

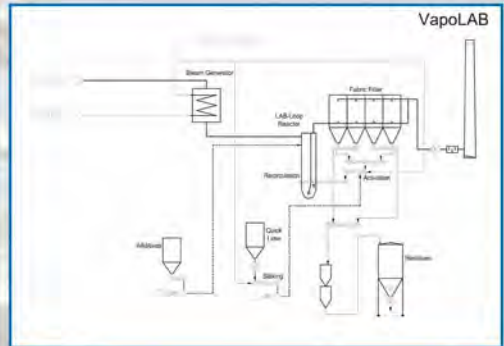


## LAB.....Führend in der Rauchgasreinigung

**LAB** hat als eine der ersten Firmen maßgeblich die Entwicklung schlüsselfertiger Rauchgasreinigungsanlagen, insbesondere in der thermischen Entsorgungswirtschaft betrieben und sich durch innovative Technik und zuverlässige Komponenten schnell einen guten Ruf erworben. Als Anlagenbauer 1953 in Frankreich gegründet, entwickelt und fertigt das in Lyon, La Seyne und seit 1998 in Stuttgart ansässige Unternehmen seit 60 Jahren schlüsselfertige Rauchgasreinigungsanlagen für Waste-to-Energy und Kraftwerke (REA) und ist in diesem Bereich mit weit über 300 aktuellen Referenzen einer der Marktführer in Europa und weltweit. Heute ist **LAB** ein Unternehmen der Groupe CNIM mit Stammsitz in Paris; daneben existieren weltweit Niederlassungen und Beteiligungen.

**LAB** verfügt über ein vollständiges Portfolio eigener Verfahren und bietet projektspezifisch an die jeweiligen Parameter angepasst das für die Aufgabe sinnvollste Verfahren an. Dabei wird zur Sauer gasabscheidung die Trockensorption mit Kalk oder Bikarbonat ebenso berücksichtigt wie Quasitrocken-, Nasswasch- oder mehrstufige und kombinierte Verfahren. Ebenso werden katalytische Entstickungsverfahren geplant und realisiert. In der Regel werden alle Verfahren im Hause entwickelt und teils patentiert, wie z.B. das neue **VapoLAB**- Verfahren, das die Leistungsfähigkeit, die Wirtschaftlichkeit und insbesondere die Energieeffizienz von Trockensorptionsverfahren noch einmal deutlich steigert.

Das Liefer- und Leistungsspektrum von **LAB** umfasst die Projektierung, Auslegung und Realisierung von schlüsselfertigen Anlagen zur Rauchgasreinigung für Waste-to-Energy und Entschwefelung von Kraftwerken sowie Wartung und Instandhaltung eigener und anderer Anlagen.



**LAB** bietet Ihnen aus einer Hand qualifizierte Beratung, die Auslegung der einzelnen Komponenten der Rauchgasreinigung, schlüsselfertige Lieferung und Montage, Inbetriebsetzung, erstellt nach Ihren Vorgaben hierfür die Dokumentation und führt Schulungen für Ihr zukünftiges Betriebspersonal durch.

Auszug aus den aktuellen Referenzen von **LAB**:

- Amagerforbrænding Kopenhagen (DK)
- Kara Roskilde (DK)
- SWDWP Devonport (GB)
- Eesti Energia AS Tallinn (EST)
- Solvay Dombasles (F)
- Westenergy Vaasa (FIN)
- Vantaan Energy Helsinki (FIN)
- Indaver - Meath (IRL)
- WRG-FCC Lincolnshire (GB)
- Viridor Oxfordshire (GB)
- VESS Ltd Staffordshire (GB)
- Sita UK Suffolk (GB)
- Viridor Trident Park Cardiff (GB)

# Darstellung verschiedener Möglichkeiten zur Reinigung von Abgasen aus Abfallverbrennungsanlagen

Christian Fuchs

1.	Beweggründe .....	559
2.	Technische Verfahren zur Reinigung von Abgasen, die derzeit zur Verfügung stehen .....	560
3.	Beschreibung der verschiedenen technischen Verfahren .....	560
3.1.	Das Trockensorptionsverfahren .....	560
3.2.	Das Quasitrockenverfahren .....	563
3.3.	Das Nasswaschverfahren .....	565
3.4.	Das Hybridverfahren .....	567
4.	Kriterien für die Auswahl des Verfahrens zur Abgasreinigung .....	568
4.1.	Technische Kriterien .....	569
4.2.	Kriterien in Hinsicht auf die Wirtschaftlichkeit .....	572
5.	Resumé .....	573

## 1. Beweggründe

Dies ist eine Darstellung und ein Vergleich der verschiedenen, derzeit zur Verfügung stehenden technologischen Verfahren zur Reinigung von Abgasen, die bei der Verbrennung von Abfall und Ersatzbrennstoffen (RDF) entstehen.

Die Entwicklung eines jeden dieser technischen Verfahren ist abgeschlossen und sie alle werden bereits seit Jahren eingesetzt, sowohl in Deutschland als auch in anderen Ländern Europas und in den meisten Fällen haben sich ihre Verlässlichkeit und ihre Effizienz erwiesen. Alle erfüllen die gesetzlich erforderlichen Standards für Emissionen.

Es gibt dennoch Unterschiede: Manche der technischen Verfahren sind effizienter oder wirtschaftlicher als andere oder sie verarbeiten bestimmte Abgasanteile besser als andere usw.

Im Folgenden werden diese verschiedenen, heute zur Verfügung stehenden technologischen Verfahren im Einzelnen dargestellt, mit ihren jeweiligen Vor- und eventuellen Nachteilen bzw. den Grenzen ihrer Einsetzbarkeit.

Ziel dieser Aufstellung ist es nicht, detaillierte Empfehlungen für eines der dargestellten technischen Verfahren abzugeben, um es als das Beste hervorzuheben. Jede der dargestellten Möglichkeiten kann unter bestimmten Voraussetzungen die jeweils beste Variante sein.

Das Ziel ist es aufzuzeigen, dass jedes einzelne Projekt einer sehr genauen Analyse der Umstände und Bedingungen unterzogen werden muss, bevor man sich für eines der verschiedenen technischen Verfahren entscheiden kann.

## 2. Technische Verfahren zur Reinigung von Abgasen, die derzeit zur Verfügung stehen

Dieser Beitrag beschränkt sich auf die technischen Verfahren zur Neutralisierung von Abgasanteilen an sauren Gasen, wie z.B. Schwefeloxide ( $\text{SO}_x$ ), HCl und HF. Schwermetalle, Dioxine/Furane oder Stickoxide verlangen andere Verfahren, die mit denen zur Neutralisierung von sauren Gasen kombiniert oder die zusätzlich hinzugefügt werden müssen.

Zur Neutralisierung von sauren Gasen werden normalerweise alkalische Sorptionsmittel in das Abgas eingeleitet. Prinzipiell werden die technologischen Verfahren zur Reinigung von Abgasen in drei Kategorien unterteilt: trockene, halbtrockene und nasse Vorgehensweise. Dazwischen existieren eine ganze Reihe von *Hybridverfahren*, die einzelne Elemente dieser unterschiedlichen Verfahren zu mehrstufigen Reinigungsverfahren kombinieren. Mehrstufige Reinigungsverfahren kombinieren die Vorteile unterschiedlicher technischer Verfahren, entweder in wirtschaftlicher Hinsicht (Kosten) oder zur Erhöhung der Effizienz.

Verschiedene reaktive Sorptionsmittel, können je nach Reinigungsverfahren eingesetzt werden:

- Bei Trockenverfahren kommen entweder gelöschter Kalk oder Natriumbikarbonat (eigentlich Natriumhydrogenkarbonat) zum Einsatz
- Halbtrockene Verfahren nutzen ungelöschten Kalk
- Nasse Verfahren setzen Natronlauge, ungelöschten Kalk oder Kalkstein ein.

## 3. Beschreibung der verschiedenen technischen Verfahren

### 3.1. Das Trockensorptionsverfahren

Der Aufbau des Trockensorptionsverfahrens basierend auf Kalkhydrat wird nachstehend wie folgt beschrieben (dem Abgasstrom folgend):

- Optional kann eine Kühlung eingebaut werden, mit deren Hilfe die Abgase schneller auf die Reaktionstemperatur eingestellt werden und die den Feuchtigkeitsgehalt des Gases erhöht oder es kann als Alternative ein Wärmeaustauscher installiert

werden, der das Abgas auf die gewünschte Temperatur bringt, wobei gleichzeitig eine signifikante Menge an Niederdruckdampf entsteht, die zu einer weiteren Nutzung geeignet ist (VapoLAB Technologie).

- Ein Reaktor zur intensiven Vermischung von Sorptionsmitteln und Gas.
- Ein Gewebefilter, um Flugaschen und Sorptionsmittel aus dem Abgasstrom herauszufiltern.
- Optional können die Filtrerrückstände nochmals rezirkuliert werden, um die Effizienz des Verfahrens zu erhöhen.
- Ein Ventilator der den Abgasstrom von der Verbrennung zum Kamin leitet.
- Ein Kamin.
- Benötigt werden auch periphere Einrichtungen, wie ein Lager und die Anlage zur Aufbereitung der Sorptionsmittel, ein Lager für die Rückstände, und eine Station zur Aufbereitung der Druckluft.

Um die Sauer gasbestandteile der Abgase abzuscheiden, werden Additive wie Kalkhydrat oder Natriumbikarbonat in die Abgase eingeleitet und es wird eine gründliche Mischung durch statische oder mechanische Verwirbelungseinrichtungen vorgenommen. Die Effizienz der Reaktion zwischen den sauren Gasen und den Sorptionsmitteln ist abhängig von der Kontaktzeit, der Verteilung der Sorptionsmittel im Abgasstrom, der Temperatur und dem Feuchtigkeitsgehalt. Alle Versuche von Anlagenbauern und Betreibern von Anlagen ein Trockensorptionsverfahren so gut als möglich zu optimieren, gründen auf Variationen der zuvor benannten Bedingungen.

Ein Verdampfungskühler stellt die optimale Temperatur zur Reaktion mit dem Kalkhydrat her, sie liegt bei etwa 140 °C, und es handelt sich dabei um den besten Kompromiss zwischen der Effizienz der chemischen Reaktion und der Sicherheitsdistanz zum Säuretaupunkt, der je nach dem Gehalt an HCl in dem Gasgemisch variiert.

Sekundäreffekt ist, dass der relative Feuchtigkeitsgehalt des Abgases durch die Verdunstung von Wasser erhöht wird, auch das ein sehr positiver Effekt in Hinsicht auf die Effizienz des Verfahrens. Wasser (z.B. als Dampf) ist essentieller Bestandteil für die chemische Reaktion von sauren Gasen mit Kalkhydrat.

Alternativ kann zur Kühlung des Abgases auf die Reaktionstemperatur ein Wärmeaustauscher eingesetzt werden, um zusätzliche Energie aus der Verbrennung zurückzugewinnen. Dadurch wird eine bessere Wärmeeffizienz des gesamten Verbrennungsverfahrens erreicht. Der dabei entstandene Dampf kann in den Kesselkreislauf eingeleitet oder als Fernwärme zur Beheizung von Häusern genutzt werden oder er wird für das VapoLAB-Verfahren eingesetzt, das später beschrieben wird.

Der Einfluss von Reaktionszeit und Additiv-Partikelverteilung im Abgas erklärt sich von selbst. Um über diese Faktoren eine bessere Effizienz zu erreichen, gibt es verschiedene Komponenten, die zwischen der Eindüsung der Additive und dem Filter eingesetzt werden können, wie z.B. statische Mixer, Verwirbelungsgeneratoren und mechanische Reaktoren.

Die Rezirkulation von Flugaschen und Reaktionssalzen, die von dem Gewebefilter ausgefiltert wurden, hat einen enormen Einfluss auf die Effizienz des Trockensorptionsverfahrens. Ein hoher Prozentsatz der eingedüsten Menge an Sorptionsmittel kann in der Zeit zwischen Eindüsung und Herausfiltern durch den Gewebefilter nicht reagieren. Ein entsprechend hoher Anteil an unverändertem, reaktionsfähigem Sorptionsmittel findet sich noch in der Filterasche. Dieser Anteil an noch reaktivem Kalkhydrat im Verhältnis zu der eingedüsten Menge ergibt das stöchiometrische Verhältnis des Verfahrens. Falls die gesamte Menge an gelöschtem Kalk reagiert hat und kein freier Kalk in den Rückständen nachweisbar ist, beträgt das stöchiometrische Verhältnis 1. Normalerweise pendelt das stöchiometrische Verhältnis für Trockensorptionsverfahren zwischen 2 und 3, was davon abhängt, ob es Rezirkulation gibt und ob eine zusätzliche Befeuchtung des Rezirkulats (Wassereinspritzung) durchgeführt wird. Die besten stöchiometrischen Verhältnisse können mit der Dampfendüsung in die Rezirkulation der Rückstände erreicht werden, womit ein Wert von annähernd 1,4 erreicht wird.

Die Rezirkulation hat aber noch einen weiteren positiven Zusatzeffekt: Bei der Verbrennung von Hausmüll oder Ersatzbrennstoffen (RDF) sind die Konzentrationen von sauren Gasen im Abgas niemals konstant: es kann immer zu erhöhten Konzentrationspeaks kommen. Die Rezirkulation hat den Vorteil, dass die zur Reaktion zur Verfügung stehende Menge an Sorptionsmittel im Abgasstrom um Faktoren erhöht wird – darum sind diese Verfahren in Hinsicht auf die Stabilität und die Vermeidung von Peaks sehr viel besser als Verfahren ohne Rezirkulation.

Bei bestimmten Anwendungen kann auch die Benutzung von Natriumbikarbonat statt Kalkhydrat als Sorptionsmittel angeraten sein.

Hier ist in den meisten Fällen, vor allem in bereits existierenden Anlagen, eine Kühlung erforderlich, um eine Reaktionstemperatur von annähernd 170° bis 180° zu erreichen. Diese Anforderung entsteht nicht aufgrund des Einsatzes von Natriumbikarbonat als Sorptionsmittel, sondern es sind andere Verfahrensschritte, die solche Anforderungen stellen, wie z.B. der zusätzliche Einsatz von Aktivkohle zur Schwermetall, Quecksilber und Dioxin/Furanabscheidung, durch den eine Temperatur von annähernd 200 °C nicht überschritten werden darf.

Natriumbikarbonat ist hochreaktiv, muss aber an Ort und Stelle zu einem sehr feinen Pulver frisch vermahlen werden, um diese hohe Reaktivität zu erreichen. Deshalb werden Mahlstationen mit zwei oder drei Spezialmühlen benötigt, so dass selbst bei Höchstanforderungen immer eine Reservemühle zur Verfügung steht, die bei Normalbetrieb im Fall von regelmäßigen Reinigungen und für ungeplante Ausfälle alternativ eingesetzt werden kann.

Wird das frisch gemahlene Pulver in den heißen Gasstrom eingeleitet reagiert Natriumhydrogenkarbonat zu Natriumbikarbonat, indem das Wasser entzogen wird. Hier zeigt sich, dass im Verlauf dieses technischen Verfahrens weniger Rückstände entstehen, als bei dem vergleichbaren Verfahren auf Kalkhydratbasis.

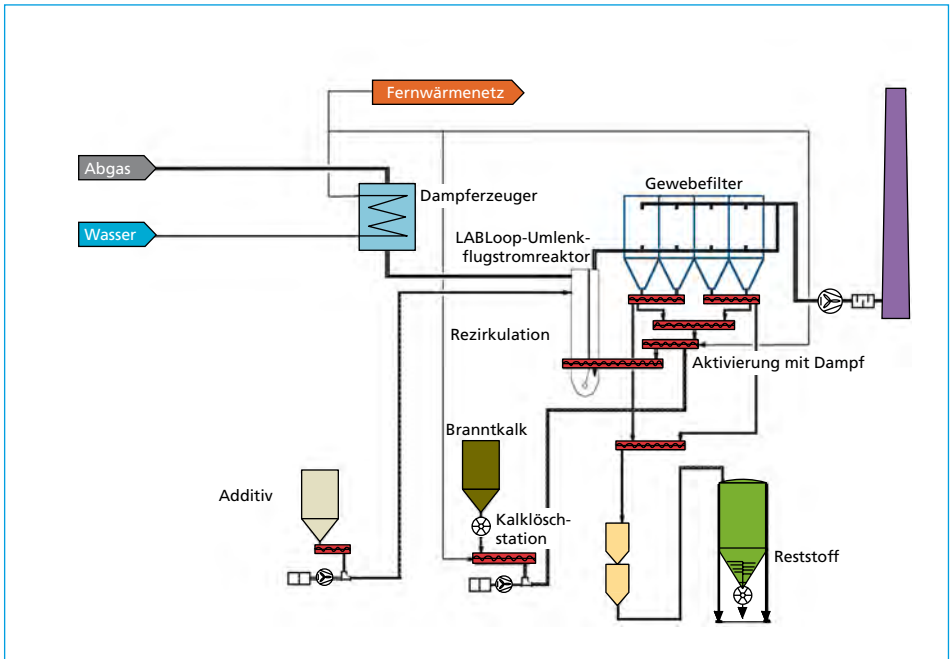


Bild 1: Verfahrensschema Trockensorptionsverfahren, hier: VapoLAB

### 3.2. Das Quasitrockenverfahren

Das Quasitrockenverfahren arbeitet mit ungelöschtem Kalk als Sorptionsmittel, der billiger ist als gelöschter Kalk und der, da er kein Wasser enthält, 30 Prozent mehr reaktives Material bietet. Das Ablöschen kann unabhängig vom Verfahren selbst und vor Ort durchgeführt werden, um eine verdünnte Kalksuspension (Kalkmilch) herzustellen, die aus gelöschtem Kalk und Wasser besteht.

Der Aufbau des Quasitrockenverfahrens basierend auf ungelöschtem Kalk wird nachstehend wie folgt beschrieben (dem Abgasstrom folgend):

- Um die Abgase auf die optimale Reaktionstemperatur von etwa 140 °C zu kühlen, wird das Sprühabsorptionsverfahren eingesetzt und gleichzeitig wird verdünnte Kalksuspension (Kalkmilch) eingespritzt, um in einem ersten Verfahrensschritt die Menge an sauren Komponenten des Abgases zu reduzieren.
- Ein Reaktor, um Sorptionsmittel und Gas intensiv miteinander zu vermischen und um zusätzliche Sorptionsmittel wie z.B. Aktivkohle und auch Kalkhydrat beizumengen, so dass in einem zweiten Verfahrensschritt die Menge an sauren Bestandteilen weiter reduziert wird.
- Ein Gewebefilter, um Flugaschen und Sorptionsmittel aus dem Abgasstrom herauszufiltern.

- Optional können die Filtrerrückstände nochmals rezirkuliert und angefeuchtet werden, um die Effizienz des Verfahrens zu erhöhen.
- Ein Ventilator der den Abgasstrom von der Verbrennung zum Kamin leitet.
- Der Kamin.
- Benötigt werden auch periphere Einrichtungen, wie ein Lager und die Anlage zur Aufbereitung der Sorptionsmittel, ein Lager für die Rückstände, und eine Station zur Aufbereitung der Druckluft.

Alle Konditionen, die bereits in dem Kapitel über das *Trockensorptionsverfahren* angesprochen worden sind, müssen vollumfänglich auch bei dem quasitrockenen Sorptionsverfahren beachtet werden. Es handelt sich dabei um die Verweildauer, die Temperatur, den Gehalt an Feuchtigkeit und die Rezirkulation.

Hauptunterschied zwischen den beiden Verfahren ist, dass es sich in diesem Fall statt um ein Pulver um eine Suspension handelt, welche in die Abgase eingeleitet wird und durch das Verdampfen erhöht sich der Gehalt an Feuchtigkeit in den Abgasen. Die Verdampfung bewirkt eine extreme Erhöhung der relativen Feuchte auf den Partikeln. Unter diesen Bedingungen werden die Reaktionen und Zwischenreaktionen des Calciums mit HCl-Molekülen verbessert. In durchgetrocknetem Zustand kommt es weiterhin zu Reaktionen zwischen den Sorptionsmitteln und den sauren Bestandteilen, wie beim ganz normalen Trockensorptionsverfahren. Allgemein lässt sich feststellen, dass quasitrockene Verfahren effektiver sind als Trockenverfahren, denn sie haben einen zusätzlichen Reaktor, der höhere Eintrittskonzentrationen von sauren Schadgasen erlaubt.

Die Dimensionierung des Sprühabsorbers sollte für eine komplette Durchtrocknung der Suspension ausreichen, so dass trockene Partikel entstanden sind. Normalerweise ist das nach einer Verweilzeit von etwa 20 Sekunden erreicht, was ebenfalls zusätzliche Reaktionszeit ist.

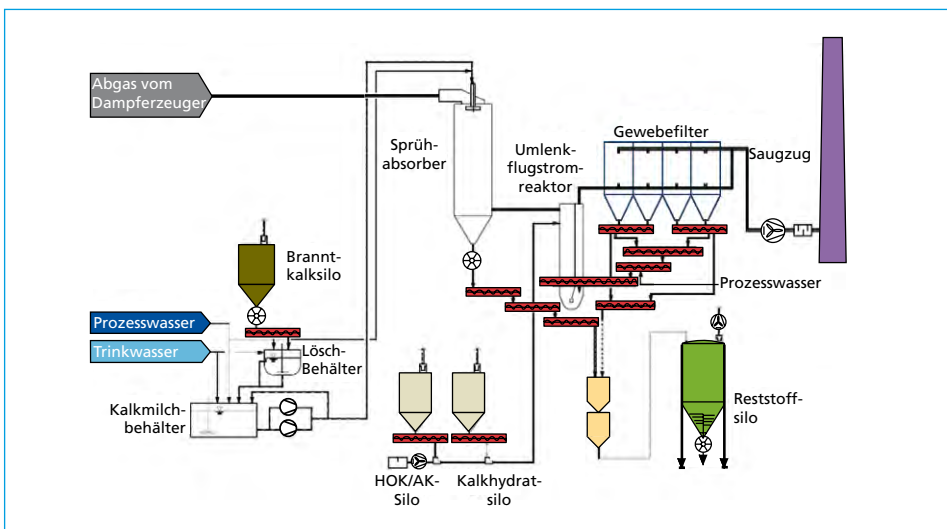


Bild 2: Verfahrensschema Quasitrockenverfahren (SemiSecoLAB)

Die Austrittstemperatur des Sprühabsorbers liegt normalerweise wie bei allen kalkbasierenden Verfahren bei etwa 140 °C, um einen sicheren Abstand zum Säuretaupunkt zu bewahren.

Flüchtige Schwermetalle und Dioxine/Furane werden sowohl mit Hilfe des trockenen als auch des Quasitrockenen Sorptionsverfahrens effizient durch das Eindüsen von Aktivkohle herausgefiltert.

### 3.3. Das Nasswaschverfahren

Das Nasswaschverfahren arbeitet mit ungelöschtem Kalk, Natronlauge oder Kalkstein als Sorptionsmittel, je nach Art des Einsatzes und Abscheideaufgabe. Verbrennungsanlagen von Abfall und Ersatzbrennstoffen arbeiten normalerweise mit ungelöschtem Kalk, denn dieses Reagens ist ein guter Kompromiss zwischen Leistung, zusätzlicher Anstrengung das Sorptionsmittel aufzubereiten und Preis. Verbrennungsanlagen für Sondermüll und Klärschlamm benutzen Natronlauge, denn diese Anlagen benötigen eine hohe Abscheideleistung und sie sind meist relativ klein, was bedeutet, dass der absolute Verbrauch der kostspieligen Natronlauge niedrig ist. Kraftwerke, die in einer Stunde Tonnen von Sorptionsmitteln für die Entschwefelung verbrauchen, beschränken sich auf den Einsatz von Kalkstein, der weithin verfügbar und billig ist.

Der Aufbau des Nasswaschverfahrens wird nachstehend wie folgt beschrieben (dem Abgasstrom folgend):

- Eine Entstaubung durch elektrostatische Fällung ist optional.
- Ein Sprühtrockner zur Eindampfung der Abschlammung der Reaktionssalze.
- Ein Gewebefilter.
- Eine Quench, um die Abgase auf Sättigungstemperatur zu bringen; wird normalerweise in den ersten Wäscher integriert.
- Der erste Wäscher arbeitet in der Regel stark sauer und reinigt insbesondere HF und HCl.
- Tröpfchenabscheider zur hydraulischen Trennung der Wäscherkreisläufe
- Der zweite Wäscher wird üblicherweise neutral betrieben und behandelt größtenteils Schwefeldioxid  $\text{SO}_2$
- Tröpfchenabscheider
- Ein Elektrodynamischer Venturi (EDV) zur weiteren Minimierung der durchgehenden Tröpfchen, optional.
- Ein Ventilator der den Abgasstrom von der Verbrennung zum Kamin leitet
- Der Kamin
- Die peripheren Einrichtungen zur Unterstützung des Verfahrens, wie z.B. Lagerung und Aufbereitung der Sorptionsmittel, die Aufbereitung und Lagerung der Rück-



stände und der Erzeugung von Druckluft. Insbesondere umfasst die Behandlung von Rückständen auch extensive Bearbeitungsverfahren, wie z.B. die Verdampfung von Restschlamm und -abwässern.

- Ein Gas/Gaswärmeaustauscher oder ein Wärmeübertragungssystem sind optional.

Kommt das Abgas in eine Abgasreinigungsanlage mit Wäschern, wird es normalerweise erst mittels Elektrofilter oder, falls die Wäscherabschlammung eingedampft wird, einen Sprühtrockners und eines Gewebefilters entstaubt.

Der erste, saure Wäscher wird zur Abscheidung von Halogensäuren und  $\text{SO}_3$  eingestellt, er arbeitet mit einem sehr niedrigen pH-Wert. Der Tröpfchenabscheider garantiert eine hydraulische Trennung zwischen den beiden Gaswäschern, sollten diese mit unterschiedlichen Sorptionsmitteln arbeiten. Der zweite, neutrale Wäscher arbeitet mit einem relativ neutralen pH-Wert, um vor allem das schwach saure Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) abzufangen. Zum Schluss folgt noch ein zweiter Tröpfchenabscheider und, falls man besonders niedrige Staubemissionswerte erhalten möchte, folgt noch ein zusätzlicher Elektrodynamischer Venturi, das die Menge an Tröpfchen minimiert, die zum Ventilator und in den Kamin gelangen.

Beide Wäscher werden durch Überwachung und Aufrechterhaltung des pH-Wertes kontrolliert, falls der Wert sinkt, erhöht sich die Zugabe von Sorptionsmittel und die Abschlammung.

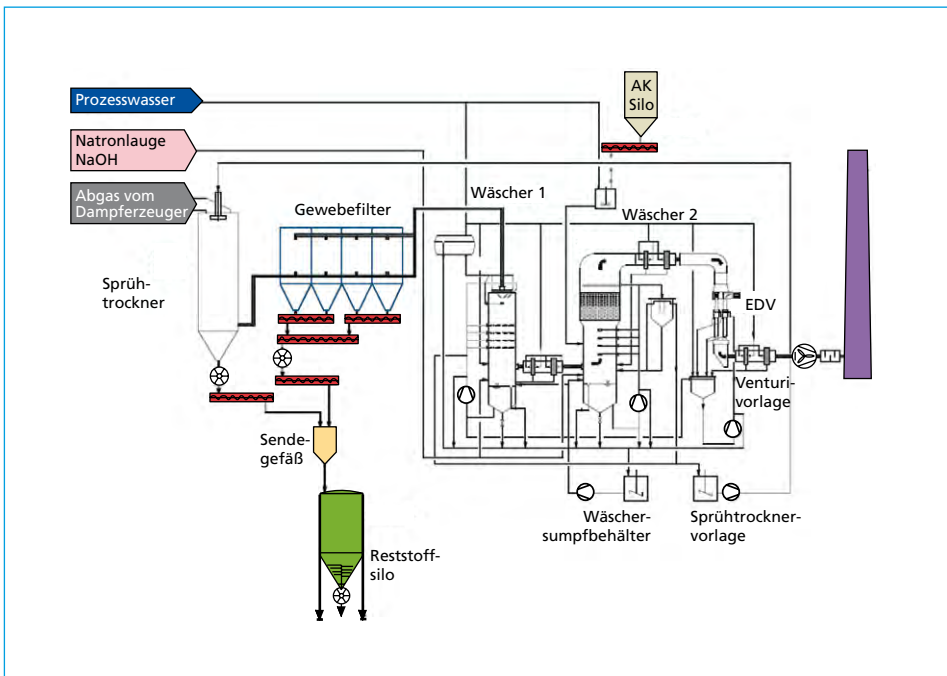


Bild 3: Verfahrensschema Nasswaschverfahren

Die Abschlammung wird entweder in einem Sprühtrockner, der dann Teil des Abgasreinigungssystems ist, verdampft oder in einem Kühlturm, was extrem viel Energie beansprucht. Alternativ kann eine Abwasserreinigung durchgeführt werden, die eine Neutralisierung, eine Abtrennung von Schwermetallen und Quecksilber sowie eine Filtrierung umfasst. Derartige Systeme sind hochkomplex und beinhalten Pumpen, Leitungssysteme, Messungen und Behälter und sogar ein separates Kontrollsystem.

Weiterhin kann die Adsorption von Schwermetallen, Quecksilber und Dioxinen/Furane in den Gaswaschprozess integriert werden und benötigt dabei keine zusätzlichen Verfahrensschritte, hierzu wird ein zusätzliches Adsorbens in der Waschsuspension verwendet, meist handelt es sich um Aktivkohle. Dies bedeutet jedoch, bei der Auslegung der Rezirkulation und der Abwasserbehandlungsanlage besondere Vorkehrungen wie Hydrozyklone zur Abtrennung der leichteren Koksfraktion zu treffen.

Das Nasswaschverfahren bietet den Vorteil einer fast vollständigen chemischen Reaktion der sauren Schadgase mit den Sorptionsmitteln, das stöchiometrische Verhältnis liegt bei nahezu 1,0. Es erlaubt die wirtschaftlich günstigste Nutzung von Sorptionsmitteln und es verbleiben die geringst möglichen Mengen an Rückständen.

### 3.4. Das Hybridverfahren

Das Hybridverfahren ist eine Kombination aus den zuvor dargestellten Technologien. Als Beispiel haben wir hier eine Kombination des Quasitrockenen und des Nasswaschverfahrens zur Beschreibung ausgesucht.

Der Aufbau dieses speziellen Hybridverfahrens wird nachfolgend beschrieben (dem Abgasstrom folgend):

- Ein Sprühabsorber zur Kühlung der Abgase auf die optimale Reaktionstemperatur von etwa 140 °C sowie zur Vorabscheidung von stark sauren Gasbestandteilen. Dabei wird Wasser und Kalkmilch eingedüst, um in einem ersten Verfahrensschritt die Menge an sauren Schadgasen zu reduzieren. Weiterhin wird hier die Abschlammung aus dem nachgeschalteten Wäscher eingedampft.
- Ein Reaktor, um Sorptionsmittel und Abgas intensiv miteinander zu vermischen und um zusätzliche Sorptionsmittel wie z.B. Aktivkoks oder -kohle und Kalkhydrat einzudüsen, so dass in einem zweiten Verfahrensschritt die Menge an sauren Bestandteilen weiter reduziert wird.
- Ein Gewebefilter, um Flugaschen und verbrauchtes Sorptionsmittel aus dem Abgasstrom herauszufiltern.
- Optional können die Filtrerrückstände nochmals rezirkuliert werden, um die Effizienz des Verfahrens zu erhöhen.
- Eine Quench, die normalerweise in den Gaswäscher integriert wird, um die Abgase auf Sättigungstemperatur zu bringen.
- Ein Wäscher als dritte Reinigungsstufe.

- Ein Tropfenabscheider.
- Ein Ventilator der den Abgasstrom von der Verbrennung zum Kamin leitet.
- Der Kamin.
- Die peripheren Einrichtungen zur Unterstützung des Verfahrens, wie z.B. Lagerung und Aufbereitung der Sorptionsmittel, die Aufbereitung und Lagerung der Rückstände und der Erzeugung von Druckluft. Insbesondere umfasst die Behandlung von Rückständen auch extensive Bearbeitungsverfahren, wie z.B. die Verdampfung von Restschlamm und -abwässern.

Dieses spezielle Hybridverfahren kombiniert zwei sehr wirksame Technologien, um entweder besonders niedrige Emissionswerte zu erhalten oder um hohe Konzentrationen von sauren Gasen zu bearbeiten.

Kombiniert man das leistungsfähige Quasitrockenverfahren und die effiziente Nasswäsche so erhält man einen wirtschaftlichen Kompromiss mit hohen Leistungsmerkmalen bei günstigen Betriebskosten.

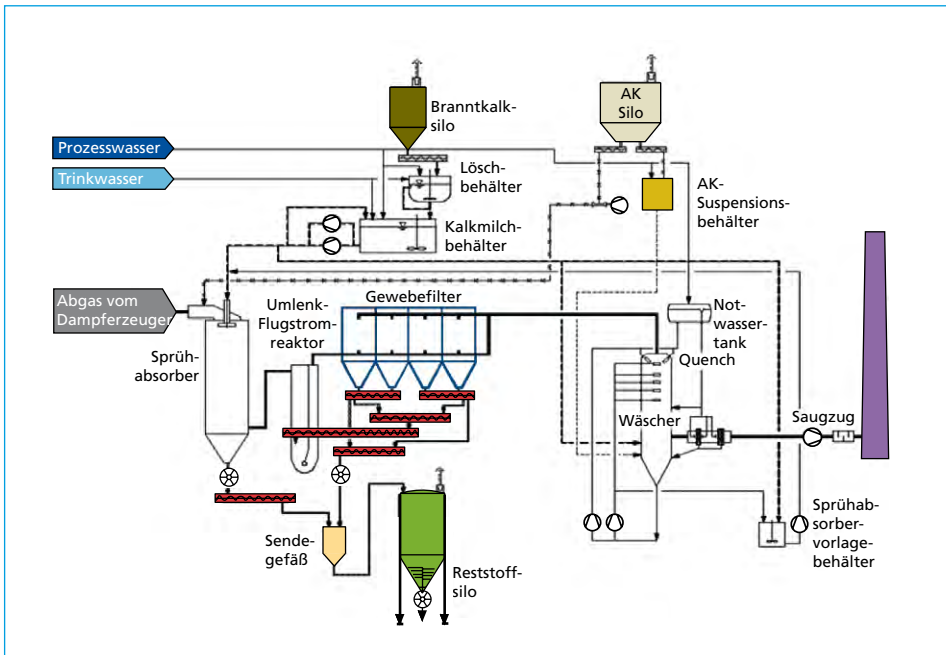


Bild 4: Verfahrensschema Hybridverfahren

## 4. Kriterien für die Auswahl des Verfahrens zur Abgasreinigung

Der Vergleich und die Auswahl eines Abgasreinigungsverfahrens können nur dann vollständig und umfassend sein, wenn man die vielen Voraussetzungen und Randbedingungen beachtet, die an jedem einzelnen Standort differieren können. Prinzipiell

wird sich jede Ausgangssituation zur Planung einer Abgasreinigungsanlage von allen anderen unterscheiden; das ist der Grund für die Vielzahl von technologischen Varianten eines jeden Verfahrens.

Zum Beispiel wird sich eine bestehende Anlage mit einer gewachsenen Infrastruktur, beschränkten Platzverhältnissen und einer vorliegenden Genehmigung bestimmter Emissionsauflagen sicherlich wesentlich von den Planungen zu einem Neubau einer Anlage unterscheiden, die bisher lediglich auf dem Papier existiert. Auch müssen Verfügbarkeit, Investitionskosten, Betriebskosten und auch anfallende Rückstände mit berücksichtigt werden.

### 4.1. Technische Kriterien

#### Leistung

Die verschiedenen technischen Verfahren unterscheiden sich in ihrer jeweiligen Leistungsfähigkeit Sauer gasbestandteile abzureinigen.

Aus technischer Sicht ist das Trockensorptionsverfahren das einfachste der Verfahren und es wurde entwickelt, um moderate Schadgaskonzentrationen zu reinigen, wie sie z.B. bei der Verbrennung von Biomasse oder Altholz entstehen. Unter bestimmten Voraussetzungen wie z.B. niedrigen Schadgaskonzentration, wenigen niedrigen Peaks und, was sehr wichtig ist, sofern die Emissionswerte nicht niedriger sind als die von der Richtive zur Abfallverbrennung fixierten Grenzwerte, kann das Verfahren auch anderweitig eingesetzt werden, z.B. bei der Hausmüllverbrennung.

Bei Verwendung von hohen Qualitäten von Kalkhydrat oder von Natriumbikarbonat, wird die Abscheideleistung verbessert oder der Verbrauch an Sorptionsmitteln reduziert. Hier ist Natriumbikarbonat am effizientesten.

Das Quasitrockene Verfahren kann aufgrund der längeren Verweilzeit der Sorptionsmittel in den Abgasen und durch den hohen Feuchtigkeitsgehalt an der Partikeloberfläche mehr leisten. Deshalb bietet sich das Quasitrockene Verfahren zur Verarbeitung von hohen Rohgaskonzentrationen an oder, falls die geforderten Emissionen unter den von der Richtive für die Abfallverbrennung festgelegten Grenzwerte liegen.

Falls sehr hohe Konzentrationen an sauren Gasen auftreten oder die Brennstoffversorgung unregelmäßig und mit vielen Peaks voranschreitet oder aber auch falls die Emissionsgrenzwerte sehr niedrig sind, wird als bevorzugte Abgasreinigung das Nasswaschverfahren eingesetzt, das, sofern es richtig konzipiert und aufgebaut ist, gegenüber Konzentrations- und Abgasstromschwankungen sehr unempfindlich ist.

Das zuvor beschriebene Hybridverfahren ist ein Kompromiss zwischen dem Quasitrockenen- und dem Nasswaschverfahren.

#### Additive

Der Betrieb einer Abgasreinigungsanlage für eine Abfall- oder Ersatzbrennstoffverbrennungsanlage verlangt den Einsatz verschiedener Ressourcen, wie z.B. elektrische

Leistung, Wasser und verschiedene Sorptionsmitteladditive. Was den spezifischen Verbrauch anbelangt, zeigt jedes der beschriebenen Verfahren unterschiedliche Eigenschaften auf.

Im Trockensorptionsverfahren wird Kalkhydrat (mit einer normalen oder mit einer hohen Oberfläche) oder Natriumbikarbonat eingesetzt, um die Sauer gasbestandteile zu behandeln. Die niedrigsten Additivkosten verursacht im Vergleich der Normalkalkhydrat, aber er hat in der Regel den höchsten Verbrauch. Weniger Verbrauch bei einem höheren Einkaufspreis verursacht Kalkhydrat mit hoher Oberfläche, jedoch ist Natriumbikarbonat noch teurer. Bei diesem Vergleich schneidet Normalkalkhydrat am besten ab.

Das Halbtrockene Verfahren benutzt ungelöschten Kalk als Sorptionsmittel, der im Einkauf günstiger als alle anderen Kalkprodukte oder Natriumbikarbonat ist. Bei den Additiven für die genannten Abgasreinigungsanlagen für die Abfallverbrennung ist er deshalb die erste Wahl.

Das Nasswaschverfahren setzt Kalkstein, ungelöschten Kalk oder Natronlauge als Sorptionsmittel ein. Im Vergleich ist Kalkstein die bei weitem günstigste Variante aller Additive, aber er zeigt die niedrigste Reaktivität und verlangt erheblichen Aufwand und zusätzliche Anlagen für die Aufbereitung. Deshalb kommt er praktisch nur in großen Kraftwerken zum Einsatz, die einen sehr hohen Verbrauch an Sorptionsmitteln haben und die daher sehr auf Anlagentechnik mit optimierten Additivkosten achten. Für alle anderen Verbrennungsanlagen wird in der Abgasreinigung in der Regel entweder ungelöschter Kalk oder Natronlauge eingesetzt. Was den Verbrauch an Additiven anbelangt, zeigt das Nassverfahren das beste stöchiometrische Verhältnis und daher kann nur der Preis ausschlaggebendes Element sein. Ungelöschter Kalk ist weitaus günstiger als Natronlauge.

Um die Vorgaben der Direktive zur Abfallverbrennung zu erfüllen, setzen alle Anlagen mehr oder weniger große Mengen der unterschiedlichsten Additive ein. Alle setzen mehr als das für die molare Reaktion verlangte Minimum ein. Dieses Mehrverbrauchsverhältnis nennt sich stöchiometrischer Faktor.

Am effizientesten ist das korrekt ausgelegte Nasswaschverfahren, dessen stöchiometrischer Faktor bei etwa 1,01 – 1,1 liegt. Hier wird der niedrigste Verbrauch an Additiven erreicht. Hybridverfahren und Quasitrockenes Verfahren erreichen einen Faktor von etwa 1,9 – 2,1, daher sind beide Verfahren leistungsstark und arbeiten wirtschaftlich.

Das Trockensorptionsverfahren auf der Basis von Kalkhydrat erreicht Faktoren zwischen 1,9 bis zu 3,0, je nach Art des eingesetzten Kalkhydrats und dem Verbrennungstyp. Wird Natriumbikarbonat eingesetzt erreicht man Verhältnisse zwischen 1,1 und 1,3. Das neue VapoLAB-Verfahren bietet im Vergleich der Trockensorptionsverfahren den niedrigsten Verbrauch an Kalkhydrat und ein stöchiometrisches Verhältnis von etwa 1,4.

### **Rückstände**

Das stöchiometrische Verhältnis bezieht sich nicht allein auf den Verbrauch eines jeden einzelnen Additivs, sondern es bezieht sich logischerweise auch auf die Menge an Rückständen.

Auch hier erweist sich, dass beim Nasswaschverfahren mit seinem niedrigen Verbrauch an Additiven die niedrigste Menge an Rückständen entsteht.

Hybrid- und Quasitrockenverfahren bieten mittlere Mengen an Rückständen, lediglich das Trockensorptionsverfahren produziert signifikante Mengen von Rückständen, da das stöchiometrische Verhältnis dann bis auf 3,0 ansteigen kann. Ausnahmen bilden das VapoLAB-Verfahren mit einem Verhältnis von 1,4 und Natriumbikarbonat mit einem Verhältnis von 1,1 bis 1,3. Hier sind die anfallenden Mengen an Rückständen fast in der Größenordnung von Nasswaschverfahren.

### **Platzanspruch**

Vor allem, wenn bereits existierende Anlagen mit einem neuen Abgasreinigungsverfahren ausgestattet werden sollen, ist der für die einzelnen Komponenten der Anlage benötigte Platzanspruch ein wichtiges Kriterium. Genauso wichtig ist, dass die Installation der neuen Anlage das Arbeiten an der bereits existierenden Anlage nicht behindern darf.

Unter diesem Gesichtspunkt liegt das Trockensorptionsverfahren auf dem ersten Platz. Die benötigten Komponenten sind im Vergleich mit anderen Verfahren klein, die Komplexität ist gering und ihr Einbau ist vergleichsweise schnell durchzuführen.

Alle anderen Verfahren, ganz gleich ob es sich um Nass- oder Quasitrockene Verfahren handelt, benötigen Komponenten mit größeren Ausmaßen und/oder mehrere Verfahrensschritte, also ist eine größere Anzahl an Komponenten einzubauen und der Platz hierfür vorzusehen. Aus diesem Grund benötigt der Einbau weiterhin mehr Zeit.

Trotzdem kann in der Regel für jedes Verfahren eine Aufstellung auch bei beengten Platzverhältnissen gefunden werden, sofern andere Kriterien aufzeigen, dass dieses Verfahren vorteilhaft wäre.

### **Verfügbarkeit**

Das wichtigste Kriterium bei der Auswahl eines dieser verschiedenen Abgasreinigungsverfahren ist die Verfügbarkeit unter Betriebsbedingungen.

Hier muss ganz klar gesagt werden, dass im Optimalfall alle Verfahren Verfügbarkeiten von mehr als 95 Prozent erreichen können, sofern die Anlage korrekt ausgelegt wurde, die Montage vorschriftsmäßig ausgeführt wurde und eine qualifizierte Wartung gemäß der Wartungsvorschriften durchgeführt wird.

Die Erfahrungen der letzten Jahre zeigen, dass das Nassverfahren in Hinsicht auf die Verfügbarkeit Vorteile hat. Ein möglicher Grund hierfür kann die in der Regel stationäre Betriebsweise des Nasswaschverfahrens sein, da sich schwankende Eintrittsbedingungen in Bezug auf Volumenstrom und Schadgasgehalte nur wenig auf die Regelung der Anlage auswirken, Trockensorptionsverfahren jedoch bei wechselnden Eintrittsbedingungen ständig nachregeln müssen.

### **Instandhaltung/Wartung**

Entscheidende Argumente für die Auswahl eines bestimmten Abgasreinigungsverfahrens können die jährlichen Ausgaben für Personal und Wartung sein.

Prinzipiell ist es der Fall, dass je komplexer das Abgasreinigungssystem ist und je mehr Einzelkomponenten eingesetzt sind, desto höher sind die Aufwendungen für die Wartung: Häufigkeit der Wartung, Wartungsdauer, Personaleinsatz und erforderliche Ersatzteile. Komplexe Verfahren, die aus mehreren Verfahrensschritten und einer entsprechenden Anzahl von Einzelkomponenten bestehen, verlangen auch mehr Instandhaltungsaufwand.

Allerdings besteht die Tendenz, dass unter realen Betriebsbedingungen die Komponenten, die mit trockenen Abgasreinigungsrückständen beaufschlagt werden wie Förderschnecken, Zellradschleusen, Silos oder Sendegefäße einen erhöhten Instandhaltungsaufwand erfordern; dies spricht gegen die *einfachen* Trockenverfahren.

Unter Abwägung der Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren unter Bezug auf Komplexität und damit verbundene hohe Wartungsaufwendungen sowie kritische Produkte, die ebenfalls die Wartungsaufwendungen erhöhen, kann man festhalten, dass Trockensorptionsverfahren hier Vorteile haben, da sich durch die geringe Anzahl zu wartender Komponenten der geringste Gesamtaufwand ergibt.

## 4.2. Kriterien in Hinsicht auf die Wirtschaftlichkeit

### Investitionen

Unglücklicherweise werden in den letzten Jahren die Entscheidungen für eine bestimmte Abgasreinigungstechnologie immer mehr unter dem Gesichtspunkt der anfallenden Investitionskosten getroffen.

Eine umfassende Auswertung aller relevanten technischen Kriterien, insbesondere der Verbrauch an Additiven, die Menge an anfallenden Rückständen, die zu erwartenden Wartungs-/Unterhaltungskosten und eine kumulative Kostenkalkulation über die kommenden Betriebsjahre zeigen deutlich, wie gering der Anteil an Investitionskosten ist, betrachtet man die gesamten Aufwendungen. Je länger die Abschreibungsdauer anhält, desto geringer wird die Bedeutung der Investitionskosten für die gesamten Betriebskosten und desto stärker wird der Einfluss der laufenden Betriebskosten für Verfügbarkeit, Wartung/Instandhaltung usw.

Die *einfachen* Trockensorptionsverfahren bestehen aus einer kurzen Verfahrenslinie, sie verlangen lediglich die Lagerung und Dosierung von Additiven sowie die Förderung und Lagerung von Rückständen. Unter dem Gesichtspunkt der Investitionskosten erscheinen sie am vorteilhaftesten.

Quasitrockene- und Hybridverfahren sind ein Kompromiss. Im Investitionsvergleich sind sie um 10 bis 30 Prozent teurer als Trockensorptionsverfahren, abhängig von den zusätzlichen peripheren Komponenten, wie z.B. Kalklösanlagen.

In diesem Vergleich ist das mehrstufige Nasswaschverfahren das teuerste Verfahren, unter anderem wegen des zusätzlichen Aufwandes, der für die Behandlung des Abwassers betrieben werden muss.

### Betriebskosten

Die Betriebskosten der jeweiligen Verfahren verhalten sich in der Regel umgekehrt wie die zugehörigen Investitionskosten. Betriebskosten setzen sich aus Additiv- und

Rückstandskosten sowie aus Instandhaltungsaufwendungen (Personal, Ersatzteile usw.) zusammen.

Berücksichtigt man lediglich die Kosten für Additive und für die Entsorgung der Rückstände, so muss man das Nasswaschverfahren klar bevorzugen. Kommen nun noch die Häufigkeit der Wartungen, die Wartungsdauer und die laufenden Betriebskosten hinzu, ist dieses Verfahren immer noch als vorteilhaft zu bezeichnen.

Quasitrockene- und Hybridverfahren haben, wegen ihres höheren stöchiometrischen Verhältnisses höhere Kosten für Additive und die Entsorgung der Rückstände. Auch sind die Wartungskosten vergleichsweise hoch, da es eine große Anzahl von Komponenten gibt.

In Hinsicht auf die Kosten für Additive hat das Trockensorptionsverfahren die höchsten laufenden Betriebskosten, aber das wird durch die Wartungskosten zumindest teilweise wieder ausgeglichen. Die geringe Komponentenanzahl erfordert nur einen minimalen Wartungseinsatz. Vor allem das VapoLAB-Verfahren mit seinem stöchiometrischen Verhältnis von etwa 1,4 hat im Vergleich niedrige Kosten für Additive und Rückstände, da es sich aber um ein Trockensorptionsverfahren handelt, bleibt der Aufwand für Wartung wegen der geringen Anzahl verbauter Komponenten minimal. Auch diesen Vergleich gewinnt daher das Trockensorptionsverfahren.

### Größe

*Size matters.* Wird ein Abgasreinigungsverfahren geplant und realisiert, hat man einen komplexen Bereich von Lieferungen und Leistungen zu berücksichtigen. Da gibt es Engineering, Genehmigungsplanung, Komponenten und Aggregate, Elektro- und leittechnische Einrichtungen, deren Montage, Montageüberwachung, Inbetriebsetzung, Probetrieb und Abnahme.

Nur wenige dieser Kostenfaktoren verändern sich mit der Größe der geplanten Anlage. Lediglich die Materialkosten werden von der Größe der geplanten Anlage direkt beeinflusst. Hier zeigt sich eine lineare Abhängigkeit. Aber bereits die Kosten der Installation gleicher Komponenten unterschiedlicher Größe ändern sich nicht mehr linear, sondern degressiv. Anders die Kosten für das Engineering, die Genehmigungsplanung und die Abnahme: Diese verändern sich nicht, egal ob es sich um eine kleine oder eine große Anlage handelt.

Fazit: Je größer die Abgasreinigungsanlage ist, desto wirtschaftlicher kann die schlüsselfertige Anlage kalkuliert werden.

## 5. Resumé

Das Angebot an verfügbaren Abgasreinigungsverfahren reicht von simplen Trockensorptionsverfahren bis hin zu komplexen mehrstufigen Nasswaschverfahren, die sogar noch mit weiteren Kombinationen zu Hybridverfahren verbunden werden können, die ganz bestimmte wirtschaftliche oder technische Voraussetzungen erfüllen können. Prinzipiell finden sich in diesem Spektrum für alle Erfordernisse entsprechende, passende Lösungen.



Vor jeder Planung muss eine Bewertungsmatrix erstellt werden, in die alle für dieses spezielle Projekt relevanten Kriterien einfließen müssen. Das ist die einzige Möglichkeit, wie man das für dieses spezielle Projekt günstigste Verfahren ermitteln kann.

Berücksichtigt man lediglich die oben beschriebenen greifbaren Kriterien wie Investition oder den Verbrauch an Additiven, so werden die *weichen* Kriterien, die ebenfalls einen Einfluss auf das Projekt haben können, vernachlässigt. Ein Beispiel ist z.B. die Akzeptanz der geplanten Anlage in der Bevölkerung, die man mit einem höherwertigen Verfahren mit niedrigsten Emissionswerten steigern kann. Bedenken Sie wie viel Schaden durch Verzögerung eine Bürgerinitiative während der Projektrealisierung anrichten kann, falls Einsprüche eingelegt werden, eventuell sogar gerichtliche Schritte unternommen werden.

Die Trockensorptionsverfahren haben innerhalb dieses Vergleichs an Bedeutung gewonnen. Zusätzlich zu ihrer niedrigen Investition wurde ihre Leistungsfähigkeit in den letzten Jahren beträchtlich erhöht, vor allem das VapoLAB-Verfahren ist sehr wirtschaftlich in Hinsicht auf geringsten Verbrauch an Additiven.

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

**Energie aus Abfall** – Band 10

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Michael Beckmann.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013

ISBN 978-3-935317-92-4

ISBN 978-3-935317-92-4 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky  
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2013

Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,

Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky

Erfassung und Layout: Petra Dittmann, Sandra Peters,

Martina Ringgenberg, Ginette Teske, Ulrike Engelmann, LL. M., Ina Böhme

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.