

# **Überblick zur Abgasreinigung**

**Rudi Karpf**

ete.a Ingenieurgesellschaft mbH, Lich

10. Fachtagung  
Abgasreinigung von  
Feuerungsanlagen und thermische Prozesse  
Haus der Technik, Essen, 25. - 26. Juni 2015

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Allgemeines .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Aufbau und Merkmale der Abgasreinigungsverfahren.....</b>	<b>5</b>
2.1 ENTSTAUBUNGSVERFAHREN.....	7
2.2 TROCKENE VERFAHREN ZUR ABSCHIEDUNG DER SAUREN SCHADGASKOMPONENTEN .....	9
2.3 NASSE VERFAHREN ZUR ABSCHIEDUNG DER SAUREN SCHADGASKOMPONENTEN .....	11
2.4 VERFAHREN ZUR ENTSTICKUNG .....	12
2.5 VERFAHREN ZUR SCHWERMETALL UND DIOXIN/FURAN-ABSCHIEDUNG .....	15
2.6 BIOLOGISCHE VERFAHREN .....	16
<b>3. Auswahlkriterien und -verfahren von Abgasreinigungssystemen .....</b>	<b>17</b>
<b>4. Zusammenfassung .....</b>	<b>21</b>
<b>5. Literatur.....</b>	<b>22</b>

## 1. Allgemeines

Warum brauchen wir Verfahren zur Abgasreinigung? Müssen es immer strengere Emissionsgrenzwerte sein? Machen wir nicht schon genug im Bereich der Luftreinhaltung? Diese Fragen stellt sich manch einer wie z.B. Betreiber von Energieerzeugungs- und Verbrennungsanlagen oder Industrieunternehmen die bereits viel Geld in die Abgasreinigung investiert haben.

Warum noch mehr getan werden muss, zeigen Untersuchungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO), die die Luftverschmutzung in ihrer Kausalität zu Gesundheitsbeeinflussungen belastbar nachweisen [1]. In West-Europa nehmen wir die Luftverschmutzung optisch nicht mehr wahr, wenn doch gleich die Belastungen durch Feinstaub, Stickoxide und in deren Folge, insbesondere in den Sommermonaten durch Ozon, nur mittelbar wahrgenommen werden kann. In vielen Ländern unserer Erde herrscht jedoch mitunter eine enorme Luftverschmutzung wie in den so genannten Schwellenländern China und Indien.

Folgende Graphik (Abb. 1) zeigt die nationalen Luftschadstoff-Emissionen, bezogen auf das Jahr 1990 bzw. für Feinstaub bezogen auf das Jahr 1995. Es zeigt, dass die Emissionen der klassischen Luftschadstoffe in den letzten Jahrzehnten deutlich gesunken sind. Begründet wird dies vom Umweltbundesamt mit dem technischen Fortschritt, dem Wechsel hin zu emissionsärmeren Brennstoffen und letztendlich die nationalen und EU-weiten Vereinbarungen, die zu weniger Emissionen führten und somit für eine bessere Luftqualität sorgte. Im betrachteten Zeitraum ab 1990 fand für alle Schadstoffe außer Ammoniak ein Großteil der Emissionsminderung in den Jahren direkt nach 1990 statt, in großem Maße durch die industrielle Transformation in den neuen Bundesländern. In den letzten Jahren flachten die Emissionstrends auf niedrigem Niveau ab. Die weitgehend von der Landwirtschaft dominierten Ammoniak-Emissionen weisen jedoch schon ab 1991 einen recht flachen Verlauf auf [2].

Die bis dato 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 - 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 und anderen Industrieländern eine Vielfalt von Abgasreinigungsverfahren existiert.

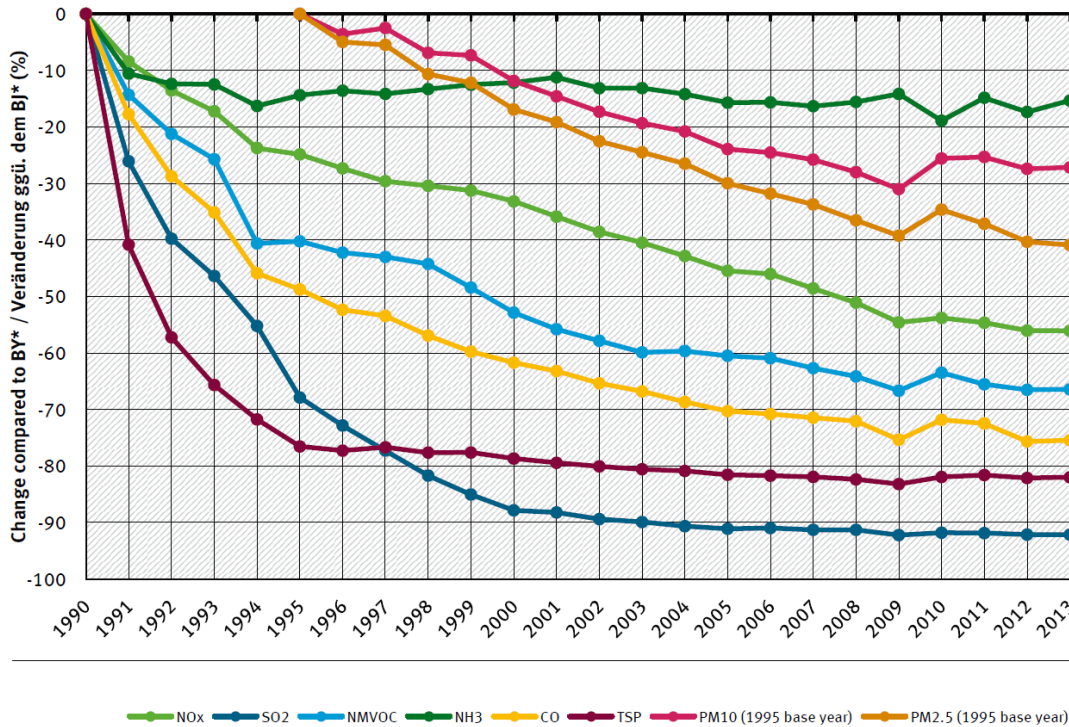


Abb.1 Trend der Luftschadstoff Emissionen; Basisjahr (BJ) 1990, 1995 für Feinstaub [2].

Die folgende Graphik (Abb. 2) zeigt anhand der Umsätze des deutschen Anlagenbaus, in welchen Branchen in den Jahren 2009 bis 2013 in Luftreinhaltemaßnahmen investiert wurde. Neben der Müllverbrennung, Abfallwirtschaft und Kraftwerke mit 18 % stellt der Bereich Eisen, Stahl und NE-Metalle mit 35 % den größten Anteil dar.

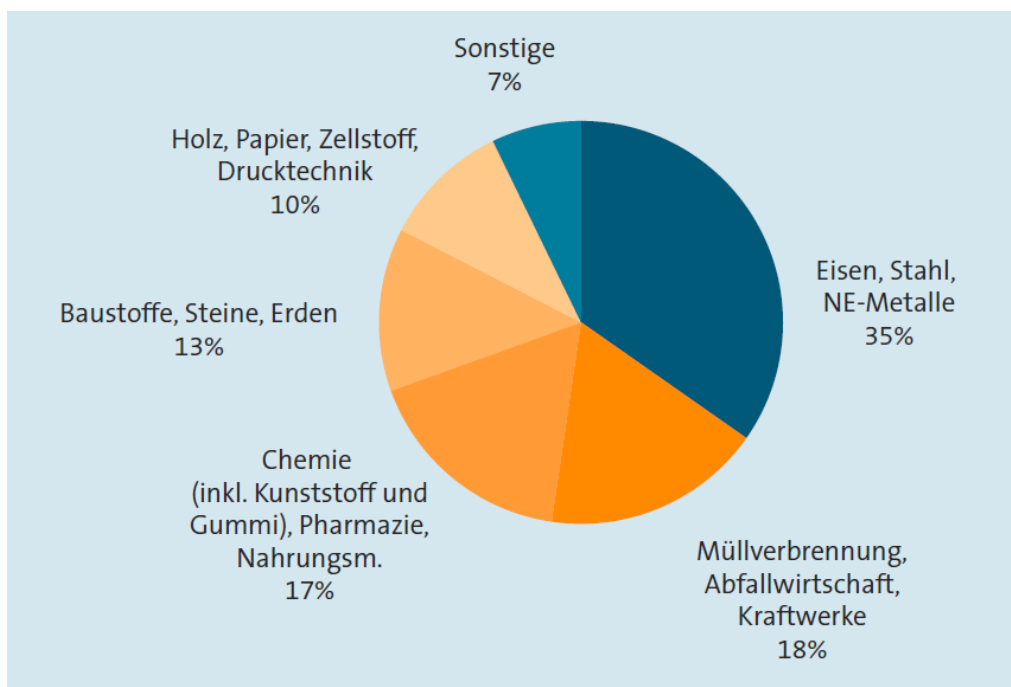


Abb.2 Auftragseingang nach Kundenbranchen 2009-2013 für Luftreinigungstechnik [3]

In dem vorliegenden Beitrag wird zum einen ein Überblick der eingesetzten Verfahren 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.

## 2. 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 modifiziert zu [4]

Komponente	E-Filter <sup>1)</sup>	Gewebe- filter <sup>1)</sup>	Sorptions- filter	Fest- /Wanderbett- Adsorber	Wäscher	SNCR	SCR	Fackel / Verbrennung
Staub	x	x	x		(x)			
HCl			x	(x)	x			
HF			x	(x)	x			
SO <sub>2</sub>			x	x	x			
NO <sub>x</sub>				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	x
NH <sub>3</sub>				x	x		x	
VOC			(x)	x			x	x

( ) bedingt geeignet bzw.

{x} staubgebundene Schwermetalle

<sup>1)</sup> reine Staubabscheider

Was in der Verfahrensmatrix nicht aufgeführt sind, aber dennoch nennenswert erscheint, sind die zur Entstaubung eingesetzten Zyklone sowie zur Geruchsminderung und VOC-Abscheidung zum Einsatz kommenden Biofilter bzw. Biowäscher. Die Zyklone werden zur

Entstaubung mit nicht so hohen Emissionsanforderungen, insbesondere für feinere Partikel, sowie zur z.B. als Funkenschutz-Abscheider bei Holzverbrennungsanlagen eingesetzt.

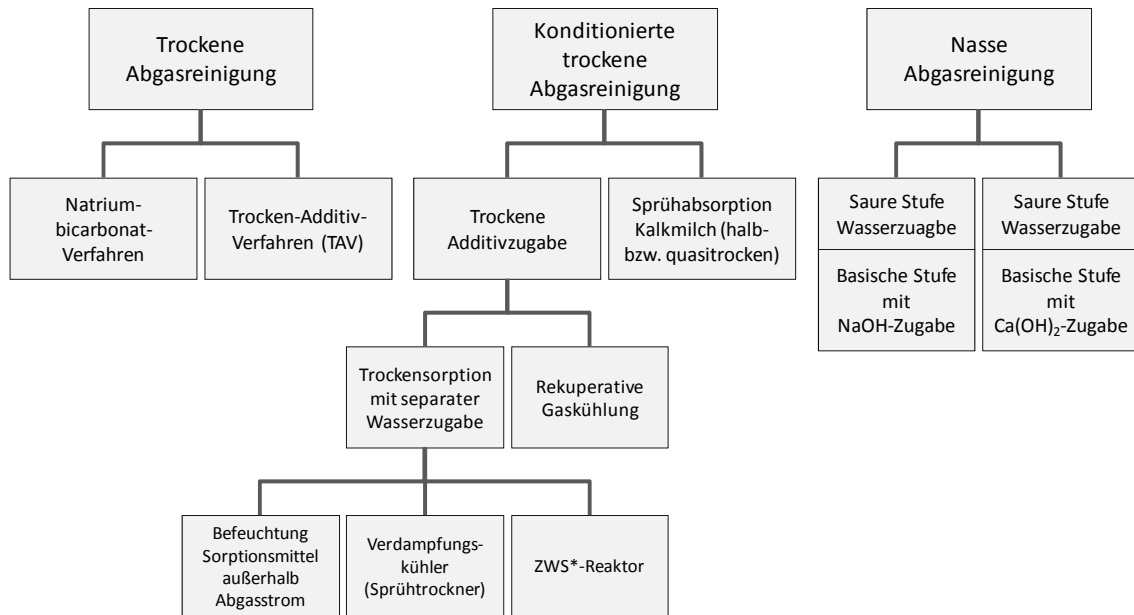
Für die Abscheidung der sauren Schadgasbestandteile sowie der Schwermetalle und Dioxine/Furane kann eine Einteilung in nasse und (konditioniert) trockene Verfahren vorgenommen werden. Welches Verfahren letztendlich einzusetzen ist, hängt von vielen Faktoren ab. In Kapitel 3 wird aufgezeigt, welche Auswahlkriterien 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 [5]

<b><i>nasse Verfahren</i></b>	<b><i>(konditionierte) trockene Verfahren</i></b>
geringer Sorbensverbrauch (Stöchiometrie 1), dadurch geringe Reststoffmenge	größerer Sorbensverbrauch (Stöchiometrie 1,6 bis >2), dadurch größere Reststoffmenge
teure Additive (z.B. NaOH)	günstige Additive (z.B. Ca(OH) <sub>2</sub> )
großes Abscheidevermögen für HCl und SO <sub>2</sub>	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 keine Wasserdampffahne

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 Abb. 3 gezeigte 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.



**Abb. 3** Einteilung der Abgasreinigungsverfahren zur Abscheidung von HCl, SO<sub>x</sub> und HF (\* Zirkulierende Wirbelschicht) [6]

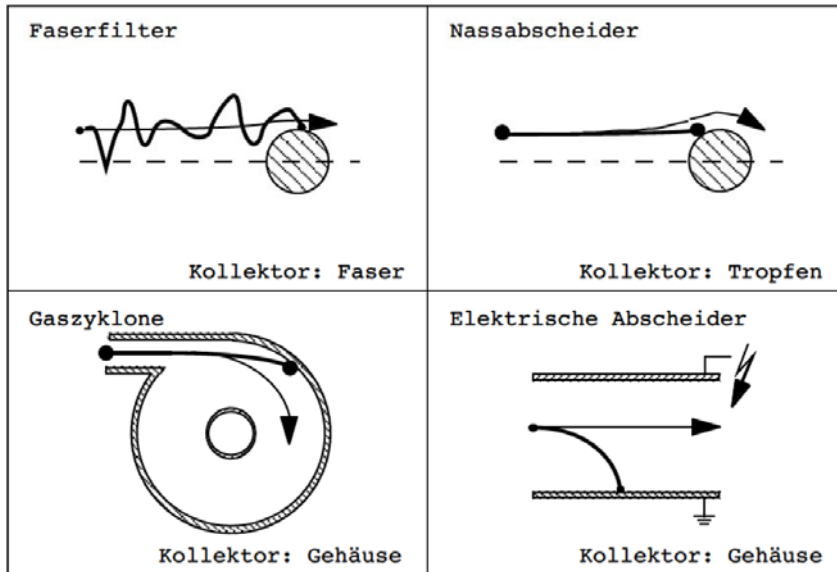
## 2.1 Entstaubungsverfahren

Die Entstaubung als ältestes Abgasreinigungsverfahren hat an Aktualität nicht verloren, wie man an der Diskussion und Forderungen an die Feinstaubabscheidung sieht.

Die in der Praxis zum Einsatz kommenden Staubabscheider unterscheidet man nach der Art der Abscheidetechnik:

- a) *Massenkraftabscheider* (Schwer- und Fliehkraftabscheider)
- b) *filternde Abscheider* (Gewebefilter)
- c) *elektrostatische Abscheider* (Elektrofilter)
- d) *Nassabscheider* (Waschturm, Venturi-, Rotations-, Strahl- und Wirbelwäscher)

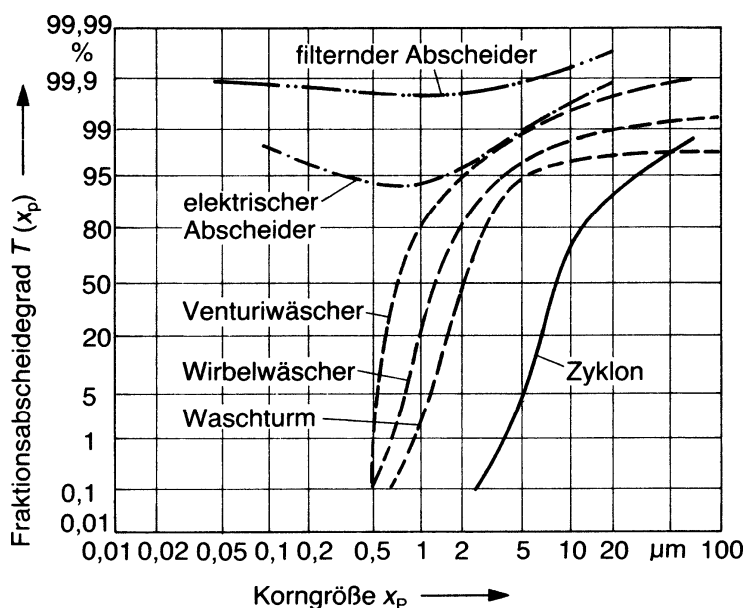
Zur Abscheidung von festen oder flüssigen Partikeln aus einem Gasstrom müssen die Partikel in Bereiche transportiert werden, wo sie von dem Gasstrom nicht mehr mitgenommen werden können. Das können wie in Abb. 4 gezeigt, die Oberfläche einer Faser oder Flüssigkeitstropfen sein sowie die Außenwand eines Gaszyklons und die Niederschlagsfläche eines Elektro-Filters sein.



**Abb. 4** Beispielhafte Darstellung des Partikeltransportes hin zum gasumströmten oder -überströmten Kollektoroberflächen unterschiedlicher Abscheidertypen [7]

Die Effektivität eines Staubabscheiders wird durch den Fraktionsabscheidegrad und den Gesamtabscheidegrad bestimmt. Der Fraktionsabscheidegrad  $T(x_p)$  bzw.  $\eta_F$  ist das Verhältnis der abgeschiedenen Masse einer bestimmten Kornklasse zu der im Rohgas enthaltenen Masse dieser Kornklasse. Der Gesamtabscheidegrad  $T_{ges}$  bzw.  $\eta_{ges}$  ist das Verhältnis der gesamten abgeschiedenen Feststoffmasse zu der gesamten im Rohgas enthaltenen Feststoffmasse.

In Abb. 5 sind die Fraktionsabscheidegrade in Abhängigkeit der Partikelgrößen für verschiedene Entstauber dargestellt.



Einzelheiten zu den jeweiligen Entstaubungsverfahren sowie weiterführende Informationen entnehmen Sie bitte der Fachliteratur wie z.B. [11].

**Abb. 5** Fraktionsabscheidegradkurven verschiedener Staubabscheidesysteme [8]

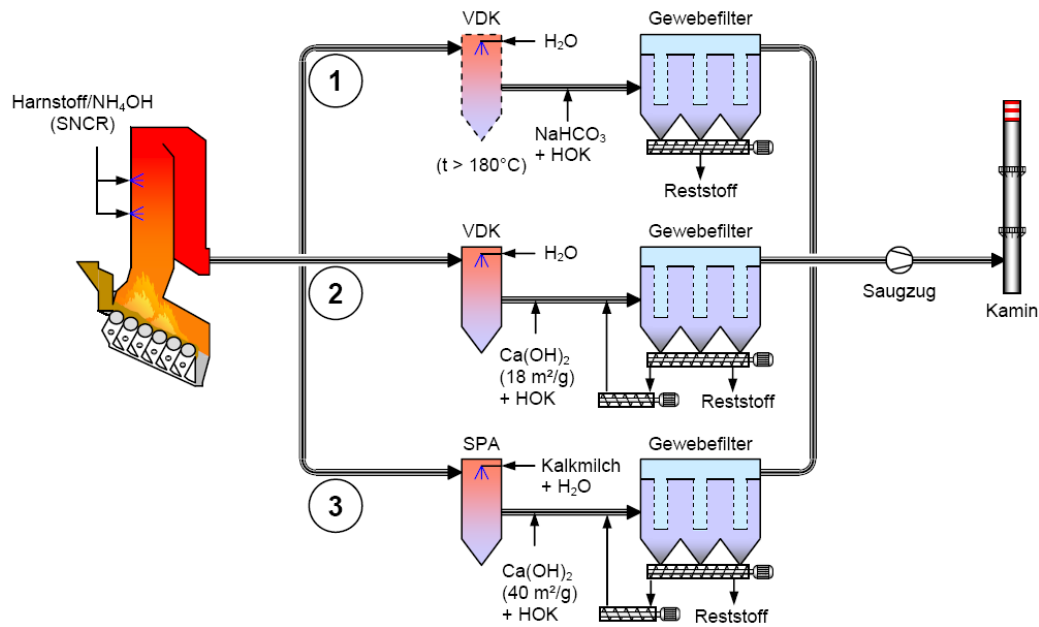


## 2.2 Trockene Verfahren zur Abscheidung der sauren Schadgaskomponenten

Trockensorptionsverfahren sind Abgasreinigungsverfahren, die weder Nasswäscher noch Elektrofilter (als Vorentstauber) benötigen. Die Staub- und Schadstoffabscheidung erfolgt simultan an einem Gewebefilter, wie in Abb. 6 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<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. [5], [9]) verwiesen.

Die Trockensorption mit Natriumhydrogencarbonat (auch Natriumbicarbonat genannt) als Additiv, ist ein von der Abgasfeuchte unabhängiges Abgasreinigungsverfahren. 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 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.



**Abb. 6** vereinfachte Verfahrensschemata trockener / konditionierter Trockensorptionsverfahren am Beispiel der Müllverbrennung zur Einhaltung der 17. BImSchV ( $\text{NO}_x = 200 \text{ mg/m}^3$ ) und Rohgaskonzentrationen  $\text{HCl} \leq 2500 \text{ mg/m}^3$  und  $\text{SO}_2 \leq 2000 \text{ mg/m}^3$  (VDK=Verdampfungskühler; SPA=Sprühabsorber; HOK=Aktiv-Herdofenkoks) [5]

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  $130 - 150 \text{ }^\circ\text{C}$  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  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  und  $\text{HCl}$  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 [10] ermittelt, dass es eine Zwischenreaktion von bereits gebildetem Calciumchlorid mit Calciumhydroxid gibt, bei der das sogenannte Calciumhydroxidchlorid ( $\text{Ca}(\text{OH})\text{Cl}$ ) 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. [5]).

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.

### **2.3 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  $\text{SO}_2$ -Abscheidung dient (siehe hierzu Abb. 7). Die erste Wäscherstufe erfüllt im Wesentlichen zwei Funktionen:

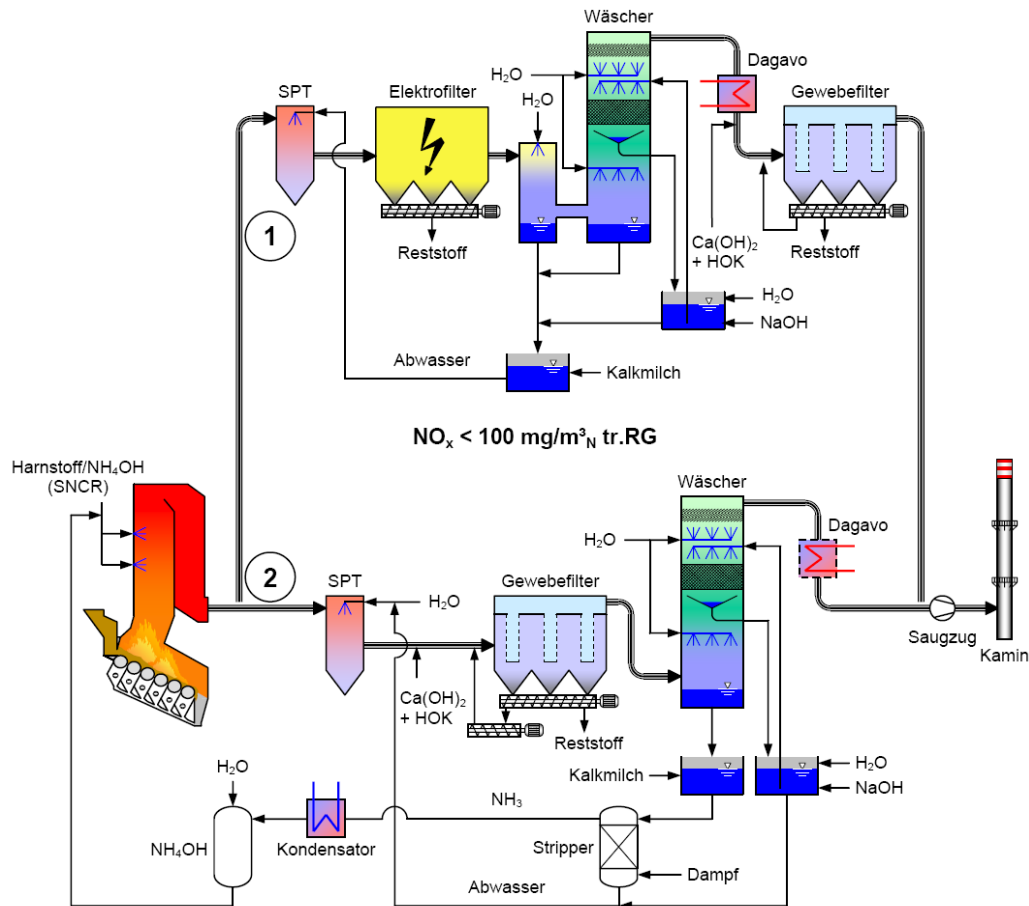
- die Sättigung der Abgase, d.h. die Abkühlung der Abgase im Kontakt mit Wasser auf Sättigungstemperatur
- die Absorption von Halogen- und Quecksilberverbindungen sowie von  $\text{SO}_3$

Die Halogenwasserstoffverbindungen  $\text{HCl}$  und  $\text{HF}$  (auch Bromwasserstoff  $\text{HBr}$  und Iodwasserstoff  $\text{HI}$ ) 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  $\text{HCl}$ ,  $\text{HBr}$  und  $\text{HI}$  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 ( $\text{SO}_2$ ) erfolgt in der zweiten Stufe bei einem pH-Wert zwischen 5,5 bis 5,9 durch Eindüsung von Natronlauge und unter Zufuhr von Luftsauerstoff ( $\text{O}_2$ ) für die Oxidation von Sulfit ( $\text{SO}_3^{2-}$ ) zu Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

Auf die genauen chemischen Vorgänge bei der Nasswäsche wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen und auf die bestehende, umfangreiche Literatur verwiesen (z.B. [11]).



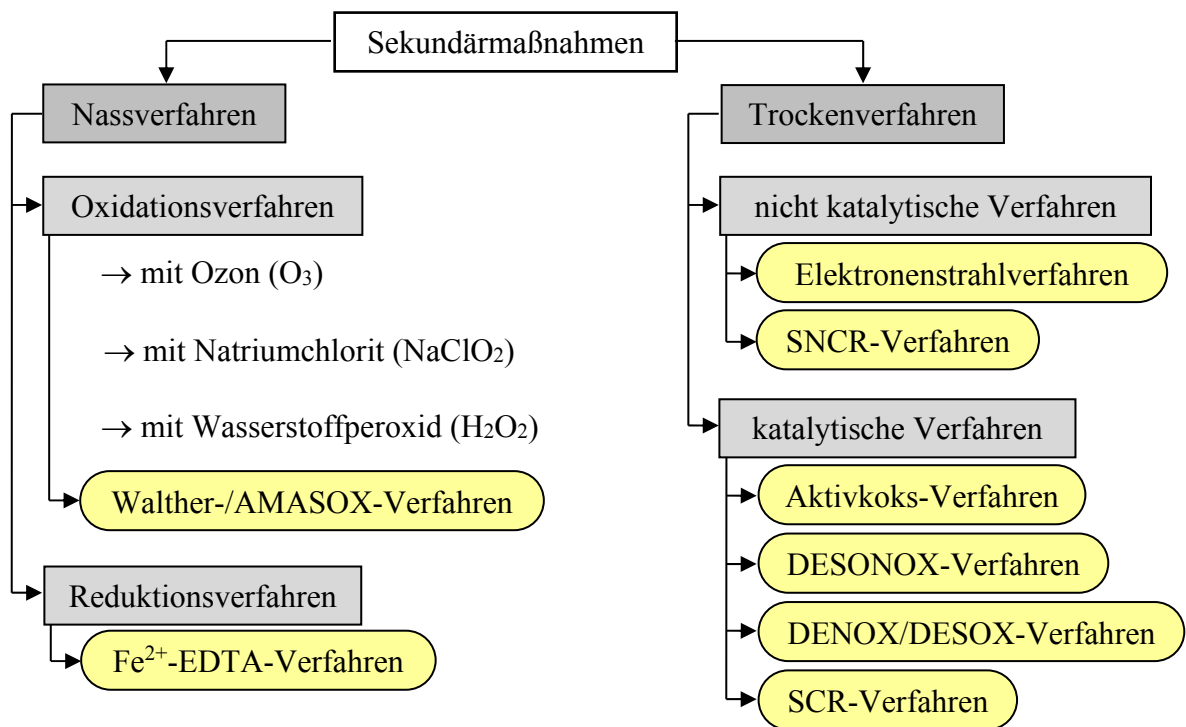
**Abb. 7** vereinfachte Verfahrensschemata mehrstufiger Abgasreinigungsverfahren am Beispiel der Müllverbrennung zur Einhaltung der halben 17. BImSchV ( $\text{NO}_x < 100 \text{ mg/m}^3$  SNCR-Verfahren) und Rohgaskonzentrationen  $\text{HCl} \leq 2500 \text{ mg/m}^3$  und  $\text{SO}_2 \leq 2000 \text{ mg/m}^3$  (SPT=Sprühtrockner); {1} 2-stufiger Wäscher inkl. Abwasereindampfung, {2}Trockensorption u. Wäscher [5]

## 2.4 Verfahren zur Entstickung

Zur Minderung von Stickoxiden gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten und Verfahren. Hierbei wird in primär- und sekundärseitige Maßnahmen unterschieden. Die primärseitigen Maßnahmen sind feuerungstechnische Maßnahmen wie z.B. Flammenkühlung, Abgasrezirkulation (Schaffung reduzierender Verbrennungszonen), usw..

Sekundärmaßnahmen sind chemische und technische Verfahrensmaßnahmen, die dazu geeignet sind, die im Abgas enthaltenen  $\text{NO}_x$ -Emissionen zu verringern.

Zu den Sekundärmaßnahmen zählen sowohl nasse als auch trockene Verfahren, wie in Abb. 8 gezeigt.



**Abb. 8** Verfahrenübersicht der Sekundärmaßnahmen zur Stickoxidminderung

Für die Stickoxidminderung hinter Feuerungsanlagen und thermischen Prozessen 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  $\text{NH}_2$ -Radikale dient. Der Reaktionsweg verläuft jeweils über die Bildung von  $\text{NH}_2$ -Radikalen. Als Reduktionsmittel werden vorwiegend Ammoniak (als 25 bis 30%ige  $\text{NH}_3$ -Lösung), Harnstoff (als 40 bis 45%ige  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ -Lösung), Isocyanäure ( $\text{HNCO}$ ) und einige weitere stickstoffhaltige Verbindungen eingesetzt.

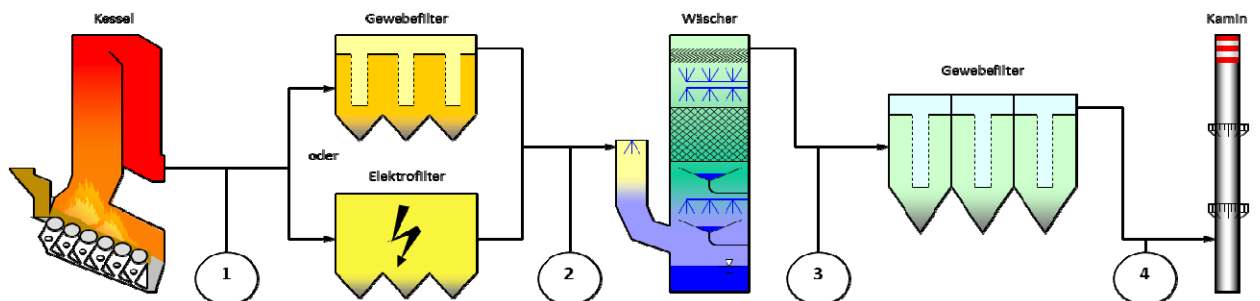
Alle Reduktionsmittel haben gemeinsam, dass sie nur in einem relativ engen Temperaturbereich, typischerweise 850 bis 950 °C (bei Harnstoff) bzw. 950 bis 1050 °C (bei Ammoniak), eine signifikante Stickoxidminderung ohne Nebenprodukte erzielen. In diesem Fall spricht man von selektiver nicht-katalytischer 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  $\text{NH}_2$ -Radikalen, sondern katalytisch an Vanadiumpentoxid ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ). 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).



Position	1	2	3	4
Anordnung	High Dust / High $\text{SO}_x$	Low Dust / High $\text{SO}_x$	Low Dust / Low $\text{SO}_x$	Tail End
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>einfache und kostengünstige Anlagentechnik</li> <li>kein Wärmetauscher und kein zusätzlicher Energieverbrauch (Erdgas, Dampf) wie in 3 und 4</li> <li>zusätzliche Dioxinzerstörung</li> <li>keine aufwendige Staubvorabscheidung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>kein Wärmetauscher wie in 3 und 4</li> <li>zusätzlich komplette Dioxinminderung im Katalysator möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>zusätzlich komplette Dioxinminderung im Katalysator möglich</li> <li>keine Dioxinbelastung im Reststoff bei nachgeschaltetem Polzeifilter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>keine signifikante Deaktivierung</li> <li>hohe Standzeiten</li> <li>bei Niedertemperatur-SCR (230°C) Verwendung von Dampf zur Wiederaufheizung möglich</li> <li>bei Niedertemperatur-SCR (180°C) ggf. keine Aufheizung notwendig</li> <li>fast kein <math>\text{SO}_2</math> / <math>\text{SO}_3</math></li> <li>keine Staubbläser</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ggf. Einschränkungen bei Katalysatorstandzeit</li> <li>Staubbläser notwendig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>aufwendige Staubvorabscheidung &lt; 20 mg/m<sup>3</sup></li> <li>durch die <math>\text{SO}_2/\text{SO}_3</math>-Konversion relativ hohe <math>\text{SO}_3</math>-Konzentration (Aerosolbildung)</li> <li>zum Teil Staubbläser notwendig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>aufwendige und kostenintensive Wiederaufheizung</li> <li>Verwendung von korrosionsbeständigen Materialien (Wasser-/ Säuretaupunkt) im Nassbereich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>nur bei Niedertemperatur-SCR → hohes Katalysatorvolumen</li> <li>höhere Reststoffbelastung mit Organika des vorgeschalteten Adsorbers</li> <li>aufwendige und kostenintensive Wiederaufheizung (Ausn. 180°C)</li> <li>Ggf. Katalysatorregeneration erforderlich (180°C)</li> </ul>

Abb. 9 Übersicht Vor- und Nachteile der Schaltungsarten für eine DENOX-Anlage hinter Abfallverbrennungsanlagen [11]

Es gibt mehrere Schaltungsmöglichkeiten d.h. Positionierungsmöglichkeiten für eine DeNO<sub>x</sub>-Anlage innerhalb der Abgasreinigungsanlage wie Abb. 9 zeigt. Die Position der DeNO<sub>x</sub>-Anlage im Abgasweg hat einen großen Einfluss auf den Abgasreinigungsbetrieb, da z.B. das SO<sub>2</sub> durch den Katalysator teilweise (ca. 0,5 bis 2%) zu SO<sub>3</sub> oxidiert wird, was zum einen Korrosionsprobleme durch die Absenkung der Säuretaupunkttemperatur verursachen kann und zum anderen mit nicht umgesetztem Ammoniak (bei vorhandenem NH<sub>3</sub>-Schlupf) zu Ammoniumsulfat ((NH)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) oder zu klebrigem Ammoniumhydrogensulfat (NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>) reagieren kann.

Weiterführende Informationen sind der einschlägigen Literatur (z.B. [11]) zu entnehmen.

## 2.5 Verfahren zur Schwermetall und Dioxin/Furan-Abscheidung

Die Abscheidung von Schwermetallen und Dioxine/Furane (PCDD/PCDF) erfolgt sehr häufig mittels eines adsorptiv wirkenden Verfahrens, wie bereits in der Verfahrensmatrix in Tab. 1. gezeigt wurde. Neben den typischen Adsorption-/Sorptionenverfahren erfolgt die Abscheidung von partikulär gebundenen Schwermetallen und PCDD/PCDF über entsprechende Partikelabscheider.

Die in der Praxis zum Einsatz kommenden Adsorbentypen sind in Abb. 10 gezeigt.

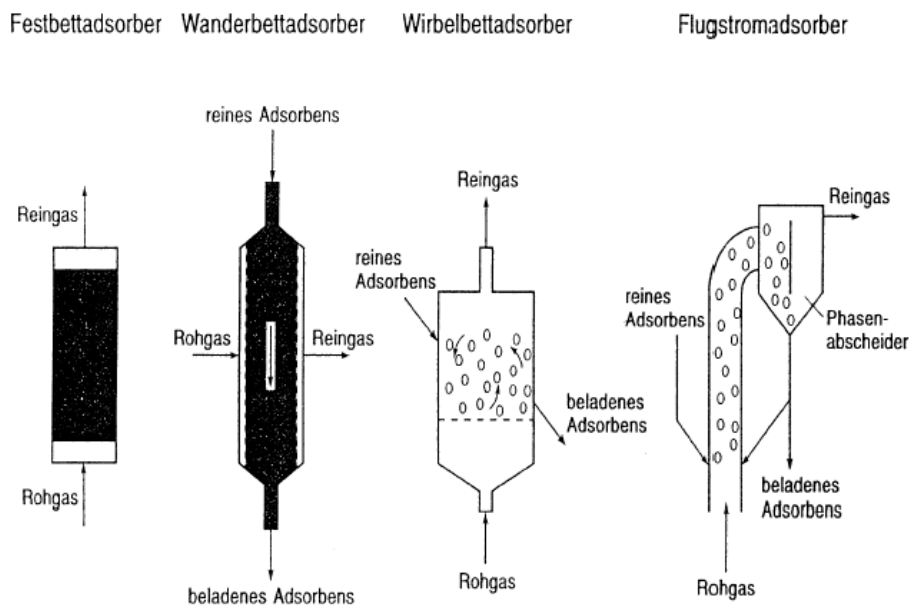


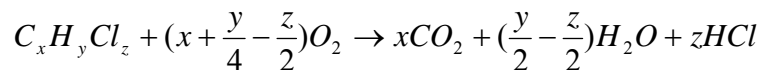
Abb. 10 Adsorbentbauarten zur Reinigung von Abgasströmen[12]

Aber auch in Nass-Wäschern erfolgt eine Abscheidung durch zunächst physikalische Lösung der Schwermetalle wie z.B. Quecksilber, als ionisches Quecksilber (Hg-Komplex).

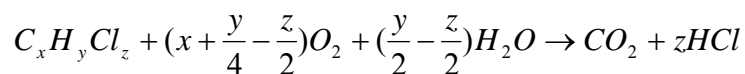
Mit der Zugabe von z.B. Organo-Sulfiden in die Waschlösung erfolgt eine Immobilisierung durch eine chemische Absorption.

Bei der PCCD/PCDF-Abscheidung kommen weitere Abscheidemöglichkeiten in Frage. So z.B. die katalytische oder thermische Oxidation mit folgenden Reaktionsgleichungen.

mit  $y > z$

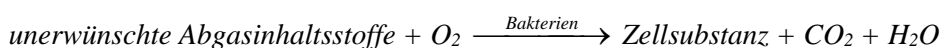


mit  $y < z$



## 2.6 Biologische Verfahren

Bereits seit einigen Jahrzehnten werden Mikroorganismen (Bakterien, Pilze,...) zur Behandlung von umweltbeeinträchtigende Stoffen eingesetzt. In der biologischen Abgasreinigung, meist zur Abscheidung von organischen Schadstoffen, werden deren Moleküle zunächst in die wässrige Phase überführt. Die darin enthaltenen Mikroorganismen spalten oder zerstören die Schadstoffe, sodass im Idealfall nur Kohlendioxid und Wasser als Stoffwechselprodukte entstehen. [13]



Bei der Umwandlung der Schadstoffe durch die Mikroorganismen sind zwei Grundprozesse von dominierender Bedeutung: [13]

- Absorption der Schadstoffe (Transport aus der gasförmigen in die wässrige Phase)
- Umsetzung der absorbierten Abgasinhaltsstoffe in der wässrigen Phase durch Mikroorganismen, die sich auf einem festen Trägermaterial, als sogenannter Biofilm beim Biotropfkörperverfahren befinden, oder suspendiert in einer Flüssigkeit beim klassischen Biowäscher vorliegen können.

Bei der biologischen Abgasreinigung unterscheidet man zwischen Biofiltern und Biowäschern. Die Biofilter werden zur Reinigung von Abgasströmen mit geringer Belastung von z.B. geruchsintensiven Verbindungen eingesetzt. Der Biowäscher hingegen ermöglicht den Stoffumsatz höher konzentrierter biologisch abbaubarer Substanzen. Die zum Einsatz



kommenden Wäschertypen sind entweder Biotropfkörper (Biotrickling Filter (BTF)) oder der klassische Absorber mit externem Belebungsbecken, wenn größere Verweilzeiten für den Stoffumsatz notwendig sind.

### 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<sub>2</sub> vorgenommen werden kann.

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

**Tab.:3** zugrunde gelegte Abgasparameter für die Entscheidungs-Matrizen [14]

Parameter	Einheit	TMW	TMW	HMW	Spitze (0,5 - 5h)
Heizwert	[MJ/kg]	10	11,5	14	18
H <sub>2</sub> O	Vol.-% tr.	12	15	19	24
Staub	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	1.500	2.500	3.500	10.000 (Rußblasen)
NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	300	400	500	700
HCl	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	600	1.500	4.000	5.000
SO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	300	650	1.500	3.000
Hg	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	0,3	0,5	1	1,2
Cd + Tl	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	1	2,5	7	10

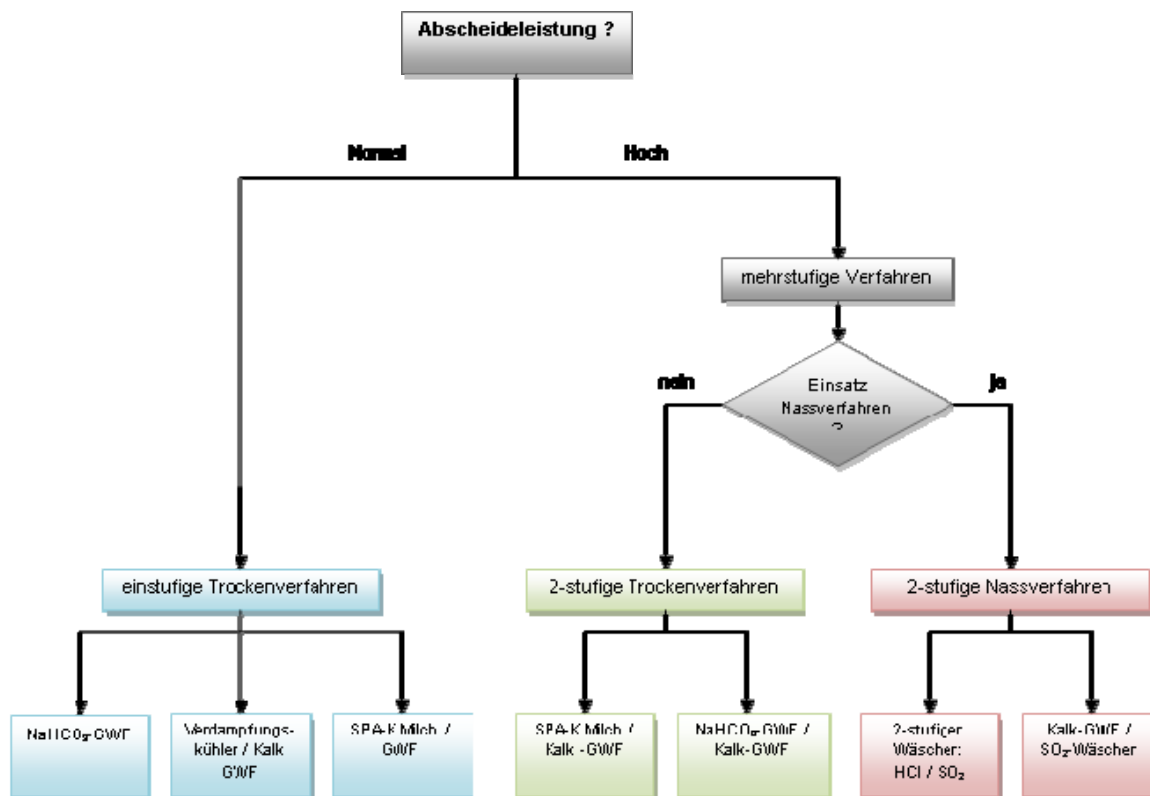
Des Weiteren sind für die Verfahrensauswahl zur Abscheidung der sauren Schadgasbestandteile die angestrebte Reinigungsleistung und die einzuhaltenen Grenzwerte entscheidend. Um diese Grenzwerte qualifizieren zu können (vgl. Tab. 4), werden die Grenzwerte der 17. BImSchV (*normale* Abscheideleistung), bzw. die halbierten Werte der

17. BImSchV (*hohe* Abscheideleistung) im Anwendungsfall einer Abfallverbrennungsanlage als Referenzwerte betrachtet.

**Tab.:4** Emissionsgrenzwerte zur Definition der Abscheideleistung NORMAL und HOCH für die Entscheidungs-Matrizen [14]

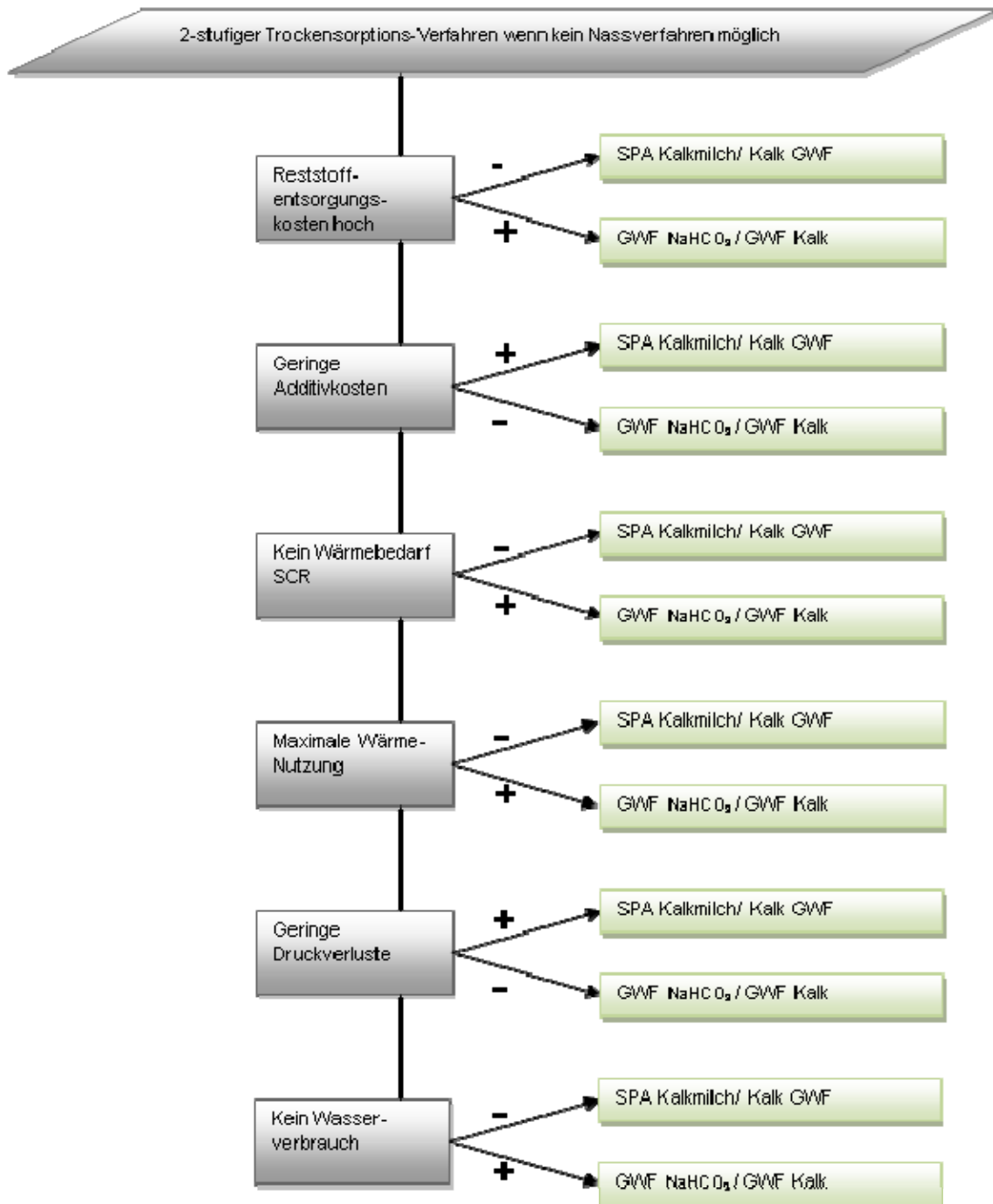
Komponente	Einheit	NORMAL Grundlage: Grenzwerte 17. BImSchV	HOCH Grundlage: Grenzwerte ½ 17. BImSchV
TOC	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	10	5
CO	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	50	25
HCl	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	10	5
HF	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	1	0,5
SO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	50	25
Staub	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	10	5
NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	200	100
Hg	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	0,03	0,025
Cd, Tl	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	0,05	0,025
Sb - Sn	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	0,5	0,25
As - Cr	mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.	0,05	0,025
Dioxine/Furane	ng/m <sup>3</sup> i.N.tr.	0,1	0,05

Die Entscheidungspfade in Abb. 11 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.



**Abb. 11** Entscheidungsmatrix zur Auswahl eines Verfahrens in Abhängigkeit der geforderten Emissionen respektive Abscheidegrad [14]

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. Abb. 12). Sind zum Beispiel standortbedingt hohe Reststoffentsorgungskosten (wie z.B. in Frankreich) zu erwarten, hat das Trockensorptionsverfahren mit Natriumbicarbonat ( $\text{NaHCO}_3$ ) 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 ist in gleicher Lesart zu verstehen.



**Abb. 12** Entscheidungsmatrix zur Auswahl eines zweistufigen Trockensorptions-Verfahren (+ gut, - ungünstig; Sprühabsorption (SPA), Gewebefilter (GWF)) [14]

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.

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

## 4. Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag zeigt zum einen die weiterhin bestehende Notwendigkeit einer fortschreitenden und –entwickelnden Abgasreinigungstechnologien und zum anderen die Vielfältigkeit der bestehenden Verfahren zur Minderung von Luftschadstoffen.

Es werden die einzelnen Verfahrensmerkmale zur Minderung der jeweiligen Schadstoffe wie z.B. Staub, sauren Gasbestandteile ( $\text{SO}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ), Schwermetalle, Dioxine/Furane sowie flüchtige organische Verbindungen (VOC) anhand der Verfahrensgruppen wie trockene-/nasse Verfahren, katalytische und biologische Verfahren aufgezeigt.

Abschließend werden beispielhaft für die Abscheidung der sauren Schadgasbestandteile ( $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{SO}_2$ ) 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 wieder.

## 5. Literatur

- [1] WHO Europa: „Neu entdeckte gesundheitliche Auswirkungen von Luftverschmutzung machen größere Anstrengungen zur Reinhaltung der Luft in der Europäischen Union erforderlich“; Brüssel und Kopenhagen, 31. Januar 2013
- [2] Umweltbundesamt: “Trend der Luftschadstoff-Emissionen”;  
<http://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen/trend-der-luftschadstoff-emissionen>, Dessau 12.05.2015
- [3] VDMA Allgemeine Lufttechnik – Geschäftsbericht 2013-2014, B3 – 5
- [4] Karpf, R.: „Kumulierter Energieaufwand zur Herstellung verschiedener Abgasreinigungsanlagen“. Energie aus Abfall, Hrsg. Karl J. Thomé Kozmiensky und Michael Beckmann, Neuruppin: TK Verlag Karl J. Thomé Kozmiensky, 2010 Bd. 7, S. 639-669
- [5] Karpf, R.: „Welches Abgasreinigungsverfahren ist das Richtige? -Antworten auf sich ändernde Schadstoffkonzentrationen in Abfall- und Ersatzbrennstoffverbrennungsanlagen“. VGB PowerTech 12/2008, S. 107-114
- [6] Karpf, R.: Thermische Abfallbehandlung-Die neue Richtlinie VDI 3460 Blatt 1, KRdL-Expertenforum, KRdL-Schriftenreihe 43, S. 87-98, 01.02.2012, Bonn
- [7] Schmidt, E.: „Grundlagen der Filternden Partikelabschug“; Essen: Haus der Technik, 2008.
- [8] Bank, M.: „Basiswissen Umwelttechnik“; *Wasser, Luft, Abfall, Lärm, Umweltrecht*, 4. komplett neu bearb. Auflage, 2000; Würzburg: Vogel Buchverlag.
- [9] Karpf, R.: „Optimierte Abgasreinigung für Brennstoffe mit hohem Chlorgehalt“. VDI Seminar Technikforum: "Ersatzbrennstoffe für Industrieanlagen". 28. - 29. April 2008, Berlin
- [10] 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
- [11] Diepenseifen, K.; Karpf, R.: Brennstoff, Dampf, Rauchgas. Verlag Lührs & Röver, 2011, S. 252 – 334

- [12] Schultes, M.: "Abgasreinigung: Verfahrensprinzipien, Berechnungsgrundlagen, Verfahrensvergleich"; Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (1996).
- [13] Grüner, T.: „Abscheidung von leichtflüchtigen Gasen (VOC) und anderen organischen Schadgasen aus Produktions- und Hallenabluft“; Biologische Wäscher für die VOC-Minderung, Haus der Technik, Essen (2007)
- [14] Karpf, R.: „Überblick zur Abgasreinigung“. 9. Fachtagung Abgasreinigung von Feuerungsanlagen und thermische Prozesse Haus der Technik, Essen, 06. - 07. Juni 2013