Konzepte der Abgasreinigungsverfahren

Rudi Karpf, Tina Krüger und Yannick Conrad

1. Aufbau und Merkmale der Abgasreinigungsverfahren .....

1.1. Trockene Verfahren zur Abscheidung der sauren Schadgaskomponenten .....

1.2. Nasse Verfahren zur Abscheidung der sauren Schadgaskomponenten .....

1.3. Verfahren zur Entstickung .....

2. Überblick der in Europa eingesetzten Abgasreinigungsverfahren .....

3. Auswahlkriterien und -verfahren von Abgasreinigungssystemen .....

4. Zusammenfassung .....

5. Literatur .....

Die stetige Fortschreibung der gesetzlichen Emissionsanforderungen hin zu immer niedrigeren Emissionsgrenzwerten hat dazu beigetragen, dass es auch eine andauernde Neu- und Weiterentwicklung im Bereich der Abgasreinigungsverfahren gegeben hat. In den letzten 10 bis 15 Jahren kamen weitere Aspekte wie Betriebsmittel- und Energieoptimierungen als Gestaltungsmerkmale der Abgasreinigungsverfahren hinzu. Das ist wohl auch der Grund, weshalb in Deutschland als auch in ganz Europa eine Vielfalt von Abgasreinigungsverfahren hinter Abfallverbrennungsanlagen existiert.

In dem vorliegenden Beitrag wird zum einen ein Überblick der eingesetzten Verfahren in Europa gegeben und zum anderen aufgezeigt, wann welches Verfahren eingesetzt werden kann bzw. sinnvollerweise eingesetzt werden soll.

Zunächst werden ein Überblick zum Aufbau und die wesentlichen Merkmale von Abgasreinigungsverfahren gegeben.

1. Aufbau und Merkmale der Abgasreinigungsverfahren

Es gibt eine Vielzahl von Verfahrensstufen sowie umfangreiche Kombinationsmöglichkeiten Derselben zu den unterschiedlichsten Konzepten. Mit den Verfahrensstufen können zum Teil nur einzelne Schadgaskomponenten aber auch simultan mehrere Schadgase aus dem Abgas abgeschieden werden. Eine Übersicht mit welcher Komponente bzw. Verfahrensstufe welches Schadgas reduziert werden kann, gibt die folgende Tabelle 1.

Tabelle 1: Verfahrensmatrix zur Abscheidung verschiedener Luftschadstoffe

Komponente	E-Filter[1)]	Gewebe-filter[1)]	Sorptions-filter	Fest-/Wan-derbett-Filter	Wäscher	SNCR	SCR
Staub	x	x	x		(x)		
HCl			x	(x)	x		
HF			x	(x)	x		
SO_2			x	x	x		
NO_X				x	(x)	x	x
Hg		x	x	x	x		
Cd, Tl	{x}	{x}	x	x	{x}		
Sb - Sn	{x}	{x}	x	x	{x}		
As - Cr	{x}	{x}	x	x	{x}		
PCDD/PCDF	{x}	{x}	x	x	x		x
NH_3				x	x		x

( ) bedingt geeignet bzw.

{x} staubgebundene Schwermetalle

1) reine Staubabscheider

Quelle: Karpf, R.: Kumulierter Energieaufwand zur Herstellung verschiedener Abgasreinigungsanlagen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann M. (Hrsg.): Energie aus Abfall. Band 7. 2010, S. 639-669

Für die Abscheidung der sauren Schadgasbestandteile sowie der Schwermetalle und Dioxine/Furane kann eine Einteilung in nasse und (konditioniert) trockene Verfahren vorgenommen werden. Welches Verfahren letztendlich einzusetzen ist hängt von vielen Faktoren ab. In Kapitel 3 wird aufgezeigt, welche Auswahlkriterien zu welcher Verfahrensentscheidung führen können.

In der folgenden Tabelle 2 sind grundsätzlich die Merkmale von nassen und trockenen bzw. konditioniert trockenen Abgasreinigungsverfahren gegenübergestellt.

Tabelle 2: Merkmale von nassen und (konditioniert) trockenen Abgasreinigungsverfahren

nasse Verfahren	(konditionierte) trockene Verfahren
geringer Sorbensverbrauch (Stöchiometrie 1), dadurch geringe Reststoffmenge	größerer Sorbensverbrauch (Stöchiometrie1,6 bis >2), dadurch größere Reststoffmenge
teure Additive (z.B. NaOH)	günstige Additive (z.B. $Ca(OH)_2$)
großes Abscheidevermögen für HCl und SO_2	gutes Abscheidevermögen
selektive Abscheidung	keine selektive Abscheidung
mehrstufiges System	einstufiges System
aufwendige Abwasseraufbereitung/Entsorgung	einfache u. robuste Komponenten
benötigt in der Regel eine Staubvorabscheidung	benötigt keine Staubvorabscheidung
größere Staub/Aerosol – Emissionen	geringer Wartungsaufwand
PCDD/PCDF- Abscheidung in Verbindung mit Füllkörperwäscher und HOK-Dosierung	sehr gute Abscheidung für Schwermetalle und PCDD/PCDF an HOK
größerer Platzbedarf	kein Nasskamin notwendig, dadurch keineWasserdampf-fahne

Quelle: Karpf, R.: Welches Abgasreinigungsverfahren ist das Richtige? -Antworten auf sich ändernde Schadstoffkonzentrationen in Abfall- und Ersatzbrennstoffverbrennungsanlagen. VGB PowerTech 12/2008, S. 107-114

Nimmt man eine weitere Differenzierung der nassen und trockenen Verfahren nach den unterschiedlichen Additiven und der Art der Abgaskühlung (-konditionierung) vor, so ergibt sich die in Bild 1 gezeigt Einteilung. Hierbei wird bereits deutlich, dass z.B. mit einem Sprühabsorptionsverfahren eine rekuperative Energieauskopplung nicht möglich ist, da die Abgasenthalpie zur Verdampfung des Additivmassenstroms benötigt wird.

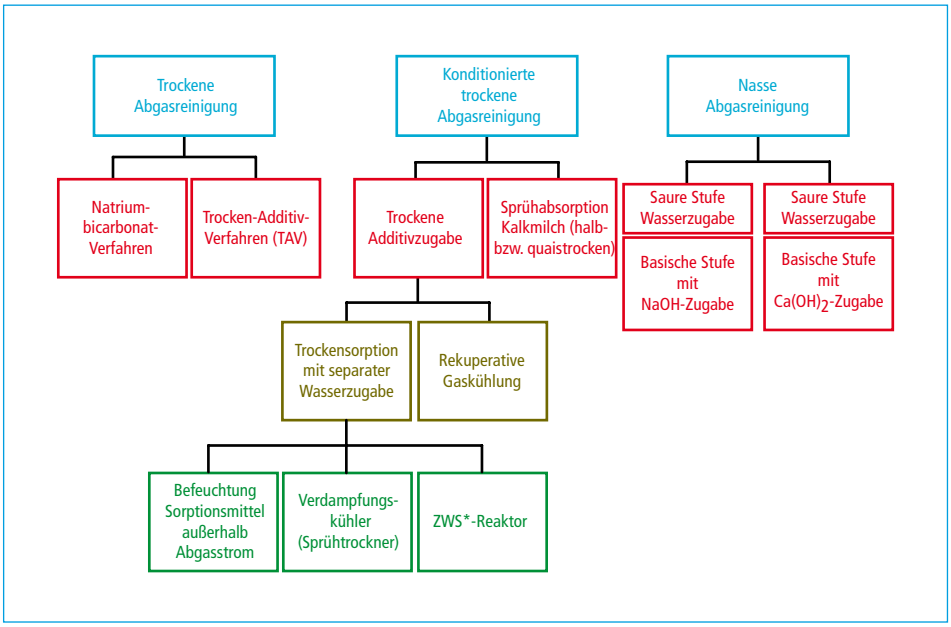


Bild 1: Einteilung der Abgasreinigungsverfahren zur Abscheidung von HCl, SO_x und HF (* Zirkulierende Wirbelschicht)

Quelle: Karpf, R.: Thermische Abfallbehandlung-Die neue Richtlinie VDI 3460 Blatt 1, KRdL-Expertenforum, KRdL-Schriftenreihe 43, S. 87-98, 01.02.2012, Bonn

1.1. 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, wie in Bild 2 dargestellt. 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_2) 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], [4]) verwiesen.

Die Trockensorption mit Natriumhydrogencarbonat (auch Natriumbicarbonat genannt) als Additiv, ist ein von der Abgasfeuchte unabhängiges Abgasreinigungsverfahren. Natriumbicarbonat ($NaHCO_3$) zersetzt sich bei etwa >140 °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 zum einen darin, dass über ein Aufmahlen des Natriumbicarbonats eine große Oberfläche und somit Stoffaustauschfläche geschaffen und zum anderen 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.

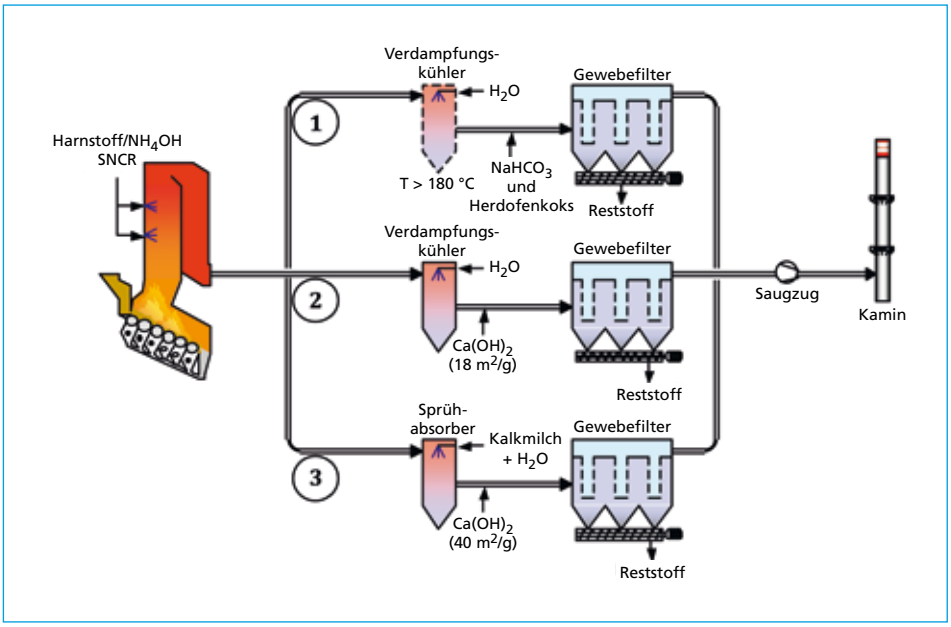


Bild 2: Vereinfachte Verfahrensschemata trockener/konditionierter Trockensorptionsverfahren zur Einhaltung der 17. BImSchV (NO_x = 200 mg/m³) und Rohgaskonzentrationen HCl ≤ 2.500 mg/m³ und SO_2 ≤ 2.000 mg/m³

Quelle: Karpf, R.: Welches Abgasreinigungsverfahren ist das Richtige? Antworten auf sich ändernde Schadstoffkonzentrationen in Abfall- und Ersatzbrennstoffverbrennungsanlagen. VGB PowerTech 12/2008, S. 107-114

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 bis 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 $Ca(OH)_2$ 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 [5] 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 unreagierten Kalkhydratpartikeln auch das gebildete Calciumchlorid sowie das Calciumhydroxidchlorid wieder zugeführt und somit die 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.

1.2. 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 (siehe hierzu Bild 3). 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 üblicherweise 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. [1]).

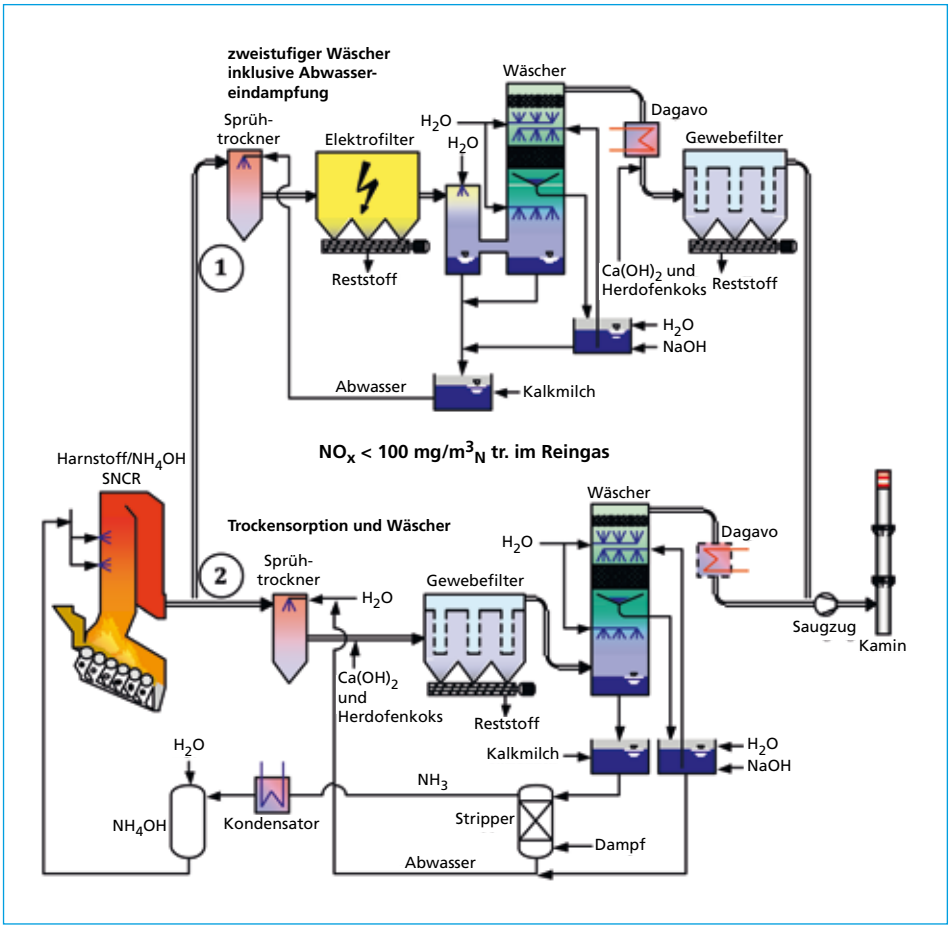


Bild 3: Vereinfachte Verfahrensschemata mehrstufiger Abgasreinigungsverfahren zur Einhaltung der halben 17. BImSchV (NO_x < 100 mg/m³ SNCR-Verfahren) und Rohgaskonzentrationen HCl ≤ 2.500 mg/m³ und SO_2 ≤ 2.000 mg/m³ (SPT=Sprühtrockner); (1) 2-stufiger Wäscher inkl. Abwassereindampfung, (2)Trockensorption u. Wäscher

Quelle: Karpf, R.: Welches Abgasreinigungsverfahren ist das Richtige? Antworten auf sich ändernde Schadstoffkonzentrationen in Abfall- und Ersatzbrennstoffverbrennungsanlagen. VGB PowerTech 12/2008, S. 107-114

1.3. 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 $(NH_2)_2CO$-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 1.050 °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 1.050°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.

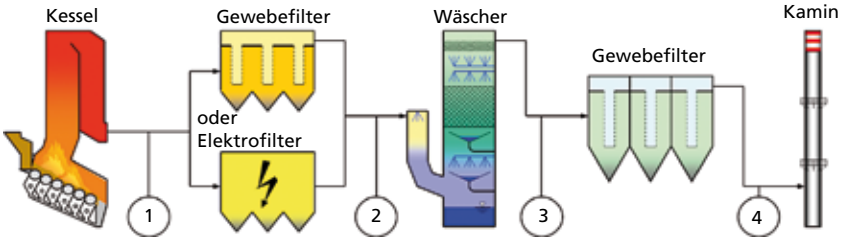
Bei dem SCR-Verfahren werden die Stickoxide mit Hilfe eines Katalysators und Ammoniak als Reduktionsmittel zu molekularem Stickstoff und Wasser umgesetzt.

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 bis 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 wie Bild 4 zeigt. Die Position der DeNOx-Anlage im Abgasweg hat einen großen Einfluss auf den Abgasreinigungsbetrieb, da z.B. das SO_2 durch den Katalysator teilweise (etwa 0,5 bis 2 %) zu SO_3 oxidiert wird, was zum einen Korrosionsprobleme durch die Anhebung der Säuretaupunkttemperatur verursachen kann und zum anderen mit nicht umgesetztem Ammoniak (bei vorhandenem NH_3-Schlupf) zu Ammoniumsulfat ($(NH)_2SO_4$) oder zu klebrigem Ammoniumhydrogensulfat (NH_4HSO_4) reagieren kann.

Weiterführende Informationen sind der einschlägigen Literatur (z.B. [1]) zu entnehmen.



Position	1	2	3	4
Anordnung	**High Dust / High SO_x**	**Low Dust / High SO_x**	**Low Dust / Low SO_x**	**Tail End**
Vorteile	• einfache und kostengünstige Anlagentechnik • kein Wärmetauscher und kein zusätzlicher Energieverbrauch (Erdgas, Dampf) wie in 3 und 4 • zusätzliche Dioxinzerstörung • keine aufwendige Staubvorabscheidung	• kein Wärmetauscher wie in 3 und 4 • zusätzlich komplette Dioxinminderung im Katalysator möglich	• zusätzlich komplette Dioxinminderung im Katalysator möglich • keine Dioxinbeladung im Reststoff bei nachgeschaltetem Polizeifilter	• keine signifikante Deaktivierung • hohe Standzeiten • bei Niedertemperatur-SCR (230°C) Verwendung von Dampf zur Wiederaufheizung möglich • bei Niedertemperatur-SCR (180 °C) ggf. keine Aufheizung notwendig • fast kein SO_2/SO_3 • keine Staubbläser
Nachteile	• Ggf. Einschränkungen bei Katalysatorstandzeit • Staubbläser notwendig	• aufwendige Staubvor abscheidung < 20 mg/m³ • durch die SO_2/SO_3-Konversion relativ hohe SO_3-Konzentration (Aerosolbildung) • zum Teil Staubbläser notwendig	• aufwendige und kostenintensive Wiederaufheizung • Verwendung von korrosionsbeständigen Materialien (Wasser-/Säuretaupunkt) im Nassbereich	• nur bei Niedertemperatur-SCR → hohes Katalysatorvolumen • höhere Reststoffbeladung mit Organika des vorgeschalteten Adsorbers • aufwendige und kostenintensive Wiederaufheizung (Ausn. 180 °C) • Ggf. Katalysatorregeneration erforderlich (180 °C)

Bild 4: Übersicht Vor- und Nachteile der Schaltungsarten für eine DENOX-Anlage

Quelle: Diepenseifen, K.; Karpf, R.: Brennstoff, Dampf, Rauchgas. Verlag Lührs & Röver, 2011, S. 308

2. Überblick der in Europa eingesetzten Abgasreinigungsverfahren

Basierend auf einer Datenerhebung des Interessenverbandes ISWA [7] wurde eine Gegenüberstellung der jeweiligen in Europa zum Einsatz gekommenen Abgasreinigungsverfahren hinter Abfallverbrennungsanlagen vorgenommen. Das Ziel bestand darin, eine mögliche Länder oder Nord/Süd-spezifische Zuordnung herstellen zu können. Zur besseren Übersicht erfolgte die Gegenüberstellung differenziert nach der Schadstoffeinteilung (Staub, saure Schadgase (HCl, HF, SO_2), Stickoxiden (NO_x) und Schwermetalle (SM)).

Die ausgewerteten Daten des ISWA sind nicht vollständig und aufgrund einer fehlenden Legende auch nicht immer eindeutig zuzuordnen. Verfahren, deren Abkürzungen nicht entschlüsselt werden konnten, wurden nicht berücksichtigt und somit als nicht existent betrachtet. Für die deutschen Anlagen wurden die ISWA-Daten anhand der bei der ITAD bzw. der durch den jeweiligen Betreiber veröffentlichten Informationen verifiziert. Es zeigte sich, dass viele Angaben in der ISWA-Datenerhebung nicht (mehr) stimmten. Von den 78 Anlagen in Deutschland konnten nur die Daten von 22 Anlagen unmittelbar aus dem ISWA-Bericht verwendet werden. Die Daten aus allen anderen deutschen Anlagen waren widersprüchlich (bei etwa 25 Anlagen) oder nicht vollständig (bei etwa 30 Anlagen), so dass sie für die folgende Gegenüberstellung korrigiert bzw. ergänzt wurden. Die Daten aus allen anderen Ländern wurden eins zu eins aus der ISWA-Studie übernommen. Aufgrund der Tatsache, dass die Daten für Deutschland in dem Bericht oftmals unstimmig bzw. nicht vollständig waren, ist davon auszugehen, dass auch die Angaben der anderen Länder mit Fehlern behaftet sind. Zur Verwirrung und Fehlinterpretation dürften die Definitionen von *Semi-Dry* (SD) und *Dry* (D) führen, welche von Betreiber zu Betreiber und von Land zu Land scheinbar unterschiedlich aufgefasst wurden.

Für die Auswertung wurden jeweils die Anlagen pro Land ausgezählt, die das entsprechende Verfahren verwenden. Wenn alle Anlagen eines Landes jeweils baugleiche Linien haben, so ist die Summe aller Verfahren für eine Schadstoffgruppe (also NO_x, Staub, saure Schadgase und Schwermetalle) gleich der Gesamtanzahl aller Anlagen in einem Land. Hat eine Anlage nicht baugleiche Linien – wie z.B. eine Linie mit Elektrofilter (E-Filter) und eine weitere Linie mit Gewebefilter (GWF) zur Entstaubung, dann wird die Anlage entsprechend mehrfach gezählt (in diesem Bsp. 1 x GWF und 1 x E-Filter), so dass die Summe der Minderungsstufen für eine Schadstoffgruppe höher als die Gesamtanzahl aller Anlagen(-standorte) in einem Land sein kann. Für die Abscheidung der Schwermetalle/Dioxine/Furane wurde bei Verwendung eines Gewebefilters (fabric filter (FF)) angenommen, dass dieser als Flugstromadsorber betrieben wird.

Bei den Entstaubungsverfahren wurde zwischen nur E-Filter, nur GWF und nur Zyklon unterschieden. Die Aussage nur E-Filter bedeutet, dass in dieser Anlage die Entstaubung ausschließlich über E-Filter realisiert wird. Es bedeutet aber nicht zwingend ein 1-stufiges Verfahren (es können auch mehrere E-Filter pro Linie sein). Das Gleiche gilt für nur GWF. Bei der Bezeichnung E-Filter+GWF werden sowohl E-Filter als auch GWF eingesetzt (auch hier ist die Anzahl der einzelnen Filter pro Linie nicht festgelegt). Gleiches gilt für E-Filter+Zyklon und GWF+Zyklon, wobei keine der ausgewerteten Anlagen mehrere Zyklone in einer Linie vorweist.

In Bild 5 ist zu erkennen, dass in fast allen europäischen Ländern, mit Ausnahme der Schweiz und Ländern wie Ungarn, Slowenien und Irland, überwiegend Gewebefilter eingesetzt werden. Das Vorhandensein eines E-Filters in den Anlagenschaltungen ist zum einen historisch bedingt (Entwicklungen in den gesetzlichen Emissionsanforderungen), aber auch als Flugstaubabscheider vor Abgaswäscher wird er noch häufig eingesetzt. Da in der Schweiz, mit einer Ausnahme, ausschließlich Wäscher zur sauren Schadgasabscheidung ohne Waschwassereindampfung betrieben werden (vgl. Bild 7), ist dies wohl auch der Grund, weshalb hier ausschließlich E-Filter zum Einsatz kommen.

In den südeuropäischen Ländern dominiert der Gewebefilter.

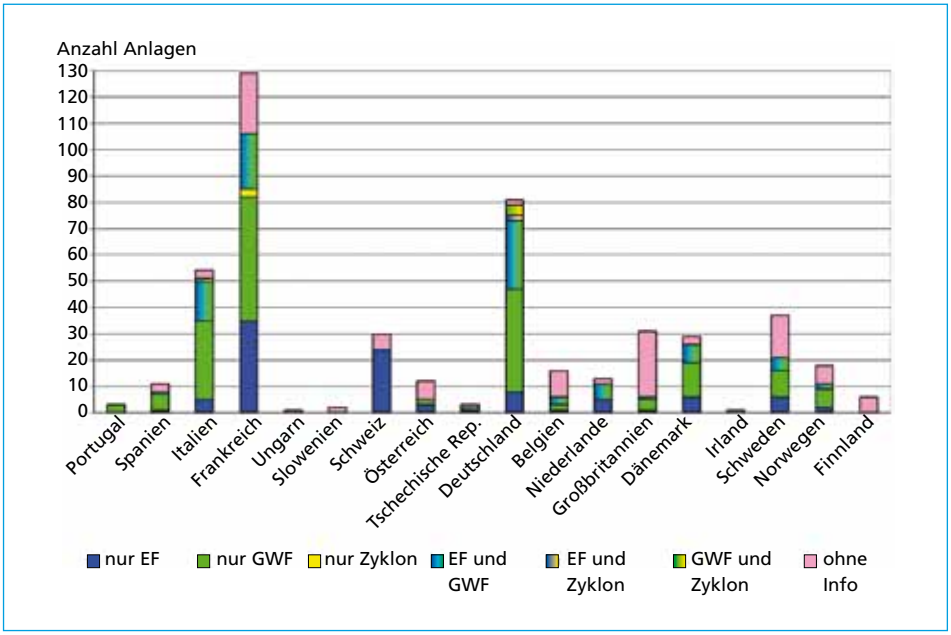


Bild 5: Gegenüberstellung der Entstaubungsverfahren hinter Abfallverbrennungsanlagen in europäischen Ländern

Datengrundlage: ISWA Working group on Energy Recovery: Waste-to-Energy – State-of-the-Art-Report. Statis-tics 6th Edition, August 2012

Wertet man die Daten für die eingesetzten Entstickungsverfahren (Bild 6) aus, so ist zu erkennen, dass insbesondere in Mitteleuropa das SCR-Verfahren häufig zum Einsatz kommt. Aber auch in Italien und Frankreich wird zur NO_x-Minderung ein Katalysator eingesetzt. Vor allem für Frankreich ist die Datenlage sehr dürftig, die Erfahrung zeigt jedoch, dass gerade in Frankreich von einer Vielzahl von SCR-Anlagen auszugehen ist. In Skandinavien sind lediglich für Schweden Angaben zum Einsatz des SCR-Verfahren gemacht worden. Wie bereits o.g. lagen der ISWA-Studie z.T. nur unzureichende Informationen zu Grunde, sodass kein Trend oder eindeutige Zuordnung der Technologien vorgenommen werden kann.

Im Bereich der Abscheideverfahren der sauren Schadgasbestandteile konnten für die einzelnen Länder, gemäß Bild 7, mehr Daten ausgewertet werden. Wie bereits o.g. besitzt die Schweiz zur Abscheidung der sauren Schadgasbestandteile, mit Ausnahme von einer Anlage, Abgaswäscher. Aber auch in den Ländern wie z. B. Tschechische Republik, Niederlande, Österreich und Schweden liegt eine Dominanz auf den nassen bzw. auf den so genannten Hybrid-Verfahren, der Kombination von einem nassen und konditioniert trockenen Verfahren, vor. In diesen Ländern besteht jedoch auch keine Forderung eines abwasserfreien Anlagenbetriebs, sodass die Abwässer nach einer Abwasserbehandlung in den Vorfluter eingeleitet werden dürfen. Dieser Anlagenbetrieb hat natürlich gewisse betriebswirtschaftliche Vorteile im Bereich der Reststoffentsorgungskosten.

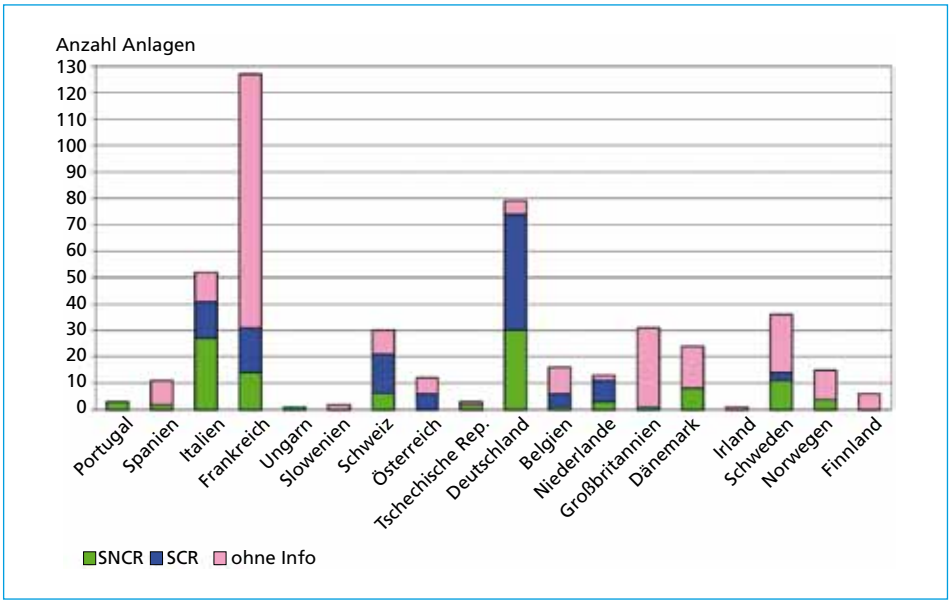


Bild 6: Gegenüberstellung der Entstickungsverfahren hinter Abfallverbrennungsanlagen in europäischen Ländern

Datengrundlage: ISWA Working group on Energy Recovery: Waste-to-Energy – State-of-the-Art-Report. Statis-tics 6th Edition, August 2012

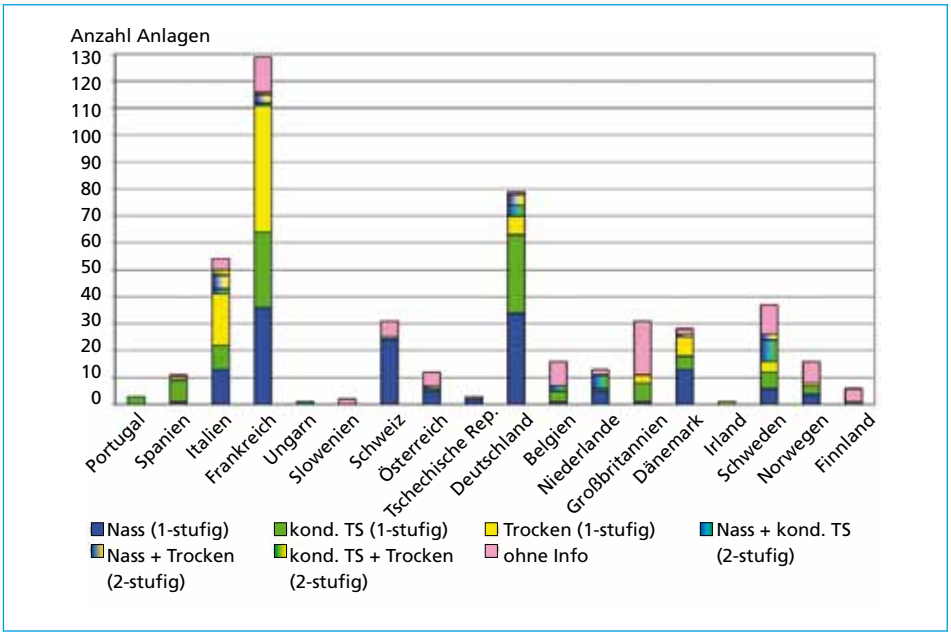


Bild 7: Gegenüberstellung der Verfahren zur Abscheidung der sauren Schadgasbestandteile HCl, HF, SO_2 hinter Abfallverbrennungsanlagen in europäischen Ländern

Datengrundlage: ISWA Working group on Energy Recovery: Waste-to-Energy – State-of-the-Art-Report. Statis-tics 6th Edition, August 2012

Die Ermittlung der Verfahren zur Schwermetall- und Dioxin/Furan-Abscheidung (Bild 8) zeigt, dass, mit Ausnahme der Schweiz, die Abscheidung vornehmlich mit einem Flugstromadsorber (Gewebefilter) vorgenommen wird. Die aufwendigen A-Kohle-Adsorber (Wanderbett-Adsorber) werden nur in Österreich, Niederlande und Deutschland vereinzelt eingesetzt. Neben der Schweiz erfolgt die Abscheidung in Wäschern in einem kleineren Umfang noch in den Ländern Italien, Frankreich, Österreich, Niederlande, Dänemark, Schweden und Deutschland. Die hierfür in Frage kommenden Verfahren sind die Schwermetallbindung in Form von Komplexbildung mit Liganden wie z.B. Chlor, Brom, Jod und Cyanid und anschließender Fällung, der Einsatz von A-Kohle und die Adsorption der Dioxine/Furane an Kunststoffoberflächen (Füllkörper) nach dem ADIOX-Verfahren.

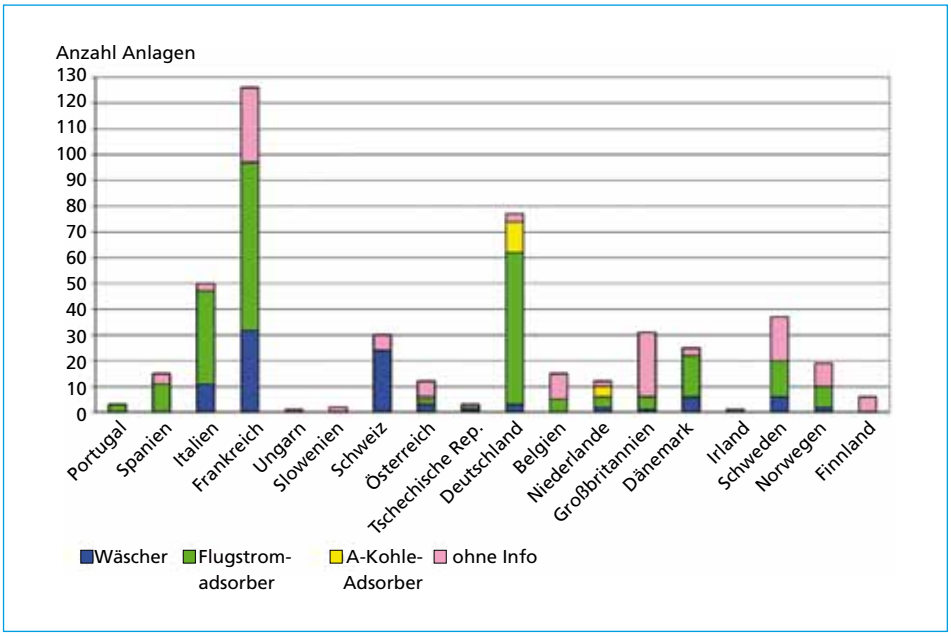


Bild 8: Gegenüberstellung der Verfahren zur Abscheidung Schwermetallen, Dioxine/Furane hinter Abfallverbrennungsanlagen in europäischen Ländern

Datengrundlage: ISWA Working group on Energy Recovery: Waste-to-Energy – State-of-the-Art-Report. Statis-tics 6th Edition, August 2012

3. Auswahlkriterien und -verfahren von Abgasreinigungssystemen

Eine generelle Aussage, wann welches Abgasreinigungsverfahren bzw. welches Additiv am geeignetsten ist, gibt es nicht. Zum Treffen der richtigen Auswahl müssen verschiedene Parameter herangezogen und bewertet werden. Dazu gehören z. B. die Rohgaskonzentrationen respektive die sich daraus ableitenden Abscheidegrade sowie die zu Verfügung stehenden Additive und Reststoffentsorgungsmöglichkeiten. Des Weiteren spielen wirtschaftliche, energetische und räumliche Aspekte eine entscheidende Rolle.

Im Folgenden wird anhand von Entscheidungs-Matrizen beispielhaft aufgezeigt, wie die Auswahl eines Abgasreinigungsverfahrens zur Abscheidung der sauren Schadgasbestandteile HCl, HF, SO_2 vorgenommen werden kann.

Es wird angenommen, dass das zu betrachtende Abgas im Rohgaszustand vor der Abgasbehandlung den in Tabelle 3 angegebenen Parameterwerten entspricht, die als Durchschnittliche Belastungswerte angenommen werden. Sollten höhere Rohgaskonzentrationen vorliegen, ist dies zu berücksichtigen.

Tabelle 3: Zugrunde gelegte Abgasparameter für die Entscheidungs-Matrizen

Parameter	Einheit	TMW	TMW	HMW	Spitze (0,5 - 5h)
Heizwert	[MJ/kg]	10	11,5	14	18
H_2O	Vol.-% tr.	12	15	19	24
Staub	mg/m³ i.N.tr.	1.500	2.500	3.500	10.000 (Ruß-blasen)
NO_x	mg/m³ i.N.tr.	300	400	500	700
HCl	mg/m³ i.N.tr.	600	1.500	4.000	5.000
SO_2	mg/m³ i.N.tr.	300	650	1.500	3.000
Hg	mg/m³ i.N.tr.	0,3	0,5	1	1,2
Cd + Tl	mg/m³ i.N.tr.	1	2,5	7	10

Des Weiteren sind für die Verfahrensauswahl zur Abscheidung der sauren Schadgaskomponenten die angestrebte Reinigungsleistung und die einzuhaltenden Grenzwerte entscheidend. Um diese Grenzwerte qualifizieren zu können (vgl. Tabelle 4), werden die Grenzwerte der 17. BImSchV (normale Abscheideleistung), bzw. die halbierten Werte der 17. BImSchV (hohe Abscheideleistung) als Referenzwerte betrachtet.

Komponente	NORMAL Grundlage: Grenzwerte 17. BImSchV	HOCH Grundlage Grenzwerte 1/2 17. BImSchV
	mg/m³ i.N.tr.	
TOC	10	5
CO	50	25
HCl	10	5
HF	1	0,5
SO_2	50	25
Staub	10	5
NO_x	200	100
Hg	0,03	0,025
Cd, Tl	0,05	0,025
Sb - Sn	0,5	0,25
As - Cr	0,05	0,025
Dioxine/Furane	0,1	0,05

Tabelle 4:

Emissionsgrenzwerte zur Definition der Abscheideleistung NORMAL und HOCH für die Entscheidungs-Matrizen

Die Entscheidungspfade in Bild 9 zeigen, dass für die Einhaltung der geltenden Grenzwerte der 17. BImSchV ein einstufiges (konditioniertes) Trockensorptionsverfahren ausreichend ist. Sind die Anforderungen höher, so ist generell empfehlenswert ein mehrstufiges Verfahren einzusetzen. In diesem Fall muss eine weitere Entscheidung zwischen einem zweistufigen (konditioniertem) Trockensorptionsverfahren und einem zweistufigen nassen Verfahren bzw. Hybridverfahren getroffen werden.

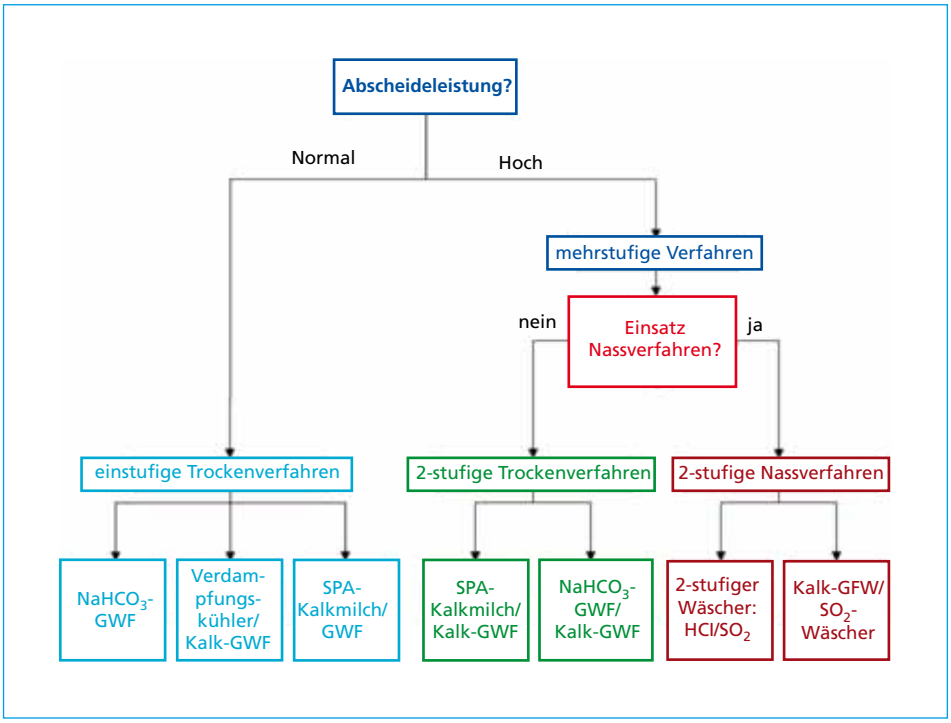


Bild 9: Entscheidungsmatrix zur Auswahl eines Verfahrens in Abhängigkeit der geforderten Emissionen respektive Abscheidegrad

Merkmale der Anlage/ Infrastruktur	Kalk	Natrium-bi-carbonat
geringe Additivkosten	+	-
hohe Reststoffentsorgungskosten	-	+
nachgeschaltete SCR-DeNOx-Anlage	+[1)]/-	+
maximale Nutzung der Wärmeenergie	+[1)]/0	+
Einsatz von trockenem Brennstoff	+/-	+
für kleinste HF- und SO_2-Emissionen	+	-
Hg-Abscheidung	+	-
System mit Pufferwirkung (Emissionen)	+	-

[1)] bei Einsatz des PTU-Verfahren (PTU = partielle Taupunktunterschreitung; von ete.a patentiertes Verfahren)

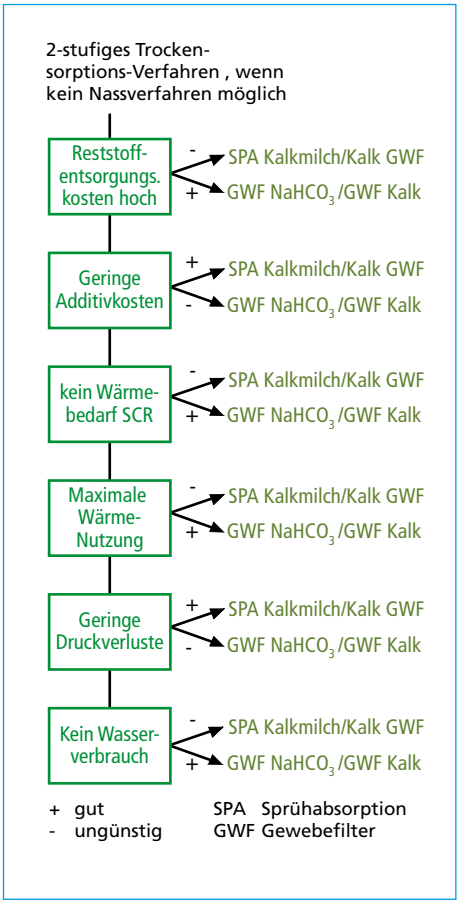
Tabelle 5:

Merkmale für den Einsatz von Kalk und Natriumbicarbonat (+ gut; 0 neutral; - ungünstig)

Quelle: Karpf, R.: Verbesserung der Abscheideleistungen bei optimiertem Additiveinsatz. 3. Tagung Trockene Abgasreinigung: Rauchgasreinigungstechniken für Festbrennstoff–Feuerungen und die thermische Prozesstechnik, 08. – 09. November 2007, HdT Essen

Da in den letzten zehn Jahren die neu installierten Abgasreinigungsanlagen überwiegend als einstufige (konditionierte) Trockensorptionsverfahren gebaut wurden, wird in Tabelle 5 eine qualitative Bewertung, bei welchen Merkmalen der Anlage bzw. der Infrastruktur welches Additiv Vor- bzw. Nachteile besitzt, vorgenommen.

In der Diskussion um das richtige und günstigste Additiv wird sehr häufig der wichtigsten Absorptionskomponente – das Gewebefilter – in seiner Funktionsweise als *Sorptionsfilter* zu wenig Beachtung geschenkt. Zur Sicherstellung einer effizienten Schadgasabscheidung (Sorption) ist die Einhaltung einer Filterflächenbelastung im Bereich von 50 bis 70 [m^3/m^2h] sowie die Ausbildung eines ausreichend dicken und konstanten *Filterkuchen* auf dem eingesetzten Filtermedium unabdingbar. Letzteres ist beim Einsatz von Natriumbicarbonat in Abhängigkeit der Verweilzeit nicht so entscheidend wie bei der Verwendung von Kalk. Insbesondere bei der Optimierung und beim Umbau von bestehenden Anlagen ist darauf zu achten, dass die Anströmung des Filters so gegeben ist bzw. angepasst wird, dass optimale Sorptionsbedingungen vorliegen. Auch die Art der Abreinigung sowie der Abreinigungszyklus sind von Bedeutung und müssen auf die Sorptionsbedingungen abgestimmt werden.



Ist eine hohe Abscheideleistung gefordert, aber der Einsatz eines nassen Verfahrens nicht möglich (z.B. geringe Platzverhältnisse), so sind anhand folgender Kriterien die genannten zweistufigen Verfahren zu bewerten (vgl. Bild 10). Sind zum Beispiel standortbedingt hohe Reststoffentsorgungskosten (wie z.B. in Frankreich) zu erwarten, hat das Trockensorptionsverfahren mit Natriumbicarbonat ($NaHCO_3$) aufgrund des geringeren Reststoffanfalls gegenüber dem Sprühabsorptionsverfahren (SPA) mit Kalkhydrat gewisse Vorteile. Aus diesem Grund ist das Natriumbicarbonatverfahren gegenüber dem Kalkverfahren positiver (+) zu bewerten. Die Bewertung aller weiteren Kriterien sind in gleicher Lesart zu verstehen.

Bild 10:

Entscheidungsmatrix zur Auswahl eines zweistufigen Trockensorptions-Verfahrens

Ist jedoch die Verwendung eines nassen Verfahrens ebenso möglich, erhöht sich die Entscheidungsvielfalt, sodass grundsätzlich mehrstufige trockene und nasse sowie so genannte Hybrid-Verfahren eingesetzt werden können. In der gleichen Weise wie in Bild 10 wurde in Bild 11 eine qualitative Bewertung von vier unterschiedlichen Verfahren vorgenommen.

Zur Ermittlung des unter den jeweiligen Randbedingungen günstigsten Verfahrens ist der größtmögliche Übereinstimmungsnenner zu bestimmen. Das heißt, das Verfahren, dass am häufigsten mit einem + identifiziert wurde ist zu bevorzugen, insofern die übrig gebliebenen negativ (-) bewerteten Kriterien zu tolerieren sind.

4. Zusammenfassung

Der Titel des vorliegenden Beitrags *Konzepte der Abgasreinigung* ist sehr weitfassend und lässt zunächst viel Interpretationsspielraum. Um nicht zum einen zu oberflächlich und zum andern auch nicht zu detailliert die einzelnen Verfahren und Konzepte zu behandeln, wurde zunächst auf den prinzipiellen Aufbau und die Merkmale der Abgasreinigungsverfahren eingegangen. Hierbei wurde in trockene und nasse Verfahren sowie in Stickoxidminderungsverfahren differenziert.

Anhand einer externen Datenerhebung zu den in Europa hinter Abfallverbrennungsanlagen eingesetzten Abgasreinigungsverfahren erfolgte in Abhängigkeit der einzelnen Schadgase bzw. Schadgasgruppen eine differenzierte Auswertung. Das Ziel bestand darin, eine mögliche Länder oder Nord/Süd-spezifische Zuordnung herstellen zu können. Dabei zeigte sich, dass z.B. nasse Verfahren in Ländern, in

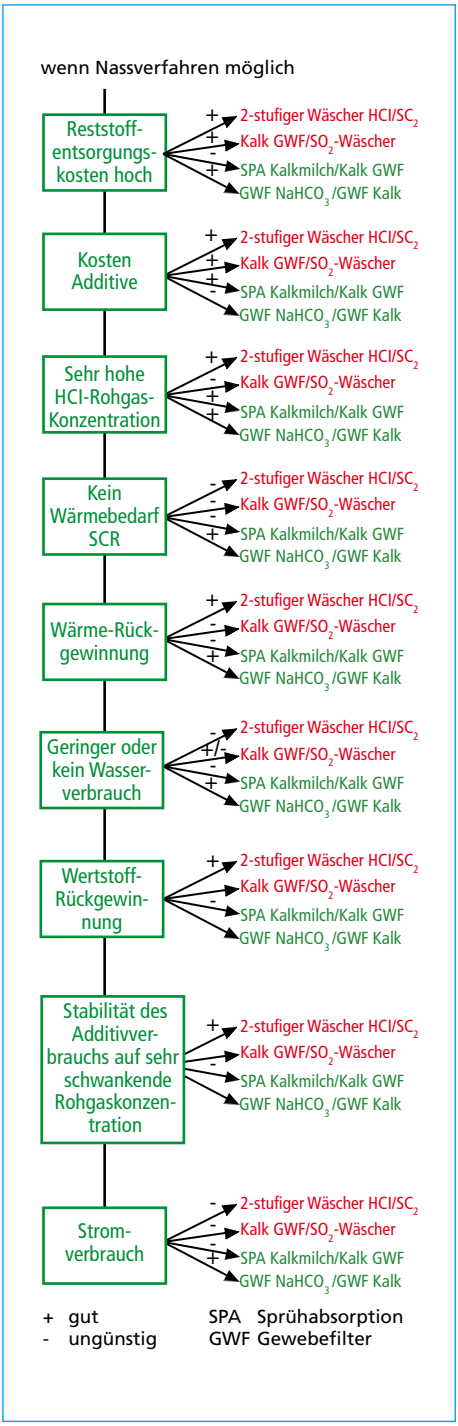


Bild 11: Entscheidungsmatrix zur Auswahl eines zweistufigen Verfahrens

denen kein abwasserfreier Betrieb gefordert ist, dominieren. Oder das in Südeuropa bevorzugt (konditioniert) trockene Verfahren eingesetzt werden.

Abschließend wurde beispielhaft für die Abscheidung der sauren Schadgasbestandteile (HCl, HF, SO_2) die Vorgehensweise zur Verfahrens-/Konzept-Auswahl skizziert. Die Entscheidungskriterien und –merkmale hierfür waren neben der geforderten Abscheideleistung energetische, wirtschaftliche und räumliche Aspekte.

Welches Verfahren bzw. Konzept letztendlich das Richtige ist, hängt von vielen anlagen- und standortspezifischen Faktoren ab und unterliegt keiner Pauschalität. Das Zitat von Pablo Picasso *Wenn es nur eine Wahrheit gäbe, könnte man nicht hundert Bilder über dasselbe Thema malen* spiegelt die Kausalität sehr schön wider.

5. Literatur

[1] Karpf, R.: Kumulierter Energieaufwand zur Herstellung verschiedener Abgasreinigungsanlagen. In: Thomé Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.(Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 7. Neuruppin: TK Verlag Karl J. Thomé Kozmiensky, 2010, S. 639-669

[2] Karpf, R.: Welches Abgasreinigungsverfahren ist das Richtige? Antworten auf sich ändernde Schadstoffkonzentrationen in Abfall- und Ersatzbrennstoffverbrennungsanlagen. VGB PowerTech 12/2008, S. 107-114

[3] Karpf, R.: Thermische Abfallbehandlung-Die neue Richtlinie VDI 3460 Blatt 1, KRdL-Expertenforum, KRdL-Schriftenreihe 43, S. 87-98, 01.02.2012, Bonn

[4] Karpf, R.: Optimierte Abgasreinigung für Brennstoffe mit hohem Chlorgehalt. VDI Seminar Technikforum: Ersatzbrennstoffe für Industrieanlagen. 28. – 29. April 2008, Berlin

[5] Allal, K.M.; Dolignier, D.J.; Martin, G.: Reaction mechanism of calcium hydroxide with gaseous hydrogen chloride. Revue de L'Institut Français du Pétrole; Vol. 53, Nr.6, Nov.-Dec. 1998

[6] Diepenseifen, K.; Karpf, R.: Brennstoff, Dampf, Rauchgas. Verlag Lührs & Röver, 2011, S. 308

[7] ISWA Working group on Energy Recovery: Waste-to-Energy – State-of-the-Art-Report. Statistics 6th Edition, August 2012

[8] Karpf, R.: Verbesserung der Abscheideleistungen bei optimiertem Additiveinsatz. 3. Tagung Trockene Abgasreinigung: Rauchgasreinigungstechniken für Festbrennstoff–Feuerungen und die thermische Prozesstechnik, 08. – 09. November 2007, HdT Essen