

Sprühtrockner – Sprühabsorber – eine Komponente die oft zu klein ist und hohe Betriebskosten verursacht –

Armin Möck

1.	Grundlage Verdampfungskühler	668
2.	Düsentchnik.....	670
2.1.	Düsenarten.....	670
2.2.	Grundlagen Düsentchnik – gilt nur für Einstoffdüsen	671
2.3.	Freie Querschnitte Düsen	673
2.4.	Düsenauswahl.....	674
2.5.	Funktion innenmischende Zweistoffdüsen	674
3.	Sprühtrockner	676
4.	Sprühabsorber	678
4.1.	Flüssigkeiten Sprühabsorber – Reaktion/Verdampfung – Auswirkung Anlagenbau:	679
5.	Auslegung Sprühtrockner – Sprühabsorber – Strömung und Düsenverteilung –	680
5.1.	Häufig realisierte Fehler an Sprühtrockner – Sprühabsorber	681
6.	Betrieb Sprühtrockner – Sprühabsorber.....	682
6.1.	Cleaning-in-place-System.....	683
7.	Betriebsbeispiel: Neubau von zwei Sprühtrocknern im AHKW Neunkirchen und Betriebserfahrungen.....	683
7.1.	Komponenten des Eindüs- und Reinigungs-Systems	687
8.	Literatur	690

Beim Betrieb von verschiedenen industriellen (meist Groß-) Anlagen (fossil befeuerte Kraftwerke, Zementwerke, Metallhütten, Reststoffverbrennungsanlagen/Abfallverbrennungsanlagen, Glaswerke, chemische Werke, petrochemische Anlagen usw.) entstehen große Mengen heißer Gase. Diese Gase sind in den allermeisten Fällen mit einer Vielzahl an Schadstoffen (Feststoffe/Staub, HCl, SO₂, HF, usw.) beladen, deren Konzentration oberhalb der gesetzlichen Grenzwerte liegen [11]. Zur Einhaltung dieser Grenzwerte werden die Abgase sehr aufwendig gereinigt. Im Folgenden wird detailliert auf zwei Bauarten einer Komponente der Abgasreinigung eingegangen: den Sprühtrockner und den Sprühabsorber.

1. Grundlage Verdampfungskühler

Die *Mutter* der Sprühtrockner und Sprühabsorber ist der klassische Verdampfungskühler. Verdampfungskühler sind auch Teil von Abgasreinigungsanlagen. 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),
- um den Wirkungsgrad der Abscheideprozesse zu erhöhen.

Der Verdampfungskühler besteht aus einem zylindrischen (meist vertikalen) Rohr (Durchmesser etwa 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. Im oberen Konus sind zur Verbesserung der Gasverteilung über dem Verdampfungskühler-Querschnitt meist Einbauten (Lochbleche, Strömungsrichtbleche, usw.) enthalten. Für einen hohen Wirkungsgrad eines Verdampfungskühler/Sprühtrockner/Sprühabsorber ist eine homogene und rotationsfreie Gasverteilung über den gesamten Querschnitt notwendig.

Die heißen Gase werden (meist) oben in den Verdampfungskühler eingeleitet. Nach erfolgter Vergleichmäßigung des Gasstromes wird mittels Düsen oder Rotationszerstäuber Wasser zerstäubt und gleichmäßig mit dem heißen Gas vermischt. Durch die Verdampfung des Wassers (Verdampfungsenthalpie Wasser 2.257 kJ/kg) wird das Gas abgekühlt.



Bild 1: Verdampfungskühler - Außenansicht



Bild 2: Verdampfungskühler - Innenansicht

Quelle: Intensiv-Filter Velbert

Die Austrittstemperatur kann durch Veränderung der eingebrachten Wassermenge geregelt werden. Im Folgenden werden wir uns auf die Düsen als Zerstäubungsorgan beschränken, da diese Anwendung die Majorität der gebauten Anlagen darstellt. Weltweit sind mehrere Tausend Verdampfungskühler in Betrieb.

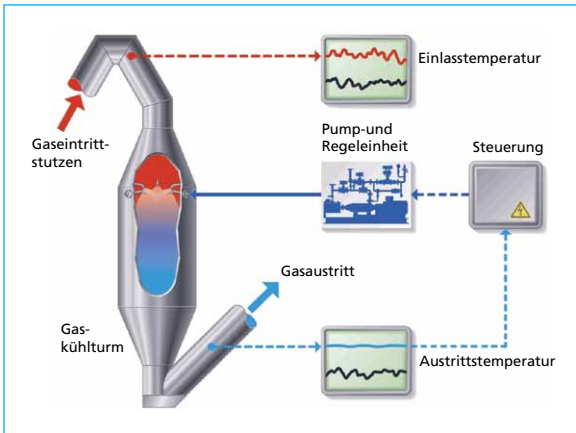


Bild 3:

Regelschema für den Verdampfungskühler

Der Verdampfungskühler muss so groß gewählt werden, dass die eingebrachten Wassertropfen bei allen Betriebsbedingungen innerhalb des Zylinders des Verdampfungskühlers 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 chemisch abbinden führt unverdampftes Wasser in Kombination mit den Stäuben zu starken Materialanhaftungen (*Anbackungen*) am unteren Konus des Verdampfungskühlers 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 Verdampfungskühler und können dort mechanische Schäden verursachen. Dieser Wartungsaufwand ist sehr kostenintensiv, gefährlich und reduziert die Verfügbarkeit der kontinuierlich laufenden Produktionsanlagen.



Bild 4: Anbackungen aufgrund unverdampfter Tropfen

Somit wird von Anlagenbauern und Endkunden auf eine sichere Auslegung der Verdampfungsprozesse geachtet. 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 [1].

Der kritische Fall (=Auslegungsfall) bei der Auslegung der Größe von Verdampfungskühlern 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.

2. Düsenteknik

Die für Sprühtrockner und Sprühabsorber notwendigen Düsen müssen folgende Eigenschaften aufweisen:

- Großer Volumenstrom-Regelbereich (mindestens 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);
- Einfach regelbar (stabile Regelung ohne Schwankungen);
- Geringes Energie/Tropfengrößen-Verhältnis;
- Robust, wartungsarm:
 - * geringe Verstopfungsgefahr = große freie Querschnitte,
 - * verschleißfest.

Auf dem Markt der Düsen sind etwa 40.000 Düsen (Auswahl auf Bild 5 erkennbar) mit unterschiedlichen Verfahrensparametern erhältlich. Unter dieser Vielzahl an Düsentypen und Leistungsgrößen kommen nur sehr wenige Düsen für diese sehr speziellen Anwendungen in Frage.



Bild 5: Überblick über Düsen

2.1. Düsenarten

Die für Sprühtrockner und Sprühabsorber verwendeten Düsen 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).

2.2. Grundlagen Düsenteknik – gilt nur für Einstoffdüsen

Bauform

Hohlkegel ist feiner als Vollkegel.

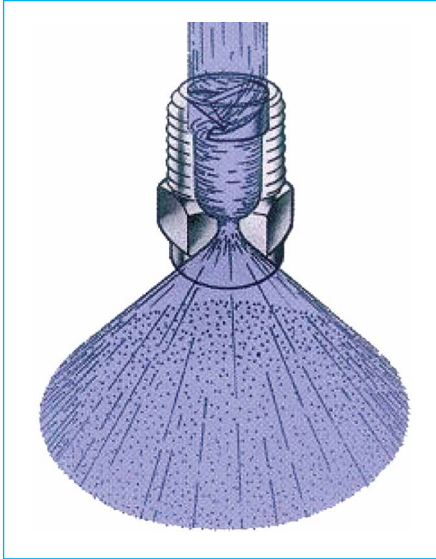


Bild 6: Vollkegeldüse

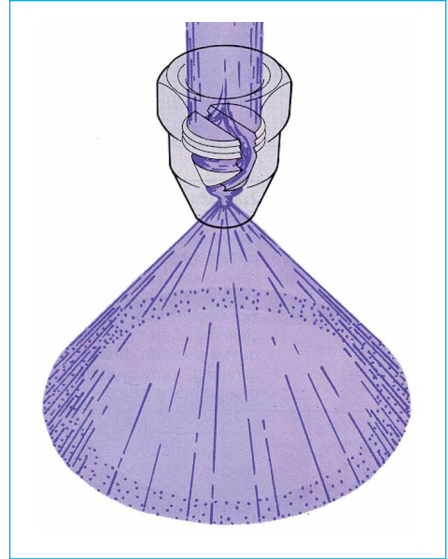


Bild 7: Hohlkegeldüse

Baugröße

Je kleiner eine Düse einer Bauart ist bzw. je weniger Flüssigkeit diese Düse zerstäubt, umso feiner ist das Tropfenspektrum.

Druck

Je höher der Druck an der Düse, umso feiner sind die erzeugten Tropfen.

Strahlwinkel

Je größer der Strahlwinkel einer Düse ist, umso feiner ist das Tropfenspektrum.

Bei vielen Düsenanwendungen muss der Volumenstrom der Düse laufend den Betriebsbedingungen angepasst werden. Da für diese Anpassung des Volumenstroms der Austausch der Düsen gegen andere Leistungsgrößen nicht in Betracht kommt, kann diese Anpassung der Betriebsweise nur über die Veränderung des Flüssigkeitsdruckes erfolgen.

Gemäß der Bernoullischen Gleichung steigt der Vorlaufdruck quadratisch zur Volumenstromänderung an. Dies bedeutet, dass Änderungen der Eindüsmengen nur über Druckänderungen realisierbar sind:

$$\text{Axial-Hohlkegeldüsen: } p_2 = (V_2/V_1)^2 \cdot p_1$$

$$\text{Axial-Vollkegeldüsen: } p_2 = (V_2/V_1)^{2,5} \cdot p_1$$

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.

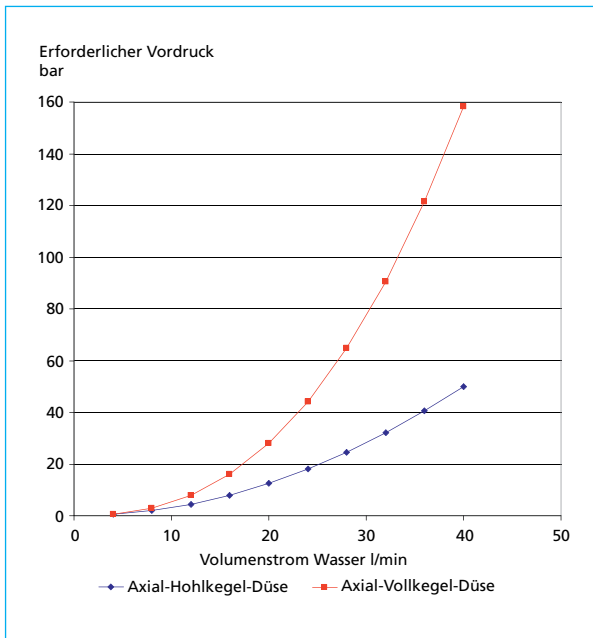


Bild 8:

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

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),
- 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.

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} bis dv_{98} bedeutet, dass 98 Prozent des Volumen der Flüssigkeit in Tropfen dieser Größe oder kleiner zerstäubt werden) bedingt durch die große Spanne des Vordrucks.

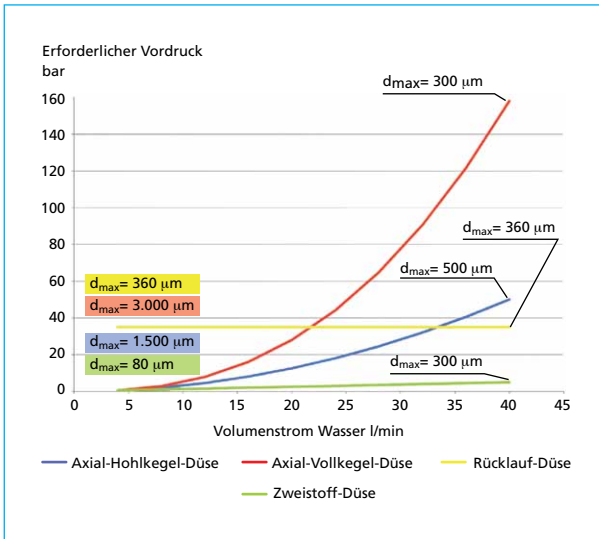


Bild 9:

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

In der Realität sind diese Düsen aus folgenden Gründen nicht für Anwendungen mit geregelter 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.

2.3. Freie Querschnitte 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

2.4. Düsenauswahl

Für Sprühtrockner und Sprühabsorber werden aus folgenden Gründen nur innenmischende Zweistoffdüsen verwendet:

- Aufgrund der Feststoffbelastung der Flüssigkeiten (bis 30 Vol.-%) 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

2.5. Funktion 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. Auf Bild 10 erkennen Sie das Funktionsprinzip der Düse. Das vor zerstäubte Wasser (2) und die über seitliche Bohrungen definiert zugeführte Druckluft (1) treffen sich in der inneren Mischkammer (3) und das feine Wasserspray verlässt die Düse über die Austrittsöffnung (4).

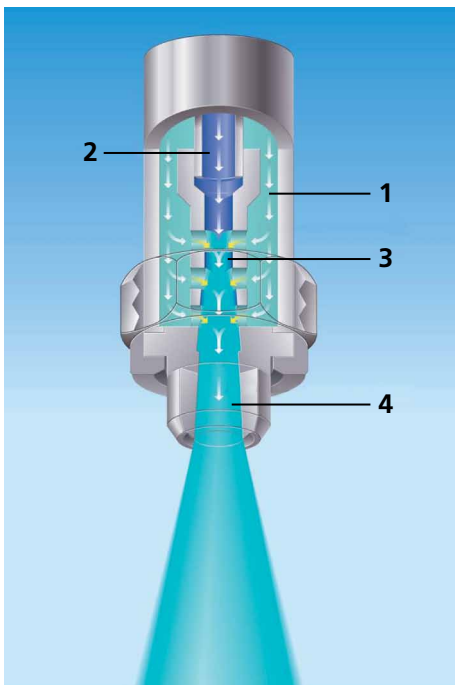


Bild 10: Prinzip Zweistoff-Düse - Prinzip und Baugrößen

Vorteile der Zweistoffdüse

- sehr feine Tropfenspektren möglich
- viele Leistungsgrößen verfügbar (V_{wasser} pro Düse von 0,0006 - 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

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.

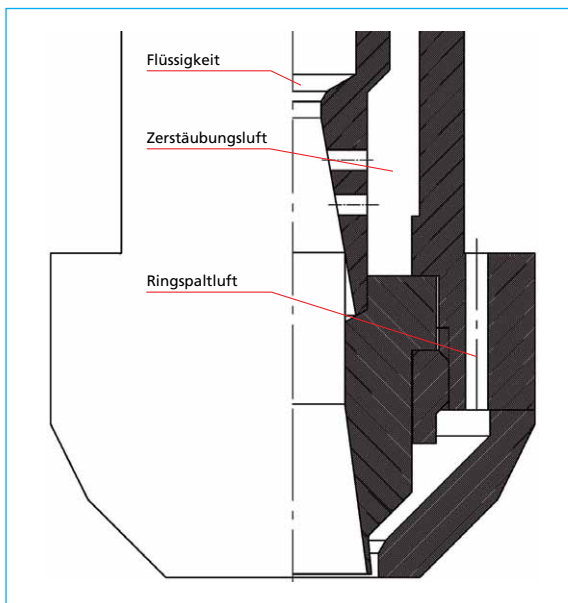


Bild 11: Ringspaltdüse

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden für die Anwendung in Sprühtrockner und Sprühabsorber die Laval-Düsen mit einem Ringspalt versehen. Diese patentierte *Ringspaldüse* (Bild 11) zerlegt die großen Tropfen am Düsenmund in kleine Tropfen (sekundäre Zerstäubung) [3].

In dem mit Nanolicht aufgenommenen Bild 12 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 13 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 12: Austrittskante Zweistoffdüse ohne Beaufschlagung von Ringspaltluft



Bild 13: Austrittskante mit Beaufschlagung von Ringspaltluft

Quelle: ESG Baden-Baden

Quelle: ESG Baden-Baden

3. Sprühtrockner

Sprühtrockner werden seit vielen Jahrzehnten bei der Herstellung von zahlreichen granularen Endprodukten wie Waschpulver verwendet. Sprühtrockner als Teil von industriellen Abgasreinigungen (kurz: RRA) wurden notwendig, als die Vorschrift von abwasserfreien Reststoffverbrennungsanlagen Gültigkeit erlangte [8]. Da bis zur Jahrtausendwende primär RRA auf Basis von Nasswäschern konzipiert und gebaut wurden entstand zwangsläufig Abwasser [2]. Die primäre Aufgabe von Sprühtrockner 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 Sprühtrockner 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 und durch einen Sprühtrockner zu ersetzen [8].

Flüssigkeiten Sprühtrockner – Verdampfung – Auswirkung Anlagenbau

Die Flüssigkeiten welche in den Sprühtrockner 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 *Neutrat* 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 [6].

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

Tabelle 1: Zusammensetzung Neutrat

Stoff	Gew.-% Normal	Gew.-% Min - Max
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_2O	90,1	90
Salz-/Feststoffe		maximal 10

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:

- 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 [6]. 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.

- Im Verdampfungskühler verdampft das Wasser praktisch rückstandsfrei. Im Sprühtrockner 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 CaCl_2) und der Eigenschaft, dass CaCl_2 sehr hygroskopisch ist, muss der Reststoff sehr trocken am Ende der Verdampfungsstrecke ankommen. Erfahrungsgemäß muss man von einer Erhöhung der Verweilzeit der Tropfen im Sprühtrockner von Faktor fünf gegenüber der reinen Wasserverdampfung ausgehen. Da sich die Durchmesser der Tropfen quadratisch auf die erforderliche Verdampfungsstrecke auswirken und die verfügbaren Bauhöhen von Sprühtrockner begrenzt sind ist man natürlich bestrebt Zerstäubungsmittel/Düsen mit feinen Tropfenspektren zu verwenden.

Für einen zuverlässigen Betrieb eines Sprühtrockner mit obiger Wasseranalyse (Tabelle 1) und einem hohen Anteil an Calciumchlorid muss darauf geachtet werden, dass die Zieltemperatur nach Verdampfung des Wassers (Austritt Sprühtrockner) nicht unter 160 bis 175 °C beträgt. Diese Austrittstemperatur muss basierend auf der gesamten Reststoffzusammensetzung festgelegt werden. Außerdem müssen der untere Konus des Sprühtrockners und das gasführende Rohr zum Filter beheizt sein [10]. Ansonsten entstehen v. a. in der Anfahrphase bleibende Anbackungen. Da Falschlufteintrag und Kältebrücken bei den üblichen Staubsammel- und austragsorganen am unteren Ende des Sprühtrockners fast nicht zu verhindern sind, wird bei diesen Anwendungen darauf oft verzichtet. Die gasführenden Rohrleitungen zum Filter müssen bzgl. Gasgeschwindigkeit so ausgelegt sein, dass die Reststoffe sicher aus dem Sprühtrockner heraus transportiert werden. Soll auf die Austragsorgane nicht verzichtet werden so muss auf die maximale Reduzierung (Verhinderung) der Falschlufmenge und die Begleitbeheizung besonderes Augenmerk gerichtet werden.

Der größte Kostenpunkt beim Betrieb der Sprühtrockner sind die Wartungskosten [4, 9]. Hierzu zählt primär die Kosten zur Entfernung großer Wandbeläge und feuchter Ablagerungen, v. a. im unteren Bereich des Sprühtrockners. Nicht selten kommt es vor, dass der untere Konus des Sprühtrockners mit feuchten Anbackungen regelmäßig komplett zuwächst und die Anlagen abgefahren werden müssen. Durch den Produktionsausfall, die Entfernung der harten Beläge und die gesonderte Entsorgung des abgebauten Materials entstehen sehr hohe Kosten. Außerdem wird durch die Stillstände die Verfügbarkeit der Anlage stark reduziert.

4. Sprühabsorber

Sprühabsorber stehen in direkter Konkurrenz zu den nassen Abgaswäschern deren Abwässer die Sprühtrockner verdampfen. 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 [5]. 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 [12]. In den USA werden aber auch Abgasreinigungen in großen Kohlekraftwerken (bis 800 MW_{el}) z. T. mit Sprühabsorber zur Abscheidung von SO₂ betrieben.

4.1. Flüssigkeiten Sprühabsorber – Reaktion/Verdampfung – Auswirkung auf den Anlagenbau

Im Gegensatz zum Sprühtrockner wird im Sprühabsorber eine definierte Flüssigkeit eingedüst. Der allergrößte Teil aller Sprühabsorber-Anlagen werden mit Kalkmilch (Calciumhydroxid (Ca(OH)₂) und Wasser), die restlichen Anlagen mit Natronlauge betrieben. Die üblichen Konzentrationen der Kalkmilch liegen bei 12 bis 18 Prozent. Die Aufgabe des Sprühabsorbers ist es die für die Umwelt schädlichen Bestandteile aus dem Abgas (primär SO₂, HCl, HF) zu binden. Auf die bekannten chemischen Reaktionen zwischen Ca und den Schadstoffen soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden.

Um bei den trockenen Verfahren die chemische Bindung der Schadstoffe 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 birgt das Bestreben die Temperatur am Austritt des Sprühabsorbers an die Säuretaupunkttemperatur des Abgases anzunähern die Gefahr von Korrosion [10]. 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 Sprühtrockner 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.

5. Auslegung Sprühtrockner – Sprühabsorber – Strömung und Düsenverteilung –

Um die Gehäusegröße von Sprühtrockner – Sprühabsorber möglichst klein zu halten ist man bestrebt den Wirkungsgrad der Verdampfung und Trocknung möglichst hoch zu wählen. Der Wirkungsgrad des Verdampfungsprozesses hängt primär ab von:

5.1. Gleichmäßige Gasverteilung über dem gesamten Querschnitt

Hierbei wird angestrebt dass alle Gasgeschwindigkeitsvektoren (abgesehen von der Randströmung mit geringerer Gasgeschwindigkeit) senkrecht nach unten gerichtet (möglichst keine Rotationsströmung) und die Geschwindigkeiten möglichst gleich sind [7]. Diesem Ziel kommt man heute mit CFD–Untersuchungen sehr nahe (Bilder 14 bis 17).

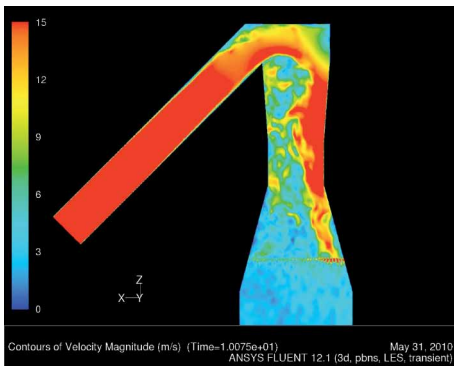


Bild 14: Seitenansicht CFD, vor Optimierung

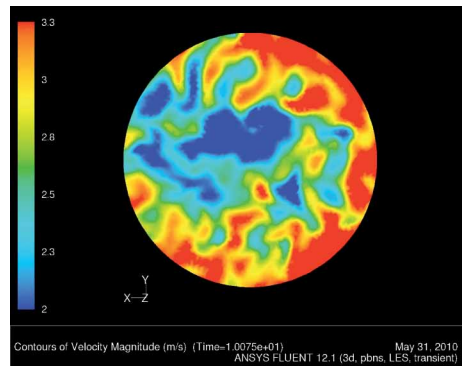


Bild 15: Seitenansicht CFD, Schnitt durch die Ebene

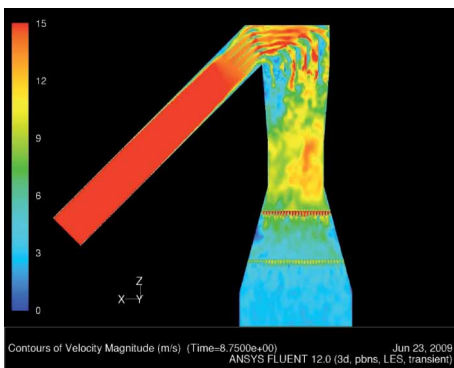


Bild 16: Seitenansicht CFD, vor Optimierung

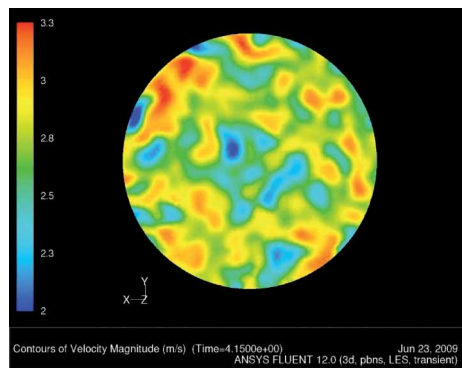


Bild 17: Seitenansicht CFD, Schnitt durch die Ebene

5.2 Gleichmäßige Flüssigkeitsverteilung über dem gesamten Querschnitt

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 bedüster 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).

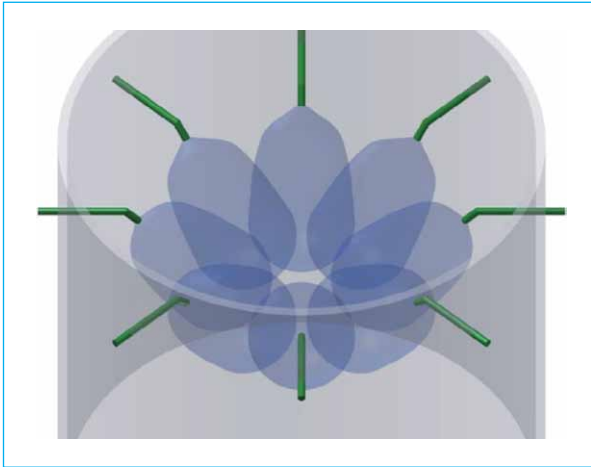


Bild 18:

Beispiel für die Düsenverteilung im Sprühtrockner – Sprühabsorber

5.1. Häufig realisierte Fehler an Sprühtrockner – Sprühabsorber

Gehäuse/Reaktor zu klein ausgeführt

Dies ist der am meisten realisierte Fehler. Entweder wird die Verweilzeit der Tropfen bei der Auslegung der Anlage zu gering gewählt oder entstehen die Störungen durch veränderte Rahmenbedingungen wie Gasmenge oder Eintrittstemperatur.

Gehäuse/Reaktor zu groß ausgeführt

Um eine große Verweilzeit der Tropfen zu erhalten wurden einige Sprühtrockner – Sprühabsorber sehr groß gebaut. Dadurch reduzierten sich die sonst üblichen Gasgeschwindigkeiten am Eintritt des Sprühtrockners – Sprühabsorbers von 3 bis 4 m/s auf 0,8 bis 2 m/s. Dies führte kombiniert mit dem Impulseintrag der Zweistoffdüsen zu Strömungsschiefen und Rückströmungen welche an den Wänden Anbackungen erzeugten. Grundsätzlich muss die Gasgeschwindigkeit im Sprühtrockner – Sprühabsorber mit der Düsengröße und -anzahl abgestimmt werden (Bild 18).

Schlechte Gasverteilung bei ausreichenden Sprühtrockner-Volumina

Viele ältere Sprühtrockner – Sprühabsorber (oft Bauweise Babcock) weisen am Eintritt keinen Konus sondern einen scharfen Übergang von der gasführenden Leitung zum Sprühtrockner – Sprühabsorber auf.

An diesen Sprühtrocknern – Sprühabsorbern, welche bzgl. Volumen groß genug ausgelegt sind kommt es aber häufig zu Funktionsstörungen. Diese sind bedingt durch die Tatsache, dass der zentrale Kernstrahl des Abgases sich nur sehr langsam dem großen Durchmesser anpasst. Die Kernströmung *schießt durch*. Es kommt dann zu Anbackungen am Boden und Unterteil des Sprühtrockners – Sprühabsorbers, da das aktive Volumen nicht genutzt wird. Bei gewissen Betriebszuständen kann es auch vorkommen, dass die Kernströmung am Rand des Zylinders eine Rückströmung verursacht, welche den Feintropfenanteil der Düsen wieder nach oben trägt und dort Anbackungen generiert.

6. Betrieb Sprühtrockner – Sprühabsorber

Anbackungen in und an den Düsen führen immer zu einer Vergrößerung der Tropfenspektren und somit zu einer Verschlechterung des verfahrenstechnischen Prozesses. Im Regelfall werden Zweistoffdüsen in Sprühtrockner/Sprühabsorber, welche üblicherweise mit kritischen Flüssigkeiten betrieben werden, aufgrund der Anbackungen in und an den Düsen und Düsenlanzen alle 8 bis 20 h demontiert und gereinigt.

Diese Reinigungen sind

- gefährlich weil dabei die laufende Anlage mit heißen und giftigen Abgasen geöffnet werden muss. Die Düsenlanzen sind heiß, schwer sind und die mit den Lanzen entfernten Stoffe gesundheitsschädlich.
- kostenintensiv, da Tauschlanzen vorhanden sein müssen, die Reinigung viel Zeit in Anspruch nimmt und aufgrund der Behandlung mit starken Säuren Düse und Lanze sehr stark verschleifen.
- für den Prozess störend, da Falschluf einströmt und die Gesamtsteuerung der Eindüsung durch das Außerbetriebnehmen einer Lanze gestört wird.

Trotz dieser regelmäßigen Reinigungen haben nahezu alle Sprühtrockner – Sprühabsorber eine maximale Reisezeit von 6 bis 8 Monaten. Der Grund dafür ist, dass der Feststoffaustrag, die Unterseite des Sprühtrockners – Sprühabsorbers oder/und die ausströmenden Gasleitungen starke Anbackungen aufweisen. Dadurch erhöht sich der Druckverlust über den Sprühtrockner – Sprühabsorber und die Gebläse können diese höheren Drücke nicht mehr kompensieren und gehen in Überlast. Z. T. werden Resttropfen auch bis in den nachfolgenden Filter getragen und verursachen dort verkrustete Filterschläuche oder Anbackungen in den Filterkammern [1]. Diese Folgeschäden von nichtoptimalen Verdampfungsprozessen im Sprühtrockner – Sprühabsorber generieren sehr hohe Reinigungs-, Instandhaltungs- und Produktionsausfallkosten. Oft entstehen diese Anbackungen im Sprühtrockner – Sprühabsorber durch verspätete Reinigung der Düsen. Der Betreiber muss entscheiden welcher Aufwand (Reinigung Düsen oder Sprühtrockner – Sprühabsorber) für ihn günstiger ist. In jedem Fall der Sprühtrockner – Sprühabsorber bzgl. Betriebs- und Wartungskosten eine *teure* Anlagenkomponente.

Diese Kosten können durch heute verfügbare cleaning-in-place-Systeme deutlich gesenkt werden.

6.1. Cleaning-in-place-System

In einigen Neuanlagen kommt die neue Ringspaldüse in Kombination mit einem automatischen Abreinigungssystem der Düsenlanzen (cleaning-in-place) zum Einsatz. Dieses Abreinigungssystem reinigt die Düsenlanzen und Düsen in einstellbaren Intervallen mit einem Reinigungsmedium automatisch ab (ohne Ausbau der Lanzen). Hierbei wird aus den z. B. 6 Stück Düsenlanzen eine Lanze außer Betrieb genommen, mit sauberem Wasser gespült und dann nacheinander auf der Wasser- und Druckluftseite mittels eines Luftstromes, welcher mit einer geringen Menge eines Reinigungsmediums beaufschlagt ist, gereinigt. Der ganze Reinigungszyklus nimmt etwa 1 bis 2 Minuten Zeit in Anspruch und läuft vollautomatisch ab. Da diese automatisierte Abreinigung sehr viel öfters als die manuelle Reinigung stattfindet kommt es nicht mehr zu den Anbackungen im Sprühtrockner – Sprühabsorber aufgrund eines nicht optimalen Düsenbetriebes (Bild 19 und 20).



Bild 19: Düse vor automatischer Reinigung



Bild 20: Düse nach automatischer Reinigung

7. Betriebsbeispiel: Neubau von zwei Sprühtrocknern im AHKW Neunkirchen und Betriebserfahrungen

Am Standort Neunkirchen (Bild 21) wird seit 1970 Hausmüll verwertet. Die Anlage erfuhr 1996 und 2001 Modernisierungsmaßnahmen.

Kennzahlen Neunkirchen

- Betreiber: EEW Energy from Waste GmbH
- Verbrennungskapazität: 150.000 t/a
- Dampferzeugerkapazität: 2 • 8,5 t/h
- Energieerzeugung:
 - * elektrisch: 11,6 MW Strom
 - * thermisch: 22,0 MW Fernwärme

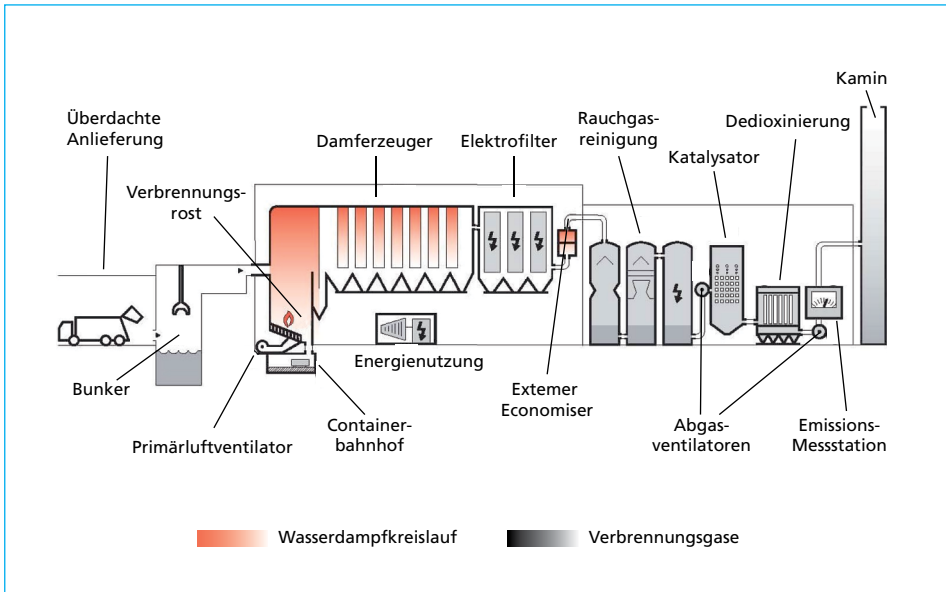


Bild 21: Aufbau AHKW Neunkirchen (Quelle: Infoblatt EEW Energy from Waste GmbH)

Die nasse Abgasreinigung besteht aus

- Stufe 1: Venturiwäscher sauer
- Stufe 2: Radialstromwäscher basisch
- Stufe 3: Nass-Elektrofilter

Bis Ende 2010 wurde das Abwasser aus den nassen Abgasreinigungsstufen mittels einer aufwendigen Abwasserbehandlungsanlage aufbereitet und danach eingedampft [8]. Auf den folgenden Bildern 22 und 23 ist die Komplexität des Verfahrens ersichtlich. Die Anzahl der hier nicht dargestellten aber eingebauten Einzelkomponenten (Kugelhähne, Ventile, Schieber, usw.) kombiniert mit dem *Schwierigkeitsgrads* der Flüssigkeit war der Grund für den notwendigen hohen Wartungsaufwand und der damit verbundenen Störanfälligkeit.

Das ursprüngliche Ziel der aufwendigen Abwasserbehandlungsanlage (ABA) und Eindampfanlage (EDA) war es, die Betriebskosten durch Verkauf der separierten Rückstände zu reduzieren. Es war geplant die mit der Anlage gewonnenen Wertstoffe Kochsalz und Gips zu verkaufen. Es stellte sich aber heraus, dass das Salz nicht verkaufbar war, da es a) zu feucht/nicht rieselfähig war und b) die emotionalen Hürden der Kunden bzgl. der Herkunft des Produkts unterschätzt wurden. Durch ein Überangebot an Gips auf dem Markt konnten auch hier keine guten Erlöse erzielt werden [8].

Neben der negativen Verkaufsbilanz war der Betrieb von ABA und EDA sehr wartungs- und somit kostenintensiv.

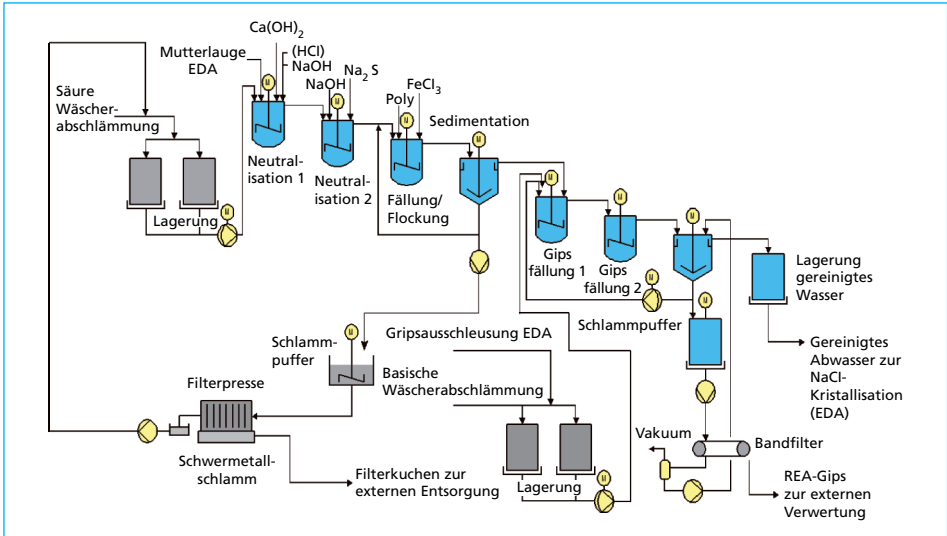


Bild 22: Aufbau Abwasserbehandlungsanlage (ABA) Neunkirchen bis 2010

Quelle: AHKW Neunkirche

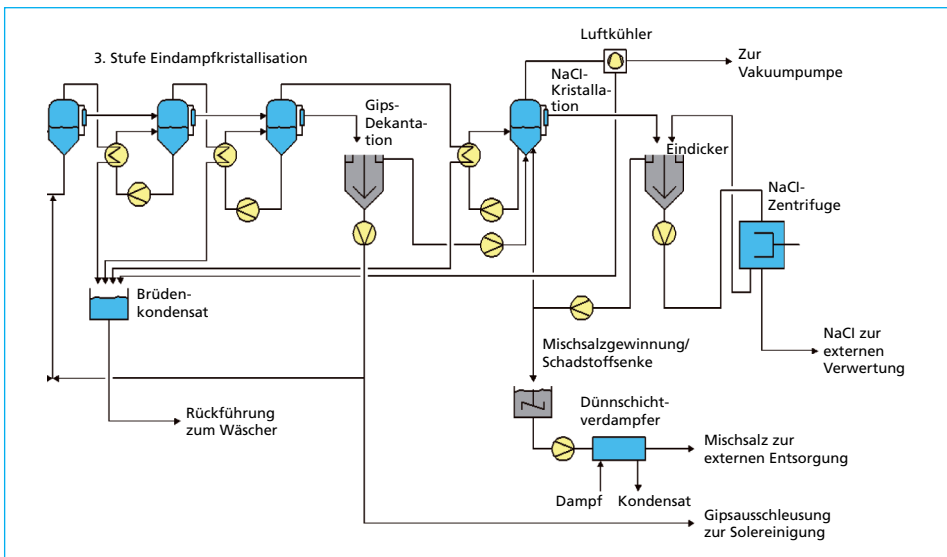


Bild 23: Aufbau Eindampfanlage (EDA) Neunkirchen bis 2010

Quelle: AHKW Neunkirchen

Der Dauerbetrieb war nur durch die ständig erhöhte Aufmerksamkeit des Personals in der Leitwarte und hohen manuellen Aufwand/Eingriff möglich. So mussten z. B. beim Anfahren mehrere Saugleitungen stündlich für 8 bis 10 h mechanisch freigestocht werden.

Das Vorhandensein von vielen dieser Problemstellen erschwerte den Betrieb beträchtlich. Unterblieben diese manuellen Eingriffe ging die Anlage schnell außer Betrieb.

Entscheidung für Umbau

Basierend auf folgender Sachlage wurde der Umbau zum Sprühtrockner im Jahre 2010 beschlossen.

- Teil der ABA hätte ersetzt werden müssen
- hohe Betriebskosten durch hohen stetigen Wartungsaufwand
- Produkte nicht wirtschaftlich verkaufbar
- Neuanlage konnte im Dampferzeugergebäude untergebracht werden
 - * geringe/keine Gebäudekosten
 - * einfaches Genehmigungsverfahren)

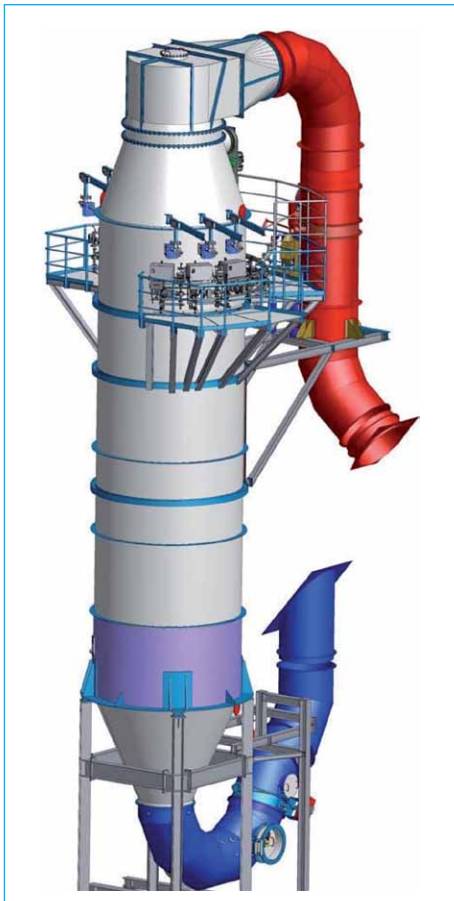


Bild 24: Übersichtsdarstellung Sprühtrockner Neunkirchen

Rahmenbedingungen für Umbau

- Sprühtrockner musste in bestehendem Gebäude untergebracht werden
- max. Höhe 22 m
- Genehmigung von Gebäudeerhöhung war unmöglich
- Eintrittstemperatur Gas 200 bis 250 °C
- Austrittstemperatur Gas mind. 170 °C
- Eindüsmenge 1,6 m³/h
- wartungsfreier Dauerbetrieb
- Reisezeit mindestens 6 Monate

Durch aufwendige CFD-Untersuchungen wurde die An- und Ausströmung und Gasverteilung höhenoptimiert gestaltet.

Erst die hier zum ersten Male im Dauerbetrieb zum Einsatz gekommene neue Düsen- und Abreinigungstechnik (Cleaning-in-place) ermöglichte überhaupt dieses Projekt.

Aufgrund der strikten Höhenlimitierung des Sprühtrockners wurden an die Düsenteknik hohe Ansprüche gestellt:

- Die *schwierige* Flüssigkeit (Neutrat mit Kalk-/Gipsanteil aufgrund Neutralisation mit Kalkmilch) musste sehr fein zerstäubt werden

- Die Düsen mussten aufgrund des Feststoffanteils in der Flüssigkeit sehr verschleißbeständig sein.
- Die nicht zu vermeidenden Anbackungen in den Düsenlanzen und Düsen aufgrund der gelösten Salze im Neuträt und aufgrund des Feststoffanteils durften nicht zu manuellen Eingriffen (Anlage wurde wartungsfrei projektiert) oder zum Ausfall der Anlage führen (sehr hohe Verfügbarkeit war gefordert).

Resultate

- Reduzierung des Druckluftverbrauches bei gleich bleibendem Tropfenspektrum bzw. Verfeinerung des Tropfenspektrum bei gleich bleibendem Druckluftverbrauch
- Individuelle Anpassung des Online-Abreinigungsaufwands und der -zyklen
- Reduzierung der Wartungsarbeiten um etwa 98 Prozent (Erhöhung der Reisezeit der Düsenlanzen von üblicherweise 8 bis 20 Stunden auf mehrere Monate ohne Demontage der Lanzen)
- Keine Düsen Schäden mehr, da manuelle Handhabung praktisch nicht mehr notwendig ist und durch die Verwendung von massiven Hartmetalldüse

7.1. Komponenten des Eindüs- und Reinigungs-Systems

Auf Düsenebene

Hier stellen die Düse (Bild 25) und die Düsenlanze (Bild 26) die entscheidenden Komponenten dar. Die Düse muss das richtige Tropfenspektrum generieren und mit der Lanze realisiert man die Verteilung der Düsen über dem Querschnitt. Die Düse ist vorne an der Düsenlanze montiert.

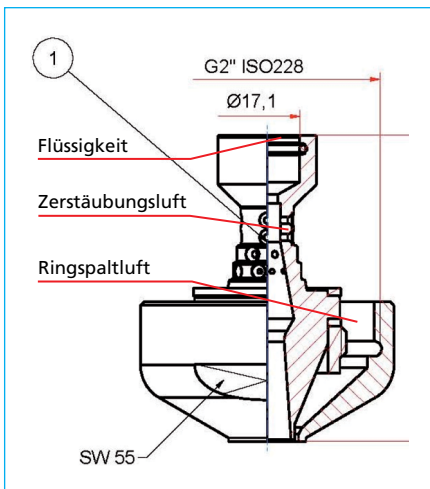


Bild 25: Düse

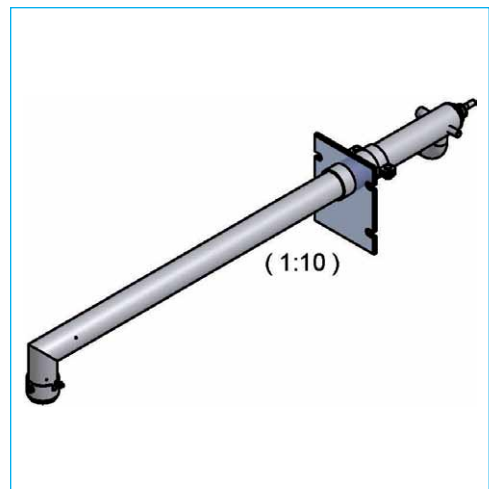


Bild 26: Düsenlanze

Die auf Bild 27 dargestellten Komponenten (magnetisch-induktive Durchflussmessung und das für diese Flüssigkeit speziell konzipierte Regelventil sind Teil der Gesamtregelung Sprühtrockner – Sprühabsorber, aber auch für die Online-Abreinigung notwendig. Auf Bild 28 ist die LOC-Einheit dargestellt. In dieser Einheit sind die Mess- und Regelungskomponenten für die automatische Abreinigung zusammengefasst.

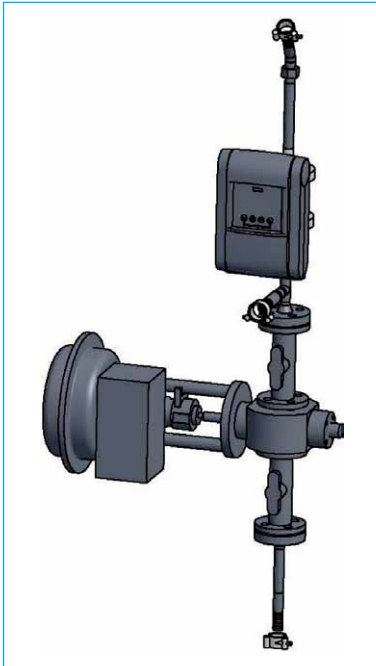


Bild 27: Messung und Regelung Flüssigkeit/Neutrat

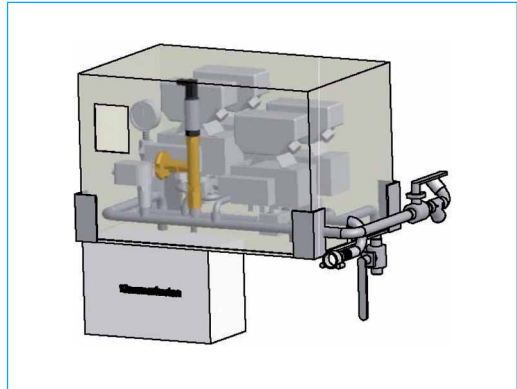


Bild 28: LOC-Einheit

Auf Bild 29 sind die auf den Bildern 25 bis 28 dargestellten Komponenten bei dem Neunkirchen-Sprühtrockner mit sechs Düsenlanzen und Ringleitungen ersichtlich.

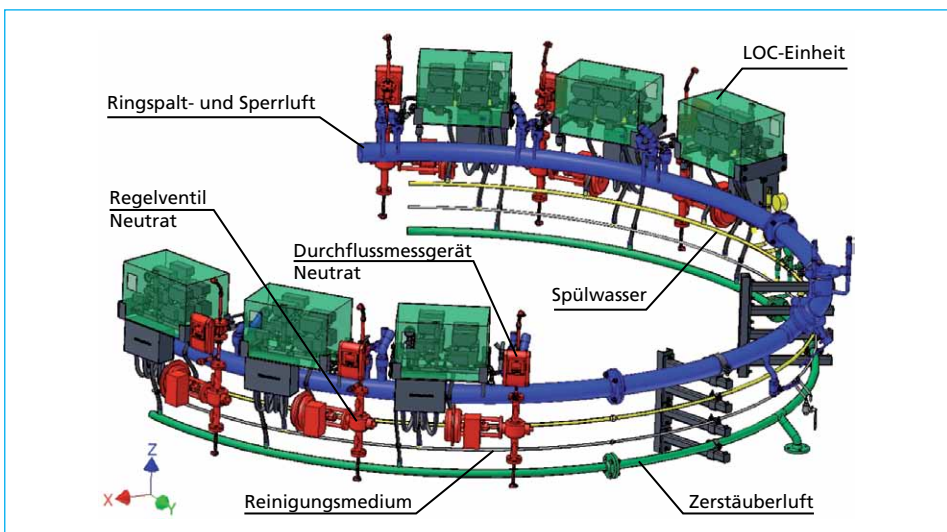


Bild 29: Aufbau Ringleitungen mit Anbaukomponenten

Versorgungseinheiten auf Ebene 0

Auf den folgenden Bildern 30 bis 32 sind die Komponenten dargestellt, welche für die Versorgung der Online-Reinigung mit dem Reinigungsmedium notwendig sind.

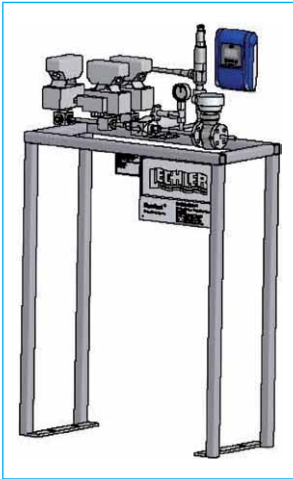


Bild 30: Zitronensäurestation



Bild 31: Zitronensäuretank

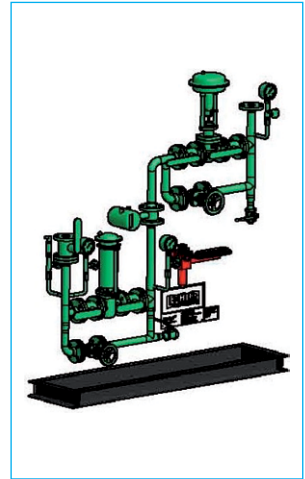


Bild 32: Regelstrecke Druckluft

Betriebskosten

- Druckluft pro Sprühtrockner 400 bis 600 m³/h bei $\Delta p = 3$ bis 5 bar (abhängig von der eingedüsten Flüssigkeitsmenge)
- Verbrauch Reinigungsmedium pro Düsenlanze:
 - = 20 l/d Zitronensäure (10 Prozent)
 - = 2,0 kg/d Zitronensäurepulver
 - = 2,- EUR/d Kosten

Aufgetretene Störungen

- Störung: Ringspaltluftgebläse ausgefallen, Düsenfunktion schlecht, starke
- Anbackungen am Fuße des Sprühtrockners
- Grund: Ansaugfilter aufgrund ausgefallener Reinigung verstopft
- Lösung: regelmäßiger Austausch Ansaugfilter
- Störung: Düsenspitze abgebrochen, Düsenfunktion verschlechtert,

Anbackungen

- Grund: Düsenspitze korrodiert
- Lösung: Düsen werden alle 12 bis 15 Monate ersetzt
- Störung: Leckagen an den Düsenlanzen
- Grund: Cl-Gehalt im Neutrat viel höher als geplant,
- Lösung: Flüssigkeitsrohre wurden in noch hochwertigerem Werkstoff ausgeführt

Zusammenfassung Betriebserfahrungen nach 24 Monaten Dauerbetrieb

- Anlage läuft im Dauerbetrieb ohne manuelle Eingriffe/Wartung (Kunde ist sehr zufrieden mit Anlage und Prozesssicherheit)
- Zu 95 Prozent der Zeit wird die Anlage im Maximalpunkt betrieben
- bei visuellen Überprüfungen alle 6 Monate werden minimale Wandbeläge am unteren Konus festgestellt
- aufgrund guter Verdampfung der Tropfen ist ein Betrieb ohne Staubaustrag am tiefsten Punkt möglich
- Zur Reduzierung der Betriebskosten könnte man Resttropfenmessungen und damit evtl. verbundene Optimierung des Luftverbrauchs durchführen

Die Bilder 33 bis 36 zeigen den Zustand des Sprühtrockners nach 18 Monaten Dauerbetrieb:



Bild 33: Lanzenebene



Bild 34: Blick nach unten in den Sprühtrockner



Bild 35: leichte Anbackungen am Konus unten



Bild 36: Blick nach oben

8. Literaturverzeichnis

- [1] Förster, U.: Umweltschutztechnik, 6. Auflage. Springer-Verlag: 2004.
- [2] Fritz, W.; Kern, H: Reinigen von Abgasen, 3. Auflage. Vogel-Verlag: 1992.

- [3] Patentanmeldung PCT WO 2007/042210 A1, 19. April 2007.
- [4] Möck, A.: Balancing the costs, Veröffentlichung World-Cement, April 2007.
- [5] Gottschalk, J.: Trockensorption als Abgasreinigungstechnik für Abfallverbrennungsanlagen, Vortrag Haus der Technik. Essen: November 2006.
- [6] Schulteß, W.: Grundlagen der trockenen und quasitrockenen Sorption, Vortrag Haus der Technik. Essen: November 2006.
- [7] Albring, W.: Angewandte Strömungslehre, 5. Auflage. Berlin: Akademie-Verlag: 1978.
- [8] E On-Energy from Waste-Broschüre, AHKW Neunkirchen
- [9] Karpf, R.: Emissionsbezogene Energiekennzahlen von Abgasreinigungsverfahren bei der Abfallverbrennung. Neuruppin: TK-Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012.
- [10] Intensiv-Filter: Taschenbuch Filtrationstechnik, Wuppertal: Ley + Wiegandt-Verlag.
- [11] Diepenseifen, K.: Brennstoff, Dampf, Rauchgas. Verlag Lührs & Röver: 2011.
- [12] VDI-Berichte 2165: Emissionsminderung 2012. VDI-Verlag: 2012.