

Sprühabsorber oder Verdampfungskühler – eine Komponente die Sorge bereitet?

Erfahrungen und Lösungen bei der Eindüsung von Flüssigkeiten in den
Abgasstrom am Beispiel des MHKW Wuppertal

Rüdiger Siebert
AWG Abfallwirtschaftsgesellschaft mbH, Wuppertal

Yannick Conrad
Rudi Karpf
ete.a Ingenieurgesellschaft mbH, Lich

VGB Tagung
Thermische Abfallverwertung
Kassel, 28. – 29. Oktober 2014

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Auslegungsgrundlagen von Sprühabsorbern und Verdampfungskühler.....	3
2.1	ROTATIONSZERSTÄUBER.....	8
2.2	ZWEI- BZW. DREISTOFF-DÜSEN.....	10
2.3	EINSTOFF-DÜSEN ZUR STAUBBENETZUNG	11
3	Substitution Sprühabsorber durch einen Verdampfungskühler	11
3.1	VERWENDUNG DER BESTEHENDE KOMPONENTE SPRÜHABSORBER	12
3.2	DÜSEN ODER ROTATIONSZERSTÄUBER?	12
3.3	STRÖMUNGSTECHNIK	14
3.4	KORROSIONSVERMEIDUNG.....	15
4	Erfahrungen mit der Umstellung der Sprühabsorption auf eine reine Verdampfungskühlung im MHKW Wuppertal.....	15
4.1	KURZBESCHREIBUNG	15
4.2	ERFAHRUNGEN IM BETRIEB	15
4.3	VERFAHRENSUMSTELLUNG	16
4.3.1	<i>Untersuchung des Temperaturverlaufs bei Einsatz und Positionierung der vorhandenen Düsen</i>	<i>16</i>
4.3.2	<i>Strömungsuntersuchungen.....</i>	<i>17</i>
4.3.3	<i>Strömungsuntersuchung mit neuer Düsenpositionierung</i>	<i>17</i>
5	Zusammenfassung.....	19
6	Literatur	20

1 Einleitung

In der Abgasreinigung hinter Abfallverbrennungsanlagen werden sehr häufig konditionierte Trockensorptionsanlagen mit Kalkhydrat eingesetzt. Hierbei erfolgt die Konditionierung über die Eindüsung von Wasser zur Einstellung optimaler Prozessbedingungen oder über die Verdüsung von Kalkmilch-Suspension. Dafür werden unterschiedliche Anforderungen an die Eindüsung der Flüssigkeit/Suspension und die Apparatedimensionierung gestellt.

Es stehen drei Verdüsungssysteme zur Verfügung, dessen Wirkungsweise sowie die Vor- und Nachteile aufgezeigt und diskutiert werden.

Erfahrungen mit Sprühabsorptionsverfahren zeigen, dass es immer wieder Betriebszustände gibt, in denen die Einhaltung der SO₂-Emissionswerte sich als schwierig gestaltet. Die Ursache hierfür liegt sehr häufig in der Auslegung des Sprühabsorbers. Die Einhaltung der Emissionen, insbesondere für SO₂, erfordert niedrigere Austrittstemperaturen (Filtertemperaturen), die jedoch aufgrund der notwendigen Verweilzeit (Trocknungszeit der Suspensionspartikel) nicht möglich sind. Alternativ hierzu kann die erforderliche Additivmenge als trockenes Pulver vor Gewebefilter dem Prozess zugegeben werden. In diesem Fall wird die Temperaturreduzierung des Abgases über eine Verdampfungskühlung durch eine reine Wassereindüsung in den Sprühabsorber realisiert. Das hat den Vorteil, dass der Sprühabsorber für eine reine Wasserverdampfung ausreichend dimensioniert ist und die Einstellung niedrigerer Austrittstemperaturen kein Problem darstellt. Hierfür werden verschiedene Beispiele, deren Randbedingungen sowie die Vor- und Nachteile aufgezeigt. Es wird ebenso beschrieben auf was bei dieser Umstellung zu achten ist, insbesondere im Bereich der Strömungsverhältnisse.

Am Beispiel des MHKW Wuppertal werden die Erfahrungen der Substitution des ehemaligen Sprühabsorbers durch die Betriebsweise eines Verdampfungskühlers aufgezeigt und bewertet.

2 Auslegungsgrundlagen von Sprühabsorbern und Verdampfungskühler

Sprühabsorber und Verdampfungskühler unterscheiden sich in der Weise, dass in den Sprühabsorber eine Suspension, d.h. Flüssigkeit und Feststoff, und in einen Verdampfungskühler eine reine Flüssigkeit, i.d.R. Wasser eingedüst wird. In beiden Fällen wird jedoch Wasser verdampft und das Rauchgas dabei abgekühlt und befeuchtet. Für einen störungsfreien Betrieb muss die Verweilzeit und somit die Abmessungen des Apparates ausreichend groß sein, dass das Wasser vollständig verdampft. Diese Verweilzeit muss aufgrund der

Tatsache der Feststofftrocknung beim Sprühabsorber länger sein als bei einer reinen Wasserverdampfung.

Hierbei spielen u.a. eine Rolle,

- Wärme und Stoffübertragung an der Phasengrenze Flüssigkeit/Gas (Konvektion, Strahlung, Wärmeleitung)
- Wärme- und Stofftransport im inneren der Tropfen (Wärmeleitung, Diffusion, Konvektion)
- chemische Reaktionen zwischen Flüssigkeit und Gas
- Phasenübergänge von gelösten Inhaltsstoffen im Tropfen (Kristallisation)

Für die mathematische Modellierung und Beschreibung der Verdunstung von Flüssigkeitstropfen wurden zahlreiche Modelle zur Berücksichtigung der beschriebenen Phänomenologischen Transportansätze entwickelt. Nach [1] wurden mit dem „Uniform-Temperatur-Modell“, bei dem von einer homogenen Temperaturverteilung innerhalb der Tropfen ausgegangen wird, gut Ergebnisse erzielt.

Bei der Verdampfung bzw. Trocknung einer Salzlösung, wie sie im Fall der Sprühabsorption vorliegt, stellt sich aufgrund des geringen Stofftransports innerhalb des Tropfens schnell ein Konzentrationsgefälle der Salzlösung ein. Das bedeutet, dass aufgrund der Wasserverdunstung in der äußeren Schicht der Tropfen sich Salz anreichert. Die hierdurch hervorgerufene erhöhte Salzkonzentration führt wiederum zu einer Erniedrigung des Wasserdampfdruckes, sodass weniger Wasser in der Tropfenoberfläche verdunstet. Die sich dadurch bildende Salzkruste schließt Wasser im inneren der Tropfen ein und vermindert die weitere Wasserverdampfung. Dies wurde auch in [2] sehr anschaulich experimentell nachgewiesen.

Das bedeutet, dass für die Auslegung von Sprühabsorbern bzw. Sprühtrocknern die Wärme- und Stofftransportvorgänge im inneren der Tropfen berücksichtigt werden müssen, was sehr schnell zu komplexen Ansätzen führt.

Für die reine Wasserverdampfung kann vereinfacht die isotherme Verdampfung, d.h. die Verdampfung der Tröpfchen bei konstanter Gas- und Flüssigkeitstemperatur, in folgender Herleitung betrachtet werden.

Für den aus der Gasphase konvektiv übertragener Wärmestrom gilt

$$\dot{Q}_{Gas,kov.} = \alpha \cdot A_{Tr} \cdot (T_{Gas} - T_{Tr})$$

mit der Tropfenoberfläche

$$A_{Tr} = 4 \cdot \pi \cdot r_{Tr}^2$$

und dem Wärmeübergangskoeffizient α

$$\alpha = \frac{Nu \cdot 2 \cdot r_{Tr}}{\lambda}$$

mit λ als Wärmeleitfähigkeit des Gases und Nu als dimensionslose Ähnlichkeitszahl die das Verhältnis von Wärmekonvektion und –leitung ausdrückt.

Für die isotherme Wasserverdunstung gilt

$$\dot{Q}_V = \dot{m}_{Tr} \cdot \Delta h_v \quad \text{mit } \Delta h_v \text{ der spezifischen Verdampfungsenthalpie.}$$

Setzt man die beiden Energieströme gleich, mit der Zielsetzung die Verdampfungszeit zu ermitteln, ergibt sich folgende Differenzialgleichung

$$-\frac{dm_{Tr}}{dt} \cdot \Delta h_v = \alpha \cdot A_{Tr} \cdot (T_{Gas} - T_{Tr})$$

$$-2 \int_{r_0}^r r_{Tr} \cdot dr = \frac{Nu \cdot \lambda}{\Delta h_v \cdot \rho_{H_2O}} \int_0^t dt$$

Für die Vollständige Verdampfung der Tropfen ($r_{Tr}(t) = 0$) ergibt sich

$$t = \frac{\rho_{H_2O} \cdot \Delta h_v}{Nu \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{(T_{Gas} - T_{Tr})} \cdot r_{0Tr}^2$$

Das bedeutet, je kleiner die eingedüsten Tropfen (r_{0Tr}) und je größer die Eintrittstemperatur T_{Gas} des Rauchgases sind, desto schneller sind die Tropfen vollständig verdampft.

Neben den thermodynamischen Randbedingungen gibt es ebenso verfahrenstechnische Unterschiede, die im Folgenden kurz skizziert werden sollen.

Aus der Reaktionskinetik ist bekannt, dass die Reaktionen zwischen der Gas- und Feststoffphase erheblich schlechter und gehemmter als Reaktionen zwischen der Gas- und Flüssigkeitsphase ablaufen. So unterstützt auch bei der Trockensorption die Anwesenheit von Wasser bzw. Wasserdampf die Reaktion zwischen den Schadgasmolekülen und dem als Feststoff verwendeten Kalkhydrat. Die Abscheidung wird dann begünstigt, wenn flüssiges Wasser auf den Kalkpartikeln vorhanden ist. Dies kann zum einen durch Kondensation der

Rauchgasfeuchte als auch durch die gemeinsame Eindüsung von Kalkhydrat und Wasser in Form einer Kalkmilch-Suspension erfolgen.

Diese Erkenntnis führte u.a. zur Entwicklung des Sprühabsorptionsverfahrens, das zunächst für die Rauchgasentschwefelung hinter fossilbefeuerten Verbrennungsanlagen erfolgreich eingesetzt wurde. In der Anwendung zur Reinigung von Rauchgasen aus der Müllverbrennung wurden im Vergleich zum Kraftwerksbereich (Stöchiometrien von ca. 1,4) lediglich Stöchiometrien von 2,2 bis >2,5 (bezogen auf die abgeschiedene Schadstoffmenge) erreicht.

Betrachtet man sich z.B. die Oberflächenstruktur (siehe Abbildung 1, linkes Bild) des aus Branntkalk mit Wasser frisch gelöschten Kalkhydrats, so stellt man fest, dass dieser eine sehr hohe spezifische Oberfläche besitzt. Die spezifische Oberfläche von Kalkhydrat aus einer Sprühabsorption mit Kalkmilch nimmt jedoch infolge der tropfenförmigen Agglomerationen (siehe Abbildung 1, rechtes Bild) im Vergleich dazu ab.

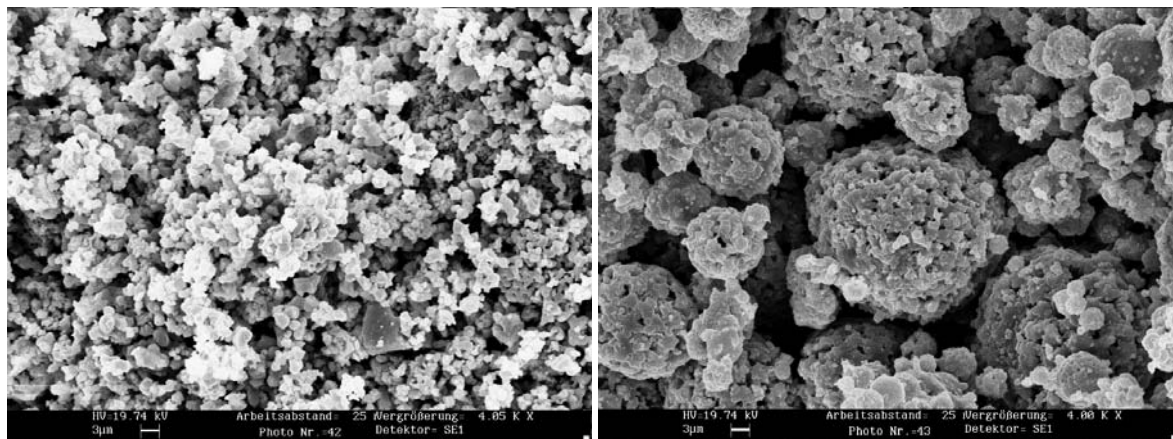


Abbildung 1: REM-Aufnahme links von frisch gelöschten Kalkhydrat und rechts von Kalkhydrat/Reaktionssalzen aus einer Sprühabsorption mit Kalkmilch [3]

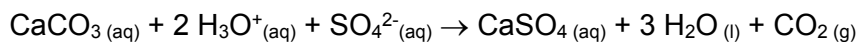
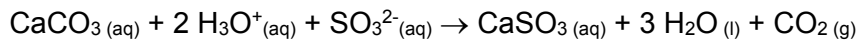
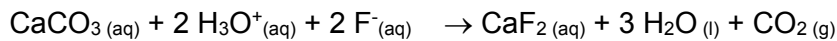
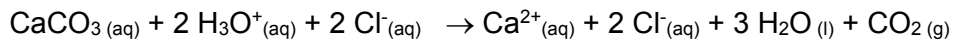
Die für die chemischen Reaktionen erforderliche Stoffaustauschfläche verringert sich infolge der tropfenförmigen Agglomerationen, die bei der Verdampfung der Kalkmilch entstehen. Das erklärt aber nicht die unterschiedlichen Stöchiometrien bei den Sprühabsorptionsverfahren für die Reinigung von Rauchgasen aus der Müll- bzw. Kohleverbrennung.

Bei der Sprühabsorption ist der Anteil der flüssigen Phase während der Absorbenseindüsung und für die Dauer der Verdampfungskühlung im Vergleich zur konditionierten Trockensorption deutlich höher. Berücksichtigt man die Steigerung der Schadstoffabsorption und die Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit aufgrund der Ionenbildung in der flüssigen Phase, dann erwartet man, dass sich für die Sprühabsorption im Vergleich zur konditionierten Trockensorption eine höhere Reaktivität und damit eine geringere Stöchiometrie ergeben. Das ist jedoch bei der Müllverbrennung nicht der Fall.

Die Ursache hierfür liegt hauptsächlich bei der Bildung von Calciumcarbonat. Das Kohlendioxid hat in der Gasphase im Vergleich zu den sauren Schadgasen HCl, HF und SO₂ zwar

eine geringere Affinität zum Kalkhydrat, dafür ist die Konzentration von CO₂ im Rauchgas um ein Vielfaches höher.

In trockenem Zustand ist das Calciumcarbonat aufgrund seiner hohen Gitterenergie und seiner kompakten Oberflächenstruktur relativ inert (Kalkstein). Von Säuren wird es jedoch unter Abspaltung von CO₂ zersetzt (saurer Regen). Daher kommt es in der flüssigen Phase zu einer Reaktion mit den sauren Schadgasen HCl, HF und SO₂:



Je länger eine flüssige Phase für die Reaktion der Schadgase bei der Chemisorption mit Kalkhydrat zur Verfügung steht, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass das gebildete Calciumcarbonat auch tatsächlich mit den sauren Schadgasen reagiert.

Bei der Sprühabsorption in der Rauchgasreinigung von Müllverbrennungsanlagen erfolgt während der Verdampfung des Wasseranteils der Kalkmilch die Absorption von CO₂ und die Bildung von CaCO₃. Da das Rauchgas bei der Konditionierung auf etwa 140 °C abgekühlt wird, ist die Dauer für die Verdampfung des Wasseranteils und die damit verbundene Existenz einer flüssigen Phase relativ kurz, sodass das gebildete CaCO₃ nur in geringem Umfang mit den sauren Schadstoffen reagieren kann.

Im Vergleich dazu wird das Rauchgas bei der Sprühabsorption in der Rauchgasreinigung von Kohlekraftwerken auf bis zu 70 °C abgekühlt. Für die Verdampfungskühlung sind daher größere Wassermengen und längere Verweilzeiten erforderlich, die durch eine größere Dimensionierung der Sprühabsorber erreicht werden. Die längeren Verweilzeiten im Rauchgasstrom, die erheblich niedrigere Rauchgastemperatur und die damit verbundene höhere Rauchgasfeuchte bewirken, dass die erforderliche flüssige Phase für die Reaktionen des gebildeten CaCO₃ mit den sauren Schadgasen (vgl. o.g.) für einen längeren Zeitraum verfügbar ist. Da in diesem Fall mehr gebildetes CaCO₃ umgesetzt wird, sinkt dadurch der Reagenzbedarf und somit die Stöchiometrie.

Die Erfahrungen heutiger Sprühabsorptionsanlagen nach Müllverbrennungsanlagen zeigen, dass insbesondere für eine effektive und ausreichend gute SO₂-Abscheidung tiefere Betriebstemperaturen und somit höhere relative Rauchgasfeuchten notwendig wären. Diese können jedoch oftmals nicht realisiert werden, da die Verweilzeiten in den Sprühabsorbern bzw. die Absorber-Abmessungen zu klein sind.

Es stehen drei Verdüsungssysteme für die Rauchgaskonditionierung zur Verfügung, dessen Wirkungsweise sowie die Vor- und Nachteile im Folgenden beschrieben werden.

2.1 Rotationszerstäuber

Die Rotationszerstäuber sind zentrisch im Kopf des Sprühabsorbers angeordnet. In der Regel genügt ein Zerstäubungsaggregat pro Sprühabsorber. Wie in Abbildung 2 gezeigt, wird die Flüssigkeit i.R. in entgegengesetzter Richtung des einströmenden Rauchgases verdüst.

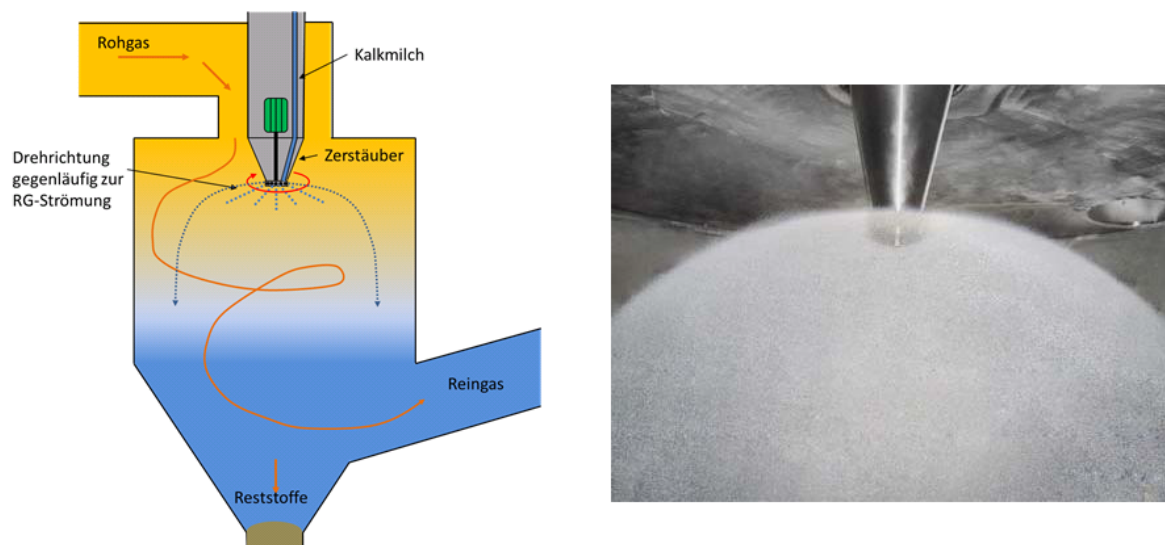


Abbildung 2: Links Sprühabsorber inklusive Anordnung des Rotationszerstäuber und Strömungsverlauf; rechts Aufnahme eines Sprühbildes [4]

Die Größe der in einem Sprühabsorber gebildeten Tropfen wird von unterschiedlichen Parametern bestimmt. Diese lassen sich nach [5] in zwei Kategorien einteilen:

- 1) Die stofflichen Eigenschaften des eingebrachten Fluid:

Stoffdichte	ρ [kg/m ³]	→	$\rho^t \sim D$
Oberflächenspannung	σ [kg/s ²]	→	$\sigma^s \sim D$
dynamische Viskosität	η [Pa s]	→	$\eta^r \sim D$

- 2) Die prozessabhängige Bau- und Betriebsweise

Drehzahl	n [1/min]	→	$n^{-p} \sim D$
Durchmesser des Sprühtellers	d [m]	→	$d^{-u} \sim D$
Förderrate	\dot{m} [kg/h]	→	$\dot{m}^q \sim D$

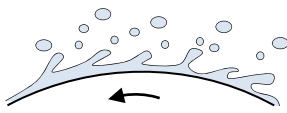
Darüber hinaus sind die Bauform (glatter Sprühteller oder Schaufel-/Düsenausführung) mit N [-] als Anzahl der Schaufeln/Düsen und die Beladungshöhe des Fluid auf dem Sprühteller relevant.

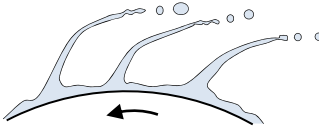
Die Tropfengröße, gemessen als Tropfendurchmesser D , verhält sich dabei proportional zu den oben genannten Einflussfaktoren:

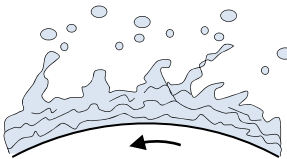
Die *qualitativen* Aussagen, dass eine Zunahme bei den stofflichen Eigenschaften, also eine Zunahme der Dichte, dynamischen Viskosität oder der Oberflächenspannung sowie eine höhere Förderrate, zu einem größeren Tropfendurchmesser führen, während eine höhere Drehzahl und ein höherer Durchmesser des eingesetzten Sprühtellers kleinere Tropfen ergeben, sind mit Erfahrungswerten gut zu belegen.

Die Grundlage für die quantitative Bestimmung der Abhängigkeiten zwischen Tropfendurchmesser und Einflussgröße über die Exponenten (p, q, r, s, t, u) bilden zahlreiche Versuchsreihen.

Neben der Tropfengröße ist auch der Bildungsmechanismus der Tropfen durch den Tellerdurchmesser d , die Drehzahl n und Fördermenge \dot{m} beeinflussbar [5]:

a)  Tropfenbildung bei sehr geringen Randgeschwindigkeiten und Förderrate: Viskosität und Oberflächenspannung des Fluid sind Prozessbestimmend

b)  *Ausbildung von Strähnen*
Tropfenbildung bei hoher Randgeschwindigkeit und Förderrate. Die physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeit sind nach wie vor bestimmend für die Tropfengröße

c)  *Ausbildung von Fluidschichten*
Bei sehr hoher Geschwindigkeit und Förderrate ist neben den physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeit das Wirken der Trägheitskraft auf das Fluid entscheidend; die Strähnenbildung wird durch die Ausbildung von Fluidschichten ersetzt.

Mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit und Förderrate nimmt demnach der Einfluss der physikalischen Eigenschaften des Fluid für die Tropfenbildung deutlich ab, so dass dieser als konstant angenommen werden kann. Die entstehenden Tropfen entsprechen in ihrer Größenverteilung einer Verteilung um den mittleren Durchmesser D_{50} .

Der Vorteil der Rotationszerstäuber ist ein sehr kompaktes Verdüsungssystem, was bei entsprechender Dimensionierung unempfindlich ist.

Nachteilig sind

- Beim Wechsel des Zerstäuberaggregates erfolgt für die Zeit des Wechsels keine Additivzugabe und Kühlleistung
- Beeinflussung der Tropfengröße über die Suspensionsdichte und –menge
- Bei ungleichmäßiger Rauchgas-Anströmung kann es, aufgrund des horizontalen Tropfenauswurfs zu Anbackungen im Absorber kommen.

Erfahrungen ausgeführter Anlagen zeigen, dass die o.g. Nachteile zu erheblichen Schwierigkeiten führen können. Ebenso zeigte sich an einigen Anlagen ein großer Verschleiß der am Umfang des Zerstäuberrad eingesetzten Düsen (Hülsen). Bei Dichteunterschieden der Suspension (größerer Wasseranteil gegenüber Kalkmilchmenge) wurden starke Materialabzehrungen an der Unterseite des Zerstäubungstellers festgestellt.

2.2 Zwei- bzw. Dreistoff-Düsen

Die Zwei- bzw. Dreistoffdüsen sind i.d.R. über Düsenlanzen am Umfang im Eintrittsbereich der Absorber oder Verdampfungskühler angeordnet (siehe Abbildung 3). Die Anzahl hängt von der Absorbergröße und Flüssigkeitsmenge ab. Entgegen dem Rotationszerstäuber erfolgt die Überwindung der Oberflächenspannung der Flüssigkeit zur Erzeugung feiner Tropfen nicht durch die Flieh- und Scherkräfte sondern durch die gleichzeitige Eindüsung von Druckluft. Hier gilt das Prinzip je größer der Druckluftdruck und –menge, desto kleiner sind die Flüssigkeitstropfen.

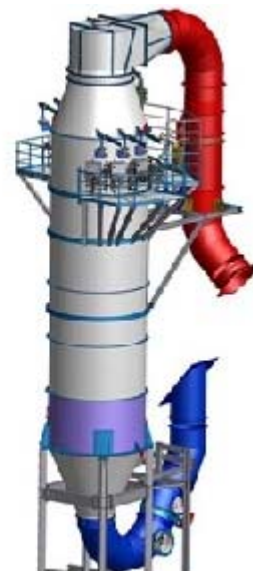


Abbildung 3: Sprühabsorber inklusive Anordnung der Zweistoffdüsen [4][6]

Es ist jedoch zu beachten, dass die „Druckenergie“ (Δp) der Druckluft nahezu proportional zu Bewegungsenergie umgesetzt wird und nur ein geringer Anteil der Druckenergie für die Überwindung der Scherkräfte der Oberflächenspannung aufgebracht wird.

$$v_{Tr} = 0,88 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_L}}$$

Der Vorteil dieser Zerstäubungsart ist, dass

- einzelnen Düsenlanzen/Düsen können ohne Einbußen der Abscheide- und Kühlleistung während des Betriebes gewechselt werden
- bei Verwendung einer Druckluftmengen-Regelung kann, unabhängig der Flüssigkeitsmenge, ein gleiches Tropfenspektrum sichergestellt werden.

Als Nachteil sind der größerer Rohrleitungs- und Armaturenaufwand sowie der Druckluftbedarf zu nennen.

2.3 Einstoff-Düsen zur Staubbeneetzung

Die Einstoffdüsen, z.T. als Rücklaufdüsen ausgeführt, werden zum einen in Wirbelschichtverfahren und zum anderen zur Befeuchtung von rezirkulierten Additiven/Reaktionssalzen für die feine Benetzung der Partikel eingesetzt. Im Vergleich zu den Zweistoffdüsen kann nicht so ein feines Tropfenspektrum ($> 200 \mu\text{m}$), selbst bei einem Flüssigkeitsdruck von ca. 40 bar, erreicht werden. Die Düsen sind i.R. sehr robust und unempfindlich. Es ist lediglich darauf zu achten, dass der „Düsenmund“ weitestgehend frei von Anbackungen bleibt, da dies das Tropfenspektrum beeinflussen kann. Hierfür gibt es diverse Möglichkeiten wie z.B. Sperr- oder Hüll-Luft.

3 Substitution Sprühabsorber durch einen Verdampfungskühler

Wie bereits erläutert kann es im Einzelfall erforderlich sein den bereits installierten Sprühabsorber durch einen Verdampfungskühler zu substituieren, wenn beispielsweise eine niedrigere Austrittstemperatur erforderlich ist (siehe Kap. 1).

Anstelle von Kalkmilch wird dann reines Wasser im Sprühturm eingedüst und das für die Abscheidung benötigte Kalkhydrat wie nach Sprühabsorber (Verdampfungskühler) trocken eingeblasen.

Um einen sicheren und effizienten Betrieb nach der Umstellung zu gewährleisten, sind jedoch technische Aspekte zu beachten, welche im Voraus eines Umbaus untersucht bzw. geklärt werden müssen.

3.1 Verwendung der bestehende Komponente Sprühabsorber

Aufgrund der schnelleren Verdampfung von Wassertropfen gegenüber Kalkmilchpartikeln, wird der bestehende Sprühabsorber in der Regel weiterverwendet, da dieser für die reine Verdampfungskühlung meistens überdimensioniert ist (siehe auch Kap. 2).

Einige existierende Sprühabsorber sind zusätzlich mit spezifischen Einrichtungen ausgestattet, die in der Verwendung als Verdampfungskühler überflüssig sind und in diesem Fall entfernt werden können, wie zum Beispiel Systeme für die Reinigung von kalkartigen Ablagerungen. Ansonsten kann der Sprühlturm in der Regel im Bestand übernommen werden.

3.2 Düsen oder Rotationszerstäuber?

Ein wichtiger zu betrachtenden Aspekt ist die Art und Weise der Eindüsung des Wassers respektive der Kalkmilch-Suspension in das Rauchgas.

Dafür kommen grundsätzlich zwei Systeme, Rotationszerstäuber oder Zweistoff-Düsen in Frage. Da diese Systemen i.R. für den Betrieb mit Kalkmilch ausgelegt sind, muss bei der Umstellung zunächst überprüft werden, in wie fern die Auslegung für den reinen Wasserbetrieb ausreicht, oder ob ein gesamter Systemaustausch notwendig ist.

Für die Auswahl zwischen Zweistoff-Düsen und/oder Rotationszerstäuber können folgende Kriterien herangezogen werden [5]:

Durchsatzleistung des Eindüsungssystem

Das Eindüsungssystem muss den gesamten Schwankungsbereich (MIN- bis zum MAX-Lastfall) der gewünschten Abkühlung und Additiveintrag im Sprühabsorber (Verdampfungskühler) abdecken. Bei hohen Flüssigkeitsmengen zeigen sich Rotationszerstäuber als Einzelkomponente etwas geeigneter als Zweistoff-Düsen.

Durch gleichzeitigen Einsatz von mehreren Düsen (Düsenlanzen) können jedoch heutzutage ebenfalls große Bereiche mit der Düsentechnik abgedeckt werden. Grenzen werden hierbei lediglich durch die Anordnungsmöglichkeiten der Düsen und den notwendigen Aufwand an Rohrleitungen gesetzt.

Leistungsbedarf des Systems (Effizienz)

Verglichen zum theoretischen aufzubringenden Leistungsbedarf für die Zerstäubung einer Flüssigkeit in Tropfenform, ist der tatsächliche Energieaufwand bzw. die Effizienz bei dem Einsatz von Zweistoff-Düsen als auch von Rotationszerstäubern sehr hoch bzw. schlecht.

Aus dem Grund ist der Leistungsbedarf des Zerstäubungssystems oftmals kein Entscheidungskriterium sondern Aspekte wie Platzverhältnisse, Verfügbarkeit u.a..

Tropfengrößenverteilung

Bei kleinen und mittleren Flüssigkeitsmengen, besitzen Rotationszerstäuber und Zweistoff-Düsen ähnliche Tropfengrößenverteilungen. Bei höheren Durchflussmengen ist die Homogenität der Verteilung bei Rotationszerstäuber etwas besser.

Feinheit der Tropfen

Für die Verdampfungskühlung spielt die erreichbare Feinheit der Wassertropfen eine große Rolle. Bei Kalkmilch wird die Feinheit durch die Anwesenheit von Kalkpartikel begrenzt, während bei reinem Wasser die Feinheit überwiegend durch die Grenze des Zerstäubungssystems bestimmt wird. Nach dem Stand der Technik, sind beide Systeme in der Lage ein feines Tropfenspektrum zu erzeugen, wobei Düsen durch die gesteuerte Zufuhr von Druckluft sehr feine Tropfen erzielen können, auch bei kleineren Flüssigkeitsmengen.

Wartung

Ein wichtiger Punkt aus Sicht des Betreibers ist die Möglichkeit der Wartung während dem Betrieb. Hier zeigt der Einsatz von Düsen deutlich Vorteile gegenüber Rotationszerstäuber. Im Falle einer Wartung des Rotationszerstäubers verliert der komplette Absorber seine Wirkung. Bei Düsenlanzen gibt es dagegen die Möglichkeit einzelnen Düsen zur Wartung und Reinigung herauszunehmen, während die restlichen Düsen weiterhin in Betrieb bleiben.

Design des Sprühturms für eine optimale Zerstäubung

Für die Optimierung der Eindüsung und Verteilung des Sprühbildes im Sprühturm sind Düsen besser geeignet, da aufgrund des geringen Platzbedarfs mehr Möglichkeiten in der Anordnung im Sprühturm gegeben sind.

Rotationszerstäuber sind in deren Positionierung eingeschränkt, und werden üblicherweise am Kopf des Sprühturmes eingebaut.

3.3 Strömungstechnik

Wie schon beschrieben, wird durch Erzeugung von feinen Tropfen, zunächst eine hohe Oberfläche zwischen Gasphase und Flüssigphase erzielt, wodurch eine bessere Konvektion des übertragenen Wärmestroms stattfindet.

Damit aber eine gleichmäßige Temperaturabkühlung und keine Strahlenbildung sichergestellt werden, ist auf die Strömungsverhältnisse innerhalb des Sprühturms zu achten.

Diese werden im Wesentlichen durch die physikalischen Eigenschaften des Rauchgases und die Geometrie des entsprechenden Sprühturms (inkl. Eindüsungssystem) beeinflusst.

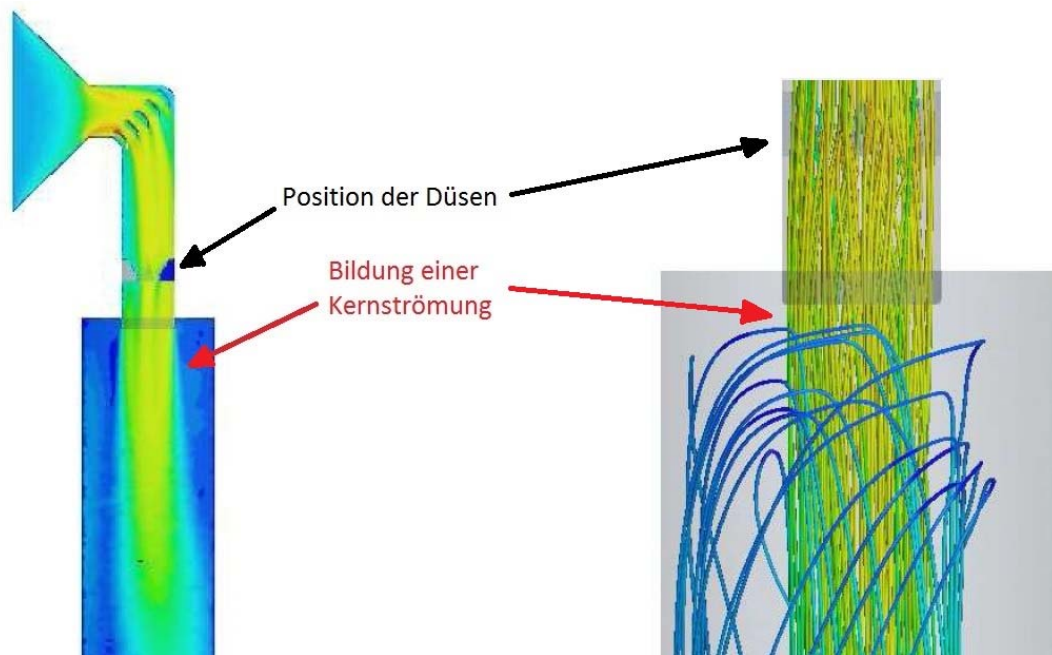


Abbildung 4: Simulierte Kernströmungseffekte innerhalb eines Sprühtrockners

Die Abbildung 4 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer Strömungsuntersuchung, welche im Rahmen einer Optimierung eines Sprühtrockners durchgeführt wurde. Es ist sehr gut zu erkennen, dass die besondere Eintrittsgeometrie zur Ausbildung einer Kernströmung in der Mitte des Sprühtrockners führt, wodurch das zur Verfügung stehende Volumen nur zu einem Drittel genutzt wird.

Auch die koaxiale Anordnung der Düsen im Kernstrom ist nicht optimal gewählt, da die Tropfen aufgrund der hohen Rauchgasgeschwindigkeit in diesem Bereich nur eine geringe Verweilzeit besitzen. Selbst der bessere Wärmetransport (Wärmeübergang) aufgrund der höheren Geschwindigkeit kann die geringere Verweilzeit nicht kompensieren und zu einem Tropfenaustrag aus dem Sprühturm führen.

Die Erfahrungen ausgeführter Anlagen zeigen, dass es immanent wichtig ist, dass die Geometrie des Sprühturms respektive die Rauchgasströmung sowie die Anordnung des Zerstäubungssystems aufeinander abgestimmt sein müssen.

3.4 Korrosionsvermeidung

Der Umbau des Sprühabsorbers zum Verdampfungskühler hat im Wesentlichen zum Ziel eine höhere Abkühlung des Rauchgases und somit Einstellung der für die Abscheidung notwendigen Temperatur sicherzustellen.

Hinsichtlich des Korrosionsverhaltens im Sprühlturm sind jedoch besondere Punkte zu beachten:

- Durch absenken der Rauchgas-Austrittstemperatur wird die Wandtemperatur insbesondere am Ende des Sprühlturms kälter (sog. „kaltes Ende“), so dass es in diesen Bereichen zu Kondensationen kommen kann.
- Durch Umstellung von Kalkmilch auf reines Wasser, entfällt der säureneutralisierende Anteil Kalkhydrat in der Flüssigkeit, wodurch die Säurebildner im Rauchgas direkt in der Flüssigphase vorliegen (Hydrolyse) und hoch korrosive Kondensate bilden können.

Aus den genannten Gründen ist es notwendig auf entsprechende Korrosionsschutzmaßnahmen zu achten, wie beispielsweise das Aufbringen eines Korrosionsschutzanstriches oder das Anbringung einer Begleitheizung im unteren Drittel des Sprühlturms.

4 Erfahrungen mit der Umstellung der Sprühabsorption auf eine reine Verdampfungskühlung im MHKW Wuppertal

4.1 Kurzbeschreibung

Im Rahmen einer Optimierungsmaßnahme von zwei identischen Abgasreinigungslinien des MHKW Wuppertals erfolgte der Umbau des vorhandenen Sprühabsorptions-Verfahren in ein konditioniertes Trockensorptionsverfahren mit Verdampfungskühler. Der existierende Sprühabsorber wurde als Verdampfungskühler umfunktioniert und weiterverwendet. Außer der Umstellung von Kalkmilch auf reines Wasser wurden die übrigen Komponenten, unter anderem der Rotationszerstäuber weiter verwendet.

4.2 Erfahrungen im Betrieb

Mit der Umstellung der Sprühabsorptionsanlage auf ein konditioniertes Trockensorptionsverfahren mit Verdampfungskühler konnte die gewünschte Zielsetzung, die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV nach dieser Verfahrensstufe (Vorreinigung), erfüllt werden.

Die Abkühlung mit reinem Wasser ermöglichte eine bessere Einstellung der erforderlichen Betriebstemperatur vor Gewebefilter und somit eine erhöhte Abscheideleistung der sauren Schadgase, insbesondere von Schwefeldioxid (SO₂).

Nach einer gewissen Betriebszeit wurden jedoch starke Erosionserscheinungen an der Sprühscheibe (inkl. Befestigungsschraube) des Rotationszerstäuber festgestellt (siehe Abbildung 5).



Abbildung 5: Aufnahmen über den Korrosionsschaden an der Sprühscheibe des Rotationszerstäubers [Quelle: AWG Wuppertal]

Als Schadensursache wird die niedrige Temperatur des eingespeisten Wassers vermutet (ca. 20 °C), welches verglichen zur ursprünglichen Temperatur der frisch gelöschten Kalkmilchsuspension (ca. 80 °C) zu Kondensation auf der Unterseite der Sprühscheibe führte. Aufgrund der dadurch hohen entstandenen Instandhaltungskosten wurden Alternativen zur Problemlösung gesucht und erarbeitet.

4.3 Verfahrensumstellung

Nach Abwägen verschiedener Maßnahmen erschien die Nutzung der bereits vorhandenen Notassereindüsung mittels Zweistoff-Düsen als Hauptbedüsung, als die beste Alternative. Um die Noteindüsung im Dauerbetrieb verwenden zu können, wurden der Umstellung verschiedene Untersuchungen vorangestellt, welche in Teilschritten erfolgte.

4.3.1 Untersuchung des Temperaturverlaufs bei Einsatz und Positionierung der vorhandenen Düsen

Im alleinigen Betrieb der Notwassereindüsung wurde bei zwei unterschiedlichen Lastfällen der Temperaturverlauf innerhalb des Sprühturms ermittelt. Im kleineren Lastfall zeigten sich

zunächst keine außergewöhnlichen Effekte bezüglich des Abkühlungsverhaltens im Sprüh-turm. Im höheren Lastfall konnte anhand der Temperaturwerte im unteren Teil des Absorbers festgestellt werden, dass die Wassertropfen nicht komplett verdampft sind und z.T partiell eine Benetzung der Absorberwand mit Wasser vorlag.

Um dies im zukünftigen Zweistoff-Düsenbetrieb zu vermeiden, wurden Strömungsuntersuchungen, insbesondere zur Simulation des Trocknungsverhaltens der Wassertropfen, bei Prof. Dr. Beer, Hochschule Amberg Weiden (HAW) beauftragt.

4.3.2 Strömungsuntersuchungen

Die Strömungssimulationen wurden zunächst für den Ist-Zustand bei unterschiedlichen Lastfällen, mit besonderem Augenmerk auf die Temperaturverteilung, die Rauchgas-Geschwindigkeit sowie die Tropfenbahnen inkl. Verweilzeit, durchgeführt.

Durch die Simulation wurde festgestellt, dass die Kernströmung des Rauchgases (heißeste Zone) wenig Kontakt mit den Sprühbahnen der Wassertropfen besitzen und somit eine unzureichende Verdampfung der Tropfen verursacht. Dadurch bestand auch das Risiko, dass Tropfen direkt auf die Gehäusewand treffen und es so zur lokalen Kondensation und daraus folgernd zu Korrosion kommen kann.

Aus den Simulationsergebnissen abgeleitet, wurden alternative Positionierungen der Düsen vorgeschlagen, die wiederum zunächst über strömungstechnische Untersuchungen verifiziert werden sollten.

4.3.3 Strömungsuntersuchung mit neuer Düsenpositionierung

Im Vergleich zur ursprünglichen Anordnung (Winkel) wurden die Düsenlanzen so positioniert, dass der Wasserstrahl mehr zur Kernströmung ausgerichtet ist und die Kernströmung diagonal schneidet, sodass es zu größeren Turbulenzen und damit zu einem besseren Wärmetransport kommt (vgl. Abb. 6).

Die Simulation zeigte, dass dadurch eine deutliche Verkürzung der Verdampfungszeiten erreicht werden konnte. Für den Max-Lastfall bestand jedoch weiterhin ein Risiko der Wandbenetzung durch Wassertropfen. Aus diesem Grund wurde eine weitere Simulation mit einem feineren Tropfenspektrum durchgeführt. Die Ergebnisse waren jetzt durchweg positiv, so dass einer Neupositionierung der bestehenden Düsen mit feinerem Tropfenspektrum nichts mehr im Wege stand.

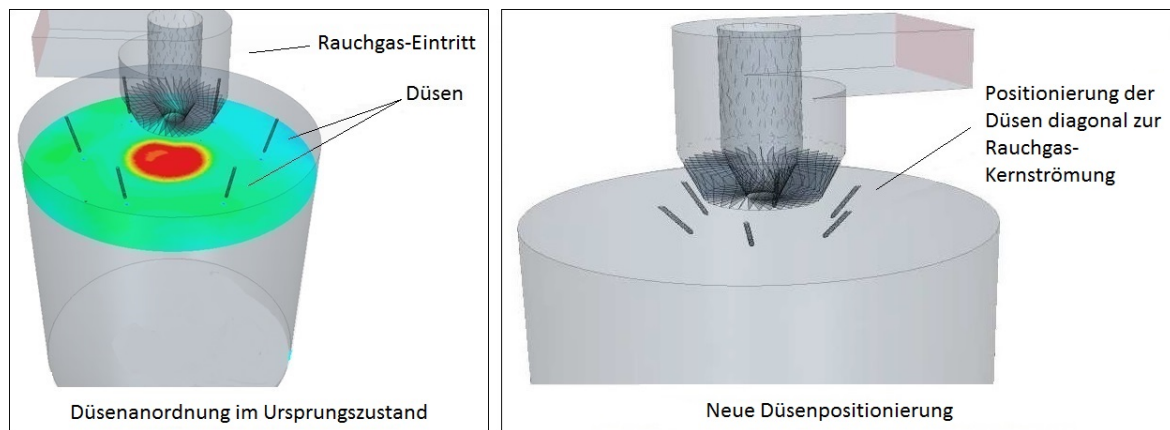


Abbildung 6: Vergleich der Düsenanordnung im Ist-Zustand und mit optimierter Positionierung

In Abbildung 7 sind die Ergebnisse der Strömungssimulation für die Tropfenverweilzeit und –verteilung des ursprünglichen Einbauzustands gegenüber der optimierten Positionierung der Düsenlanzen dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass die rot eingefärbten Tropfenbahnen mit der längsten Verweilzeit von > 1 Sekunde im wandnahen Bereich zu finden sind und letztlich auch die Ursache für die im Betrieb gefundene Wasserbenetzung widerspiegeln. Wogegen in der rechten Darstellung gut zu erkennen ist, dass die Tropfenbahnen sich überhaupt nicht mehr im wandnahen Bereich festzustellen und bereits auf halber Höhe des Absorbers komplett verdampft sind.

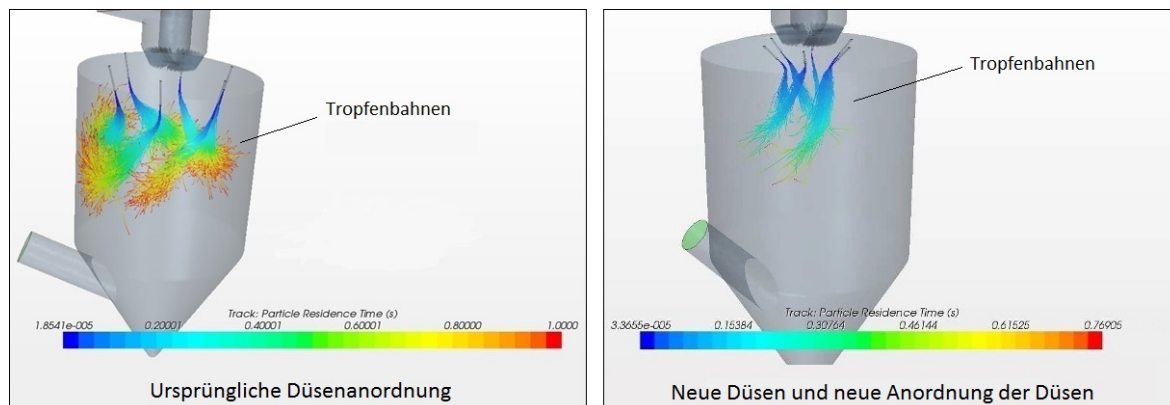


Abbildung 7: Vergleich der Verweilzeiten im Ist-Zustand und mit optimierter Düsenpositionierung sowie feinerem Tropfenspektrum

Auf Basis der Untersuchungsergebnisse wurde die vorhandene Eindüsung entsprechend auf Zweistoff-Düsen umgebaut. Der Betreiber ist seit dem Umbau sehr zufrieden und bestätigte einen störungsfreien und wartungsarmen Betrieb.

5 Zusammenfassung

Nach einer kurzen Einführung zum besseren Verständnis der Unterscheidungsmerkmale von Verdampfungskühlern und Sprühabsorbern sowie der jeweiligen Aufgaben innerhalb der Verfahrensstufe wurden die unterschiedlichen Eindüsungssysteme vorgestellt. Über die diskutierten Vor- und Nachteile sowie die Randbedingungen der verschiedenen Verdüsungssysteme wurden entsprechende Bewertungskriterien und Entscheidungsmerkmale beschrieben.

An dem konkreten Beispiel des MHKW Wuppertal wurde die Vorgehensweise für die Umstellung von dem Sprühabsorberbetrieb hin zur reinen Verdampfungskühlung aufgezeigt. Beginnend mit der reinen Substitution der Kalkmilch durch Wasser und die sich daraus ergebenden Schwierigkeit bis hin zu der stufenweisen Vorgehensweisen über Strömungsuntersuchungen und Umbauten zum heutigen Betrieb.

Das Beispiel Wuppertal macht deutlich, dass unter Berücksichtigung der sich neu ergebenden Prozessbedingungen und schrittweisen Vorgehensweise eine erfolgreiche und störungsfreie Umstellung möglich ist. Neben dem gegenüber Rotationszerstäubern flexibleren Betrieb mit Zweistoff-Düsen ist eine Prozessoptimierung für die Abscheidung der sauren Schadgasbestandteile aufgrund der tieferen Austrittstemperaturen ein entscheidender Vorteil.

Welche Lösung oder Maßnahme zur Prozessoptimierung notwendig und richtig ist, muss von Anlage zu Anlage aufs Neue untersucht und geprüft werden.

6 Literatur

- [1] Noll, B.; Wurz, D.; Hartig, S.; Feller, J.: Berechnungen von Tropfenverdunstung und – wachstum für wässrige Lösungen von Elektrolyten. VGB Kraftwerkstechnik 75, Heft 6, 1995.
- [2] Wurz, D.; Hartig, S.; Walter, J.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Verdunstung von Tropfen aus Salzlösungen und Suspension. 9. Fachtagung *Fort-schritte und Erfahrungen bei der Abgasreinigung von Feuerungsanlagen und thermi-schen Prozessen*. Haus der Technik, Essen, 6 Juni 2013
- [3] Karpf, R.: Verbesserung der Abscheideleistung bei optimierten Additiveinsatz. 3. Tagung *Trockene Abgasreinigungstechniken für Festbrennstoff-Feuerungen und die thermische Prozesstechnik*, Essen, 08 – 09 November 2007
- [4] Möck, A.: Eindüsung von Kalkmilch in der trockenen Rauchgasreinigung – Düse oder Rotationszerstäuber. Fachtagung *Trockene Abgasreinigung für Feuerungsanlagen und andere thermische oder chemische Prozesse*. Haus der Technik, Essen, 12 No-vember 2009
- [5] Masters, K.: *Spray drying handbook*. 5th. ed. Essex : Longman Scientific & Technical, 1991. ISBN 0-582-06266-7
- [6] Möck, A.: *Sprühtrockner – Sprühabsorber – Eine Komponente die oft zu klein ist und hohe Betriebskosten verursacht*. Energie aus Abfall – Band 11. Neuruppin : TK Ver-lag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014. ISBN 978-3-944310-08-4