

# **Optimierungspotentiale von Abgasreinigungsverfahren in MVA- Bestandsanlagen insbesondere im Hinblick auf den "Verwerterstatus"**

**Dipl.-Ing. Rudi Karpf**

**Dipl.-Ing. Tina Krüger**

**ete.a Ingenieurgesellschaft mbH, Lich**

6. Tagung  
Trockene Abgasreinigung:  
für Feuerungsanlagen und thermische Prozesse  
Essen, 11. - 12. November 2010

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Beseitigungs- oder Verwertungsanlage?</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Aufbau und Merkmale der trockenen Verfahren</b> .....	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Anforderungen an die Abgasreinigung</b> .....	<b>6</b>
<b>4.1</b>	<b>KALKHYDRATBASIERTE VERFAHREN</b> .....	<b>9</b>
4.1.1	<i>Beispiel 1: MHKW Wuppertal</i> .....	9
<b>4.2</b>	<b>NATRIUMHYDROGENCARBONATBASIERTE VERFAHREN</b> .....	<b>12</b>
4.2.1	<i>Beispiel 2: Kassel</i> .....	12
4.2.2	<i>Beispiel 3: MVA Weisweiler</i> .....	15
<b>4.3</b>	<b>KOMBINIERTER VERFAHREN</b> .....	<b>19</b>
4.3.1	<i>Beispiel 4: MVA Delfzijl (Kalk und Bicar)</i> .....	19
4.3.2	<i>Beispiel 5: HVC Alkmaar (kond. Trockensorption mit nasser Feinreinigung)</i> .....	22
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>26</b>

## 1 Einleitung

Der Aspekt der Energieerzeugung aus Abfällen gewinnt durch die steigenden Anforderungen an den Klimaschutz sowie der immer knapper werdenden Ressourcen an Primärenergieträgern immer mehr an Bedeutung. Auch die stetig steigenden Primärenergiepreise geben neue Anreize, die noch im Abgas zur Verfügung stehenden Energiepotentiale zu nutzen.

Somit steigt zunehmend die Motivation, auch bestehende Anlagen energetisch zu optimieren um vom Beseitiger- hin zum Verwerterstatus zu wechseln. Denn neben den geringeren Energiekosten hat der Verwerterstatus für den Betreiber den Vorteil, dass auch Abfälle außerhalb seines Entsorgungsgebietes akquiriert werden können, was die Anlagenauslastung sicherstellen kann.

Die Energieeffizienz einer thermischen Abfallbehandlungsanlage ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Ein großes Optimierungspotential bietet sicher der Kessel mit dem dazugehörigen Dampf-Kondensatsystem. Aber auch im Bereich der Abgasreinigungsanlage gibt es Möglichkeiten, den Energieverbrauch zu reduzieren und/oder Wärmeenergie auszukoppeln. Die vorliegende Ausarbeitung möchte im speziellen auf die Energieoptimierungspotentiale der trockenen Abgasreinigungsverfahren näher eingehen.

## 2 Beseitigungs- oder Verwertungsanlage?

Die politische Antwort auf diese Frage liefert die Abfallrahmenrichtlinie RL 2008/98/EG. Hierin wird über eine Bilanzformel, die so genannte R1-Kennzahl bestimmt, wobei per Definition ab einem Wert von 0,65 bei Neuanlagen bzw. 0,6 bei Altanlagen<sup>1</sup> eine Verwertungsanlage vorliegt.

Es ist jedoch zu beachten, dass die R1-Formel eine politische Ordnungsfunktion darstellt, mit dem Ziel, eine juristische Abgrenzung zwischen Beseitigungs- und Verwertungsanlagen herzustellen (vgl. [1]). Um das technische Optimierungspotential hinsichtlich einer Energieeffizienz aufzuzeigen, liefert die VDI-Richtlinie 3460, Blatt 2 eine exaktere Methode.

---

<sup>1</sup> Altanlage: Genehmigung vor 01.01.2009

### 3 Aufbau und Merkmale der trockenen Verfahren

Trockensorptionsverfahren sind Abgasreinigungsverfahren, die weder Nasswäscher noch Elektrofilter (als Vorentstauber) benötigen. Die Staub- und Schadstoffabscheidung erfolgt simultan an einem Gewebefilter. Hierbei wird ein pulverförmiges Reagenz (Natriumhydrogencarbonat oder Kalkhydrat) in den Abgasstrom geblasen und danach an einem Gewebefilter (Schlauchfilter) abgeschieden. Durch chemische Reaktionen zwischen dem Reagenz und den gasförmigen Schadstoffen Chlorwasserstoff (HCl), Fluorwasserstoff (HF) und Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) werden diese Schadstoffe an dem Reagenz gebunden.

Auf die genauen chemischen Vorgänge bei der Schadgasabscheidung mit Natriumbicarbonat und Kalkhydrat wird an dieser Stelle nicht detaillierter eingegangen und stattdessen auf die bestehende, umfangreiche Literatur (z.B. [2], [3]) verwiesen.

Ein von der Abgasfeuchte unabhängiges trockenes Abgasreinigungsverfahren ist der Einsatz von Natriumhydrogencarbonat oder Natriumbicarbonat (NaHCO<sub>3</sub>) als Additiv. Natriumbicarbonat (NaHCO<sub>3</sub>) zersetzt sich bei etwa >140 °C im Abgas zu Natriumcarbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasserdampf (H<sub>2</sub>O). Dabei hinterlassen die gasförmigen Zersetzungsprodukte des Bicarbonats, die CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Moleküle, nach dem Übergang in die Gasphase Lücken bzw. Löcher im Reagenzpartikelkorn, sodass hierdurch Natriumcarbonat mit einer hohen spezifischen Oberfläche entsteht. Das frisch erzeugte Natriumcarbonat ist daher reaktiver als das normale Kalkhydrat. Die Anforderungen an den Prozess für eine effektive Schadgasabscheidung bestehen darin, dass über ein Aufmahlen des Natriumbicarbonats eine große Oberfläche und somit Stoffaustauschfläche geschaffen sowie eine Mindestverweilzeit von 2 Sekunden bei einer Temperatur >140°C sichergestellt werden muss. Weiterhin ist eine gute und homogene Verteilung des Natriumbicarbonats im Abgasstrom zu gewährleisten.

Anders als beim Natriumbicarbonat ist die relative Abgasfeuchte bei dem trockenen Abgasreinigungsverfahren mit Kalkhydrat von großer Bedeutung. Denn bei einer ausreichend hohen Feuchte im Abgas bilden sich Hydrathüllen um die Kalkpartikel, wodurch die Reaktionskinetik gegenüber reiner Trockensorption außerordentlich begünstigt wird. Das bedeutet, dass Adsorptions- und Absorptionsvorgänge nebeneinander ablaufen. Dabei begünstigt die Hydrathülle den Stoffübergang Gas-/Partikeloberfläche und die Porendiffusion durch gewisse Löseeffekte, die im molekularen Bereich schnelle Ionenreaktionen ermöglichen. Abhängig von der vorhandenen Abgasfeuchte und -temperatur findet die Trockensorption mit Kalkhydrat typischerweise bei Abgastemperaturen von 130 – 150 °C statt. Anders als beim Natriumbicarbonat ist für eine optimale Schadgasabscheidung mittels Kalkhydrat das

Vorhandensein eines nachgeschalteten Gewebefilters mit Rezirkulation des am Gewebefilter abgeschiedenen Reststoffes unerlässlich. Der sich auf den Filterschläuchen aufbauende Filterkuchen bietet eine ausreichend hohe Kontaktzeit zwischen Abgas und Additiv.

Ferner ist die ausreichende Bildung von Calciumchlorid aus  $\text{Ca(OH)}_2$  und HCl für den Prozess von Bedeutung, da das Calciumchlorid aufgrund seiner hygroskopischen Eigenschaften die Bildung der oben genannten Hydrathüllen um die Kalkhydratpartikel begünstigt.

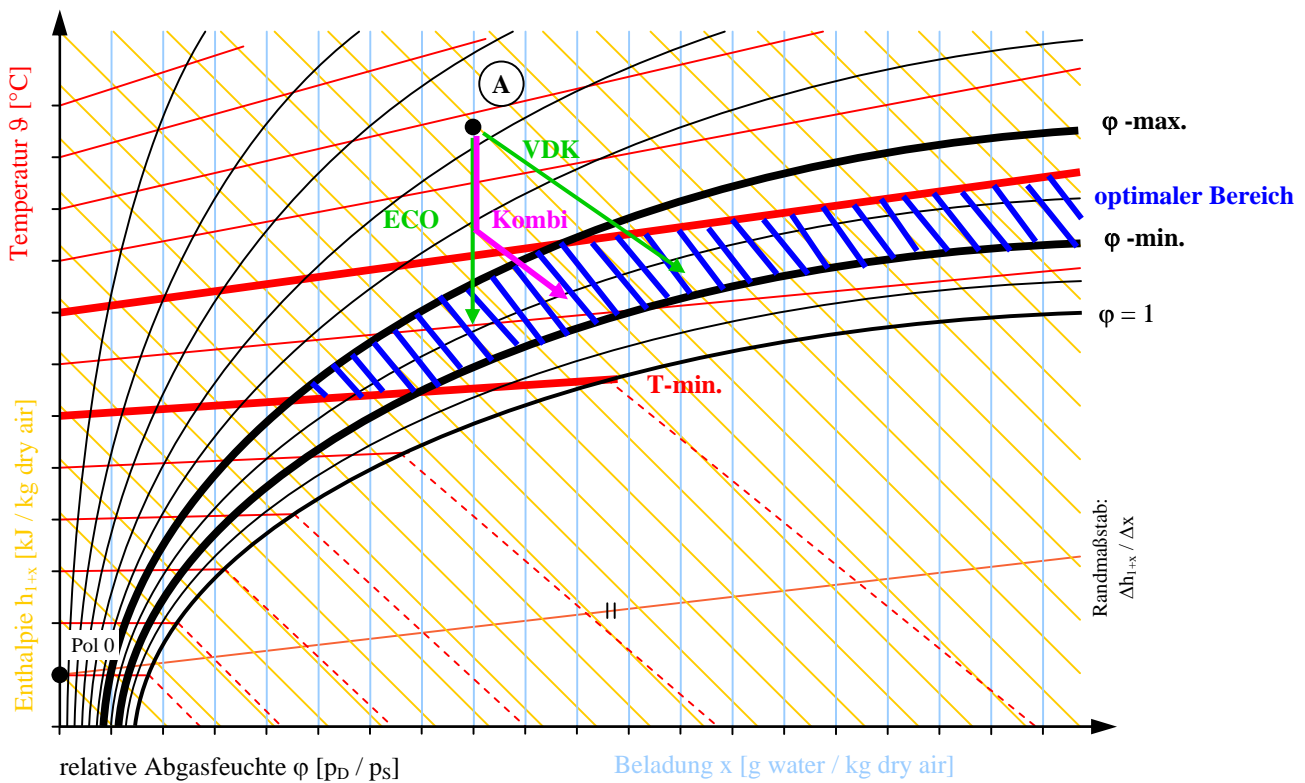
Des Weiteren wurde in [4] ermittelt, dass es eine Zwischenreaktion von bereits gebildetem Calciumchlorid mit Calciumhydroxid gibt, bei der das sogenannte Calciumhydroxidchlorid ( $\text{Ca(OH)Cl}$ ) gebildet wird. Dieses Calciumhydroxidchlorid ist reaktiver als das Calciumhydroxid, da sich aufgrund seiner Molekülstruktur ein schwaches Dipolmoment ergibt. Das Vorhandensein von Calciumhydroxidchlorid verbessert somit die Abscheidung der sauren Schadgase, insbesondere die Abscheidung des reaktionsträgeren  $\text{SO}_2$ .

Durch die Rezirkulation des am Gewebefilter abgeschiedenen Reststoffes wird dem Prozess neben den noch unreaktierten Kalkhydratpartikeln auch das gebildete Calciumchlorid sowie das Calciumhydroxidchlorid wieder zugeführt und somit die  $\text{SO}_2$ -Abscheidung unterstützt. (vgl. [2])

Die Anforderungen an den Prozess bestehen somit zum einem in der Einstellung der für die Trockensorption notwendigen relativen Abgasfeuchte sowie zum anderen in der Sicherstellung eines ausreichend dicken Filterkuchens und der Rezirkulation der Reststoffe.

## 4 Anforderungen an die Abgasreinigung

Wie in Kapitel 3 erläutert, ist für die Schadgasabscheidung mit Kalkhydrat die Einstellung der optimalen relativen Abgasfeuchte von wesentlicher Bedeutung. Abbildung 1 zeigt den optimalen Temperatur-Feuchte-Bereich (blau markiert) für die konditionierte Trockensorption mit Kalkhydrat. Dieser kann durch Eindüsen von Wasser in einem Verdampfungskühler (VDK – grün markiert), durch die Abgaskühlung mittels ECO (grün markiert) oder durch eine Kombination aus beidem (pink markiert) erreicht werden.



**Abb. 1:** Darstellung optimaler Temperatur-Feuchte-Bereich für die konditionierte Trockensorption mit Kalkhydrat.  
A = Ausgangspunkt

Während im ersten Fall die im Abgas enthaltene Wärmeenergie vollständig vernichtet wird, kann diese in den beiden anderen Fällen noch (teilweise) durch die Auskopplung mittels eines Wärmetauschers z.B. für die Kondensataufheizung genutzt werden. In ausgeführten Trockensorptionsanlagen ist der Einsatz eines Verdampfungskühlers am verbreitetsten und stellt dadurch ein Optimierungspotential dar.

Bei der Überlegung hinsichtlich einer Umstellung vom Verdampfungskühler- hin zum Wärmeauskopplungs-Betrieb ist zu beachten, dass Letzterer nur sehr träge und nur in bestimmten Grenzen auf mögliche Temperaturschwankungen im Abgaseintritt reagieren kann. Die genaue Einstellung der optimalen Abgastemperatur kann dadurch sehr schwierig werden. Aus diesem Grund kann die Kombination aus einem Verdampfungskühler und einem Wärmetauscher empfehlenswert sein. Mittels des Wärmetauschers kann die Hauptwärmeenergie des Abgases ausgekoppelt und genutzt werden, während mit Hilfe des Verdampfungskühlers die optimale Abgastemperatur sehr genau eingestellt werden kann.

Eine andere Möglichkeit, die Trägheit des Wärmetauschers auszugleichen und eine optimale Abgastemperatur auch bei sich ändernden Eintrittstemperaturen einzustellen, besteht darin, dass Rezirkulat vor Aufgabe in das Abgas anzufeuchten. Der so eingebrachte Wasseranteil sollte 5 Gew.-% des Rezirkulat-Massenstroms nicht überschreiten. Von Vorteil ist hierbei auch, dass im Vergleich zu einem Verdampfungskühler nur sehr wenig Platz für den sogenannten Befeuchtungsmischer benötigt wird.

## 5 Energieoptimierte Abgasreinigungskonzepte

Eine Energieoptimierung von Abgasreinigungsanlagen kann vor allem durch folgende wesentliche Maßnahmen erfolgen.

1. Verringerung des Druckverlustes:

- Ersatz von AGR-Anlagen mit hohem Druckverlust (z.B. mehrstufige nasse Verfahren) durch druckverlustärmere AGR-Anlagen (z.B. konditionierte Trockensorption)
- Optimierung der Strömungsverhältnisse in den AGR-Komponenten und –Kanälen (z.B. Vermeidung von 90°-Bögen bzw. Einsatz von Leitblechen)
- Vermeidung von Staubablagerungen in der AGR-Anlage

2. Verringerung der Betriebstemperatur des SCR-Katalysators: Durch die Verringerung der Betriebstemperatur verringert sich auch der Energieaufwand zur Aufheizung des Abgases vor SCR-Katalysator (geringere Abstrahlverluste). Vorhandene SCR-Katalysatoren können – je nach Ausführung und Dotierung/Aktivität– als sogenannte Niedertemperatur-Katalysatoren betrieben werden. Wichtig ist hier vor allem die Möglichkeit, den Katalysator in regelmäßigen Abständen zu regenerieren, also auszuheizen.

3. Reduzierter Einsatz bzw. Ersatz des VDK durch einen Wärmetauscher: vgl. Ausführung in Kapitel 4.

Im Folgenden werden ausgeführte Abfallverbrennungsanlagen mit energetisch optimierten, trockenen Abgasreinigungsverfahren vorgestellt.



## 4.1 Kalkhydratbasierte Verfahren

### 4.1.1 Beispiel 1: MHKW Wuppertal

Das Müllheizkraftwerk Wuppertal besteht aus vier Verbrennungseinheiten sowie einer Reserveeinheit und hat eine Verbrennungskapazität von ca. 400.000 t Hausmüll pro Jahr. Dabei wird eine elektrische Energie von ca. 180.000 MWh erzeugt. Abzüglich des eigenen Energiebedarfs speist die AWG ca. 140.000 MWh in das Stromnetz der Stadtwerke Wuppertal AG ein. Zusätzlich wird Fernwärme in das Netz der WSW und an das benachbarte Freibad abgegeben. (vgl. [5])

Jedem Kessel ist zur Abscheidung des Flugstaubs ein Elektrofilter nachgeschaltet. Die anschließende Abgasreinigung gliedert sich in die so genannte Abgasvorreinigung, in der die Abscheidung der sauren Schadgaskomponenten sowie eine Vorabscheidung der Schwermetalle erfolgt und die Abgasnachreinigung, in welcher die Hauptabscheidung der Schwermetalle, Dioxine und Furane sowie die Entstickung stattfinden (vgl. Abb. 2).

Das Abgas aller Verbrennungseinheiten wird in einem Sammelkanal zusammengeführt und auf die vier parallel betriebenen Abgasvorreinigungslinien verteilt. Zwei dieser Vorreinigungslinien bestehen aus dem sogenannten NID-Verfahren, in welchem Branntkalk ( $\text{CaO}$ ) Vorort in einem Trockenlöscher zu Kalkhydrat ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) abgelöscht wird. Im Befeuchtungsmischer werden das Rezirkulat sowie das frisch erzeugte  $\text{Ca(OH)}_2$  mit Wasser befeuchtet und in das Abgas dosiert. Durch die große Menge an befeuchtem Rezirkulat wird das Abgas im NID-Reaktor von 170 °C auf ca. 140 °C abgekühlt. Zuvor wird über einen Gas-Wasser-Wärmetauscher (WT 35/36), welcher in dem gemeinsam genutzten Abgaskanalstück der NID-Linien 35 und 36 installiert ist (vgl. Abb. 2), das Abgas von ca. 225 °C auf 190 - 170 °C (abhängig vom Lastfall) abgekühlt. Die Wärmeenergie des Abgases wird dabei für die Vorwärmung des Kondensats verwendet. Die Reaktionsprodukte werden am nachgeschalteten Gewebefilter abgeschieden und teilweise rezirkuliert.

Die beiden anderen Abgasvorreinigungslinien besitzen zunächst einen Verdampfungskühler zur Abkühlung des Abgases von ca. 225 °C auf ca. 145 °C. Anschließend erfolgt die trockene Dosierung von  $\text{Ca(OH)}_2$  und Herdofenkoks (HOK). Im nachgeschalteten Gewebefilter werden die Reaktionsprodukte abgeschieden und teilweise rezirkuliert. Vor Dosierung in den Abgasstrom wird das Rezirkulat mit Wasser befeuchtet um eine Verbesserung der Abscheidebedingungen zu erzielen. Dadurch wird das Abgas nochmals von ca. 145 °C auf ca. 140 °C abgekühlt.

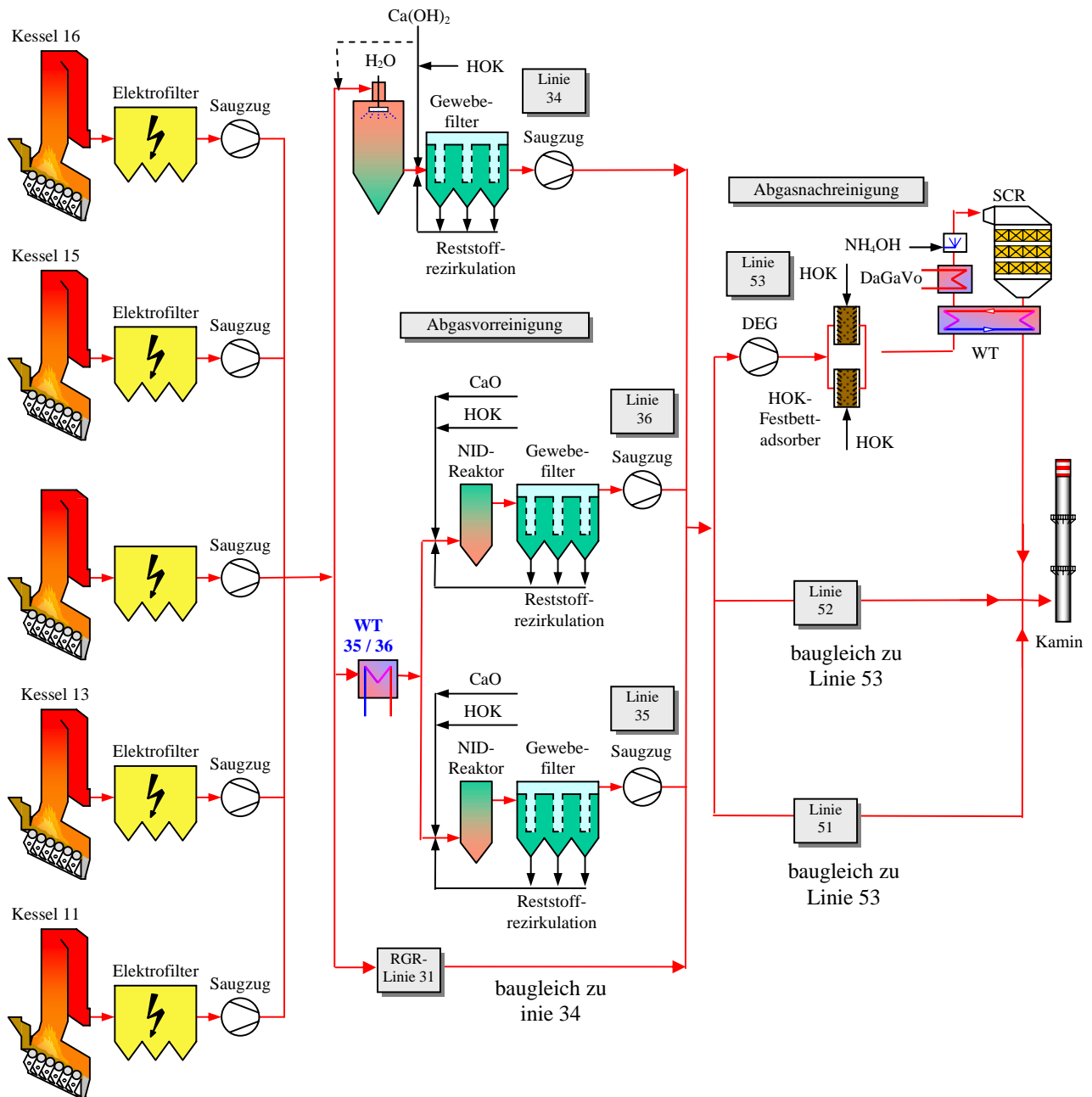


Abb. 2: Übersichtsschema des MHW Wuppertal ([5], verändert).

Nach der Vorreinigung werden die Abgase über eine weitere Abgassammelschiene auf drei parallel betriebene Nachreinigungsstufen verteilt. Dort erfolgt die Hauptabscheidung der Schwermetalle, Dioxine und Furane durch Adsorption an Herdofenkoks in Festbettadsorbern. Die Abgase werden anschließend vor dem Eintritt in die DeNOx-Anlagen zum Erreichen der erforderlichen Reaktionstemperatur von 170 °C mittels eines Gas-Gas-Wärmetauschers und

eines Dampf-Gas-Vorwärmers aufgeheizt, bevor die Eindüsung des Ammoniakwassers (NH<sub>4</sub>OH) für die Entstickung in den SCR-Katalysatoren erfolgt.

Die Abgasdaten des MHKW Wuppertal sind in Tabelle 1 aufgeführt. Es gelten die Grenzwerte der 17. BImSchV.

**Tab. 1: Abgasdaten MHKW Wuppertal.**

Parameter	Einheit	Nominallast	Maximallast
Volumenstrom, trocken	Nm <sup>3</sup> /h tr.	96.800	106.480
Abgastemperatur	°C	230	250
H <sub>2</sub> O	Vol.-% f.	15	25
O <sub>2</sub>	Vol.-% f.	8	11
Schadgaskonzentrationen	Einheit	TMW	HMW
HCl	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	1.200	2.500
HF	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	15	30
SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	300	1.200
NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	300	400
Staub	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	50	50
Hg	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	0,7	1,5
Cd + Tl	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	1	5

Wie anhand der beiden Abgasvorreinigungslinien 35 und 36 zu sehen ist, ist auch bei Einsatz eines kalkhydratbasierten Verfahrens die Nutzung der Abgaswärme und somit eine Steigerung der Energieeffizienz möglich.

Die mittels des Wärmetauschers der beiden Vorreinigungslinien 35 und 36 (WT 35/36) ausgekoppelte Energie wird für die Kondensataufwärmung verwendet. Dabei wird ein Teilstrom des Kondensats über den Wärmetauscher geführt und dadurch vorgewärmt. Durch den WT 35/36 wird die Rauchgastemperatur im Sammelkanal von ca. 220 °C auf ca. 190 - 170 °C (je nach Lastfall) reduziert. Die dabei ausgekoppelte Energie wird zur Vorwärmung des Kondensats von 60 °C auf ca. 73 °C verwendet. Die restliche Erwärmung des Kondensats erfolgt in einem Dampf-Wasser-Wärmetauscher mittels Zuführung von Anzapfdampf aus der Turbine.

Die durch den Wärmetauscher 35/36 eingesparte Menge an Anzapfdampf kann entweder verstromt oder zur Fernwärmeauskopplung verwendet werden. Je nach Betriebsweise der Abgasreinigungsanlage (Lastfall, Rohgastemperatur) können dank des WT 35/36 1,5 bis 3 MW Fernwärme ausgekoppelt bzw. 300 bis 600 kW Strom zusätzlich erzeugt und eingespeist werden. (vgl. [5])

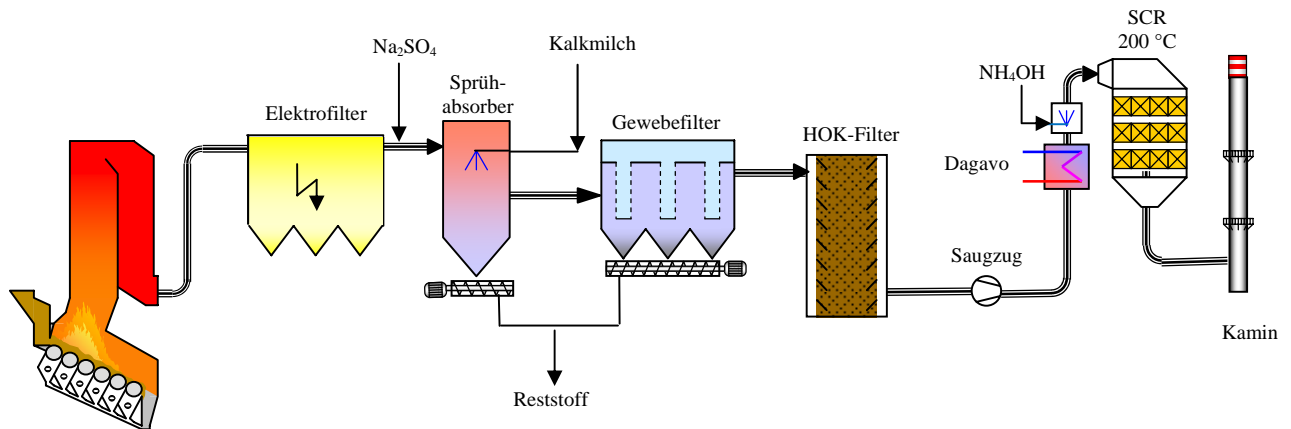
## **4.2 Natriumhydrogencarbonatbasierte Verfahren**

### **4.2.1 Beispiel 2: Kassel**

Das Müllheizkraftwerk (MHKW) Kassel besteht aus zwei baugleichen Verbrennungslinien in denen pro Jahr ca. 150.000 t Haus- und Gewerbemüll verbrannt werden. Bei Nennlast der Anlage werden pro Stunde ca. 36 t Dampf pro Linie erzeugt und zum Antrieb einer Turbine zur elektrischen Stromerzeugung genutzt. (vgl. [6])

Aufgrund des sanierungsbedürftigen Zustands der vorhandenen alten Abgasreinigungskomponenten E-Filter, Sprühabsorber und Gewebefilter wurde entschieden, diese durch eine energetisch optimierte Abgasreinigungsanlage zu ersetzen.

Vor Umbau der Abgasreinigungsanlage wurde nach dem Kessel das ca. 270 bis 230 °C (je Reisezeit) heiße Abgas in einem Elektrofilter vorentstaubt. Durch die Eindüsung von Dinatriumtetrasulfid ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) wurde eine Schwermetallsenke geschaffen, so dass im Abgas enthaltene Schwermetalle schon hier zu einem großen Teil gebunden wurden. Der nachfolgende Sprühabsorber diente zur Temperaturabsenkung des Abgases auf 140 °C sowie durch den in Form von Kalkmilch eingebrachten Kalk zur Bindung der sauren Schadgasbestandteile ( $\text{SO}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$  und  $\text{HF}$ ). An dem nachgeschalteten Gewebefilter wurden die Abgasstäube bzw. Reaktionssalze abgeschieden. Nach dem Gewebefilter wurde das Abgas über den HOK-Wanderbettfilter geleitet. Im Anschluß an den HOK-Filter erfolgte die Eindüsung einer Ammoniaklösung. In einem nachfolgenden Dampf-Gas-Vorwärmer (DaGaVo), wurde die Abgastemperatur mit Frischdampf [420 °C, 42 bar (ü)] von 140 °C auf die Katalysatorbetriebstemperatur von 200 °C erhöht (vgl. Abb. 3).



**Abb. 3:** Darstellung der Abgasreinigungsanlage im MHW Kassel vor Umbau ([7], verändert).

Die Abgasdaten der MHW Kassel sind in Tabelle 2 aufgeführt. Es gelten die Grenzwerte der 17. BImSchV.

**Tab. 2:** Abgasdaten MHW Kassel ([8], korrigiert).

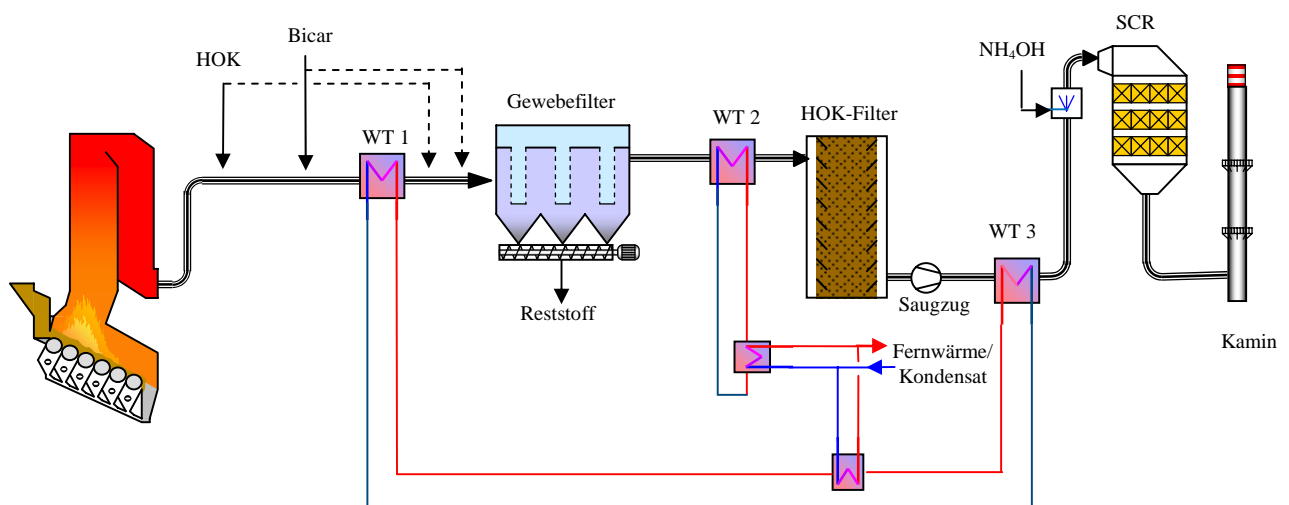
Parameter	Einheit	TMW	HMW
Volumenstrom, trocken	Nm <sup>3</sup> /h f.	60.000	60.000
Abgastemperatur	°C	250	250
Schadgaskonzentrationen	Einheit	TMW	HMW
HCl	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	1.200	2.500
HF	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	25	25
SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	500	1.500
Staub	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	1.500	3.000
Hg	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	1,0	1,5

Der Aufbau der neuen Abgasreinigungsanlage ist in Abbildung 4 dargestellt.

Direkt nach Kessel bzw. dem ersten Wärmetauscher WT 1 (variable Eindüsstelle) erfolgt die Dosierung von Natriumbicarbonat und HOK zur Abscheidung der sauren Schadgaskomponenten und der Schwermetalle, Dioxine und Furane. Anschließend wird das Abgas mittels eines ersten Wärmetauschers (WT 1) von ca. 250 °C auf ca. 180 °C abgekühlt. Im Gewebefilter erfolgt die Abscheidung der Reaktionsprodukte und des im Abgas enthaltenen Flugstaubs. Nach dem Gewebefilter erfolgt eine weitere Abgasabkühlung mittels

Wärmetauscher (WT 2) von 180 °C auf ca. 140 °C bevor das Abgas in den HOK-Filter geleitet wird. Dieser dient als Polizei-Filter für die noch im Abgas enthaltenen Schwermetalle, Dioxine und Furane. Vor Eintritt in den SCR-Katalysator wird das Abgas mittels eines dritten Wärmetauschers (WT 3) wieder auf ca. 180 °C aufgewärmt. (vgl. [9])

Die ausgekoppelten Wärmeenergien aus den Wärmetauschern 1 und 2 werden zur Wiedererwärmung des Abgases vor SCR-Katalysator und/oder (abhängig vom Lastfall) für die Fernwärmeauskopplung bzw. die Kondensataufheizung verwendet.



**Abb. 4:** Darstellung der Abgasreinigungsanlage im MHKW Kassel nach Umbau ([7], [9], verändert).

Die technischen Daten der drei Wärmetauschern sind der Tabelle 3 zu entnehmen.

**Tab. 3:** Technische Daten der Wärmetauscher im MHKW Kassel [7].

Position	WT 1	WT 2	WT 3
Rohre	Glattrohre	Rippenrohre	Rippenrohre
Module	5	2	4
Heizfläche	1.029 m <sup>2</sup>	836 m <sup>2</sup>	1.272 m <sup>2</sup>
Wärmeleistung	1.500 kW	1.409 kW	1.126 kW

Mit dem gewählten Abgasreinigungskonzept können ca. 1.240 kW Wärme je Linie aus dem Abgasstrom ausgekoppelt werden, wie Tabelle 4 zeigt.

**Tab. 4: Technische Daten der Abgasreinigung im MHKW Kassel ([9], [10]).**

Parameter	Einheit	WT 1	GWF	WT 2	SZG	HOK-Filter	WT 3	SCR	Summe
Temperatur	°C	180	170	130	140	140	200	200	-
Druckverlust	mbar	10	20	10	(75)*	10	10	5	65
Druckluftverbrauch	m³/h	150	-	-	-	-	-	150	
Stromverbrauch	kW	(10)***	100	-	268	50	-	-	(486)**
Wärmeaus- bzw. -einkopplung	kW	+1.667	-	+1.006	-	-	-1.432	-	<b>+1.241</b>

\* Gesamtförderhöhe des Saugzuges

\*\* Stromverbrauch einschließlich der Druckluftherzeugung ( $P_{el.} = 48 \text{ kW}$ ) und Lüfter für Bicar-Eindüsung ( $P_{el.} = 10 \text{ kW}$ )

\*\*\*Förderluft für Kugelregenanlage

#### 4.2.2 Beispiel 3: MVA Weisweiler

Die Müllverbrennungsanlage (MVA) Weisweiler besteht aus 3 separaten Linien in denen pro Jahr ca. 360.000 t Abfall (Haus- und Gewerbemüll) verbrannt werden können. Bei Nennlast der Anlage werden pro Stunde ca. 51,5 t Dampf pro Linie erzeugt. Dieser wird im benachbarten Kraftwerk zum Antrieb einer Turbine zur elektrischen Stromerzeugung genutzt.

Aufgrund umfangreicher, verschleißbedingt erforderlicher Sanierungsmaßnahmen in der Abgasreinigung wird seitens des Betreibers ein Umbau der vorhandenen Abgasreinigung angestrebt. Neben der Senkung der Betriebskosten besteht eine Hauptmotivation darin, die Energiebilanz der Anlage zu verbessern und die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren.

Die vorhandene Abgasreinigungsanlage der MVA Weisweiler besteht aus einem Sprühtrockner, Gewebefilter, 2-stufigem Wäscher und einer SCR DeNOx-Anlage als Endreinigungsstufe (vgl. Abb. 5).

Nach Austritt aus dem Wäscher erfolgt die Wiederaufheizung des Abgases über einen Gas-Gas-Wärmetauscher und einen Erdgasbrenner von ca. 60 °C auf die Betriebstemperatur des Katalysators von ca. 320 °C.

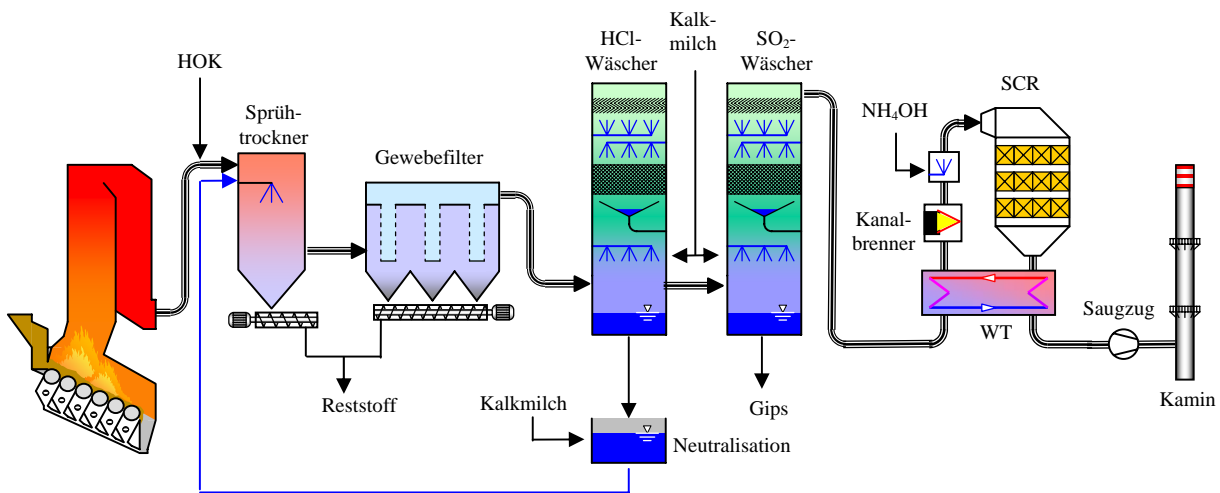


Abb. 5: Ist-Zustand der Abgasreinigungsanlage der MVA Weisweiler [11].

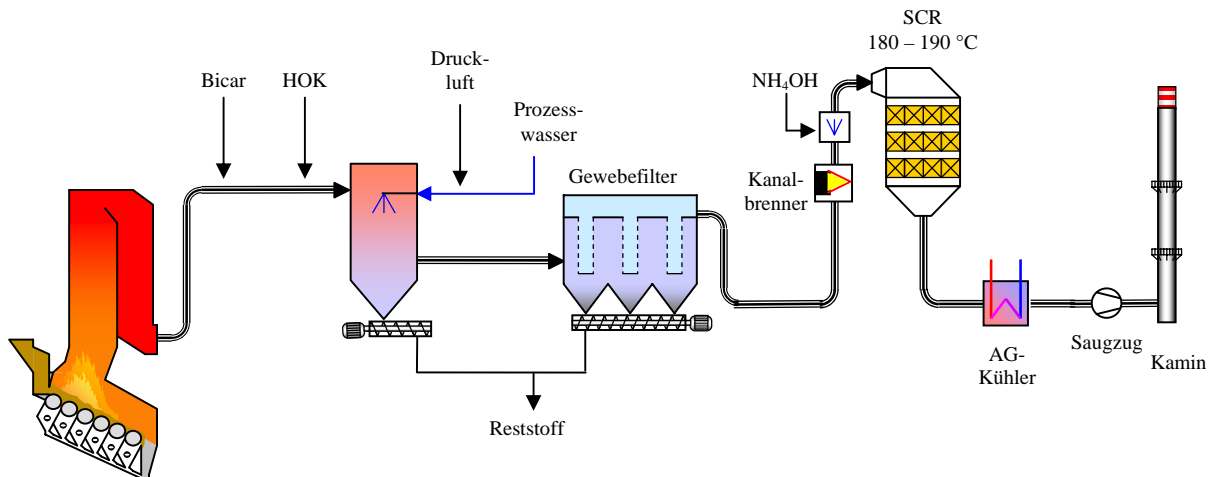
Die Abgasdaten der MVA Weisweiler sind in Tabelle 5 aufgeführt. Es gelten die Grenzwerte der 17. BImSchV, mit Ausnahme von  $\text{SO}_2$  mit einem Grenzwert von  $\text{TMW} = 20 \text{ mg/m}^3 \text{ i.N.tr.}$  und  $\text{NO}_x$  mit einem Grenzwert von  $\text{TMW} = 100 \text{ mg/m}^3 \text{ i.N.tr.}$

Tab. 5: Abgasdaten MVA Weisweiler [11].

Parameter	Einheit	Nominallast	Maximallast
Volumenstrom, trocken	$\text{Nm}^3/\text{h tr.}$	76.000	90.000
Volumenstrom, feucht	$\text{Nm}^3/\text{h f.}$	91.204	108.000
Abgastemperatur	$^{\circ}\text{C}$	220	220
$\text{H}_2\text{O}$	Vol.-% f.	16,7	16,7
$\text{O}_2$	Vol.-% f.	6,7	6,7
Schadgaskonzentrationen	Einheit	TMW	HMW
HCl	$\text{mg/m}^3 \text{ i.N.tr.}$	1.100	3.000
HF	$\text{mg/m}^3 \text{ i.N.tr.}$	30	40
$\text{SO}_x \text{ als } \text{SO}_2$	$\text{mg/m}^3 \text{ i.N.tr.}$	350	1.000
$\text{NO}_x \text{ als } \text{NO}_2$	$\text{mg/m}^3 \text{ i.N.tr.}$	300	650
Staub	$\text{mg/m}^3 \text{ i.N.tr.}$	2.100	3.000
Hg	$\text{mg/m}^3 \text{ i.N.tr.}$	0,4	1
PCCD/F	$\text{ng TEG/m}^3 \text{ i.N.tr.}$	2,6	4
Cd + Tl	$\text{mg/m}^3 \text{ i.N.tr.}$	1	4
$\Sigma (\text{Sb, As, Benzo(a)pyren, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn})$	$\text{mg/m}^3 \text{ i.N.tr.}$	20	50



Das neue Abgasreinigungsverfahren sieht vor, die Abscheidung der sauren Schadgase sowie der Schwermetalle, Dioxine und Furane in einer einstufigen Trockensorptionsstufe mittels Natriumbicarbonat und Herdofenkoks (HOK) zu realisieren (vgl. Abb. 6).



**Abb. 6: Aufbau der neuen Abgasreinigungsanlage in der MVA Weisweiler [11].**

Nach Austritt der Abgase aus dem Kessel wird in den Abgasstrom vor dem Sprühtrockner Natriumbicarbonat und Herdofenkoks trocken eingedüst. Im Sprühtrockner bzw. wird über die Eindüsung von Prozesswasser im nachgeschalteten Gewebefilter wird eine Prozesstemperatur von 180°C eingestellt. Die sich bildenden Reaktionssalze werden zusammen mit der Flugasche trocken auf dem Gewebefilter abgeschieden. Vorteil bei diesem Konzept ist, dass die Trockensorption aufgrund des Einsatzes von Natriumbicarbonat bei höheren Temperaturen betrieben werden kann, so dass im Anschluß die Entstickung über einen Niedertemperatur-Katalysator ohne vorherige Wiederaufheizung des Abgases erfolgen kann. Als Reduktionsmittel zur Stickoxidreduzierung wird auch in diesem Konzept eine verdünnte Ammoniaklösung (25%-iges Ammoniakwasser) vor dem Katalysator eingedüst.

Zur Wirkungsgradverbesserung der Gesamtanlage wird das Abgas anschließend über einen Abgaskühler von 180 °C auf ca. 140 °C abgekühlt. Der vorhandene Erdgasbrenner der SCR-DeNOx-Anlage bleibt erhalten, wird bei jedoch nur zum Anfahren und für den Zweck der Katalysatorregeneration eingesetzt.

Mit dem Umbau der Abgasreinigung wurde 2009 begonnen. Die erste Linie ist bereits umgebaut und wurde Mitte 2010 in Betrieb genommen. Der Umbau der weiteren Linien wird bis Mitte 2011 abgeschlossen sein.

Es werden durch den Umbau erhebliche energetischen Einsparungen erwartet, insbesondere durch folgende Maßnahmen:

- Wegfall der SCR-Aufheizung mit Erdgas
- Wegfall der Abgasaufheizung vor SCR-Katalysator über Gas-Gas-Wärmetauscher *stattdessen*
- Nutzung der Wärmeenergie aus dem Abgas zur Turbinenkondensatvorwärmung durch Auskopplung mittels Abgaskühler
- Verminderung des elektrischen Energieverbrauchs durch Wegfall der Wäscherstufen (Reduzierung Druckverlust, Wegfall Pumpen, Gas-Gas-Wärmetauscher etc.)

In Tabelle 6 sind die einzelnen Einsparungen prozentual aufgeführt. Es handelt sich dabei um derzeit erwartete Ca.-Werte, welche erst nach Inbetriebnahme aller drei Linien verifiziert werden.

**Tab. 6: Darstellung der erwarteten energetischen Einsparung [12].**

<b>Parameter</b>	<b>Einsparung in MWh</b>	<b>Einsparung in %</b>
elektr. Energieverbrauch	≈ 15.000	≈ 48
Erdgasverbrauch	≈ 54.000	≈ 97
Dampfverbrauch / Abwärmenutzung	≈ 31.000	≈ 84

## 4.3 Kombinierte Verfahren

### 4.3.1 Beispiel 4: MVA Delfzijl (Kalk und Bicar)

Die niederländische Müllverbrennungsanlage Delfzijl besteht aus zwei baugleichen Verbrennungslinien in denen maximal 275.000 Tonnen Abfall pro Jahr thermisch verwertet werden. Mit dem erzeugten Dampf von bis zu 140 Tonnen pro Stunde werden benachbarte Industrieunternehmen beliefert. (vgl. [13])

Da es sich bei der MVA Delfzijl um eine neue Anlage handelt, welche erst im Frühjahr 2010 in Betrieb genommen wurde, erfolgte die Auslegung und Konstruktion der Anlage bereits mit der Zielsetzung, einen möglichst hohen energetischen Wirkungsgrad zu erreichen unter gleichzeitiger Berücksichtigung der geforderten niedrigen Emissionswerte, die teilweise deutlich unter der 17. BImSchV liegen (vgl. Tab. 7).

**Tab. 7: Darstellung der geforderten Emissionswerte in der MVA Delfzijl [14].**

Komponente	Einheit	Tages- mittelwert	Halbstunden- mittelwert	Jahres- mittelwert
Gesamtstaub	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	< 5	< 15	< 3
organische Stoffe (TOC)	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	< 10	< 20	< 5
HCl	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	8	50	< 5
HF	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	< 1	< 2	< 0,5
SO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	< 50	150	< 25
NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	< 200	< 300	< 70
CO	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	< 30	100	< 30
NH <sub>3</sub>	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	< 5	-	< 5
<b>Im Reingasstrom sind folgende Grenzwerte einzuhalten und 2 x jährlich zu messen</b>				
Hg	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.		0,05	
Cd + Th	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.		0,05	
PCDD/PCDF	ng/m <sup>3</sup> i.N.tr.		0,1	
∑ (Sb, As, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn)	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.		0,5	

Die wesentlichen Abgasdaten der MVA Delfzijl sind in Tabelle 8 aufgeführt.

**Tab. 8: Abgasdaten in der MVA Delfzijl [14].**

Parameter	Einheit	Nominallast
Volumenstrom, feucht (max.)	Nm <sup>3</sup> /h f.	140.000
Abgastemperatur	°C	240
Schadgaskonzentrationen	Einheit	TMW
HCl	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	1.500
SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	1.000
NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	500
Hg	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	0,5

Die Abgasreinigung, wie in Abbildung 7 dargestellt, basiert auf einem zweistufigen Verfahren zur Erreichung niedrigster Emissionswerte. Die erste Stufe besteht aus einer reinen Trockensorption indem bei einer Kesselaustrittstemperatur von ca. 240 °C Natriumbicarbonat zur Hauptabscheidung der sauren Schadgasbestandteile eingeblasen wird. Die Flugasche und die Reaktionssalze werden an einem Gewebefilter abgeschieden. Anschließend erfolgt die Abscheidung der Stickoxide in einer SCR-Anlage bei ca. 240 °C. Als Reduktionsmittel wird eine verdünnte Ammoniaklösung (25 %-ige Ammoniakwasser) vor dem Katalysator eingedüst. Die zweite Stufe besteht aus einer weiteren Trockensorptionsstufe mit Gewebefilter, jedoch basierend auf Normalkalkhydrat mit Dosierung von HOK. Die Aufgabe dieser zweiten Stufe besteht im Wesentlichen darin, die Schwermetalle insbesondere das Quecksilber sowie die Dioxine und Furane durch Adsorption an Aktivkoks zu reduzieren. Des Weiteren erfolgt hier die Restabscheidung der sauren Schadgasbestandteile. Damit diese Abscheidung effektiv ist, wird das Abgas über einen ECO auf eine Temperatur von ca. 130°C abgekühlt. Das bietet neben den günstigen Abscheidebedingungen eine erhebliche energetische Wirkungsgradverbesserung der Gesamtanlage. Die hierbei rückgewonnenen Wärmeenergie beträgt 4.069 kW, wie in Tabelle 9 dargestellt ist.

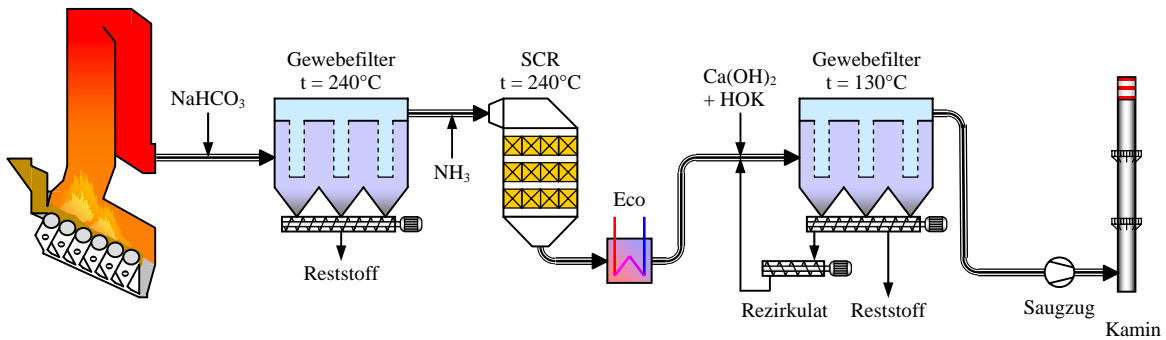


Abb. 7: Aufbau der Abgasreinigungsanlage in der MVA Delfzijl ([14], [2]).

Tabelle 9 zeigt die technischen Daten des installierten Wärmetauschers.

Tab. 9: Technische Daten des Wärmetauschers im MHKW Delfzijl [Quelle: EEW].

Position	Einheit	Wert
Strömungsrichtung	-	Gegenstrom
Heizfläche	m <sup>2</sup>	4.190 (wärmetechnisch wirksam)
Rohrteilung (horizontal, in Strömungsrichtung)	mm / mm	90 / 90
Rohrabmessung (Innen- und Außendurchmesser)	mm / mm	30 / 38
Werkstoff	-	1.0345
Wärmeaufnahme bei Nennlast	kW	4.069
Anzahl Pakete	-	6

#### 4.3.2 Beispiel 5: HVC Alkmaar (kond. Trockensorption mit nasser Feinreinigung)

In der niederländische HVC Alkmaar (Biomasseverbrennung) werden jährlich bis zu 215.000 Tonnen Biomüll verbrannt [15].

Die für die HVC Alkmaar einzuhaltenden Emissionswerte sind sehr niedrig, insbesondere die Jahresmittelwerte wie Tabelle 10 zeigt. Zur Einhaltung des geforderten NO<sub>x</sub>-Grenzwertes von 70 mg/m<sup>3</sup> wurde vom Kesselbauer eine SNCR-Anlage installiert. Der NH<sub>3</sub>-Schlupf nach Kessel ist auf maximal 15 mg/m<sup>3</sup> begrenzt.

Aufgrund der geforderten extrem niedrigen Emissionswerte besteht die Abgasreinigung der HVC Alkmaar aus einer Hauptreinigungsstufe mittels Trockensorption und einer nachgeschalteten nassen Feinreinigungsstufe, welche im Folgenden beschrieben werden. Abbildung 8 zeigt die schematische Darstellung der Abgasreinigung in der HVC Alkmaar.

Tab. 10: Emissionswerte der HVC Alkmaar [16].

Emissionsgrenzwert	Einheit	Tages- mittelwert	Halbstunden- mittelwert	Jahres- mittelwert
Partikelgehalt, gesamt	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	3	15	1
HCl-Gehalt	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	5	60	3
HF-Gehalt	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	0,5	4	0,2
SO <sub>2</sub> -Gehalt	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	30	200	10
NH <sub>3</sub> -Gehalt	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	5	-	5
Hg-Gehalt	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	0,03	-	0,005
Cd-Gehalt	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	-	-	0,005
Tl-Gehalt	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	-	-	0,005
Cd- und Tl-Gehalt	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	0,05*	-	0,01
Sb-Sn**-Gehalt, gesamt	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	0,25*	-	0,05
Dioxine/Furane Gehalt TEQ	ng/m <sup>3</sup> i.N.tr.	0,05*	-	0,02

\* Mittelwert über die Probenahmezeit

\*\* Summe Sb-Sn: Sb, As, Pb, Cr, Cu, Co, Mn, Ni, V, Sn

Nach dem Kessel mit integrierter SNCR erfolgt die Abscheidung von Flugasche mittels eines Zyklons. Anschließend erfolgt die Hauptabscheidung der sauren Schadgase sowie der Schwermetalle, Dioxine und Furane in der konditionierten Trockensorption. Dazu werden Kalkhydrat und Aktivkoks in das Abgas nach dem Zyklon dosiert. Die Reaktionsprodukte sowie die noch nicht reagierten Additivpartikel werden im nachgeschalteten Gewebefilter abgeschieden. Ein Großteil der im Gewebefilter abgeschiedenen Partikel wird befeuchtet und dem Abgas im sogenannten Umlenkreuzer wieder zugeführt (rezirkuliert). Durch die Dosierung von angefeuchtetem Rezirkulat vor Gewebefilter, wird das Abgas auf eine Temperatur von ca. 150 °C abgekühlt.

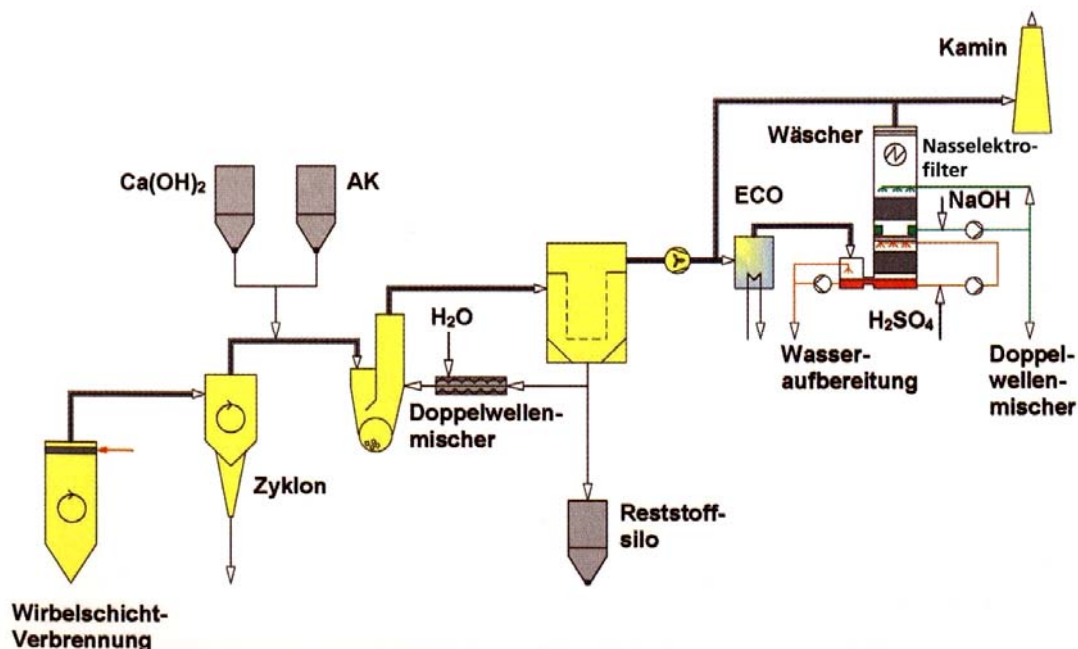


Abb. 8: Aufbau der Abgasreinigung in der HVC Alkmaar [16].

Nach Austritt aus dem Gewebefilter wird durch Auskopplung von Wärmeenergie das Abgas in einem ECO von ca. 150 °C auf ca. 100 °C weiter abgekühlt. Anschließend gelangt das Abgas in den Nasselektrofilter mit integrierter saurer und basischer Wäscher-Stufe. Hier werden die sauren Schadgaskomponenten weiter reduziert um die sehr geringen Emissionswerte einhalten zu können. Zur Sicherstellung einer ausreichenden SO<sub>2</sub>-Abscheidung wurde für die basische Waschstufe ein pH-Wert von 6,1 gewählt. In der sauren Waschstufe findet die NH<sub>3</sub>-Abscheidung bei einem pH-Wert von etwa 5,6 statt.

Das Abwasser aus der basischen Waschstufe wird über den Anfeuchtmischer in der konditionierten Trockensorption eingesetzt. Das  $\text{NH}_3$ -beladene Wasser aus der sauren Stufe – maximal etwa  $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$  – wird einer zentralen Wasseraufbereitung des Standortes zugeführt.

Das Nasselektrofilter wurde wegen der geforderten hohen Abscheidegrade für Partikel und Schwermetalle zusätzlich anstelle des zweiten Tropfenabscheiders eingesetzt. (vgl. [16])

Durch die Kombination aus einer SNCR-Anlage mit nachgeschalteter Trockensorption und einer abschließenden nassen Feinreinigung werden sehr geringe Emissionswerte erreicht bei gleichzeitiger Nutzung der im Abgas enthaltenen Wärmeenergie durch den Einsatz eines Wärmetauschers.

Anstelle des genannten Wärmetauschers besteht eine weitere Möglichkeit der Wärmerückgewinnung. „Insbesondere in Nordeuropa wird die in einer nassen Feinreinigungsstufe enthaltene Kondensationswärme häufig als Energieeintrag in ein Fernwärmenetz genutzt. Die hierbei einzuspeisenden Wärmemengen sind nicht unerheblich. Bei den üblichen Rahmenbedingungen in einer Abfallverbrennungsanlage können die spezifischen Wärmemengen in der Größenordnung von etwa 800 bis 850 kW pro  $10.000 \text{ m}^3$  i.N.f. Abgas liegen“ [16].



## 5 Zusammenfassung

Durch hohe Primärenergiepreise sowie die steigenden Anforderungen an den Klimaschutz, gewinnt der Aspekt einer möglichst hohen Energieeffizienz bei Betreibern von Abfallverbrennungsanlagen immer mehr an Bedeutung. Somit steigt zunehmend die Motivation, auch bestehende Anlagen energetisch zu optimieren um vom Beseitiger- hin zum Verwerterstatus zu wechseln. Ein großes energetisches Optimierungspotential liegt in erster Linie im kompletten Feuerungs- und Kesselbereich, jedoch auch die Abgasreinigungssysteme weisen ein Potential zur energetischen Optimierung auf.

Grundsätzlich sind im Bereich der Abgasreinigungsanlagen folgende wesentliche Maßnahmen zur Energieoptimierung möglich:

- Verringerung des Druckverlustes
- Verringerung der Betriebstemperatur von SCR-Katalysatoren
- Reduzierter Einsatz bzw. Ersatz des VDK durch einen Wärmetauscher

In der vorliegenden Ausarbeitung wurde im speziellen auf die Energieoptimierungspotentiale der trockenen Abgasreinigungsverfahren näher eingegangen. Hierzu wurden verschiedene Beispiele von ausgeführten, energetisch optimierten Abgasreinigungsanlagen mit einem trockenen Abgasreinigungsverfahren vorgestellt. Dabei machten die Anlagenbeispiele deutlich, dass generell eine Wärme- bzw. Energierückgewinnung von 200 bis 850 kW pro 10.000 Nm<sup>3</sup>/h f. unabhängig vom eingesetzten Additiv (Kalk oder Bicar) möglich ist.

Zur Ermittlung der Optimierungspotentiale und der möglichen Nutzung von Wärmeauskopplungssystemen ist eine detaillierte Prozeßbewertung vorzunehmen. Vor allem die Parameter Abgastemperatur und –feuchte sind je nach Verfahren von großer Bedeutung und können einen signifikanten Einfluß auf die Abscheideleistung aber auch auf ein mögliches Korrosionspotential haben.

Das eine energetische Optimierung auf verschiedenste Weise machbar ist, haben die Beispiele der ausgeführten Anlagen gezeigt. Sei es als Neukonzeption oder als Optimierung eines bestehenden Systems. Energie ist zu kostbar, um sie ungenutzt zu lassen.

## 6 Literatur

- [1] I. Schellenberger: „Berechnung der R1-Kennzahl zur Energieeffizienz als Verwertungskriterium“. VDI-Wissenforum: Thermische Abfallbehandlung 2008 – Energie- und preisorientierte Verfahrens- und Abgasreinigungstechniken; 9.-10. Okt. 2008, München
- [2] R. Karpf: „Welches Rauchgasreinigungsverfahren ist das Richtige? -Antworten auf sich ändernde Schadstoffkonzentrationen in Abfall- und Ersatzbrennstoffverbrennungsanlagen“. VGB PowerTech 12/2008, S. 107 - 114
- [3] R. Karpf: „Optimierte Abgasreinigung für Brennstoffe mit hohem Chlorgehalt“. VDI Seminar Technikforum: "Ersatzbrennstoffe für Industrieanlagen". 28. - 29. April 2008, Berlin
- [4] K.M. Allal, D.-J. Dolignier; G. Martin: „Reaction mechanism of calcium hydroxide with gaseous hydrogen chloride“. Revue de L'Institut Français du Pétrole; Vol. 53, Nr.6, Nov.-Dec. 1998
- [5] R. Siebert: „Energetische Optimierung eines konditionierten Trockensorptionsverfahrens mit Kalkhydrat“; 5. Fachtagung Haus der Technik: Trockene Abgasreinigung für Feuerungsanlagen und andere thermische oder chemische Prozesse; 12. -13. November 2009, Essen
- [6] Internetseite des MHKW Kassel
- [7] N. Tanner, J. Bendig: „Erste Betriebserfahrungen mit einer energetisch optimierten Rauchgas-Reinigungsanlage - 2. Energetischer Teil“. 3. Fachtagung Haus der Technik: Trockene Abgasreinigung für Festbrennstoff-Feuerung und die thermische Prozesstechnik Grundlagen, Betreibererfahrungen, Sorbenzien. 8.-9. November 2007, Essen
- [8] C. Fuchs: „Rauchgasreinigung energetisch optimiert - Erste Betriebserfahrungen des MHKW Kassel“. 3. Fachtagung Haus der Technik: „Trockene Abgasreinigung für Festbrennstoff-Feuerung und die thermische Prozesstechnik Grundlagen, Betreibererfahrungen, Sorbenzien“. 8.-9. November 2007, Essen

- [9] N. Tanner: „Energieeffizienz von Abfallverbrennungsanlagen. Schadstoffreduzierung unter Berücksichtigung der Energieeffizienz – Vergleich von Abgasreinigungsverfahren“. Juni 2010, Kassel (unveröffentlicht).
- [10] N. Tanner, K.-H. Schreyer: Schadstoffminderung unter Berücksichtigung der Energieeffizienz – Vergleich von Abgasreinigungsverfahren. In: Thomé-Kozmienski, K.J.; Beckmann, M. (Hrsg): Energie aus Abfall Band 7. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010, S. 671 ff.
- [11] A. Wiedl, A. Heymann, S. Hartig: „Bewertung verschiedener Optimierungskonzepte für den Umbau einer nassen Rauchgasreinigungsanlage einer MVA“. 5. Potsdamer Fachtagung: Optimierung in der thermischen Abfall- und Reststoffbehandlung, Perspektiven und Möglichkeiten. 21./22.02.2008, Potsdam.
- [12] Angaben des Betreibers; MVA Weisweiler GmbH & Co. KG, Zum Hagelkreuz 22, 52249 Eschweiler
- [13] Internetseite der E.ON Energy from Waste:  
<http://www.eon-energyfromwaste.com/Leistungen/526.aspx>
- [14] C. Fuchs, H. Bieber: „Trockensorption und SCR- Technologie - Innovative Verfahrenstechnik bei der EEW Delfzijl“. 5. Fachtagung Haus der Technik: Trockene Abgasreinigung für Feuerungsanlagen und andere thermische oder chemische Prozesse. 12. -13. November 2009, Essen
- [15] Nichttechnische Zusammenfassung der Umweltverträglichkeitsprüfung: „Milieu Effect Rapport Bio-energiecentrale“. Beauftragt von der NV Huisvuilcentrale Noord-Holland. Erstellt von Ecofys BW und Tauw BV. 21 September 2006
- [16] R. Margraf: „Einfaches Verfahren für erhöhte Anforderungen an Emissionsgrenzwerte bei Abfall- und EBS-Verbrennungsanlagen unter Beachtung des Energieeffizienzgebotes“. In: Thomé-Kozmienski, K.J.; Beckmann, M. (Hrsg): Energie aus Abfall Band 7. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010, S. 769 ff.