

## **Gegenüberstellung der spezifischen Behandlungskosten von Quasitrocknen Abgasreinigungsanlagen beim Einsatz verschiedener Sorbenzien**

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

Überblick über quasitrockene Verfahren zur Abgasreinigung, Darstellung der Randbedingungen und daraus resultierender Schaltungsvarianten, Zusammenstellung der erforderlichen Investitionen und Betriebskosten, Ermittlung der spezifischen Behandlungskosten für die betrachteten Verfahrensvarianten und Einsatzstoffe am Beispiel von Model-Anlagen

<b>1. Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2. Abgasreinigungsverfahren</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Partikelabscheidung</b>	<b>4</b>
<b>2.2. Abscheidung von sauren Bestandteilen</b>	<b>6</b>
Nassverfahren	6
Quasitrockenes Verfahren	7
Abscheidung mit Ca-haltigem Absorbens	7
Abscheidung mit Na-haltigem Absorbens	8
Kombiverfahren	8
<b>2.3. Schwermetallabscheidung</b>	<b>8</b>
<b>2.4. Feuerungstechnische Maßnahmen</b>	<b>9</b>
SNCR	10
<b>2.5. Abgasfeinreinigung</b>	<b>11</b>
Festbettabsorber	11
SCR-Anlage	11
<b>3. Aufbau neu zu erstellender Anlagen</b>	<b>12</b>
<b>3.1. Randbedingungen</b>	<b>12</b>
<b>3.2. Variante 1</b>	<b>13</b>
<b>3.3. Variante 2</b>	<b>14</b>
<b>4. Investitionen und Betriebskosten</b>	<b>17</b>
<b>5. Platzbedarf</b>	<b>19</b>
<b>6. Zusammenfassung</b>	<b>20</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>21</b>

## 1. Einleitung

Abgasreinigungsanlagen dienen zwei grundsätzlichen Zielen. Zum einen ist der zurückgehaltene Stoff das Produkt eines Prozesses. Als Beispiele seien die Russproduktion oder ein Zementprozess mit Ölschiefer als Brennstoff und Rohprodukt für die Zementherstellung angeführt. Hierbei werden die festen Bestandteile trocken abgeschieden und in den weiterführenden Prozessen als Produkt eingesetzt.

Für gasförmige Abgasbestandteile können chemische Waschverfahren für die Abscheiden von  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  oder  $\text{HCl}$  eingesetzt werden, um das gewünschte Produkt Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), Gips ( $\text{Ca}(\text{SO}_4)$ ), Anhydrit ( $\text{Ca}(\text{SO}_3)$ ) oder Salzsäure ( $\text{HCl}$ ) herzustellen.

In Anlagen zur Strom- und/oder Wärmeerzeugung werden Verfahren eingesetzt, die die Produkte Gips und Schwefelsäure aus dem Kraftwerksbetrieb oder Gips, Anhydrit,  $\text{HCl}$  aus der thermischen Verwertung von (Rest-) Abfällen als Wertstoff gewinnen und dem Produktkreislauf wieder zuführen können.

Zum anderen werden die Abgasreinigungsanlagen dazu verwendet, schädliche Bestandteile aus dem Abgas zu entfernen und somit der Umwelt dauerhaft zu entziehen. Es handelt es sich hierbei um die oben bereits aufgeführten Stoffe. Weitere, vor allem gasförmige Bestandteile, die es zu entfernen gilt, sind  $\text{NO}_x$ , Schwermetalle (vor allem Cadmium und Quecksilber), Dioxine/ Furane und weitere anorganische Säurebildner ( $\text{HF}$ ,  $\text{HBr}$ ,  $\text{HJ}$ ).

Zur Abscheidung der aufgeführten Stoffe gibt es unterschiedliche Verfahren, welche den Erfordernissen entsprechend eingesetzt werden.

Zukünftig ist bei der Abgasreinigung zu beachten, dass die bei der Abfallverbrennung entstehenden Reststoffe ab dem Jahr 2020 zu Wertstoffen werden und einem Verwendungszweck zugeführt werden sollen. Abfallstoffe zur oberirdischen Deponierung sind nicht mehr zulässig.

In Japan sind entsprechende Vorschriften seit einiger Zeit in Kraft und haben sowohl bei der Anlagenausführung als auch bei den eingesetzten Verfahren zu Änderungen oder Anpassungen an die neuen Erfordernissen geführt.

Im Rahmen des Vortrags wird nur auf mögliche Abgasreinigungsverfahren hinter thermischen Verwertungsanlagen für (Rest-) Abfälle oder Biomasseverbrennungsanlagen eingegangen.

## 2. Abgasreinigungsverfahren

Abgase hinter thermischen Verwertungsanlagen enthalten Feststoffe, Flüssigkeiten und Gase. Bei der Verbrennung von Restabfalls ergibt sich typischerweise die in **Tabelle 1** aufgelistete Abgaszusammensetzung.

Abgaszusammensetzung	Mittelwerte	Spitzenwerte
	[mg/m <sup>3</sup> *)	[mg/m <sup>3</sup> *)
Staub	2.000 – 4.000	3.000 – 5.000
HCl	1.600 – 2.500	2.500 – 5.000
HF	10 - 15	15 - 25
SO <sub>2</sub> /SO <sub>3</sub>	350 - 450	600 - 800
NO <sub>x</sub>	350 – 450	400 - 600
CO	10 – 50	10 - 50
C <sub>ges</sub>	5 – 0	5 - 10
Hg	0,1 – 0,3	0,1 - 0,6
Cd + Tl	1 – 2	k. A.
Sb, As, Pb, Cr, Cu, Co, Ni, Mn, V, Sn	5 – 10	k. A.
PCDD/F [ng/m <sup>3</sup> (TE)]	2 – 4	k. A.

\*) Alle Werte bezogen auf Norm, trocken

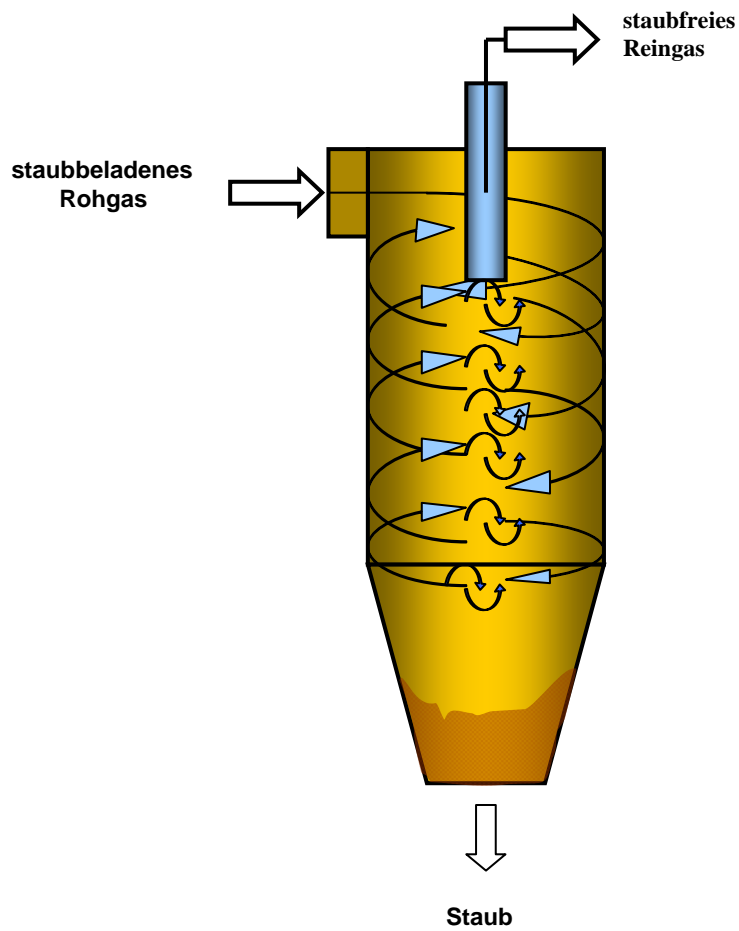
**Tabelle 1: Typische durchschnittliche Schadstoffkonzentrationen im Abgas** nach Ersatzbrennstoffverwertungsanlagen

### 2.1. Partikelabscheidung

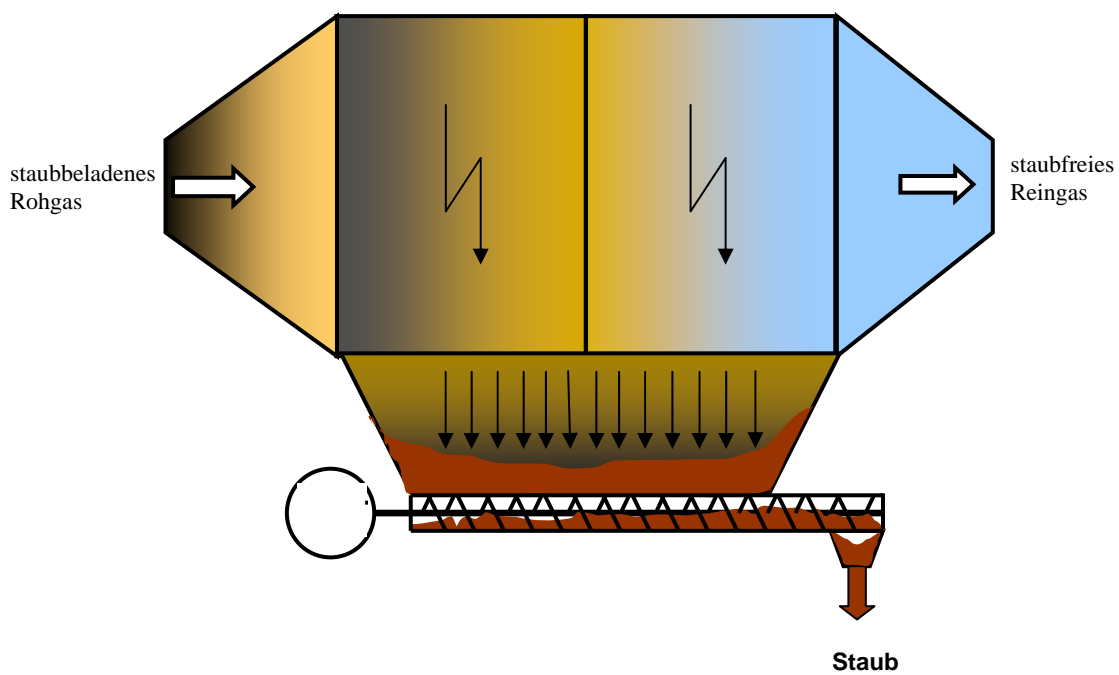
Aschepartikel, Salze oder kondensierte (Fest-) Stoffe werden je nach Anforderungen mit folgenden Aggregaten abgeschieden:

- mit mechanischen Abscheider (Absetzkammern, Zyklone oder Multizyklone),
- mit elektrostatischem Abscheider mit einem oder mehreren Feldern oder
- mit filterndem Abscheider.

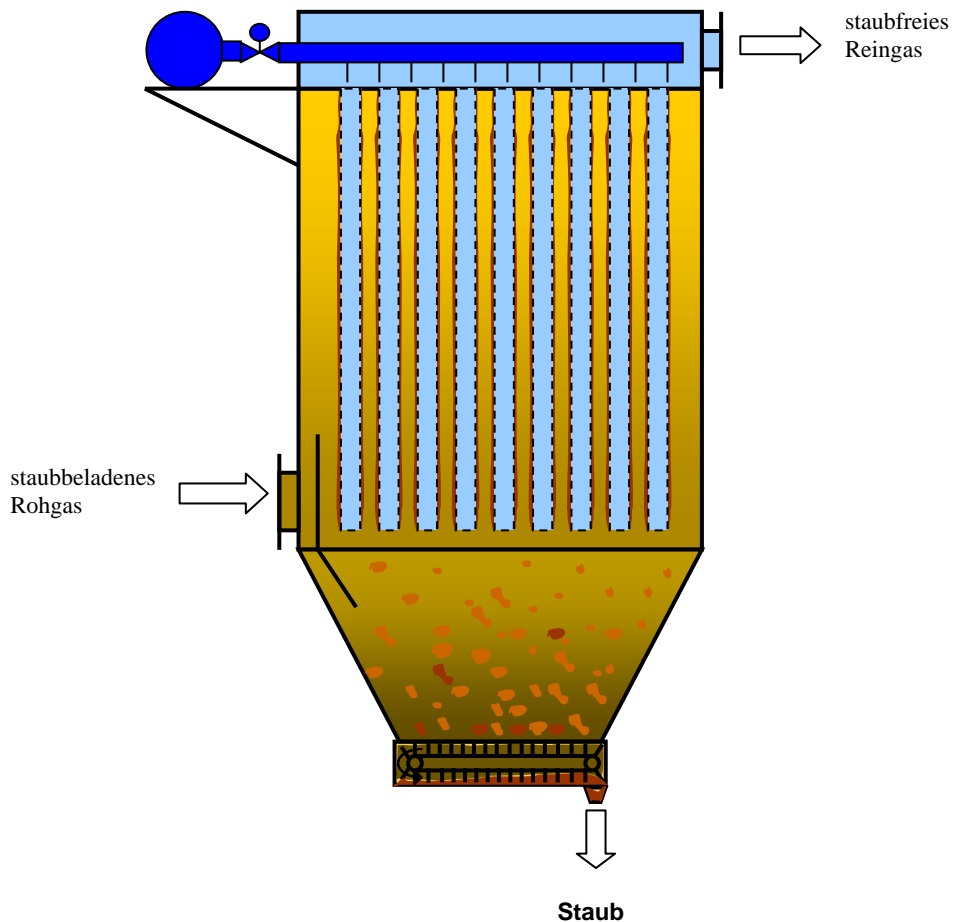
Die einzelnen Aggregate zur Partikelabscheidung sind in **Bild 1**, Massenkraftabscheider, **Bild 2**, elektrostatischer Abscheider, und **Bild 3**, filternder Abscheider, schematisch dargestellt.



**Bild 1: Massenkraftabscheider [1]**



**Bild 2: Elektrostatischer Abscheider (Elektrofilter) [1]**



**Bild 3:** Filternder Abscheider [1]

## 2.2. Abscheidung von sauren Bestandteilen

Saure gasförmige Abgasbestandteile werden in Wäschern oder Reaktoren mit oder ohne Wasserzugabe und unter Zugabe von Hilfsstoffen (Adsorbentien und Absorbentien) gebunden und abgeschieden. Hierzu können nasse, quasitrockene oder trockene Verfahren eingesetzt werden.

### Nassverfahren

Die nassen Verfahren zur Abgasreinigung werden nur aus Gründen der Vollständigkeit erwähnt und sind nicht Bestandteil dieser Betrachtung.

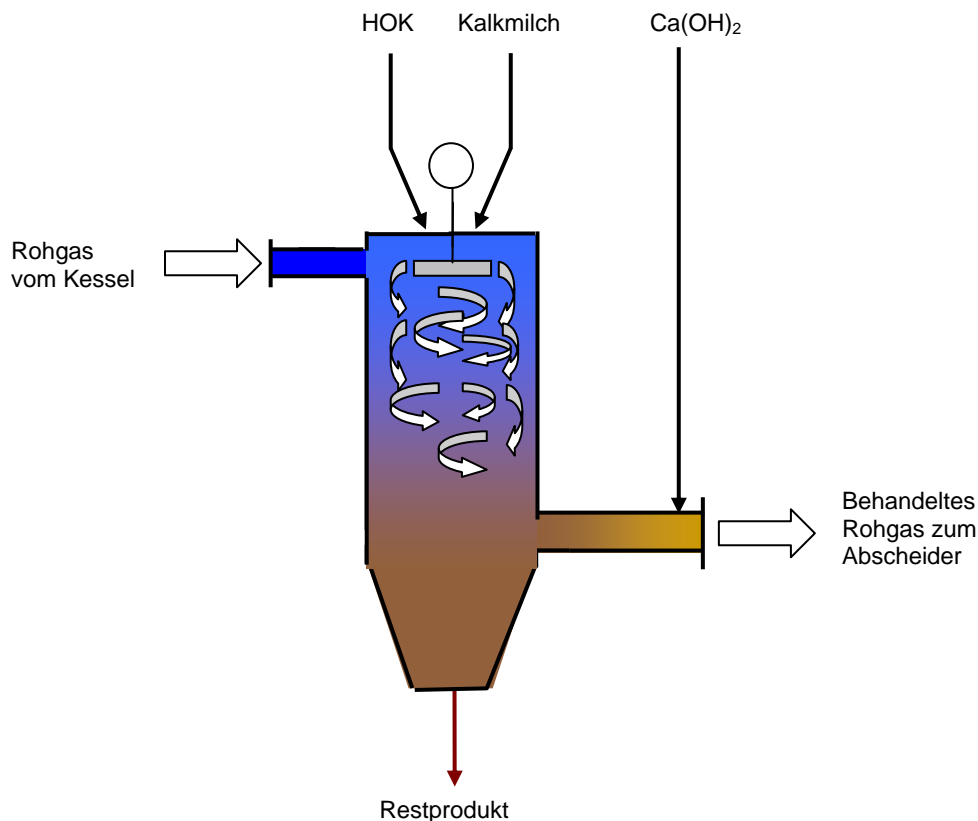
Das heiße Abgas wird in einer Quenchstufe bis zur Sättigung abgekühlt, die sauren Abgasbestandteile werden in Wäschern durch intensiven Kontakt mit einer Waschflüssigkeit aus dem Abgas ausgewaschen. Die abgeschiedene(n) Substanz(en) werden in der Waschflüssigkeit direkt oder durch ein in der Waschflüssigkeit vorhandene Reagenz gebunden und zusammen mit der Waschflüssigkeit aus dem Kreislauf entfernt.

### Quasitrockenes Verfahren

Allen quasitrockenen Verfahren gemeinsam ist, dass in einem Reaktor Wasser verdampft wird und über die Verdampfungswärme das Abgas auf die gewünschte Temperatur abgekühlt wird. Das Reagenz wird gemeinsam mit dem Wasser als Suspension oder getrennt trocken in den Reaktionsraum eingebracht. Die Temperatur des Abgases wird dadurch auf eine optimale Reaktionstemperatur gebracht.

### Abscheidung mit Ca-haltigem Absorbens

Beim Einsatz von Ca als Reaktionspartner bildet ein Sprühabsorber mit Düsen oder Sprühteller zum Einbringen des Wassers/der Suspension den optimalen Reaktionsraum (**Bild 4**). Der Reaktor ist so ausgelegt, dass sich eine entsprechend lange Verweilzeit zum Reagieren mit den Abgasbestandteilen und zum Trocknen der Partikel ergibt.



**Bild 4: Sprühabsorber**

Die gasförmigen und flüssigen Bestandteile reagieren mit dem fein verteilten Reagenz. Die Reaktionsprodukte werden in einem nachgeschalteten Abscheider abgeschieden. Beim Einsatz von Ca-haltigen Reagenzien wird eine Temperatur von 140 bis 150 °C eingestellt.

Diese Temperaturuntergrenze darf nicht unterschritten werden. Hintergrund ist, dass beim Einsatz Ca-haltiger Adsorbentien unter Anwesenheit von HCl Calciumchlorid ( $\text{CaCl}_2$ ) entsteht. Kristallines  $\text{CaCl}_2$  nimmt Wasser aus dem Abgas als exotherme Reaktion auf und baut dieses im Kristallgitter ein. Dabei vergrößert sich das Salzkristall stark, wird klebrig und wirkt stark korrosiv. Der

Volumenzuwachs ist vor allem beim Einsatz von filternden Abscheidern zu beachten.

Die Filtermedien bei filternden Abscheidern werden dadurch verstopft und lassen sich nur durch Waschen reaktivieren. Allerdings verschlechtert sich das Filtrationsverhalten der Filtermedien in den meisten Fällen.

Bei der quasitrocknen Abgaseinigung mit Ca als Medium sollte in Anwesenheit von HCl die Temperatur am filternden Abscheider von 140°C nicht unterschritten werden. Bei hoher relativer Feuchte im Abgas ist eine noch höhere Temperatur zur Erhöhung der Lebensdauer der Filter empfehlenswert.

#### **Abscheidung mit mit Na-haltigem Absorbent**

Bei diesem Verfahren wird die Abgastemperatur nach der letzten Wärmetauschers des Kessels nur noch aus Sicherheitsgründen und wegen dem Einsatz des kohlenstoffhaltigen Absorbent abgesenkt. In einen Reaktor werden die Sorbentien trocken eingeblasen.

Zum Einsatz kommt beispielsweise  $\text{NaHCO}_3$ , Natriumbicarbonat.

Während der optimale Temperaturbereich für Ca-haltige Verbindungen eher bei 140°C liegt, ist es beim Einsatz von Na-haltigen (z. B.  $\text{NaHCO}_3$ ) sinnvoll die Temperatur nicht unter 180 °C absinken zu lassen. Bei einer Temperatur von > 180 °C platzt die von  $\text{SO}_x$  belegte Oberfläche durch Volumenzuwachs automatisch ab und legt so jeweils neue, reaktive Oberflächen frei.

Die unterschiedlichen stöchiometrischen Faktoren bei der Schadgaseinbindung spielen bei der ökonomischen Betrachtung eine wesentliche Rolle. Bei trockenen Verfahren wird der Garantiewert der Hersteller in der Größenordnung von 2 bis 2,5 beim Einsatz von  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  liegen. Beim Einsatz von  $\text{NaHCO}_3$  kann mit einem Faktor von 1,05 bis 1,25 ausgegangen werden [2].

#### **Kombiverfahren**

Bei entsprechender Prozessführung können auch beide Reagenzien,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  und  $\text{NaHCO}_3$  eingesetzt werden.

Mit dem preiswerteren  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , Kalziumhydroxid, wird der Hauptteil der sauren Bestandteile eingebunden, mit dem reaktiveren und teureren  $\text{NaHCO}_3$  wird die Nachreaktion durchgeführt.

Inwieweit sich dieses Verfahren unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten günstig darstellt, ist in jedem Einzelfall zu überprüfen.

### **2.3. Schwermetallabscheidung**

Die über 850°C heißen Abgase werden in einem Abhitzekeessel auf ca. 180 bis 200°C abgekühlt. Die Schwermetalle Cadmium zu 85 %, Arsen zu 75 %, Blei zu 30 % und Zink zu 25 % kondensieren und verbinden sich mit den Feststoffen im Abgas. Zusätzlich verbinden sich die Schwermetalle mit Chlor, Schwefel oder Fluor zu Salzen.



Quecksilber dagegen, ein Metalle mit hohem Dampfdruck, verbleibt in der Gasphase. Je nach Chlorgehalt setzt sich jedoch der überwiegende Teil zu Quecksilberchlorid um, welches beispielsweise in einem sauren Wäscher (pH-Wert < 4,5) sicher abgeschieden und mit der Waschflüssigkeit ausgetragen wird. Metallisches Quecksilber wird nicht im Wäscher abgeschieden.

Bei quasitrockener oder trockener Abgasreinigung lässt sich Quecksilber mit angepassten Verfahren gut entfernen. Ein Verfahren besteht im Einblasen von mahlaktiviertem HOK in den Rohgasstrom. Mit Hilfe des im Abgas vorhandenen  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  erfolgen die Eigendotierung des HOK und eine gute Abscheidung der Schwermetalle. Eventuell vorhandene Spuren an organischen Verbindungen werden ebenfalls abgeschieden. Der Bedarf an HOK ist gering. Die Abscheideraten durch einen Flugstromreaktor sind in **Tabelle 2** dargestellt.

	Vor Adsorber	Nach Adsorber	Abscheidegrad
Schwermetall	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	%
Hg	0,0294	0,0011	96
Cd	0,0133	< 0,0002	98
Tl	< 0,0001	< 0,0001	-
Sb	0,0730	<0,0004	99
As	0,0080	< 0,0004	95
Pb	0,1004	0,0017	99
Cr	0,0018	0,0009	50
Co	< 0,0001	< 0,0001	-
Cu	0,0241	0,0034	86
Mn	0,0107	0,0024	78
Ni	0,0015	0,0009	40
V	<0,0030	< 0,0003	-
Sn	0,0410	0,0071	83

**Tabelle 2: Konzentrationen einzelner Schwermetalle in mg/m<sup>3</sup> bezogen auf Normzustand bei 11 Vol.-% O<sub>2</sub> im Abgasstrom vor und nach einem Flugstromreaktor [3]**

Bei höheren Abgastemperaturen hinter dem Kessel als die genannten 180 bis 200 °C ist der Einsatz von „normalem“ HOK unter Sicherheitsgesichtspunkten nicht möglich. Alternativ kann dann ein mineralisches oder entsprechend aufbereitetes kohlenstoffhaltiges Material eingesetzt werden [2].

#### 2.4. Feuerungstechnische Maßnahmen

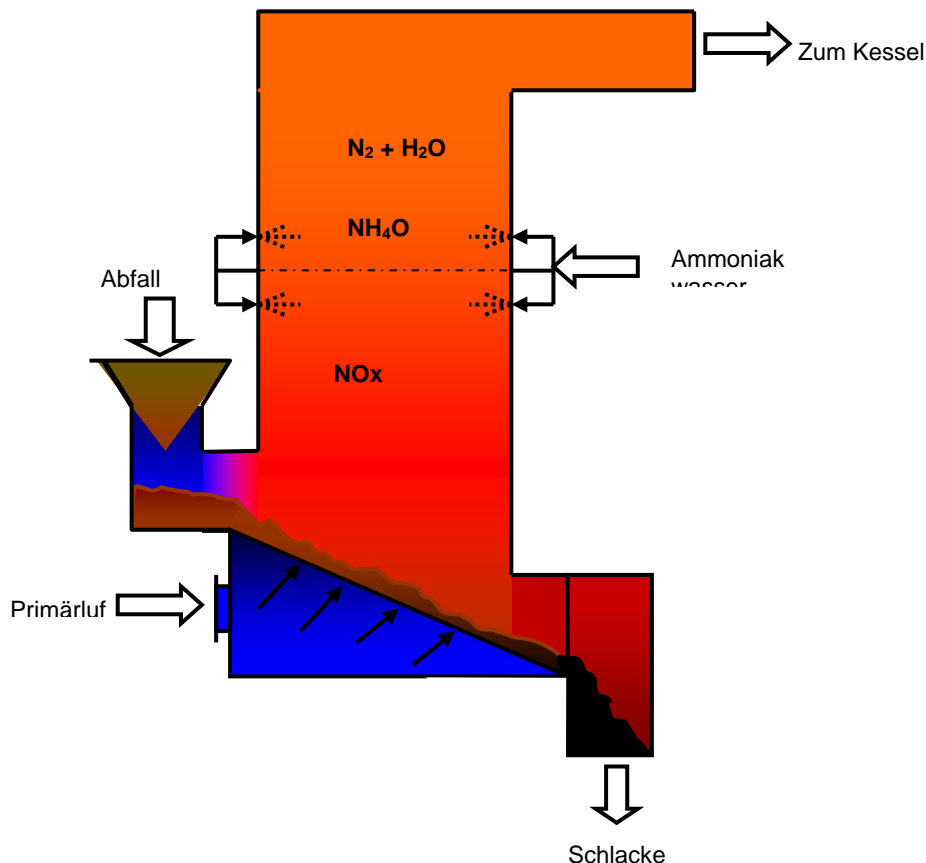
Durch eine entsprechende Feuerführung und feuerungstechnische Maßnahmen werden die geforderten Werte für CO sicher eingehalten.

Niedrige NO<sub>x</sub>-Werte können durch den Einsatz entsprechender Brenner und der dazugehörigen Feuerungsleistungsregelung erreicht werden. Eine weitere Reduzierung im Bereich der Verbrennung wird durch die Zugabe von

Harnstofflösungen, Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) oder Ammoniakwasser ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) in den Feuerraum erreicht.

### SNCR

Im Kessel können zusätzlich zu den feuerungstechnischen Maßnahmen Reagenzien (Harnstofflösungen, Ammoniakwasser) bei entsprechenden Temperaturfenstern eingespritzt werden, um eine zusätzliche Reduktion der  $\text{NO}_x$ -Werte durch die SNCR (selective-non-catalytic-reduction) zu erreichen. Der prinzipielle Aufbau einer SNCR-Anlage ist in **Bild 5** ersichtlich.



**Bild 5: Prinzipieller Aufbau einer SNCR-Anlage [4]**

Allerdings kann sich bei niedrigen  $\text{NO}_x$ -Reingaswerten, z. B. beim Betrieb mit einem Reingaswert von  $70 \text{ mg/m}^3$  (Tagesmittelwert) und einer trockenen Abgasreinigung eine Trübung der Abgasfahne einstellen. Grund hierfür ist die Entstehung von Ammoniumchlorid ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), welches ausserhalb des Kamins bei der Abkühlung des Abgases in der Atmosphäre zeigt.  $\text{NH}_4\text{Cl}$  kondensiert und streut als kleines Partikel das Licht, was dann die Verfärbung der Abgasfahne ergibt.

Bei Betrieb einer nassen Abgasreinigung führen nicht alle Verfahren zu einer gesicherten Abscheidung von  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Als Aerosol kann  $\text{NH}_4\text{Cl}$  mehrere Waschstufen passieren und gegebenenfalls beim Einsatz von nasslaufenden Saugzügen aus Edelstahl zu Problemen durch Korrosion führen. Eine Trübung der Abgasfahne tritt hier normalerweise nicht auf, da die Dampffahne die Sichtbarkeit der Verfärbung verhindert.

## 2.5. Abgasfeinreinigung

Eine zusätzliche Feinreinigung der Abgase über die Vorgaben der 17. BImSchV. hinaus erfolgt, soweit erforderlich, in der nachgeschalteten Abgasfeinreinigung.

### Festbettabsorber

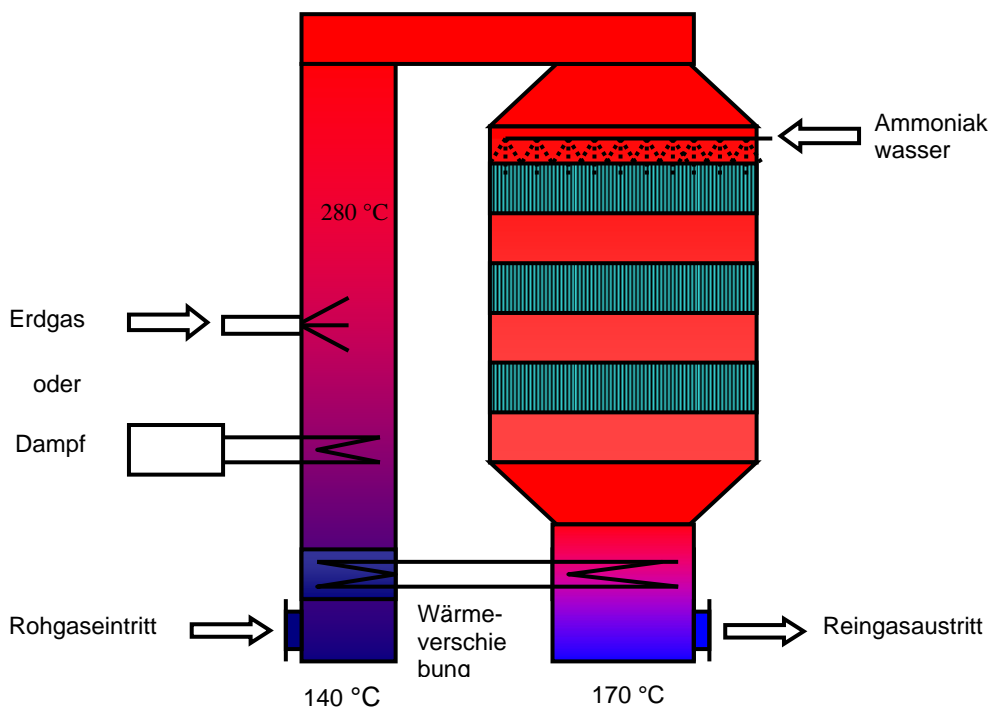
Hierfür kommen vor allem Festbetten aus Aktivkohle/Aktivkoks (HOK) oder anderen Adsorbentien oder die Eindüsung dieser Materialien vor einem zusätzlichen, als Polzeifilter fungierenden filternden Abscheider zum Einsatz.

Mit Hilfe der Abgasfeinreinigung werden Restkonzentrationen von  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$ , HCl, Schwermetallen (vor allem Quecksilber), Dioxine und Furane z. T. unter die Nachweisgrenzen erreicht.

### SCR-Anlage

Wenn die  $\text{NO}_x$ -Werte nicht den gesetzlichen Vorgaben entsprechen und eine SNCR-Anlage nicht eingesetzt werden kann, können SCR-Anlagen (selectivcatalyticreactor) eingesetzt werden. Mit Hilfe entsprechender Katalysatoren und unter Zuhilfenahme von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) wird  $\text{NO}_x$  zu  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{N}_2$  umgewandelt.

Die Abgastemperatur muss je nach eingesetztem Katalysatortyp,  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$ -Gehalt, Abgasfeuchte und gefordertem  $\text{NO}_x$ -Reingaswert auf 180 bis 280°C angehoben werden. Ein typischer Anlagenaufbau ist in **Bild 6** dargestellt.



**Bild 6:** SCR-Anlage [4]

Die Katalysatoren bestehen aus dem Trägermaterial TiO, das mit Vanadiumpentoxid ( $V_2O_5$ ) dotiert ist. Je höher die Konzentration des als Katalysator eingesetzten  $V_2O_5$  ist, desto besser und schneller läuft die Reaktion ab. Die Reaktivität des Katalysators bewirkt jedoch gleichzeitig eine Oxidation von  $SO_2$  zu  $SO_3$ . Das entstehende  $SO_3$  reagiert mit dem Reduktionsmittel  $NH_3$  zu Ammoniumsulfat/ Ammoniumhydrogensulfat.

Um möglichst kompakt bauen und die Reaktion bei niedrigen Temperaturen ablaufen lassen zu können, ist die Konzentration von  $SO_2/SO_3$  möglichst in Richtung der Nachweisgrenze zu reduzieren. In Abhängigkeit von Abgastemperatur und Abgasfeuchte stellt sich ein Gleichgewicht ein. Ammoniumhydrogensulfat ist ein klebriger Stoff, der sich u. a. im Katalysator anlagert und den Druckverlust über den SCR-Reaktor ansteigen lässt, bis ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlage nicht mehr möglich ist. Der SCR-Reaktor muss daher entweder nach der Außerbetriebnahme regelmäßig gewaschen oder durch Anhebung der Temperatur vom Ammoniumhydrogen-sulfat befreit werden (Freiheizen).

Neben der Reduktion von  $NO_x$  zu  $H_2O$  und  $N_2$  werden die im Abgas vorhandene Dioxine und Furane bei entsprechender Fahrweise durch Oxidation bis unter die Nachweisgrenze zerstört.

### **3. Aufbau neu zu erstellender Anlagen**

Heute werden viele Verbrennungsanlagen mit einer preiswerten Ausführung der Abgasreinigung, wie nachfolgend beschrieben, aufgebaut.

#### **3.1. Randbedingungen**

Allen quasitrocknen Verfahren gemeinsam ist, dass die Abgastemperatur mit Hilfe einer Flüssigkeit (Wasser), welche vollständig verdampft soweit abgesenkt und das Abgas konditioniert wird, dass die gewünschte Reaktion abläuft und als Restprodukt ein trockenes Produkt anfällt. Dieses Produkt wird mittels elektrosta-tischer Gasreinigung (Elektrofilter), filternden Abscheidern (Schlauchfilter) oder Massenkraftabscheider (Zyklone, Multizyklone) bzw. Kombinationen aus den beschriebenen Abscheidern aus dem Abgasstrom entfernt.

Die Temperaturabsenkung kann sowohl durch Eindüsen der reinen Flüssigkeit (Wasser) oder einer Mischung aus Flüssigkeit und dem Einsatzstoff ( $Ca(OH)_2$ ) als Kalkmilch als auch durch Einbringen von angefeuchtetem Rezirkulat erfolgen.

Bei den trockenen Verfahren wird die Abgastemperatur in Abhängigkeit vom Sorbenz gewählt. Die optimale Reaktionstemperatur von Ca-haltigen Sorbenzien liegt bei ca.  $140\text{ }^\circ\text{C}$ , die Temperatur für  $NaHCO_3$  kann für einen optimalen Reaktionsverlauf  $>180\text{ }^\circ\text{C}$  betragen. Bei Temperaturen unter  $180\text{ }^\circ\text{C}$  ist eine Mahlaktivierung vorzusehen.

### 3.2. Variante 1

Variante 1 ist ausgelegt für die Abscheidung von Abgasen gemäß **Tabelle 1** ohne extreme Spitzen von HCl und/oder SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub>. Die angedachte Anlage ist in **Bild 7** dargestellt und besteht aus:

- dem Sprühabsorber mit Kalkmilchzugabe (H<sub>2</sub>O + Ca(OH)<sub>2</sub>) zur Temperaturabsenkung und Sauergasabscheidung zur optimalen Prozesssteuerung,
- der trockenen Zugabe von kohlenstoffhaltigen Adsorbentien zur Hg- und PCDD/F-Abscheidung vor Sprühabsorber und
- dem Gewebefilter zur Staub- und Restproduktabscheidung mit und ohne Rezirkulation.

Optional möglich ist

- zur Abgasnachreinigung durch zusätzliche Eindüsung von trockenem Ca(OH)<sub>2</sub> oder NaHCO<sub>3</sub> vor Filter in den Abgaskanal oder in einen Transportreaktor.

Das entstehende Restprodukt wird im filternden Abscheider als Mischung aus Flugasche, Reaktionsprodukt (Salze) und kohlenstoffhaltigem Adsorbent abgetrennt.

Der Vorteil dieser Variante besteht u. a. darin, dass das basische Potential der Flugasche bei der Sauergasabscheidung mitgenutzt und so die Menge und die Kosten für das Reagenz Ca(OH)<sub>2</sub> reduziert werden können.

Die optionale Zugabe von trockenem Ca(OH)<sub>2</sub> vorzugsweise trocken gelöscht Material mit einer hohen spezifischen Oberfläche oder mahlaktiviertem NaHCO<sub>3</sub> kann fallweise bei Schadgasspitzen oder kontinuierlich erfolgen.

Das Restprodukt wird in einem Reststoffsilo zwischengelagert und per Silo-LKW abtransportiert.

Nachteilig kann sich bei stark schwankenden Rohgasgehalten die große Menge an einzudüsendem Reagenz bemerkbar machen, welches zum sicheren Unterschreiten der geforderten Reingaswerte einzusetzen ist. Zusätzlich wird ein Teil des Ca(OH)<sub>2</sub> durch CO<sub>2</sub> zu CaCO<sub>3</sub> umgewandelt und nimmt an der Sauergasabscheidung nicht mehr teil.

Mit Ca-haltigen Sorbentien betriebene Anlagen arbeiten mit einer Stöchiometrie von 1,6 bis 2,2.

Da die Kosten für das Reagens und die Entsorgung der Restprodukte derzeit günstig sind, wird diese Form der Anlage für neu zu konzipierende Anlagen am häufigsten eingesetzt.

Bei der Verwendung von reinen kohlenstoffhaltigen Adsorbentien (z. B. HOK) vor einem Schlauchfilter lassen sich die in **Tabelle 2** dargestellten Abscheidegrade für Schwermetalle erreichen.

### 3.3. Variante 2

Variante 2 ist ebenfalls für die Abscheidung von Abgasen gemäß **Tabelle 1** ohne extreme Spitzen von HCl und/oder SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub> ausgelegt. Die angedachte Anlage besteht aus:

- der Wassereindüsung zur Beherrschung eventueller Temperaturspitzen hinter dem Kessel (Sicherheitsverriegelung)
- Reaktor mit trockener Zugabe von Natriumbikarbonat (NaHCO<sub>3</sub>) zur Sauer gasabscheidung
- der trockenen Zugabe von kohlenstoffhaltigen Adsorbentien zur Hg- und PCDD/F-Abscheidung im Reaktor bei Temperaturen > 180°C [5] und
- dem Gewebefilter zur Staub- und Restproduktabscheidung ohne Rezirkulation.

Zusätzlich kann hinter der Abgasreinigung ein Wärmetauscher nachgeschaltet werden, mit dessen Hilfe die Temperatur des Abgases bis auf ca. 10 K oberhalb des Wassertaupunktes abgesenkt werden kann. Diese rückgewonnene Wärme kann zur Speisewasservorwärmung oder zur Auskopplung von Fern- oder Prozesswärme genutzt werden und verbessert die energetische Situation der Verbrennungsanlage (**Bild 8**).

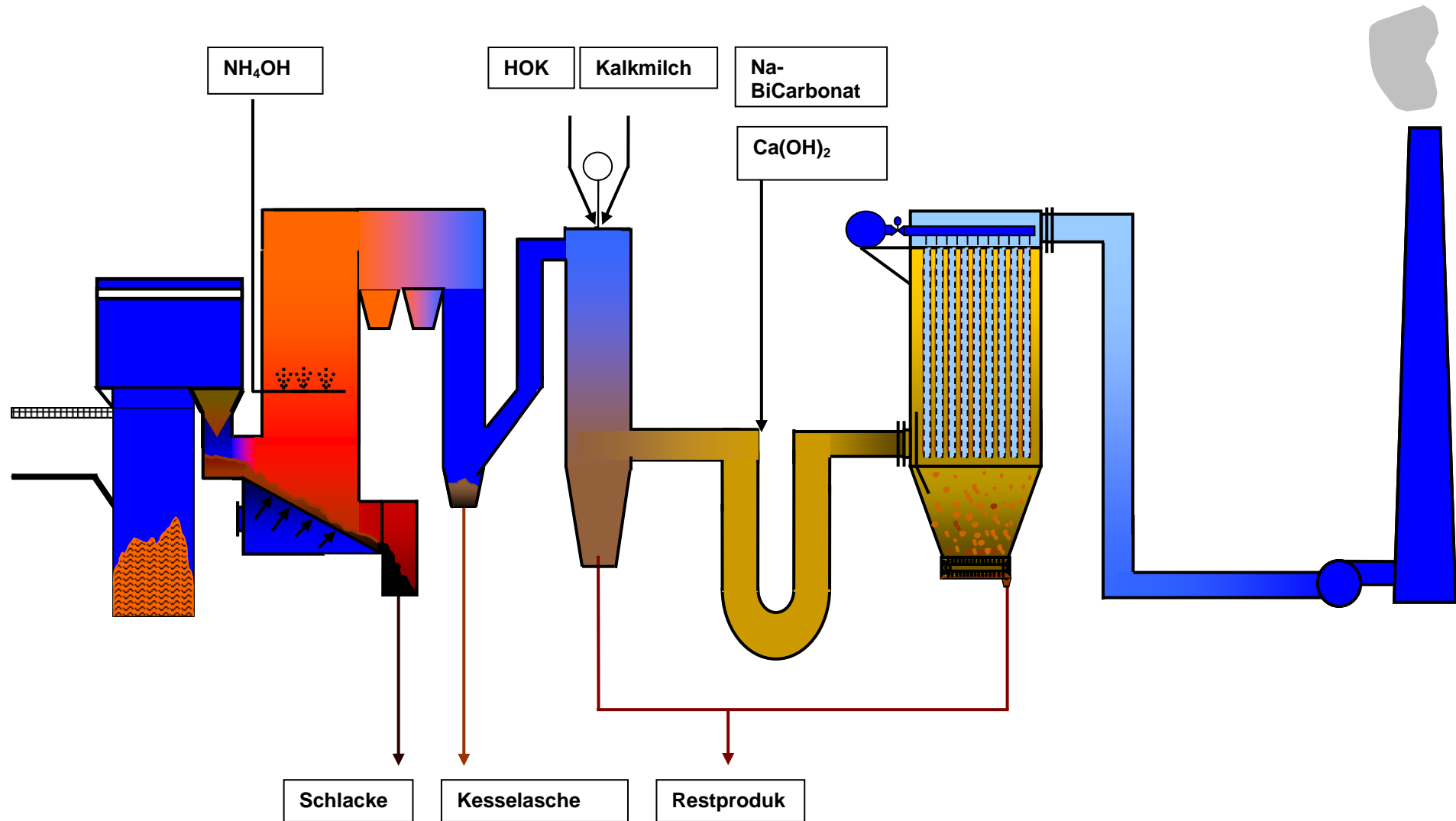


Bild 7: Kostengünstige Abgasreinigungsanlage mit verbessertem Wirkungsgrad [4]

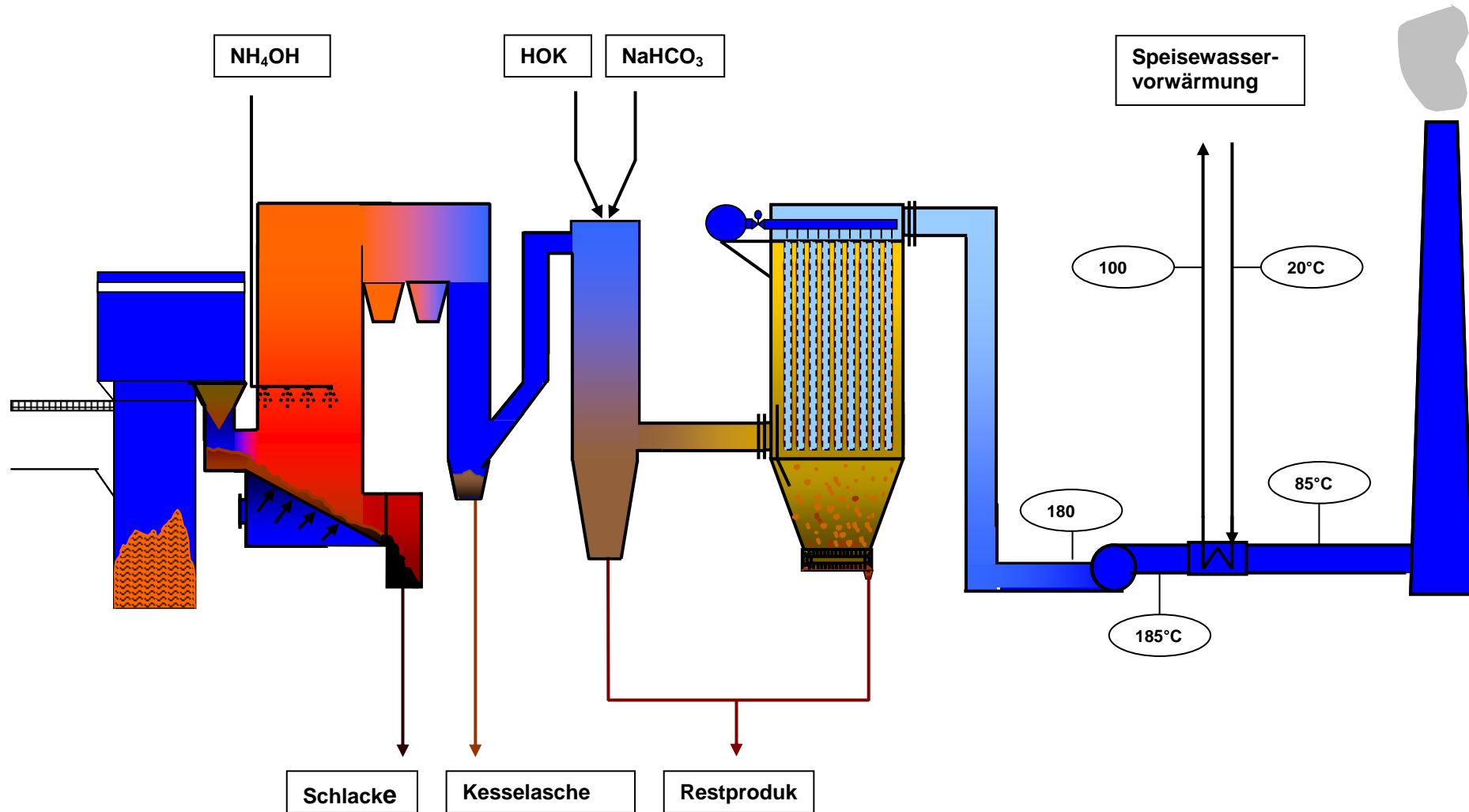


Bild 8: energetisch optimierte Abgasreinigungsanlage [4, angepasst]



#### 4. Investitionen und Betriebskosten

Im Rahmen der dieses Vortrages wird nur auf das trockene und quasitrockene Verfahren eingegangen. Eine Gegenüberstellung zwischen einem quasitrockenen und nassen Verfahren ist in [3] dargestellt.

Folgender Anlagenaufbau wurde für die Berechnung zugrunde gelegt:

- Quasitrockne Abgasreinigung für Ca-haltigem Sorbenz mit Sprühabsorber, Transportreaktor, filternden Abscheider, Kalkmilchaufbereitung und Saugzug.
- Quasitrockene Abgasreinigung für Na-haltigem Sorbenz mit Reaktor, filternder Abscheider, Mahlaktivierung, Saugzug und Wärmetauscher

Bei der Betrachtung wurde beide Anlagen die gleiche Abgaskonzentration (Mittelwerte) gemäß **Tabelle 1** angenommen. Diese Festlegung wurde getroffen, um vergleichbare Bedingungen für die Berechnung der spezifischen Kosten mittels Mengen an Einsatzstoffen und für die Entsorgung der entstehenden Restprodukte zu erhalten.

Die entstehenden Restprodukte werden in beiden Fällen trocken mit Silo-LKW einer Anlage zur untertägigen Verfüllung zugeführt.

Die Entstickung soll in beiden Fällen durch SNCR erfolgen und geht nicht in die Betrachtung mit ein. Ebenso wurde der Effekt der Speisewasservorwärmung oder Auskopplung von Fernwärme beim Verfahren mit Na-haltigem Sorbenz monetär nicht berücksichtigt.

Für die Ermittlung der spezifischen Kosten wurde mit den in **Tabelle 3** aufgeführten Werten gerechnet.

Für eine Anlage mit einen Durchsatz von ca. 205.000 Mg/a Restabfall und einer dazugehörigen Abgasmenge von 150.000 m<sup>3</sup>/h (N, f) ergeben sich folgende Investitionen:

- |                            |     |      |           |
|----------------------------|-----|------|-----------|
| • Trockenes Verfahren      | ca  | 6,5  | Mio. Euro |
| • Quasitrockenes Verfahren | ca. | 7,5  | Mio. Euro |
| • Nasswäsche               | ca. | 18,5 | Mio. Euro |

	Spez. Investition	Stöchiometrischer Faktor *)	Reagens	Beschaffungs-/Entsorgungskosten
	€/m <sup>3</sup> (N, f)	-		€/t oder €/m <sup>3</sup>
<b>1. Na-basiertes Verfahren</b>				
		1,2	NaHCO <sub>3</sub>	200,00
			HOK	150,00
			Strom	42,00
			Restprodukt	150,00
<b>2. Ca-basiertes Verfahren</b>	40 - 70	2,0	CaO	70,00
			HOK	150,00
			Strom	42,00
			Restprodukt	150,00

<sup>\*)</sup> bezogen auf Werte 17. BImSchV.

**Tabelle 3:** Zusammenstellung spezifischer Kosten

Aus den Gegebenheiten der Anlagen und einer jährlichen Betriebszeit von 7.500 Volllaststunden resultieren die in **Tabelle 4** zusammengestellten Mengen an Reststoffen und Verbräuchen. Die Kapitalkosten wurden unter der Annahme eine Abschreibungszeit von 15 Jahren und einem Zinssatz von 4% und einem daraus resultierenden Annuitätenfaktor von 9,0 ermittelt.

Der Betrieb der trockenen und quasitrocknen Anlage erfordert kontinuierlich 1,0 Mitarbeiter je Schicht bei einem 3-Schicht-6-Brigade-System und einem kontinuierlichen Betrieb für die Betreuung inklusive Anlieferung der Reagenzien und Entsorgung der Restprodukte.

Die Kosten für die benötigte elektrische Energie wurden

42 €/MWh und

die Personalkosten wurden mit

50.000 €/(a x Mitarbeiter)

angesetzt.

	Einheit	Na-basiertes Verfahren	Ca-basiertes Verfahren
Investition	€	6.500.000,-	7.500.000,-
Zinssatz,	%	4,0	4,0
Abschreibungszeit	a	15,0	15,0
Annuitätenfaktor		9,0	9,0
Annuität	€/a	585.000,-	675.000,-
Betriebskosten:			
- REAGENZIEN NaHCO <sub>3</sub> , HOK 1 CaO, HOK 2 + Wasser + Druckluft	€/a	970.000,-	190.000,-
- STROM	€/a	140.000,-	145.000,-
Entsorgungskosten	€/a	1.100.000,-	1.100.000,-
Personalkosten	€/a	300.000,-	300.000,-
Kosten für Wartung und Reparatur (3 % der Investition)	€/a	195.000,-	225.000,-
<b>Jahreskosten</b>	<b>€/a</b>	<b>3.290.000,-</b>	<b>2.635.000,-</b>
<b>Spez. Kosten</b>	<b>€/t</b>	<b>16,05</b>	<b>12,85</b>

**Tabelle 4:** Kostenvergleich

## 5. Platzbedarf

Ausgehend von der in Kapitel 4 genannten Abgasmenge ist folgende Fläche für die Abgasreinigung nebst den erforderlichen Nebenanlagen vorzusehen:

**benötigte Fläche ca. 450 m<sup>2</sup>, bzw. ca. 15 x 30 m<sup>2</sup>**

Die aufgeführten Flächen sind für die beiden quasitrockenen Abgasreinigungsanlagen nahezu gleich, setzen eine Aufstellung auf der grünen Wiese voraus und berücksichtigen keine in der realen Anlagengestaltung normalerweise vorhandenen räumlichen Einschränkungen oder Vorgaben.

Alle Komponenten sind in einer Achsrichtung aufgestellt.

## 6. Zusammenfassung

Bei den derzeitigen Rahmenbedingungen in Deutschland hat sich der Trend von komplexen Anlagen, wie er Ende des 20. Jahrhunderts gegeben war, umgekehrt.

Die mit nassen Verfahren erzeugten Produkte Gips und Kochsalz bzw. Salzsäure lassen sich nicht kostendeckend auf dem Markt unterbringen. Diese Anlagen können nicht gegen die preiswerten Abgasreinigungsanlagen, bestehend aus einem Reaktor oder Sprühabsorber mit nachgeschalteten filternden Abscheider konkurrieren.

Für jede neu zu erstellende Abgasreinigungsanlage ist unter den gegebenen Prämissen zu überprüfen, welche Abgasreinigungs-anlage den spezifischen Erfordernissen entspricht.

Ein großer Kostenblock bei den Jahreskosten besteht in der Annuität und ist damit direkt von der Höhe der Investition abhängig. Diese Zahl reagiert direkt auf den gewählten Zinssatz und die Abschreibungszeit.

Dieser Anteil ist für die thermischen Verwertungsanlagen in den vergangenen Jahren stetig zurückgegangen. Hierfür sind zum einen die geringeren Investitionen verantwortlich. Damit einher gingen aber auch geringere Zinssätze und eine Verlängerung des Abschreibungszeitraumes.

Sollte sich in der Zukunft für das Sorbenz Natriumbicarbonat ein Kreislauf ergeben, welcher die Gestehungs- und/oder Entsorgungskosten günstiger gestaltet, so kann dieses Verfahren für neu zu erstellende Anlagen weitere Pluspunkte sammeln.

Es sind Modelle denkbar, bei denen bei geänderten Entsorgungskosten für die anfallenden Restprodukte das aufwändigere Nassverfahren zu günstigeren Kosten führt als bei den betrachteten quasitrocknen Verfahren.

## Literaturverzeichnis

- [1] Udo Seiler  
„Aktueller Stand bei der Abgasreinigungsanlagen hinter Verbrennungsanlagen“  
Stand der Technik Rauchgasreinigungsanlagen und thermischen Prozessen,  
6. Unabhängiges Symposium, Stuttgart 16. – 17. März 2004
- [2] Dr. Bernd Morun, Dipl.-Ing. P. U. Schmidt, DrySoTec GmbH, Essen,  
Deutschland  
„Zukunftsweisende Trockensorption zur Rauchgasreinigung am Beispiel von  
Zwei Reststoffverbrennungsanlagen“  
BAT-, energie-, preisorientierte Verfahrens-/ Dioxin-/ Rauchgas-  
reinigungstechniken 2005 für Verbrennungs- und Feuerungsanlagen  
VDI-Wissensforum, 15. – 16. September 2005, München
- [3] Gottschalk, J.  
„Flugstromverfahren – ein Verfahren der Kohlenstoffadsorptionstechnik zur  
Minimierung der Restemissionen – Teil 2“  
Abfallwirtschaftsjournal 5 (1993), Nr. 1, Seite 78
- [4] Dipl.-Ing. Udo Seiler, Fichtner GmbH & Co.KG, Stuttgart, Deutschland  
“Die quasitrockene Abgasreinigung: Eine zeitgemäße und preiswerte Lösung  
der Emissionsminderung für Abfallverbrennungsanlagen“  
BAT-, energie-, preisorientierte Verfahrens-/ Dioxin-/ Rauchgas-  
reinigungstechniken 2005 für Verbrennungs- und Feuerungsanlagen  
VDI-Wissensforum, 15. – 16. September 2005, München
- [5] Dr.-Ing. W. Esser-Schmittmann CSC GmbH & Co.KG, Vettweiß,  
Dr. R. Semmler, Horst Weyer und Partner GmbH, Düren, Deutschland  
„Leitfaden zum sicheren Umgang mit Adsorbentien in der Abgasreinigung,  
- technische und rechtliche Aspekte -“  
BAT-, energie-, preisorientierte Verfahrens-/ Dioxin-/ Rauchgas-  
reinigungstechniken 2005 für Verbrennungs- und Feuerungsanlagen  
VDI-Wissensforum, 15. – 16. September 2005, München