

Energieeffiziente Abgasreinigung bei der Abfallverbrennung

Dipl.-Ing. R. Karpf, ete.a Ingenieurgesellschaft mbH, Lich (Hessen)

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.

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 (AGR) gibt es Möglichkeiten, den Energieverbrauch zu reduzieren und/oder Wärmeenergie auszukoppeln. Die vorliegende Ausarbeitung geht auf die Energieoptimierungspotentiale von Abgasreinigungsverfahren hinter Abfallverbrennungsanlagen ein. Es werden grundsätzliche Möglichkeiten der Energieoptimierung genannt und in konkreten Beispielen vorgestellt. Dabei handelt es sich sowohl um Bestandsanlagen als auch um Neuanlagen.

2 Aufbau und Merkmale der Abgasreinigungsverfahren

2.1 Trockene Verfahren zur Abscheidung der sauren Schadgaskomponenten

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 (SO₂) 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. [1], [2]) verwiesen.

Ein von der Abgasfeuchte unabhängiges trockenes Abgasreinigungsverfahren ist der Einsatz von Natriumhydrogencarbonat oder Natriumbicarbonat (NaHCO_3) als Additiv.

Natriumbicarbonat (NaHCO_3) zersetzt sich bei etwa $>140\text{ °C}$ im Abgas zu Natriumcarbonat (Na_2CO_3), Kohlendioxid (CO_2) und Wasserdampf (H_2O). Dabei hinterlassen die gasförmigen Zersetzungsprodukte des Bicarbonats, die CO_2 - und H_2O -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 $>140\text{ °C}$ 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 $130 - 150\text{ °C}$ 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 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 [3] ermittelt, dass es eine Zwischenreaktion von bereits gebildetem Calciumchlorid mit Calciumhydroxid gibt, bei der das sogenannte Calciumhydroxidchlorid (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 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 SO_2 -Abscheidung unterstützt (vgl. [1]). 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.

2.2 Nasse Verfahren zur Abscheidung der sauren Schadgaskomponenten

Bei den nassen Verfahren besteht die Abgasreinigungsanlage in der Regel aus einem zweistufigen Wäscher wobei die zweite Stufe der SO_2 -Abscheidung dient. Die erste Wäscherstufe erfüllt im Wesentlichen zwei Funktionen:

- die Sättigung der Abgase, d.h. die Abkühlung der Abgase im Kontakt mit Wasser auf Sättigungstemperatur
- die Absorption von Halogen- und Quecksilberverbindungen sowie von SO_3

Die Halogenwasserstoffverbindungen HCl und HF (auch Bromwasserstoff HBr und Iodwasserstoff HI) lassen sich gut bis sehr gut in Wasser absorbieren, da bei den meist vorliegenden Abgaskonzentrationen ihr Gleichgewichtspartialdruck sehr niedrig ist und hierbei Säuren bilden. Diese bilden sich bei HCl , HBr und HI in Wasser sehr leicht und fast vollständig. Durch Zugabe von Kalkmilch reagiert ein Teil der absorbierten Säureionen mit dem Waschwasser zu Salzen. Gewöhnlich wird durch eine pH-Wertregelung Kalkmilch zudosiert, so dass sich durch die verbleibenden Säuren ein pH-Wert von 0,8 bis 1,5 in der ersten Waschstufe einstellt.

Die Absorption von Schwefeldioxid (SO_2) erfolgt in der zweiten Stufe bei einem pH-Wert zwischen 5,5 bis 5,9 durch Eindüsung von Natronlauge und unter Zufuhr von Luftsauerstoff (O_2) für die Oxidation von Sulfit (SO_3^{2-}) zu Sulfat (SO_4^{2-}).

Auf die genauen chemischen Vorgänge bei der Nasswäsche wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen und auf die bestehende, umfangreiche Literatur verwiesen (z.B. [16]).

2.3 Verfahren zur Entstickung

Für die Stickoxidminderung hinter Abfall- und EBS-Verbrennungsanlagen haben sich das SNCR-Verfahren (Selectiv Non-Catalytic Reduction) sowie das SCR-Verfahren (Selectiv Catalytic Reduction) als die geeignetsten Verfahren etabliert.

Das SNCR-Verfahren basiert auf der Umsetzung von NO mit einem zugeführten Reduktionsmittel, das vorzugsweise als Precursor für NH_2 -Radikale dient. Der Reaktionsweg verläuft jeweils über die Bildung von NH_2 -Radikalen. Als Reduktionsmittel werden vorwiegend Ammoniak (als 25 bis 30%ige NH_3 -Lösung), Harnstoff (als 40 bis 45%ige $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ -Lösung), Isocyansäure (HNCO) und einige weitere stickstoffhaltige Verbindungen eingesetzt.

Alle Reduktionsmittel haben gemeinsam, dass sie nur in einem relativ engen Temperaturbereich, typischerweise 850 bis 950 °C (bei Harnstoff) bzw. 950 bis 1050 °C (bei Ammoniak), eine signifikante Stickoxidminderung ohne Nebenprodukte erzielen. In diesem Fall spricht man von selektiver nicht-katalytischer Reduktion (SNCR).

Oberhalb des o.g. Temperaturbereiches von 850 bis 1050°C wird in zunehmendem Maße Ammoniak oxidiert, d.h., es bilden sich Stickoxide.

Die Eindüsung der Reduktionsmittel erfolgt aufgrund des erforderlichen Temperaturfensters in der Nachbrennzone des Kessels.

Bei dem SCR-Verfahren werden die Stickoxide mit Hilfe eines Katalysators und Ammoniak als Reduktionsmittel zu molekularem Stickstoff und Wasser umgesetzt.

Der Reaktionsweg verläuft jedoch nicht über die Bildung von NH_2 -Radikalen, sondern katalytisch an Vanadiumpentoxid (V_2O_5). Üblicherweise liegt das Temperaturfenster für die SCR-Katalysation im Bereich von 200 bis 400°C. Daneben ist unter bestimmten Bedingungen auch der Betrieb des SCR-Katalysators bei niedrigeren Temperaturen von 160 – 180 °C möglich. In diesem Fall wird von einem Niedertemperaturkatalysator gesprochen.

Die Gase diffundieren an die Katalysator-Oberfläche (Adsorption), wo die Reaktionen des Ammoniaks mit den Stickoxiden und dem Sauerstoff stattfinden. Anschließend diffundieren die Reaktionsprodukte wieder zurück in das Abgas (Desorption).

Es gibt mehrere Schaltungsmöglichkeiten d.h. Positionierungsmöglichkeiten für eine DeNOx-Anlage innerhalb der Abgasreinigungsanlage. Die Position der DeNOx-Anlage im Abgasweg hat einen großen Einfluss auf den Abgasreinigungsbetrieb, da z.B. das SO_2 durch den Katalysator teilweise (ca. 0,5 bis 2%) zu SO_3 oxidiert wird, was zum einen Korrosionsprobleme durch die Absenkung der Säuretaupunkttemperatur verursachen kann und zum anderen mit nicht umgesetztem Ammoniak (bei vorhandenem NH_3 -Schlupf) zu Ammoniumsulfat ($(\text{NH})_2\text{SO}_4$) oder zu klebrigem Ammoniumhydrogensulfat (NH_4HSO_4) reagieren kann.

Weiterführende Informationen sind der einschlägigen Literatur (z.B. [16]) zu entnehmen.

3 Anforderungen an die Abgasreinigung

Die Anforderungen für einen optimalen Reinigungsprozess sind bei den einzelnen Abgasreinigungsverfahren sehr unterschiedlich.

Bei der Entstickung mittels SNCR-Verfahren ist insbesondere eine zuverlässige Temperaturerfassung unabdingbar. Weiterhin ist auf eine gute Verteilung des Reduktionsmittels im Abgas zu achten. Durch verschiedene Eindüspunkte kann eine hohe Variabilität erreicht werden. Das SCR-Verfahren dagegen ist ein einfacher Prozess, denn hier ist die gleichmäßige Verteilung des Abgases durch die Konstruktion der vielfach erprobten und eingesetzten Katalysatoren i.d.R. gegeben. Die Betriebstemperatur des Katalysators ist größtenteils abhängig von der im Abgas noch enthaltenen Konzentration an SO_2 und SO_3 , da hier die Gefahr der Sublimation von Ammoniumsulfatverbindungen besteht. Bei verhältnismäßig niedrigen SO_2 - und SO_3 -Konzentrationen besteht die Möglichkeit, den SCR-Katalysator als Niedertemperaturkatalysator zu betreiben. Hierbei ist vor allem zu berücksichtigen, dass der Katalysator ggf. in regelmäßigen Abständen ausgeheizt bzw. regeneriert werden muss, um die sich bildenden Ammoniumsulfatverbindungen zu desublimieren.

Auch die nassen Abgasreinigungsverfahren sind einfache Prozess, bei denen nur wenige Einstellparameter beachtet werden müssen. Üblicherweise wird mittels einer Leitfähigkeitsmessung die Konzentration der Salzbeladung in der Waschflüssigkeit aus der ersten Stufe gemessen und darüber die auszuschleusenden Wassermengen geregelt. Für einen – vor allem wirtschaftlich – optimalen Prozess ist darauf zu achten, dass die in die zweite Stufe getragene HCl-Konzentration gering ist, da ansonsten der Verbrauch an z. B. Natronlauge deutlich ansteigt. Aufgrund des Stoffübergangs und –transports können Abgaswäscher, unabhängig vom Abscheidegrad, nahezu stöchiometrisch betrieben werden. Dies trifft für die trockenen bzw. konditioniert trockenen Verfahren nicht zu.

Wie in Kapitel 2 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.

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 verbreiteten und stellt dadurch ein Optimierungspotential dar.

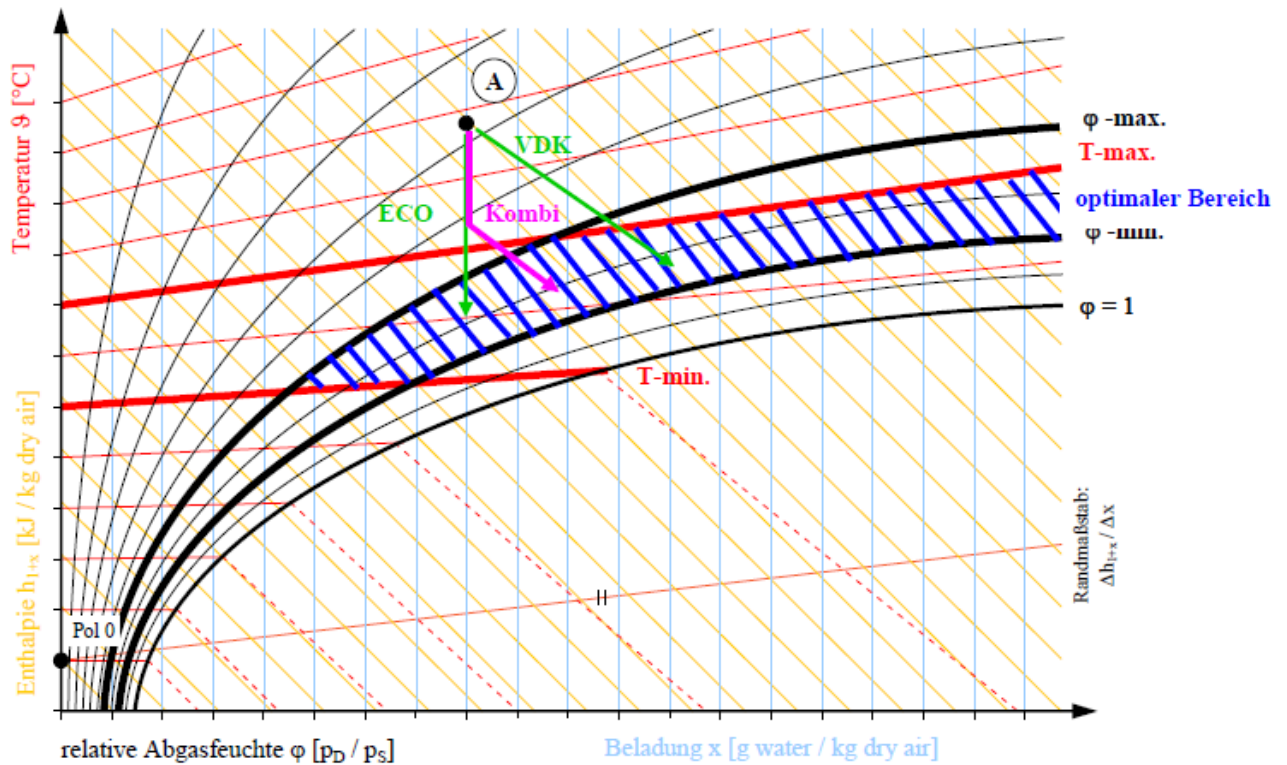


Abb. 1: Darstellung optimaler Temperatur-Feuchte-Bereich für die konditionierte Trockensorption mit Kalkhydrat. A = Ausgangspunkt

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 von Verdampfungskühlung und rekuperativer Wärmenutzung empfehlenswert sein. Mittels eines Wärmetauschers kann die Hauptwärmeenergie des Abgases ausgekoppelt und genutzt werden, während mit Hilfe der Verdampfungskühlung 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 2 Gew.-% (max. 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.

4 Möglichkeiten zur Energieoptimierung von Abgasreinigungssystemen

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

a) 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

b) 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.

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

d) Nutzung der Kondensationsenergie: Es besteht die Möglichkeit, das wasserdampfgesättigte Abgas nach einer Nasswäsche in einer Kondensationsstufe weiter abzukühlen. Die dabei entstehende Kondensationswärme kann z.B. über Wärmepumpen zur Fernwärmenutzung eingesetzt werden.

Im Folgenden werden die genannten Optimierungsmaßnahmen in ausgeführten Abfallverbrennungsanlagen vorgestellt. Dabei handelt es sich sowohl um Bestandsanlagen, welche energetisch optimiert, als auch um Neuanlagen, die bereits energieoptimiert konstruiert und ausgelegt wurden.

5 Ausführungsbeispiele

5.1 Verringerung Druckverlust

Die Optimierung der Abgaskanalführung kann zu einer deutlichen Energieeinsparung führen. So auch im MHKW Ludwigshafen, welches im Folgenden vorgestellt wird.

Die Abbildung 2 zeigt die Abgaskanalführung zum Kamin vor der Optimierung. Wie zu erkennen ist, sind aufgrund räumlicher Gegebenheiten einige Bögen in der Kanalführung enthalten. Der Abgaskanal mündet mit einer 102°-Umlenkung in den Kamin.

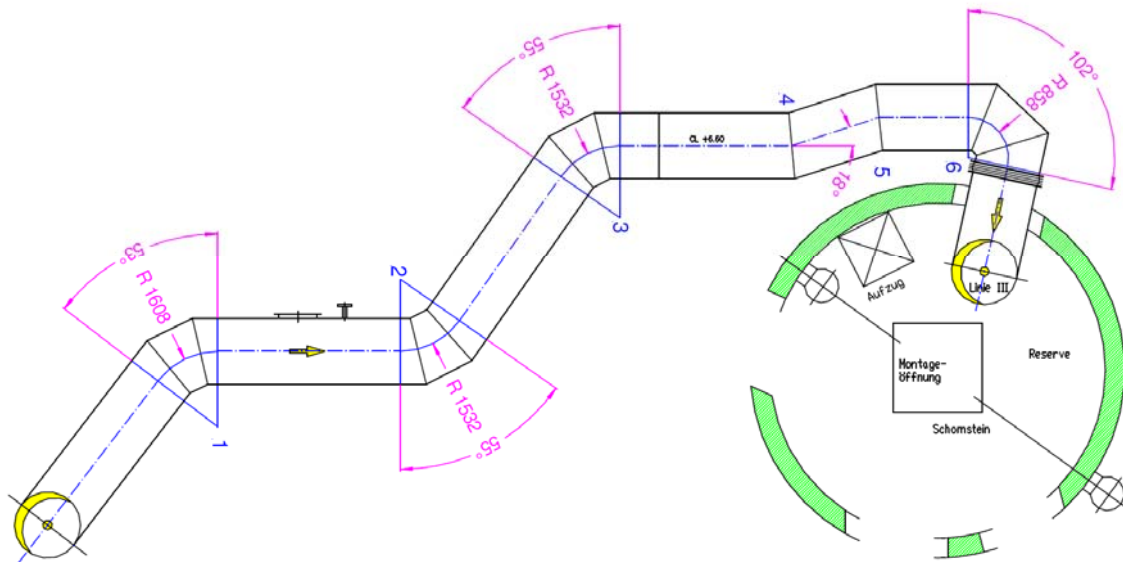


Abb. 2: Abgaskanalführung zum Kamin im MHKW Ludwigshafen vor der Optimierung [Quelle: Strömungstechnische Untersuchung der Fa. ESG].

Weiterhin mündete der Abgaskanal vor den Optimierungsmaßnahmen rechtwinklig in den Kamin, wie in Abbildung 3 dargestellt.

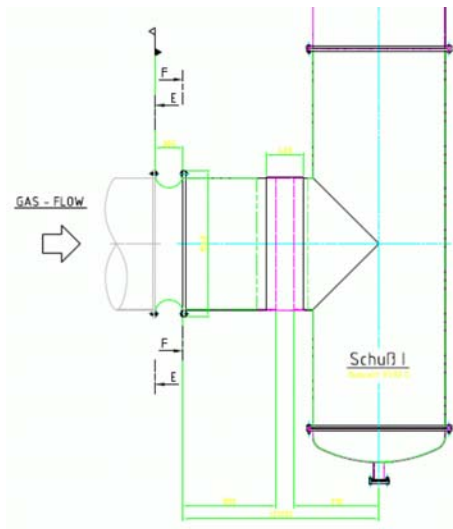


Abb. 3: MHKW Ludwigshafen vor der Optimierung: 102°-Umlenkung mündet im Kamin [Quelle: Strömungstechnische Untersuchung der Fa. ESG].

Nach Prüfung der Strömungs- und Druckverhältnisse wurden folgende Energieoptimierungsmaßnahmen realisiert:

- Einbringung von Leitblechen an den Kanalumlenkungen (vgl. Abb. 4)
- Änderung der Einmündung in den Kamin von rechtwinklig auf 45° -Schräge (vgl. Abb. 4)

Insgesamt erbrachten die Optimierungsmaßnahmen einer Reduzierung des Druckverlustes um 6 hPa, was einer elektrischen Leistung am Saugzug von ca. 21 kW entspricht.

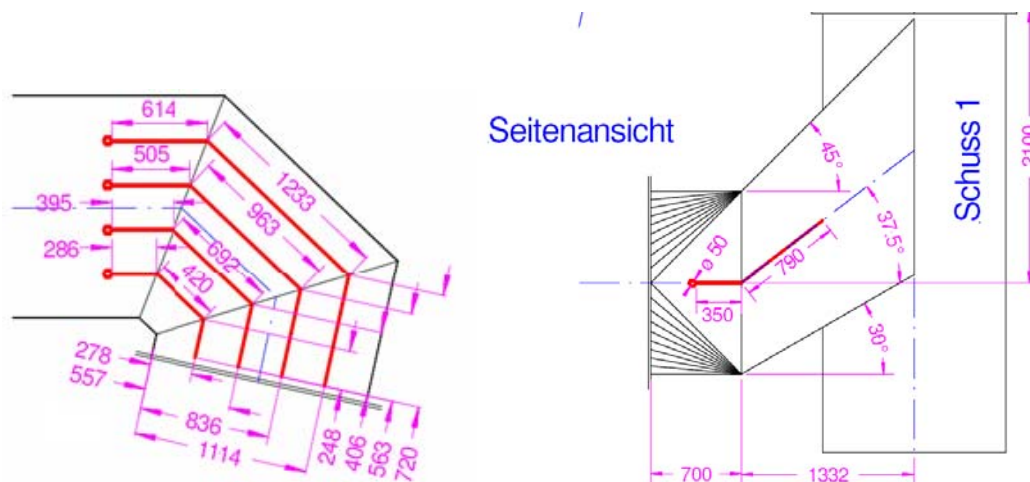


Abb. 4: Einbau von Leitblechen in die 102°-Umlenkung (links) und Änderung der Einmündung des Kanals in den Kamin von rechtwinklig auf schräg (rechts). [Quelle: Strömungstechnische Untersuchung der Fa. ESG].

5.2 Absenkung Betriebstemperatur SCR-Katalysator

Das Absenken der Betriebstemperatur des SCR-Katalysators zwecks Energieeinsparung wurde bereits in einigen Abfallverbrennungsanlagen durchgeführt, so z.B. im MHKW Ludwigshafen oder auch in der MVA Weisweiler, welche im Folgenden noch beschrieben wird. Die Neukonzipierung eines Niedertemperatur-Katalysators ist in Deutschland üblicherweise nur in Zusammenhang mit einem vorgeschalteten Aktivkoks-Wanderbettfilter realisiert, wie beispielsweise im MHKW Wuppertal oder in der MVA Weißenhorn.

Ein Beispiel für einen neukonzipierten Niedertemperatur-Katalysator hinter einer Sprühabsorption ist die MVA Paris, Carrier-sur-Seine (vgl. Abb. 5). Diese besteht aus zwei Abfallverbrennungslinien mit jeweils einem SCR-Katalysator am Ende der Abgasreinigung.



Abb. 5: MVA Paris, Carrier-sur-Seine [Quelle: Shell, environmental catalysts & systems].

Ein Niedertemperatur-Katalysator besteht dabei aus vier autarken „Shell-Denox-Modulen“, ähnlich einem Gewebefilter in Kammerbauweise. Abbildung 6 zeigt schematisch den Aufbau des Niedertemperatur-Katalysators.

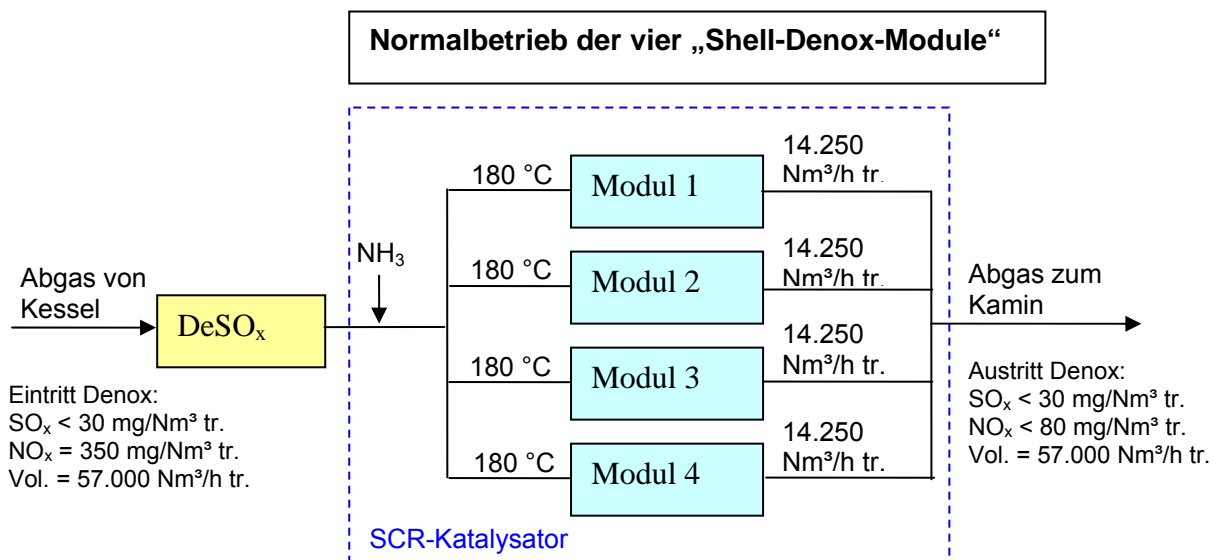


Abb. 6: Aufbau des Niedertemperatur-SCR-Katalysators in der MVA Paris, Carrier-sur-Seine [Quelle: Shell, environmental catalysts & systems].

Die Regeneration des Katalysators erfolgt modulweise. Dazu wird während des Betriebs ein einzelnes Modul separiert und mit einem Abgasteilstrom von lediglich 3.000 Nm³/h tr. beaufschlagt. Mittels eines Erdgasbrenners wird der Teilstrom auf eine Temperatur > 280 °C erwärmt (vgl. hierzu Abb. 7). Bei der Regeneration werden die Ammoniumsulfatverbindungen desublimiert und NH₃ und SO_x freigesetzt. Um eine Grenzwertüberschreitung zu verhindern, wird das mit SO_x beladene Abgas nach der Ausheizung wieder der vorgeschalteten Entschwefelungsstufe (DeSO_x) zugeführt. Die Regeneration eines Moduls dauert 1-2 Tage und wird einmal jährlich durchgeführt. Vorteil dieses Verfahrens ist, dass aufgrund der Kammerbauweise des Katalysators einzelne Module während des Betriebs abgetrennt und regeneriert werden können. Dabei ist wie beschrieben nur ein sehr geringer Regenerationsvolumenstrom notwendig, was dazu führt, dass der Energieaufwand zur Anhebung der Temperatur vor dem auszuheizenden Modul sehr gering ist. Ein weiterer Vorteil dieser Schaltung ist, dass auch während der Regeneration alle Emissionswerte eingehalten werden können.

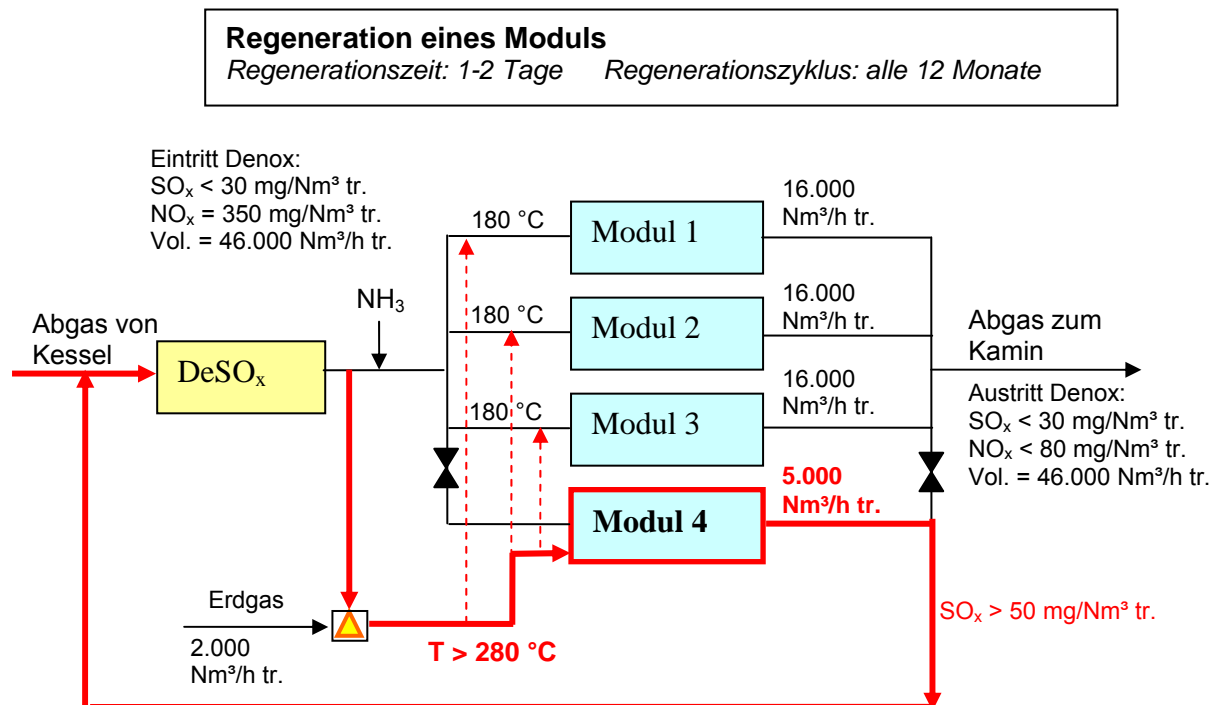


Abb. 7: Regeneration eines Shell-Denox-Moduls. [Quelle: Shell, environmental catalysts & systems]

5.3 Wärmetauscher zwecks Abgaskühlung

Im Folgenden werden mehrere Beispiele zur rekuperativen Abgaskühlung und Einbindung der ausgekoppelten Energie aufgezeigt.

5.3.1 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. [4]).

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. 8).

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 (CaO) Vorort in einem Trockenlöscher zu Kalkhydrat (Ca(OH)_2) abgelöscht wird. Im Befeuchtungsmischer werden das Rezirkulat sowie das frisch erzeugte Ca(OH)_2 mit Wasser befeuchtet und in das Abgas dosiert. Durch die große Menge an befeuchtetem 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. 8), das Abgas von ca. 225 °C auf $190 - 170\text{ °C}$ (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 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.

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 Wanderbettadsorbern.

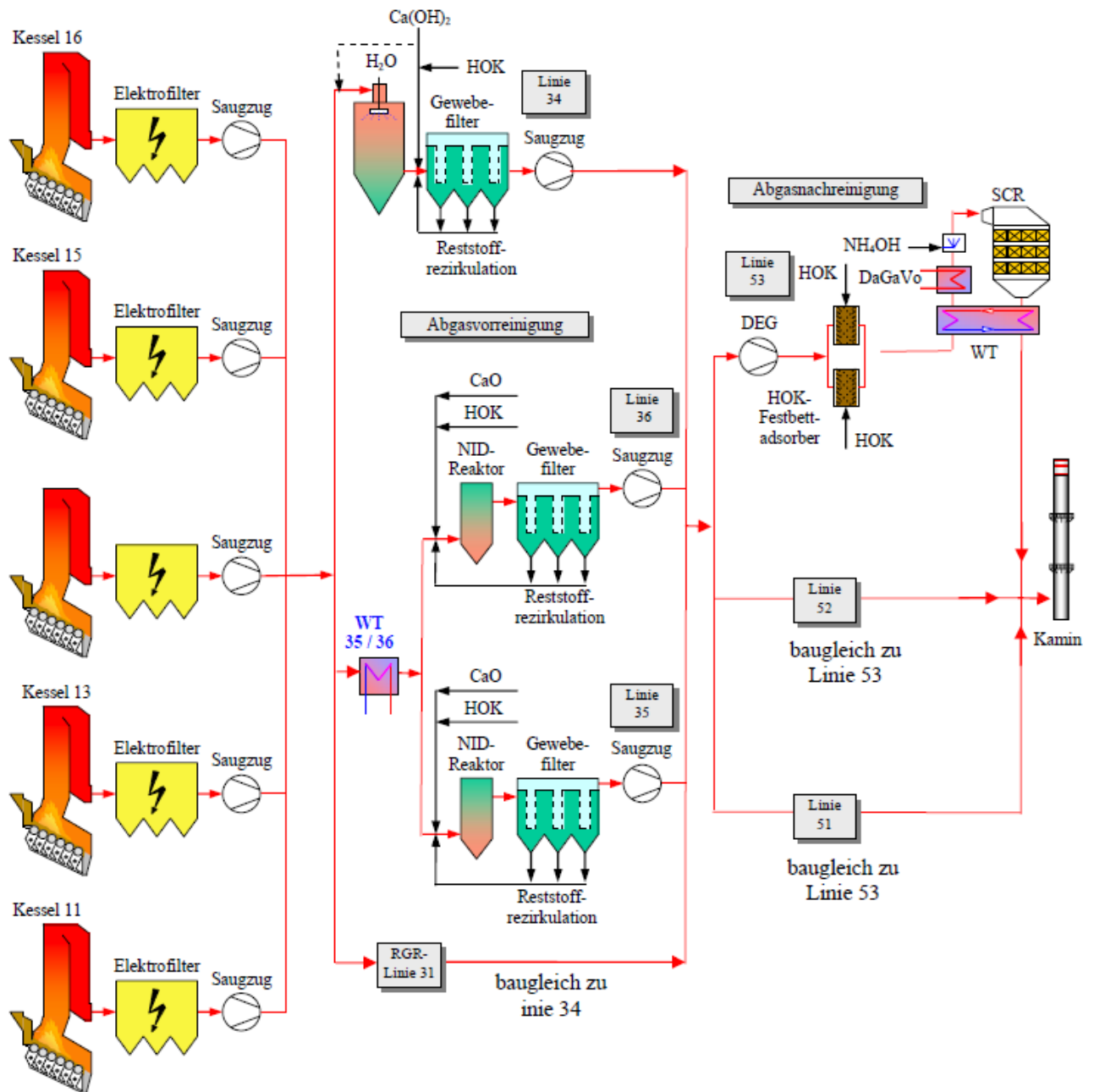


Abb. 8: Übersichtsschema des MKW Wuppertal ([4], verändert).

Die Abgase werden anschließend vor dem Eintritt in die DeNO_x-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_4OH) für die Entstickung in den SCR-Katalysatoren erfolgt.

Die Abgasdaten des MKW 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 ³ /h tr.	96.800	106.480
Abgastemperatur	°C	230	250
H ₂ O	Vol.-% f.	15	25
O ₂	Vol.-% f.	8	11
Schadgaskonzentrationen	Einheit	TMW	HMW
HCl	mg/m ³ i.N.tr.	1.200	2.500
HF	mg/m ³ i.N.tr.	15	30
SO _x als SO ₂	mg/m ³ i.N.tr.	300	1.200
NO _x als NO ₂	mg/m ³ i.N.tr.	300	400
Staub	mg/m ³ i.N.tr.	50	50
Hg	mg/m ³ i.N.tr.	0,7	1,5
Cd + Tl	mg/m ³ 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 Abgastemperatur 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. [4])

5.3.2 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. [5])

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 wurden nach dem Kessel die ca. 270 bis 230 °C (je Reisezeit) heißen Abgase in einem Elektrofilter vorentstaubt. Durch die Eindüsung von Dinatriumtetrasulfid (Na_2SO_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 (SO_3 , SO_2 , HCl und 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. 9).

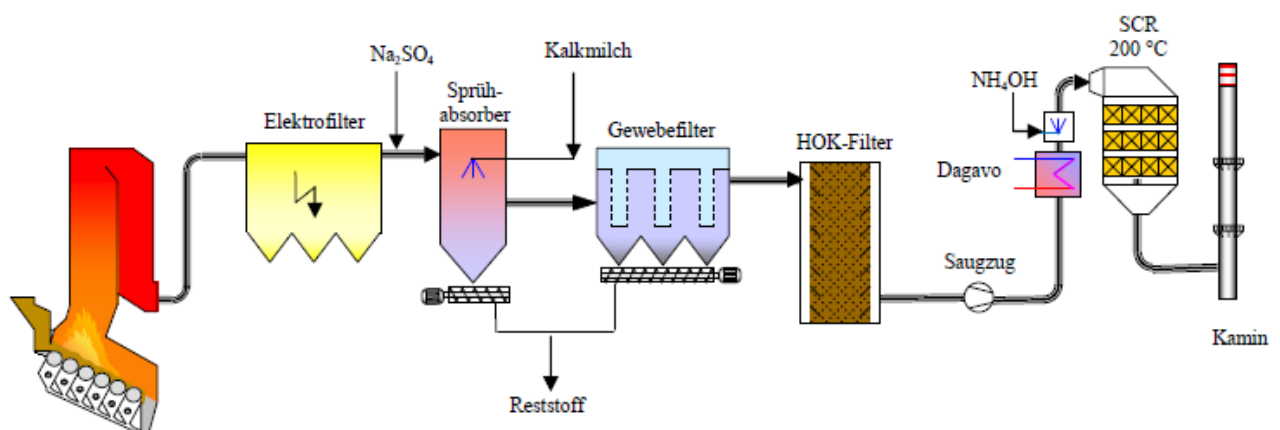


Abb. 9: Darstellung der Abgasreinigungsanlage im MHKW Kassel vor Umbau ([6], verändert)

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

Tab. 2: Abgasdaten MHKW Kassel ([7], korrigiert)

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

Der Aufbau der neuen Abgasreinigungsanlage ist in Abbildung 10 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. [8])

Die ausgekoppelten Wärmeenergiemengen aus den Wärmetauschern 1 und 2 (vgl. Abb. 11) werden zur Wieder-Erwärmung des Abgases vor SCR-Katalysator und/oder (abhängig vom Lastfall) für die Fernwärmeauskopplung bzw. die Kondensataufheizung verwendet.

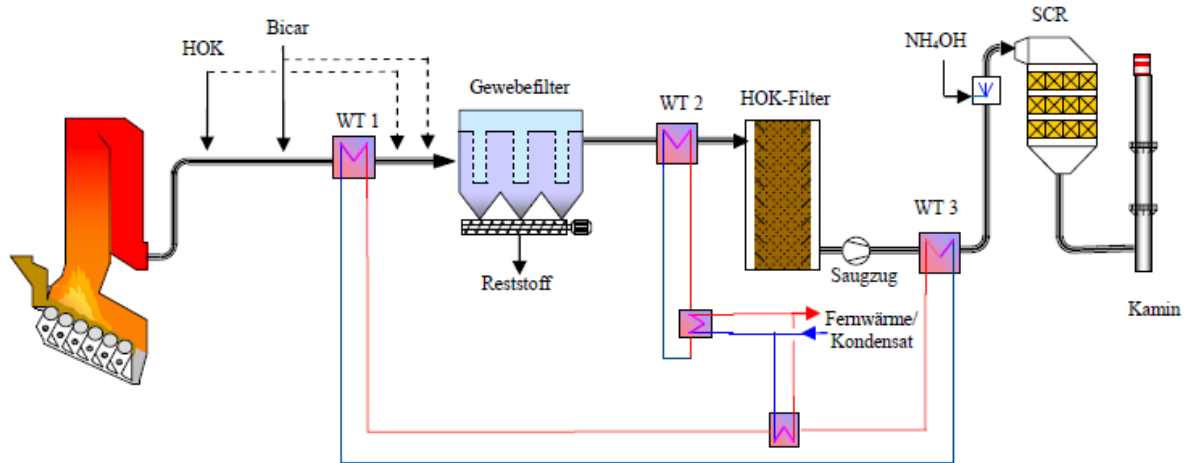


Abb. 10: Darstellung der Abgasreinigungsanlage im MHKW Kassel nach Umbau ([6], [8], verändert)



Abb. 11: Abgas-Wärmetauscher 1 und 2 im MHKW Kassel [6].

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

Tab. 3: Technische Daten der Wärmetauscher im MHKW Kassel [6].

Position	WT 1	WT 2	WT 3
Rohre	Glattrohre	Rippenrohre	Rippenrohre
Module	5	2	4
Heizfläche	1.029 m ²	836 m ²	1.272 m ²
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 ([8], [9])

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	-	+1.241

* Gesamtförderhöhe des Saugzuges (SZG)

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

***Förderluft für Kugelregenanlage

5.3.3 Beispiel 3: MVA Weisweiler

Die Müllverbrennungsanlage (MVA) Weisweiler besteht aus drei 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 CO₂-Emissionen zu reduzieren.

Die vorhandene Abgasreinigungsanlage der MVA Weisweiler besteht aus einem Sprühtrockner, Gewebefilter, 2-stufigem Wäscher und einer SCR DeNO_x-Anlage als Endreinigungsstufe (vgl. Abb. 12).

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.

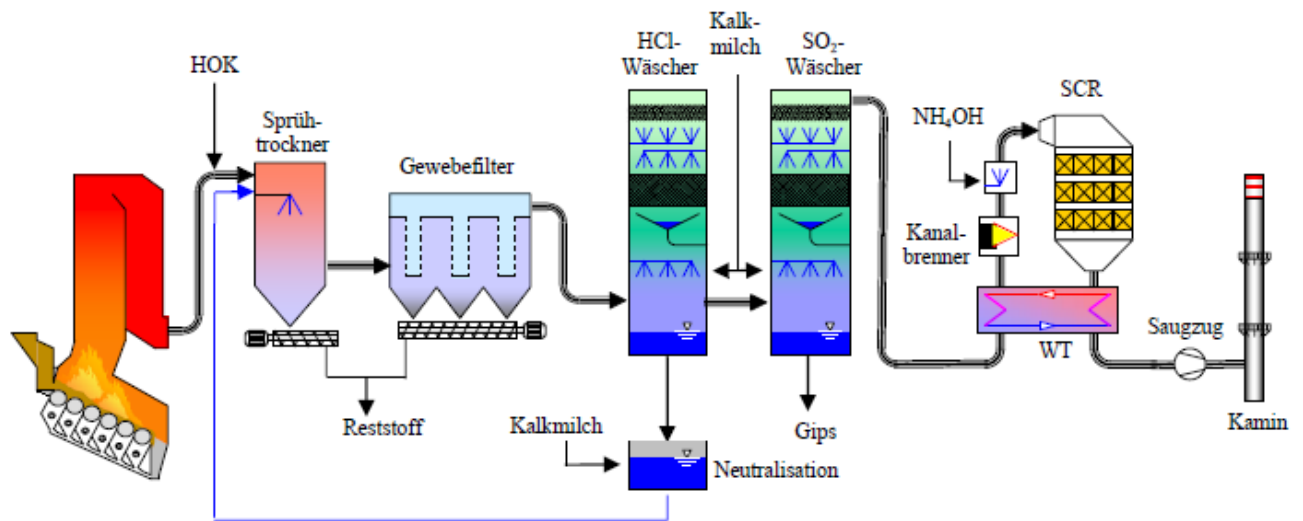


Abb. 12: Ist-Zustand der Abgasreinigungsanlage der MVA Weisweiler [10]

Die Abgasdaten der MVA Weisweiler sind in Tabelle 5 aufgeführt. Es gelten die Grenzwerte der 17. BImSchV, mit Ausnahme von SO_2 mit einem Grenzwert von $\text{TMW} = 20 \text{ mg/m}^3 \text{ i.N.tr.}$ und NO_x mit einem Grenzwert von $\text{TMW} = 100 \text{ mg/m}^3 \text{ i.N.tr.}$

Tab. 5: Abgasdaten MVA Weisweiler [10]

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
H_2O	Vol.-% f.	16,7	16,7
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
$\sum (\text{Sb, As, Benzo(a)pyren, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn})$	$\text{mg/m}^3 \text{ i.N.tr.}$	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. 13).

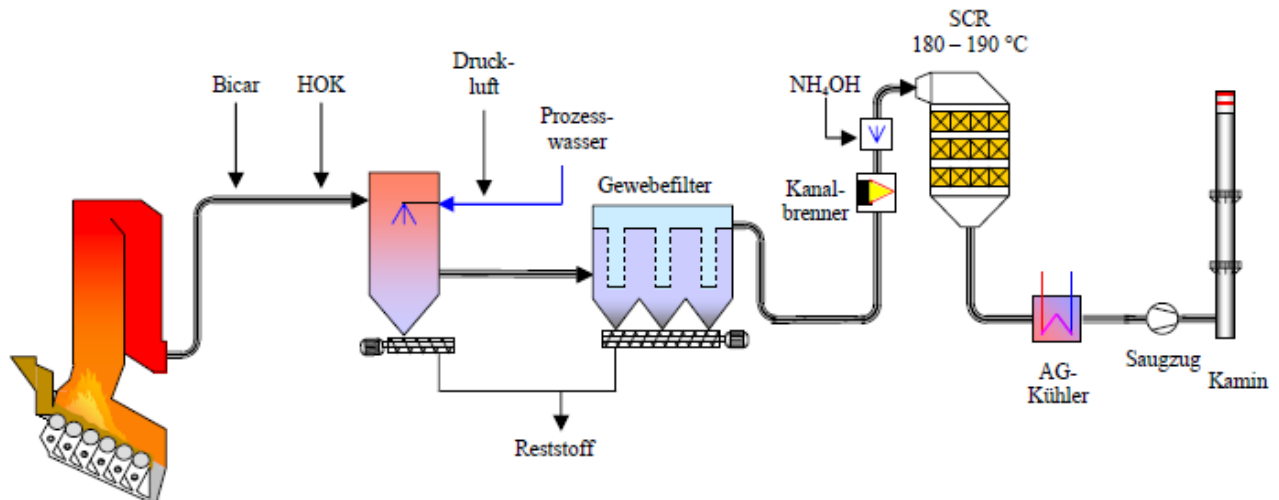


Abb. 13: Aufbau der neuen Abgasreinigungsanlage in der MVA Weisweiler [10].

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 [11]

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

5.3.4 Beispiel 4: MVA Delfzijl

Die niederländische Müllverbrennungsanlage Delfzijl, wie in Abbildung 14 gezeigt, 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. [12]).



Abb. 14: MVA Delfzijl [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 [13]

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

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

Tab. 8: Abgasdaten in der MVA Delfzijl [13]

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

Die Abgasreinigung, wie in Abbildung 15 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 Haupt-abscheidung 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.

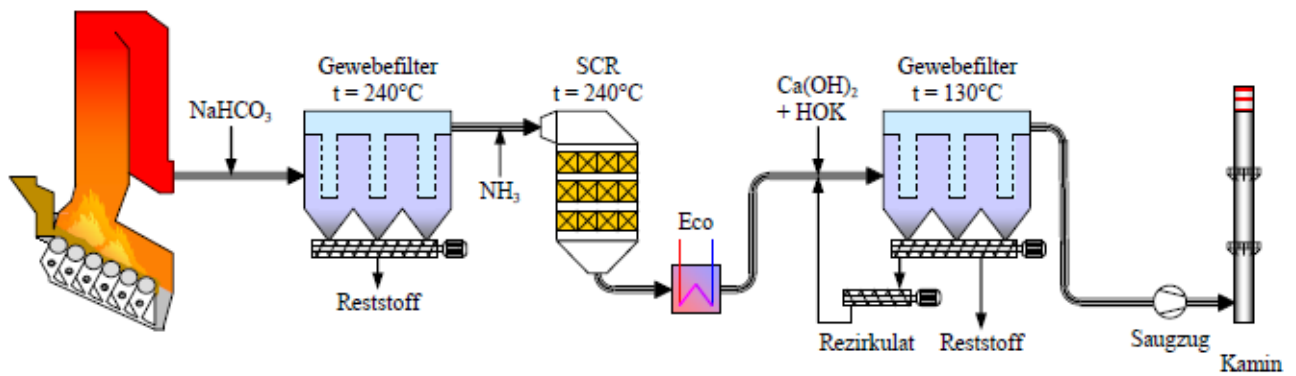


Abb. 15: Aufbau der Abgasreinigungsanlage in der MVA Delfzijl ([13], [1])

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

Position	Einheit	Wert
Strömungsrichtung	-	Gegenstrom
Heizfläche	m ²	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

5.4 Nutzung der Kondensationsenergie

5.4.1 Beispiel 5: HVC Alkmaar

In der niederländische HVC Alkmaar (Biomasseverbrennung) werden jährlich bis zu 215.000 Tonnen Biomüll verbrannt [14].

Die für die HVC Alkmaar einzuhaltenen Emissionswerte sind sehr niedrig, insbesondere die Jahresmittelwerte wie Tabelle 10 zeigt. Zur Einhaltung des geforderten NO_x-Grenzwertes von 70 mg/m³ wurde vom Kesselbauer eine SNCR-Anlage installiert. Der NH₃-Schlupf nach Kessel ist auf maximal 15 mg/m³ 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 16 zeigt die schematische Darstellung der Abgasreinigung in der HVC Alkmaar.

Tab. 10: Emissionswerte der HVC Alkmaar [15]

Emissionsgrenzwert	Einheit	Tages- mittelwert	Halbstunden- mittelwert	Jahres- mittelwert
Partikelgehalt, gesamt	mg/m ³ i.N.tr.	3	15	1
HCl-Gehalt	mg/m ³ i.N.tr.	5	60	3
HF-Gehalt	mg/m ³ i.N.tr.	0,5	4	0,2
SO ₂ -Gehalt	mg/m ³ i.N.tr.	30	200	10
NH ₃ -Gehalt	mg/m ³ i.N.tr.	5	-	5
Hg-Gehalt	mg/m ³ i.N.tr.	0,03	-	0,005
Cd-Gehalt	mg/m ³ i.N.tr.	-	-	0,005
TI-Gehalt	mg/m ³ i.N.tr.	-	-	0,005
Cd- und TI-Gehalt	mg/m ³ i.N.tr.	0,05*	-	0,01
Sb-Sn**-Gehalt, gesamt	mg/m ³ i.N.tr.	0,25*	-	0,05
Dioxine/Furane Gehalt TEQ	ng/m ³ 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 Umlenkreaktor wieder zugeführt (rezirkuliert). Durch die Dosierung von angefeuchtetem Rezirkulat vor Gewebefilter, wird das Abgas auf eine Temperatur von ca. 150 °C abgekühlt.

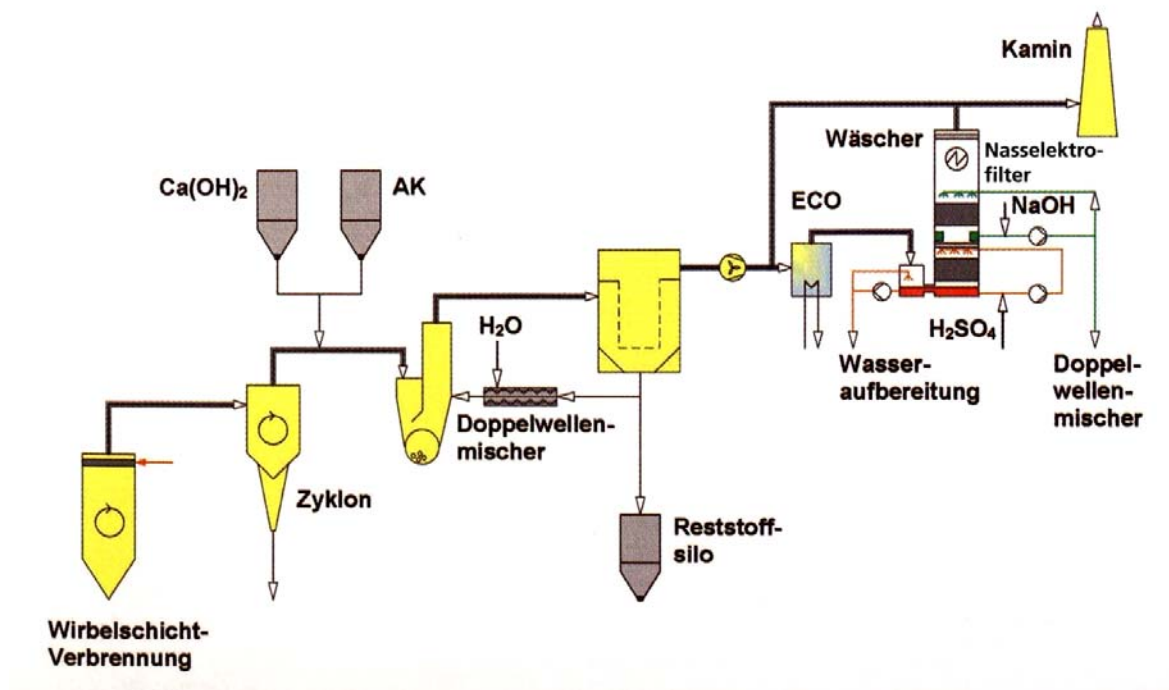


Abb. 16: Aufbau der Abgasreinigung in der HVC Alkmaar [15]

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_2 -Abscheidung wurde für die basische Waschstufe ein pH-Wert von 6,1 gewählt. In der sauren Waschstufe findet die NH_3 -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 NH_3 -beladene Wasser aus der sauren Stufe – maximal etwa 0,5 m³/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. [15])

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.

Eine zusätzliche Möglichkeit der Wärmerückgewinnung besteht in der Nutzung der Kondensationswärme. „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 m³ i.N.f. Abgas liegen. Die basische Waschstufe wird in diesem Fall als Füllkörperwäscher ausgeführt. Das Waschwasser wird mit Düsen auf das Füllkörperbett verteilt. Beim Durchrieseln des Füllkörperbettes wärmt sich das Abwasser auf, gleichzeitig kühlt sich das gesättigte Abgas bei Durchströmung des Füllkörperbettes von unten nach oben ab. Das aufgewärmte Wasser wird einem extern angeordneten Plattenwärmetauscher zugeführt, indem es seine Wärme teilweise an die Flüssigkeit des Fernwärmenetzes abgibt. Das Abwasser wird dann erneut oberhalb des Füllkörperbettes in den Wäscher zurückgegeben. Die anfallenden Abwassermengen sind bei dieser Anwendung erheblich größer und werden bestimmt durch die Abkühlung der Gase.“ [15].

5.4.2 Beispiel 6: MHKW Sävenäs

Die Abgasreinigung im MHKW Sävenäs (Schweden) besteht aus einer im Kessel integrierten SNCR-Anlage und einem Elektrofilter zur Abscheidung des Flugstaubs mit nachgeschalteter Nasswäsche. Vor Eintritt in die Nasswäsche wird das Abgas über einen ECO von 220 °C auf 140 °C gekühlt. Die dabei ausgekoppelte Wärme wird in das Fernwärmenetz der Stadt Göteborg gespeist. Im Anschluss an den ECO wird das Abgas in einer Quench weiter auf die Sättigungstemperatur von ca. 60 °C abgekühlt. Nach dem Wäscher gelangt das gereinigte Abgas in eine Kondensationsstufe, in der die Abgastemperatur mittels einem Kühler auf Temperaturen ≤ 40 °C gesenkt wird (vgl. Abb. 17). Die dabei entstehende Kondensationsenergie (die Kühlmitteltemperatur erhöht sich von ca. 28 °C auf 50 °C) wird den Absorptionswärmepumpen zugeführt und zur Fernwärmeaufheizung oder zum Wiederaufheizen des Abgases nach der Kondensationsstufe von 40 °C auf 60 °C verwendet. Durch die Kombination einer Nasswäsche mit einer Kondensationsstufe werden folgende Vorteile erreicht:

- Energierückgewinnung durch ECO und Kondensationsstufe
- Nutzung des anfallenden Kondensats als Waschwasser
- durch die fehlende Feuchte im Abgas besteht eine geringere Korrosionsgefahr

Gesteigerte Emissionsminderung durch niedrigere Waschwassertemperaturen (Gleichgewichtsbedingungen)

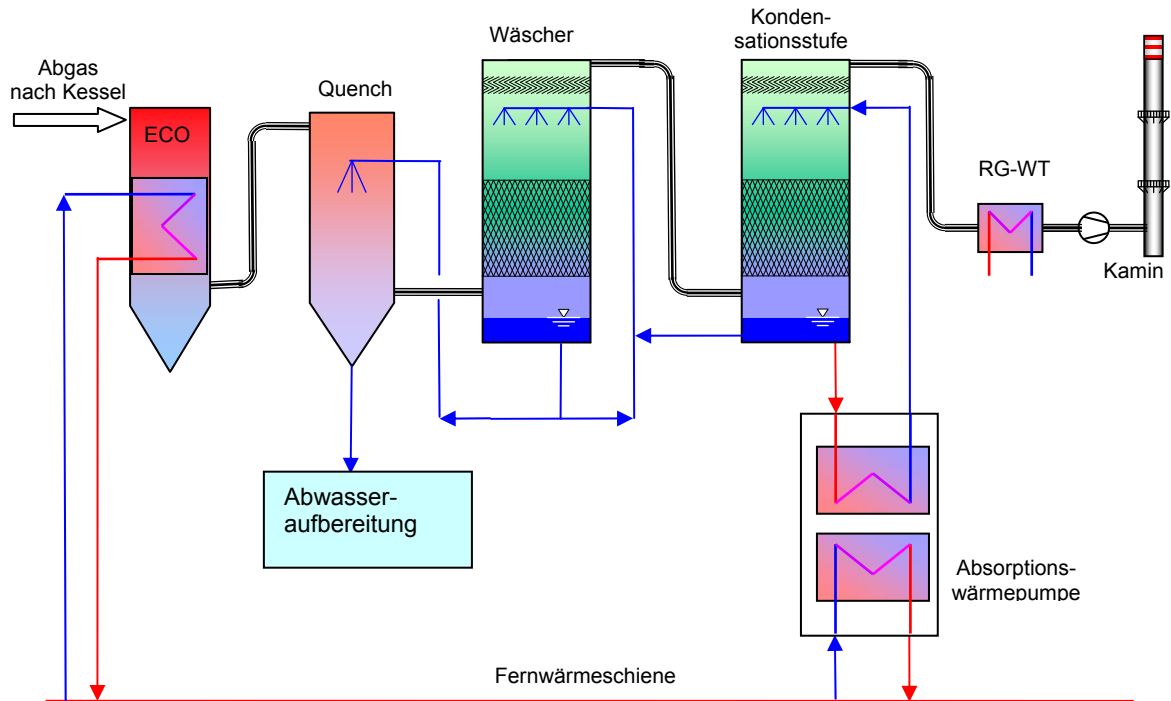


Abb. 17: Aufbau der Abgasreinigung mit Wärmerückgewinnung im MHKW Sävenäs [17]

4.3.3 Beispiel 7: MHKW Karlstad

Auch die Abfallverbrennungsanlage in Karlstad, Schweden, ist ein Beispiel für eine Abgasreinigung mit Nasswäsche und anschließender Kondensationsstufe. Aufgrund verschärfter Grenzwerte wurde die bestehende konditionierte Trockensorption um eine Nasswäsche und eine nachfolgende Kondensationsstufe ergänzt (vgl. Abb. 18).

Die Kondensationsenergie wird mittels Wärmepumpen an das örtliche Fernwärmenetz abgeben. Mit diesem System lassen sich bis zu 5 MW Wärmeenergie auskoppeln.

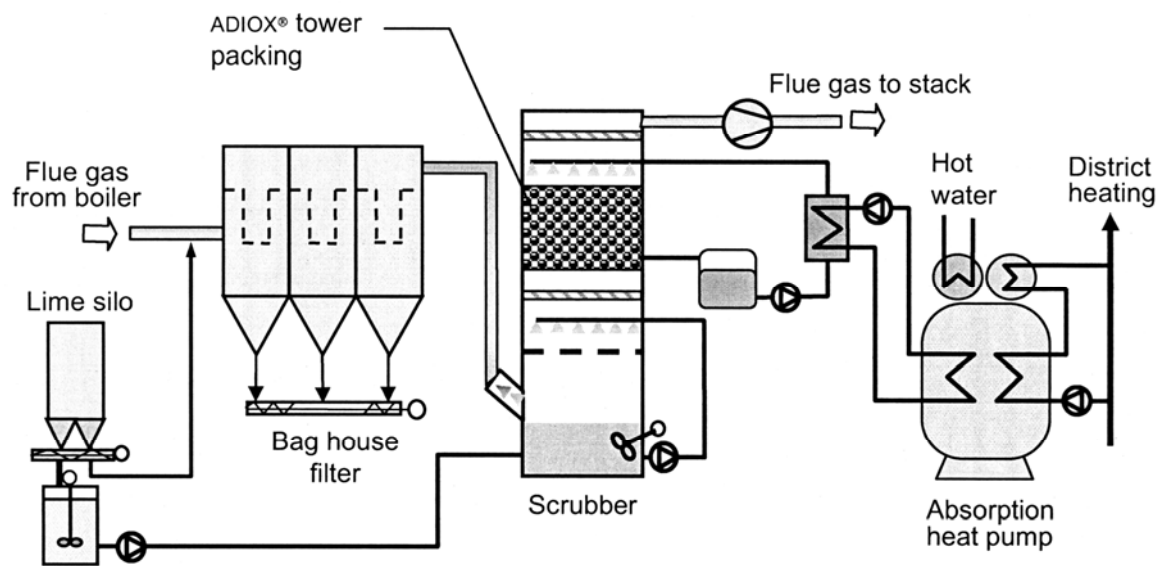


Abb. 18: Aufbau der Abgasreinigung im MCHW Karlstad [18]

6 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 bzw. Neuanlagen bereits energieoptimiert auszulegen. Ein großes energetisches Optimierungspotential liegt in erster Linie im 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 der Verdampfungskühlung durch einen Wärmetauscher
- Nutzung der Kondensationsenergie

In der vorliegenden Ausarbeitung wurden die Optimierungspotentiale verschiedener Abgasreinigungssysteme beschrieben und verschiedene Beispiele von ausgeführten energetisch optimierten Abgasreinigungsanlagen vorgestellt.

Dabei machten die Anlagenbeispiele deutlich, dass grundsätzlich bei jedem Abgasreinigungssystem Möglichkeiten der Energieoptimierung bestehen. Durch die dargestellten Maßnahmen kann eine Wärme- bzw. Energierückgewinnung von 200 bis 850 kW pro 10.000 Nm³/h f. erreicht werden.

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.

7 Literatur

- [1] R. Karpf: „Welches Abgasreinigungsverfahren ist das Richtige? -Antworten auf sich ändernde Schadstoffkonzentrationen in Abfall- und Ersatzbrennstoffverbrennungsanlagen“. VGB PowerTech 12/2008, S. 107 - 114
- [2] R. Karpf: „Optimierte Abgasreinigung für Brennstoffe mit hohem Chlorgehalt“. VDI Seminar Technikforum: "Ersatzbrennstoffe für Industrieanlagen". 28. - 29. April 2008, Berlin
- [3] 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
- [4] 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
- [5] Internetseite des MHKW Kassel
- [6] N. Tanner, J. Bendig: „Erste Betriebserfahrungen mit einer energetisch optimierten Abgas-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
- [7] C. Fuchs: „Abgasreinigung 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
- [8] N. Tanner: „Energieeffizienz von Abfallverbrennungsanlagen. Schadstoffreduzierung unter Berücksichtigung der Energieeffizienz – Vergleich von Abgasreinigungsverfahren“. Juni 2010, Kassel (unveröffentlicht).

- [9] 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.
- [10] A. Wiedl, A. Heymann, S. Hartig: „Bewertung verschiedener Optimierungskonzepte für den Umbau einer nassen Abgasreinigungsanlage einer MVA“. 5. Potsdamer Fachtagung: Optimierung in der thermischen Abfall- und Reststoffbehandlung, Perspektiven und Möglichkeiten. 21./22.02.2008, Potsdam.
- [11] Angaben des Betreibers; MVA Weisweiler GmbH & Co. KG, Zum Hagelkreuz 22, 52249 Eschweiler
- [12] Internetseite der E.ON Energy from Waste:
<http://www.eon-energyfromwaste.com/Leistungen/526.aspx>
- [13] 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
- [14] 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
- [15] 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.
- [16] Karpf, Rudi: „Kumulierter Energieaufwand zur Herstellung verschiedener Abgasreinigungsanlagen“, Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz, 27. und 28. Januar 2010, Berlin
- [17] Pedersen, Carl-Arne: „Erfahrungen mit der NO_x-Minimierung sowie Abgaskondensation am Beispiel MSW Gothenburg, GRAAB mit Götaverken Miljö AB und von Roll RG-Technik.“ VDI Bildungswerk Seminare 43-59-07, 14. – 15. September 1995, München.
- [18] GÖTAVERKEN MILJÖ AB: „Flue gas treatment with integrated dioxin removal by ADIOX[®]“, http://www.gmab.se/eng_varmepumpar.htm



Ingenieurgesellschaft für Energie- und Umweltengineering & Beratung mbH

Heinrich-Neeb-Straße 17

35423 Lich

☎ 06404-658164

☎ 06404-658165

✉ info@ete-a.de

www.ete-a.de