

Auslegung und Gestaltung von Sprühtrockner/Sprühabsorber und Verdampfungskühler

Armin Möck

1.	Düsentchnik.....	409
1.1.	Düsenarten.....	409
1.2.	Freie Querschnitte der Düsen	411
1.3.	Düsenauswahl.....	412
1.4.	Innenmischende Zweistoffdüsen	412
1.5.	Ringspaltdüse.....	413
1.6.	Rücklaufdüsen	414
2.	Bauliche und verfahrenstechnische Grundlagen von Verdampfungskühler, Sprühabsorber und Sprühtrockner	415
2.1.	Geometrie.....	415
2.2.	Gasverteilung.....	416
2.3.	Flüssigkeitsverteilung	419
3.	Verdampfungskühler	420
4.	Sprühabsorber	422
5.	Sprühtrockner.....	424
6.	Quellen	426

Durch die in den vergangenen Jahren kontinuierliche Reduzierung der Emissionsgrenzwerte – basierend auf dem Bundes-Immissionsschutzgesetz – für alle industriellen (meist Groß-) Anlagen – fossil befeuerte Kraftwerke, Zementwerke, Metallhütten, Reststoffverbrennungsanlagen/Abfallverbrennungsanlagen, Glaswerke, chemische Werke, petrochemische Anlagen usw. – muss ein erhöhter technischer Aufwand zur Reduzierung der Emissionen betreiben werden.

All diese Produktions.- und Entsorgungsanlagen produzieren große Mengen heißer Gase, welche in den allermeisten Fällen eine Vielzahl an Schadstoffen – Feststoffe/Staub, HCl, SO₂, HF, Hg, usw. – unterschiedlichster Konzentrationen beinhalten. Wenn diese Konzentrationen oberhalb der gesetzlichen Grenzwerte, welche in Bundes-Immissionsschutz-Verordnungen, in der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft)

oder in europäischen Richtlinien definiert sind, liegen, müssen diese Abgase zum Teil mit aufwändiger Technik gereinigt werden. Mit Ausnahme von Kohlendioxid lassen sich Schadstoffe im Abgase durch eine oder mehrere Reinigungsstufen reduzieren.

Die Reinigung besteht im Wesentlichen aus Filterung, Ad- und Absorption und katalytischer Umsetzung.

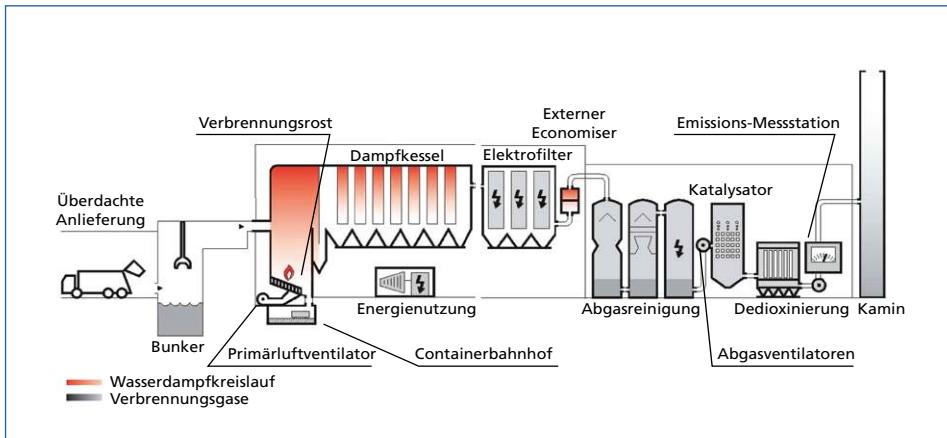


Bild 1: Aufbau des AHKW Neunkirchen

Quelle: Infoblatt E-On AHKW Neunkirchen, E On-Energy from Waste-Broschüre AHKW Neunkirchen

Im Folgenden wird detailliert auf die Auslegung und Funktion von zwei Bauarten einer Komponente der Abgasreinigung eingegangen. Diese sind der Sprühabsorber (Abkürzung im weiteren Text: SA) und der Verdampfungskühler (Abkürzung: VDK). Der Vollständigkeit halber muss auch der Sprühtrockner (Abkürzung: ST) erwähnt und besprochen werden.

Diese drei Komponenten ähneln sich in Ihrer Form und technischen Ausstattung sehr. Was diese drei Komponenten unterscheidet ist ihre *Aufgabe*:

Der VDK soll die Gase *nur* kühlen, der SA soll kühlen und Schadstoffe binden und der ST soll die Flüssigkeit *nur* sicher verdampfen.

Was alle drei Komponenten gemeinsam haben, ist die Zerstäubungstechnik mit welcher die verschiedenen Flüssigkeiten in Tropfen zerlegt werden. Ohne diese feinen Tropfen könnten die Apparate ihre Funktionen nicht erfüllen oder würden Ausmaße annehmen, welche nicht realisierbar wären.

Für diese Zerstäubung von Flüssigkeiten kommen immer zwei verschiedene Grundprinzipien zum Einsatz:

- Düsen,
- Rotationszerstäuber.

Aufgrund der Tatsache, dass die Majorität der Anlagen weltweit mit Düsen ausgestattet ist, wollen wir uns im Folgenden auf die Beschreibung dieser Technik beschränken.

1. Düsenteknik

Die für VDK/ST/SA notwendigen Düsen müssen folgende Eigenschaften aufweisen:

- Großer Volumenstrom-Regelbereich (mindesten 10 : 1),
 - * zum An- und Herunterfahren der Anlagen,
 - * zur Anpassung an verschiedenen Lastfälle,
- Über den Regelbereich gleich bleibende verfahrenstechnische Eigenschaften wie Tropfengrößenverteilung und Sprühwinkel,
- Idealerweise ein einstellbares Tropfenspektrum – zur Anpassung der Anlagengröße an vorhandene räumliche Gegebenheiten oder an geänderte Prozessbedingungen,
- Einfach regelbar – stabile Regelung ohne Schwankungen,
- Geringes Energie/Tropfengrößen-Verhältnis,
- Robust, wartungsarm,
 - * geringe Verstopfungsgefahr = große freie Querschnitte,
 - * verschleißfest.



Bild 2: Überblick über Bauformen von Düsen

Auf dem Markt der Düsen sind etwa 40.000 Düsen (Auswahl auf Bild 2 erkennbar) mit unterschiedlichen Verfahrensparametern erhältlich. Unter dieser Vielzahl an Düsentypen und Leistungsgrößen kommen nur sehr wenige Düsen für diese sehr speziellen Anwendungen in Frage.

1.1. Düsenarten

Die für VDK/ST/SA verwendeten Düsen [12] gehören aufgrund der hohen Anforderungen zu den Spezialdüsen.

Warum werden diese Spezialdüsen verwendet, wenn es doch viel einfachere Standarddüsen gibt?

Düsen unterscheiden sich primäre durch folgende verfahrenstechnische Eigenschaften:

- zerstäubter Volumenstrom Flüssigkeit bei einem spezifischen Druck,

- Tropfengrößenverteilung des generierten Tropfenspektrums,
- Strahlwinkel,
- Verbrauchswerte an Hilfsmedien wie Druckluft oder Dampf – gilt nur für Zweistoffdüsen.

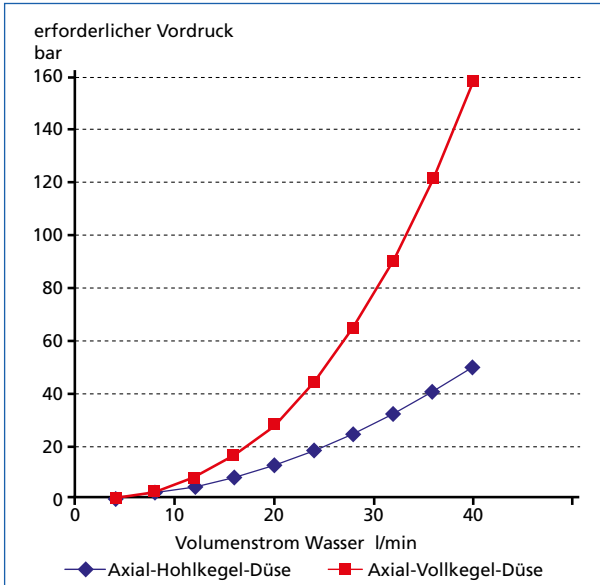


Bild 3:

Druck-Mengen-Diagramm für Wassermengen von 4 bis 40 l/min

In diesem Diagramm ist die Veränderung des Vordruckes über den Volumenstrombereich von 1 : 10 von z.B. 4 bis 40 l/min aufgetragen. Der Startüberdruck beträgt 0,5 bar.

Da, wie oben schon erwähnt, sich über diese große Druckbereiche auch die Tropfengrößen sehr stark ändern sind diese einfachen Düsen nicht für anspruchsvolle Anwendungen geeignet.

Basierend auf den komplexen Anforderungen entstanden für diese Anwendungen zwei Gruppen von Spezialdüsen:

- Zweistoffdüse (innenmischend) und
- Rücklaufdüse.

Die Eigenschaft, dass sich die Tropfenspektren je nach Betriebspunkt der Düsen ständig verändern, ist für die Auslegung von Anlagen und die Realisierung eines stabilen Dauerbetriebs vieler physikalischer und chemischer Prozesse sehr nachteilig.

Diese Defizite der ständigen ungewollten Tropfengrößenveränderungen treten bei der Verwendung von Zweistoff- und Rücklaufdüsen nicht auf.

Um die verfahrenstechnische Vorteile der Spezialdüsen herauszustellen sind im folgenden Diagramm die Tropfengrößen über einen Volumenstrombereich von 1:10 (in diesem Beispiel von 4 bis 40 l/min) von vier verschiedenen Düsentypen aufgetragen (Bild 4).

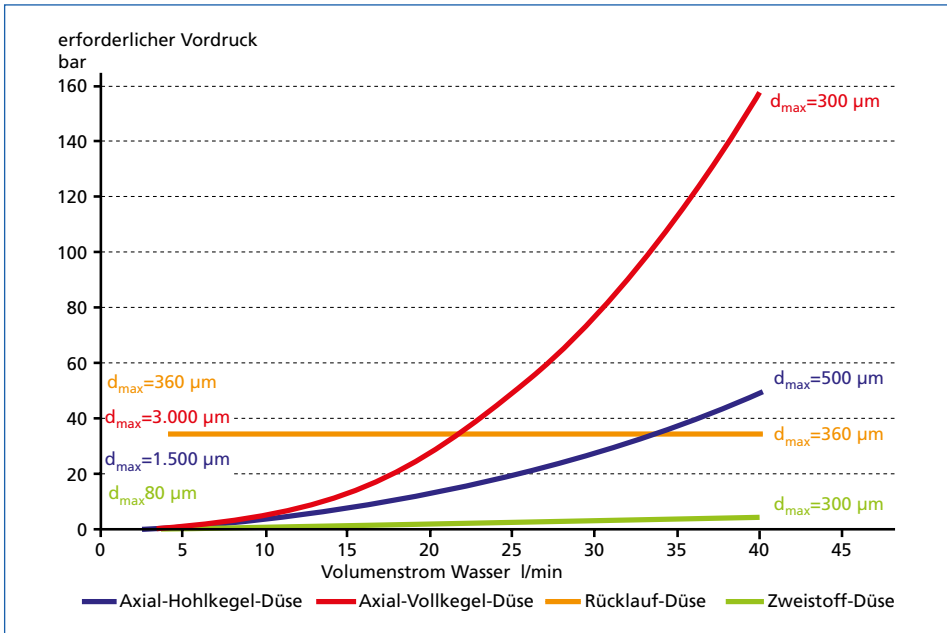


Bild 4: Druck-Mengen-Tropfengrößen-Diagramm für Wassermengen von 4 bis 40 l/min verschiedener Beispieldüsen

Wie zu erkennen ist, gibt es bei den beiden Axial-Düsen große Veränderungen in der maximalen Tropfengröße (wir verwenden hier die Bezeichnung *max. Tropfen* für den $dv_{98} - dv_{98}$ bedeutet, dass 98 Prozent des Volumen der Flüssigkeit in Tropfen dieser Größe oder kleiner zerstäubt werden) bedingt durch die große Spanne des Vordruckes.

In der Realität sind diese Düsen aus folgenden Gründen nicht für Anwendungen mit geregelterm Volumenstrom und einer gezielten Verdampfung des Wassers einsetzbar:

- Regelbereiche von 0,5 bis 160 bar bzw. 0,5 bis 50 bar sind mit einem einstufigen Regelventil nicht abbaubar bzw. führen zu sehr hohem Verschleiß im Regelventil und an den Düsen
- Die Veränderung der Tropfengröße im Bereich von 1 : 3 bzw. 1 : 10 über den Regelbereich erlaubt es nicht damit einen gleich bleibenden und stabilen Prozess – z.B. vollständige Verdampfung – zu realisieren.

1.2. Freie Querschnitte der Düsen

Neben der einfachen Regelbarkeit der Flüssigkeitsmenge und der gleich bleibenden bzw. einstellbaren Tropfengrößen stellen die freien Querschnitte der Düsen einen entscheidenden Vorteil dar:

Freie Querschnitte der 4 bis 40 l/min – Düsen:

Axial-Hohlkegeldüse 2,0 mm

Axial-Vollkegeldüse	2,4 mm		
Rücklauf-Düse	6,0 mm	→	bedingt für mit Feststoff beladene Flüssigkeiten geeignet
Zweistoff-Düse	9,5 mm	→	für mit Feststoff beladene Flüssigkeiten geeignet, da auch Flüssigkeitsdruck gering

1.3. Düsenauswahl

Für ST/SA werden aus folgenden Gründen nur innenmischende Zweistoffdüsen [12] verwendet:

- Aufgrund der Feststoffbeladung der Flüssigkeiten (bis 30 Vol.-Prozent) bei diesen Anwendungen und bedingt durch den hohen Vordruck von etwa 35 bar und den damit verbundenen hohen Fließgeschwindigkeiten würde es bei Verwendung von Rücklaufdüsen zu sehr hohem Verschleiß an Pumpe und Düse kommen.
- Die für den Prozess notwendigen feinen Tropenspektren sind mit Rücklaufdüsen nicht generierbar.
- Komplette im sehr verschleißfesten (kombiniert mit geringer Sprödigkeit) und korrosionsbeständigen Werkstoff Hartmetall (Wolframkarbid) herstellbar.

Rücklaufdüsen kommen sehr oft zum Einsatz in großen VDKs mit hohen Wassermengen (Zementwerke), bei welchen der Einsatz von Zweistoffdüsen die Betriebskosten deutlich erhöhen würden.

1.4. Innenmischende Zweistoffdüsen

Als Zweistoffdüse bezeichnet man eine Düse bei welcher die Energie für die Zerstäubung des Wassers in feine Tropfen nicht allein durch den Flüssigkeitsdruck sondern über ein sekundäres Medium – hier Druckluft – eingebracht wird.

In Bild 5 ist das Funktionsprinzip der Düse zu erkennen.

Das vorzerstäubte Wasser und die über seitliche Bohrungen definiert zugeführte Druckluft treffen sich in der inneren Mischkammer und das feine Wasserspray verlässt die Düse über die Austrittsöffnung.

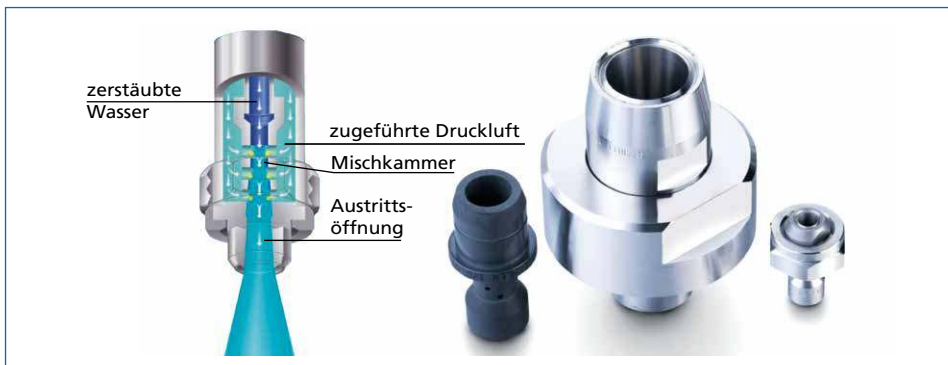


Bild 5: Zweistoff-Düse – Funktionsprinzip und Baugrößen

Vorteile der Zweistoffdüse:

- sehr feine Tropfenspektren möglich,
- viele Leistungsgrößen verfügbar (V_{Wasser} pro Düse von 0,0006 bis 12 m³/h),
- Regelbereich der Düsen bis zu 40 : 1,
- Tropfengröße des Sprays über die spezifische Druckluftmenge einstellbar – auch während des Betriebes,
- in Relation zu den Volumenströmen sehr große freie Querschnitte,
- in allen Metallen, Keramik und Hartmetall herstellbar.

Nachteile der Zweistoffdüse:

- durch Druckluftverbrauch relativ hohe Betriebskosten,
- Austrittsgeschwindigkeit der Tropfen sehr hoch und somit hohen Impulswirkung auf die Gasströmung.

1.5. Ringspaltdüse

Nach Jahrzehnte langem Einsatz von bestimmten Zweistoffdüsen stellte man erst vor wenigen Jahren mittels Hochgeschwindigkeitsfotografie fest, dass sich bei Wasser und noch ausgeprägter bei Flüssigkeiten mit höherer Viskosität und Dichte (Abwasser REA, Kalkmilch) entlang des Austrittskegels ein Wasserfilm zur Düsenvorderseite bewegt, welcher sich dann unzerstäubt ablöst und das Tropfenspektrum sehr stark negativ verändert.

Da sich diese großen Tropfen außerhalb des eigentlichen Düsenstrahles befinden wurde diese vorher mit den Tropfenmessgeräten nie erfasst und gemessen.

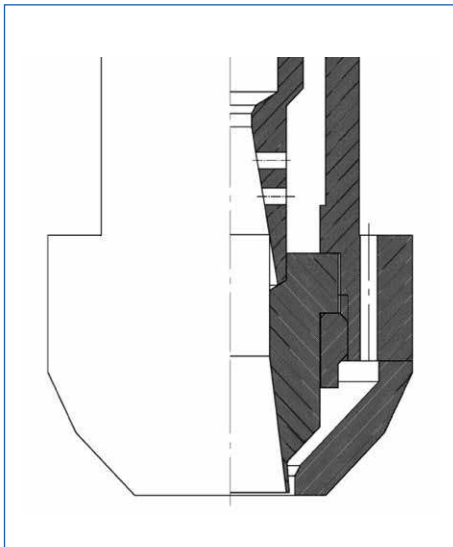


Bild 6: Ringspaltdüse

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden für die Anwendung in ST und SA die Laval-Düsen mit einem Ringspalt versehen. Diese patentierte *Ringspaltdüse* (Bild 6) zerlegt die großen Tropfen am Düsenmund in kleine Tropfen [10] (sekundäre Zerstäubung).

In dem mit Nanolicht aufgenommenen Bild 7 sind diese großen Tropfen sehr gut erkennbar. Durch die Ringspaltluft wird dieser Effekt der Grobtropfenbildung verhindert, das Tropfenspektrum wird deutlich feiner und kontrollierbar.

Die dafür notwendige Druckluft wird entweder von der vorhandenen Zerstäubungsluft abgezweigt oder von einem mehrstufigen Gebläse generiert.

Auf Bild 8 erkennt man die deutliche erhöhte Feinheit des Tropfenspektrums und die kompaktere Form des Düsenstrahls – bei gleichen Umgebungsbedingungen und identischen Volumenströmen Wasser und Druckluft durch die Düse.



Bild 7: Austrittskante Zweistoffdüse – ohne Beaufschlagung von Ringspaltluft

Quelle: ESG Baden-Baden



Bild 8: Austrittskante Zweistoffdüse – mit Beaufschlagung von Ringspaltluft

Quelle: ESG Baden-Baden

1.6. Rücklaufdüsen

Die Rücklaufdüse [9, 12] wird mit einem konstanten Vordruck von etwa 35 bar beaufschlagt. Aus der Düse führt ein Rücklauf zurück in den Tank. Der entscheidende Unterschied zu normalen Düsen liegt darin, dass das Regelventil zur Regelung des Volumenstroms nicht in der Zulaufleitung zur Düse sondern im Rücklauf zwischen Düse und Tank sitzt.

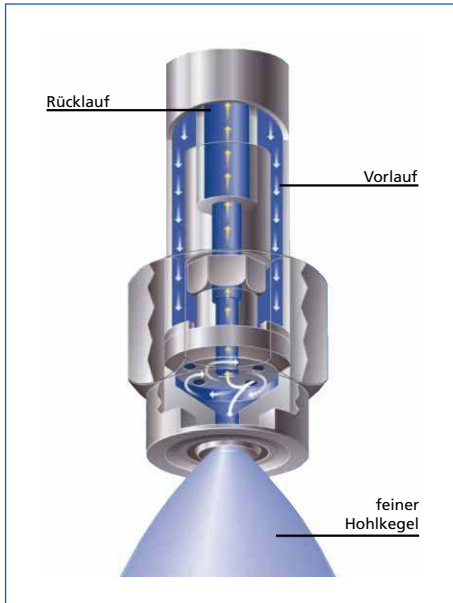


Bild 9: Funktion der Rücklaufdüse



Bild 10: Rücklaufdüsen

Durch die spezielle Konstruktion der Düse und die entsprechende Auslegung von Pumpe (Fördervolumen muss etwa fünfzig Prozent höher sein als maximale Eindüsmenge) und Regelventil (auf Rücklaufdruck und Höhenverhältnisse angepasst) erreicht man dadurch ein feines Tropfenspektrum und ein Regelverhältnis im Wasservolumenstrom von bis 12 : 1 (viele Standardgrößen verfügbar, z.T. projektbezogene Auslegung).

Der Verschleiß durch den hohen Vordruck wird durch den Einsatz von verschleißfesten (und thermoschockbeständigen) Düsen aus Hartmetall verhindert.

2. Bauliche und verfahrenstechnische Grundlagen von Verdampfungskühler, Sprühabsorber und Sprühtrockner

2.1. Geometrie

Lange bevor Sprühabsorber und Sprühtrockner zum Einsatz kamen wurden heiße Gase mittels Verdampfungskühlung abgekühlt. Sprühabsorber und Sprühtrockner stellen Sonderformen von VDKs mit erweiterten Funktionen dar.

Dies Anlagen bestehen aus einem zylindrischen (in den allermeisten Fällen vertikalen) Rohr (meist Durchmesser von 0,5 bis 12 m) welches oben und unten mit einem Konus verbunden ist. Die Koni dienen als Übergangsstück von und zu den gasführenden Rohrleitungen.

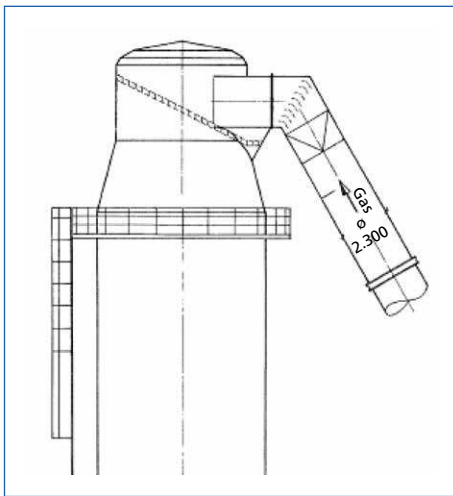


Bild 11: Verdampfungskühler – alte Bauform

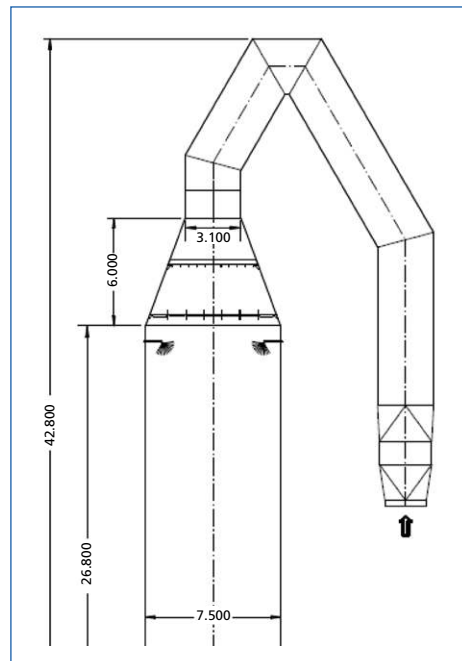


Bild 12: Verdampfungskühler – neue Bauform

Diese VDK/SA/ST werden meist von oben nach unten durchströmt [9], da diese Bauform entscheidende Vorteile bietet:

- Unten kann ein automatisierter Staubaustrag installiert werden, in welchem die ständig anfallenden Stäube/kleine Festpartikel gesammelt werden. Der Grund für das Ausfallen der Stäube liegt in der Reduzierung der Gasgeschwindigkeit im VDK/SA/ST und er damit unterschrittenen Mindestgasgeschwindigkeit zum Transport dieser Partikel.
- Es kann zu keiner Anhäufung von *schwebenden* Festpartikeln im VDK/SA/ST aufgrund der Reduzierung der Gasgeschwindigkeit kommen (Wirbelschicht-Effekt).
- Als Strömungseinbauten können die üblichen Lochbleche verwendet werden. Bei Einströmung von unten würden herabfallende größere Partikel (Ablösen der normalen Grundverschmutzung oder von Anbackungen durch Fehlfunktion der Zerstäubungsorgane) das obere Lochblech zusetzen und damit dessen Funktion empfindlich stören (s.u.).

2.2. Gasverteilung

Eines der Hauptaugenmerke bei der Gestaltung und dem Bau von VDK/SA/ST [4] muss auf die Gasverteilung auf Düsenebene gerichtet werden.

Für einen hohen Wirkungsgrad dieser Anlagen müssen Gas und Flüssigkeit möglichst gut und früh gemischt werden. Dies kann nur durch eine homogene (und rotationsfreie) Gasverteilung auf Düsenebene und eine gleichmäßige Flüssigkeitsverteilung über dem gesamten Querschnitt erreicht werden.

Dazu werden in den zuführenden Gasleitung oft Leitbleche und im oberen Konus der VDK/SA/ST zur Verbesserung der Gasverteilung nahezu immer Einbauten in Form von zweilagigen Lochblechen eingebaut.

Diesem Ziel kommt man heute mit CFD-Untersuchungen sehr nahe (Bilder 13 bis 16).

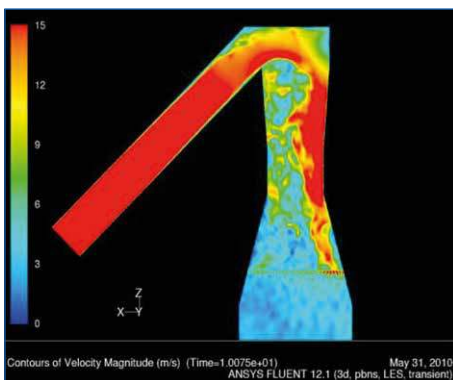


Bild 13: Seitenansicht CFD, vor der Optimierung

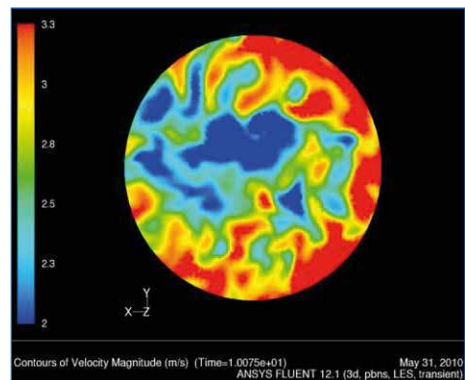


Bild 14: Seitenansicht CFD, Düsenebene, vor der Optimierung

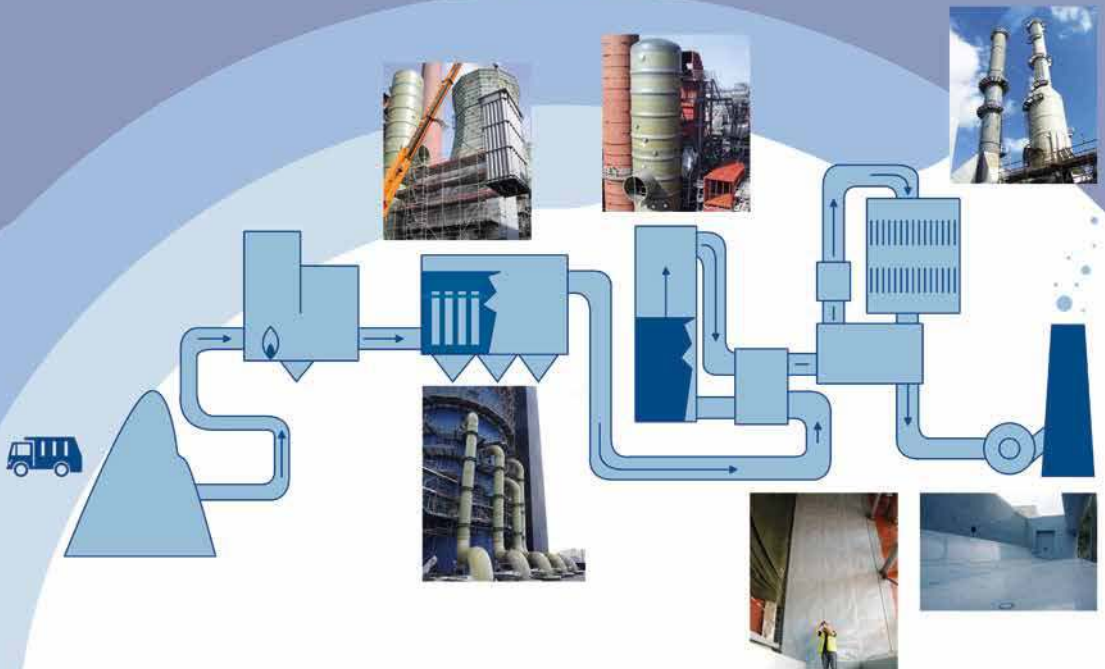
Haben Sie schon einmal
über Kunststofflösungen nachgedacht?

WIR JA!

Korrosionsbeständigkeit

Prozesssicherheit

Langlebigkeit



Unser Liefer- und Leistungsspektrum beinhaltet unter anderem:

- Behälter, Prozessapparate und Wäscher aus glasfaserverstärkten Kunststoffen und Verbundlösungen.
- Rohrleitungssysteme aus Verbundwerkstoffen inkl. individueller Planung und Berechnung.
- Spezialkomponenten für die Rauchgasreinigung wie z. B. Nasselektrofilter und fluorierte Auskleidungssysteme in Gaskanälen für einen unübertroffenen Korrosionsschutz Ihrer Anlagen.
- Schnelle Abhilfe bei ungeplanten Anlagenstillständen sowie die richtige Beratung und Ausarbeitung von Wartungs- und Instandhaltungskonzepten inklusive Service und Montagen.

**Plasticon**
Composites

Plasticon Germany GmbH
Dieselstraße 10
46539 Dinslaken

Tel.: +49 2064 499-0
Fax: +49 2064 499-299
service@plasticon.de
www.plasticoncomposites.de

THE HOK® SOLUTION

The efficient solution for waste gas & water treatment



HOK® - activated carbon and, thanks to the favourable pore structure, the first choice for numerous applications in environmental technology:

- in biological waste water clarification
- as a filter material and adsorbent in water treatment applications
- as an adsorbent for waste gas purification in metallurgical and waste incineration processes

Sometimes, a single, well-considered decision is all it takes:

For the benefit of your company and for the benefit of the environment, the answer is HOK®!

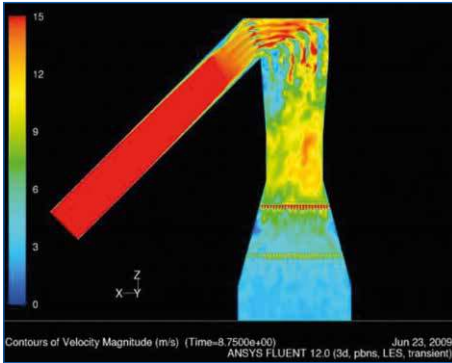


Bild 15: Seitenansicht CFD, nach der Optimierung

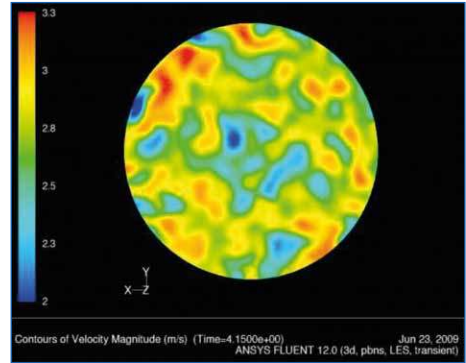


Bild 16: Seitenansicht CFD, Düsenebene nach der Optimierung

Nach erfolgter Homogenisierung des Gasstromes wird mittels Düsen oder Rotationszerstäuber Wasser zerstäubt und gleichmäßig mit dem heißen Gas vermischt.

Im Folgenden werden wir uns auf die Düsen als Zerstäubungsorgan beschränken, da für diese drei Anlagentypen die Düse als Zerstäubung die Majorität der gebauten Anlagen darstellt.

2.3. Flüssigkeitsverteilung

Um die Flüssigkeit gleichmäßig zu verteilen sind rein theoretisch unendlich viele kleine Düsen notwendig.

Um der potentiellen Gefahr von Anbackungen an den Wänden durch Abbindung von reaktiven Staub- und Aschepartikeln mit Wasser und die Gefahr von Korrosion durch Auftreffen von Tropfen an der Innenwand zu reduzieren wird zwischen Wand und Düsenstrahlen/Sprühkegel ein gewisser Abstand eingehalten. Durch diesen Abstand (nicht mit Tropfen beaufschlagter Randbereich) entfernt man sich natürlich vom Optimum der Wasserverteilung. Bei einer sehr guten Gasströmung kann dieser Abstand aber gering gehalten werden. Mittels Darstellung von empirisch aufgenommenen Düsenstrahlen werden diese Düsenverteilungen optimiert (Bild 18).

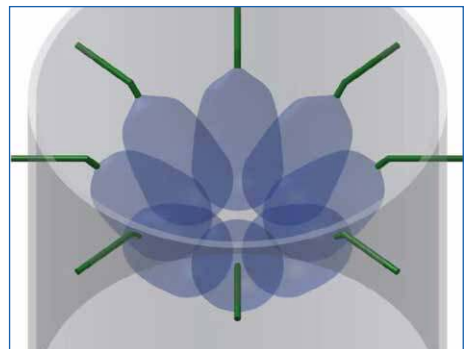


Bild 17: Beispiel für Düsenverteilung im Verdampfungskühler, Sprühabsorber und Sprühtrockner

3. Verdampfungskühler

VDKs werden, wie das Wort schon klar ausdrückt, nur für die Kühlung der Gase eingesetzt [4]. Weltweit sind mehrere Tausend Verdampfungskühler in Betrieb.

VDKs stellen auch heute noch einen Teil von vielen Abgasreinigungsanlagen dar. Diese werden verwendet um die heißen Gase (Temperaturen etwa 200 bis 1.200 °C) aus den Prozessen abzukühlen bevor diese den staubabscheidenden Komponenten (Elektrofilter, Gewebefilter) zugeführt werden.

Die Abkühlung der Gastemperatur ist notwendig um

- die nachgeschalteten Anlagenteile zu schützen (kostengünstigere Werkstoffe können verwendet werden),
- die Betriebsmenge des Gases zu reduzieren (Anlagen können kleiner = kostengünstiger ausgelegt werden)
- den Wirkungsgrad der Abscheideprozesse bei Elektrofilter durch Anheben der Gasfeuchte zu ermöglichen und zu erhöhen [5, 7].

Durch die Verdampfung des Wassers (Verdampfungsenthalpie Wasser 2.257 kJ/kg) wird das Gas abgekühlt.



Bild 18: Verdampfungskühler – Außenansicht

Die Austrittstemperatur kann durch Veränderung der eingebrachten Wassermenge geregelt werden.



Bild 19: Verdampfungskühler – Innenansicht

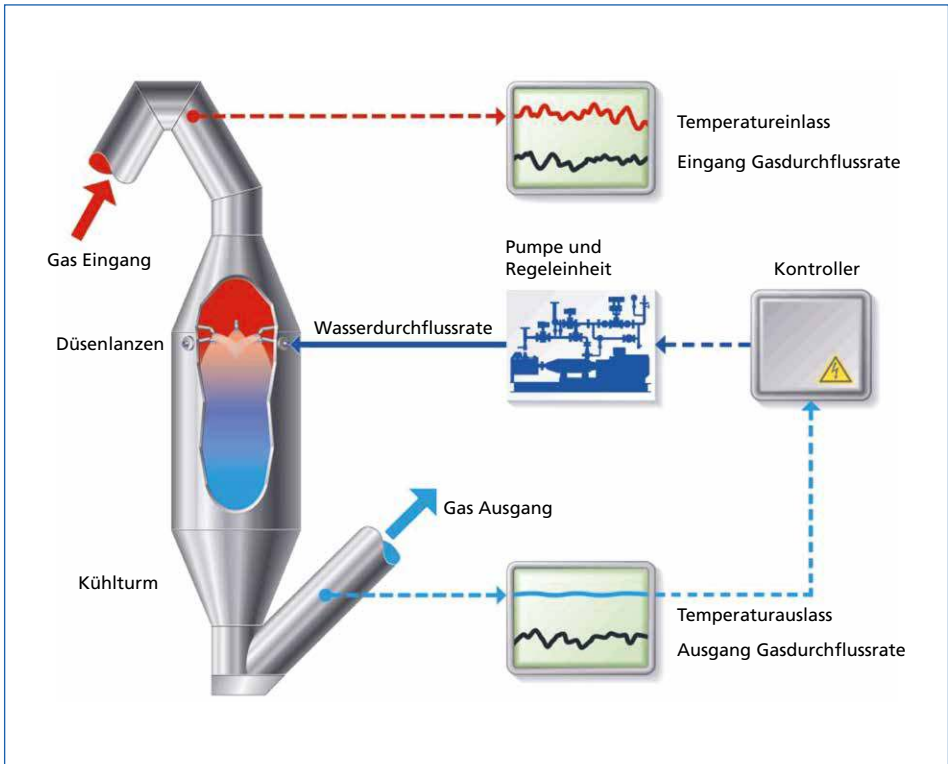


Bild 20: Regelschema Verdampfungskühler

Auslegung

Der VDK muss so groß gewählt werden, dass die eingebrachten Wassertropfen bei allen Betriebsbedingungen innerhalb des Zylinders des VDKs vollständig verdampfen. Da die Abgase in den meisten Fällen auch eine hohe Feststofffracht haben und die Feststoffe/Stäube/Asche z.T. in Verbindung mit Wasser [9] chemisch abbinden führt unverdampftes Wasser in Kombination mit den Stäuben zu starken Materialanhaftungen (*Anbackungen*) am unteren Konus des VDKs und/oder an den Seitenwänden. Diese Anbackungen müssen ab gewissen Ausprägungen meist mechanisch entfernt werden, was nicht bei laufendem Betrieb realisiert werden kann.

Je nach Anbackneigung der Anbackungen fallen diese auch gelegentlich nach unten in den VDK und können dort mechanische Schäden verursachen. Dieser Wartungsaufwand ist sehr kostenintensiv, gefährlich und reduziert die Verfügbarkeit der kontinuierlich laufenden Produktionsanlagen. Somit wird von Anlagenbauern und Endkunden auf eine sichere Auslegung der Verdampfungsprozesse geachtet.



Bild 21:

Anbackungen aufgrund unverdampfter Tropfen

Die notwendige Zeit von der Generierung der Tropfen bis zur Verdampfung hängt bei isobaren und isothermen Umgebungsbedingungen primär von der Größe der Tropfen ab.

Da aus Gründen der Ökonomie die Anlagenteile möglichst klein gebaut werden sollen, ist man bestrebt möglichst feine Tropfensprays unter Aufwendung von möglichst wenig Energie zu erzeugen.

Der kritische Fall (= Auslegungsfall) bei der Auslegung der Größe von VDKs ist der Betriebszustand mit der maximalen Gasmenge und der minimalen Ein- und Austrittstemperaturen.

Für die Auslegung des Bedüsungssystems (Pumpengröße, Nennweiten, Düsengrößen) muss die maximale Gasmenge, die maximale Ein- und die minimale Austrittstemperatur in Betracht gezogen werden [9].

Die Gasgeschwindigkeiten im Betriebszustand in den VDKs liegen bei Rücklaufdüsen (s.u.) zwischen 3 und 4,5 m/s, beim Einsatz von Zweistoffdüsen zwischen 4 und 6 m/s. Bei Eindüsung in Rohrleitungen (*Ducts*), welche baulich nicht als VDK ausgeführt sind, können Gasgeschwindigkeiten von bis zu 25 m/s auftreten.

Die Verdampfungsstrecken bis zur vollständigen Verdampfung werden unter Verwendung von Computerprogrammen oder mittels CFD errechnet.

4. Sprühabsorber

SA stehen in direkter *Konkurrenz* zu anderen Verfahren zur Abgasreinigung, wie den nassen Abgaswäschern [2, 6, 11]. Obwohl die technische Lösung der trockenen Abgasreinigung schon lange vorher zur Verfügung stand, wurde verstärkt erst ab etwa 1995 eine breite Akzeptanz bei den Betreibern und den Behörden erreicht [6]. Nahezu alle danach errichteten RRA in der Abfallverbrennung sind als reine Trockenverfahren ohne Nasswäscher konzipiert und ausgeführt worden. Die Investitions- und Betriebskosten dieser Anlagen sind deutlich geringer.

Diese trockene RRA kommt in Europa aber nur bei kleinen und mittleren Anlagen (primär Abfallverbrennung) zum Einsatz. Großkraftwerke sind aufgrund der länderspezifischen Parameter wie z.B. Energie-, Entsorgungs-, Additiv- und Personalkosten, geforderte Abscheideraten und Marktpreise für das Endprodukt Gips weiterhin mit nassen Abgaswäschern ausgerüstet [13].

In den USA werden aber auch Abgasreinigungen in großen Kohlekraftwerken (bis 800 MW_{el}) z.T. mit SA zur Abscheidung von SO₂ betrieben.

Auslegung

Im Gegensatz zum ST wird im SA eine definierte Flüssigkeit eingedüst. Der allergrößte Teil aller SA-Anlagen werden mit Kalkmilch (Calciumhydroxid (Ca(OH)₂) und Wasser), die restlichen Anlagen mit Natronlauge betrieben.

Die üblichen Konzentrationen der Kalkmilch liegen bei 5 bis 18 Prozent.

Die Aufgabe des SA ist es die für die Umwelt schädlichen Bestandteile aus dem Abgas (primär SO₂ und HCl) zu binden.

Auf die bekannten chemischen Reaktionen zwischen Ca und den Schadstoffen soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden.

Um bei diesem trockenen Verfahren die chemische Bindung der Schadstoffe (speziell SO₂) an das Calcium zu ermöglichen und den Wirkungsgrad der Reaktion zu erhöhen (= geringer Stöchiometriefaktor = Optimierung des Betriebsmitteleinsatzes) sind primär folgende Bedingungen notwendig:

- eine möglichst tiefe Abgastemperatur und
- eine erhöhte Abgasfeuchte

Durch die Verdampfung von Wasser im heißen Abgas wird man beiden Bedingungen gleichzeitig gerecht. Die hohe Verdampfungsenthalpie von Wasser senkt die Abgastemperatur stark ab und gleichzeitig steigt der Wasserdampfanteil im Abgas.

Durch die separate Regelung von Wasser und Kalkmilch (Additiv) kann zu jeder Schadstoffbelastung des Abgases der ideale Betriebspunkt (Anpassung Anteil Kühlung und Absorption) eingestellt werden.

Da die Anlagenteile und gasführenden Kanäle in der Regel nicht in Edelstahl sondern in Normalstahl ausgeführt werden [7] birgt das Bestreben die Temperatur am Austritt des SA an die Säuretaupunkttemperatur des Abgases anzunähern die Gefahr von Korrosion. Zusätzlich ist es nahezu unmöglich eine zuverlässige Verdampfung und ausreichende Trocknung der Ca bzw. der Calciumchlorid-Partikel bei Annäherung der Austrittstemperatur an den Säuretaupunkt zu realisieren.

Somit wird meist zu Lasten des Stöchiometriefaktors die Austrittstemperatur angehoben.

Wie beim ST sind auch hier der untere Konus und die Abgaskanäle im unteren Bereich begleitbeheizt. Die Gefahr von Anbackungen ist bei den hier vorliegenden Reststoffen aufgrund des geringeren Anteils an Calciumchlorid reduziert.

SA werden immer mit Zweistoffdüsen betrieben. Die Gründe dafür sind:

- es sind sehr feine Tropfenspektren notwendig um vertretbare Verdampfungs- und Trocknungsstrecken zu erhalten
- ein einstellbares Tropfenspektrum ist von Vorteil, da die Rahmenbedingungen sich oft ändern
- aufgrund des hohen Feststoffgehaltes in der Flüssigkeit ist die Abrasion sehr hoch, was Düsen aus massivem Hartmetall bedingt

Die Gasgeschwindigkeiten im Betriebszustand in den SA liegen zwischen 2,5 und 3,5 m/s. Die notwendigen Strecken bis zur vollständigen Verdampfung und Trocknung der entstehenden Reststoffpartikel ist, abhängig von der Konzentration der Kalkmilch und der Schadstoffe, sind um Faktor 3 bis 4 höher als bei einer reinen Wasserverdampfung.

5. Sprühtrockner

Sprühtrockner werden seit vielen Jahrzehnten bei der Herstellung von zahlreichen granularen Endprodukten wie Waschpulver verwendet [6].

Sprühtrockner als Teil von industriellen Abgasreinigungen (kurz: RRA) wurden notwendig, als die Vorschrift von abwasserfreien Reststoffverbrennungsanlagen Gültigkeit erlangte [3]. Da bis zur Jahrtausendwende primär RRA auf Basis von Nasswäschern konzipiert und gebaut wurden entstand zwangsläufig Abwasser [4].

Die primäre Aufgabe von ST ist die kostengünstige Entsorgung dieser Abwässer.

Im Zuge von neuen Vorschriften in den USA, müssen (vermutlich ab 2015 beginnend) dort auch Kohlekraftwerke abwasserfrei sein.

Die anfallenden Waschflüssigkeiten werden in den Haupt- oder einen Teilstrom des Abgases eingedüst, das Wasser verdampft und die festen Verdampfungsrückstände werden im anschließenden Filter abgeschieden und entsorgt.

Eine Alternative zur ST ist die Wasseraufbereitung mit dem Ziel verkaufbare Stoffe zu erhalten. Wobei auch bei diesem Verfahren eine Restmenge Wasser verdampft werden muss. Die Wasseraufbereitungsanlagen haben sich aber als sehr unzuverlässig und wartungs- und somit kostenintensiv herausgestellt. Kombiniert mit der Erfahrung, dass die chemisch reinen Wertstoffe wie z.B. Kochsalz aufgrund der rein psychologischen Hürde der Herkunft (Abfallverbrennungsanlage) nicht verkaufbar sind, haben sich einige Betreiber von Wasseraufbereitungsanlagen entschieden diese stillzulegen [3] und durch einen ST zu ersetzen.

Auslegung

Die Flüssigkeiten welche in den ST verdampft werden bestehen meist aus Mischungen der Abwässer vom sauren und basisch betriebenen Nasswäscher. Diese werden dann mit Kalkmilch (Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) und Wasser) oder Natronlauge neutralisiert.

Die dabei entstehende Flüssigkeit wird meist *Neuträt* genannt.

Die Neutralisierung ist zur chemischen Bindung der leicht flüchtigen ausgewaschenen Schadstoffe notwendig und führt zur Reduzierung des pH-Wertes. Würde man die Waschflüssigkeiten unneutralisiert eindüsen, würden sich die leicht flüchtigen Schadstoffe anschließend wieder im Abgas befinden [11].

In der nachfolgenden Tabelle 1 wird ein Beispiel für die Zusammensetzung einer Mischung, welche mit Natronlauge neutralisiert wurde, aufgezeigt:

Stoff	normal Gew.-%	min – max Gew.-%
CaCl ₂	4,9	3 bis 10
NaCl	1,9	1 bis 3
CaSO ₄	2,1	1 bis 4
CaF ₂	0,13	0 bis 3
Staub, Inertes	0,03	0,01 bis 0,3
H ₂ O	90,1	> 90
Salz-/Feststoffe		max. 10

Tabelle 1:

Zusammensetzung des Neuträts

Da aufgrund der stark schwankenden Beladungen des Abgases mit Schadstoffen die Konzentrationsbereiche der einzelnen Bestandteile sehr groß sind, ist es notwendig die verfahrenstechnischen Sicherheitsfaktoren sehr groß zu wählen. Die Anlagen müssen *robust* ausgelegt sein.

Die entscheidenden Unterschiede bei der Verdampfung von Restwasser mit diesen hohen Beladungen im Vergleich zu reinem Wasser sind:

1. Die hohe Salzfracht im Tropfen kann dazu führen, dass sich während des Verdampfungsprozesses um den Tropfen eine Feststoff-/Salzkruste bildet welche die weitere Aufheizung des Tropfens und die Verdampfung behindert und die Verdampfungsstrecke deutlich verlängert [11]. Außerdem kann es bei zu kurzer Verdampfungsstrecke vorkommen, dass diese eingeschlossenen Tropfen bzw. nicht durchgetrocknete Partikel beim Auftreffen auf der Wand aufplatzen und ungewollte Anbackungen bilden.
2. Im VDK verdampft das Wasser praktisch rückstandsfrei. Im ST bleibt aber nach der Verdampfung des Wassers ein Reststoff (Salz) übrig, welcher noch getrocknet werden muss bevor er einem Förderorgan zum Weitertransport übergeben werden kann.

Aufgrund des hohen Salzanteils (speziell von CaCl₂) und der Eigenschaft, dass CaCl₂ sehr hygroskopisch ist, muss der Reststoff sehr trocken am Ende der Verdampfungsstrecke ankommen.

Erfahrungsgemäß muss man von einer Erhöhung der Verweilzeit der Tropfen im ST von Faktor 5 gegenüber der reinen Wasserverdampfung ausgehen. Da sich die Durchmesser der Tropfen quadratisch auf die erforderliche Verdampfungsstrecke auswirken und die verfügbaren Bauhöhen von ST begrenzt sind ist man natürlich bestrebt Zerstäubungsmittel/Düsen mit feinen Tropfenspektren zu verwenden.

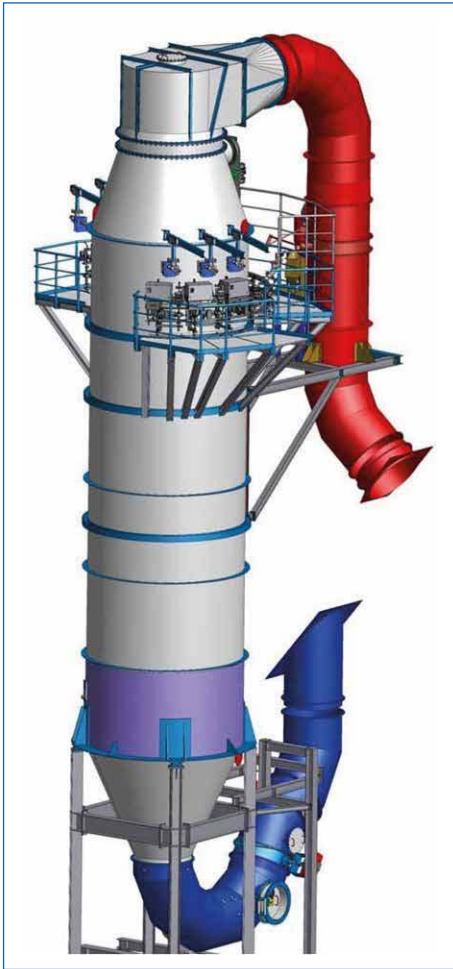


Bild 22: Übersichtsdarstellung eines Sprühtrockners

Für einen zuverlässigen Betrieb eines ST mit obiger Wasseranalyse (Tabelle 1) und einem hohen Anteil an Calciumchlorid muss darauf geachtet werden, dass die Zieltemperatur nach Verdampfung des Wassers (Austritt ST) nicht unter 160 bis 175 °C beträgt. Diese Austrittstemperatur muss basierend auf der gesamten Reststoffzusammensetzung festgelegt werden.

Außerdem müssen der untere Konus des ST und das gasführende Rohr zum Filter beheizt sein [7]. Ansonsten entstehen vor allem in der Anfahrphase bleibende Anbackungen.

Da Falschlufteintrag und Kältebrücken bei den üblichen Staubsammel- und austragsorganen am unteren Ende des ST fast nicht zu verhindern sind, wird bei diesen Anwendungen darauf oft verzichtet. Die gasführenden Rohrleitungen zum Filter müssen bezüglich Gasgeschwindigkeit so ausgelegt sein, dass die Reststoffe sicher aus dem ST heraus transportiert werden.

6. Quellen

- [1] Albring, W.: Angewandte Strömungslehre. Berlin: Akademie-Verlag, 5. Auflage, 1978
- [2] Diepenseifen, K.: Brennstoff, Dampf, Rauchgas. Verlag Lührs & Röver, 2011
- [3] E On-Energy from Waste-Broschüre *AHKW Neunkirchen*
- [4] Fritz, W.; Kern, H.: Reinigen von Abgasen. Vogel-Verlag, 3. Auflage, 1992
- [5] Förster, U.: Umweltschutztechnik. Springer-Verlag, 6. Auflage, 2004
- [6] Gottschalk, J.: Trockensorption als Abgasreinigungstechnik für Abfallverbrennungsanlagen. Vortrag Haus der Technik, Essen November 2006
- [7] Intensiv-Filter: Taschenbuch Filtrationstechnik. Wuppertal: Ley + Wiegandt-Verlag

- [8] Karpf, R.: Emissionsbezogene Energiekennzahlen von Abgasreinigungsverfahren bei der Abfallverbrennung. Neuruppin: TK-Verlag, 2012
- [9] Möck, A.: Balancing the costs. Veröffentlichung World-Cement, April 2007
- [10] Patentanmeldung PCT WO 2007/042210 A1 vom 19. April 2007
- [11] Schulteß, W.: Grundlagen der trockenen und quasitrockenen Sorption. Vortrag Haus der Technik, Essen November 2006
- [12] Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 11, 2014
- [13] VDI-Berichte 2165: Emissionsminderung 2012. VDI-Verlag, 2012



TONNENWEISE ENERGIE!

**ENERGIEGEWINNUNG AUS ENTSORGUNGSSTOFFEN:
EFFIZIENT & UMWELTFREUNDLICH.**

Die Kosten für Energie steigen und steigen. Umso wichtiger wird es für Unternehmen und Kommunen, nach günstigen Brennstoff-Alternativen zur Energieversorgung zu suchen. Wir kennen sie: Haus- und Gewerbemüll, Industrie-Reststoffe oder Ersatzbrennstoffe. Und seit vielen Jahren beweisen wir, wie sich aus ihnen über thermische Verwertungsprozesse Nutzenergie zur Erzeugung von Strom, Prozessdampf oder Fernwärme gewinnen lässt.

Mehr Infos und Referenzen unter: www.standardkessel-baumgarte.de



STANDARDKESSEL BAUMGARTE - Kraftwerksanlagen, Anlagen-Service und Dienstleistungen rund um die Gewinnung von Strom, Dampf und Wärme aus Entsorgungsstoffen, Primärbrennstoffen, Abhitze und Biomasse.



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Michael Beckmann (Hrsg.):

Energie aus Abfall, Band 14

ISBN 978-3-944310-32-9 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2017
Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.
Erfassung und Layout: Sandra Peters, Anne Kuhlo, Janin Burbott-Seidel, Claudia Naumann-Deppe,
Ginette Teske, Gabi Spiegel, Cordula Müller
Druck: Universal Medien 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 Funk- sendung, 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.