgas von Abfallverbrennungsanlagen". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall" Band 9. S. 591-598. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2012. Anmerkung: Die Angaben zu den Investitionskosten und der Erläuterungstext sind mit [Beckmann-2] identisch.
- [BImSchG] BImSchG - Bundes-Immissionsschutzgesetz. Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. 17. Mai 2013.
- [Binnewies] Binnewies, M.; Jäckel, M.; Willner, H.; Rayner-Canham, G.: "Allgemeine und Anorganische Chemie". 1. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Imprint der Elsevier GmbH, München 2004.
- [BK] Wissenschaftlicher Beirat der Bundesärztekammer: "Potentielle Gesundheitsgefahren durch Emissionen aus Müllverbrennungsanlagen". Deutsches Ärzteblatt 90, 11. Januar 1993, Heft 1/2. S. 52-60. Abgedruckt auch in: Abfallwirtschaftsjournal 5 (1993) Heft 3. S. 242-253.
- [BKB Hannover] BKB Hannover GmbH: "Neue Energie aus Abfall". Firmenschrift März 2005.
- [Blank] Blank, M.: "Basiswissen Umwelttechnik". 2. Auflage. Vogel Buchverlag, Würzburg 1994.

- [BMU-2005] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): "Müllverbrennung - eine Gefahrenherd? Abschied von der Dioxinschleuder". Berlin Juli 2005.
- [BMU-2007] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): "Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm". Berlin August 2007.
- [Bonn] Bonn, B.; Baumann, H.; Pelz, G.: "Bildung und Abbau von N₂O in Wirbelschichtfeuerungen". VGB Konferenz "Forschung in der Kraftwerkstechnik". 24.-25. Februar 1993. (Tagungsband VGB-TB 231).
- [Büchel] Buechel, K.H.; Moretto, H.-H.; Woditsch, P.: " Industrielle anorganische Chemie". 3. Auflage. Verlag Wiley-VCH, Weinheim 1999.
- [Büchner] Büchner, H.-P.: "Das EBS-Kraftwerk in Heringen". VGB PowerTech 90 (2010) Heft 12. S. 80-85.
- [Buser] Buser, S.; Brandt, G.: "HCN- und N₂O-Emissionen bei der Verbrennung von Klärschlamm in einer Wirbelschichtfeuerung". Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 58 (1998) Heft 4. S. 161-165.
- [BVT-WI] Europäische Kommission: "Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration". August 2006.
- [BVT-LCP] Europäische Kommission: "Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants". Juli 2006.
- [Claus] Claus, J.C.: "Planung komplexer Abfallbehandlungsanlagen". Dissertation, Technische Universität Berlin, 2000.
- [DBR] Deutsche Bundesregierung: "Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm". Klausurtagung des Bundeskabinetts in Meseberg, August 2007. Ohne Autor, an vielen im Internet publiziert. Grundlage für: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): "Bericht zur Umsetzung der in der Kabinettsklausur am 23./24.08.2007 in Meseberg beschlossenen Eckpunkte für ein Integriertes Energie- und Klimaprogramm". Stand 05.12.2007.
- [Dehoust] Dehoust, G.; Gebhardt, P.; Gärtner, S.: "Der Beitrag der thermischen Abfallbehandlung zu Klimaschutz, Luftreinhaltung und Ressourcenschonung". Gutachten im Auftrag der Interessengemeinschaft der Betreiber Thermischer Abfallverbrennungsanlagen in Deutschland (ITAD). Darmstadt April 2002.
- [DIN 1301-3] DIN 1301 Teil 3. "Einheiten; Umrechnungen für nicht mehr anzuwendende Einheiten". Oktober 1979.
- [DIN EN 14181] DIN EN 14181. "Emissionen aus stationären Quellen - Qualitätssicherung für automatische Messeinrichtungen". September 2004.
- [DIN EN 15259] DIN EN 15259. "Luftbeschaffenheit - Messung von Emissionen aus stationären Quellen - Anforderungen an Messstrecken und Messplätze und an die Messaufgabe, den Messplan und den Messbericht". Januar 2008.

- [DIN EN 15267] DIN EN 15267. "Luftbeschaffenheit - Zertifizierung von automatischen Messeinrichtungen". Juli 2009.
- [Dittrich] Dittrich, R.; Nowag, R.: "Vergleichende Beurteilung und Abscheideleistung von SNCR-SCR-Technik". VDI Wissensforum. BAT- und preisorientierte Dioxin-/Rauchgasreinigungstechniken 2002. Seminar 435914. München, 19.-20. Sep. 2002.
- [EEW Breisgau] Energy from Waste (EEW): "TREA Breisgau". Firmenschrift der EEW Energy from Waste Saarbrücken GmbH. 2013.
- [EEW Hannover] EEW Energy from Waste Hannover GmbH: "Hannover". Firmenschrift. April 2014.
- [EIPPCB] European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau: Homepage der Institution, <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/>, abgerufen im Juli 2013.
- [Englmaier] Englmaier, L.; Herzog, T.: "Recladding im MHKW Burgkirchen". VGB PowerTech 84 (2004) Heft 11. S. 66-73.
- [Epiney] Epiney, A.: "Umweltrecht in der Europäischen Union". 3. Auflage. Nomos Verlagsgesellschaft, Baden Baden 2013.
- [Ernst] Ernst, A.: "Kompakt-DeNOx als Systemlösung für Müllverbrennungsanlagen". WLB 38 (1994) Heft 3. S. 58-60.
- [Euwid 2007 27] Europäischer Wirtschaftsdienst (Euwid): "Grüne fordern niedrigere Grenzwerte für Müllverbrennungsanlagen". Euwid Re 2007 Nr. 27. S. 27.
- [Euwid 2010 30] Europäischer Wirtschaftsdienst (Euwid): "Kommission plant europaweites Handelssystem für SO₂ und NO_x". Euwid Re 2010 Nr. 30. S. 24.
- [Euwid 2011 11] Europäischer Wirtschaftsdienst (Euwid): "Bundesumweltministerium will Grenzwerte für die Mitverbrennung von Abfällen verschärfen". Euwid Re 2011 Nr. 11. S. 25.
- [Euwid 2011 30] Europäischer Wirtschaftsdienst (Euwid): "Rot-Grün: Gleiche Behandlung für MVA und Mitverbrennung". Euwid Re 2011 Nr. 30. S. 26.
- [Euwid 2011 35] Europäischer Wirtschaftsdienst (Euwid): "NRW-Antrag zur Verschärfung der 17. BImSchV im Bundesrat". Euwid Re 2011 Nr. 35. S. 23.
- [Fischer] Fischer, B.: "Energieeffizienz des Müllheizkraftwerkes Mainz". in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Optimierung der Abfallverbrennung 2". S. 565-578. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2005.
- [Fleck] Fleck, E.: "Darfs ein bisschen mehr MVA sein ? - Kriterien für die maximale Baugröße". Umweltmagazin 37 (2007) Heft 5. S. 12-13.
- [Fleschenberg] Fleschenberg, B.: "Herangehensweise bei der Projektrealisierung einer thermischen Restabfallbehandlungsanlage durch ein Entsorgungsunternehmen". In: "Bio- und Restabfallbehandlung IV". S. 260-266. Witzenhausen-Institut. Neues aus Forschung und Praxis. Witzenhausen, 2000.
- [Frank] Frank, M.J.; Gutberlet, H.; Brandenstein, J.: "Betrieb von Rauchgas-Entstickungsanlagen mit Denox-Katalysatoren". VGB PowerTech 86 (2006) Heft 4. S. 72-77.

- [Geoedekoop] Geoedekoop, M.; Spriensma, ; R. "The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment." Methodology Report von Ré Consultants B.V. P Amersfoort, Niederlande, Third edition, 22 June 2001.
- [Glarborg] Glarborg, P.; Jensen, A.D.; Johnsson, J.E.: "Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems".
Progress in Energy and Combustion Science 29 (2003) S. 89-113.
- [Gleis-1] Gleis, M.; Wiechmann, B.: "Neue Konsequenzen".
Resource 25 (2012) Heft 3. S. 33-39.
- [Gleis-2] Gleis, M.; Johnke, B.: "Beste verfügbare Technik - Vorgaben für ein hohes Niveau der Abfallverbrennung". In: Versteyl, A.; Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Planung und Umweltrecht". Band 1. S. 51-68. TK Verlag, Neuruppin 2008.
- [Görtzen] Görtzen, J.; Brem, G.; Lüjten, M.; Jongen, H.: " NOx-Reduktion durch SNCR mit unterschiedlichen Reagenzien in Zementdrehrohröfen". ZKG 56 (2003) Heft 2. S. 35-43.
- [Gohlke] Gohlke, O.; Schmidt, W.; Baj, P.; Papa, G.: "Energieeffiziente NOx-Minderung dank moderner Feuerungstechnik".
Umweltmagazin 42 (2012) Heft 8. S. 46-48.
- [Grundgesetz] Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland (GG),
1. Fassung vom 23. Mai 1949
- [Gutierrez] Gutierrez, M.J.F., Baxter, D.; Hunter, C.; Svoboda, K.: "Nitrous oxide (N₂O) emissions from waste and biomass to energy plants".
Waste management & Research 23 (2005) S. 133-147.
- [Hannes] Hannes, K.; Schmahl, K.-H.; Weiler, H.: "Möglichkeiten zur NOx-Minderung für grosse Feuerungsanlagen".
BWK 39 (1987) Heft 10. S. R15-R22.
- [Hansmann] Hansmann, K.; Sellner, D.: "Grundzüge des Umweltrechts".
Erich Schmidt Verlag, Berlin 2012.
- [Harborth] Harborth, P.; Fuß, R.; Flessa, H.; FrickeK.: "Nachweis starker N2O Hot-Spots auf einer MBA-Deponie: Ein Zielkonflikt für Minimierungsstrategien von Treibhausgasemissionen?".
Müll und Abfall 45 (2013) Heft 6. S. 280-287.
- [Haug] Haug, N.; Sauter, G; Samant, G.; Herden, H.: "SCR-Betriebsanlage in der Zementindustrie". Umweltmagazin 34 (2004) Heft 1/2. S.46-48.
- [Heide] Heide, B. v.d. : "Ist das SNCR-Verfahren noch Stand der Technik". in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall Band 4". S. 275-293. TK Verlag, Neuruppin 2008.
- [Heiting] Heiting, B.: "Stand der Technik bei der Rauchgasreinigung von Großkraftwerken". VGB PowerTech 91 (2011) Heft 6. S.114-123.
- [Herrlander] Herrlander, B.: "Wirkungsvolle Entstickung von Rauchgasen durch SCR". Chemie-Technik 20 (1991) Heft 3. S. 54-60.
- [Höling] Höling, M.: "Errichtung und erste Betriebserfahrungen mit der Thermischen Restanfallbehandlungs und Energieverwertungsanlage (TREA) Breisgau". VGB PowerTech 85 (2005) Heft 12. S. 38-43.

- [Hollemann] Hollemann, A.F.; Wiberg, E.: "Lehrbuch der Anorganischen Chemie". 91.-100. Auflage. Walther de Gruyter, Berlin 1985.
- [Huber] Huber, H.D.; König, D.: "Nutzen einer High-Tech-Abgasbehandlung". ReSource 22 (2009) Heft 4. S. 8-11.
- [Hunsinger] Hunsinger, H.: "Primärmaßnahmen zur NO_x-Minderung in Abfallverbrennungsanlagen". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall" Band 9. S. 573-590. TK Verlag, Neuruppin 2012.
- [Kalmbach] Kalmbach, S.: "Stand der Technik und Anwendung der BVT-Dokumente im Anlagenzulassungsrecht". In: Thomé-Kozmiensky et al.: "Immissionsschutz. Band 2" S. 285-295. TK Verlag, Neuruppin 2012.
- [Kaltenbach] Kaltenbach, E.; Maaßen, U.: "Braunkohle". BWK 65 (2013) Heft 4. S. 106-116.
- [Keller-R.] Keller-Reinsbach, H.W.: "Einsatzmöglichkeiten von stickstoffhaltigen Abwässern zur Entstickung in thermischen Abfallbehandlungsanlagen". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Behandlung von Sonderabfällen 3". S. 505-524. EF-Verlag Berlin 1990.
- [Kersting] Kersting, M.: "Beispielhafte Kostenrechnung für den Einsatz einer katalytischen und nichtkatalytischen Entstickungsanlage für eine Abfallverbrennungsanlage mit einer Kapazität von 200.000 t/a". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". (Band 4). S. 341-350. TK Verlag, Neuruppin 2008.
- [Khartchenko] Khartchenko, N.V.: "Umweltschonende Energietechnik". 1. Auflage. Vogel-Verlag, Würzburg 1997.
- [Kielburger] Kielburger, G.: "BASF-Umweltschutzprojekte vor dem Abschluß". wlb 35 (1991) Heft 7/8. S. 20.
- [Klein] Klein, M. R.; Kubisa, R.: "N₂O-Freisetzung bei Verbrennungsprozessen sowie N₂O-Reduzierung unter Einsatz von Spezialtechniken". VDI Bildungswerk. Seminar 43-59-06. "Dioxin- und Gesamtemissionsminderungstechniken". München, 15.-16. September 1994.
- [Kleppmann] Kleppmann, F.; Grüttner, W.; Dima, B.: "Heiße DeNO_x (katalytische Entstickung) im Müllheizkraftwerk Würzburg". Müll und Abfall 39 (2007) Heft 6. S. 269-273.
- [Kloepfer] Kloepfer, M.: "Umweltschutzrecht". Verlag C.H. Beck, München 2011.
- [Koebel] Koebel, M.; Elsener, M.: "Entstickung von Abgasen nach dem SNCR-Verfahren: Ammoniak oder Harnstoff als Reduktionsmittel". Chem.-Ing.-Tech. 64 (1992) Heft 10. S. 934-937.
- [Köser] Köser, H.: "SCR-DeNO_x-Katalysatoren. Qualitätssicherung, Beurteilung und neue Entwicklungen". Haus der Technik. Fachbuchreihe. Vulkan-Verlag, Essen 1992.
- [Kolar] Kolar, J.; Geis, H.: "Erste Betriebserfahrungen mit der NO_x-Minderung im HKW Sandreuth". BWK 39 (1987) Heft 10. S. R31-R34.
- [Kopp-Assenb.] Kropp-Assenmacher, S.: "Neue Entwicklungen im europäischen und nationalen Abfallwirtschaftsrecht". VGB PowerTech 89 (2009) Heft 8. S. 84-87.

- [KrWG] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. KrWG - Kreislaufwirtschaftsgesetz. 24. Februar 2012.
- [KrW/AbfG] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen. KrW/AbfG - Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz. 27. September 1994.
- [Lahl-1] Lahl, U.: "Verschärfung der Abgasgrenzwerte für die Abfallverbrennung - warum?". Müllmagazin 20 (2007) Heft 3. S. 1-2.
- [Lahl-2] Lahl, U.: "Gleiches Recht für alle. Mit neuen Anforderungen an die Abgasreinigung will die 37. BImSchV eine Gleichbehandlung aller thermischen Verfahren erreichen". Müllmagazin 21 (2008) Heft 1. S. 42-45.
- [Lahl-3] Lahl, U.: "Neue Anforderungen an die Abgasreinigung - die 37. BImSchV". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". (Band 4). S. 153-162. TK Verlag, Neuruppin 2008.
- [Lahl-4] Lahl, U.; Gröger, V.; Böske, J.: "Das Umbaukonzept der Bielefelder Alt-MVA im Kontext weitergehender Perspektiven". wlb 35 (1991) Heft 7/8. S. 48-50.
- [Lange] Lange, M.; Oels, H.-J.: "Gesetzliche Vorschriften und technische Maßnahmen zur NOx-Emissionsminderung bei Feuerungsanlagen und stationären Verbrennungsmotoren". BWK 39 (1987) Heft 10. S. R5-R12.
- [Löschau] Löschau, M.: "Abfallverbrennung als Emissionsquelle". ReSource 22 (2009) Heft 4. S. 30-37.
- [Loo] Loo, K.v.d.; Gutberlet, K.: "Steinkohle". BWK 64 (2012) Heft 4. S. 88-97.
- [LT Saarland] Landtag des Saarlandes: "10. Beschlußfassung über den von der CDU-Landtagsfraktion eingebrachten Antrag betreffend Mißbilligung der Amtsführung des Ministers für Umwelt, Energie und Verkehr". 11. Wahlperiode, 24. Sitzung am 8. Mai 1996. Abgerufen über: <http://archiv.jura.uni-saarland.de/Landtag-Saar/protokolle/s24/pl112401.htm> und <http://archiv.jura.uni-saarland.de/Landtag-Saar/protokolle/s24/pl112411.htm>
- [Mayr] Mayr, F.: "Kesselbetriebstechnik". 7. Auflage. Resch-Verlag, Gräfeling 1997.
- [Mineur] Mineur, M.; Schmidt, W.: "Betriebliche Versuche zur Optimierung der SNCR-Anlage in Müllverwertungsanlagen". VGB PowerTech 91 (2011) Heft 1/2. S. 94-99.
- [Muzio] Muzio, L.J.; Quartucy, G.C.; Cichanowicz, J.E.: "Overview and status of post-combustion NOx control: SNCR, SCR and hybrid technologies". Int. J. of Environment and Pollution 17 (2002) Heft 1/2. S. 4-30.
- [MVA B.H.] MVA Bielefeld-Herford GmbH (Hrsg.): "Abfall Energie Umwelt". Firmenschrift 1997.
- [Napp] Napp, M.: "Thermische Abfallbehandlung in Großanlagen und dezentralen Kleinanlagen". Umweltpraxis 3 (2003) Heft 10. S. 13-15.
- [Pachaly] Pachaly, R.: "SCR/SNCR: optimal NOx-Emissionen mindern". Umweltmagazin 40 (2010) Heft 3. S.41-43.

- [Pawelka] Pawelka, E.; Kuhn, M.; Gierend, C.: "Optimierung NH₄OH-Eindüsung einer SCR-Anlage mittels Fuzzy Control am Beispiel der MVA Flötzersteig, Wien". VDI Bildungswerk. Seminar 435916. BAT-, energie-, preisorientierte Verfahrens-/Dioxin-/ Rauchgasreinigungstechniken 2004 für Verbrennungs- und Feuerungsanlagen. München, 16.-17. September 2004.
- [Pletscher] Pletscher, K.; Glinka, U.; Externbrink, A.: "Absenkung der Betriebstemperatur an einem SCR-Oxidationskatalysator in einem Abfallheizkraftwerk". Umweltpraxis 1 (2001) Heft 7-8. S. 24-27.
- [R 1975 442] Richtlinie des Rates vom 15. Juli 1975 über Abfälle (75/442/EWG) - Abfallrahmenrichtlinie. Amtsblatt der Europäischen Union, L194, 25. Juli 1975, S.47.
- [R 1989 369] Richtlinie 89/369/EWG des Rates vom 8. Juni 1989 über die Verhütung der Luftverunreinigung durch neue Verbrennungsanlagen für Siedlungsmüll. Amtsblatt der Europäischen Union, L163, 14.06. 1989, S. 32.
- [R 1989 429] Richtlinie 89/429/EWG des Rates vom 21. Juni 1989 über die Verringerung der Luftverunreinigung durch bestehende Verbrennungsanlagen für Siedlungsmüll. Amtsblatt der Europäischen Union, L203, 15.07.1989, S. 50.
- [R 1994 67] Richtlinie 94/67/EG des Rates vom 16. Dezember 1994 über die Verbrennung gefährlicher Abfälle. Amtsblatt der Europäischen Union, L 365, 31.12.1994, S. 34.
- [R 1996 61] Richtlinie 96/61/EG des Rates vom 24. September 1996 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung. Amtsblatt der Europäischen Union, L257, 24.09.1996, S. 26.
- [R 2000 76] Richtlinie 2000/76/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Dezember 2000 über die Verbrennung von Abfällen. Amtsblatt der Europäischen Union, L332, 28.12.2000, S. 91.
- [R 2001 81] Richtlinie 2001/81/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2001 über nationale Emissionshöchstmenge für bestimmte Luftschadstoffe. Amtsblatt der Europäischen Union, L309, 27.11.2001, S. 22.
- [R 2004 107] Richtlinie 2004/107/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Dezember 2004 über Arsen, Kadmium, Quecksilber, Nickel und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe in der Luft. Amtsblatt der Europäischen Union, L23, 26.01.2005.
- [R 2006 12] Richtlinie 2006/12/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. April 2006 über Abfälle (kodifizierte Fassung). Amtsblatt der Europäischen Union, L114, 27.04.2006.
- [R 2008 50] Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa. Amtsblatt der Europäischen Union, L152, 11.06.2008 S. 1.
- [R 2008 98] Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. Amtsblatt der Europäischen Union, L312, 22.11.2008, S. 3.

- [R 2010 75] Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) (Neufassung). Amtsblatt der Europäischen Union, L334, 17.12.2010, S. 17.
- [Reimann] Reimann, D.O.: "NOx-Emissionen bei Abfallverbrennungsanlagen". Müll und Abfall 21 (1989) Heft 9. S. 457-462.
- [Reimer] Reimer, H.: "Zur Entstickung der Rauchgase von Müllverbrennungsanlagen". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Müllverbrennung und Umwelt". S. 164-180. EF-Verlag, Berlin 1985.
- [Richers] Richers, U.: "Abfallverbrennung in Deutschland - Entwicklungen und Kapazitäten". KIT Scientific Reports 7560. KIT Scientific Publishing 2010. <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000019325>.
- [Riedel] Riedel, E.: "Anorganische Chemie". 6. Auflage. Walther de Gruyter GmbH & Co.KG, Berlin 2004.
- [Rothensee] Müllheizkraftwerk Rothensee GmbH: "Wenn man Stroh zu Gold spinnen vermag: Aus Müll entsteht Licht und Wärme". Firmenschrift zur Anlage, Oktober 2010.
- [RWE] RWE AG: "Das Projekt BOA 2 & 3". Firmenschrift RWE AG.
- [SchadRegG] Gesetz zur Ausführung des Protokolls über Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister vom 21. Mai 2003 sowie zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 166/2006 vom 6. Juni 2007.
- [Schärer] Schärer, B.; Haug, N.: "Kostenanalyse zur NOx-Abgasreinigung bei Kraftwerken". BWK 39 (1987) Heft 10. S. R75-R84.
- [Schallert] Schallert, B.: "NOx-Minderung mit Katalysatoren - Grundlagen, Betriebserfahrungen und Optimierungspotentiale". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall. Band 4". S. 295-308. TK Verlag, Neuruppin 2008.
- [Schellenberger] Schellenberger, I.: "Stickoxidreduktion jetzt ohne Katalysator". BWK 57 (2005) Heft 11. S. 12-13.
- [Schmitt-T.] Schmitt-Tegge, J.D.: "Die Situation der Haus- und Sondermüllverbrennung im Jahre 1992 in der Bundesrepublik Deutschland". VGB Kraftwerkstechnik 73 (1993) Heft 8. S. 730-733.
- [Schoenberger] Schoenberger, H.: "Integrated pollution prevention and control in large industrial installations on the basis of the best available techniques - the Sevilla Process". Journal of Cleaner Production 17 (2009) S. 1526-1529.
- [Scholz] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: "Abfallbehandlung in thermischen Verfahren". Teubner-Reihe Umwelt. B.G. Teubner Verlag, Stuttgart 2001.
- [Schrod] Schrod, M.; Semel, J.; Steiner, R.: "Verfahren zur Minderung von NOx-Emissionen in Rauchgasen". Chem.-Ing.-Tech. 57 (1985) Heft 9. S. 717-727.
- [Schultess] Schultess, W.: "Möglichkeiten zur NOx-Minderung für kleine und Mittlere Anlagen". BWK 39 (1987) Heft 10. S. R23-R29.

- [Seifert] Seifert, H.; Merz, D.: "Primärseitige Stickoxidminderung als Beispiel für die Optimierung des Verbrennungsvorgangs in Abfallverbrennungsanlagen". Forschungszentrum Karlsruhe. Wissenschaftliche Berichte. FZKA 6944. Dezember 2003.
- [Sievers] Sievers, U.: Auswirkungen des Ammoniakschlupfes bei der Stickoxidreduktion in Steinkohlekraftwerken unter besonderer Berücksichtigung der Flugasche. VDI Fortschrittsberichte. Reihe 15 (Umwelt), Nr. 118. VDI Verlag, Düsseldorf 1994.
- [Simon, H.W.] Simon, H.-W.: "Sie köchelt noch". Entsorga-Magazin 26 (2007) Heft 9. S. 10-15.
- [Simon, F.G.] Simon, F.G.; Keldenich, K.: "Abfallwirtschaft im Spannungsfeld zwischen thermischer Behandlung und Recycling". Chemie Ingenieur Technik 84 (2012) Heft 7. S. 985-990.
- [Söhndel] Söhndel, B.: "Restmüllheizkraftwerk Böblingen". Abfallwirtschaftsjournal 7 (1995) Heft 3. S. 162-165.
- [Sotec] SOTEC GmbH: "TREA Breisgau. Thermische Restabfallbehandlungs- und Energieerzeugungsanlage Breisgau. Firmenschrift der Sotec GmbH. Flyer zur Anlage. Stand ca. 2006.
- [Stegemann] Stegemann, B.; Knoche, R.: "Emissionsminderung in der thermischen Abfallverwertung - Verfahren und Möglichkeiten der Rauchgasreinigung und Rückstandsbehandlung- Teil 1". Staub - Reinhaltung der Luft 52 (1992) S. 179-185.
- [Steinmüller] L. & C. Steinmüller: "NO_x-Reduction, Sekundärmaßnahmen". Firmenprospekt P9312-01-05/N1. Gummersbach ca. 1998.
- [Stöhr] Stöhr, M. (VGB Arbeitsgruppe N₂O): "N₂O in der Umwelt". VGB Kraftwerkstechnik 73 (1993) Heft 2. S. 160-171.
- [Stoffel] Stoffel, B.; Rüegg, H.: "Primäre NO_x Minderung bei Hausmüll-Rostfeuerungsanlagen durch Optimierung der Verbrennungsförderung". In: VDI (Hrsg.): "Verbrennung und Feuerungen. 19. Deutscher Flammentag". VDI Bericht 1492. S. 337-342. Tagung in Dresden, 14.-15. Sep. 1999. VDI Verlag, Düsseldorf 1999.
- [Strauß] Strauß, K. "Kraftwerkstechnik". 5. Auflage. Springer Verlag, Berlin 2006.
- [Tabasaran] Tabasaran, O.; Huber, H.D.: "Die thermische Abfallbehandlung auf Rostsystemen". Umweltpraxis 2 (2002) Heft 11. S.11-16.
- [Thiel] Thiel, S.: "Im Ländervergleich. Über Gemeinsamkeiten, Unterschiede und Kapazitäten von Ersatzbrennstoff-Kraftwerken in Deutschland und Österreich liegen aktuelle Daten vor". ReSource 26 (2013) Heft 1. S. 4-10.
- [Thomé-K.-1] Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Recyclinggesellschaft - Die Abfallrahmenrichtlinie stellt hohe Anforderungen". Resource 22 (2009) Heft 3. S. 4-11.
- [Thomé-K.-2] Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Verbrennung von Abfällen". S. 1031-1036. EF-Verlag, Berlin 1985.
- [thru.de] Umweltbundesamt. Homepage zum Schadstofffreisetzung- und -verbringungsregister PRTR. <http://www.thru.de>.

- [UBA 36 07] Theloke, J.; Jörß, W. et al.: "Maßnahmen zur Einhaltung der Emissionshöchstmengen der NEC-Richtlinie. Teil 1: Maßnahmen zur weiteren Verminderung der Emissionen an NO_x, SO₂ und NMVOC in Deutschland. Teil 2: Referenzszenario 2000 - 2020 für Emissionen unter der NEC-Richtlinie (SO₂, NO_x, NMVOC und NH₃)". Reihe UBA-Texte Nr. 36/07. Umweltbundesamt Dessau 2007.
- [UBA 37 07] Schärer, B. (Red.): "Luftreinhaltung 2010 – Nationales Programm zur Verminderung der Ozonkonzentration und zur Einhaltung der Emissionshöchstmengen. Programm gemäß § 8 der 33. BImSchV und der Richtlinie 2001/81/EG (NEC RL)". Reihe UBA-Texte Nr. 37/07. Umweltbundesamt Dessau 2007.
- [UBA 16 08] Fehrenbach, H.; Giegrich J.; Mahmud S.: "Beispielhafte Darstellung einer vollständigen, hochwertigen Verwertung in einer MVA unter besonderer Berücksichtigung der Klimarelevanz". Reihe UBA-Texte Nr. 16/08. Umweltbundesamt Dessau 2007.
- [UBA CC 08 13] Umweltbundesamt: "Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2013 Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2011". Reihe Climate Change, Ausgabe 8/2013, S. 122. Umweltbundesamt Dessau 2013.
- [UBA-Daten1] Umweltbundesamt: "Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen. 1990 - 2011 (Endfassung: 12.12.2012)". Emissionsentwicklung für klassische Luftschadstoffe. <http://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen>
- [UBA-Daten2] Umweltbundesamt: "Stickstoffdioxid (NO₂) im Jahr 2013". Jährliche Auswertung NO₂ - 2013. <http://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/stickstoffoxide>
- [UBA-MVA1] Umweltbundesamt (UBA): "Thermische, mechanisch-biologische Behandlungsanlagen und Deponien für Rest-Siedlungsabfälle in der Bundesrepublik Deutschland. 5. Auflage. Januar 2001.
- [UBA-MVA2] Umweltbundesamt. Aktuelle Liste der Abfallverbrennungsanlagen. Ohne Datum publiziert. Download Januar 2013. <http://www.umweltbundesamt.de>.
- [UBA-KW] Umweltbundesamt: "Kraftwerke in Deutschland ". Umweltbundesamt Dessau, August 2013.
- [UBA-SBK] Umweltbundesamt: "Thermische Behandlungsanlagen mit Ersatzbrennstoff (mittel und hochkalorische Fraktion) als hauptsächlichen Brennstoff". Umweltbundesamt Dessau, Dezember 2011.
- [V 166 2006] Verordnung (EG) Nr. 166/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Januar 2006 über die Schaffung eines Europäischen Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregisters und zur Änderung der Richtlinien 91/689/EWG und 96/61/EG des Rates. Amtsblatt der Europäischen Union, L 33/1, 04.02.2006.
- [VDI 3460] VDI Richtlinie 3460: "Emissionsminderung - Thermische Abfallbehandlung". März 2002.

- [VDI 3460-1] VDI Richtlinie 3460 Blatt 1: "Emissionsminderung - Thermische Abfallbehandlung - Grundlagen". Februar 2014
- [VDI 3476-3] VDI Richtlinie 3476 Blatt 3: "Abgasreinigung. Verfahren der katalytischen Abgasreinigung". Januar 2012
- [VDI 3927-1] VDI Richtlinie 3927 Blatt 1: "Abgasreinigung - Abscheidung von Schwefeloxiden, Stickstoffoxiden und Halogeniden aus Abgasen (Rauchgasen) von Verbrennungsprozessen". November 2000.
- [VDI 3950] "Emissionen aus stationären Quellen - Qualitätssicherung für automatische Mess- und elektronische Auswerteeinrichtungen". Dezember 2006.
- [VDI 4600] VDI Richtlinie 4600: "Kumulierter Energieaufwand (KEA) Begriffe, Berechnungsmethoden". Januar 2012.
- [Vehlow] Vehlow, J.: "Municipal Solid Waste Management in Germany". Waste Management 16 (1996) Heft 5/6. S. 367-374.
- [Vogg] Vogg, H.: "Stellung der Abfallverbrennung in der Abfallwirtschaft - Stand und Tendenzen". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Müllverbrennung und Umwelt 4". S. 1-13. EF Verlag, Berlin 1990.
- [Von Roll Inova] Von Roll Inova GmbH: "Entstickungsverfahren". Firmenschrift. Download von der Homepage 2007. <http://www.vonrollinova.ch>.
- [Wagner] Wagner, W.: "Wärmeträgertechnik mit organischen Medien". 6. Auflage. Dr. Ingo Resch Verlag, Gräfeling 1997.
- [Wahl] Wahl, D.J.; Seibel, G.: "Verringerung der Stickoxidemissionen in den kohle- und ölgefeuerten Kraftwerksblöcken der VKR mit katalytischen und nichtkatalytischen Verfahren". BWK 39 (1987) Heft 10. S. R44-R56.
- [Walk-1] Richers, U.; Walk, W.; Speck, V.: "Prozessübergreifende Bewertung von Entstickungstechniken der Abfallverbrennung vor dem Hintergrund der NEC-Richtlinie". In: VDI (Hrsg.): Bericht 2035 "Emissionsminderung 2008". S. 71-79. VDI Verlag, Düsseldorf 2008. Tagung in Nürnberg, 9.-10. April 2008.
- [Walk-2] Walk, W.; Richers, U.: "Überlegungen zur Energieeffizienz durch prozessübergreifende Betrachtung am Beispiel der Emissionsminderung von Stickoxiden". Chemie Ingenieur Technik 80 (2008) Heft 9. S. 1376. (Beitrag zur ProcessNet Jahrestagung 2008, Karlsruhe, 7. - 9. Oktober 2008).
- [Walk-3] Walk, W.; Richers, U.: "DeNOx bei der Abfallverbrennung vor dem Hintergrund der NEC-Richtlinie". In: Lorber, K.E. et al. (Hrsg.): "DepoTech 2008 - Abfallwirtschaft, Abfalltechnik, Deponietechnik und Altlasten". Tagungsband zur 9. DepoTech Konferenz, S. 661-664. Montanuniversität Leoben (Österreich), 12.-14. November 2008. VGE Verlag GmbH, Essen 2008.
- [Warnatz] Warnatz, J.; Maas, U.; Dibble, R.W.: "Verbrennung". 2. Auflage. Springer Verlag, Berlin 1997.
- [Waskov] Waskow, S.: "Anforderungen der Industrieemissionsrichtlinie der EU und Umsetzung im innerstaatlichen Recht in Bezug auf Kapitel I und II der Richtlinie". In: Thomé-Kozmiensky et al.: "Immissionsschutz. Band 2" S. 3-8. TK Verlag, Neuruppin 2011.

- [Werther] Werther, J.; Ogada, T.; Philippek, C.: "N₂O emissions from the fluidised-bed combustion of sewage sludges".
Journal of the Institute of Energy 68 (1995) S. 93-101.
- [Zeldovich] Zeldovich, J.: "The oxidation of nitrogen in combustion an explosions".
Acta Physicochimica U.R.S.S. 21 (1946) Nr. 4. S. 577-628.
Zitiert nach [Scholz].



Die europäische Richtlinie über Industrieemissionen fordert zukünftig die verbindliche Anwendung der besten verfügbaren Technologien für Umweltschutzmaßnahmen. In diesem Zusammenhang wurden in Deutschland die Grenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen herabgesetzt, so dass zusätzliche Maßnahmen mit einem erhöhten Ressourcenaufwand und Energiebedarf notwendig sind. Am Beispiel der Verfahren zur Stickoxidminderung wird ein sektorübergreifender Ansatz abgeleitet, der an Stelle einer Aufrüstung der Entstickungsverfahren an Abfallverbrennungsanlagen die Nutzung der effizienteren Technik an Kraftwerken in Form einer Dienstleistung vorsieht.