

HOK- und reststofffreie Abgasreinigung im Jahr 2013

Dipl.-Ing. Reinhard Schu
EcoEnergy Gesellschaft für
Energie- und Umwelttechnik mbH
Walkenried am Harz

Dipl.-Ing. Udo Seiler
Schwaben-ING Stuttgart GmbH
Stuttgart

30./31. Januar 2008
Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz
Vivis

Inhaltsverzeichnis

Kap. 0	Einleitung	3
Kap. 1	Emissionen der Abfallverbrennung	4
Kap. 1.1	Grenzwerte	4
Kap. 1.2	Dioxine und Furane	6
Kap. 1.3	Quecksilber	9
Kap. 1.4	NO _x und NH ₃	11
Kap. 1.5	Schwermetalle	13
Kap. 1.6	Feinstaub	13
Kap. 1.7	Reststoffe der Abgasreinigung	15
Kap. 2	Multifunktionale Abgaskatalyse	18
Kap. 2.1	Entstickung und NH ₃ -Reduktion	18
Kap. 2.2	Ionisation von Quecksilber	20
Kap. 2.3	Zerstörung von Dioxinen	21
Kap. 3	Entstaubung, Aschewäsche und nasse Abgasreinigung	21
Kap. 4	Vision Nullemission – ZEWTEC	25
Kap. 5	Zusammenfassung und Ausblick	29

Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Entwicklung der NEC-Schadstoffe [36].....	6
Bild 2:	Dioxinemissionsquellen in Deutschland zwischen 1990 und 2000 (Rückgang um den Faktor > 17) mit Anteil der Müllverbrennung.....	8
Bild 3:	Entwicklung des Quecksilbergehaltes im Abfall seit 1980	10
Bild 4:	Rückgang der Quecksilberemissionen aus MVA zwischen 1990 und 2001, nach [64]	11
Bild 5:	Aufteilung der globalen jährlichen NO _x -Emissionen nach [12]	12
Bild 6:	NO _x -Emissionen in Deutschland, nach [66]	12
Bild 7:	Reingaswerte MVA (KEZO= Kehrlichtverwertung Zürcher Oberland [7]).....	15
Bild 8:	FIUWA-Verfahren zur Flugaschewaschung der Firma von Roll Inova [8]	17
Bild 9:	Varianten SCR-Schaltung in der Abgasreinigung.....	18
Bild 10:	Schaltungsvarianten von SCR-Katalysatoren in Abfallverbrennungsanlagen [31] ..	19
Bild 11:	Ergebnisse mit SNCR und nach Zuschaltung der SCR in der ASM Brescia [5]...	20
Bild 12:	Körngößenverteilung Flugasche aus einer MVA [4]	22
Bild 13:	Fraktionsabscheidegrade von Staubabscheidern [51].....	22
Bild 14:	HOK- und reststofffreie Abgasreinigung mit Restwärmenutzung	23
Bild 15:	3-Stufige Abgaswäsche zur HCl, SO _x und Feinstaubreduktion, Multi-Venturi-System, von Roll Inova [69]	24
Bild 16:	Modulare Erweiterung zur CO ₂ -Abscheidung oder kompletten Abgaszerlegung zur Produktion von technischen Gasen	26
Bild 17:	OXYCOAL-AC Prozess mit Hochtemperaturmembran [32]	28
Bild 18:	CO ₂ -Sequestrierung [56]	29

Kap. 0 Einleitung

Die Anforderungen an die im Blickpunkt der Öffentlichkeit stehenden Abfallverbrennungsanlagen werden immer höher, obwohl schon heute die höchsten Emissionsstandards im Vergleich zu anderen Verbrennungsanlagen gestellt werden. Eine MVA ist schon lange keine Dioxinschleuder mehr, aber die Tatsachen werden von der Öffentlichkeit erst mit einem hohen Zeitverzug wahrgenommen. In Erörterungsterminen verhindern meist emotional geprägte Argumente den Genehmigungsfortschritt. Die Akzeptanz für die Abfallverbrennung ist in Deutschland noch wesentlich höher als in vielen anderen Ländern, so dass sich Anlagenbauer und Planer neben der reinen technischen Ausführung der Abgasreinigung zur Emissionsminimierung auch um die Akzeptanz der Technologie im Ausland bemühen müssen, um die Exportmöglichkeiten ihrer Technologien zu erhöhen. Die Entwicklung hin zu einer „Nullemissions“-Abfallverbrennungsanlage soll in diesem Beitrag untersucht werden. Als Emissionen werden gasförmige, flüssige und feste Emissionen betrachtet.

Technologisch ist eine „Nullemission“ nicht diskussionsfähig, da Techniker so korrekt sind, dass selbst kleinste, kaum messbare Spuren unterhalb der Grundbelastung benannt werden. Gleichzeitig wird der Begriff 17. BImSchV-Halbe diskutiert, wobei nur einzelne Grenzwerte reduziert wurden, niemals alle und auch nicht um die Hälfte und nicht durchgehend, sondern in Abwägung der technologisch zumutbaren Möglichkeiten und der öffentlichen Meinung. International werden im Bereich der Kohleverbrennung und -vergasung Begriffe wie ZEC Zero Emission Coal, ZECOTECH Zero Emission Combustion Technologies, ZECOMIX, ZET Zero Emission Technologies, ZECA Zero Emission Coal Alliance geprägt. Im technischen Sinn liegt hier natürlich keine „Nullemission“ vor, jedoch liegt die Emission trivialwissenschaftlich wesentlich näher an einer „Nullemission“ als bei der Begrifflichkeit „Emission“.

Die Prognose für die Emissionsentwicklung von Abfallverbrennungsanlagen ist vor dem Hintergrund der derzeitigen Genehmigungspraxis und Gesetzgebung klar in Richtung „Nullemission“ erkennbar. In dem aktuellen Entwurf der 37. BImSchV werden höhere Anforderungen an Abfallverbrennungsanlagen bzgl. der NO_x-Fracht gestellt als für andere Verbrennungsanlagen gleicher Leistungsgröße. Der Gesetzgeber begründet dies unter anderem mit der damit verbesserten Akzeptanz von Abfallbehandlungsanlagen. Kennzeichnend ist auch, dass Biomassekraftwerke nicht unter die Regelung der 37. BImSchV fallen sollen.

So ist es auch nicht verwunderlich, dass bei ökologisch angesehenen Technologien wie z. B. mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen MBA, Kompostierungsanlagen und Biogasanlagen mit ganz anderen Maßstäben Emissionsgrenzwerte festgelegt werden. Es ist eine Tatsache, dass die durchschnittliche MBA in der Gesamtbetrachtung eine höhere Abgasemission und Feststoffemission aufweist als eine durchschnittliche MVA. Die gesetzliche Regelung der Abgasemission einer Kompostierungsanlage wird aktuell an den üblichen Standard der Abgasemissionsminderung von Abfallbehandlungsanlagen angepasst. Dass die durchschnittliche Biogasanlage durch diffuse Methanemissionen mehr Treibhausgase - ohne Berücksichtigung der CO₂-Emission der Biomasse - emittiert als ein Braunkohlekraftwerk ist auch erst in jüngster Zeit diskutiert worden, obwohl der Sinn und Zweck der hohen Subventionierung nach dem EEG von Biomasse-Vergärungsanlagen in der Reduzierung von Treibhausgasen liegt. Regelungen zur Begrenzung der Methanemissionen von Biogasanlagen werden zurzeit getroffen. Bei der Biogasaufbereitung auf Erdgasqualität zur Einspeisung ins Erdgasnetz wurden bisher bis zu 4 % des Methans in die Umgebung als Abgas entlassen. Bei einem Äquivalenzfaktor von 21 zu CO₂ ergeben sich daraus 91 % CO₂-Emissionsäquivalente pro 100 % Biogas. Zur Verbesserung der Akzeptanz von Biogasaufbereitungsanlagen wurde eine Technologie entwickelt, die den Restmethangehalt reduziert, z. B. Zetech4® (Zero Emission Technology), die modular optional eingesetzt werden kann, um damit den Nullemissionscharakter zu unterstreichen.

Nur in der Abfallverbrennung hechelt man hinter dem Gesetzgeber hinterher, sowohl bei der Frage der Energieeffizienz als auch bei der Frage der Emissionsminderung.

Im Bereich der Grenzwertfestlegung in der Immissionsüberwachung von Abfallverbrennungsanlagen geht es schon lange nicht mehr um reale Immissionen. Die öffentliche Diskussion sollte daher mit Stereotypen wie „Nullemission“ geführt werden, die von der Öffentlichkeit verstanden werden.

Eine im Jahr 2013 erstellte Verbrennungsanlage sollte auch noch im Jahr 2030 betrieben werden können, ohne die Abgasreinigung komplett umzubauen.

Zur Vermeidung teurer Umbauten und Nachrüstungen im Bereich der Abgasreinigung sollte daher für neu zu bauende Abfallverbrennungsanlagen ein modulares Nullemissions-Abgasreinigungskonzept gewählt werden. Die zu installierenden Grundmodule sollten ohne Ausbau zur „Nullemission“ zu konventionellen Abgasreinigungsanlagen konkurrenzfähig sein.

Dieser Beitrag zeigt ein Abgasreinigungskonzept auf, das die heute bekannten Anforderungen der Emissionsminimierung, Ressourcenschonung, Energieeffizienz und sozialen Verträglichkeit bei wirtschaftlicher Vergleichbarkeit zu vorhandenen Systemen erfüllt und modular bis hin zur Nullemission erweiterbar ist.

Wir bezeichnen Abfallbehandlungsanlagen mit einer modular bis hin zu einer Nullemission erweiterbaren Abgasreinigungsanlage als „Zero Emission Waste-to-Energy Conversion“ – ZEWTEC.

Mit einer Nullemissions-Technik wird die Akzeptanz erhöht und die Standortwahl bemisst sich nach rein logistischen und wärmetechnischen Gesichtspunkten. Alleine über logistische Optimierung des Standortes und einer optimierten Wärmeauskopplung können ca. 20 - 30 €/t Abfall eingespart werden. Die zusätzlichen Kosten einer CO₂-Wäsche zur Legitimierung des Begriffs „Nullemission“ betragen < 10 €/t bei einem modularen Abgasreinigungskonzept. Ein offener Umgang mit der Akzeptanz zahlt sich aus.

Kap. 1 Emissionen der Abfallverbrennung

Kap. 1.1 Grenzwerte

Die bestehenden und im Jahr 2007 erneut vom Gesetzgeber bestätigten Werte der 17. BImSchV schreiben die in Tabelle 1 dargestellten Werte verbindlich als maximale Grenzwerte vor. Unabhängig von diesen gesetzlichen Mindestwerten wurden in verschiedenen Anlagen niedrigere Werte bei der Genehmigung beantragt. Bei fast allen Anlagen werden z. T. deutlich niedrigere Werte erreicht. Hier von ausgenommen ist in der Regel der Reingas-NO_x-Wert.

Tabelle 1: Entwicklung der Grenzwerte der TA Luft und 17. BImSchV

Schadstoff	TA-Luft 1974 [mg/Nm ³]	TA-Luft 1986 [mg/Nm ³]	17. BImSchV 1990 [mg/Nm ³]	17. BImSchV 1999 [mg/Nm ³]	37. BImSchV* 2007 Entwurf [mg/Nm ³]
Gesamtstaub	100	30	10	10	k.A.
Corg.	-	20	10	10	k.A.
HCl	100	50	10	10	k.A.
HF	5	2	1	1	k.A.
CO	1.000	100	50	50	k.A.
SO _x	-	100	50	50	-
NO _x	-	500	200	200	150 100
Cd, Tl	Kl. I: 20 Kl. II: 50 Kl. III: 50	Kl. I: 0,02	0,05	0,05	k.A.
Hg			0,05	0,03	k.A.
Sb, As, Pb, Cr, Cu, Co, Mn, Ni, V, Sn		Kl. II: 1 Kl. III: 5	0,5	0,5	k.A.
PCDD/PCDF	-	-	0,1 [ng/Nm ³]	0,1 [ng/Nm ³]	k.A.

Zusätzlich zu den Grenzwerten nach 17. BImSchV und 37. BImSchV ergeben sich weitere Grenzwerte nach TA Luft. Für Ammoniak ist ein Grenzwert von 20 mg/m³ mindestens einzuhalten, dieser Wert wird jedoch in Abhängigkeit von der Standortsituation und der Immissionsprognose meist noch weiter auf 10 mg/m³ abgesenkt. Weitere Begrenzungen ergeben sich meist aus den Irrelevanzkriterien nach Kapitel 4 TA Luft entsprechend Vorbelastung und Immissionsprognose.

Heute machen die Emissionen aus Abfallverbrennungsanlagen nur einen geringen Anteil an den Gesamtemissionen aus, obwohl in demselben Zeitraum auch die Gesamtemissionen an diesen Schadstoffen stark zurückgegangen sind.

Tabelle 2: Anteil der Abfallverbrennung an den Gesamtemissionen

Schadstoff	Anteil der Abfallverbrennung
SO _x	< 0,15 %
NO _x	< 0,2 %
Dioxine und Furane	< 0,9 %
Quecksilber	< 0,01 %
Feinstaub	< 0,2 %

Trotz der niedrigen Emissionen von Abfallverbrennungsanlagen gilt es übergeordnet, die seit 1960 identifizierten Schädigungen der Umwelt durch Versauerung, Eutrophierung und Bildung bodennaher Ozons durch die Schadstoffe SO₂, NO_x, NH₃ und NMVOC (flüchtige organische Verbindungen ohne Methan) zu begrenzen.

Die Einhaltung der NEC-Richtlinie 2001/81/EG legt nationale Emissionshöchstmengen (national emission ceilings – NECs) für die Luftschadstoffe SO₂, NO_x, NH₃ und NMVOC fest, die bis zum Jahre 2010 einzuhalten sind.

Tabelle 3: Nationale Höchstmengen der Emissionen bis 2010 nach 2001/81/EG

Land	SO ₂ [1.000 t/a]	NO _x [1.000 t/a]	NMVOC [1.000 t/a]	NH ₃ [1.000 t/a]
Österreich	39	103	159	66
Belgien	99	176	139	74
Dänemark	55	127	85	69
Finnland	110	170	130	31
Frankreich	375	810	1.050	780
Deutschland	520	1.051	995	550
Griechenland	523	344	261	73
Irland	42	65	55	116
Italien	475	990	1.159	419
Luxemburg	4	11	9	7
Niederlande	50	260	185	128
Portugal	160	250	180	90
Spanien	746	847	662	353

Schweden	67	148	241	57
Vereinigtes Königreich	585	1.167	1.200	297
EG 15	3.850	6.519	6.510	3.110

In der folgenden Abbildung ist die Entwicklung der NEC-Schadstoffe aufgezeigt. Nach den UBA-Prognosen können bis 2010 die Emissionshöchstmengen für SO₂ und NMVOC bereits durch in der Vergangenheit beschlossene Maßnahmen eingehalten werden. Für NO_x und NH₃ reichen die in der Vergangenheit beschlossenen Maßnahmen zum Einhalten der Emissionshöchstmengen noch nicht aus. Es sind zusätzliche Bestimmungen in Form der 37. BImSchV bezogen auf Abfallverbrennungsanlagen erforderlich.

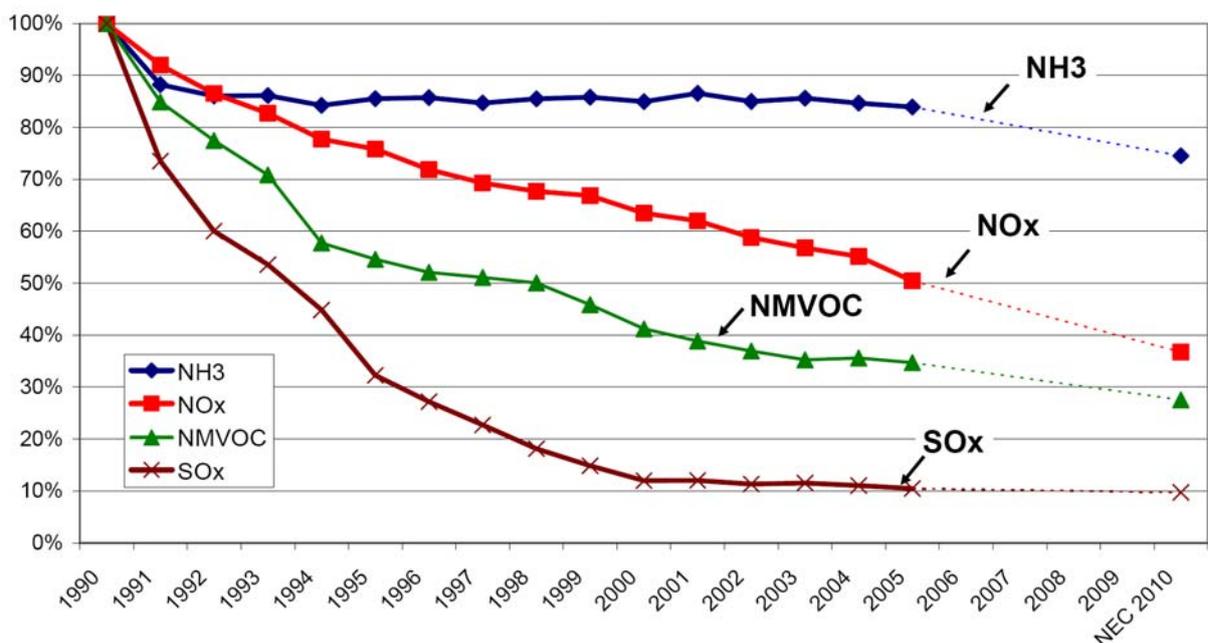


Bild 1: Entwicklung der NEC-Schadstoffe [35]

Entscheidend für die Analyse der Konsequenz der 37. BImSchV auf die Abgasreinigungstechnik ist das Fehlen eines NH₃-Grenzwertes sowohl in der 17. BImSchV als auch der 37. BImSchV. Die Autoren gehen von einer zukünftigen Genehmigungspraxis aus, dass ein Grenzwert von 10 mg/Nm³ praktisch einzuhalten ist, unabhängig vom Standort.

Kap. 1.2 Dioxine und Furane

Seit Mitte der 80er Jahre wurden Diskussionen über die Toxizität von Dioxinen und Furanen wegen den verbesserten analytischen Nachweismöglichkeiten geführt. Im Zuge von zahlreichen Untersuchungen zu Bildungsmechanismen und Herkunft von Dioxinen und Furanen (PCDD/F) wurden die Abfallverbrennung sowie die Sekundärmetallindustrie als Hauptquellen identifiziert.

Auf Grund der außerordentlich hohen Toxizität von PCDD/F beschloss der Bundesgesetzgeber relativ schnell drastische Maßnahmen zur deutlichen Verringerung der Emissionen an PCDD/F. Als Folge sanken binnen weniger Jahre die Gesamtemissionen an PCDD/F in Deutschland drastisch (siehe Tabelle 5).

Für die Abfallverbrennung wurde Anfang der 90er Jahre die 17. BImSchV mit einem PCDD/F-Grenzwert von 0,1 ng TE/Nm³ beschlossen, der ab Ende 1996 auch für Altanlagen galt.

Dieser Grenzwert konnte in Folge der Anpassungen der MVA besonders durch einzuhaltende Mindestverbrennungstemperaturen und Mindestverweilzeiten der Rauchgase, die sich daraus konsequenterweise ergebende Veränderung der Feuerungsführung sowie durch Abscheidung bzw. Zerstörung der PCDD/F in der Rauchgasreinigung nicht nur eingehalten, sondern im Mittel um den Faktor 30 deutlich unterschritten werden.

Bereits durch die Primärmaßnahme Mindestverbrennungstemperaturen und Mindestverweilzeiten der Rauchgase sowie optimierte „Feuerungsführung“ in Form einer effektiven Feuerungsleistungsregelung wurde der Ausbrand der Rauchgase deutlich verbessert. So konnte der Gehalt an höherkettigen Kohlenwasserstoffen und hier besonders der Präkursoren (Dioxinvorläufer) drastisch reduziert werden. Durch das Fehlen der Präkursoren konnte die Neubildung von Dioxinen beim Abkühlen der Rauchgase deutlich reduziert werden.

Dies in Verbindung mit einer wesentlich effektiveren Rauchgasreinigung mit Abscheidung der Restdioxingehalte an Aktivkohlen / Aktivkoks bzw. deren Zerstörung an Katalysatoren führte dazu, dass die durch die Abfallverbrennung verursachten Dioxinmissionen binnen 5 Jahren um den Faktor 1.000 zurückgingen.

Der Anteil der MVA an den PCDD/F-Emissionen in Deutschland sank von 33 % im Jahr 1990 auf unter 0,9 % im Jahr 2000 – und dies bei einem wesentlich geringeren Gesamtemissionsniveau.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Dioxinmissionen von deutschen MVA zwischen 1990 und 2000 aufgeführt. Man erkennt deutlich den Rückgang der Emissionen sowie die deutliche Unterschreitung des Grenzwertes der 17.BImSchV von 0,1 ng TE/m³.

Tabelle 4: Dioxin-Emissionen deutscher MVA seit 1980 [3], [43], [13]

Jahr	Anlage	Emissionen [ngTE/m ³]
1980	<i>geschätzt</i>	10 bis 100
1990	<i>gemessen</i>	1 bis 10
1998	MVA Weisweiler	0,0012
	MVR Hamburg	0,003
	MVA Ruhleben	0,0035

Die Müllverbrennung ist heute unter den im Jahr 1990 identifizierten Hauptemittenten die mit Abstand unbedeutendste Dioxinquelle. Nachfolgende Tabelle und Abbildung zeigen dies im Überblick.

Tabelle 5: Dioxin-Emissionsquellen in Deutschland, jährliche Emissionen an Dioxin in g TE [66]

Dioxinquelle	Emissionen pro Jahr in g TE/a		
	1990	1994	2000 (UBA)
Metallgewinnung und –Verarbeitung	740	220	40
Müllverbrennung	400	32	< 0,5
Kraftwerke	5	3	< 3
Industrielle Verbrennungsanlagen	20	15	< 10
Hausbrandfeuerstätten	20	15	< 10
Verkehr	10	4	<1
Krematorien	4	2	< 2
Gesamtemission Luft	1.200	330	<< 70

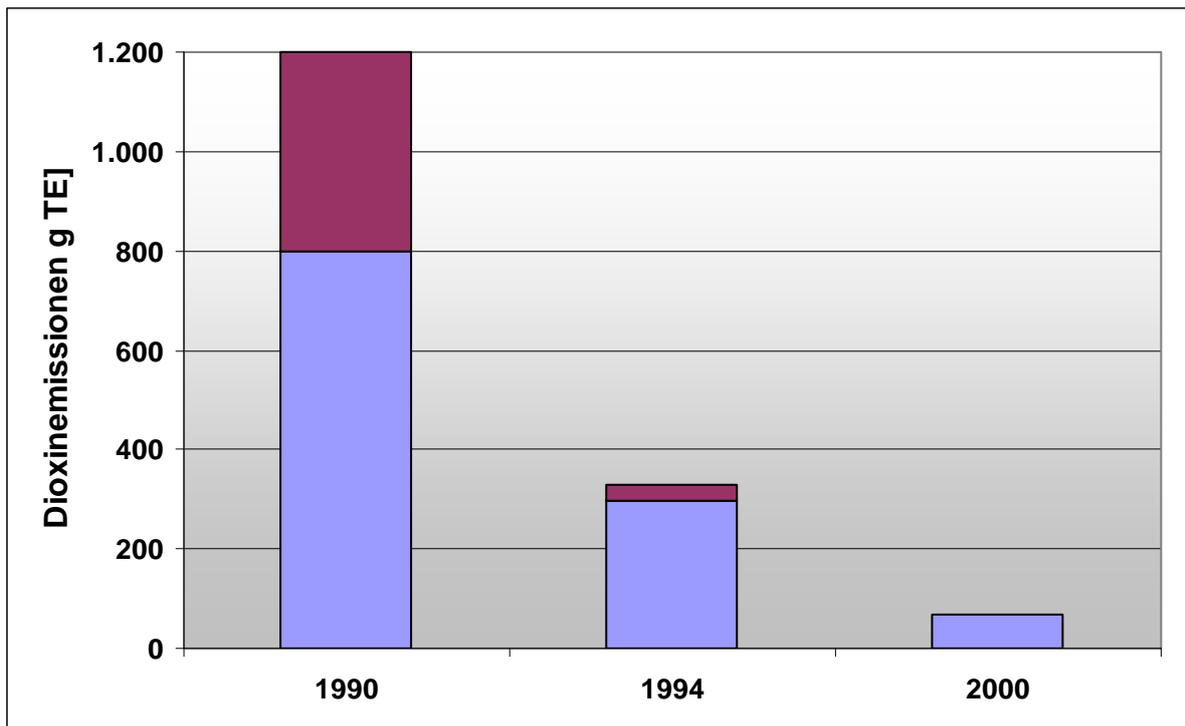


Bild 2: Dioxinmissionsquellen in Deutschland zwischen 1990 und 2000 (Rückgang um den Faktor > 17) mit Anteil der Müllverbrennung

Neben den Dioxin- und Furan-(PCDD/F)-Emissionen ist auch die Belastung der Bevölkerung zurückgegangen.

Die Arbeitsgruppe Dioxin der Uni Bochum konnte bereits für Mitte der 90er Jahre zeigen, dass die PCDD/F-Hintergrundbelastung innerhalb Deutschlands stark rückläufig ist. Die PCDD/F-Konzentrationen im Milchfett sind von 32,5 TE pg/g Fett im Jahre 1987 auf 16,0 TE pg/g Fett im Jahre 1995 gesunken [21][57]. 2002 wurden mit Mittel sogar nur 12 TE pg/g Fett ermittelt. Angesichts der deutlich rückläufigen PCDD/F-Emissionen ist heute von noch geringeren Belastungen mit sinkender Tendenz auszugehen. Für die Rauchgasreinigungstechnik gilt weiterhin das Schadstoffminimierungsgebot.

Sind Rauchgastemperaturen von 1.100 °C über 2 sec. nach 17. BImSchV bei > 1 % Chlor im Abfall erforderlich?

Bei MVA oder EBS-Kraftwerken handelt es sich um Abfallbehandlungsanlagen, keine Sonderabfallbehandlungsanlagen. In der Abfallbehandlungsanlage werden überwachungsbedürftige Abfälle eingesetzt, keine besonders überwachungsbedürftigen Abfälle.

Für die Verbrennung von Abfällen wird in der BImSchV 17 § 4 Feuerung die Verbrennungsbedingungen geregelt:

„(2) Verbrennungsanlagen sind so zu errichten und zu betreiben, dass die Temperatur der Verbrennungsgase, die in Verbrennungsanlagen bei der Verbrennung von Abfällen oder Stoffen nach § 1 Abs. 1 entstehen, nach der letzten Verbrennungsluftzuführung mindestens 850 Grad C (Mindesttemperatur) beträgt. Bei der Verbrennung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen mit einem Halogengehalt aus halogenorganischen Stoffen von mehr als 1 vom Hundert des Gewichts, berechnet als Chlor, hat der Betreiber dafür zu sorgen, dass eine Mindesttemperatur von 1100 Grad C eingehalten wird.“

Die „mit“ Verknüpfung – besonders überwachungsbedürftige Abfälle mit 1 % chlororganischen Stoffen - ist hier wesentlich für das Verständnis des Gesetzestextes. Schon seit Jahren werden Müllverbrennungsanlagen mit mehr als 1 % chlororganischen Stoffen betrieben und genehmigt. Unbekannt ist

heute leider, mit welchem Chlorgehalt MVA's betrieben werden, da es in einer MVA kaum eine Input-überwachung gibt.

Erhöhte Gehalte an karzinogenen und toxischen Schadstoffen wie Aromaten, speziell PCP und PCB, die ebenfalls zu den halogenorganischen Stoffen gehören, sind für nicht überwachungsbedürftige Abfälle ausgeschlossen, da es sich sonst um besonders überwachungsbedürftige Abfälle handeln würde, die jedoch entsprechend Positivkatalog bei MVA und EBS-Kraftwerken ausgeschlossen sind, soweit der Chlorgehalt 1 %, bezogen auf die Sonderabfälle, übersteigen würde.

Es ist von Seiten des Gesetzgebers nachzuvollziehen, bei besonders überwachungsbedürftigen Abfällen, die bereits einen Wert von 1 % an halogenorganischen Verbindungen aufweisen, nicht mehr zwischen PCP, PCB oder Dioxinen zu unterscheiden, sondern im Sinne der Vorsorge gleich eine höhere Verbrennungstemperatur zur sicheren Zerstörung der toxischen organischen Schadstoffe zu verlangen.

Verschiedene Studien belegen, dass PVC in der Müllverbrennung die Bildung von Dioxinen und Furanen nicht begünstigt, sondern sogar den Ausbrand von Feststoffen und Gasen positiv beeinflusst [64]. Die entscheidenden Faktoren bei der Entstehung von PCDD und PCDF sind vielmehr die Anlagenauslegung, die Verbrennungsbedingungen und das Abkühlverhalten der Rauchgase.

Weder das erhöhte Chlor-Angebot, noch größere Mengen eventuell als Pigmente vorliegender Kupfer-Verbindungen haben eine signifikante Auswirkung auf die Bildung chlorierter organischer Verbindungen. Insbesondere für PCDD und PCDF konnte selbst bei fünffach erhöhter Chlor-Fracht keine Erhöhung der Konzentrationen für PCDD und PCDF im Rauchgas ermittelt werden, so die zusammenfassende Bewertung vom Forschungszentrum Karlsruhe [54].

Kap. 1.3 Quecksilber

Quecksilber wurde bereits in den 60er Jahren als Nervengift identifiziert. Als Folge wurde zunächst die technische Anwendung von Quecksilber reduziert (keine Hg-Schalter mehr) und schließlich seit Mitte der 80er Jahre ganz eingestellt.

Heute gibt es weder Quecksilberthermometer zu kaufen, noch quecksilberhaltige Batterien. Der Verzicht auf Quecksilber kann daher als ein bedeutender Erfolg der Umwelterziehung in Deutschland angesehen werden.

Der Verzicht auf Quecksilber in der Produktion hat mittlerweile auch Auswirkungen auf die Quecksilbergehalte im Abfall. Bild 3 zeigt exemplarisch die Quecksilberbelastung von Hausmüll seit 1985. Für andere Abfallarten - besonders für Gewerbeabfall und damit auch für Ersatzbrennstoffe – kann von einer ähnlichen Entwicklung ausgegangen werden.

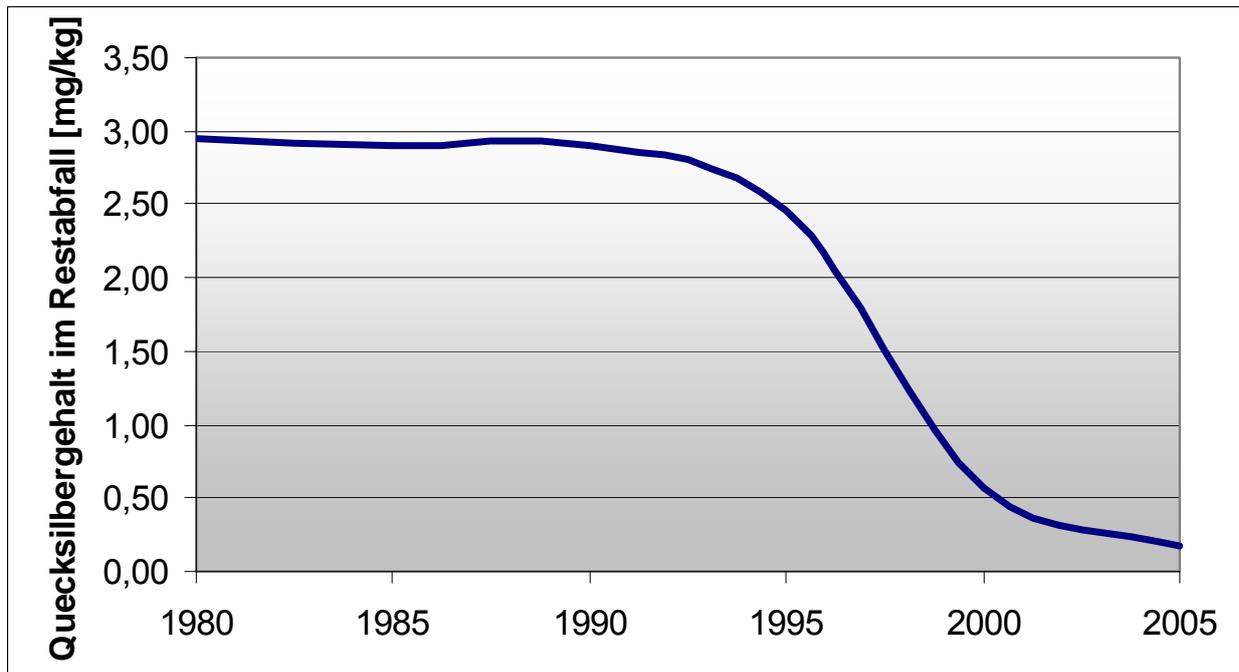


Bild 3: Entwicklung des Quecksilbergehaltes im Abfall seit 1980

Das leicht flüchtige Quecksilber ist Bestandteil des zu verbrennenden Abfalls und gelangt durch den Verbrennungsprozess quantitativ ins Rauchgas. Quecksilberemissionen sind daher nicht von der Verbrennungsführung abhängig und teilweise auch nicht an die Staubemissionen gekoppelt.

Zur Entfernung von Quecksilber aus dem Rauchgas muss neben einer sehr effektiven Staubabscheidung auch eine absorptive Stufe in der Rauchgasreinigung zur Entfernung von gasförmigem Quecksilber vorhanden sein. Dies geschieht z. B. im Falle einer nassen Rauchgasreinigung in der ersten sauren Wäscherstufe (Vorwäscher), indem das gasförmige Quecksilber in Quecksilberchlorid umgewandelt und dann abgedehnt wird.

Alternativ bzw. ergänzend wird Quecksilber mittels Aktivkohle bzw. -Herdofenkoks quantitativ aus dem Rauchgas entfernt. Das beladene Adsorbens wird mittels Gewebefilter („Totalfilter“) aus dem Rauchgas abgedehnt. Gewebefilter arbeiten besonders bei Feinstäuben deutlich effektiver als die bis Anfang der 90er Jahre in MVA eingesetzten E-Filter. Die Gesamtstaubemissionen aus MVA und mit ihnen die Emissionen an weiteren Schwermetallen sind drastisch zurückgegangen.

Durch die effektive Rauchgasreinigung und durch den Rückgang der Quecksilbergehalte im Abfall gelingt es, den sehr niedrigen Grenzwert der novellierten 17. BImSchV von 0,03 mg/m³ um den Faktor 5 bis 20 zu unterschreiten. Dies führt zu einer deutlichen Verringerung der Gesamtemissionen. Wurden 1990 aus MVA noch 347 kg Quecksilber emittiert, gingen die Werte auf 4,5 kg (1,3 % der Ausgangsemmissionen) im Jahr 2001 zurück. Damit sind die Quecksilberemissionen aus der Verbrennung von Hausmüll für die Schadstoffbelastung des Menschen irrelevant. Die Quecksilberemissionen aller Verursacher – vom Auto bis zum Heizkraftwerk – betragen laut UBA 31.000 kg [63]. Damit tragen MVA und Ersatzbrennstoffkraftwerke heute nur zu 0,01 % an den Gesamtquecksilberemissionen bei. Dies wird von den Genehmigungsbehörden durch kontinuierliche Messungen überwacht.

Tabelle 6: Quecksilber-Gesamtemissionen und Emissionen deutscher MVA 2001, nach [56]

Bezugsjahr	Gesamtemissionen Deutschland	Emissionen MVA
1990	nicht bekannt	0,347 t/a
2001	31 t/a	0,005 t/a

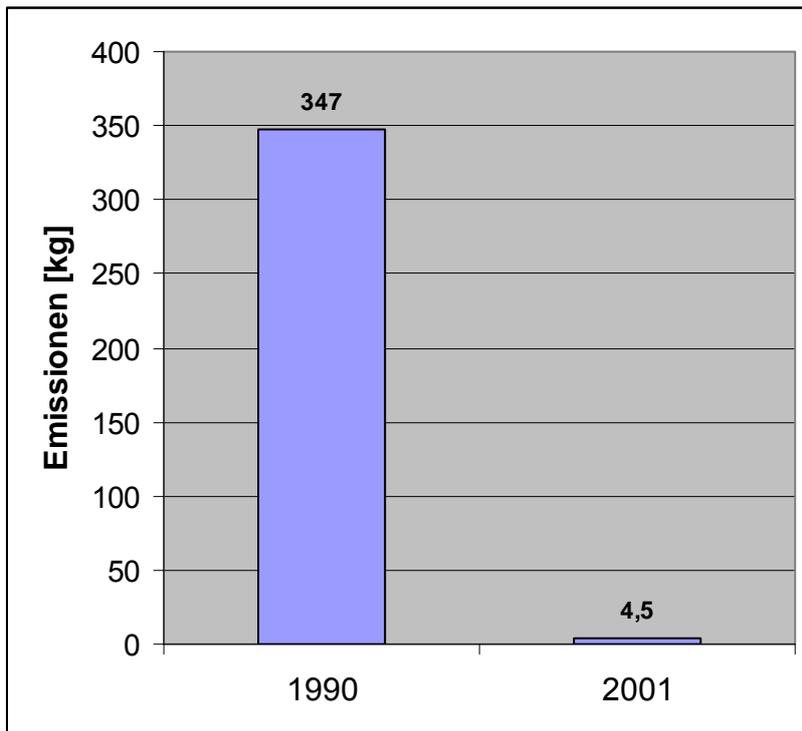


Bild 4: Rückgang der Quecksilberemissionen aus MVA zwischen 1990 und 2001, nach [63]

Kap. 1.4 NO_x und NH₃

Stickstoffoxide NO und NO₂, ihre Summe wird als NO_x bezeichnet, bilden sich aus dem Stickstoff der Luft, der bei lokalen Temperaturspitzen im Brennraum mit Sauerstoff reagiert.

Es gelingt, durch eine moderne Feuerungsleistungsregelung im Rohgas einen Stickoxidgehalt von

- 250 mg/Nm³ bei der Verbrennung von Ersatzbrennstoffen und
- 300 bis 350 mg/Nm³ bei der Verbrennung von Hausmüll

zu erreichen. Die SNCR muss dann „nur“ noch Reduktionsraten von etwa 50 % erreichen, was den Betriebsmittelverbrauch sowie den Ammoniakschlupf reduziert. Mittels SNCR und einem NH₃-Grenzwert von 10 mg/Nm³ sind Grenzwerte für NO_x von 150 mg/Nm³ gesichert einhaltbar.

Ein Grenzwert von 100 mg/Nm³ ist mit einem SNCR Verfahren unter Einhaltung eines NH₃ Grenzwertes von 10 mg/Nm³ nicht gesichert einhaltbar. Ein solcher Grenzwert ist wirtschaftlich nur mittels Katalysator (SCR) erreichbar.

NH₃-Emissionen aus der Abfallverbrennung resultieren fast ausschließlich aus nicht verbrauchtem Betriebsmittel - NH₃-Schlupf - aus der Entstickung.

Die Begründung der Reduzierung der Gesamtfrachten an NO_x und NH₃ hängt mit der Versäuerung, Eutrophierung und der Entstehung von bodennahem Ozon zusammen. Mit dem weiteren Abschalten von Kernkraftwerken ist bis 2020 eine Erhöhung der Energieerzeugung aus Verbrennungsprozessen verbunden, die eine zusätzliche NO_x-Fracht bewirkt. Im Entwurf der 37. BImSchV wird für Neuanlagen eine maximale Jahresemission vorgeschrieben. Für Abfallverbrennungsanlagen würden sich danach folgende Jahresmittelwerte ergeben:

- 150 mg/m³ für Anlagen 50 MW bis 100 MW
- 100 mg/m³ für Anlagen > 100 MW

bei gleichzeitige Einhaltung von ca. 10 mg/m³ NH₃. In Bild 5 sind die globalen jährlichen NO_x-Emissionen aufgeführt.

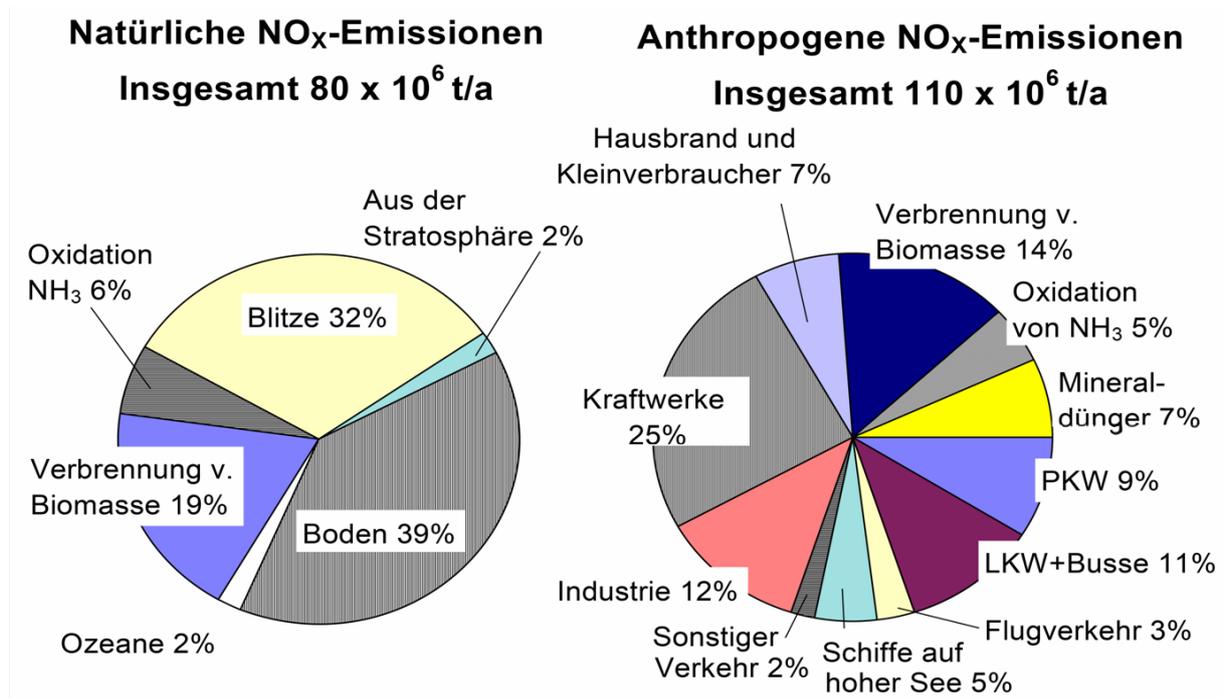


Bild 5: Aufteilung der globalen jährlichen NO_x-Emissionen nach [11]

Gerade vor dem Hintergrund der erheblichen NO_x-Reduktionen im Verkehrssektor seit 1996 und weiterer Maßnahmen auch für Lkw und Dieselfahrzeuge ist ersichtlich, dass der Kraftwerkssektor einen Beitrag leisten muss. Die folgende Grafik verdeutlicht, dass zwar in anderen Bereichen seit 1990 die Emissionen gesenkt wurden, die NO_x-Reduzierung im Kraftwerkssektor seit 1995 jedoch stagniert.

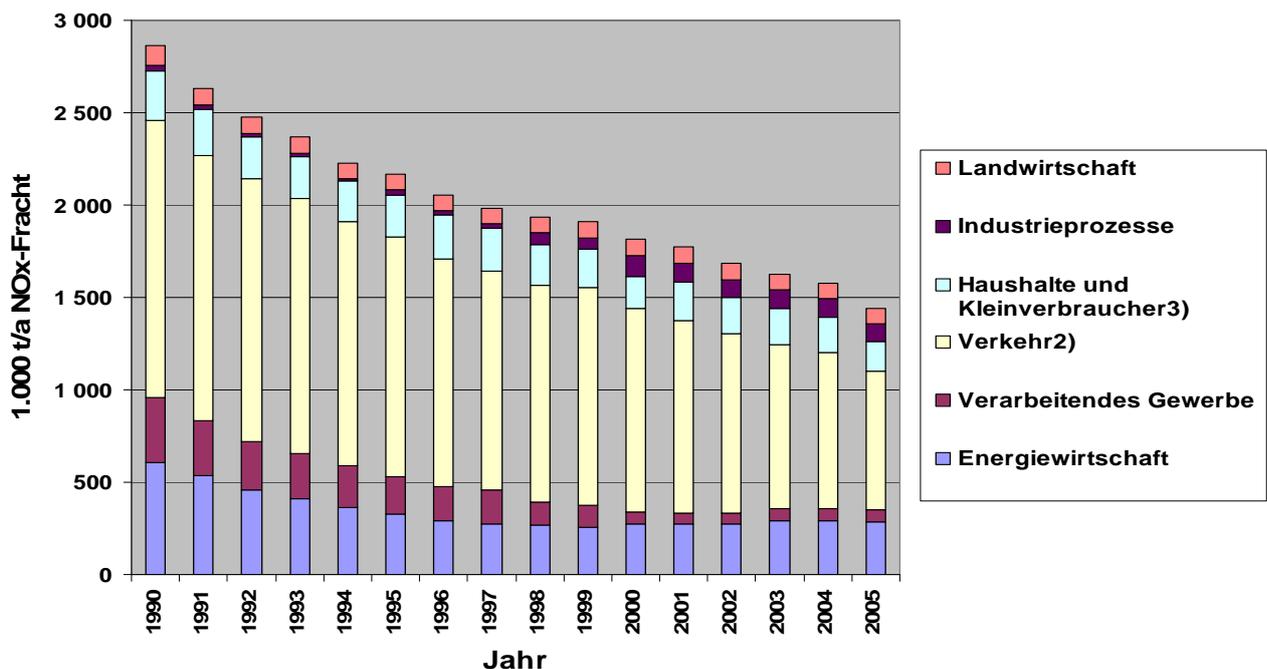


Bild 6: NO_x-Emissionen in Deutschland, nach [65]

Die vom Straßenverkehr verursachten Emissionen sind in den letzten Jahren in allen Bereichen drastisch gesunken und werden in den nächsten Jahren noch weiter reduziert

Kap. 1.5 Schwermetalle

Die meisten Schwermetalle, die in Müllverbrennungsanlagen auftreten, werden entweder mit der Schlacke zum größten Teil eluatfest ausgetragen oder sind an Partikel gebunden, die sich wiederum durch Kondensation und Sublimation im Filterstaub anreichern. Dieser Effekt lässt sich durch eine wirkungsvolle Entstaubung zur Schwermetallausschleusung nutzen. Nur das leichtflüchtige Quecksilber erfordert eine Feinreinigung mittels geeigneter Additive, die in der Regel aus HOK, Aktivkohle oder saurem Wäscher bestehen.

In Bezug auf Schwermetalle haben Chloride einen positiven Nebeneffekt: Sie sind als Transportmedien zur besseren Mobilisierung und Abscheidung von Schwermetallen bei hohen Verbrennungstemperaturen vorteilhaft [52]. Auf diese Weise verbessert PVC die Qualität von Schlacken, indem es die Schwermetalle auf den mengenmäßig kleinen Anteil der Rauchgasreinigungsrückstände konzentriert. Die ca. 300 kg Schlacke pro Tonne Müll werden im Regelfall verwertet, die rund 25 kg Reste aus der Rauchgasreinigung pro Tonne Müll werden zur Zeit noch als Sonderabfall behandelt bzw. Untertage als Bergeversatz nach Bergrecht verwertet. Schwermetallemissionen liegen heute bei Abfallbehandlungsanlagen << 10 % der Grenzwerte 17. BImSchV, bei separater Betrachtung der Quecksilberemission.

Kap. 1.6 Feinstaub

Feinstaub besteht aus Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser $\leq 10 \mu\text{m}$ (PM10; PM = particulate matter) und $\leq 2,5 \mu\text{m}$ (PM2,5). Epidemiologische Untersuchungen haben gezeigt, dass feine Staubpartikel in der Umgebungsluft Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben können, da sie lungengängig sind. Deshalb wurden in der EU-Richtlinie 1999/30/EG (Richtlinie über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft) erstmals Immissionsgrenzwerte für PM10 festgelegt. Die Grenzwerte der ersten Stufe der EU-Richtlinie wurden in der 22. BImSchV in Deutsches Recht umgesetzt und sind seit dem Januar 2005 einzuhalten.

Die wesentlichen Quellen für Feinstaub sind in der nachfolgenden Tabelle als Prognose für 2010 aufgeführt. Abfallverbrennungsanlagen bzw. EBS-Kraftwerke sind bei den industriellen Produktionsprozessen enthalten. Sie machen nur einen Bruchteil der Gesamtemissionen an Feinstaub aus.

Tabelle 7: Prognose der Feinstaub-Gesamtemissionen für 2010 [49]

Quellgruppe	PM10 [1.000 t]		PM2,5 [1.000 t]	
	absolut	anteilig	absolut	anteilig
Straßenverkehr	24	11 %	16	13,5 %
Aufwirbelung Straßenstaub	28	13 %	7,1	6 %
sonstiger Verkehr	30	13,5 %	26	21,5 %
Kleinfeuerungen	24	11 %	22	18 %
Kraft- und Heizwerke	12	5,5 %	9,8	8 %
industrielle Produktionsprozesse	67	31,5 %	27	22,5 %
Sonstiges	32	14,5 %	13	10,5 %
Summe	217	100 %	120,9	100 %

Die geringe Relevanz der Abfallverbrennung für die Feinstaubemissionen zeigen auch Untersuchungen aus Nordrhein-Westfalen. Hier wurden vom Landesumweltamt die Feinstaubemissionen der ge-

genehmigungsbedürftigen Anlagen nach BImSchG ermittelt. Die genehmigungsbedürftigen Anlagen sind zusammen für weniger als 1/3 der Gesamtemissionen an Feinstaub verantwortlich.

An diesem Drittel an Feinstaubemissionen sind alle Abfallbehandlungsanlagen inkl. der MVA und EBS-Kraftwerke zu nur etwa 0,4 % beteiligt. Dies bedeutet, die Relevanz der Abfallverbrennungsanlagen an den gesamten Feinstaubemissionen beträgt nur etwa 0,1 % bis 0,2 %. Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse aus Nordrhein-Westfalen.

Tabelle 8: Feinstaubemissionen genehmigungsbedürftiger Anlagen NRW [36]

Anlagenart 4. BImSchV	Feinstaubemissionen aus gefassten Quellen	
	absolut [t/a]	relativ [%]
01 Energieerzeugung	5.985	40,2
02 Steine und Erden	3.345	22,4
03 Eisen und Stahl	3.445	23,1
04 Chemie	1.362	9,1
05 Oberflächenbehandlung	109	0,7
06 Holz	251	1,7
07 Nahrungsmittel	275	1,8
08 Abfallbehandlung inkl. MVA	52	0,4
09 Lagerung von Stoffen	46	0,3
10 Sonstiges	35	0,2
Summe	14.905	100

Die Feinstaubemissionsquelle „Abfallverbrennungsanlage“ ist auch deshalb so unbedeutend, weil effektive Aggregate zur Entstaubung eingesetzt werden.

Durch die effektive Staubabscheidung sind die Gehalte an Feinstaub im Rauchgas einer Abfallverbrennungsanlage sogar oft geringer als die angesaugte Verbrennungsluft aus einer Großstadt. Dies jedenfalls zeigen Untersuchungen des Anlagenbauers von Roll sowie der Universität Zürich [6]. Nachfolgende Abbildung zeigt dies. Die thermische Abfallbehandlung ist daher keine relevante Quelle für Feinstaub.

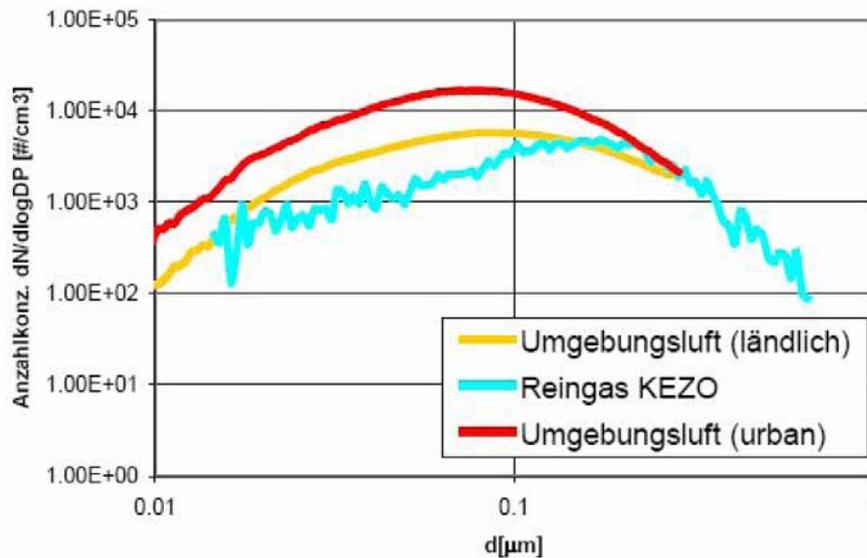


Bild 7: Reingaswerte MVA (KEZO= Kehrrechtverwertung Zürcher Oberland) [7]

Vor dem Hintergrund weitreichender Regelungen in allen Bereichen, nicht zuletzt der Diskussion über die Installation von Filtern in Hausbrandanlagen, wird auch die Abfallbehandlung weiterhin den Weg der Emissionsminimierung gehen.

Kap. 1.7 Reststoffe der Abgasreinigung

Bei der Abfallverbrennung fallen neben der Rost- und Kesselasche zusätzlich Flugstäube und flüssige oder feste Reststoffe in der Abgasreinigung an.

Mit Inkrafttreten des KrW-/AbfG September 1994 ist der Begriff Reststoffe durch die Formulierungen „Abfälle zur Verwertung“ bzw. „Abfälle zur Beseitigung“ ersetzt worden. In diesem Beitrag wird aufgrund der diskutierten Scheinverwertung von Flugstäuben der Begriff „Reststoffe“ verwendet, wenn kein Recycling entsprechend der in Abstimmung befindlichen EU-Abfallrahmenrichtlinie erfolgt.

Die EU-Kommission hat das von ihr gegen Deutschland im Jahre 1998 eingeleitete Vertragsverletzungsverfahren wegen der Verwertung von Abfällen im Bergbau 2003 eingestellt. Nach der seit 24. Juli 2002 geltenden Versatzverordnung dürfen schadstoffhaltige Abfälle nur noch in Salzbergwerken genutzt werden. Enthalten Abfälle Metalle wie Zink, Blei, Kupfer, Zinn, Chrom, Nickel und Eisen, müssen diese vorrangig recycelt werden, soweit dies technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist.

Filterstäube aus der Siedlungsabfall- und Sonderabfallverbrennung wurden in der Vergangenheit mit hohen Schadstoffgehalten in Bergwerken eingesetzt, die nicht in trockenen Salzgesteinsformationen den dauerhaften Abschluss von der Biosphäre gewährleisten können. Im Vergleich zu den Anforderungen an die Beseitigung von Sonderabfällen in UTD hinsichtlich des Anforderungsniveaus an den Schutz der Umwelt war diese Form der Verwertung neu zu betrachten.

Flugstäube aus MVA werden heutzutage überwiegend als Bergversatz verwertet, wobei diese Entsorgung eher einer Untertagedeponierung gleicht. Die Filterstäube aus MVA können in Europa nur in Deutschland verwertet werden. Der Bergversatz von Sonderabfällen ist nur in Deutschland rechtlich als Verwertung erlaubt, in keinem anderen Land Europas.

Als Bergversatzmaterial wurden 2005 ca. 2,2 Mio. t Abfälle verwendet. Davon sind ca. 59 % (ca. 1,3 Mio t) gefährliche Abfälle. Das entspricht ca. 7 % des Gesamtaufkommens gefährlicher Abfälle (18,5 Mio t) in Deutschland. Daneben werden Filterstäube aus MVA aus Frankreich, Dänemark, Holland, Österreich, Luxemburg, Italien, Schweiz und aus noch anderen europäischen Ländern in Deutschland verwertet.

Bis Mitte der 90er Jahre wurden in Deutschland noch Entsorgungspreise von 400 - 600 DM/t Flugstaub gehandelt. Das war die Phase der Erprobung von Einschmelzverfahren. In dieser Zeit wur-

den Verfahren wie das Schwel-Brenn-Verfahren, Noell-Konversionsverfahren, Thermoselect-Verfahren und VEBA mit integrierter Einschmelzung aller Aschen, sowohl Rostschlacken als auch Kesselaschen und Filterstäube angeboten.

Daneben wurden noch eine Reihe spezifischer Einschmelzverfahren entwickelt, um die Qualitäten aller oder ausgewählter Rückstände von anderen thermischen Anlagen zu verbessern und auf das Niveau von Schmelzgranulat zu bringen:

- Elomelt-("Redmelt")Verfahren (Einschmelzung im elektrischen Lichtbogen)
- Fosmelt-Verfahren (Einschmelzung in brennstoffbeheizter Glaswanne)
- Lusor-Verfahren (Einschmelzung in elektrisch beheizter Glaswanne)
- Ebara-Kubota-Verfahren (Einschmelzen im Schachtofen durch direkte Öl-/Gasbeheizung)
- verschiedene Plasmaofenverfahren
- CORMIN-N-Verfahren, KHD, Zyklonfeuerung mit Kohle

Mit Inbetriebnahme der GRUBE TEUTSCHENTHAL im Mai 1995 mit Entsorgungskosten von 185 DM/t Flugasche und Reaktionsprodukten aus der Rauchgasreinigung von MVA hat sich der Markt neu orientiert. Planungen für Einschmelzverfahren wurden eingestellt. Deutschland ist heute Verwertungsmonopolist in Europa für Sonderabfälle aus der Rauchgasreinigung von MVA und SVA.

Neben dem später entwickelten und ausgeführten Syncom-Verfahren der Firma Martin werden keine weiteren Versinterungs- oder Einschmelzverfahren für Flugstäube mehr auf dem deutschen Markt angeboten. 1994 wurden dann Aschewasch-Verfahren entwickelt von Techform und von der Firma von Roll Inova als FLUWA-System.

Ab 1996 wurden von der Firma von Roll Inova mindestens sieben Anlagen als saure und eine neutrale Aschewäsche in der Schweiz und 1999 eine saure Aschewäsche in der Tschechischen Republik installiert.

Beim von Roll-FLUWA-Prozess (Flugaschewaschung) werden Kessel- und Filterasche mit dem sauren Abwasser des ersten (sauren) Rauchgaswäschers bei einem pH-Wert von 3,5, einem Lösungsmittel/Feststoffverhältnis von 4 und einer Verweilzeit von 45 Minuten gewaschen. Die behandelte Asche wird mit Wasser nachgereinigt und zusammen mit der Schlacke deponiert. Die gelösten Metalle werden durch Neutralisation und/oder Zugabe von Fällungsmitteln gefällt oder durch Ionentausch abgetrennt. Der gereinigte Filterkuchen enthält bis zu 25 % Zink und kann in metallurgischen Prozessen zur Gewinnung von Zink, Cadmium und Quecksilber eingesetzt werden. Aus der Flugasche werden ≥ 85 % des enthaltenen Cadmiums, ≥ 85 % des Zinks, ≥ 33 des Kupfers und Bleis sowie ≥ 95 % des Quecksilbers abgetrennt. Die Kosten der Flugascheentsorgung nach diesem Verfahren betragen ca. 150 - 250 €/t (Winter).

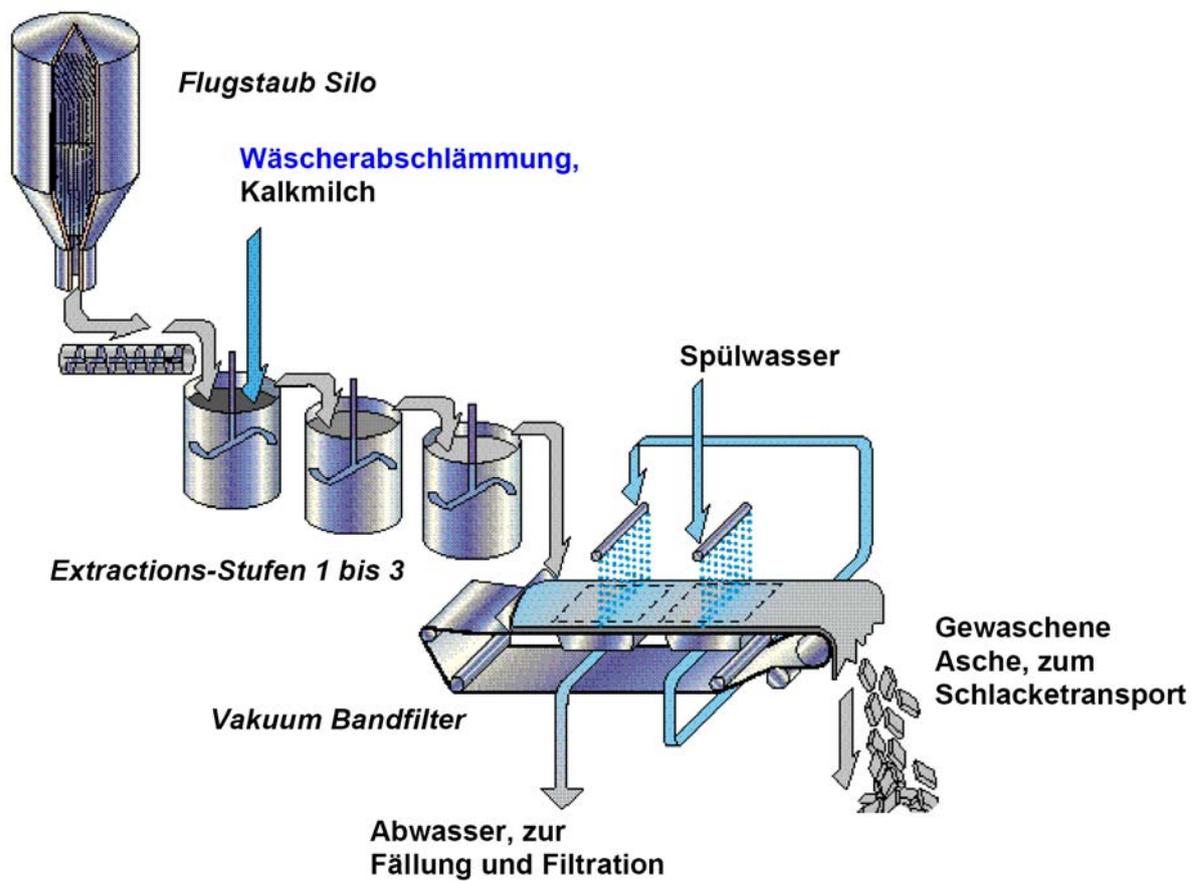


Bild 8: FIUWA-Verfahren zur Flugaschewaschung der Firma von Roll Inova [8]

Das FLUWA-Verfahren [6] wurde weiterentwickelt und seit 2007 mit einer zusätzlichen Dioxinauswaschung (exDIOX) [27] mittels Flotation erweitert. Andere Verfahren [58] mit Aschewäsche und Zinkrückgewinnung gehen von einer Rückführung der Aschen in den Feuerraum zur Dioxinzerstörung und damit Vermischung mit den Rostschlacken und entsprechend gemeinsamer Verwertung im Straßenbau aus.

Kap. 2 Multifunktionale Abgaskatalyse

Eine multifunktionale Abgaskatalyse wird Standard einer neuen Generation von Nullemissions-Kraftwerken sein. Durch die multifunktionale Abgaskatalysen können Schadstoffe zerstört und die Produktion von Wertstoffen katalysiert werden.

Katalysatoren für die Rauchgasentstickung reduzieren neben NO_x auch Dioxine, Furane, Kohlenwasserstoffe, CO und viele andere oxidierbare Moleküle.

Schwermetallmoleküle werden ionisiert, wodurch die Lösbarkeit erhöht wird und nach einer sauren Waschung der Rauchgase und Aschen können diese Schwermetalle ausgewaschen, konzentriert und damit recycelt werden.

Durch die Katalyse wird das Gleichgewicht SO₂/SO₃ in Richtung SO₃ verschoben und die Schwefelsäureproduktion ermöglicht. Daneben ist auch die Produktion von Zinkblende (ZnS), Anhydrit CaSO₄, Kieserit (MgSO₄) Glaubersalz Na₂SO₄ mit Schwefeltrioxyd möglich.

Die Entwicklung der Abgasreinigung wird von folgenden Prämissen und Leitparametern geprägt:

Prämissen Abgasreinigung

- SCR-Katalysator zur Entstickung
- Nasse Abgasreinigung
- Chlorrecycling
- Metallrecycling
- Recycling der Feststoffe

Leitparameter

- NO_x, NH₃
- SO_x, HCl,
- Hg
- Dioxine
- Feinstaub

Die multifunktionale Abgaskatalyse ist direkt oder indirekt für die Reduzierung der Leitparameter NO_x, NH₃, Hg, Dioxine und Feinstaubreinigung erforderlich. Für Chlorrecycling, Metallrecycling und Recycling der Feststoffe ist die nasse Abgasreinigung unabdingbar.

Kap. 2.1 Entstickung und NH₃-Reduktion

Zur katalytischen Entstickung gibt es drei generelle Schaltungsvarianten. Die Tail-End-SCR wird meist für Nachrüstungen verwendet. SCR-Schaltungen, die eine Aufheizung der Abgase erfordern, sind mit einem hohen Energieverlust verbunden und widersprechen den Kriterien der Energieeffizienz.

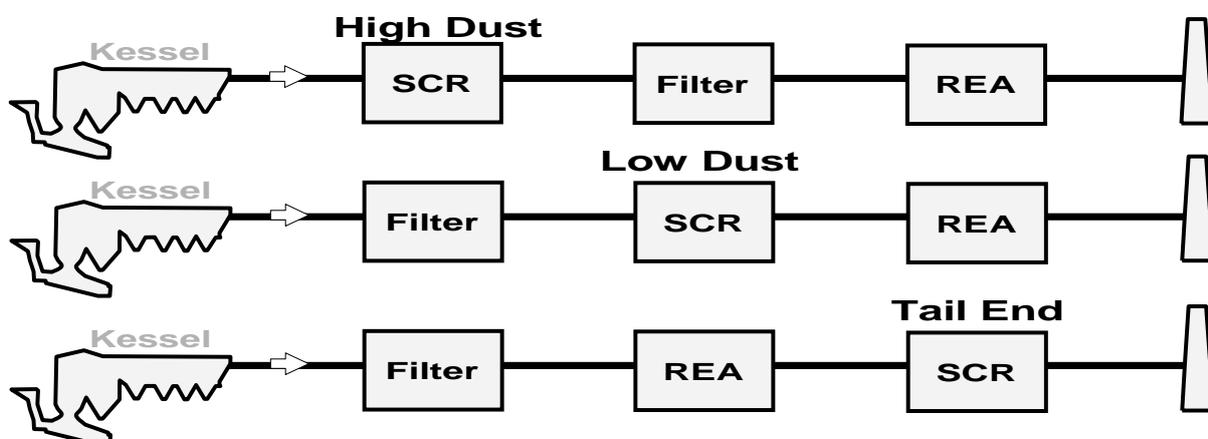


Bild 9: Varianten SCR-Schaltung in der Abgasreinigung

Aufgrund der hohen Schwefelfracht ist es bei Abfallbehandlungsanlagen nicht möglich, eine SCR als Low Dust oder High Dust bei Temperaturen < 280 °C mit ausreichender Verfügbarkeit durchzuführen, da ausfallendes Ammoniumsulfat den Katalysator blockieren würde. Temperaturen oberhalb von 320 °C verursachen Katalysatorvergiftungen durch auskondensierende Schwermetallsalze wie z. B. Bleichlorid.

In der nachfolgenden Grafik sind einige ausgeführte SCR-Schaltungen dargestellt. In der Anlage WTE Delfzijl der BKB wird die Problematik der Ammoniumsulfatverblockung durch eine Teilentschwefelung durch die Zugabe von Natriumbicarbonat vor dem Filter umgangen. Diese Schaltung müsste klassisch als Tail-End-SCR bezeichnet werden, da bereits eine Entstaubung und Entschwefelung durchgeführt wurde. Vorteilhaft bei dieser Schaltung ist die nicht erforderliche Wiederaufheizung, da durch die Eigenschaften von Natriumbicarbonat eine Schwefelabscheidung auch bei 240 °C möglich ist.

In der TREA Breisgau (Freiburg) ist eine typische Low Dust-SCR dargestellt. Die Wabenkatalysatoren wurden kürzlich durch Plattenkatalysatoren eingetauscht. Ausreichende Standzeiterfahrungen bestehen bisher nicht. In Mainz wurde zwar eine SCR vorgesehen, jedoch nie in Betrieb genommen.

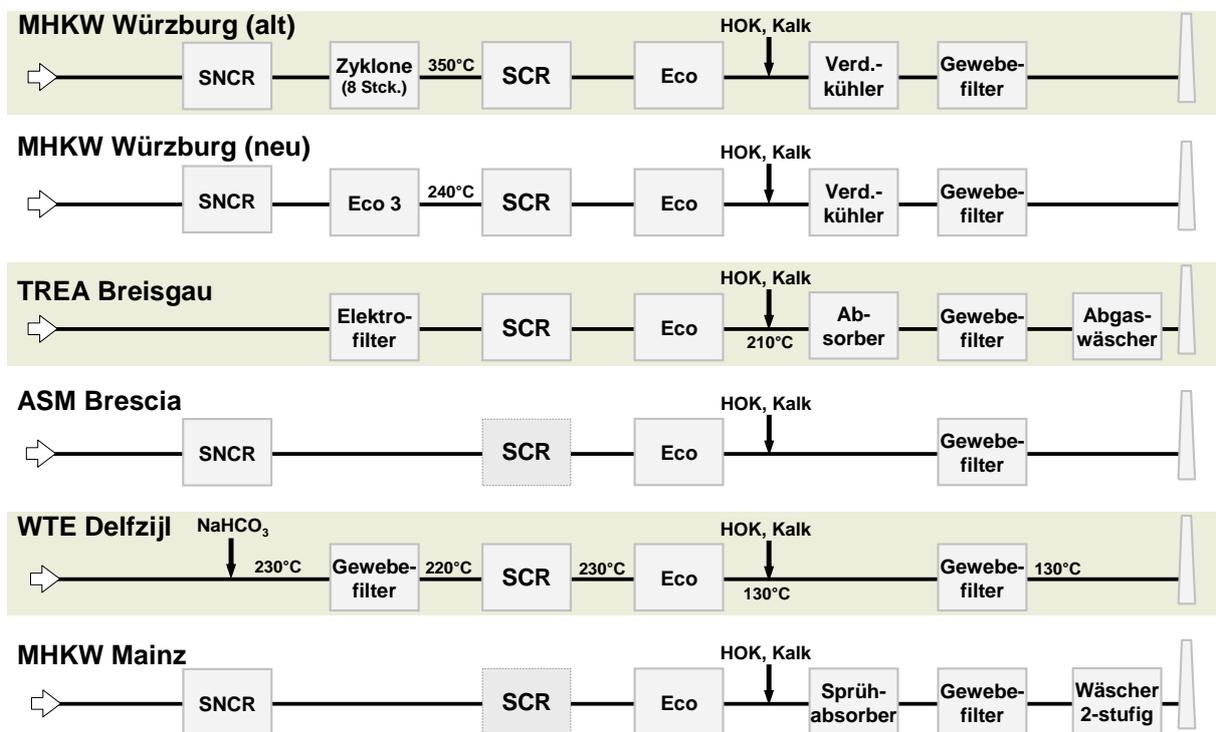


Bild 10: Schaltungsvarianten von SCR-Katalysatoren in Abfallverbrennungsanlagen [30]

Auffallend ist, dass zurzeit keine SCR als High Dust-Schaltung ausgeführt wurde, da die Schaltungen mit vorgelagerter SNCR als reine Schlupfkatalysatoren ausgeführt wurden, die vorrangig zur NH₃-Reduktion dienen.

Der Wirkungsgrad der NO_x-Reduktion liegt bei unter 50 %, da wegen der Ammoniumsulfat-Problematik kein frisches NH₃ vor dem Katalysator zugegen sein wird. Nach Auftreten der Probleme mit Blei-Katalysatorinhibierung im MHKW Würzburg bei einer Temperatur von 350 °C wurde die Temperatur durch die Nachrüstung eines Economizers auf 240 °C drastisch reduziert und es wurde auf die Zyklonentstaubung verzichtet.

In der ASM Brescia wurde im Rahmen des Forschungsprojektes NextGenBioWaste ein High-Dust-Katalysator als Schlupfkatalysator getestet. Es wurde eine Reduktion von NO_x um 40 % und gleichzeitig von NH₃ um 33 % erreicht. Für das Forschungsprojekt wurde ein Budget von 29 Mio. € angesetzt.

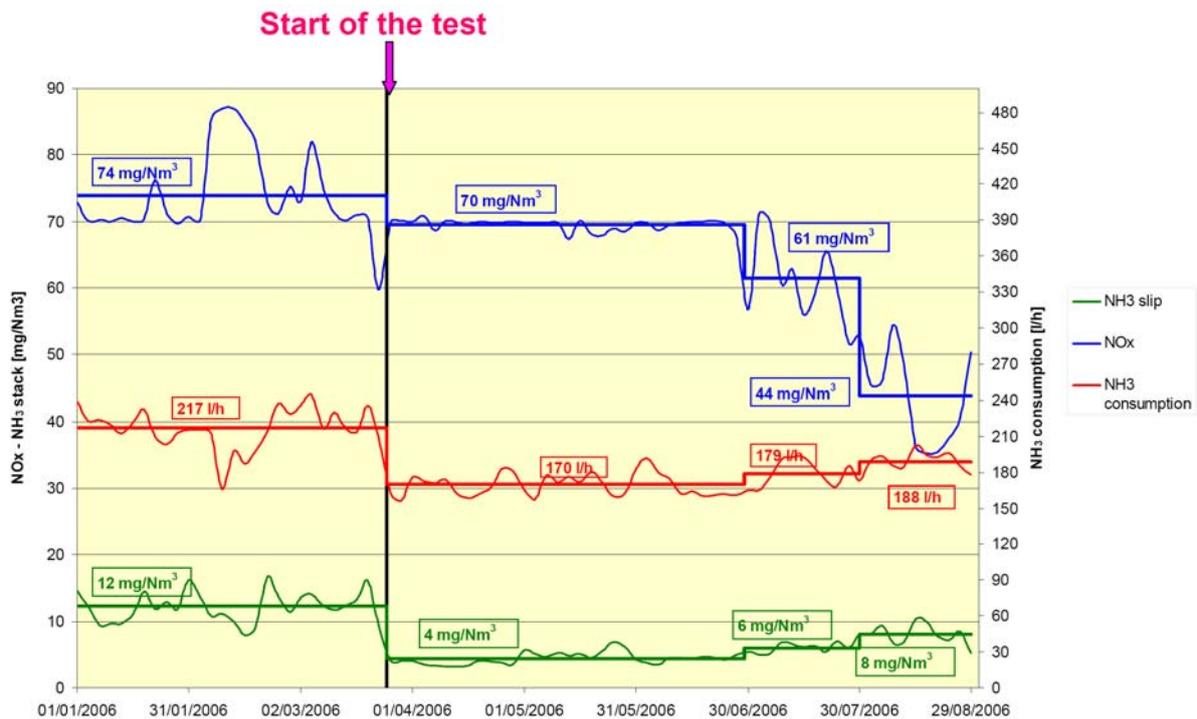


Bild 11: Ergebnisse mit SNCR und nach Zuschaltung der SCR in der ASM Brescia [5]

Erfolg versprechend ist eine Low Dust SCR bei 290 °C mit einer Abweichung von 10 Kelvin. Bleisalze kondensieren bei Temperaturen > 320 °C und können sich als Kondensat nicht mehr auf den aktiven Zentren des Katalysator absetzen, sondern werden als Staub durch den Katalysator getragen. Gleichzeitig wird durch Temperaturen > 280 °C eine Verblockung durch Ammoniumsulfat vermieden. Für die Entstaubungstechnik bei > 300 °C haben sich bisher nur E-Filter und Zyklone bewährt. Nachteil der E-Filter ist die in diesem Temperaturbereich katalysierte Dioxinentstehung. Zwar werden die Dioxine im Katalysator bei entsprechender Auslegung als DeDiox-SCR wieder zerstört, die Aschen bleiben jedoch weiter belastet und müssen als Sonderabfall beseitigt werden.

Der Zyklon scheidet bei entsprechender Auslegung und Einstellung die Feinstkornfraktion < 10 µm kaum ab und kann somit eine dioxinarmer Aschefraktion abscheiden. Zusätzlich zur Staubabscheidung wird die für den Katalysator wichtige homogene Temperatur- und Schadstoffverteilung eingestellt. Durch gezielte Eindüsung von Ammoniak im Zyklonaustritt wird eine optimale NH₃-Verteilung im Katalysator gewährleistet. Durch die hohe Salzfracht im Rauchgas ist eine angepasste Katalysatorreinigung durch Rußbläser und u. U. auch Infraschall unerlässlich.

Bei Biomassekraftwerken ist die Kombination SNCR mit SCR in High-Dust-Schaltung aus den Projekten Wien-Simmern und Alkmaar bekannt. Mit dieser Schaltung werden NO_x-Reingaswerte << 50 mg/m³ gesichert eingehalten.

Kap. 2.2 Ionisation von Quecksilber

Neben der Entstickung führt der Katalysator zusätzlich einen Hg-Shift [61] von schwerlöslichem metallischem Hg₀ zu leichtlöslichem ionisiertem Hg²⁺ durch, dieses wird über die nasse Rauchgasreinigung vollständig erfasst. Elektrofilter heben diese Wirkung des Katalysators zum Teil wieder auf und sollten nicht nach dem Katalysator eingesetzt werden. Ionisiertes Quecksilber als auch andere ionisierte Schwermetalle bilden mit Chlor lösliche Schwermetallchloride, die im Wäscher abgeschieden werden. Wichtig bei der Auslegung des Wäschers ist ein pH-Wert von < 3,5. Bei einem höheren pH-Wert kann es zu einer Disproportionierung kommen und metallisches Quecksilber frei werden. Eine stark saure Wäsche

verstärkt die Ionisation von Quecksilber und bei Anwesenheit von Chlor wird Quecksilberchlorid komplett ausgewaschen. Der Einsatz von Aktivkohle zur Quecksilberemission ist dann nicht mehr erforderlich.

Kap. 2.3 Zerstörung von Dioxinen

Der SCR-Katalysator wird mit geringen Änderungen für die Zerstörung von organischen Verbindungen inkl. Dioxine und Furane eingesetzt. Für die komplette katalytische Dioxin-Zerstörung werden von verschiedenen Herstellern Katalysatoren wie beispielsweise ZERONOX® D von Envirotherm, DIOx-Katalysatoren von Siemens und NOx-DeDioxin von BASF angeboten und mit großem Erfolg eingesetzt. Der Einsatz von Aktivkohle und auch die Entsorgung eines Aktivkohle-Flugasche-Gemisches ist dann überflüssig, da Quecksilber ebenfalls über Katalyse und Waschung ausgeschleust wird.

Als weiterer Vorteil der multifunktionalen Katalyse ist die absolute Umsetzung von NH_3 , wodurch die Entstehung von Ammoniumchlorid bei Temperaturen $< 200\text{ °C}$ sicher vermieden wird.

Kap. 3 Entstaubung, Aschewäsche und nasse Abgasreinigung

Die Entstaubung verfolgt zwei Ziele:

- Maximale Feinstaubminderung im Abgas
- minimale Schadstofffracht im abgeschiedenen Staub

Zum Verständnis der Entstaubung ist die Korngrößenverteilung des Filterstaubes von entscheidender Bedeutung.

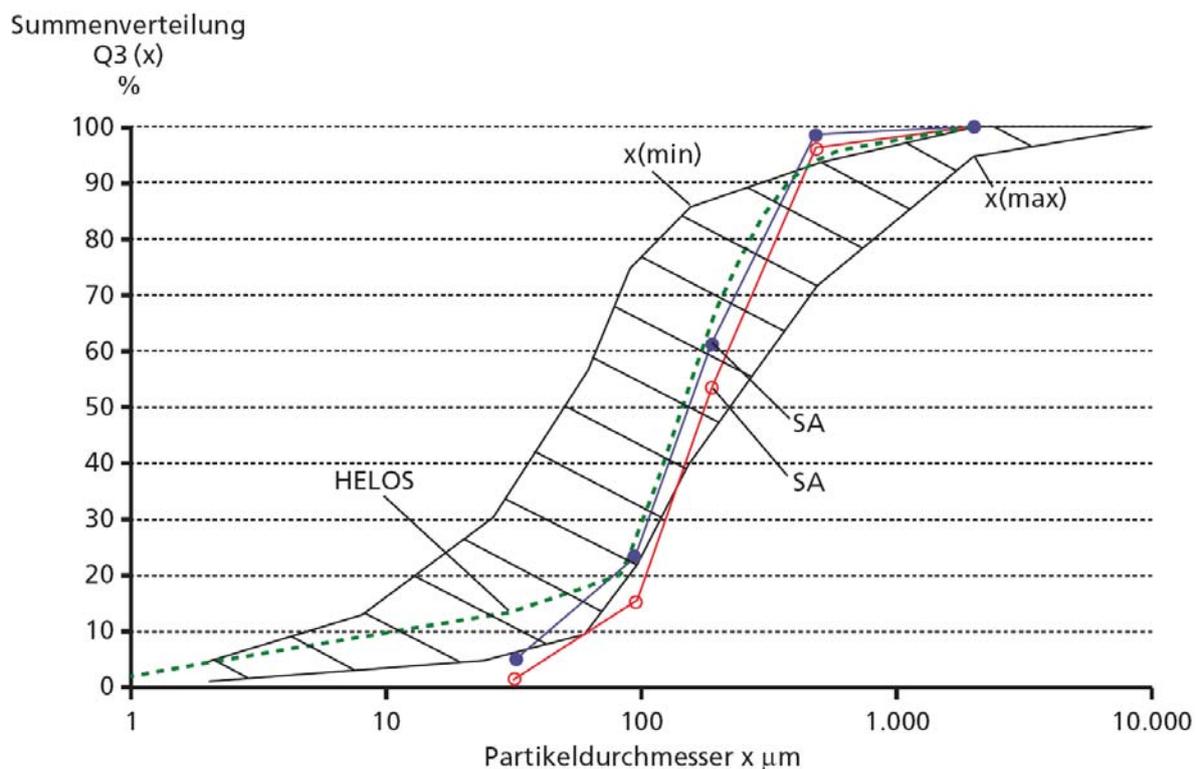


Bild 12: Korngrößenverteilung Flugasche aus einer MVA [4]

Im Zusammenhang mit Bild 13 kann man erkennen, dass mit einem Zyklon Partikel ab einer Korngröße von ca. 10 µm abgeschieden werden. Der Staubgehalt im Rohgas einer MVA beträgt 2.000 mg/m³ - 3.000 mg/m³, bei der Abreinigung des Kessels 4.000 mg/m³ - 5.000 mg/m³. Durch einen Zyklon werden ca. 90 % der Staubfracht abgeschieden, es verbleibt dennoch eine relativ hohe Staubfracht von ca. 300 mg/m³ nach der Zyklonentstaubung.

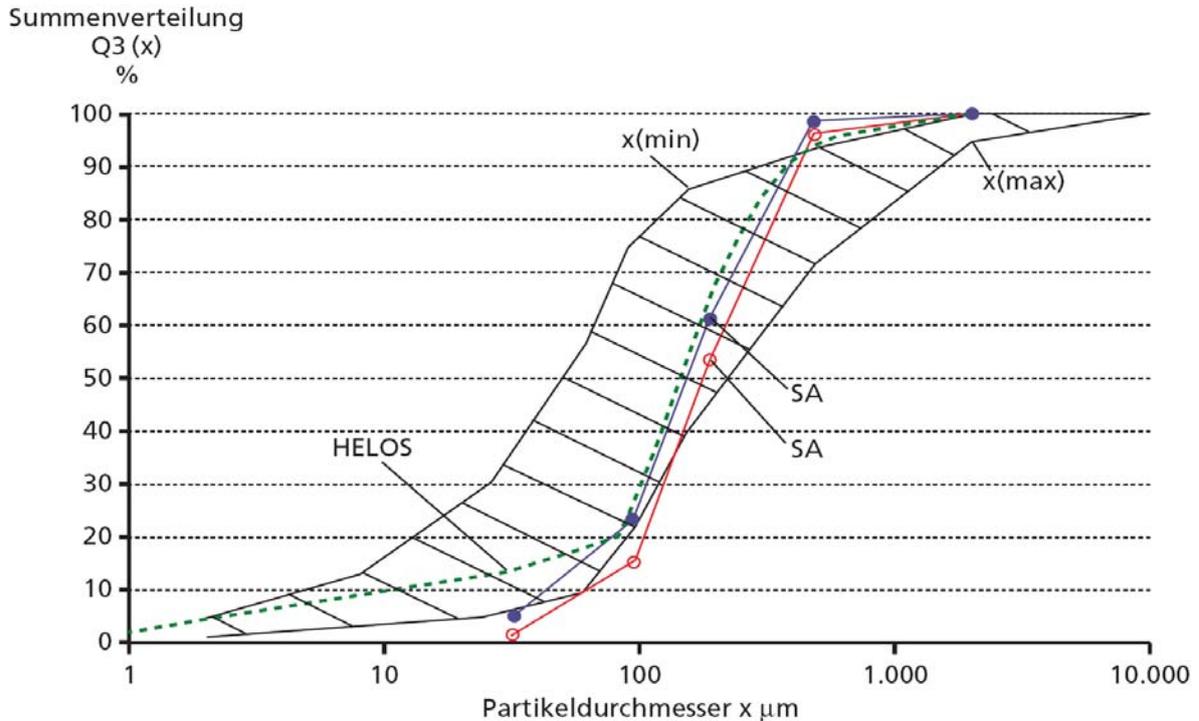


Bild 12: Korngößenverteilung Flugasche aus einer MVA [4]

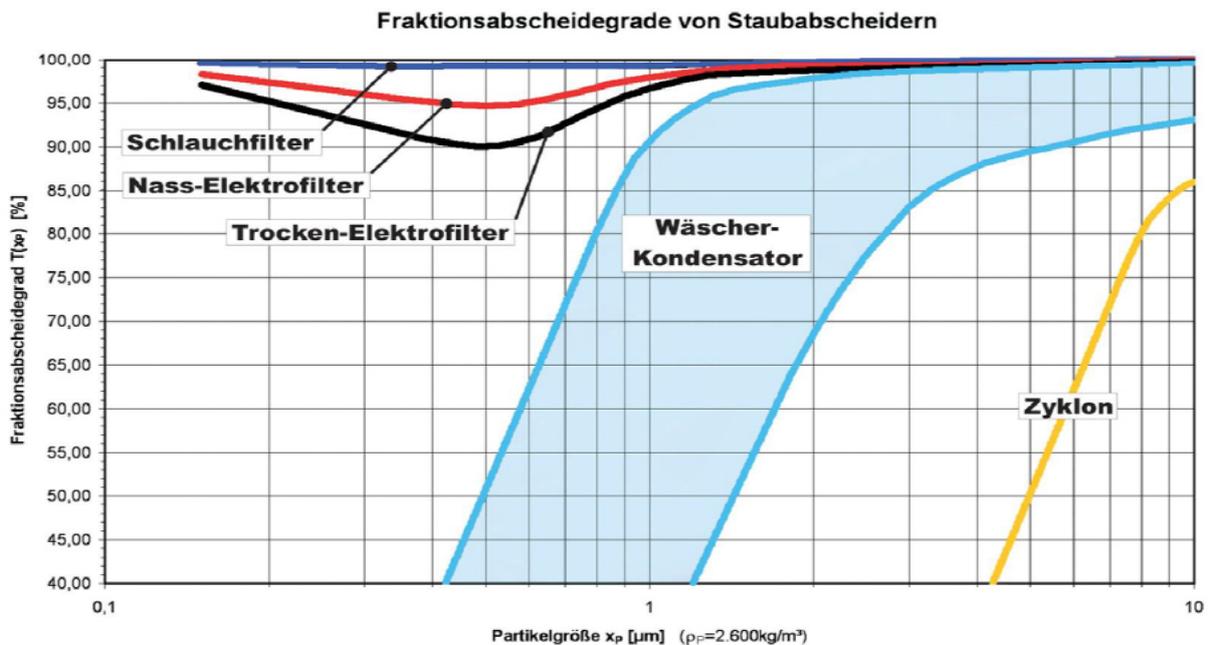


Bild 13: Fraktionsabscheidegrade von Staubabscheidern [50]

Das zur HOK- und reststofffreien Abgasreinigung vorgeschlagene Verfahren ist in Bild 14 dargestellt:

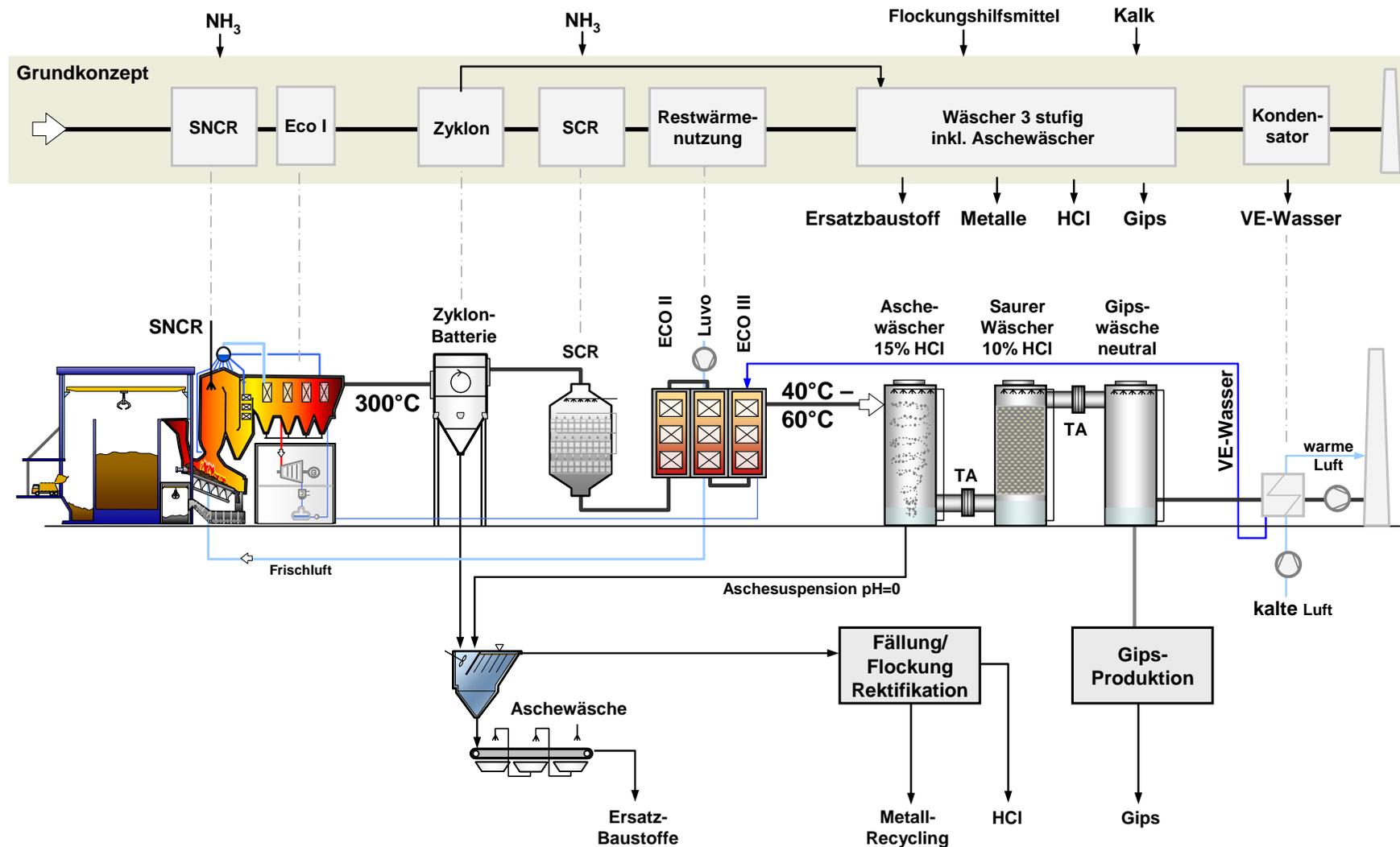


Bild 14: HOK- und reststofffreie Abgasreinigung mit Restwärmee-nutzung

Durch die Vorabscheidung der Flugstäube bei sehr hoher Temperatur von 300 °C – 400 °C kann eine dioxinarmer Flugasche mit < 100 ng/kg Dioxin gewonnen werden. Aufgrund des hohen Oberflächen-Masse-Verhältnisses weisen nicht abgeschiedene Feinststäube < 5 µm eine erhöhte Dioxinfracht > 1 µg/kg auf. Die hohe Oberfläche der Partikel ist für die weitere Katalyse im DeDiox-SCR von Vorteil, da die oberflächennahen Dioxinmoleküle der oxidierenden Atmosphäre des Katalysators ausgesetzt sind und somit das Dioxin auf der Oberfläche und Korngrenzen der Feinstpartikel zerstört wird. Die Feinstpartikel werden im folgenden 5-stufigen Wäscher sicher abgeschieden:

1. Rauchgaskondensation durch Rauchgasunterkühlung mittels Speisewasser-Niederdruckvorwärmer
2. Aschewäscher zur Abscheidung der Feinaschen und gleichzeitig 1. saure Waschstufe mit 15 %iger Salzsäure bei einem pH-Wert von 0
3. Füllkörperwäscher mit feinen Einbauten zur Feinstaubabscheidung und 2. saurer Wäscher
4. Alkalischer Wäscher mit Kalkmilch zur Entschwefelung
5. Rauchgasentschwadung und weitere Kondensation

Zwischen den Wäschern 2, 3 und 4 ist jeweils ein Tropfenabscheider geschaltet. Bei dieser Abgasreinigung liegen die Reststaubgehalte bei << 5 mg/m³.

Ein Beispiel einer Hochleistungswäsche mit den Multiventuri-Einbauten und einer 3-stufigen Wäsche in einem Kompakttaggregat erreicht einen Reststaubgehalt von < 5 mg/m³ und ist in der KVA Emmenspitz in der Schweiz von der Firma von Roll Inova installiert worden.

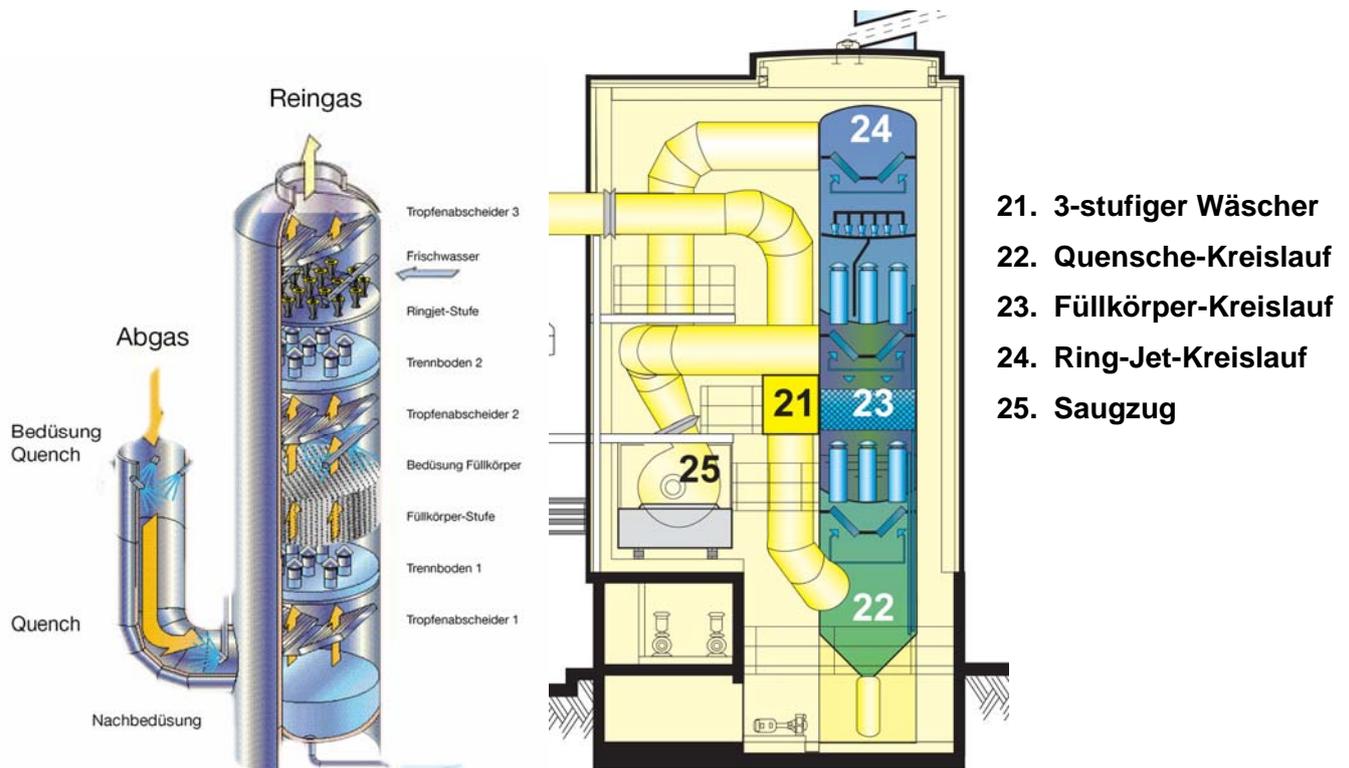


Bild 15: 3-Stufige Abgaswäsche zur HCl, SOx und Feinstaubreduktion, Multi-Venturi-System, von Roll Inova [68]

Das Waschwasser aus der 1. sauren Waschstufe wird als 15%ige Salzsäure zusammen mit den Feinaschen zum Spülen der Zyklonaschen verwendet. Nach der extrem sauren Waschung mit nachgeschalteter neutraler Waschung auf einem Bandfilter ist die Asche für die Verwertung als Bauersatzstoff geeignet. Weitere Möglichkeiten der Flugascheverwertung nach der Salz- und Schwermetallauswaschung

liegen in der Rückführung der Aschen nach der Aschewäsche in die Feuerung und dann gemeinsame Verwertung mit den Rostaschen, wie dies bereits in einer MVA getestet wurde [58].

Das saure Waschwasser enthält die aus dem Filterstaub heraus gelösten Edelmetalle, die über eine nun folgende Flockung und Fällung als Schwermetallschlamm zum Edelmetallrecycling - zum Beispiel zur Firma B.U.S. Steel Service GmbH - abgetrennt werden.

Nach der Schwermetallabtrennung gelangt die Salzsäure in eine Rektifikation, in der die Salzsäure weiter bis zur Verkaufsqualität (35%ige Salzsäure) aufgereinigt wird.

In Deutschland wird bei insgesamt 6 Müllverbrennungsanlagen Salzsäure aus der Abgasreinigung gewonnen: Böblingen, Hamburg-Borsigstrasse, Hamburg-Rugenberger Damm, Kempten, Kiel, Nürnberg und Mannheim.

Der Rücklauf aus der Rektifikation wird dem 2. sauren Wäscher zugeführt. Im 2. Wäscher sind Einbauten zur Minimierung der Kreislaufpumpenleistung und zur Erhöhung der Feinstaubabscheidung vorgesehen.

Chlor, Fluor, Schwermetalle und Feinstaub werden in den ersten beiden sauren Waschstufen sicher abgeschieden. Durch den hohen Säuregehalt kann sich kein SO_x abscheiden. Zur Entschwefelung wird daher eine alkalische Waschstufe geschaltet, die mit Kalkmilch oder Natronlauge betrieben werden kann, um Gips oder Natriumsulfat als Wertstoffe zu produzieren. Insgesamt produzieren nur ca. 20 deutsche MVA Gips.

Nachdem die Rauchgase auf ca. 40 °C bis 60 °C gekühlt wurden, gelangen sie in den Entschwadungs-Kondensator. Mit Frischluft werden die Rauchgase noch weiter abgekühlt, so dass sich die Luft entfeuchtet und gleichzeitig teilsalziges Wasser anfällt. Das Kondensat kann als Vorlauf für die Vollentsalzungsanlage des Kessels als Kühlwasser für einen Nasskühlturm zur Wirkungsgradverbesserung oder für andere Prozesse, in denen sauberes Wasser benötigt wird, verwendet werden. Der Kondensatanfall kann entsprechend dem Frischwasserbedarf der Anlage gefahren werden. Die aufgewärmte Frischluft wird mit dem Abgas im Kamin nach der Emissionsmessung vermischt und gemeinsam über den Schornstein an die Umgebung abgegeben. Durch die Entschwadung kann in den meisten Wetterlagen eine Dampffahne vermieden werden.

Kap. 4 Vision Nullemission – ZEWTEC

In Kapitel 3 konnte ein Abgasreinigungskonzept vorgestellt werden, das keine Aktivkohle oder Herdofenkoks (HOK) und keine Additive zur Chlorreduktion einsetzt. Durch den minimierten Additiveinsatz werden auch die entsprechenden Reststoffmengen zur Entsorgung vermieden. Zusätzlich werden die Aschen in einer Weise abgeschieden sowie katalytisch und chemisch-physikalisch behandelt, dass die Flugaschen wieder einem stofflichen Recycling zugeführt werden können.

Das reicht noch nicht?

Der UN-Klimarat IPCC hat bestätigt, dass CO₂-Emissionen einen verheerenden Einfluss auf die Erwärmung haben werden, wenn sie bis zum Jahr 2050 nicht um 50 % - 80% gesenkt werden. Doch wenn man sich vor Augen führt, dass mit einer Zunahme des Weltenergiebedarfs um 60 % zwischen 2002 und 2030 gerechnet wird, während erneuerbare Energien bis 2050 voraussichtlich lediglich ein Drittel des Energiemixes ausmachen werden, wird das immense Ausmaß der Herausforderung deutlich.

Obleich eine Erhöhung der Energieeffizienz bereits einen großen Beitrag leisten kann, wird dies alleine das Problem nicht lösen können.

Unter Nullemission könnte man - wie in der Kohleverbrennung üblich - verstehen, dass eine Anlage kein klimarelevantes CO₂ mehr emittiert. Klimarelevant ist bei Abfall nur der fossile CO₂-Anteil und der beträgt pro Tonne Abfall ca. 40 % - 60% der Gesamt-CO₂-Emissionen. Der biogene CO₂-Anteil wird als Emission bewertet, da Biomasse der Atmosphäre während des Wachstums CO₂ entzieht und somit den CO₂-Kreislauf mit neutraler Bilanz darstellt.

Da CO₂ einen Schadstoff und eine Belastung für nachfolgende Generationen darstellt, kann man die Entsorgung der abfallstämmigen klimarelevanten CO₂-Anteile auch als Atmosphären-Deponierung bezeichnen, die genauso wie die terrestrische Deponierung ein Erbe an unsere Kinder darstellt.

Fossiles CO₂ aus der Abfallverbrennung stellt einen Reststoff aus der Abfallbehandlung dar, der nach der Abfallrahmenrichtlinie entweder vermieden, wiederverwendet oder recycelt werden sollte.

Ist ein Stoff dann kein Abfall, weil man ihn nicht sehen kann, nicht fühlt und er keinen direkt erkennbaren Einfluss auf die menschliche Gesundheit hat? Fossiles CO₂ stellt immerhin 30 % - 40 % der Abfallmasse dar.

Dow Deutschland GmbH & Co. OHG, Werk Stade betreibt seit 1990 eine Sonderabfallverbrennungsanlage, genannt RVA (Reststoffverwertungsanlage) für 40.000 t/a hochkalorische Kunststoffreste mit hohem PVC-Anteil und produzieren 40.000 t/a Salzsäure und 40.000 t/a Soda (Na₂CO₃·10H₂O, Dehydrat des Natriumcarbonates) zur werkseigenen Verwertung. Der Massenanteil der verwertbaren CO₂-Produkte aus dem Abfall beträgt 100 % des Abfallanfalls. Im Werk Stade wurde schon 1990, also vor der internationalen Klimadiskussion 1992 in Rio de Janeiro, aus reiner Motivation des wirtschaftlichen Recyclings CO₂ verwertet.

Die Fabrik von Shell Chemicals in Scotford, Alberta, Australien will künftig 60 % ihres gegenwärtigen CO₂-Ausstoßes an die benachbarte Firma Air Liquide verkaufen.

In Bild 16 ist eine CO₂-Abscheidungsvariante dargestellt. Für eine Nullemission reicht es aus, nur ca. 40 % bis 60 % des entstandenen CO₂ zu verwerten.

Als weitere modulare Erweiterung könnte eine Luftzerlegungsanlage Stickstoff, CO₂ und Edelgase am MVA-Standort produzieren, somit würde eine schornsteinfreie MVA entstehen.

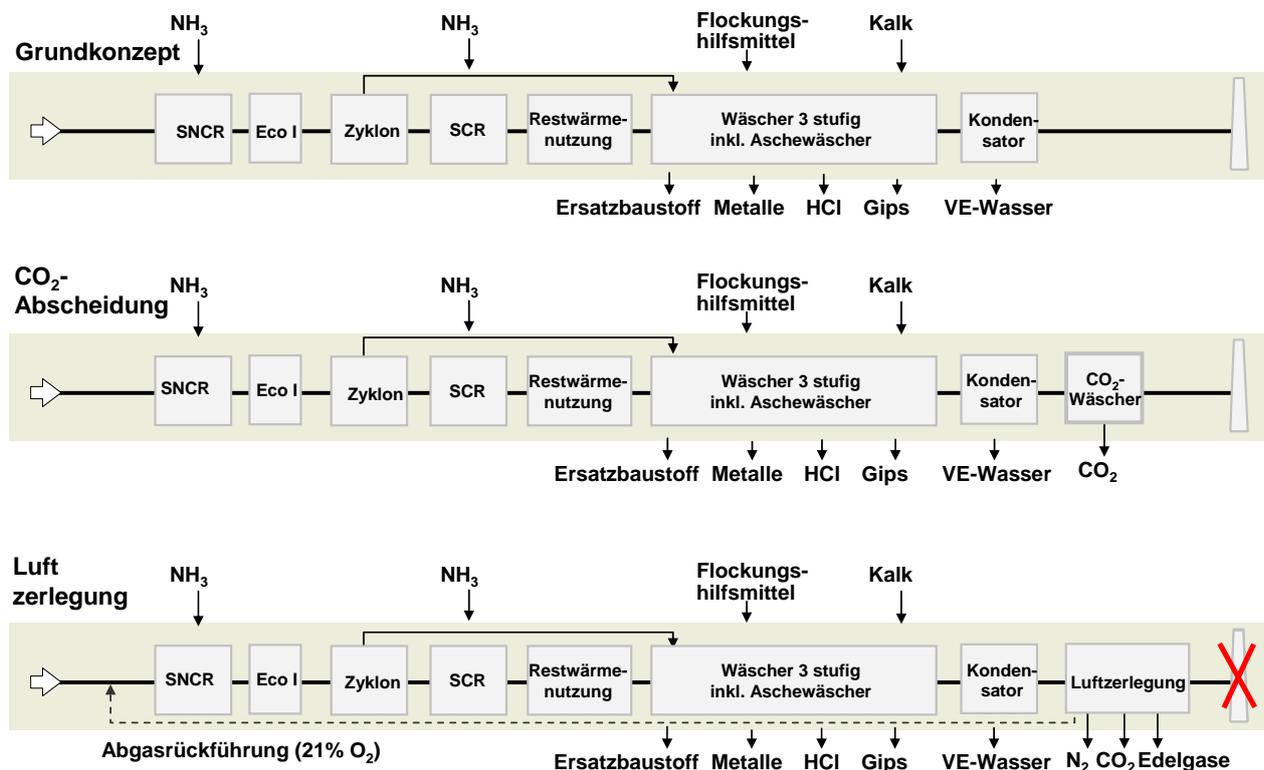


Bild 16: Modulare Erweiterung zur CO₂-Abscheidung oder kompletten Abgaszerlegung zur Produktion von technischen Gasen

Im Grundkonzept wird das Abgas soweit gereinigt, dass eine weitergehende Abgasreinigung erweitert werden kann.

Zur CO₂-Abscheidung werden in der Kohleverbrennung drei unterschiedliche Technologiekonzepte und zusätzlich deren Kombination verfolgt:

1. Post-Combustion Capture - CO₂-Abscheidung nach der Verbrennung
2. Pre-Combustion Capture - Vergasung mit Sauerstoff, CO-CO₂-Shift und CO₂/H₂-Trennung
3. Oxy-Fuel Combustion Capture - Verbrennung mit technischem Sauerstoff

Nur bei Variante 1 kann auf eine kosten- und energieintensive Luftzerlegungsanlage verzichtet werden. Variante 1 bietet überdies die flexible Einstellung des CO₂-Reduktionsgrades und die Möglichkeit der Nachrüstung, sowohl für den gesamten Abgasstrom als auch für einen Abgasteilstrom.

Die Konzepte werden in der Literatur unterscheiden nach der Energieeffizienz des Gesamtprozesses und dem CO₂-Abscheidegrad. Die Erfahrungen mit der Versuchsanlage OxyFuel (500 KW_{th}) in Jänschwalde und die Auslegungsdaten der Demonstrationsanlage (30 MW_{th}) in Schwarze Pumpe belegen nur einen maximalen Abscheidegrad des durch die Verbrennung frei werdenden CO₂ von 85 % bis 90 %, bedingt durch 3 % bis 10 % Falschlufteile durch die Unterdruckfahrweise und die feuerungsbedingte Einstellung eines Restsauerstoffgehaltes der Abgase von 3 % bis 4 %. Hinzu kommen die Verluste an CO₂ bei der Speicherung und Endlagerung des CO₂. Das Wuppertal Institut geht von nur 60 % CO₂-Speicherung aus dem Kraftwerksprozess aus [17]. Berücksichtigt man, dass das CO₂-freie Kraftwerk ca. 30 % mehr CO₂ bei gleicher Stromerzeugung wie das konventionelle Kraftwerk verbraucht, ergibt sich lediglich eine CO₂-Reduktion durch Langzeitspeicherung von 30 %. In der folgenden Tabelle sind nur die CO₂-Abscheidegrade ohne Verflüssigung, Transport und Speicherung angegeben. Für die CO₂-Abscheidung am kalten Ende wurden Waschverfahren, von Teilstrom bis Gesamtstromwäsche vorausgesetzt.

Tabelle 9: Wirkungsgradverluste und CO₂-Abscheidegrade CO₂-freier Kraftwerkskonzepte

Technologie	Wirkungsgradverlust %-Punkte	CO ₂ -Abscheidegrad
CO ₂ -Abscheidung am kalten Ende (PCC)	0 % - 8 %	0 % - 90 %
Vergasung mit Sauerstoff	8 % - 10 %	85 % -95 %
OxyFuel CO ₂ -Rezirkulation mit kryogener Luftzerlegung	< 10 %	85 % - 90 %
OxyFuel CO ₂ -Rezirkulation mit Hochtemperatur-Membran	2 % - 5 %	85 % - 90 %

Energetisch sehr interessant ist die Weiterentwicklung der Luftzerlegung mit dem Hochtemperatur-Membranverfahren.

Die Kosten für Transport und Speicherung werden von der COORETEC- Arbeitsgruppe in Deutschland auf etwa 10 bis 24 € pro Tonne CO₂ geschätzt [10]. Bei der Verbrennung von einer Tonne Braunkohlenstaub fallen ca. 2 t CO₂ an, die Kosten für Speicherung und Transport ohne die technologischen Mehrkosten für die CO₂-Abscheidung betragen ca. 20 bis 48 €/t Trockenbraunkohle bzw. ca. 25 - 60% der heutigen Brennstoffkosten.

Alle Maßnahmen zur CO₂-Abscheidung sind nur dann sinnvoll, wenn der anschließende Verbleib des CO₂ zufrieden stellend geklärt ist. Die derzeitigen Sequestrierungsmöglichkeiten sind in Bild 18 dargestellt.

Tabelle 10: Speicherpotentiale für CO₂

Speichertyp	Nutzbares globales Potential / Gt CO ₂
Ozean	praktisch unbegrenzt
Saline Aquifere	praktisch unbegrenzt
Leere Gasfelder	> 700
Leere Ölfelder	> 120
Tiefe Kohlelagerstätten	15*
Tertiäre Ölförderung	5**

* Erlöse durch Gewinnung von Grubengas (Methan) ** Erlöse durch gesteigerte Ölausbeute

Den absehbar besten Nutzen hat die CO₂-Nutzung zur tertiären Erdöl- und Erdgasförderung, sozusagen um die Reste auszudrücken bzw. auszuspülen. Die unterirdische Deponierung wird in der Öffentlichkeit ein wenig dem Bergversatz oder der Endlagerung von radioaktiven Abfällen angesehen und trägt gerade bei der Abfallbehandlung nicht zu einer Erhöhung der Akzeptanz bei. Schon heute sprechen sich BUND, Greenpeace, NABU, WWF, Germanwatch und Wuppertal Institut gegen eine Speicherung von CO₂ im Ozean aus.

Verwertungsmöglichkeiten für CO₂ aus Abfallbehandlungsanlagen stehen genügend zur Verfügung, da es sich um wesentlich geringere Mengen handelt und der Anteil der CO₂-Kosten bezogen auf den fossilen Anteil <10 €/t Abfall beträgt. CO₂ aus der Aminwäsche entspricht theoretisch sogar den Qualitätsansprüchen der Lebensmittelindustrie. Die Anwendungsbereiche in der Industrie, vor allem Petrochemie, Pharmaindustrie, Landwirtschaft und chemischen Industrie insbesondere bezogen auf regionale Absatzmärkte würde für den CO₂-Anteil aus der Abfallbehandlung ausreichen. 2003 wurden pro Tonne CO₂ noch ein Erlös von 100 € erzielt. Es ist aber mit einem ähnlichen Effekt wie beim REA-Gips zu rechnen und mit dem Überangebot an CO₂ wird der Preis entsprechend stark fallen.

Die Abfallverbrennung bietet die einmalige Möglichkeit, C-Körper zur Kunststoffproduktion zu nutzen als Alternative zur Methanolproduktion.

Bekannt ist die Produktion von Harnstoff, Tensiden, Methanol, Polycarbonate, Lactone, Urethane, Soda, Natriumbicarbonat, Calciumcarbonat usw. Aktuell gibt es mehrere Projekte zur CO₂-Elimination mittels Algen [23].

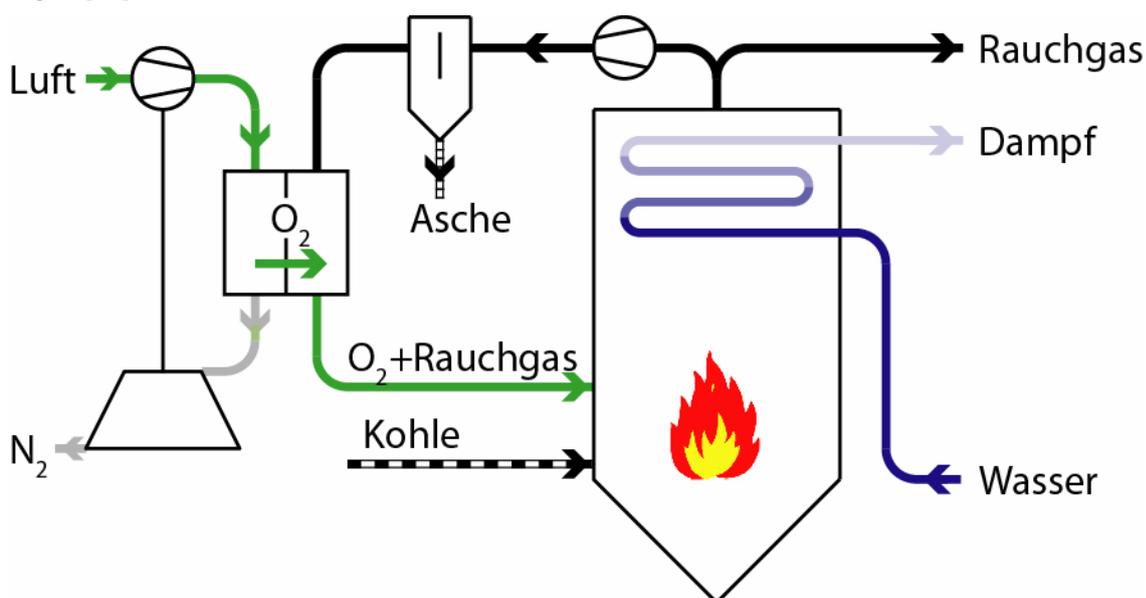


Bild 17: OXYCOAL-AC Prozess mit Hochtemperaturmembran [31]

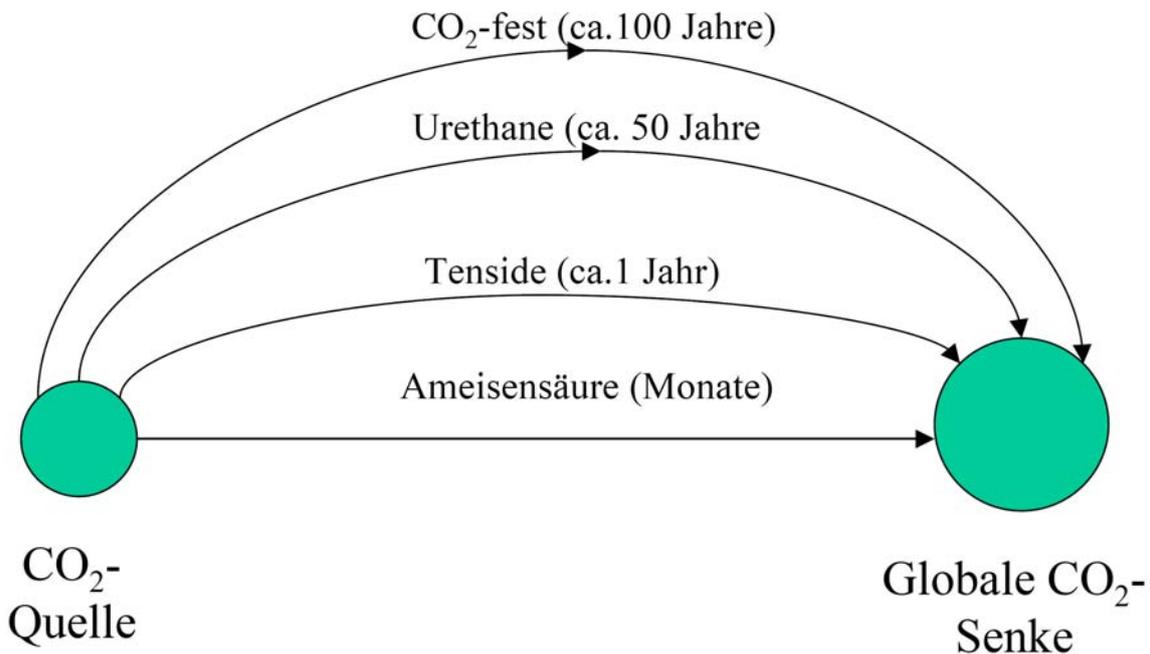


Bild 18: CO₂-Sequestrierung [55]

Kap. 5 Zusammenfassung und Ausblick

Abgasreinigung in der Abfallverbrennung steht stärker als andere Technologien grundsätzlich negativ in der öffentlichen Kritik. In dem vorliegenden Beitrag konnte gezeigt werden, dass mit einem modularen Abgasreinigungskonzept bei eventuellen Verschärfungen der Emissionsgrenzwerte durch einfache Nachrüstung bis hin zu einem Nullemissionskraftwerk ZEWTEC (Zero Emission Waste-to-Energy Conversion) erweiterbar ist.

Durch eine multifunktionale Abgaskatalyse in Synergie mit einer mehrstufigen Abgaswäsche können sowohl abgasseitige Emissionen als auch feste und flüssige Emissionen vermieden werden.

Nach den ambitionierten Zielen der CO₂-Reduktion der Bundesregierung, in die nicht nur die Kraftwerkstechnik, sondern in Zukunft auch andere Bereiche des öffentlichen Lebens, wie z. B. der Flugverkehr, mit eingeschlossen werden sollen, ist nicht zu erwarten, dass in Zukunft die Abfallbehandlung bezogen auf die fossilen CO₂-Emissionen nicht am CO₂-Reduktionsprogramm teilnehmen werden.

Fossil gefeuerte Kraftwerke mit mehr als 20 MW Feuerungswärmeleistung nehmen am CO₂-Reduktionsprogramm über den NAP (Nationaler Allokationsplan) teil.

Wenn der Gesetzgeber bei der Verschärfung der NO_x-Grenzwerte im Zuge der 37. BImSchV auch bei erhöhter technischer Problemstellung bei Abfallbehandlungsanlagen mit der Begründung der öffentlichen Akzeptanz die gleichen Grenzwerte für Abfallbehandlungsanlagen wie für fossil gefeuerte Kraftwerke fordert, wird mit derselben Begründung auch eine Reduktion der CO₂-Emission des fossilen CO₂ Abfallbehandlungsanlagen gefordert werden.

Die zur Genehmigung eingereichte Anlagenkonzeption sollte daher schon bei der Vorstellung in der Öffentlichkeit im Genehmigungsverfahren als Nullemissionskraftwerk bezeichnet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Achternbosch, M.; Richers, U.: Stoffstromanalysen zur abwasserfreien und abwassererzeugenden Verfahrenskonzeption von "nassen" Rauchgasreinigungssystemen. Wissenschaftliche Berichte FZKA 5773, Karlsruhe, 1996. Download: <http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA5773.pdf>, Stand: 21.11.2007
- [2] Bauer, T.: Hocheffiziente trockene Rauchgasreinigung mit Natriumbikarbonat - das NEUTREC® - Verfahren. In: Fachtagung VDI Wissensforum "Sorbentien/Betriebsmittel in der Rauchgasreinigung". Köln, 18./19.10.2007
- [3] Berliner Stadtreinigungsbetriebe: Unterrichtung der Öffentlichkeit über die Ergebnisse der Emissionsmessungen in der Müllverbrennungsanlage Ruhleben der Berliner Stadtreinigungsbetriebe für das Jahr 1999, Berlin, 2000
- [4] Birnbaum, L.; Richers, U.; Köppel, W.: Untersuchung der physikalisch/chemischen Eigenschaften von Filterstäuben aus Müllverbrennungsanlagen (MVA). Wissenschaftliche Berichte, FZKA-5693, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1996
- [5] Bonomo, A.: Industrial Installation and Testing of an innovative Catalyst System for NOx Removal in WTE Units. In: WTERT 2006 Annual Meeting at Columbia University, New York, 19./20.10.2006. Download: http://www.nextgenbiowaste.com/Publications/Presentations/WTERT%202006%20_Antonio%20Bonomo%20ASM.pdf, Stand: 20.11.2007
- [6] Brunner, M.: Trends und Highlights der thermischen Abfallbehandlung in Europa. In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Energie aus Abfall 2, Neuruppin: TK Verlag, 2007, S.21-28
- [7] Brunner, M.: Trends und Highlights der thermischen Abfallbehandlung in Europa, Vortragsmanuskript, Tagung „Energie aus Abfall“, 01.02.2007
- [8] Brunner, M.: The Impact of Changing Waste streams on the WtE Concept. Download: <http://www.iswa2006.org/PDF/Parallel%20Session%20B%20Green/2b%20-%20Tuesday%201030-1700%20Green/2b%201330%20PPT%20Martin%20Brunner.pdf>, Stand: 27.11.2007
- [9] Bühl, R.; et al.: PVC-Recycling. Produktinformation. Download: <http://www.pvch.ch/pdf/downloads/recybrosch.pdf>, Stand: 23.10.2007
- [10] Bundesminister für Wirtschaft und Arbeit: Bericht der COORETEC-Arbeitsgruppe: „Forschungs- und Entwicklungskonzept für emissionsarme fossilbefeuerte Kraftwerke“, Berlin 2003, ISSN 0342-9288 (BMWA Dokumentation Nr. 527), Download: <http://www.fz-juelich.de/ptj/projekte/datapool/page/1329/doku527.pdf>, Stand 30.11.2007
- [11] Cozzarini, C.: Emissionen und Immissionen von Abgaskomponenten 1996. Bericht B2319 des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und KFZ-Bau der TU Wien, 1996
- [12] Derlien, H.; Faupel, T.; Nieters, C.: Industriestandort mit Vorbildfunktion? Das ostdeutsche Chemiedreieck. November 1999, Download: <http://bibliothek.wz-berlin.de/pdf/1999/iv99-16.pdf>, Stand: 19.10.2007
- [13] Emissionsbericht MVA Weisweiler 1999: Internet-Veröffentlichung , Download: www.mva-weisweiler.de
- [14] Engweiler, J.; Napp, M.: Liberec: Die erste moderne MVA Tschechiens mit von Roll Technologie. In: VDI-Seminar "Energetische Verwertung von Abfällen Benchmarking - Mitverbrennung - Technik und Kosten", Mannheim, 07./08.06.1999. Download: http://www.vonrollinova.ch/site/deutsch/dokumentation/pdf/bibliothek/liberec_d.pdf, Stand: 26.11.2007
- [15] Europäische Union: Richtlinie 2001/81/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2001 über nationale Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, 27.11.2001. Download: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/de/oj/2001/l_309/l_30920011127de00220030.pdf, Stand: 27.11.2007
- [16] Fichtner GmbH & Co. KG: Heavy Metals in the Flue Gas Thermal Waste Treatment Plants. In: EUROFORUM-Konferenz Thermal waste treatment 98, 18.-20.03.1998

- [17] Fishedick, M; CO₂-Abscheidung und -Speicherung - eine vergleichende Betrachtung - Wuppertal Institut; COORETEC*-Workshop Leipzig, März 2005, Download
http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wibeitrag/co2-abscheidung2.pdf, Stand 01.12.2007
- [18] Fischer-Fürnsinn, A.: Biomassekraftwerk Wien - Österreichs größtes Biomasseheizkraftwerk mit Waldbiomasse. 20.04.2005, Download:
http://energytech.at/edz_pdf/20050420_feet_08_bmk_simmering_fischer.pdf, Stand: 23.11.2007
- [19] Foster Wheeler Ltd.: Pioneering CFB Technology. Download:
<http://www.fwc.com/publications/pdf/CFBBrochure.pdf>, Stand: 27.11.2007
- [20] Fuchs, C.: Eingesetzte Rauchgasreinigungstechnik bei aktuell realisierten EBS-Anlagen. In: Fachtagung VDI Wissensforum "Sorbenzien/Betriebsmittel in der Rauchgasreinigung". Köln, 18./19.10.2007
- [21] Fürst, P.: Contribution of different pathways to human exposure to PCDDs/ PCDFs. Organohalogen Compounds 13, 1-8 (1993)
- [22] Gao, L.; et al.: ZECA Technology, a novel process concept for producing hydrogen from coal. Download: <http://www3.imperial.ac.uk/portal/pls/portallive/docs/1/1085904.PDF>, Stand: 26.11.2007
- [23] Handelsblatt: Energieversorger in Deutschland interessiert. 12.11.2007
- [24] Hasse, H.: Reaktivabsorption von CO₂ aus Kraftwerksabgasen. Download: http://www.itt.uni-stuttgart.de/~notz/notz_castor_de.pdf, Stand: 21.11.2007
- [25] hewitech GmbH & Co.KG: Stoffaustausch. Produktbeschreibung, Download:
<http://www.hewitech.de/fuellkoerper/stoffaustausch.php>, Stand: 21.11.2007
- [26] Hüsch, J.: Erfahrungswerte und Entwicklungstendenzen von Sorptionsstufen zur Rauchgasreinigung in Abfallverbrennungsanlagen der BKB. In: Fachtagung VDI Wissensforum "Sorbenzien/Betriebsmittel in der Rauchgasreinigung". Köln, 18./19.10.2007
- [27] Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik; et al.: Entfernung von Dioxin aus sauer gewaschener KVA-Filterasche. 23.01.2007, Download:
<http://www.umtec.ch/dokumente/dokumente/downloads/factsheets/Factsheet%20exDIOX.pdf>, Stand: 27.11.2007
- [28] Jansen, D.: Probleme des Bergversatzes in Deutschland. Download: <http://www.bund-nrw.de/files/probleme-des-bergversatzes.pdf>, Stand: 27.11.2007
- [29] Jirkowsky, C. et al.: Verfahren zur Staubabscheidung bei Biomassefeuerungen ab 100 kW. In: 7. Holzenergie-Symposium, ETH Zürich, 18.10.2002. Download:
<http://www.scheuch.com/assets/download/Vortrag.pdf>, Stand: 20.11.2007
- [30] Kleppmann, F.; Grüttner, W.; Dima, B.: Heiße DeNO_x (katalytische Entstickung) im Müllheizkraftwerk Würzburg. In: Müll und Abfall 6/07. Berlin: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co., S. 269-273
- [31] Kneer, R. et al.: OXYCOAL-AC – Innovative Herausforderungen für eine saubere Lösung der zukünftigen Stromversorgung. Vortrag 2006. Download: http://www.wsa.rwth-aachen.de/kongress/Files/Kneer-OXYCOAL-AC-Saubere_Loesung_der_zukuenftigen_Stromversorgung.pps Stand: 28.11.2007
- [32] KWH Katalysatoren GmbH: ZERONOX® D Katalysatoren zur Zerstörung von Dioxinen und Furanen. Download: <http://www.kwhcatalysts.de/zeronoxd-d.html>, Stand: 26.11.2007
- [33] Lahl, U.: Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft - Der Emissionsbilanz zufolge trägt die Abfallwirtschaft mengenmäßig nur unwesentlich zur Feinstaubbelastung bei. In: MüllMagazin 4/2005. Download: <http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/immissionsbilanz.pdf>, Stand: 27.11.2007
- [34] Lahl, U.: Techniken zur Emissionsminderung von Stickstoffoxiden. In: HSE-Forum, Darmstadt, 05.09.2007. Download:
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/lahl_emissionsminderung.pdf, Stand: 27.11.2007
- [35] Lahl, U.: Neueste Entwicklungen europäischer Emissionsgrenzwerte einschließlich der National Emission Ceilings. In: 19. Kasseler Abfallforum und Bioenergieforum, Kassel, 24.-26.04.2007. Down-

- load: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/vortrag_lahl_emissionsgrenzwerte.pdf,
Stand: 27.11.2007
- [36] Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen: Daten und Fakten; Essen 2000; Download:
<http://www.lanuv.nrw.de/ubweb/ubnrw/kap%203.pdf>
- [37] Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen: Quecksilber und seine Verbindungen bei der Abfall-
verbrennung. Fachbericht II/2003, Download:
http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/fachberichte/fach_2003_02/fachb2_s22_74.pdf, Stand:
20.11.2007
- [38] Lengerer, W.: Membran-Brennstoffzellengesamtsystem Sauerstoffanreicherung für Brennstoffzel-
lensysteme durch Druckwechseladsorption. Seminar, Download: http://pcvt12.icvt.uni-stuttgart.de/VORLESUNGEN/DOKS/vorl_o2anreich.pdf, Stand: 22.10.2007
- [39] Linder, H.: Stickstoffoxid-Entfernung aus Abgasen mittels SCR und SNCR. In: GRIN Verlag für
Akademische Texte. Studienarbeit, 2006
- [40] Loos, T.: Simulation der chemischen Absorption im Strahlwäscher. Dissertation, Dresden,
18.08.2005. Download: http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=981004806&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=981004806.pdf, Stand:
21.11.2007
- [41] Mahler AGS GmbH: Gas Generation and Purification. Firmenbroschüre, Download:
http://www.mahler-ags.com/upload/Firmenbroschuere_Mahler_AGS_GmbH.pdf, Stand: 22.10.2007
- [42] Müller, F.; et al.: Optimierte Membran-Werkstoffe für die Sauerstoffanreicherung - ein Beitrag zum
emissionsarmen fossil befeuerten Kraftwerk. In: Spieß, L.; Kern, H.; Knedlik, C. (Hrsg.): Thüringer
Werkstofftag 2004. Berlin: Verlag Dr. Köster, 2004, S. 77-82
- [43] MVR Müllverwertung Rugenberger Damm GmbH & Co. KG: Baudokumentation, Meßwerte März /
April 1999, SUSA-Verlag, Hameln 1999
- [44] MVR Müllverwertung Rugenberger Damm GmbH & Co. KG: Umwelterklärung 2000. Download:
http://ec.europa.eu/environment/emas/pdf/es_library/37de_mvrrugenberger00_de.pdf, Stand:
27.11.2007
- [45] Nawaz, M.; Ruby, J.: Zero Emission Coal Alliance Project Conceptual Design and Economics.
Download:
http://manhaz.cyf.gov.pl/manhaz/links/COAL_BASED_NEW_TECHNOLOGIES/conceptual_design_and_econ.pdf, Stand: 19.10.2007
- [46] Nussbaumer, T.: Feinstaubminderung und Stromerzeugung im Rahmen der zukünftigen Energie-
versorgung. In: 9. Holzenergie-Symposium, ETH Zürich, 20.10.2006. Download:
<http://www.holzenergie-symposium.ch/Dokumente/Tgband9HES.pdf>, Stand: 27.11.2007
- [47] Orloff, E.: TREA Breisgau - Erste Erfahrungen im neuen Abfallzeitalter. In: VDI Wissensforum Semi-
nar "BAT-, energie- und preisorientierte Verfahrens-/Rauchgasreinigungstechniken 2007 für
Verbrennungs- und Feuerungsanlagen". München, 20.-21.09.2007
- [48] Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik: Mobilität. 2005, Download: <http://aaa.auto-umwelt.at/>, Stand: 26.11.2007
- [49] Pregger, T.: Ermittlung und Analyse der Emissionen und Potenziale zur Minderung primärer anthro-
pogener Feinstäube in Deutschland, Dissertation Universität Stuttgart, 2006, Download:
http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2006/2590/pdf/Pregger_2006_Dissertation.pdf
- [50] Pretzl, R.; Jirkowsky, C.: Möglichkeiten der Partikelabscheidung und Energie-Kostenoptimierung
durch Wärmerückgewinnungsverfahren. In: Biomassekonferenz 2005. Download:
http://www.oesfo.at/static/mediendatenbank/root01/Veranstaltungen%20Downloads/Mitteleurop%C3%A4ische%20Biomassekonferenz%202005/Vortr%C3%A4ge/Pretzl_long.pdf, Stand: 27.11.2007
- [51] Raible, L.; Vogg, H.: Dioxine und Furane im Abgasweg von Müllverbrennungsanlagen - Einflusspa-
rameter und Minderungsmöglichkeiten. In: Abfallwirtschafts Journal 8, 3, 1996, S. 46-52
- [52] Reimann, D.: Einfluß von PVC auf die Müllverbrennung. In: EntsorgungsPraxis 5/1990

- [53] Renz, U.; et al.: Entwicklung eines CO₂-emissionsfreien Kohleverbrennungsprozesses zur Stromerzeugung. In: CCS-Tagung, Jülich, 10.-11.11.2005
- [54] Rijpkema, L.: TNO-Report PVC and municipal solid waste combustion: burden or benefit? , TNO Institute of Environmental Sciences, Energy Research and Process Innovation, Apeldoorn, December 1999
- [55] Röhm, H-J. et al.: CO₂-Abscheidung aus Rauchgasen und Umsetzung zu Wertstoffen. Vortrag, 2004
Download: <http://www.energieforum.ruhr-uni-bochum.de/Energietag04/Roehm.pdf>
- [56] Rolker, J.; Art, W.: Abtrennung von Kohlendioxid aus Rauchgasen mittels Absorption. In: Chemie Ingenieur Technik 2006, 78 Nr. 4. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, S. 416-424
- [57] Schecter, A., Pöpke, O. und Fürst, P., Is there a decrease in general population dioxin body burden? A review of German and American data. Organohalogen Compounds 30, 57-60 (1996)
- [58] Schlumberger, S.: Entwicklung und Optimierung eines Verfahrens zur selektiven Zinkrückgewinnung aus sauren Ascheextrakten der thermischen Abfallentsorgung. Dissertation, Technische Universität München, 2005. Download: deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=978146255&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=978146255.pdf , Stand: 27.11.2007
- [59] Schu, R., Niestroj, J.: Anlagenauslegung, Brennstoffbeschaffung und Qualitätssicherung für Abfallverbrennungsanlagen. In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Energie aus Abfall 2, Neuruppin: TK Verlag, 2007, S.319-344
- [60] Seiler, U.: Gegenüberstellung der spezifischen Behandlungskosten von Quasitrocknen Abgasreinigungsanlagen beim Einsatz verschiedener Sorbenzien. In: Fachtagung VDI Wissensforum "Sorbenzien / Betriebsmittel in der Rauchgasreinigung". Köln, 18./19.10.2007
- [61] Srivastava, R. K.: Status of Mercury Control Technologies for Coal-Fired Power Plants. In: MIT Air Toxics Symposium, 05.08.2004
- [62] Thambimuthu, K.: Canadian Perspectives and Initiatives for the Development and Deployment of Zero Emissions Technology. IEA Zets 2nd Workshop, Washington, DC, 19.03.2002. Download: http://www.iea.org/Textbase/work/2002/washington/1_Tham_rev.pdf, Stand: 26.11.2007
- [63] Umweltbundesamt: Forschungsbericht 94-104 03 524 - Die Entwicklung der Schwermetallemissionen in der Bundesrepublik Deutschland von 1985 bis 1995,
www.umweltbundesamt.de/luft/emissionen/bericht/aktuelle_daten/schadstoffe/daten_schwermetalle/schadstoff_schwermetalle_prio.pdf
- [64] Umweltbundesamt: Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC, UBA Red. Abt. IV 2, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1999
- [65] Umweltbundesamt: Emissionen ausgewählter Luftschadstoffe nach Quellgruppen in Deutschland 1990 bis 2005. Download: <http://www.env-it.de/umweltdaten/public/document/downloadImage.do?ident=9253>, Stand: 27.11.2007
- [66] Umweltbundesamt: Hintergrundinformation Dioxine. Download:
<http://www.umweltbundesamt.de/chemikalien/dioxine.htm> , Stand: 27.11.2007
- [67] Vehlow, J.: Korrelation zwischen PVC-Fracht und Dioxinen bei der Mitverbrennung im Restabfall, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Technische Chemie, Bereich Thermische Abfallbehandlung, September 1996
- [68] Von Roll Inova, Firmenprospekt, Abgaswäsche schadstofffrei in mehreren Schritten. Download: http://www.vonrollinova.ch/site/deutsch/dokumentation/pdf/vri_abgaswsch_d.pdf, Stand: 30.11.2007
- [69] Vorsteen, B.; et al.: Hg-Rückhaltung im reingasseitigen SCR-Katalysatorbett hinter der Rauchgaswäsche einer Sonderabfall-Verbrennungsanlage. In: VGB PowerTech 4/2003. Download: http://www.nrcan.gc.ca/es/etb/cetc/combustion/co2network/pdfs/mec2_vgb_vosteen.pdf, Stand: 20.11.2007
- [70] Werneke, H.; Backhaus, C. (Erfinder); Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.: Membrantrennverfahren zur Anreicherung wenigstens einer Gaskomponente in einem Gasstrom. Offenlegungsschrift, DE 102 209 232 A1 2004.01.29, Offenlegungstag 29.01.2004

- [71] Winter, B.; et al.: Abfallvermeidung und -verwertung: Aschen, Schlacken und Stäube in Österreich. Wien, 2005. Download: <http://www.ubavie.gv.at/fileadmin/site/publikationen/REP0003.pdf>, Stand: 27.11.2007
- [72] Ziock, H.-J.; Harrison, D. P.: Zero Emission Coal Power, a New Concept. Download: http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon_seq/2b2.pdf, Stand: 26.11.2007