

# **Kumulierter Energieaufwand zur Herstellung verschiedener Abgasreinigungsanlagen**

**Dipl.-Ing. Rudi Karpf  
ete.a Ingenieurgesellschaft mbH, Lich**

# Inhaltsverzeichnis

- 1 Einleitung
- 2 Verfahrensüberblick im Kontext zu den Emissionsanforderungen
- 3 Energieverbrauch /-aufwand in der Abgasreinigung im Allgemeinen
- 4 Kumulierter Energieaufwand zur Errichtung von Abgasreinigungssystemen
- 5 Emissionsbezogener Energieaufwand im Vergleich
- 6 Ausblick
- 7 Literatur

# 1 Einleitung

Im Zusammenhang der jüngsten Klimadiskussionen gewinnt Abfall als Brennstoff eine immer größere Bedeutung. Das führte dazu, dass insbesondere an Industriestandorten, die Abfall als Brennstoff einsetzen, die Energieversorgung noch vor bzw. gleichwertig gegenüber der Abfallentsorgung gestellt wird. Dadurch konnten immer häufiger fossile Primärenergieträger wie Erdgas, Heizöl oder Kohle durch den „Ersatzbrennstoff(EBS)“ Abfall bzw. Abfallfraktionen substituiert werden.

Im Vergleich zu fossil befeuerten Heiz- und/oder Kraftwerken sind die Emissionsanforderungen an Abfallverbrennungsanlagen, die in der 17. BImSchV festgeschrieben sind, um ein vielfaches höher. Dem zufolge bestehen die Abgasreinigungseinrichtungen häufig aus mehreren Stufen und sind zum Teil sehr komplex ausgeführt. Der Energieaufwand der zum einen zur Errichtung, dem Betrieb und letztendlich Entsorgung der Anlagen nach einer gewissen Betriebsdauer (ca. 20-30 Jahren) aufgebracht werden muss, bedeutet wiederum die Freisetzung von Emissionen. Sei es durch die Herstellung von Halbzeugen wie Stahl, Aluminium, Kunststoffe, u.a. oder die Produktion von Betriebsstoffen wie Kalk, Natronlauge, Ammoniak, u.a. als auch elektrische Energie. Für die Entsorgung der Anlagen ist durch die hohen Recyclingraten und somit Rückführung in den Wirtschaftskreislauf mit einer Gutschrift für den Energieaufwand zu rechnen.

Im Rahmen einer ganzheitlichen Untersuchung von Abgasreinigungsanlagen hinter Abfallverbrennungsanlagen werden die Energieaufwendungen mit Hilfe von Kennzahlen wie z. B. dem kumulierten Energieaufwand (KEA) in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4600 ermittelt und gegenübergestellt. Als Grundlage hierfür dienen Energie- und Stoffbilanzen der jeweiligen Prozesse.

In der Vergangenheit wurden, wie in [1] beschrieben, zwar komplette Abfallverbrennungsanlagen umfassend bewertet, jedoch keine separaten Betrachtungen zu Abgasreinigungssystemen angestellt. Im Rahmen der gegenwärtigen Klimadiskussionen und einer möglichen CO<sub>2</sub>-armen Energieerzeugung wurden einige Lebenszyklusanalysen (LCA) für die so genannten „Carbon Capture and Storage (CCS)“ Technologien erstellt. In einer aktuellen Veröffentlichung [2] wurde der bauliche Aufwand sowie deren ökologische Bedeutung einer Aminwäsche hinter kohlebefeuchten Kraftwerken bewertet.

Der vorliegende Beitrag befasst sich primär mit dem kumulierten Energieaufwand zur Herstellung (KEA<sub>H</sub>) von Abgasreinigungsanlagen sowie die sich hieraus ergebenden Emissionen im Vergleich.

## 2 Verfahrensüberblick im Kontext zu den Emissionsanforderungen

Die Abscheidung gasförmiger Stoffe erfolgt durch Adsorption an einem Feststoff oder durch Absorption in einer Flüssigkeit. Im Regelfall werden chemische oder physikalische Sorptionsmittel mit dem Abgas in Kontakt gebracht. Je nach Verfahrensführung fallen dann die Umsetzungsprodukte in Form von gelösten oder trockenen Salzen an.

Für die Abgasreinigung hinter Abfall- und EBS-Verbrennungsanlagen können nasse und halbtrockene/trockene Verfahren verwendet werden. Die trockenen und halbtrockenen Verfahren bestehen meist aus Reaktionsraum/-strecke inkl. Additivzugabe, ggf. einer Konditionierungsstufe (bei den halbtrockenen Verfahren) sowie einem Staubabscheider (E-Filter, Gewebefilter). Nasse Abgasreinigungsverfahren zur Minderung von HCl-, HF- und SO<sub>x</sub>-Emissionen arbeiten absorptiv mit Wäschern verschiedenster Bauarten, z. B. als Sprühwäscher, Venturiwäscher oder Füllkörperwäscher.

Jedes der Verfahren hat seine Vor- und Nachteile und somit auch seine Berechtigung, je nach Standort und den spezifischen Rahmenbedingungen.

Die grundsätzlichen Merkmale von nassen und trockenen Verfahren sind in Tabelle 1 gegenübergestellt. Anhand dieser Merkmale kann bereits eine Vorauswahl des am geeignetsten einzusetzenden Verfahrens getroffen werden.

**Tabelle 1:** Merkmale von nassen und trockenen Abgasreinigungsverfahren [3]

<b><i>nasse Verfahren</i></b>	<b><i>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

Welcher Luftschadstoff mit welcher Reinigungsstufe bzw. Verfahren abgeschieden werden kann ist anhand einer Verfahrensmatrix in Tabelle 2 dargestellt.

Hieraus wird ersichtlich, dass es eine Vielzahl von Reinigungsstufen für die Abscheidung des ein und selben Schadstoffes gibt. Es gibt simultane Verfahren wie z.B. die Trockensorptionsverfahren mit Kalkhydrat ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) bzw.

Natriumhydrogencarbonat ( $\text{NaHCO}_3$ ) die neben der Abscheidung der sauren Schadgasbestandteile HCl, HF und  $\text{SO}_2$  unter Verwendung von Aktiv-Koks/Kohle auch gleichzeitig Schwermetalle und Dioxine/Furane an einem Sorptionsfilter (Gewebefilter) abgeschieden werden.

**Tabelle 2:** Verfahrensmatrix zur Abscheidung verschiedener Luftschadstoffe

Komponente	E-Filter <sup>1)</sup>	Gewebefilter <sup>1)</sup>	Sorptionsfilter	Fest-/Wanderbett-Filter	Wäscher	SNCR	SCR
Staub	x	x	x		(x)		
HCl			x	(x)	x		
HF			x	(x)	x		
$\text{SO}_2$			x	x	x		
$\text{NO}_x$				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
$\text{NH}_3$				x	x		x

( ) bedingt geeignet bzw.

{x} staubgebundene Schwermetalle

<sup>1)</sup> reine Staubabscheider

Wie bereits in Tabelle 1 gezeigt, besteht bei den trockenen Verfahren keine selektive Abscheidung und somit keine Möglichkeit der Wertstoffgewinnung aus den Reaktionsprodukten, wie dies beim Einsatz eines nassen Verfahrens grundsätzlich möglich ist. Der Nachteil von nassen Verfahren ist jedoch, dass eben durch die hohen selektiven Abscheideleistungen eine effiziente Reinigung sichergestellt werden kann, aber für die Vielzahl der Schadstoffbestandteile mehrere Verfahrensstufen notwendig werden. Dies spiegelt sich zum einen in einem höheren investiven als auch betrieblichen (z.B. hoher Druckverlust) Aufwand wieder. Die o.g. Wertstoffgewinnung aus den anfallenden Reststoffen bzw. Reaktionsprodukten, wie man es z.B. aus der

Rauchgasentschwefelung bei fossil befeuerten Kraftwerken kennt, hat sich in den Abfallverbrennung nicht durchgesetzt. In den 90iger Jahren wurden einige Abfallverbrennungsanlagen mit entsprechenden nachgeschalteten Aufbereitungsanlagen, sei es zur Gewinnung von Salzsäure (HCl), Natriumchlorid (NaCl) oder Gips (CaSO<sub>4</sub>), gebaut. Die Rückführung dieser Reinigungsprodukte in den Wertstoffkreislauf stellt jedoch die Ausnahme dar. Die Betreiber, die z.T. sehr energieintensiv diese Wertstoffe herstellen, entsorgen am Ende auf dem gleichen Weg wie die Betreiber, die einen wesentlich energiearmen Prozess mit z.B. einem simultanen Verfahren betreiben.

Welches Verfahren letztendlich zum Einsatz kommt, hängt wie beschrieben, von vielen Faktoren ab. Ein wesentlicher Aspekt stellen jedoch die geforderten Emissionsgrenzwerte, die mit dem Verfahren sicher eingehalten werden sollen, dar. Gespiegelt an den Leistungsfähigkeiten der einzelnen Verfahrensstufen, kann folgende Einteilung vorgenommen werden. Die genannten Verfahrensvarianten stehen beispielhaft für sicherlich noch viele andere Abgasreinigungskonzepte und erheben keinen Anspruch auf Ausschließlichkeit.

NO <sub>x</sub> -Reingaskonzentration [mg/Nm <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> ≤ 100	Sprühtrockner, Gewebefilter, 2-stufige Wäsche, SNCR	kond.Trockensorption, SNCR
		kond. Trockensorption (Ca(OH) <sub>2</sub> ), SNCR, Wäscher	
	NO <sub>x</sub> ≤ 70	Trockensorption (NaHCO <sub>3</sub> ), SCR, Trockensorption (Ca(OH) <sub>2</sub> )	kond.Trockensorption, SCR
		Sprühtrockner, Gewebefilter, 2-stufige Wäsche, SCR	
		½ 17. BImSchV	17. BImSchV
		Emissionswerte	

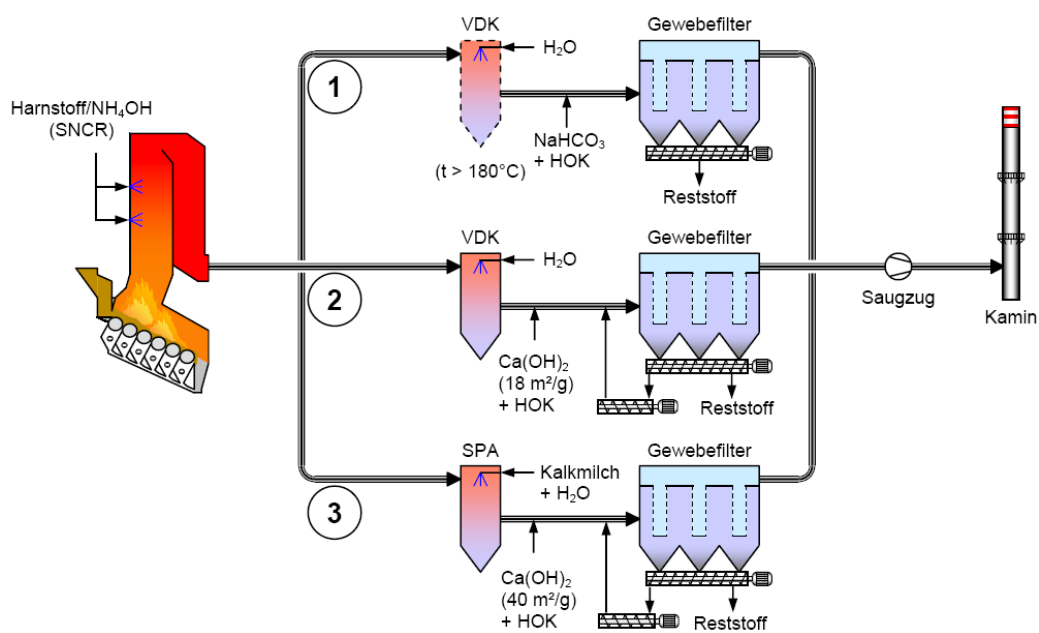
**Abb.1** Verfahrensmatrix für unterschiedliche Emissionswerte

Im Folgenden werden die Grundlagen und Merkmale der einzelnen Verfahrensstufen und Minderungsmöglichkeiten beschrieben.

## 2.1 halbtrockene / trockene Verfahren

Im Unterschied zur Abgaswäsche und Sprühsorption finden bei den Trockensorptionsverfahren die chemischen Reaktionen nicht als Gas-/Flüssig-Reaktionen, sondern als Gas-/Feststoff-Reaktion statt. In letzterem Fall ist die Reaktionsgeschwindigkeit erheblich geringer, als Gas-/Flüssig-Reaktionen, in der sich

Ionen bilden können. Als Reagenz kann Kalkhydrat ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) oder Natriumhydrogencarbonat ( $\text{NaHCO}_3$ ) eingesetzt werden. Der Begriff der halbtrockenen Verfahren wird sehr häufig mit dem sog. Sprühabsorptionsverfahren, in dem Kalkmilch zur Schadgasabscheidung in den Abgasstrom verdüst wird, gleichgesetzt. Da neben dem Sprühabsorptionsverfahren weitere halbtrockene Verfahren mit gleichen Abscheidemechanismen existieren, wird im Weiteren von *konditionierten Trockensorptionsverfahren* gesprochen. Konditionierte Trockensorption deshalb, weil zur Verbesserung der Abscheidbedingungen mit Kalkhydrat die Eindüsung von Wasser zur Abgaskühlung und Abgasbefeuchtung in Form von reinem Wasser oder als Kalkmilch verwendet wird.



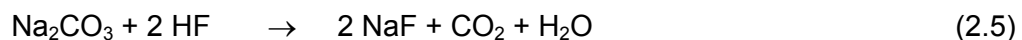
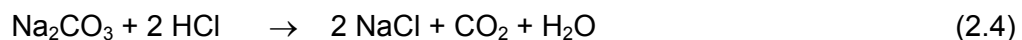
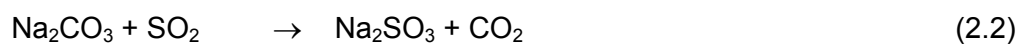
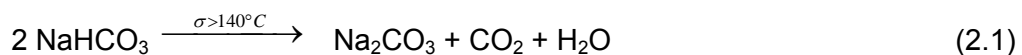
**Abb.2** vereinfachte Verfahrensschemata trockener / konditionierter Trockensorptionsverfahren zur Einhaltung der 17. BImSchV ( $\text{NO}_x = 200 \text{ mg/m}^3$ ) und Rohgaskonzentrationen  $\text{HCl} \leq 2500 \text{ mg/m}^3$  und  $\text{SO}_2 \leq 2000 \text{ mg/m}^3$  (VDK=Verdampfungskühler; SPA=Sprühabsorber; HOK=Aktiv-Herdofenkoks) [3]

Die Trockensorptions- bzw. konditionierten Trockensorptionsverfahren sind dadurch charakterisiert, dass die Staub- und Schadstoffabscheidung simultan an einem Gewebefilter erfolgt. Hierbei wird bei dem Sprühabsorptionsverfahren das Reagenz als Suspension (Kalkmilch) bzw. bei den trockenen od. konditioniert trockenen Verfahren als pulverförmiges Reagenz (Natriumhydrogencarbonat oder Kalkhydrat) in den Abgasstrom geblasen und die Reaktionsprodukte anschließend trocken an einem Gewebefilter abgeschieden. Durch chemische Reaktionen zwischen dem Reagenz und den gasförmigen Schadstoffen Chlorwasserstoff (HCl), Fluorwasserstoff (HF) und Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) werden diese gebunden und in die entsprechenden

Reaktionsprodukte überführt. Aus diesem Grund spricht man auch von Sorptionsverfahren oder *Chemisorption*.

Ein von der Abgasfeuchte unabhängiges trockenes Abgasreinigungsverfahren ist der Einsatz von Natriumhydrogencarbonat oder Natriumbicarbonat ( $\text{NaHCO}_3$ ) als Additiv. Natriumbicarbonat ( $\text{NaHCO}_3$ ) zersetzt sich bei etwa  $>140^\circ\text{C}$  im Abgas zu Natriumcarbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Dabei hinterlassen die gasförmigen Zersetzungsprodukte des Bicarbonats, die  $\text{CO}_2$ - und  $\text{H}_2\text{O}$ -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 für die Abscheidung erforderlichen Additivmengen müssen nicht weit überstöchiometrisch dosiert werden, sodass oftmals eine 0,1 – 0,4fache stöchiometrische Zugabe genügt. Natriumhydrogencarbonat hat bezogen auf die Äquivalenz bei chemischen Reaktionen lediglich eine stöchiometrische Wertigkeit von 1 im Vergleich zu Kalkhydrat, das eine stöchiometrische Wertigkeit von 2 besitzt. D.h., für die Abscheidung von 1 Mol des zweiwertigen  $\text{SO}_2$  sind 2 Mol  $\text{NaHCO}_3$  jedoch nur 1 Mol  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  erforderlich. Bei dem Natriumhydrogencarbonat wird daher der Vorteil der günstigeren Stöchiometrie durch den Nachteil bei der stöchiometrischen Wertigkeit ausgeglichen, sodass hier insgesamt keine Abnahme des Reagenzbedarfs vorliegt.



Durch die thermische Zersetzung des Natriumhydrogencarbonats entsteht das eigentliche Reagenz  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (siehe Reaktionsgleichung 2.1). Die gasförmigen Zersetzungsprodukte  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  werden hierbei an den Abgasstrom abgegeben, so dass die Reagenzmasse insgesamt abnimmt und sich die anfallende Reststoffmenge im Vergleich zu der Trockensorption mit Kalkhydrat verringert.

Die Anforderungen an den Prozess für eine effektive Schadgasabscheidung bestehen darin, dass über ein Aufmahlen des Natriumbicarbonats eine große Oberfläche und somit Stoffaustauschfläche geschaffen sowie eine Mindestverweilzeit von 2 Sekunden bei einer Temperatur  $>140^\circ\text{C}$  sichergestellt werden muss.



Bei der Verwendung von Kalkhydrat als Reagenz kommt es zu folgenden Reaktionen mit den o.g. gasförmigen Schadstoffen:



Untersuchungen und Betriebserfahrungen haben gezeigt, dass bei einer Schadstoffabscheidung mit Kalkhydrat die Abscheideleistung unter bestimmten Bedingungen verbessert werden kann. Hierzu zählt vor allem die Erhöhung der relativen Abgasfeuchte  $\varphi$ .

Der Chlorwasserstoff reagiert mit Calciumhydroxid zu Calciumchlorid, was in dem der konditionierten Trockensorption üblichen Temperaturbereichs von 130-150°C als Dihydrat vorliegt



Die HCl-Einbindung verläuft gegenüber der SO<sub>2</sub>-Einbindung energetisch bevorzugt, da die Aktivierungsenergie für die Reaktion im Niedertemperaturbereich gegenüber SO<sub>2</sub> niedriger ist.

Generell spielt für die Abscheidung saurer Schadgase (HCl, SO<sub>2</sub>, HF), mit Ausnahme von SO<sub>3</sub>, die Lösungsgeschwindigkeit in wässrigem Medium eine entscheidende Rolle, auch bei trockener Additivzugabe. Denn der stets vorhandene Wasserdampf im Abgas bildet eine Hydrathülle um die Feststoffpartikel, 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 Löseffekte, die im molekularen Bereich schnelle Ionenreaktionen ermöglichen. Aus diesem Grund spielt insbesondere für hohe SO<sub>2</sub>-Abscheideleistungen das Vorhandensein von HCl, respektive CaCl<sub>2</sub>, eine große Rolle, da man zur Ausbildung der Hydrathülle sich die hygroskopischen Eigenschaften des Calciumchlorids zu Nutzen macht.

Des Weiteren wurde in [4] ermittelt, dass es eine Zwischenreaktion von bereits gebildeten Calciumchlorid mit Calciumhydroxid gemäß Gl. 2.12 und 2.13 gibt.



Bei der konditionierten Trockensorption mit Kalkhydrat verbessert sich die Abscheidung von Schwefeldioxid bei gleichzeitiger Anwesenheit von Chlorwasserstoff und Schwefeldioxid im Abgasstrom im Vergleich zu der separaten Abscheidung bei alleiniger Anwesenheit im Abgasstrom. Im Gegensatz dazu verschlechtert sich die Abscheidung von Chlorwasserstoff unter den gleichen Bedingungen.

Daraus kann man schließen, dass das Zwischenprodukt Calciumhydroxidchlorid aus der Reaktion von Kalkhydrat mit Chlorwasserstoff (siehe Gl.2.12) auch mit dem Schwefeldioxid reagiert. Die Reaktionsgeschwindigkeit bei dieser Reaktion muss demnach größer sein als bei der Reaktion des Kalkhydrates mit Schwefeldioxid (siehe Gl.2.8), was bei unveränderten Reaktionsbedingungen (Druck und Temperatur) nur mit einer höheren Reaktivität des Calciumhydroxidchlorides erklärt werden kann. Calciumhydroxidchlorid wird aber nicht nur bei der Reaktion von Chlorwasserstoff mit Kalkhydrat gebildet. Es entsteht auch im Reststoffprodukt aus dem Gewebefilter als Folge der Reaktion von überschüssigem Kalkhydrat mit Calciumchlorid.



Abgase aus Abfall- und EBS-Verbrennungsanlagen enthalten u.a. neben den gasförmigen Schadstoffen  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$  und  $\text{HF}$  auch Dämpfe von flüchtigen Schwermetallen bzw. Schwermetallverbindungen sowie Dioxine und Furane. Die schwer flüchtigen Schwermetalle wie Chrom, Kobalt, Nickel und Kupfer werden durch eine hohe Abscheideeffizienz der Gewebefilter gemindert. Elemente mit einer höheren Flüchtigkeit wie Cadmium, Arsen und Blei verdampfen zunächst teilweise bei der Verbrennung und kondensieren anschließend bei der Abkühlung des Abgases auf den Flugaschepartikeln. Quecksilber ( $\text{Hg}$ ) dagegen ist das einzige Schwermetall, das bei der Verbrennung vollständig verdampft und anschließend nur teilweise auf Partikeln kondensiert. Das Quecksilber in Abgasen liegt in elementarer und oxidierter Form vor. Die oxidierte Form, meist als  $\text{HgCl}_2$ , lässt sich generell leichter abscheiden, als die elementare Form.

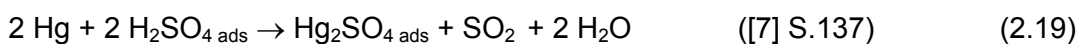
Zur Abscheidung dieser Schadstoffe werden i.d.R. hochoberflächige Adsorbenzien wie z.B. Aktivkohle bzw. –koks oder Tonminerale eingesetzt und trocken in den Abgasstrom vor dem Gewebefilter zugegeben.

Dass die Physisorption zur effektiven Entfernung von Hg(0) und Hg(II) nicht ausreicht, haben z.B. Neumann et al. [5] gezeigt. Erst eine Imprägnierung der Kohlen, z.B. durch Jod, Schwefel oder Schwefelsäure macht eine technisch nutzbare Beladung mit Quecksilber und seinen gasförmigen Verbindungen möglich. Nach geläufigen Vorstellungen kann sich die Aktivkohle in schwefeloxid- und wasserhaltigem Abgas auf folgende Weise selbst mit Schwefelsäure imprägnieren:



Dampfdruckerniedrigungen an gekrümmten Flächen mit sehr kleinen konkaven Radien der Mikro- und Submikroporen wie sie bei den hochoberflächigen Adsorbenzien vorliegen, ermöglichen es auch der Schwefelsäure bei höheren Temperaturen zu kondensieren, als dies normalerweise (Taupunkt) der Fall ist. Nach Kleine-Möllhoff et al. [6] könnte HgCl<sub>2</sub> sich in Schwefelsäure lösen, ohne zu reagieren. Das bedeutet, dass das HgCl<sub>2</sub> in molekularer, wenig dissoziierter Form vorliegt, so dass der Gleichgewichtsdampfdruck sowohl für das Lösemittel Schwefelsäure als auch für das gelöste HgCl<sub>2</sub> mit steigender Temperatur zunehmend auf der Seite der Gasphase wäre.

Für die Chemisorption von Hg(0) auf der schwefelsäureimprägnierten Kohle kann man verschiedene Reaktionsgleichungen postulieren:



Thermodynamisch ist die Oxidation von Hg(0) zu Hg(I) und/oder Hg(II) in Schwefelsäure im Kontakt mit Abgas, das Sauerstoff, Stickstoffoxide u.a. enthält möglich.

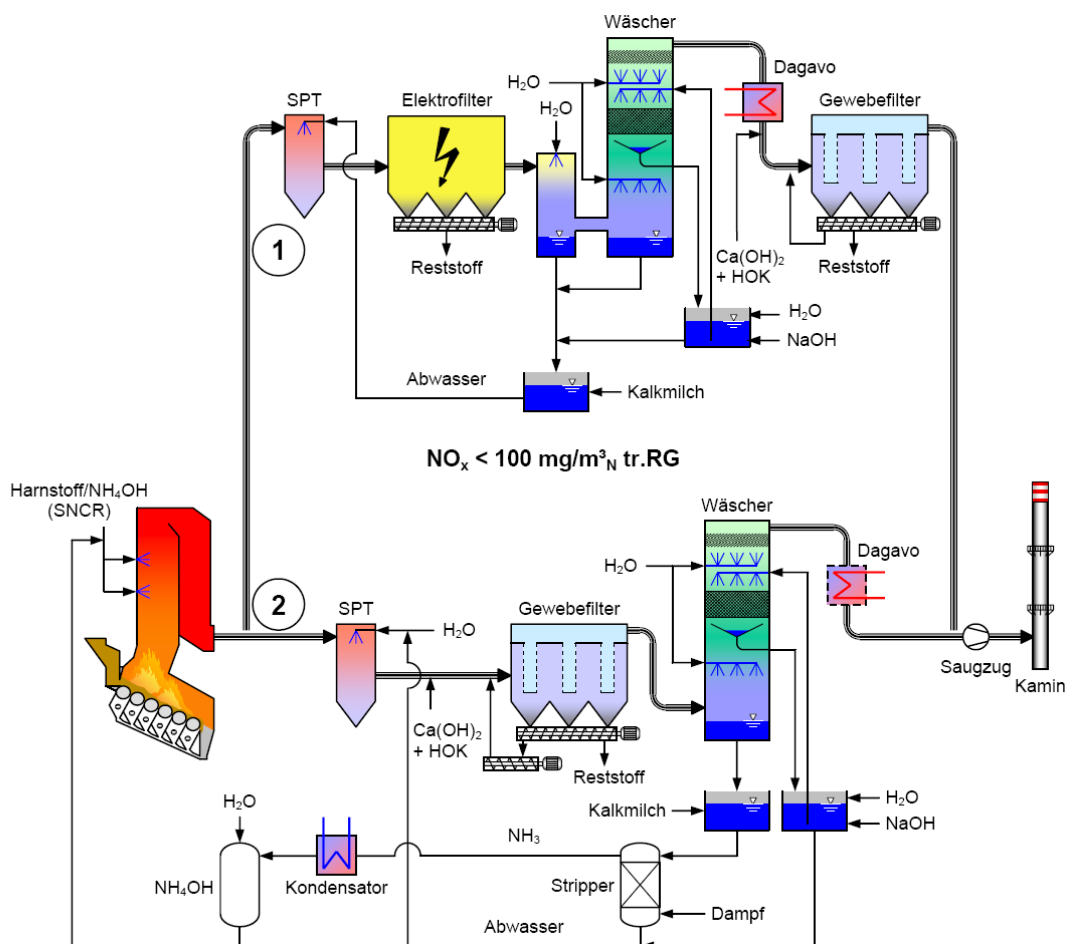
Physisorption von Hg(0) und HgCl<sub>2</sub> und Kondensation von Schwefelsäure auf Aktivkohlen sowie die physikalische Lösung von HgCl<sub>2</sub> in Wasser oder Säuren sind reversible Vorgänge, die durch niedrigere Temperaturen begünstigt werden.

Die verwendeten Aktivkohlen bzw. -kokse, die anders z.B. als zu PAK, PCDD/F u.a. keine besondere Affinität zu Hg und  $\text{HgCl}_2$  hat, bietet dem eigentlichen Sorbens Schwefelsäure nur die erforderliche Oberfläche, auf der mehr oder weniger geschützt vor der Base Kalk oder Bicarbonat, die das Sorbens unwirksam machen würde, die Bindung von Hg und  $\text{HgCl}_2$  erfolgen kann.

## 2.2 nasse Verfahren

Bei den nassen Verfahren besteht die Abgasreinigungsanlage in der Regel aus einem zweistufigen Wäscher wobei die zweite Stufe der  $\text{SO}_2$ -Abscheidung dient. Die erste Wäscherstufe erfüllt im Wesentlichen zwei Funktionen:

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

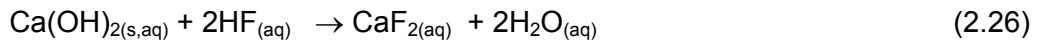
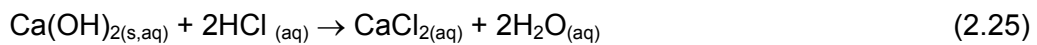


**Abb.3** vereinfachte Verfahrensschemata mehrstufiger Abgasreinigungsverfahren zur Einhaltung der halben 17. BImSchV ( $\text{NO}_x < 100 \text{ mg/m}^3$  SNCR-Verfahren) und Rohgaskonzentrationen  $\text{HCl} \leq 2500 \text{ mg/m}^3$  und  $\text{SO}_2 \leq 2000 \text{ mg/m}^3$  (SPT=Sprühtrockner);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

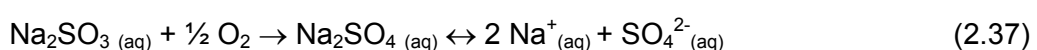
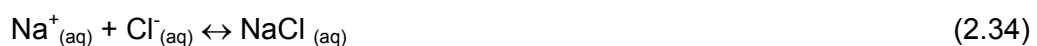
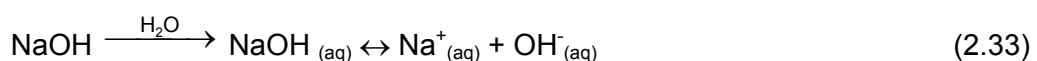
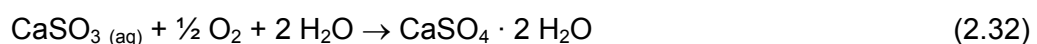
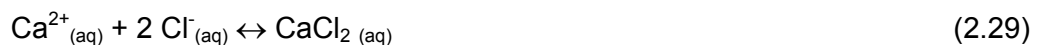
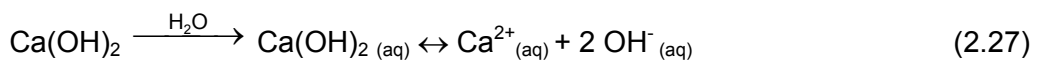
Die Halogenwasserstoffverbindungen HCl und HF (auch Bromwasserstoff HBr und Iodwasserstoff HI) lassen sich gut bis sehr gut in Wasser absorbieren, da bei den meist vorliegenden Abgaskonzentrationen ihr Gleichgewichtspartialdruck sehr niedrig ist und hierbei Säuren bilden. Diese bilden sich bei HCl, HBr und HI in Wasser sehr leicht und fast vollständig. Dagegen findet dieser Dissoziation genannte Vorgang bei HF in Wasser nur schwach statt, weswegen sich HF auch allein mit Wasser nicht so gut abscheiden lässt.



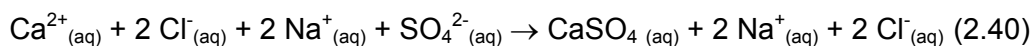
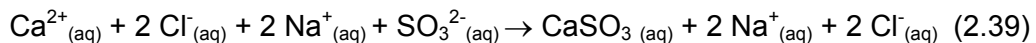
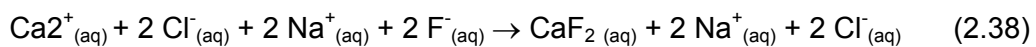
Durch Zugabe von Kalkmilch reagiert ein Teil der absorbierten Säureionen mit dem Waschwasser zu Salzen. Gewöhnlich wird durch eine pH-Wertregelung Kalkmilch zudosiert, dass sich durch die verbleibenden Säuren ein pH-Wert von 0,8 bis 1,5 einstellt.



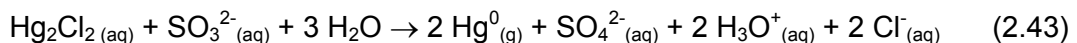
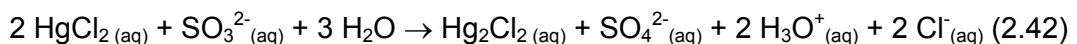
Die Absorption von Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) erfolgt in der zweiten Stufe bei einem pH-Wert zwischen 5,5 bis 5,9 unter Zufuhr von Luftsauerstoff ( $\text{O}_2$ ) für die Oxidation von Sulfit ( $\text{SO}_3^{2-}$ ) zu Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), da bei höherem pH-Wert die Oxidationsrate abnimmt.



Viele Wäscher werden so betrieben, dass eine kaskadierte Abschlammung entgegen der Gasströmung vorgenommen wird. Das bedeutet, dass durch die mit Kalkmilch neutralisierten Abwässer aus der sauren Wäscherstufe (siehe Reaktionen 2.27 bis 2.32) mit den Abwässern aus der basischen Wäscherstufe vereinigt werden, die aufgrund der Absorption mit Natronlauge (siehe Reaktionen 2.33 bis 2.37) Natriumsalze als Reaktionsprodukte enthalten, zu einer Umsalzung (siehe Reaktionen 2.38 bis 2.41) führen. Hierbei reagieren die gelösten Calcium-Ionen des  $\text{CaCl}_2$  mit den vorhandenen Fluorid-, Sulfit- und Sulfat-Ionen der Natriumsalze zu den schwerlöslichen Calciumverbindungen:



Auch Wäscher besitzen ein Abscheidopotential für Quecksilber. Wie bereits o.g. liegt das Quecksilber meist in oxidierter Form als  $\text{HgCl}_2$  vor. Aufgrund der hervorragenden Löslichkeit der Chlorokomplexe des  $\text{HgCl}_2$  erfolgt die Quecksilberabscheidung hauptsächlich in der sauren Wäscherstufe. Da nicht alles Quecksilberchlorid in der sauren Stufe abgeschieden wird, gelangt auch ein Teil in die basische Wäscherstufe. Bei hohen Schwefeldioxidkonzentrationen im Rohgas kann es zu einer Reduzierung des ionogenen Quecksilbers ( $\text{Hg}^{2+}$ ) zu elementarem bzw. metallischem Quecksilber ( $\text{Hg}^0$ ) kommen, das nicht durch die Abgaswäsche abgeschieden werden kann.



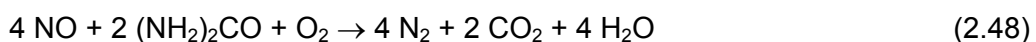
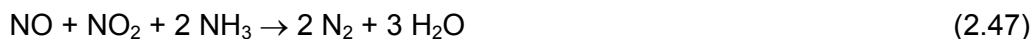
Für die Abscheidung der Quecksilbersalze aus dem Abwasser werden Organosulfidverbindungen eingesetzt, die mit dem Quecksilber dann zu schwerlöslichen Verbindungen reagieren.

## 2.3 Entstickungsverfahren

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<sub>2</sub>-Radikale dient. Als Reduktionsmittel werden vorwiegend Ammoniak (als 25 bis 30%ige NH<sub>3</sub>-Lösung), Harnstoff (als 40 bis 45%ige (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO-Lösung), Isocyanensäure (HNCO) und einige weitere stickstoffhaltige Verbindungen eingesetzt.

Die wichtigsten Bruttoreaktionen für die Stickoxid-Reduktion lauten:



Der Reaktionsweg verläuft jeweils über die Bildung von NH<sub>2</sub>-Radikalen:



Die eigentlichen radikalischen Reduktionsreaktionen lassen sich wie folgt darstellen:



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.

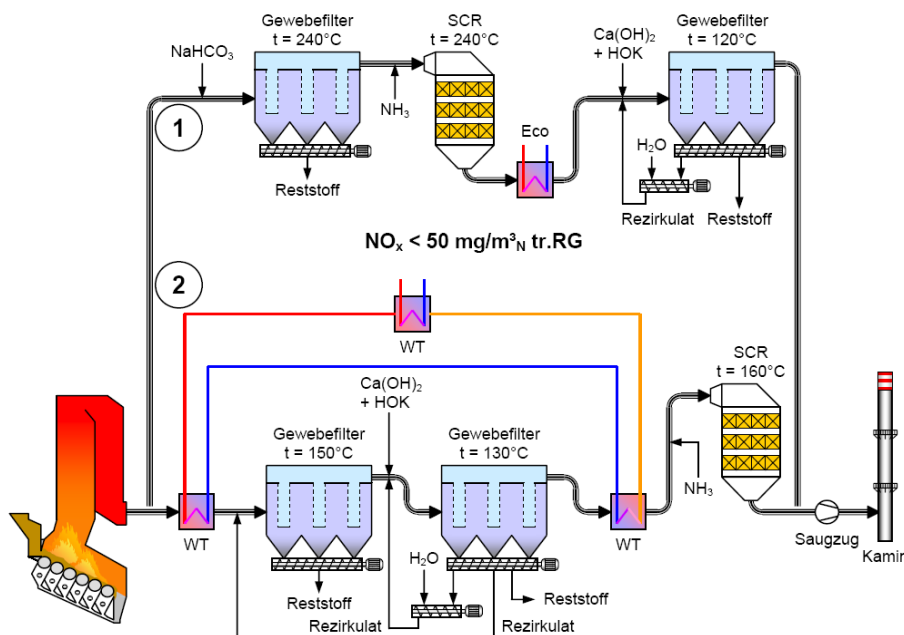
Bei der Eindüsung von Harnstofflösung lässt sich eine größere Eindringtiefe erzielen, da der Wasseranteil erst vollständig verdampfen muss, bevor sich der Harnstoff ther-

misch zersetzen und  $\text{NH}_2$ -Radikale bilden kann, während der Ammoniak bereits vor der vollständigen Tropfenverdampfung desorbiert.

Bei dem SCR-Verfahren werden die Stickoxide mit Hilfe eines Katalysators und Ammoniak als Reduktionsmittel zu molekularem Stickstoff und Wasser umgesetzt. Hierbei gelten dieselben Bruttoreaktionsgleichungen für die Stickoxidreduktion wie bei dem SNCR-Verfahren (siehe Gl.n.2.45 bis 2.47).

Der Reaktionsweg verläuft jedoch nicht über die Bildung von  $\text{NH}_2$ -Radikalen, sondern katalytisch an Vanadiumpentoxid ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) bei Temperaturen zwischen 200 und  $400^\circ\text{C}$ . 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  $\text{DeNO}_x$ -Anlage innerhalb der Abgasreinigungsanlage. Die Position der  $\text{DeNO}_x$ -Anlage im Abgasweg hat einen großen Einfluss auf den Abgasreinigungsbetrieb, da z.B. das  $\text{SO}_2$  durch den Katalysator teilweise (ca. 0,5 bis 2%) zu  $\text{SO}_3$  oxidiert wird, das zum einen Korrosionsprobleme durch die Absenkung der Säuretaupunkttemperatur verursachen kann und zum anderen mit nicht umgesetztem Ammoniak (bei vorhandenem  $\text{NH}_3$ -Schlupf) zu Ammoniumsulfat ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) oder zu klebrigem Ammoniumhydrogensulfat ( $\text{NH}_4\text{HSO}_4$ ) reagieren kann.



**Abb.4** vereinfachte Verfahrensschemata mehrstufiger Abgasreinigungsverfahren inkl. SCR-Anlage zur Einhaltung der halben 17. BImSchV ( $\text{NO}_x < 50 \text{ mg/m}^3$ ) und Rohgaskonzentrationen  $\text{HCl} > 2500 \text{ mg/m}^3$  und  $\text{SO}_2 > 2000 \text{ mg/m}^3$



### 3 Energieverbrauch /-aufwand in der Abgasreinigung im Allgemeinen

Neben den Reingasemissionen spielt auch der erforderliche Aufwand bei der Auswahl der geeigneten Technologie eine Rolle. Der Energieaufwand zur Emissionsminderung in Abgasreinigungsanlagen hängt von vielen Faktoren ab. Angefangen bei dem gewählten Additiv und dessen Reaktivität bis hin zu den elektrischen Verbrauchern der verfahrensspezifischen mechanischen Komponenten wie Pumpen, Gebläse und Förderorgane. Welche Betriebsmittelverbräuche bei welcher Abgasreinigungskomponente bzw. -verfahren anfallen ist Tabelle 3 zu entnehmen.

**Tabelle 3:** Betriebsmittelverbrauchsmatrix verschiedener Abgasreinigungskomponenten / -verfahren

Betriebsmittel	Additive	Elektrische Energie				Druckluft	Dampf	Gas
		Saugzug	Pumpen	Gebläse	Mühlen			
E-Filter		x						
Gewebefilter		x				x		
Sorptionsfilter	x	x		x		x		
Fest-/Wanderbett-Filter	x	x			x			
Wäscher	x	x	x					
SNCR	x	x	x			x		
SCR	x	x	x	x		x	x	x
nasse Verfahren	x	x	x			x	x	x
Trockensorptionsverfahren	x	x		x	x	x		
kond. Trockensorptionsverfahren	x	x	x	x		x		
Sprühabsorptionsverfahren	x	x	x	x		x		

In Abhängigkeit des gewählten Verfahrens, der benötigten Sorbenzien und eingestellten Prozessparameter (vergl. Kapitel 2) ergeben sich unterschiedliche Additivverbrauchswerte respektive Reststoffmengen. Je nach verwendeten Additiv und dessen Verbrauchswert bedeutet das wiederum einen äquivalenten Energieaufwand bei der Herstellung und somit Energieverbrauch. So wird z.B. für die Herstellung von 1 Mg NaHCO<sub>3</sub> eine Energiemenge von 7,1 GJ [8] benötigt. In Tabelle 4 sind für die gebräuchlichsten Additive in der Abgasreinigung die für die Herstellung benötigten Energieaufwendungen angegeben.

**Tabelle 4:** Primärenergieverbrauch zur Herstellung verschiedener Additive in der Abgasreinigung [9]

<b>Additiv</b>	<b>Primärenergieverbrauch [GJ/Mg]</b>
Kalkhydrat $\text{Ca(OH)}_2$	3,66
Branntkalk $\text{CaO}$	4,81
Natriumhydrogencarbonat $\text{NaHCO}_3$	7,1 <sup>1)</sup>
Natronlauge $\text{NaOH}$ (50%ig)	7,52

<sup>1)</sup>dieser Wert wurde [8] entnommen

Die übrigen variablen Betriebsmittelverbrauchswerte wie z.B. elektrische Energie für das Saugzuggebläse, Pumpen, Gebläse und Mühlen bzw. Druckluft, Gas oder Dampf variieren in Abhängigkeit des gewählten Verfahrens und der abzuscheidenden Schadgasfrachten respektive den zugrunde gelegten Emissionswerten. Das bedeutet unter Umständen, dass für die Erreichung einzelner Emissionswerte ein einstufiges Verfahren nicht mehr ausreicht und so der Anlagentechnische- und Betriebsmittelaufwand überproportional ansteigen. Diese Betrachtungen und in deren Zusammenhang stehenden Energieaufwendungen werden in diesem Beitrag nicht näher betrachtet und an anderer Stelle weitergehend ermittelt und diskutiert.

## 4 Kumulierter Energieaufwand zur Errichtung von Abgasreinigungssystemen

Die Definition zum Kumulierten Energieaufwand entsprechen der VDI-Richtlinie 4600 „Kumulierter Energieaufwand – Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden“ [10]. Der Kumulierte Energieaufwand gibt die Gesamtheit des primärenergetischen bewerteten Aufwands an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Gutes (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann. Dieser Energieaufwand stellt die Summe der Kumulierten Energieaufwendungen für die Herstellung ( $KEA_H$ ), die Nutzung ( $KEA_N$ ) und die Entsorgung ( $KEA_E$ ) des ökonomischen Gutes dar, wobei für diese Teilsummen anzugeben ist, welche Vor und Nebenstufen einbezogen sind.

$$KEA = KEA_H + KEA_N + KEA_E \quad (4.1)$$

### Kumulierter Energieaufwand zur Herstellung ( $KEA_H$ )

$KEA_H$  wird die Summe der primärenergetischen bewerteten Energieaufwendungen genannt, die sich bei der Herstellung selbst sowie bei der Gewinnung, Verarbeitung, Herstellung und Entsorgung der Fertigungs-, Hilfs- und Betriebsstoffe und Betriebsmittel einschließlich der Transportaufwendungen für einen Gegenstand oder eine Dienstleistung ergeben.

Die Energieaufwendungen für die Nutzung sowie für die Entsorgung der Abgasreinigungsanlagen sind nicht Gegenstand dieses Beitrags sondern werden im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung und in Abhängigkeit der Abscheidegrade und unterschiedlichen Emissionswerten ermittelt und diskutiert.

### 4.1 Methodik zur Ermittlung des $KEA_H$

#### Bilanzgrenzen

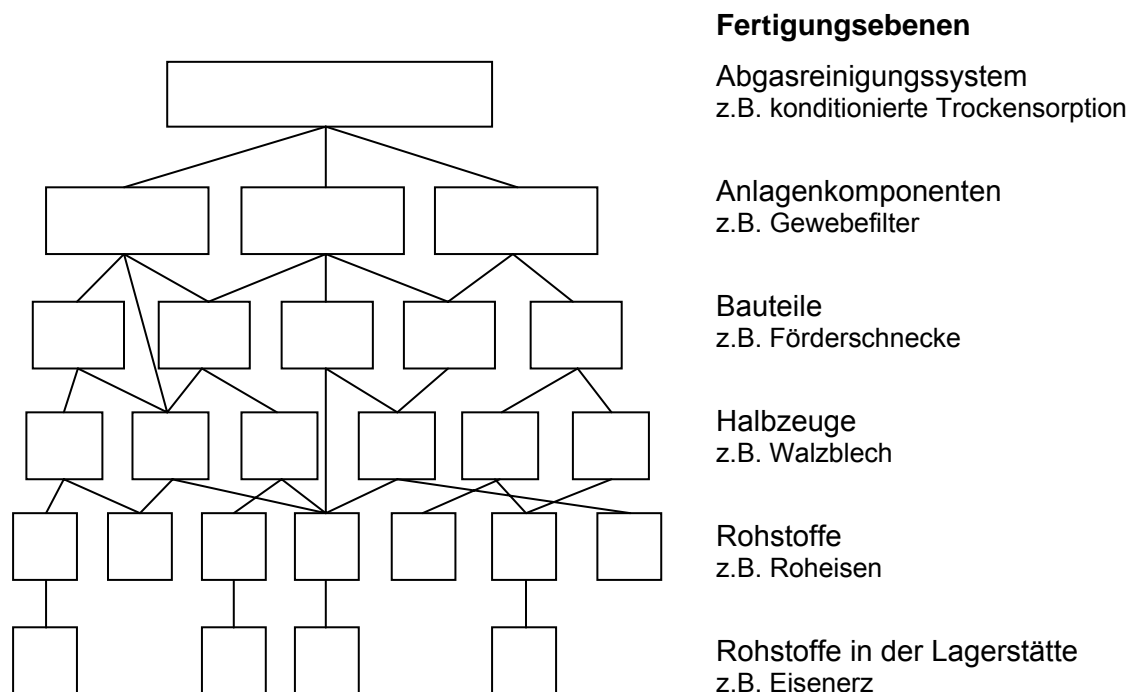
Die Bilanzgrenzen wurden so gewählt, dass die Eintrittsbedingungen in die Abgasreinigungssysteme den Austrittsbedingungen der Abgaserzeugungsanlage (Abfallverbrennungseinheit) und Energieauskopplung (Dampfkessel) entsprechen. Die Austrittsbedingungen der Abgasreinigungssysteme gleichen den Eintrittsbedingungen in den Kamin.

## Erstellung der Massenbilanzen

Die Basis zur Ermittlung des  $KEA_H$  stellt das Wissen um den Massen- und Stofffluss dar. Dazu sind detaillierte Kenntnisse über den Anlagen- und Apparateaufbau unabdingbar. Aufgrund langjähriger Erfahrungen sowie großzügiger Kooperationsbereitschaft von Anlagenbetreibern und Anlagenbauern konnten die Massenbilanzen, bis auf wenige Ausnahmen, auf Grundlage realer Daten ermittelt werden.

Zunächst wurden für die gängigsten Anlagenkomponenten wie z.B. Elektrofilter, Gewebefilter, Wäscher, Entstickungsanlagen, usw. die Massenbilanzen für einen Referenzvolumenstrom von  $100.000 \text{ m}^3/\text{h}_{i.N.tr.}$  erstellt. Da das Anlagenvolumen in den meisten Fällen durch den Abgasvolumenstrom charakterisiert wird, erschien dies als eine geeignete Referenzgröße.

In Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4600 kann der Produktionsgang der in einer Anlage eingesetzten Materialien bis zum Rohstoff in der Lagerstätte zurückverfolgt und analysiert, können alle interessierenden Parameter zunächst auf Gruppen-, dann auf Teile- bzw. Halbzeugebene bis hin zur Rohstoffebene dargestellt werden. Für die Herstellung von Abgasreinigungsanlagen ergibt sich demzufolge der in Abb. 5 dargestellte Materialbaum.



**Abb.5** Materialstammbaum zur Herstellung von Abgasreinigungssystemen gemäß [10]

Für die Untersuchung der Herstellungsphase eines Abgasreinigungssystems steht als Endprodukt die gesamte Abgasreinigungsanlage. In der zweiten Ebene wird zwischen

den einzelnen Anlagenkomponenten, wie z.B. Gewebefilter, Elektrofilter oder Wäscher unterschieden. Die darunterliegende Bauteilebene beinhaltet dann einzelnen Komponenten wie Förderschnecken, Pumpen oder Silos. In der nächsten Ebene erfolgt ein weiterer Detaillierungsgrad bis hin zu den Halbzeugen wie z.B. Walzblech, Dämmwolle oder Kupferanteil der berücksichtigten elektrischen Kabel. Theoretisch ist eine weitergehende Aufschlüsselung bis zu den Rohstoffen (Roheisen) bzw. dem Abbau der Rohstoffe in den Lagerstätten möglich. Je weiter man in dem Materialstammbaum sich in Richtung der Rohstoffe bewegt, desto detaillierter stellt sich das Gesamtergebnis dar. Allerdings besteht die Gefahr, dass ab einer gewissen Detaillierungstiefe die gewonnenen Ergebnisse eine größere Ungenauigkeit gegenüber den bereits ermittelten Daten aufweisen.

Aus diesem Grund wurde die Bilanzierung lediglich bis zu der Ebene Halbzeuge vorgenommen.

Zunächst wurden für die jeweiligen Anlagenkomponenten eine Auflistung der Bauteile und Halbzeuge erstellt und in die Bereiche Apparate- u. Stahlbau, Bauleistung/Bodenplatte und Elektroinstallation aufgeteilt. Der Komponentenumfang wurde so vorgenommen, dass ein autarker Anlagenbetrieb gewährleistet ist. Das bedeutet, dass z.B. bei dem Sorptionsfilter neben den Staubbördersystemen auch ein Additiv- und Reststoffsilo sowie Zwischenbehälter oder bei den Wäschern neben den Pumpen ebenso Vorlage-/Neutralisationsbehälter Berücksichtigung fanden.

Um den Untersuchungsaufwand in einem vertretbaren Rahmen zu halten, sind Teile und Komponenten von Bauteilen mit ähnlichen Materialeigenschaften z.B. Profilstahl, Stahlblech u.a. zu einer Materialposition zusammengefasst worden.

Die in der Tabelle 5 angegebenen Massen wurden zum einen Statikunterlagen bestehender Anlagen entnommen und zum anderen Anhand von Ausführungszeichnungen mittels Wanddicken- und Flächenberechnungen und deren Dichten ermittelt.

Auch der Kabelumfang wurde auf Basis ausgeführter Anlagen bestimmt. Für die unterschiedlichen Querschnitte sind jeweils deren Kupfer- und PVC-Anteile separat ermittelt und bewertet worden. Die Kabel wurden für alle Typen und Anlagenkomponenten mit 100 m Länge berücksichtigt. Für die Elektrobegleitheizungen wurde in ähnlicher Weise verfahren und der Aufbau über den Kupfer- und Kunststoffanteil berücksichtigt. Anhand von Ausführungsunterlagen und den installierten Leistungen wurden mit einer spezifischen Leistung von 25 W/m die entsprechenden Längen ermittelt.

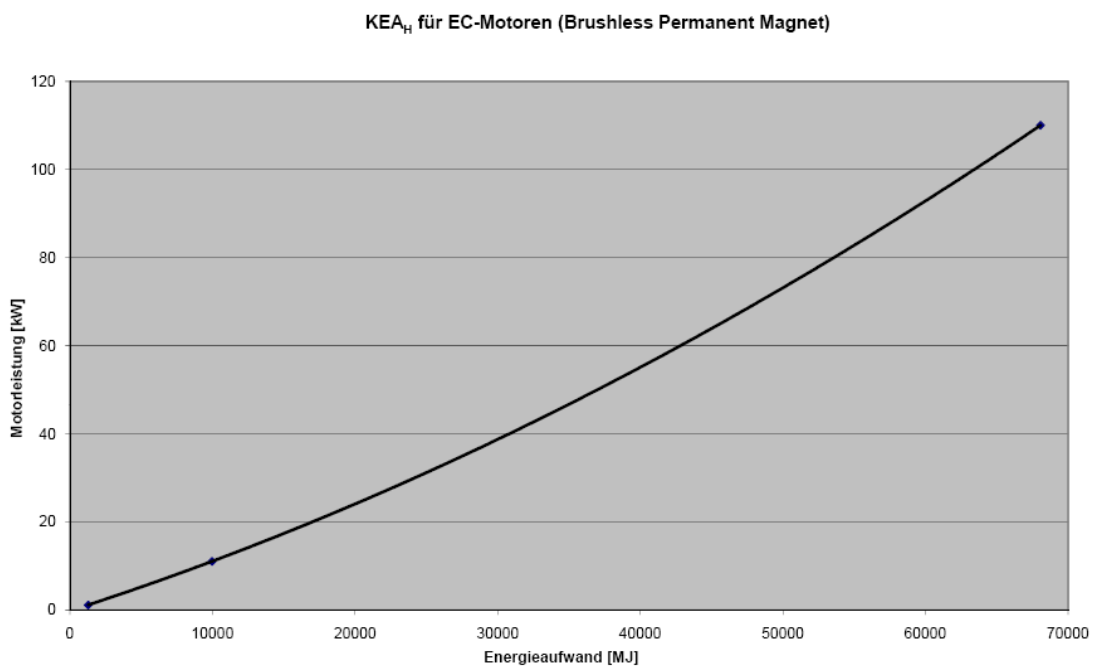
Materialien, die zwar zum Bau der Anlage benötigt werden, aber von der Anlage selbst kein Bestandteil sind, wie z.B. Blech- und Kabelverschnitt oder

Schalungsmaterial für Betonarbeiten, sind weder in der Massen- noch in der Energiebilanz berücksichtigt.

Messwertgeber wie z.B. Temperaturfühler, Druckaufnehmer, Füllstandssonden, Durchflussmessungen u.a. sowie Niederspannungs-Schaltanlagen und Prozessleitsysteme sind ebenfalls nicht in die Bilanzierung eingeflossen.

### Erstellung der Energiebilanzen

Anhand der ermittelten Materialbilanzen wurden für die einzelnen Bauteile und Halbzeuge mit den in der Literatur zur Verfügung stehenden Daten die kumulierten Energieaufwendungen auf Basis des Primärenergieverbrauchs bestimmt. Bei komplexen Produkten wie z.B. Motoren für Pumpen, Gebläse, Förderschnecken, Kompressoren und Stellantrieben wurden in Abhängigkeit der Nennleistungen anhand der in Abb. 6 dargestellten Kurve die  $KEA_H$  ermittelt.



**Abb.6** Interpolierte Kurve für  $KEA_H$  in Abhängigkeit der Nennleistung, ermittelt aus drei Nennleistungen für EC-Motoren (Brushless Permanent Magnet) [11]

## 4.2 Massen- und Energiebilanz zur Herstellung der einzelnen Abgasreinigungskomponenten

**Tabelle 4:** Massen- und Energiebilanz mit den jeweiligen KEA<sub>H</sub>'s für die Einzelbauteile als auch die Summen der Komponenten

Komponenten	Material	Gewicht [kg/Stk.]	Gewicht [kg/kgBeton]	Schüttgewicht [kg/m³]	Anzahl [Stk.]	Volumen [m³]	Länge [m]		Gesamtgewicht [kg]	KEA [MJ/kg]	KEA Referenzfall 100 000 m³/h [MJ]
<b>E-Filter</b>											
<b>Stahlbau/Apparatebau</b>											
An- und Abströmhaube mit Kanal	Stahl	240			2				480	19,90	26681,56
Aufstellungskonstruktion inkl. Gehäuse	Stahl	114190			1				114190	19,90	6347432,96
Gasverteilbleche	Stahl	770,4			1				770,4	19,90	42823,91
Isolierung	Steinwolle	1207,5			1				1207,5	14,72	49642,42
Schnecke	Stahl	140			8		6		6720	19,90	373541,90
Reststoffsilo	Stahl	5067			1				5067	19,90	100833,30
Verblechung	Stahl	644			1				644	19,90	35797,77
Vorlagegefäß	Stahl	700			2				1400	19,90	27860,00
								Gesamt	130478,9		
<b>Bodenplatte Bauleistung</b>											
Beton	Beton	32619,73	0,25	2200						0,99	32410,96
Stahl	Stahl	2987,97	0,02							19,90	59460,54
<b>Elektroinstallationen</b>											
Motoren											69,48
Kabel											118874,08
Heizung											9749,11
HS-Agregat											80380,67
										Summe	7305558,65
<b>Gewebefilter</b>											
<b>Stahlbau/Apparatebau</b>											
Aufstellungskonstruktion	Stahl	140000			1				140000	19,90	2878099,17
Druckluftversorgung	Stahl	1,45			150				217,5	19,90	4328,25
Filtergehäuse incl. Trichter	Stahl	45000			1				45000	19,90	925103,31
Filterschläuche	PP	1170			1				1170	298,00	348660,00
Isolierung	Steinwolle	7600			1				7600	14,72	115554,55
Schnecke	Stahl	140			8		6		6720	19,90	133728,00
Reststoffsilo	Stahl	5067			1				5067	19,90	100833,30
Verblechung	Stahl	3040			1				3040	19,90	62495,87
Vorlagegefäß	Stahl	700			2				1400	19,90	27860,00
								Gesamt	210214,5		
<b>Bodenplatte Bauleistung</b>											
Beton	Beton	52553,63	0,25	2200						0,99	52217,28
Stahl	Stahl	4813,91	0,02							19,90	95796,85
<b>Elektroinstallationen</b>											
Motoren											95,93
Kabel											197766,22
Heizung											48745,55
										Summe	4991284,27

Komponenten	Material	Gewicht [kg/Stk.]	Gewicht [kg/kgBeton]	Schüttgewicht [kg/m³]	Anzahl [Stk.]	Volumen [m³]	Länge [m]		Gesamtgewicht [kg]	KEA [MJ/kg]	KEA Referenzfall 100 000 m³/h [MJ]
<b>Verdampfungskühler</b>											
<b>Stahlbau/Apparatebau</b>											
Aufstellungskonstruktion	Stahl	11600			1				11600	19,90	230840,00
Druckluftversorgung	Stahl	1,45			80				116	19,90	2308,40
Düsenebenen	Stahl	1000			1				1000	19,90	19900,00
Isolierung	Steinwolle	1678			1				1678	14,72	24696,80
Kühler	Stahl	14620			1				14620	19,90	561873,31
Pumpe	Stahl	600			2				1200	19,90	23880,00
Schnecke	Stahl	140			2		6		1680	19,90	33432,00
Verblechung	Stahl	800			1				800	19,90	15920,00
Vorlagebehälter	Stahl	1600			1				1600	19,90	31840,00
								Gesamt	34294		
<b>Bodenplatte Bauleistung</b>											
Beton	Beton	8573,50	0,25	2200						0,99	8518,63
Stahl	Stahl	785,33	0,02							19,90	15628,12
<b>Elektroinstallationen</b>											
Motoren											15,55
Kabel											16887,66
										Summe	985740,47
<b>Wäscher (2-stufig)</b>											
<b>Stahlbau/Apparatebau</b>											
Aufstellungskonstruktion	Stahl	8000			1				8000	19,90	374588,24
Füllkörper Pallringe	PP			45		28			1260	93,75	277941,18
Füllkörper Igel	PP			120		14			1680	93,75	370588,24
Gummierung	EPDM	2917			1				2917	94,40	647917,18
Pumpe	Stahl	1200			1				1200	19,90	23880,00
Rohrleitungen	Stahl	173			200				34600	19,90	688540,00
Vorlagebehälter	Stahl	4200			3				12600	19,90	250740,00
Wäscher	Stahl	56183			1				56183	19,90	2630686,35
								Gesamt	118440		
<b>Bodenplatte Bauleistung</b>											
Beton	Beton	29610	0,25	2200						0,99	29420,50
Stahl	Stahl	2712,28	0,02								
<b>Elektroinstallationen</b>											
Motoren											271,92
Kabel											119304,25
										Summe	5467852,13
<b>Wärmetauscher</b>											
<b>Stahlbau/Apparatebau</b>											
Aufstellungskonstruktion	Stahl	1500			1				1500	19,90	29850,00
Isolierung	Steinwolle	4767			1				4767	14,72	35879,39
Verblechung	Stahl incl.										
Wärmetauscher Stahlstufe	Stahl	270000			1				270000	19,90	2747691,08
Wärmetauscher Glasstufe	Glas	68000			1				68000	11,97	416388,98
								Gesamt	344267		
<b>Bodenplatte Bauleistung</b>											
Beton	Beton	86066,75	0,25	2200						0,99	85515,92
Stahl	Stahl	7883,71	0,02							19,90	156885,91
										Summe	3472211,29



Komponenten	Material	Gewicht [kg/Stk.]	Gewicht [kg/kgBeton]	Schüttgewicht [kg/m³]	Anzahl [Stk.]	Volumen [m³]	Länge [m]		Gesamtgewicht [kg]	KEA [MJ/kg]	KEA Referenzfall 100 000 m³/h [MJ]
<b>SNCR-Anlage</b>											
<b>Stahlbau/Apparatebau</b>											
Druckluftversorgung	Stahl	1,45			50				72,5	19,90	1442,75
Düsenebenen	Stahl	200			2				400	19,90	7960,00
Pumpe	Stahl	200			1				200	19,90	3980,00
Rohrleitungen	Stahl	173			75				12975	19,90	258202,50
Vorlagegefäß	Stahl	1400			1				1400	19,90	27860,00
								Gesamt	15047,5		
<b>Bodenplatte Bauleistung</b>											
Beton	Beton	3761,88	0,25	2200						0,99	3737,80
Stahl	Stahl	344,59	0,02							19,90	6857,30
<b>Elektroinstallationen</b>											
Motoren											138,56
Kabel											36348,31
Heizung											843,67
										Summe	347370,89
<b>SCR-Anlage</b>											
<b>Stahlbau/Apparatebau</b>											
Aufstellungskonstruktion inkl. Reaktor	Stahl	635540			1				635540	19,90	6467657,74
Düsenebenen	Stahl	50			5				250	19,90	2544,16
Isolierung	Steinwolle	3039			1				3039	14,72	22873,39
Katalysatormodul	Stahl	5793			1				5793	19,90	58953,24
Pumpe	Stahl	200			1				200	19,90	3980,00
Verblechung	Stahl	1621			1				1621	19,90	16496,32
Vorlagegefäß	Stahl	1400			1				1400	19,90	27860,00
Katalysatormodul	Keramik	1073			9				9657	8,11	40056,01
								Gesamt	657500		
<b>Bodenplatte Bauleistung</b>											
Beton	Beton	164375	0,25	2200						0,99	163323,00
Stahl	Stahl	14553,87	0,02							19,90	289621,93
<b>Elektroinstallationen</b>											
Motoren											157,35
Kabel											55610,06
Heizung											1781,09
										Summe	7150914,29
<b>Saugzug</b>											
<b>Stahlbau/Apparatebau</b>											
Saugzug	Stahl	9500			1				9500	19,90	195299,59
Aufstellungskonstruktion	Stahl	250			1				250	19,90	4975,00
								Gesamt	9750		
<b>Bodenplatte Bauleistung</b>											
Beton	Beton	2437,5	0,25	2200						0,99	2421,90
Stahl	Stahl	223,28	0,02							19,90	4443,17
<b>Elektroinstallationen</b>											
Motoren											275893,62
										Summe	483033,28

Komponenten	Material	Gewicht [kg/Stk.]	Gewicht [kg/kgBeton]	Schüttgewicht [kg/m³]	Anzahl [Stk.]	Volumen [m³]	Länge [m]		Gesamtgewicht [kg]	KEA [MJ/kg]	KEA Referenzfall 100 000 m³/h [MJ]
<b>Kompressorstation</b>											
<b>Stahlbau/Apparatebau</b>											
Kompressorstation	Stahl	1585			1				1585	19,90	16129,96
								Gesamt	1585		
<b>Elektroinstallationen</b>											
Motoren											82,16
Kabel											62953,29
										Summe	79165,41
<b>Sprühabsorber</b>											
<b>Stahlbau/Apparatebau</b>											
Aufstellungskonstruktion	Stahl	11600			1				11600	19,90	473517,95
Absorber	Stahl	37000			1				37000	19,90	1510358,97
Ausräumer	Stahl	2500			1				2500	19,90	102051,28
Druckluftversorgung	Stahl	1,45			80				116	19,90	2308,40
Isolierung	Steinwoile	1678		2200	1				1678	14,72	24696,80
Pumpe	Stahl	1000			1				1000	19,90	19900,00
Schnecke	Stahl	140			2		6		1680	19,90	33432,00
Additivsilo	Stahl	5067			1				5067	19,90	100833,30
Verblechung	Stahl	800			1				800	19,90	15920,00
Vorlagegefäß	Stahl	1400			2				2800	19,90	55720,00
								Gesamt	64241		
<b>Bodenplatte Bauleistung</b>											
Beton	Beton	16060,25	0,25	2200						0,99	15957,46
Stahl	Stahl	1471,12	0,02							19,90	29275,27
<b>Elektroinstallationen</b>											
Motoren											71,55
Kabel											10600,53
Heizung											18748,29
										Summe	2413391,81
<b>Sorptionsfilter (Kalk)</b>											
<b>Stahlbau/Apparatebau</b>											
Aufstellungskonstruktion inkl. Gehäuse	Stahl	185000			1				185000	19,90	3803202,48
Druckluftversorgung	Stahl	1,45			100				145	19,90	2885,50
Filterschläuche	PP	1760			1				1760	298,00	524480,00
Isolierung	Steinwoile	1207,5		2200	1				1207,5	14,72	17771,99
Kalksilo/HOK-Silo	Stahl	5067			2				10134	19,90	201666,60
Reststoffsilo	Stahl	5067			1				5067	19,90	100833,30
Schnecke	Stahl	140			10		6		8400	19,90	167160,00
Verblechung	Stahl	644			1				644	19,90	12815,60
Vorlagegefäß	Stahl	2000			1				2000	19,90	39800,00
								Gesamt	214357,5		
<b>Bodenplatte Bauleistung</b>											
Beton	Beton	53589,38	0,25	2200						0,99	53246,40
Stahl	Stahl	4908,79	0,02							19,90	97684,86
<b>Elektroinstallationen</b>											
Motoren											291,56
Kabel											327505,23
Heizung											29997,26
										Summe	5379340,77

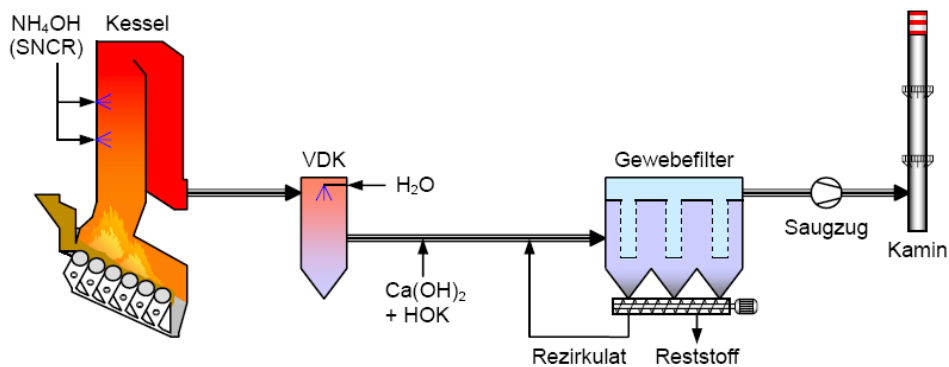
Komponenten	Material	Gewicht [kg/Stk.]	Gewicht [kg/kgBeton]	Schüttgewicht [kg/m³]	Anzahl [Stk.]	Volumen [m³]	Länge [m]		Gesamtgewicht [kg]	KEA [MJ/kg]	KEA Referenzfall 100 000 m³/h [MJ]
<b>Sorptionsfilter (Bicar)</b>											
<b>Stahlbau/Apparatebau</b>											
Aufstellungskonstruktion inkl. Gehäuse	Stahl	185000			1				185000	19,90	3803202,48
Druckluftversorgung	Stahl	1,45			100				145	19,90	2885,50
Filterschläuche	PP	1760			1				1760	298,00	524480,00
Isolierung	Steinwolle	1207,5			1				1207,5	14,72	17771,99
Bicarsilo	Stahl	5067			1				5067	19,90	100833,30
Reststoffsilo	Stahl	5067			1				5067	19,90	100833,30
Schnecke	Stahl	140			6		6		5040	19,90	100296,00
Verblechung	Stahl	644			1				644	19,90	12815,60
Vorlagegefäß	Stahl	2000			1				2000	19,90	39800,00
Mühlen	Stahl	986			6				5914	19,90	117693,45
								Gesamt	211844,74		
<b>Bodenplatte Bauleistung</b>											
Beton	Beton	52961,19	0,25	2200						0,99	52622,23
Stahl	Stahl	4851,24	0,02							19,90	96539,77
<b>Elektroinstallationen</b>											
Motoren											474,85
Kabel											327505,23
Heizung											29997,26
										Summe	5327750,95
<b>Rauchgaskanäle</b>											
<b>Stahlbau/Apparatebau</b>											
Rauchgaskanäle	Stahl	238,18					1		238,1813717	19,90	4739,81
Aufstellungskonstruktion	Stahl	200					1		200	19,90	3980,00
Isolierung	Steinwolle	30					1		30	14,72	441,54
								Gesamt	468,1813717	Summe	9161,35
<b>Rohrleitung</b>											
Rohrleitung	Stahl	11,1					1		11,1	19,90	220,89
								Gesamt	11,1	Summe	220,89

Die KEA's der einzelnen Materialien sind der Probas-Datenbank [12], mit Ausnahme der für PTFE, der aus [13] stammt, entnommen.

### 4.3 KEA<sub>H</sub> für verschiedene Abgasreinigungssysteme

Die in 4.2 aufgelisteten KEA<sub>H</sub>'s der einzelnen Anlagenkomponenten wurden entsprechend den folgenden Abgasreinigungskonzepten (vgl. auch Abb.1) zusammengestellt und addiert. Die Aufstellung und Anordnung der Anlagenkomponenten basiert auf der Installation auf die „grüne Wiese“. Dementsprechend können die zugrunde gelegten Längen der Abgaskanäle differieren und abweichen.

#### KEA<sub>H</sub> für Trockensorption mit SNCR-Verfahren (V1)

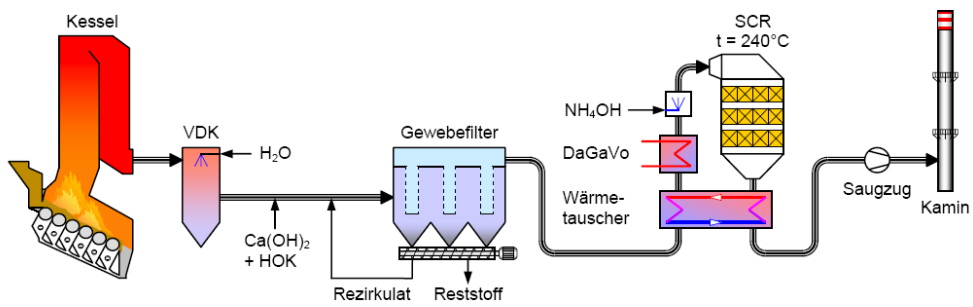


**Abb.7** Konditionierte Trockensorption mit Kalkhydrat, Abgasentstickung mit SNCR-Verfahren; Emissionsgrenzwerte nach 17. BImSchV, NO<sub>x</sub> ≤ 100 mg/m<sup>3</sup> i.N. tr.

**Tabelle 5:** KEA<sub>H</sub> für eine konditionierte Trockensorption mit Kalkhydrat und SNCR-Verfahren (V1)

Komponente	KEA <sub>H</sub> [MJ]
SNCR	347371
VDK	985740
Sorptionsfilter Kalk	5379341
Saugzug	483033
Abgaskanal	274840
Kompressorstation	79165
<b>Summe</b>	<b>7549491</b>

## KEA<sub>H</sub> für Trockensorption mit SCR-Verfahren (V2)

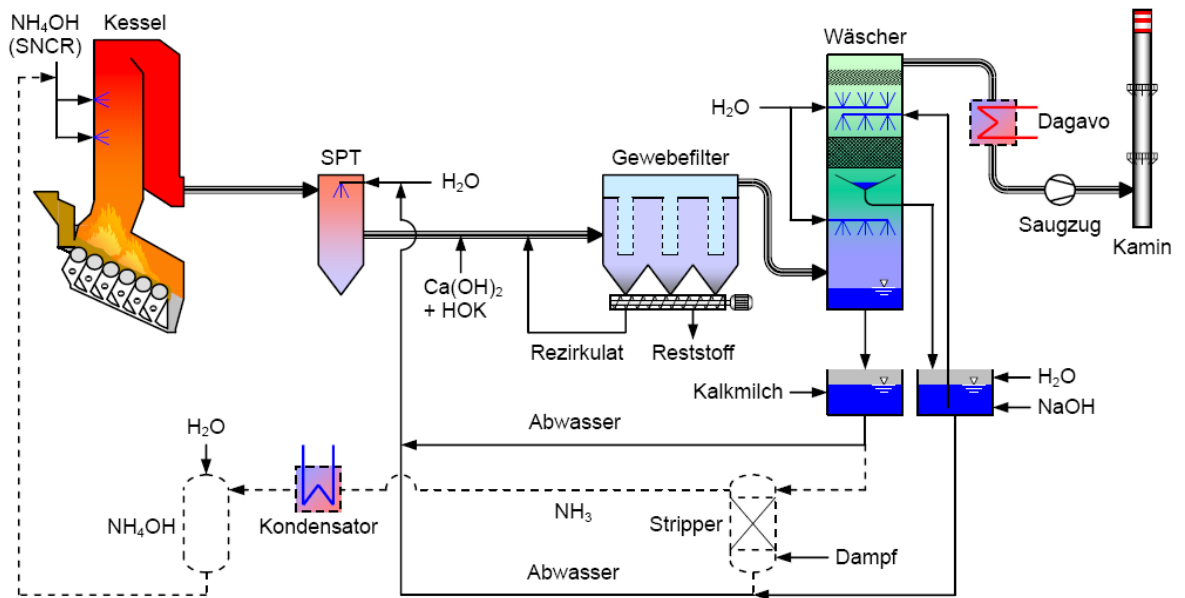


**Abb.8** Konditionierte Trockensorption mit Kalkhydrat, Abgasentstickung mit SCR-Verfahren;  
Emissionsgrenzwerte nach 17. BImSchV,  $\text{NO}_x \leq 70 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N. tr.}}$

**Tabelle 6:** KEA<sub>H</sub> für eine konditionierte Trockensorption mit Kalkhydrat und SCR-Verfahren (V2)

Komponente	KEA <sub>H</sub> [MJ]
VDK	985740
Sorptionsfilter Kalk	5379341
Wärmetauscher	3472211
SCR	7150914
Saugzug	483033
Abgaskanal	412261
Kompressorstation	79165
<b>Summe</b>	<b>17962666</b>

**KEA<sub>H</sub> für Trockensorption, nachgeschaltetem Wäscher und SNCR-Verfahren (V3)**

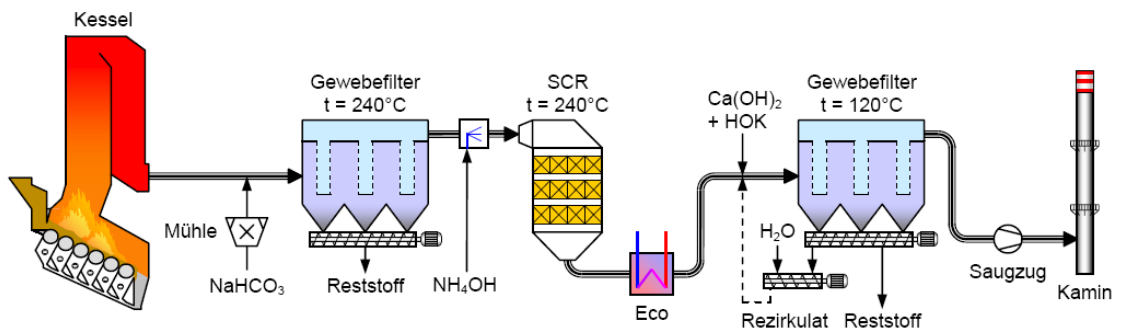


**Abb.9** Konditionierte Trockensorption mit Kalkhydrat und nachgeschaltetem Wäscher, Abgasentstickung mit SNCR-Verfahren; ½ Emissionsgrenzwerte nach 17. BImSchV, NO<sub>x</sub> ≤ 100 mg/m<sup>3</sup><sub>i.N. tr.</sub>

**Tabelle 7:** KEA<sub>H</sub> für eine konditionierte Trockensorption mit Kalkhydrat, nachgeschalteten Wäscher und SNCR-Verfahren (V3)

Komponente	KEA <sub>H</sub> [MJ]
SNCR	347371
Sprühabsorber	2413392
Sorptionsfilter Kalk	5379341
Wäscher	5467852
Saugzug	483033
Abgaskanal	366454
Kompressorstation	79165
<b>Summe</b>	<b>14536608</b>

## KEA<sub>H</sub> für eine zweistufige Trockensorption mit Kalkhydrat und Bicarbonat SCR-Verfahren (V4)

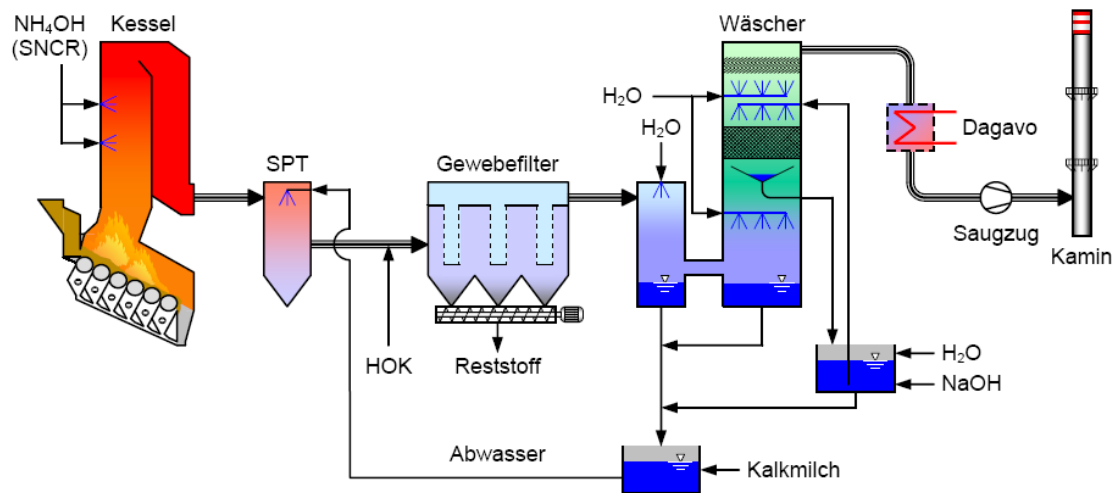


**Abb.10** Zweistufige Trockensorption mit Bicarbonat und Kalkhydrat, zwischengeschaltete Abgasentstickung mit SCR-Verfahren; ½ Emissionsgrenzwerte nach 17. BImSchV,  $\text{NO}_x \leq 70 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N. tr.}}$

**Tabelle 8:** KEA<sub>H</sub> für eine zweistufige Trockensorption mit Kalkhydrat und Bicarbonat und SCR-Verfahren (V4)

Komponente	KEA <sub>H</sub> [MJ]
Sorptionsfilter Bicar	5327751
SCR	7150914
Sorptionsfilter Kalk	5379341
Saugzug	483033
Abgaskanal	458067
Kompressorstation	79165
<b>Summe</b>	<b>18878272</b>

**KEA<sub>H</sub> für einen zweistufigen Wäscher mit Sprühtrockner, Gewebefilter und SNCR-Verfahren (V5)**



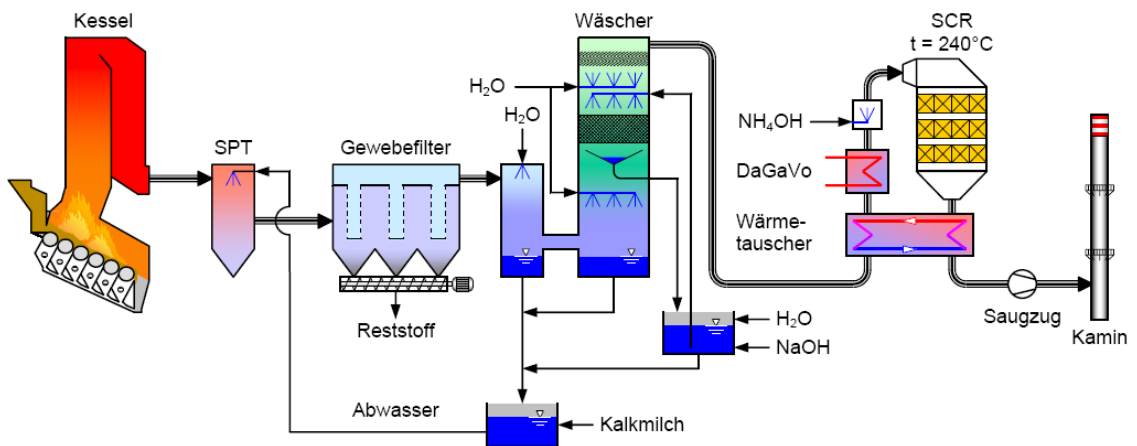
**Abb.11** Zweistufige Abgaswäsche mit vorgeschaltetem Sprühtrockner (SPT), Gewebefilter und SNCR-Verfahren;  $\frac{1}{2}$  Emissionsgrenzwerte nach 17. BImSchV,  $\text{NO}_x \leq 100 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N. tr.}}$

**Tabelle 9:** KEA<sub>H</sub> für einen zweistufigen Wäscher mit vorgeschaltetem Sprühtrockner, Gewebefilter und SNCR-Verfahren (V5)

Komponente	KEA <sub>H</sub> [MJ]
SNCR	347371
Sprühabsorber	2413392
Gewebefilter	4991284
Wäscher	5467852
Saugzug	483033
Abgaskanal	366454
Kompressorstation	79165
<b>Summe</b>	<b>14148552</b>



## KEA<sub>H</sub> für einen zweistufigen Wäscher mit Sprühtrockner, Gewebefilter und SCR-Verfahren (V6)



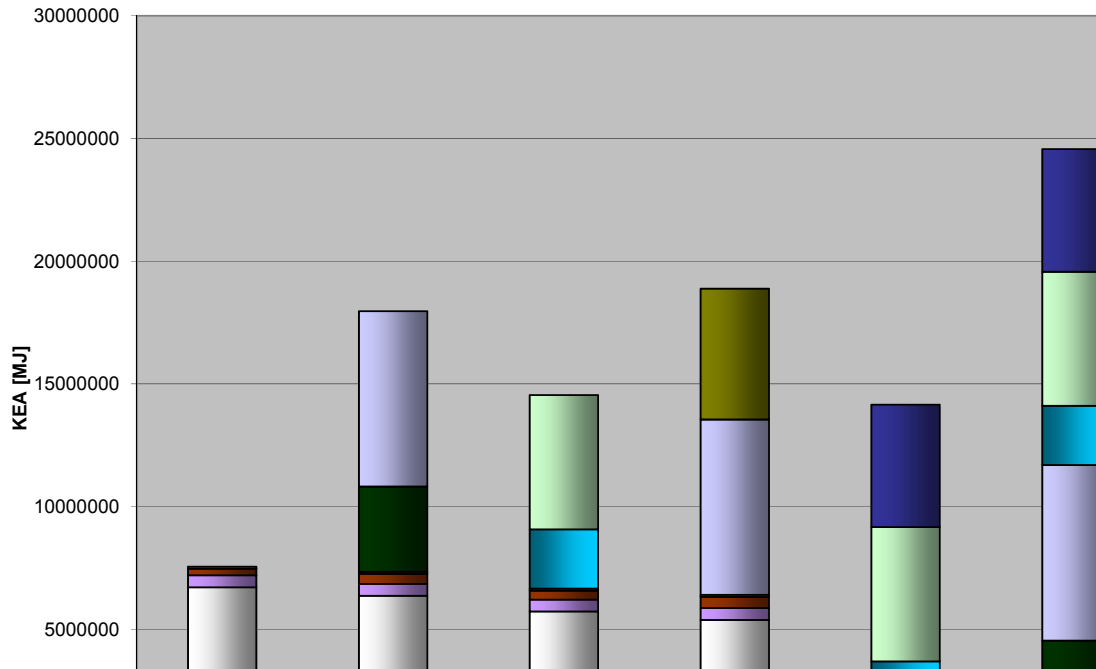
**Abb.12** Zweistufige Abgaswäsche mit vorgeschaltetem Sprühtrockner (SPT), Gewebefilter und SCR-Verfahren; ½ Emissionsgrenzwerte nach 17. BImSchV,  $\text{NO}_x \leq 70 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N. tr.}}$

**Tabelle 10:** KEA<sub>H</sub> für einen zweistufigen Wäscher mit vorgeschaltetem Sprühtrockner, Gewebefilter und SCR-Verfahren (V6)

Komponente	KEA <sub>H</sub> [MJ]
Sprühabsorber	2413392
Gewebefilter	4991284
Wäscher	5467852
Wärmetauscher	3472211
SCR	7150914
Saugzug	483033
Abgaskanal	503874
Kompressorstation	79165
<b>Summe</b>	<b>24561727</b>

In Abb.13 sind die KEA<sub>H</sub>'s der Einzelkomponenten der jeweiligen Abgasreinigungssysteme (Varianten 1 - 6) im Vergleich auf Basis der Tabellen 4 bis 9 dargestellt. Die Position „Kompressorstation“ ist aufgrund des geringen Wertes in der Säulendarstellung nicht erkennbar. Wie zu erwarten sind für Variante 1 die geringsten Energieaufwendungen zu erbringen. Dagegen sticht Variante 6 mit einem mehr als 3fachen Energieaufwand hierzu von 24.561.727 MJ hervor. Variante 4 bietet als zweistufiges Verfahren inkl. SCR-Anlage zur Erreichung kleinster NO<sub>x</sub>-Emissionen ( $\leq 70 \text{ mg/m}^3$ ) die geringsten Energieaufwendungen in der Herstellung im Vergleich zu den übrigen Varianten. Gespiegelt an der in Abb.1 dargestellten Verfahrensmatrix

weist Variante 5 gegenüber Variante 3 zur Sicherstellung der Emissionsanforderungen im linken oberen Quadranten geringfügig geringere Energieaufwendungen auf.



**Abb.13** KEA<sub>H</sub>'s der Einzelkomponenten der jeweiligen Abgasreinigungssysteme (Varianten 1 - 6) im Vergleich auf Basis der Tabellen 5 bis 10

#### 4.4 Wirkabschätzungen der KEA<sub>H</sub> für die verschiedenen Abgasreinigungssysteme

Um eine Einschätzung und Verhältnismäßigkeit der kumulierten Energieaufwendungen für die Herstellung (KEA<sub>H</sub>) der Abgasreinigungssysteme zu bekommen, werden so genannte Wirkabschätzungsfaktoren ermittelt.

##### Erntefaktor für die Herstellung

Der *Erntefaktor für die Herstellung*  $EF_H$  ist das Verhältnis zwischen Nettostromerzeugung und dem Kumulierten Energieaufwand für die Herstellung und ergibt sich als Quotient aus der physikalischen Nettostromerzeugung  $W_{netto,phys}$  während der Lebensdauer einer energiewandelnden Anlage und dem Kumulierten Energieaufwand für deren Herstellung  $KEA_H$ . Der Erntefaktor für die Herstellung  $EF_H$

stellt somit ein Maß für die energetischen Investitionen dar, die für die Stromerzeugung vorgeleistet werden müssen.

$$EF_H = \frac{W_{netto,phys}}{KEA_H} \quad (4.2)$$

Bei einem mittleren Heizwert ( $H_U$ ) des Abfalls von 11.000 MJ/Mg<sub>Abfall</sub>, einem spezifischen Abgasvolumenstrom von 4.600 m<sup>3</sup><sub>i.N.tr.</sub>/Mg<sub>Abfall</sub>, elektrischen Wirkungsgrad von  $\eta = 23\%$  und einer Lebensdauer von 20 Jahren mit 8.000 Betriebsstunden pro Jahr ergeben sich für die o.g. Varianten die in Tabelle 11 angegeben Erntefaktoren für die Herstellung.

**Tabelle 11:**  $EF_H$  für die in Kap. 4.3 beschriebenen Abgasreinigungssystemen

Variante	KEA <sub>H</sub> [MJ]	Energieinhalt Abfall [MJ/h]	Nettostrom-erzeugung [MJ/h]	Nettostrom-erzeugung [MJ/20 a]	EF <sub>H</sub>
1	7.549.491	239.130	50.217,30	8.034.768.000	1.064
2	17.962.666				447
3	14.536.608				553
4	18.878.272				426
5	14.148.552				568
6	24.561.727				327

### Energetische Rentabilitätsdauer für die Herstellung

Die *energetische Rentabilitätsdauer für die Herstellung*  $ER_H$  ist das Verhältnis zwischen dem Kumulierten Energieaufwand für die Herstellung  $KEA_H$  und des effektiv genutzten Energiestroms  $Q_{eff.}$ , ermittelt aus dem Energieinhalt des Brennstoffs (Abfall) unter Berücksichtigung des Brennstoffwirkungsgrades (gesamten energetischen Wirkungsgrades der energiewandelnden Anlage).

$$ER_H = \frac{KEA_H}{Q_{eff.}} \quad (4.3)$$

Unter den o.g. Voraussetzungen und einem energetischen Wirkungsgrad von 60% (Verwerterstatus) ergeben sich folgende energetische Rentabilitätszeiten (vgl. Tabelle 12)

**Tabelle 12:** ER<sub>H</sub> für die in Kap. 4.3 beschriebenen Abgasreinigungssystemen

Variante	KEA <sub>H</sub> [MJ]	eff. genutzter Energiestrom [MJ/h]	ER <sub>H</sub> [h]	ER <sub>H</sub> [d]
1	7.549.491	14.3478	52,62	2
2	17.962.666		125,60	5
3	14.536.608		101,32	4
4	18.878.272		131,98	5
5	14.148.552		130,99	4
6	24.561.727		203,97	7

## 5 Zusammenfassung / Ausblick

In Abhängigkeit der einzuhaltenden Emissionsgrenzwerte sowie den Standortinfrastrukturen kommen ganz unterschiedliche Abgasreinigungssysteme zum Einsatz. Die Bandbreite erstreckt sich von einstufigen simultanen bis hin zu mehrstufigen selektiv wirkenden Verfahren. Neben den verfahrenstechnischen Grundlagen zur Abscheidung der jeweiligen Schadstoffe sind auch die Grenzen der Einsatzmöglichkeiten der einzelnen Verfahren beschrieben. Mit Hilfe von Verfahrensmatrizen wird eine qualitative Entscheidungshilfe zur möglichen Verfahrensauswahl angeboten. In ähnlicher Weise werden auch die Betriebs- und Hilfsstoffe in Abhängigkeit der einzelnen Abgasreinigungskomponenten aufgezeigt.

Im Rahmen einer ganzheitlichen Untersuchung von Abgasreinigungsanlagen hinter Abfallverbrennungsanlagen werden die Energieaufwendungen mit Hilfe von Kennzahlen wie z. B. dem kumulierten Energieaufwand (KEA) in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4600 ermittelt und gegenübergestellt. Der Kumulierte Energieaufwand gibt die Gesamtheit des primärenergetischen bewerteten Aufwands an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Gutes (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann. Dieser Energieaufwand stellt die Summe der Kumulierten Energieaufwendungen für die Herstellung (KEA<sub>H</sub>), die Nutzung (KEA<sub>N</sub>) und die Entsorgung (KEA<sub>E</sub>) des ökonomischen Gutes dar.

Die vorliegende Ausarbeitung befasst sich ausschließlich mit den Kumulierten Energieaufwendungen für die Herstellung ( $KEA_H$ ) von Abgasreinigungssystemen. Als Grundlage hierfür dienen Energie- und Stoffbilanzen der jeweiligen Prozesse. Zunächst wurden für die jeweiligen Anlagenkomponenten z.B. Elektrofilter, Wäscher, Entstickungsanlagen, usw. eine Auflistung der Bauteile und Halbzeuge erstellt und in die Bereiche Apparate- u. Stahlbau, Bauleistung/Bodenplatte und Elektroinstallation aufgeteilt. Der Komponentenumfang wurde so vorgenommen, dass ein autarker Anlagenbetrieb gewährleistet ist. Das bedeutet, dass z.B. bei dem Sorptionsfilter neben den Staubfördersystemen auch ein Additiv- und Reststoffsilo sowie Zwischenbehälter oder bei den Wäschern neben den Pumpen ebenso Vorlage-/Neutralisationsbehälter Berücksichtigung fanden.

Gespiegelt an den Leistungsfähigkeiten der einzelnen Verfahrensstufen, werden sechs Varianten bewertet und zur Diskussion gestellt. Diese stehen beispielhaft für sicherlich noch viele andere Abgasreinigungskonzepte und erheben keinen Anspruch auf Ausschließlichkeit.

Um eine Einschätzung und Verhältnismäßigkeit der kumulierten Energieaufwendungen für die Herstellung ( $KEA_H$ ) der Abgasreinigungssysteme zu bekommen, werden so genannte Wirkabschätzungsfaktoren wie der Erntefaktor und die energetische Rentabilitätsdauer ermittelt.

Die für die sechs betrachteten Abgasreinigungssysteme ermittelte energetische Rentabilitätsdauer beläuft sich auf lediglich zwei bis sieben Tage. Aus diesem Grund ist zu erwarten, dass die zur Herstellung aufgewendete Energie nur ein Bruchteil gegenüber des sich einstellenden Kumulierten Energieaufwands während der Nutzung ( $KEA_N$ ) betragen wird.

Die Energieaufwendungen für die Nutzung sowie für die Entsorgung der Abgasreinigungsanlagen werden im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung, in Abhängigkeit der Abscheidegrade und unterschiedlichen Emissionswerten, in einer weiterführenden Untersuchung ermittelt und diskutiert.

## 6 Literatur

- [1] Mauch, Wolfgang: kumulierter Energieaufwand für Güter und Dienstleistungen – Basis für Ökobilanzen; Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik, Technische Universität München, IfE Schriftenreihe Heft 26, Resch Verlag 1993
- [2] Weber, S.; Wagner, H.-J.: CO<sub>2</sub>-Abscheidung mittels Aminwäsche; Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft, Ruhr-Universität Bochum, BWK Bd. 61, Springer-Verlag 2009
- [3] Karpf, Rudi: Welches Rauchgasreinigungsverfahren ist das Richtige? Antworten auf sich ändernde Schadstoffkonzentrationen in Abfall- und Ersatzbrennstoffverbrennungsanlagen, VGB PowerTech 12/2008
- [4] K.M. Allal; D.-J. Dolignier; G. Martin: Reaction mechanism of calcium hydroxide with gaseous hydrogen chloride. Revue de L'Institut Français du Pétrole; Vol. 53, Nr.6, Nov.-Dec. 1998
- [5] Neumann, P.; Schmidt, K.G.: Abscheidung von Quecksilber an Aktivkohlen, IUTA-Workshop „Quecksilber in Verbrennungsanlagen“ 10./11.11.1992
- [6] Kleine-Möllhoff, P.; Kürzinger, K.; Pfannes, G.; Lungwitz, H.: Quecksilberabscheidung mit Hilfe des Flugstromverfahrens hinter Klärschlammverbrennungsanlagen – Neue Erkenntnisse, IUTA-Workshop 25.10.1994
- [7] Keldenich, K.: Sorption von Quecksilber und anderen Schwermetallen an Aktivkohlen für die Reinhaltung von Wasser und Luft, Dissertation Universität-Gesamthochschule Essen, 1989
- [8] Pacher, Ch.; Mocker, M.; Weber-Blaschke, G.; Faulstich, M.: Ökologischer Vergleich der Sorptionsmittel Calciumhydroxid und Natriumhydrogencarbonat, Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M. (Hrsg.), Energie aus Abfall, Band 6, Seite 331-356, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky , Neuruppin, 2009
- [9] GEMIS – GEMIS-Datenbank (2007): Herstellung von Branntkalk, Calciumhydroxid und Natronlauge

- [10] VDI-Richtlinie 4600, Kumulierter Energieaufwand – Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden; Beuth-Verlag Berlin, Juni 1997
  
- [11] de Almeida, et al.: EUP Lot 11 Motors, Final Report; ISR- University of Coimbra (Portugal), 18. Februar 2008
  
- [12] Umweltbundesamt; Öko-Institut: Probas-Datenbank, Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente, 2007; [www.probas.umweltbundesamt.de](http://www.probas.umweltbundesamt.de)
  
- [13] Herrmann, Constantin: Die EuP Direktive und Wettbewerbsvorteile durch Energieeffizienz und Ecodesign; PE INTERNATIONAL GmbH, Stuttgart