

Simulationsgestützte Planung von Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA)

Claudia Bautsch, Markus Feldkamp und Rüdiger Baeye

1.	REA-Technologien.....	166
1.1.	Entwicklung der REA-Technologien.....	166
1.2.	Systematik der REA-Technologien.....	166
1.2.1.	Halbtrockene ZWS-REA-Technologie.....	167
1.2.2.	Nasse Kalk/Kalkstein-REA-Technologie.....	169
2.	CFD-Simulation.....	172
2.1.	Nasse REA.....	174
2.2.	ZWS-REA.....	174
3.	Vorstellung der simulierten Kraftwerksanlagen.....	174
3.1.	Neubau einer nassen REA – Aksa.....	174
3.2.	Optimierung einer nassen REA – Gersteinwerk.....	179
3.3.	Optimierung der ZWS-REA in Pilsen.....	182
3.3.1.	Netzmessungen.....	182
3.3.2.	Variation des Feststoffgehaltes.....	183
3.3.3.	Weitere Versuche.....	184
3.3.4.	Nachbildung der ZWS-REA Pilsen.....	184
3.3.5.	Ergebnisse.....	185
4.	Zusammenfassung.....	189
5.	Literatur.....	189

Die optimierte und effiziente Planung von Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA) mittels CFD-Simulation (Computational Fluid Dynamics) ist seit Jahren eine gebräuchliche und mittlerweile in jedem Projekt angewendete Methode. Dazu bedarf es neben umfangreicher Computertechnik und spezieller Software vor allem hochqualifizierter Spezialisten, die ein umfangreiches Fachwissen sowohl auf konstruktiv-verfahrenstechnischem als auch fluiddynamischem Gebiet aufweisen.

Der vorliegende Beitrag berichtet nach einer kurzen allgemeinen Einleitung über die Systematik der verschiedenen Entschwefelungsverfahren über insgesamt drei Projekte, in denen Rauchgasentschwefelungsanlagen sowohl für Neuanlagen simuliert als auch

bestehende REA mit Unterstützung geeigneter CFD-Simulation geplant und optimiert wurden, um die Effizienz der Anlagen zu erhöhen, die Verfügbarkeit zu verbessern und den Eigenenergieverbrauch zu reduzieren. Vor allem der Einsatz der Strömungssimulation mittels CFD ermöglicht es, Altanlagen auch im Hinblick auf zukünftig schärfere Emissionsgrenzwerte zu ertüchtigen.

1. REA-Technologien

1.1. Entwicklung der REA-Technologien

In den siebziger Jahren des vorigen Jahrhunderts rückte insbesondere durch großflächig auftretenden Umweltschäden – verursacht durch sauren Regen – das Thema der Schwefeldioxid-Abscheidung aus Kraftwerksabgasen in den Fokus der Öffentlichkeit und forcierte damit in den Industrieländern die Entwicklung unterschiedlicher Technologien zur Rauchgasentschwefelung. Zu den Ländern mit den ersten REA-Installationen zu Beginn der 80er Jahre gehörten insbesondere Deutschland, Japan und die USA.

Während der Fokus für große Kraftwerke (größer 300 MW_{el}) und/oder hohe Abscheidegrade anfänglich ausschließlich auf der nassen Kalkstein-REA-Technologie beruhte, wurden in den folgenden Jahren auch sogenannte halbtrockene und trockene REA-Technologien entwickelt, deren Einsatz zunächst begrenzt für Anwendungen in kleineren Kraftwerken oder für niedrigere Abscheidegrade schien.

Obwohl sich diese grundsätzliche Einstellung zum Teil bis heute gehalten hat, konnten insbesondere die halbtrockenen REA-Verfahren durch ständige Verbesserung ihrer Abscheidegrade und Optimierungen im Betriebs- und Wartungsverhalten ihren Anteil an den gesamten REA-Installationen in den letzten 15 Jahren deutlich verbessern.

Dennoch beträgt der Anteil der nassen Kalkstein-REA an den Gesamtinstallationen basierend auf der installierten Kraftwerksleistung nach wie vor etwa 85 Prozent, während der Anteil der halbtrockenen REA (Sprühabsorption und ZWS-REA) nur bei etwa 10 Prozent liegt. Alle anderen REA-Technologien sind eher Nischenprodukte und fallen prozentual nicht ins Gewicht.

1.2. Systematik der REA-Technologien

Das nachfolgende Schema zeigt die Systematisierung der verschiedenen REA-Technologien. Die Unterschiede liegen in verschiedenen verfahrens- und anlagentechnischen Prinzipien. Einige der aufgeführten Technologien wurden nur in geringer Anzahl in kommerziellen Anlagen umgesetzt.

Da sich die bei der Hamon Enviroserv GmbH durchgeführten simulationsgestützten Anlagenplanungen marktbedingt insbesondere auf die halbtrockene ZWS-REA und die nasse REA (Kalkstein bzw. Seewasser) beziehen, werden diese beiden Verfahren nachfolgend kurz vorgestellt.

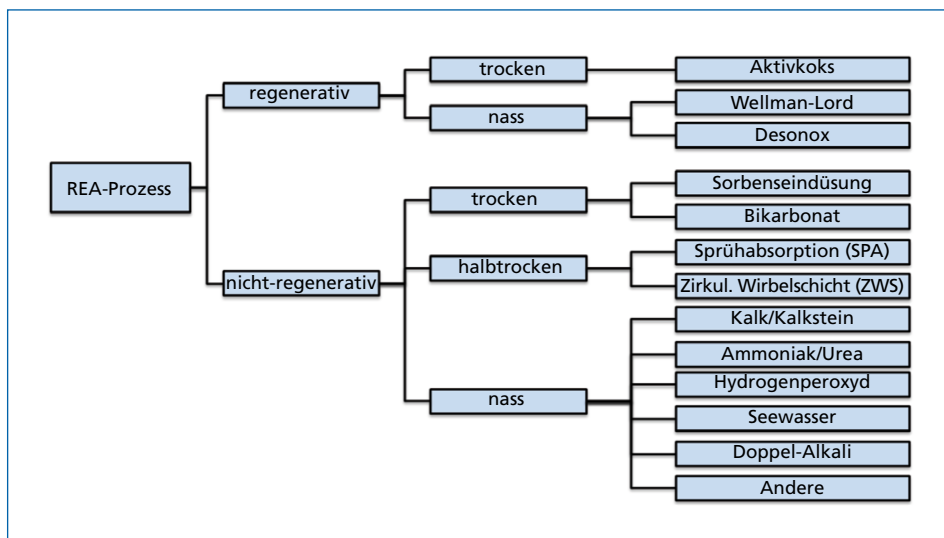


Bild 1: Systematisierung der verschiedenen REA-Technologien

1.2.1. Halbtrockene ZWS-REA-Technologie

Die Entwicklung der zirkulierenden Wirbelschicht (ZWS) Technologie begann Anfang der 70er Jahre zur Abgasreinigung von metallurgischen Prozessen. So war die erste Anlage ausschließlich für die Flußsäure (HF) Abscheidung in der Aluminium-Industrie konzipiert [11].

Durch entsprechende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten fand diese Technologie anschließend auch im Bereich der Rauchgas-Entschwefelung von Kraftwerken [12] sowie zur Abscheidung der sauren Rauchgasbestandteile HCl, HF und SO₂ in Müllverbrennungsanlagen Einzug [13].

Verfahrenstechnisch besteht eine Rauchgasreinigungsanlage basierend auf der ZWS-Technologie aus zwei Kernkomponenten, dem ZWS-Reaktor zur Abscheidung der gasförmigen Bestandteile und einem nachgeschalteten Filter zur Feststoffabscheidung. Die von der vorgeschalteten Verbrennung kommenden Rauchgase durchströmen den ZWS-Reaktor und das direkt danach angeordnete Filter und verlassen die ZWS-REA über ein Saugzuggebläse und einen Kamin gereinigt in die Atmosphäre.

Hauptkomponente zur Abscheidung der sauren Schadgase (SO₃, HCl, HF, SO₂) ist dabei der ZWS-Absorber bzw. das in seinem Inneren befindliche Feststoffinventar. Dieses besteht zu über 90 Prozent aus Produkt, das aus dem nachgeschalteten Filter recirkuliert wird, der mit dem Rohgas eingetragene Staubmenge und dem zu dosierten *frischen* Absorbens.

Die Steuerung des Prozesses erfolgt über vier Regelkreise, um auch bei schwankenden Betriebsbedingungen (Rauchgas-Parameter bzw. Volumenstrom) die vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerte jederzeit sicher einzuhalten.

Als Absorbens kommt Kalkhydrat ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ohne besonders hohe Anforderungen an die Reaktivität oder spezifische Oberfläche zum Einsatz. Alternativ kann das Kalkhydrat auch vor Ort mit einer Trockenlöschmaschine aus Branntkalk (CaO) hergestellt werden [2].

Neuere Anlagen sind sogar in der Lage direkt Branntkalk (CaO) als Absorbens einzusetzen und die Hydratation zum Kalkhydrat im ZWS-Reaktor zu vollziehen.

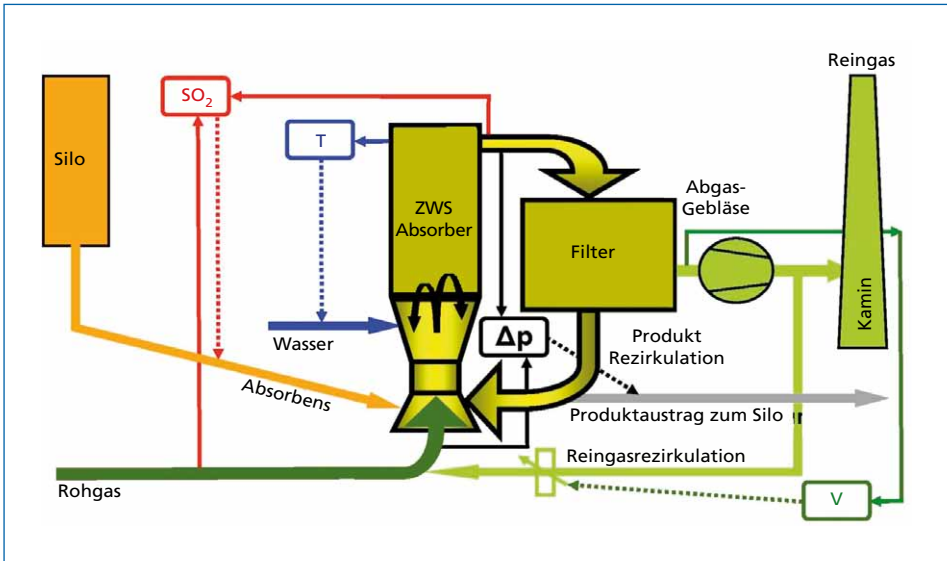


Bild 2: Prozess der ZWS-Rauchgasreinigung und deren Hauptregelkreise

Die Dosierung des Absorbens erfolgt in Abhängigkeit der gemessenen Roh- und Reingaskonzentrationen des Schwefeldioxids. Im Absorber wird mittels einer geregelten Wassereindüsung die optimale Betriebstemperatur von 15 bis 20 °C oberhalb des Wassertaupunktes eingestellt.

Voraussetzung für die vollständige Verdampfung des eingedüsten Wassers ist eine entsprechend hohe Materialdichte im ZWS-Absorber. Der gemessene Differenzdruck über den ZWS-Reaktor abzüglich seines Lehrrohrdruckverlustes gilt dabei als Maß für die darin befindliche Feststoffmenge. Übersteigt dieser Differenzdruck bzw. die Füllstände der Filterbunker einen bestimmten Grenzwert, wird REA-Produkt aus dem ZWS-System ausgetragen.

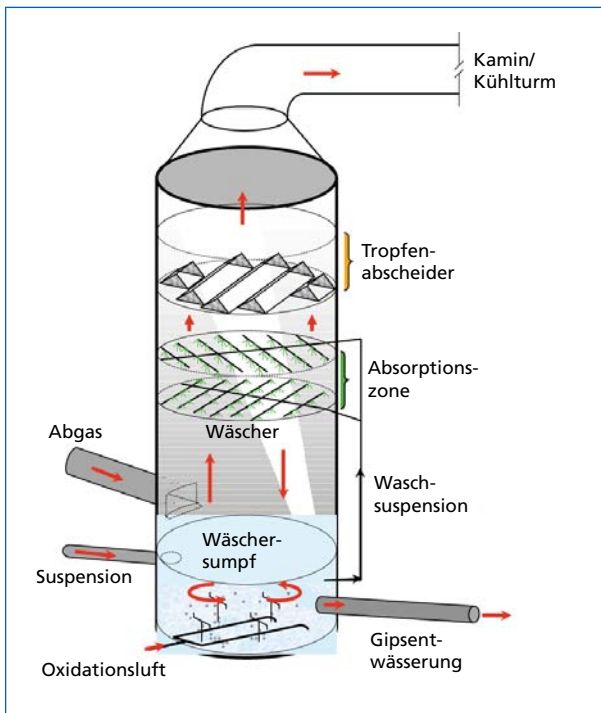
Zur Gewährleistung eines stabilen Anlagenbetriebes bei Teillastzuständen der Kessel und dadurch reduziertem Rohgasvolumenstrom kann Reingas über einen Rauchgaskanal bis zum Erreichen eines bestimmten Mindestvolumenstromes rezirkuliert werden.

Seit vielen Jahren wird diese Technologie bei den verschiedensten Anwendungen erfolgreich eingesetzt [14]. Insbesondere die Anstrengungen zur Luftreinhaltung in der Volksrepublik China haben in den letzten Jahren zu einer ungeahnten Entwicklung der ZWS-REA-Technologie mit Baugrößen von mittlerweile bis zu 600 MW_{el} geführt [9].

1.2.2. Nasse Kalk/Kalkstein-REA-Technologie

Zu den nassen Verfahren gehören Sprühwäscher, bei denen verschiedene Additive zum Einsatz kommen können. Weltweit haben Wäscher auf Kalksteinbasis einen Marktanteil von über 80 Prozent, in Japan und Europa sogar mehr als 90 Prozent [10]. Dieser hohe Marktanteil liegt in der hohen Abscheideleistung, der hohen Verfügbarkeit und dem vergleichsweise geringen Eigenenergiebedarf (< 1.5 Prozent der Kraftwerksleistung) begründet. Des Weiteren entsteht bei der Kalksteinwäsche mit Gips als Endprodukt in der Regel ein vermarktbares Produkt, so dass Kosten für eine Deponierung entfallen.

Ein weiteres häufig verwendetes Additiv ist Seewasser, welches anstelle der Kalksteinsuspension zur Absorption eingesetzt werden kann. Dabei entsteht kein festes Endprodukt. Dieses Verfahren eignet sich besonders für Standorte in Küstennähe, speziell dann, wenn Additive wie Kalkstein (CaCO_3) oder Kalkhydrat (Ca(OH)_2) erst über große Entfernungen herantransportiert werden müssten. In den letzten Jahren ist eine vermehrte Nachfrage nach seewasserbasierten REA-Wäschern hauptsächlich im asiatischen Raum zu verzeichnen. Da die grundlegende strömungsmechanische Modellierung und Simulation von Kalkstein- und Seewasser-REAs sehr ähnlich ist werden in den nachfolgenden Abschnitten beide Verfahrensprinzipien dargelegt.



In Bild 3 ist das prinzipielle Verfahrensschema eines Kalksteinwäschers dargestellt.

Bild 3:

Prinzipskizze des Sprühsturms

Die Entschwefelung der Rauchgase erfolgt bei dieser Technologie durch Absorption des Schwefeldioxids (SO_2) mittels einer wässrigen Kalksteinsuspension. Dabei wird meist ein Sprühwäschermittel mit möglichst wenigen Einbauten eingesetzt. Der Wäscher ist im Kraftwerksprozess stromabwärts der Staubabscheidung angeordnet.

Der Sprühturm wird von unten nach oben mit Rauchgas durchströmt. Die über die Düsen fein verteilte Waschsuspension bewegt sich je nach eingesetztem Düsentyp im Gegen- bzw. Gleichstrom dazu. An den versprühten Tropfen findet der Stoffübergang des SO_2 aus dem Rauchgas in die Suspension statt. Auch werden Teile anderer saurer Schadstoffe wie Flusssäure (HF) und Salzsäure (HCl) aus dem Rauchgas entfernt. Zudem erfolgt auch eine partielle Abscheidung von Feststoffen, wie Staub und Flugasche.

Die Waschsuspension aus der Absorptionszone sammelt sich im Wäschersumpf und wird dort mit Oxidationsluft versetzt. Ein Großteil der Suspension aus dem Sumpf wird rezirkuliert, ein Teil wird ausgeschleust und entwässert. Dabei erhält man als festes Produkt vermarktbares Gips.

Bei der Entwässerung fällt Abwasser an, das vor allem die löslichen Bestandteile (z.B. die Halogenverbindungen), aber auch Schwermetallverbindungen aus dem Brennstoff und aus dem Absorptionsmittel enthält. Um eine starke Anreicherung dieser Verbindungen durch die Rezirkulation der Suspension zu vermeiden, muss laufend ein Teil der Suspension ausgeschleust werden.

Das Abwasser selbst muss vor der Einleitung in Gewässer gereinigt werden. Entsprechend der Menge an ausgeschleuster Suspension wird frische Suspension im Wäschersumpf eingeleitet.

Der Sprühturmwäscher lässt sich verfahrenstechnisch in drei unterschiedliche Bereiche einteilen, in den Wäschersumpf (Flüssigkeitszone), die Absorptionszone (Sprühzone) und die Gas-Flüssig-Trennung.

In der Absorptionszone findet der Stoffübergang des SO_2 aus dem Rauchgas in die versprühten Suspensionstropfen statt. Sie bildet daher das Kernstück eines Sprühturmwäschers.

Das ungereinigte Rohgas tritt radial knapp oberhalb der Sumpfoberfläche in den Wäscher ein. Zur Versprühung der Waschsuspension befinden sich meist 3 bis 6 Düsenebenen innerhalb des Wäschers, die je nach Wäscherbauart bei Lastschwankungen zu- oder abgeschaltet werden können. Auf den einzelnen Ebenen befinden sich die Düsen. Zur Eindüsung der Waschsuspension werden bei heutigen Wäschern verschiedene Düsentypen verwendet. Diese unterscheiden sich zum Einen in ihrem Sprühbild und in ihrem Tropfenspektrum, zum Anderen hinsichtlich der Eindüsrichtung.

Bei der Eindüsung der Waschsuspension über nach unten gerichtete Düsen bewegt sich der eingedüste Flüssigkeitstropfen im Gegenstrom zum Gas, wohingegen bei beidseitig sprühenden Düsen sich die Tropfen am nach oben gerichteten Teil der Düsen zunächst im Gleichstrom mit dem Rauchgas bewegen, später in Abhängigkeit vom Tropfendurchmesser und der Gasgeschwindigkeit sich jedoch meist wieder in Richtung Wäschersumpf bewegen.

Kleine Tropfen hingegen gelangen bis in den Tropfenabscheider. Der Feststoffanteil in der Waschsuspension beläuft sich auf 8 bis 15 Prozent, der Anteil an Kalkstein jedoch nur auf 0,5 bis 3 Prozent. Durch die Rezirkulation der Waschsuspension stellt sich eine Gleichgewichtstemperatur zwischen Waschsuspension und austretendem, mit Wasserdampf gesättigtem, Rauchgas ein.

Für die Verbesserung der Abscheideleistung kann zum Einen die Chemie beeinflusst werden, z.B. über die Erhöhung der Kalksteinlöslichkeit durch kleinere Korngrößen oder Zugabe eines Puffers wie Adipinsäure, zum Anderen ist die Verbesserung der Strömungsbedingungen eine wichtige Einflussgröße.

Durch gezielte Düsenpositionierung und gleichmäßigere Wäscheran- bzw. durchströmung kann der Kontakt zwischen Tropfen und Gas verbessert und die Stoffaustauschfläche erhöht werden.

Oberhalb der Absorptionszone wird das Rauchgas im Tropfenabscheider von mitgerissenen Flüssigkeitstropfen befreit. Dadurch sollen zum Einen Ablagerungen in den Reingaskanälen vermieden werden, zum Anderen würden mitgerissene Flüssigkeitstropfen bei nachgeschalteten Anlagenteilen wie z.B. Gebläsen und Wärmetauschern zu Korrosionsschäden und Ablagerungen führen [1, 7].

Die Seewasser-REA basiert ebenfalls auf dem in Bild 3 skizzierten Prinzip des nassen Sprühturmwäschers. Bei diesem Prozess wird als Absorbens anstelle von Kalkstein das im Seewasser enthaltene Hydrogencarbonat (HCO_3^-) verwendet. Dadurch ist dieses Verfahren besonders für küstennahe Kraftwerksstandorte geeignet.

Bei Standorten am Meer wird oftmals Seewasser zur Kühlung im Kondensator des Dampfkreislaufes verwendet. Ein Teilstrom dieses Kühlwassers kann anschließend zur Entschwefelung eingesetzt werden.

In Bild 4 ist die prinzipielle Ausführung einer Anlage zur Entschwefelung mittels Seewasser dargestellt.

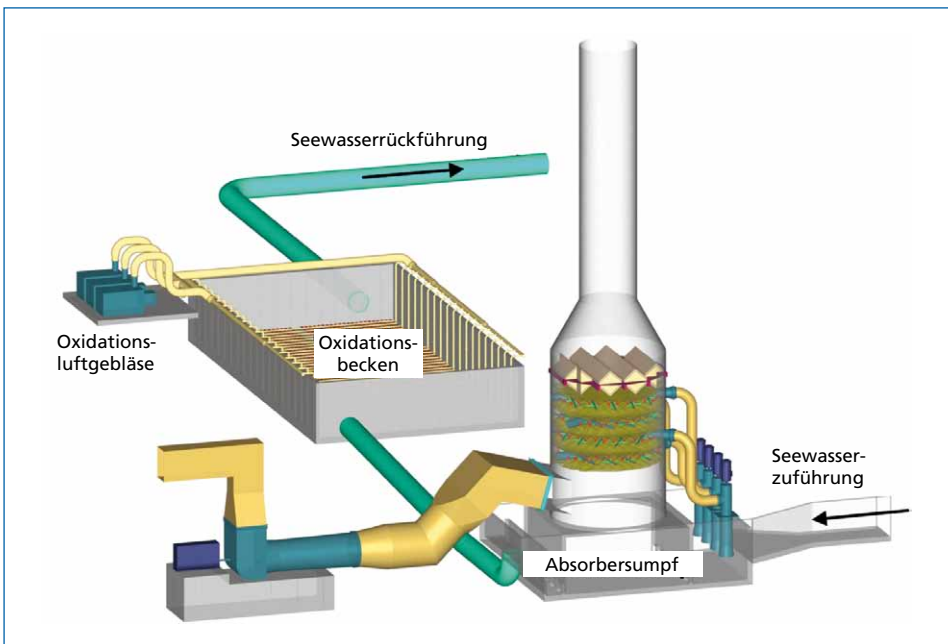


Bild 4: Modell einer Seewasser-REA

Im Gegensatz zu einer Kalkstein-REA entsteht in der Seewasser-REA kein festes Endprodukt. Die Absorptionszone einer Seewasser-REA entspricht aber im Wesentlichen der einer Kalkstein-REA. Der Hauptunterschied besteht darin, dass das Waschwasser nicht rezirkuliert wird.

Das beladene Seewasser aus dem Sprühturm wird im Wäschersumpf gesammelt und dort mit dem unbeladenen Seewasser vom Kondensator vermischt. Die Alkalien des unbeladenen Seewassers reagieren mit den gelösten H^+ -Ionen und erhöhen den pH-Wert des Wasser, welches anschließend in ein Oxidationsbecken geleitet wird.

Im Oxidationsbecken wird Luft eingebracht, welche den zur vollständigen Oxidation notwendigen Sauerstoff bereitstellt. Der Oxidationsgrad ist von der eingebrachten Luftmenge und der Verweilzeit abhängig. Damit wird sichergestellt, dass die weitere Sauerstoffzehrung des wieder ins Meer zurück geleiteten Seewassers möglichst gering ist.

Bei der Wiedereinleitung des entnommenen Seewassers ins Meer sind bezüglich des Umweltschutzes verschiedene Parameter zu beachten. Das wieder eingeleitete Seewasser weist einen höheren Gehalt an Sulfat auf als das entnommene. Diese Erhöhung beläuft sich auf 2 bis 3 Prozent des Gesamtgehaltes an Sulfat und ist damit vernachlässigbar gering. Auch der pH-Wert wird durch den Prozess beeinflusst. Die Grenzwerte für das wieder eingeleitete Seewasser sind regional verschieden. Basierend auf diesen Grenzwerten muss die Auslegung des Neutralisations- und des Oxidationsbeckens erfolgen. Die Temperaturerhöhung durch den Prozess der Seewasser-REA beläuft sich auf 0,5 bis 1,5 °C. Diese Erhöhung ist im Vergleich zur Temperaturerhöhung durch den gesamten Kraftwerksprozess von 7 bis 10 °C gering, muss jedoch bei der Auslegung des Kondensators Berücksichtigung finden. Um die Belastung des Seewassers durch Schwermetalle oder andere aus der Asche gelösten Bestandteile möglichst gering zu halten, ist die Installation eines dem REA-Wäscher vorgeschalteten Staubabscheiders essenziell. Damit kann der Eintrag an Flugaschepartikel in den REA-Wäscher minimiert werden. Je weniger Partikel in den REA-Wäscher gelangen und je kleiner diese Partikel sind, desto geringer wird der Anteil an abgeschiedenen Feststoffen im Waschwasser [1].

2. CFD-Simulation

Mit der steigenden Rechenleistung der Computerhardware in den letzten Jahrzehnten gewinnt auch die CFD Simulation immer mehr an Bedeutung bei der Analyse und Auslegung der Mehrphasenströmungen in kraftwerkstechnischen Anlagen. Denn insbesondere im Bereich der Gasreinigung ist die numerische Simulation aufgrund der Anlagendimensionen und der Komplexität der Strömung, mehrphasig (Gas-Feststoffpartikel und/oder Gas-Flüssigkeitstropfen) mit Stoffübergang und Reaktion zwischen beiden Phasen, sehr aufwendig und rechenintensiv.

Nachfolgend werden die Grundlagen zur Simulation der Mehrphasenströmung aus Rauchgas und Flüssigkeitstropfen (nasse REA) sowie Rauchgas, Feststoff- und

Flüssigkeitspartikeln in einem ZWS-REA-Absorber kurz vorgestellt. Diese Simulationenmethoden sind dabei so angelegt, dass sie direkt zur Simulation von Großanlagen eingesetzt werden kann.

Für eine genaue und aussagekräftige Simulation einer REA ist neben der gezielten Auswahl des Modellansatzes zur Beschreibung der Mehrphasenströmung auch die Bild der realen Anlage als geometrisches Modell ein wesentlicher Punkt. Hier ist Wert auf einen möglichst hohen Detaillierungsgrad bei der Erstellung der dreidimensionalen Modellgeometrie gelegt.

Dies ist von enormer Wichtigkeit für die Simulationen, da die An- und Abströmung der Absorber, gleich welcher Technologie, die Basis für eine optimale Abscheidung darstellen.

Generell beeinflussen das Profil der Gasgeschwindigkeit als auch die Feststoffverteilung und -verweilzeit im ZWS-Absorber die Reinigungsleistung maßgeblich.

Selbiges gilt für die nasse REA, auch hier ist die exakte Bild der Strömungsverhältnisse am Absorbereintritt ein wichtiger Punkt. Nur so ist es möglich, eine entsprechend optimale Düsenanordnung zu erarbeiten.

Gleichzeitig spielt die Vernetzung eine wesentliche Rolle und es ist auf eine möglichst hohe Gitterqualität zu achten, bei der die wesentlichen Qualitätsansprüche an das Rechengitter unbedingt erfüllt sein müssen. In der Praxis zeigt sich, dass bei Einhaltung aller Gitterqualitätskriterien auch der Einsatz von hybriden Netzen bei der Simulation möglich ist.

Auf der Seite der Ergebnisse gilt das wesentliche Interesse bei der CFD-Simulation sicherlich der Gasgeschwindigkeits-, Temperatur- und Feststoff- bzw. Flüssigkeitsverteilung innerhalb der simulierten REA.

Bei der ZWS-Technologie spielt auch das Verhalten der Wassereindüsung und die damit verbundene Wasserverdampfung im Prozess eine große Rolle, da die zur Verdampfung benötigte Energie maßgeblichen Einfluss auf die Temperaturverteilung hat.

Bei der Planung von Neuanlagen ebenso wie bei der Optimierung bestehender Anlagen rückt der gasseitige Druckverlust der Gaskanäle zunehmend in den Fokus. Minimiert man diesen, so lässt sich der Eigenenergiebedarf der Anlage senken. Bei bestehenden Anlagen kann eine Reduktion des gasseitigen Druckverlustes eine Kapazitätserhöhung möglich machen, da so noch Reserven in den Gebläsen nutzbar gemacht werden können.

Alle diese zuvor aufgeführten Punkte lassen sich an physikalischen Strömungsmodellen, wie sie in bis Mitte der 90er Jahre üblich waren, nur eingeschränkt oder gar nicht untersuchen.

Hier leistet die fundierte CFD-Simulation mittels validierter Modelle einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis der REA Prozesses, sowohl für nasse Absorber als auch für die ZWS-Technologie und bildet damit die Grundlage für eine optimierte Auslegung dieser Prozesse auch bei Großanlagen.

2.1. Nasse REA

Die Grundlage des Modells bildet ein Euler-Lagrange-Ansatz, der sich bei der Simulation von Gas-Partikel-Strömungen vielfach bewährt hat [7], [3]. Dabei wird die Gasphase mittels eines Euler'schen Ansatzes über die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls, Spezies und Energie beschrieben, während die Beschreibung der beiden Partikelphasen auf einem Lagrange'schen Ansatz beruhen. Hierbei werden um die jeweiligen Partikel die maßgeblichen, auftretenden Kräfte bilanziert und die Phasen dann über Quellterme miteinander gekoppelt. Die Temperaturkopplung aller auftretenden Phasen, inklusive der Verdampfung der Wassertropfen, ist dabei im Modell ebenso umgesetzt wie die Zwei-Wege-Kopplung zwischen Gas und Fluidtropfen, ohne die eine solche Simulation gar nicht möglich wäre. Die Gasphase wird als Gasgemisch bestehend aus den Komponenten CO_2 , H_2O , SO_2 , O_2 und N_2 betrachtet, lässt sich aber bei Bedarf um weitere Spezies erweitern.

Die CFD-Simulation erlaubt es, einen Blick in das Innere des Absorbers zu werfen und so gezielt Optimierungen vorzunehmen. Der Fokus liegt in der Hauptsache auf einer optimalen Nutzung und Anordnung der Sprühdüsen. Dafür werden unterschiedliche Düsentypen mit unterschiedlichen Sprühwinkeln, Sprühbildern und ggf. Durchsatz eingesetzt.

2.2. ZWS-REA

Für die Simulation einer ZWS-REA wird ein System aus zwei Eulerphasen und einer Lagrangephase aufgesetzt. Sowohl der Feststoff als auch das Gas werden als Eulerphasen modelliert, das eingedüste Wasser wird mittels des Lagrange-Ansatzes beschrieben. Auch hierbei spielt die Kopplung der Phasen untereinander hinsichtlich Energie und Impuls eine entscheidende Rolle. Durch die Nutzung mehrerer Phasen sind diese Modelle sehr komplex in ihrer Gleichungsstruktur, was einen höheren Rechenaufwand mit sich bringt.

Mit Hilfe der CFD-Simulation können wichtige Hinweise bei der Auslegung von Neuanlagen, aber auch bei der Nach- bzw. Umrüstung von bestehenden Anlagen in Bezug auf Gasströmung, Feststoffverteilung und Wassereindüsung gegeben werden. Gleichzeitig bildet die numerische Bild des ZWS-Absorbers die Grundlage für ein optimiertes Design und eine verbesserte Auslegung der dem eigentlichen Absorber nachgeschalteten Filter [5].

3. Vorstellung der simulierten Kraftwerksanlagen

3.1. Neubau einer nassen REA – Aksa

Die vorgestellte Anlage befindet sich im Norden der Türkei, etwa 270 km östlich von Istanbul. Es handelt sich um eine Anlage, die von Aksa Göynük Enerji Üretim A.S. gebaut und im Anschluss auch betrieben wird.

Die Aufstellung der Anlage in Aksa ist in Bild 5 dargestellt.

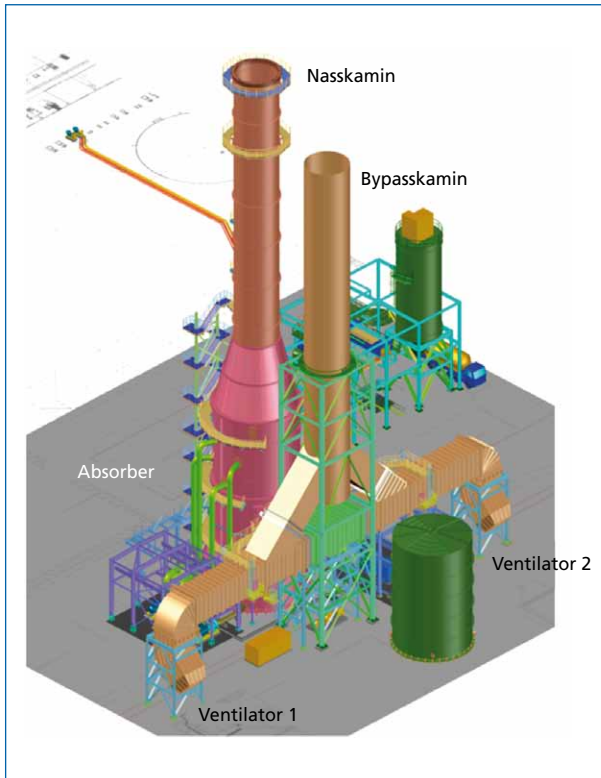


Bild 5:

Aufstellung der nassen REA in Aksa

Für die beiden installierten Kessel wird ein gemeinsamer Absorber zur Reinigung der Rauchgase verwendet. Dazu werden die beiden Rauchgasstränge kurz vor dem Absorber zusammen geführt. Beide Rauchgaspfade sind separat mit Rauchgasklappen versehen und können getrennt voneinander betrieben werden.

Der Absorber hat einen Durchmesser von 11 m und wird mit vier Düsenebenen betrieben. Oben auf dem Absorber befindet sich ein Nasskamin. Zusätzlich dazu ist ein Bypasskamin installiert.

Eine Besonderheit dieses Projektes war es, dass neben neuem Equipment auch bereits gebrauchtes Equipment aus einer bestehenden, allerdings nicht mehr in Betrieb befindlichen Anlage des Kunden verwendet werden sollte.

Dies stellte insbesondere für die Gestaltung der einzelnen Düsenebenen eine Herausforderung dar, da hierfür eine neue und sechs bereits vorhandene Pumpen verwendet werden sollten. Da standardmäßig eine Pumpe pro Ebene verwendet wird, musste das Konzept entsprechend angepasst werden. Das daraus resultierende Ebenendesign ist in Bild 6 dargestellt.

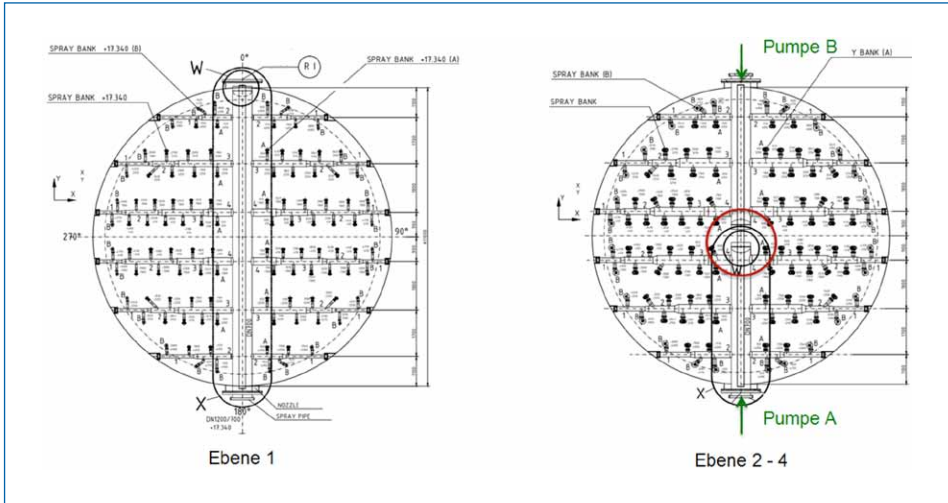


Bild 6: Design der Düsenebenen

Die unterste Ebene, Ebene 1, wird von einer Pumpe gespeist, die Ebenen 2 bis 4 werden je von einer Seite gespeist, das Zentralrohr ist in der Mitte nicht verbunden. Dies führt dazu, dass bei Ausfall einer Pumpe, die Hälfte der Düsenebene weiterhin in Betrieb gehalten werden kann.

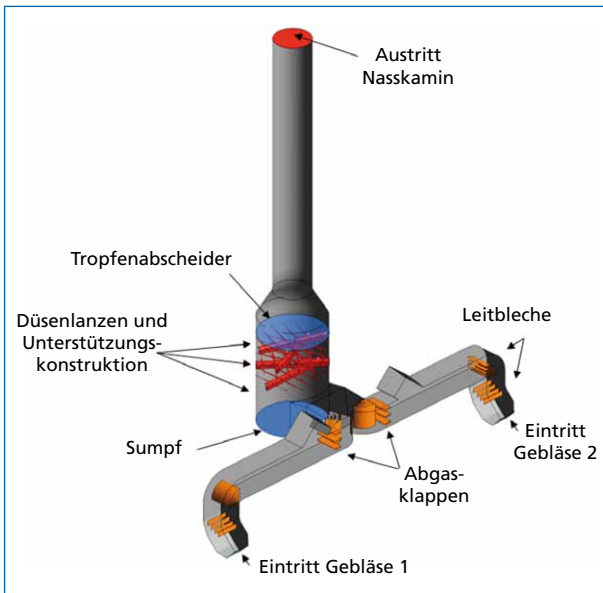


Bild 7:
Geometriemodell der Anlage in Aksa

Das Geometriemodell ist im Bild 7 dargestellt. Es beinhaltet die Rauchgaskanäle beginnend hinter den beiden Saugzügen mit den entsprechenden Kanaleinbauten, wie Klappen und Leitbleche.

Die Rauchgase aus den beiden Kesseln werden zusammengeführt und auf den Absorber geleitet. Dafür werden innerhalb der Zusammenführung optimierte Leitbleche verwendet.

Bei der Auslegung der Leitbleche war es wichtig, bei den grundlegend unterschiedlichen Betriebspunkten (ein Kessel in Betrieb/beide Kessel in Betrieb) für eine möglichst gleichförmige Anströmung des Absorbers zu sorgen. Auch hier bietet die Simulation den Vorteil, dass viele Varianten innerhalb kurzer Zeit berechnet und so das Optimum für beide Fälle bestimmt werden kann.

Innerhalb des Absorbers werden die Düsenlanzen und die Unterstützungs-konstruktion abgebildet. Der Tropfenabscheider ist vereinfacht dargestellt und bietet der Strömung einen Widerstand. Dieser Widerstand wird entsprechend der Vorgaben des Unterlieferanten für die Berechnung dort aufgeprägt. Für die Berechnung des resultierenden Druckverlustes im Tropfenabscheider kommt ein Ansatz nach Darcy zum Einsatz.

Die Suspensionstropfen werden über eine ausreichend große Anzahl an Modellpartikel in der Simulation repräsentiert. Die Durchmesser-, Massen- und die Geschwindigkeitsverteilung dieser Modellpartikel werden an jeder Düse individuell für den dort verbauten Düsentyp vorgegeben und basieren dabei auf Messungen des Herstellers an einer Einzeldüse. Im nachfolgenden Bild sind die Tropfenflugbahnen dargestellt.

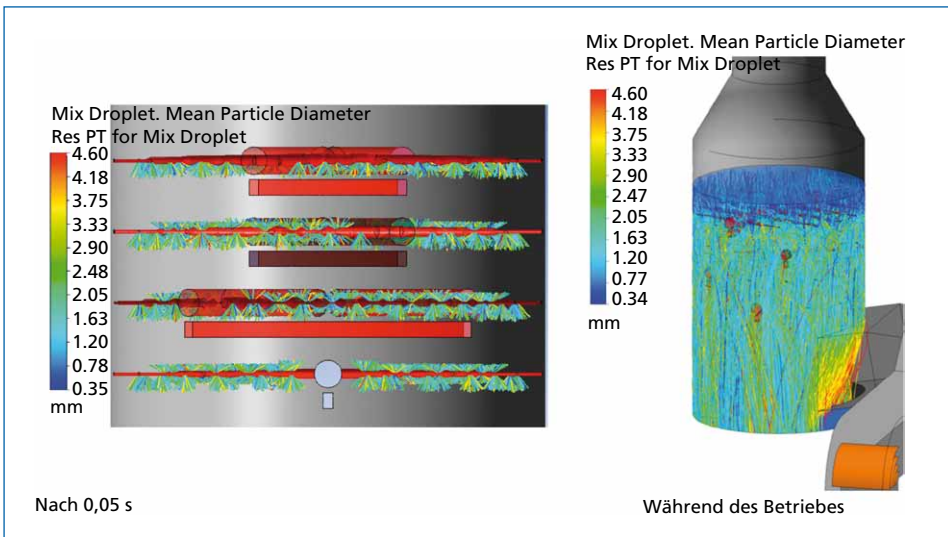


Bild 8: Tropfenflugbahnen der Suspensionstropfen

Auf der linken Seite sieht man die Flugbahnen nach 0,05 s, dabei sind die einzelnen Düsen und die verschiedenen Sprühhaltungen zu erkennen. Auf der rechten Seite sind die Tropfenflugbahnen während des Betriebes dargestellt. Dabei ist die Verdrängung der eingedüsten Flüssigkeit am Absorbereintritt gut zu erkennen. Der Wasservorhang wird durch das einströmende Gas in den Absorber hinein gedrückt.

Durch eine an die Gasströmung angepasste, optimierte Düsenanordnung wird der Absorber gleichmäßig vom Rauchgas durchströmt. Auf diesem Weg wird sichergestellt, dass der Stoffaustausch zwischen Gas und Tropfen optimal funktioniert und das SO_2 abgeschieden werden kann.

Bild 9 zeigt die Stromlinien des Gases innerhalb des Absorbers. Die Stromlinien sind mit der Gasgeschwindigkeit eingefärbt.

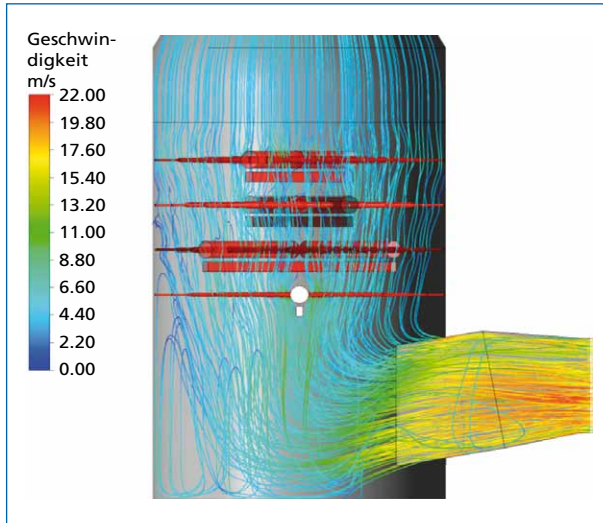


Bild 9:

Stromlinien des Gases

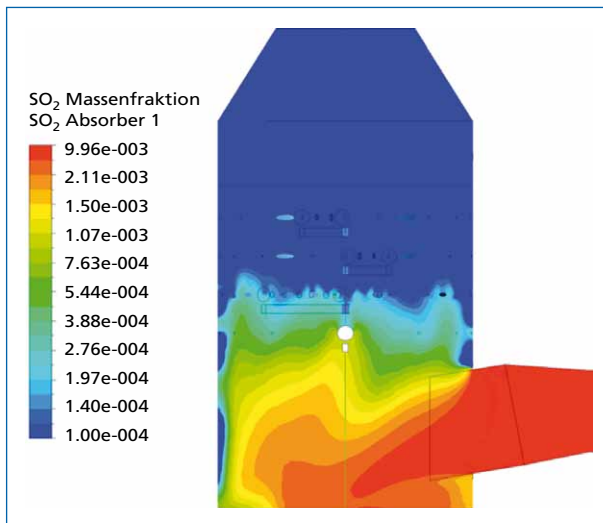


Bild 10:

SO_2 -Gehalt des Rauchgases

Dabei ist zu erkennen, dass das Rauchgas in der Wäschermitte nach oben strömt. Es kommt nicht zu Strahlenbildung innerhalb des Wäschers oder in der Nähe der Wäscherwand. Diese gleichmäßige Verteilung von Gas und Flüssigkeit spiegelt sich auch in der Abscheidung wieder. In Bild 10 ist der SO_2 -Gehalt des Rauchgases dargestellt.

Auch hier wird deutlich, dass keine ungereinigten Gasstrahlen den Wäscher verlassen. Durch den Einsatz von CFD konnte im vorgestellten Projekt eine Anlage mit gegensätzlichen Betriebspunkten ausgelegt und optimiert werden. Auch die Konzeptionierung der Düsenebenen erfolgte mittels CFD, so dass eine gleichmäßige Durchströmung des Wäschers sichergestellt werden kann.

3.2. Optimierung einer nassen REA – Gersteinwerk

Bei der vorgestellten Anlage handelt es sich um eine RWE-Anlage im Ruhrgebiet.

Bei diesem Projekt handelt es sich um eine strömungstechnische Optimierung der beiden baugleichen REA-Wäscher 10/20. Dabei wird das Design der Sprühebenen optimiert. Der Fokus liegt auf Änderung des Düsentyps und die Lage und Anzahl der Düsen. Die Position der Ebenen, ihre Drehung zueinander und die vorhandenen Unterstützungskonstruktionen bleiben unverändert. Auch der Durchsatz an Kalksteinsuspension bleibt davon unberührt.

Für die Optimierungsrechnung wird zunächst ein Modell erstellt, welches den IST-Zustand der Anlage darstellt. Mit Hilfe dieser Berechnung können Strömungsschiefen identifiziert werden.

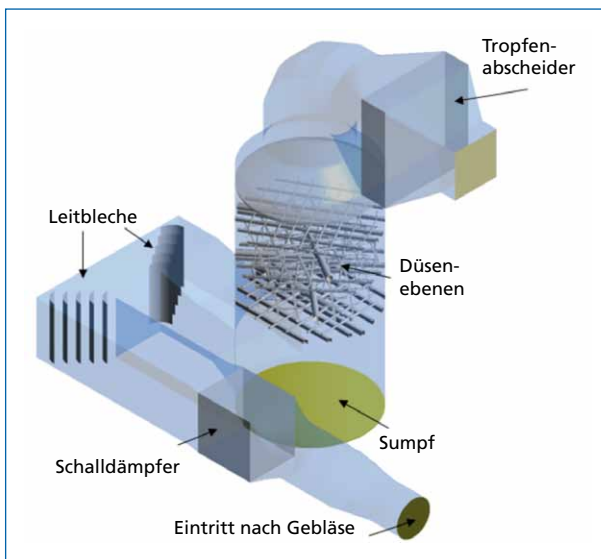


Bild 11:

Geometriemodell Gersteinwerk

In Bild 11 ist die Geometrie dargestellt. Der Rauchgasweg beginnt mit dem Austritt aus dem Gebläse. Der im Kanal an der Abströmseite des Gebläses befindliche Schalldämpfer wird mit Hilfe eines porösen Mediums beschrieben. Ihm wird ebenso wie den Tropfenabscheidern ein definierter Druckverlust bzw. Druckverlustbeiwert aufgeprägt. Im weiteren Verlauf des Kanals befinden Leitbleche, die detailliert im Modell integriert sind. Auch die Ebenen im Wäscher sind sehr detailliert abgebildet. Im Reingaskanal hinter dem Wäscher befindet sich ein stehender Tropfenabscheider.

In den nachfolgenden Bildern sind die Gasgeschwindigkeiten innerhalb des Absorbers dargestellt.

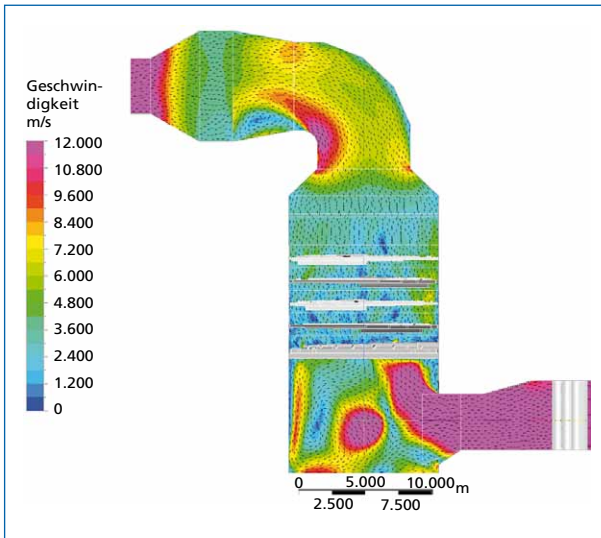


Bild 12:

Gasgeschwindigkeit im Absorber
– IST-Zustand

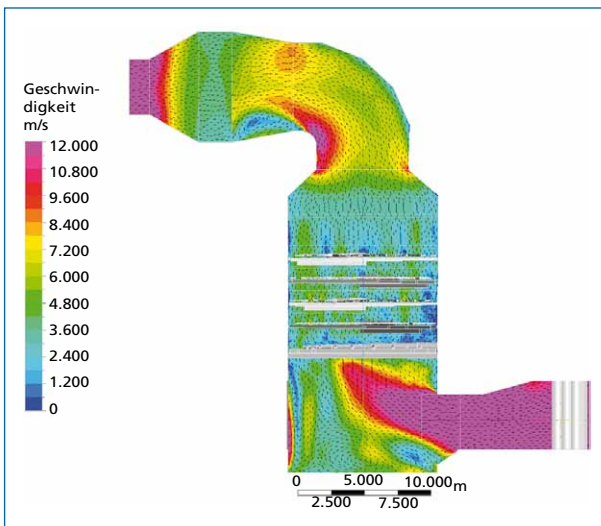


Bild 13:

Gasgeschwindigkeit im Absorber
– Optimierter Zustand

Auf der linken Seite ist der IST-Zustand dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Gasströmung direkt am Wäschereintritt nach oben gelenkt wird. In der Wäschermitte bildet sich ein großer Wirbel aus. Durch die direkte Umlenkung wird ein Teil des Wäschers insbesondere im unteren Teil nur unzureichend durchströmt. Entsprechend hoch sind die Gasgeschwindigkeiten im vorderen Wäscherteil. Durch den Einsatz verschiedener Düsentypen wird das Strömungsbild sichtlich verbessert. Dies ist im rechten Bild dargestellt. Der Rauchgasstrom nutzt den gesamten Querschnitt, legt sich aber nicht an der Wäscherwand an. Die Absorptionszone wird gleichmäßig durchströmt.

Dies wird auch bei der Betrachtung der Suspensionsverteilung deutlich, welche in den nachfolgenden Bildern dargestellt ist.

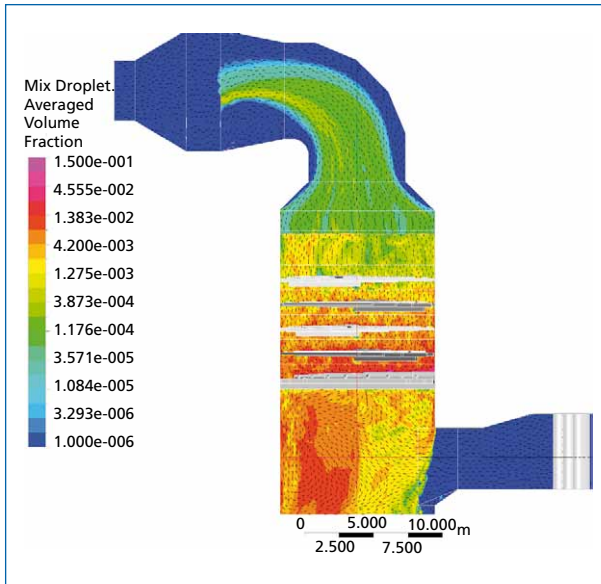


Bild 14:

Suspensionsverteilung im Absorber – IST-Zustand

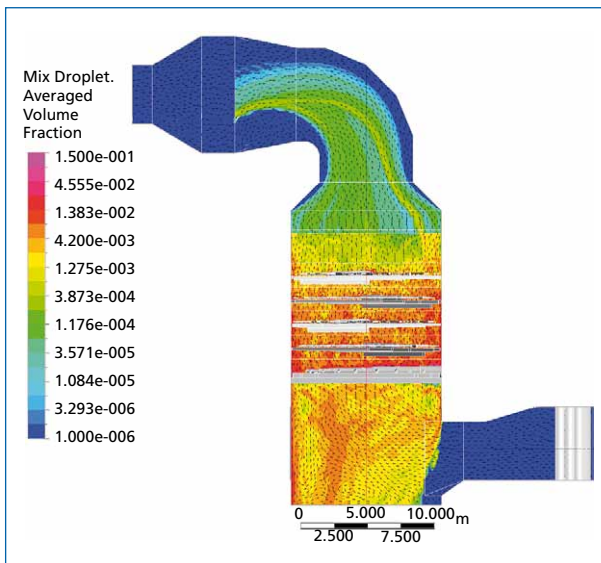


Bild 15:

Suspensionsverteilung im Absorber – Optimierter Zustand

In Bild 14 ist zu erkennen, dass die Suspension insbesondere unterhalb der Düsenebenen in die hintere Wäscherhälfte gedrängt wird. Durch diese Ungleichverteilung ist der Kontakt zwischen Tropfen und Gas in diesem Bereich nicht gewährleistet. Im optimierten Zustand (rechtes Bild) ist eine gleichmäßige Suspensionsverteilung zu erkennen.

Mit Hilfe der Simulation ist es demnach möglich, Schwachstellen zu identifizieren und gezielt Gegenmaßnahmen zu entwickeln. In diesem Fall war es die Neupositionierung der Düsen und der Einsatz verschiedener Düsentypen.

Im IST-Zustand sind pro Ebene 44 einseitig sprühende Hohlkegeldüsen mit einem Ein-düsenwinkel von 100° verbaut. Die Düsendichte beträgt $0,72$ Düsen/ m^2 . Im optimierten Zustand werden nahe der Wäscherwand 90° Vollkegeldüsen und in der Wäschermitte 120° Hohlkegeldüsen verbaut. Auf den Ebenen 1 bis 3 sind die verbauten Düsen beid-seitig sprühend, auf der obersten Ebene (Ebene 4) werden einseitig sprühende Düsen verwendet. Im optimierten Zustand beträgt die Düsendichte $0,95$ Düsen/ m^2 . Der Durchsatz pro Düse ist im optimierten Fall entsprechend geringer, so dass die gesamt versprühte Waschflüssigkeit in beiden betrachteten Fällen identisch ist.

Messungen, die je vor und nach dem Umbau durchgeführt wurden, belegen eine deutliche Verbesserung der Abscheideleistung.

Im IST-Zustand beträgt der Abscheidegrad $90,5$ Prozent, durch die Optimierung kann die Abscheideleistung auf $95,5$ Prozent erhöht werden.

3.3. Optimierung der ZWS-REA in Pilsen

Die betrachtete ZWS-REA Anlage in Pilsen wurde ursprünglich für die Entschwefelung aller damals installierten fünf Kessel konzipiert. Anstelle des ältesten Kohlekessels Nr. 1 wurde ein neuer Biomassekessel errichtet, der in die bestehende ZWS-REA mit eingebunden wurde.

Seit einiger Zeit zeigten sich bei der ZWS-REA in Pilsen unter bestimmten Betriebsbedingungen große Schwankungen der Restfeuchte und des Gehaltes an aktiven noch nicht abreagierten Kalkbestandteilen im REA-Produkt. Aus diesem Grund erhielt man den Auftrag zur Optimierung dieser ZWS-REA.

Dazu wurden ausgehend von einer umfassenden Überprüfung der vorhandenen Betriebs-Messungen umfangreiche Netzmessungen bei verschiedensten Betriebszuständen roh- und reingasseitig an der ZWS-REA durchgeführt.

Des Weiteren wurde die komplette Anlage beginnend von den vorgeschalteten Rauchgaskanälen aller Kessel bis einschließlich des der ZWS-REA nachgeschalteten Elektrofilters in ein dreidimensionales und sehr detailliertes Computermodell überführt.

Mittels CFD-Simulation konnten anschließend die Ergebnisse der durchgeführten Messungen bestätigt werden und das eingesetzte CFD-Modell so validiert werden. Ausgehend von den Ergebnissen der Simulation sowie der Auswertung der Meßkampagne konnte dem Betreiber Optimierungspotential für den zukünftigen Anlagenbetrieb aufgezeigt werden.

3.3.1. Netzmessungen

Sowohl im Rohgas- als auch im Reingaskanal wurden Netzmessungen mit 20 bis 50 Messpunkten durchgeführt, die durch mehrfache Wiederholungsmessungen bestätigt

wurden. Im Ergebnis wurden erhebliche Schief lagen der Rauchgasparameter Geschwindigkeit, Temperatur und SO_2 sowohl in den Rohgaskanälen als auch im ZWS-Absorber festgestellt.

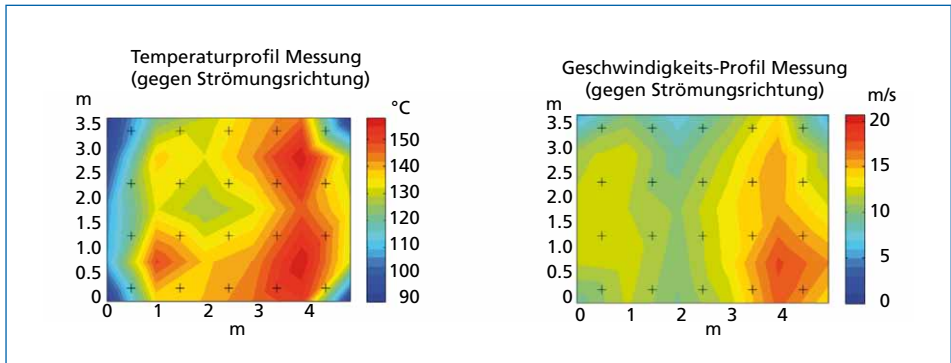


Bild 16: Temperatur- und Geschwindigkeitsprofile im Rohgaskanal

Ursache für diese starken Abweichungen innerhalb der Profile sind nicht nur die verschiedenen in die ZWS-REA eingebundenen Kessel, sondern vor allem die fehlenden bzw. mangelhaften Strömungsleitvorrichtungen. Im Rahmen der umfangreichen Meßkampagne zeigte sich darüber hinaus, dass die installierten Betriebsmessungen, die zur Regelung der ZWS-REA benutzt werden, teilweise erheblich von den Mittelwerten der Netzmessungen abweichen. Die Weiterverarbeitung dieser fehlerhaften Daten führt im Leitsystem zu Problemen beim störungsfreien Betrieb der ZWS-REA.

Die Netzmessungen der zuvor genannten Parameter im Reingaskanal nach Elektrofilter zeigen eine wesentlich bessere Übereinstimmung mit den Betriebsdaten, obwohl auch hier insbesondere beim SO_2 ein Profil (d.h. keine gleichförmige SO_2 -Verteilung) nachgewiesen werden konnte.

3.3.2. Variation des Feststoffgehaltes

Der über den ZWS-Absorber gemessene Druckverlust ist – abzüglich des Leerrohrdruckverlustes – ein Maß für die im ZWS-Absorber befindliche Feststoffmenge und wird als Bettdruckverlust bezeichnet. Mit Hilfe einer Sollwertvorgabe für den Bettdruckverlust wird die zum Absorber rezirkulierte Feststoffmenge – Rezirkulat – geregelt.

In einer Messreihe mit unterschiedlichen Sollwerten für den Bettdruckverlust von 6 mbar (Versuch 21) bzw. 12 mbar (Versuch 20) wurde der Einfluss auf das ZWS-System untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass sich die eingedüste Wassermenge bei automatischer Wasserregelung, d.h. bei gleicher Reingastemperatur, zwischen beiden Versuchen deutlich unterscheidet. Bei höherem Feststoffgehalt im Absorber wird also nicht nur die Wasserverdampfung verbessert, sondern verringert sich auch die zur Kühlung erforderliche Wassermenge durch einen größeren Kühleffekt in Folge der erheblich größeren rezirkulierten Feststoffmenge. Dieser Fakt führte in der

Konsequenz zu einer messbaren Reduzierung der Restfeuchte des ZWS-REA-Produktes von 1,6 Prozent zu 1,1 Prozent. Daraus resultiert eine entsprechend verringerter Neigung zu Anbackungen im Absorber, dem nachgeschalteten Filter sowie allen mechanischen und pneumatischen Fördersystemen. Die Betriebsicherheit der ZWS-REA kann also durch die Anhebung des Bettdruckverlustes erhöht werden.

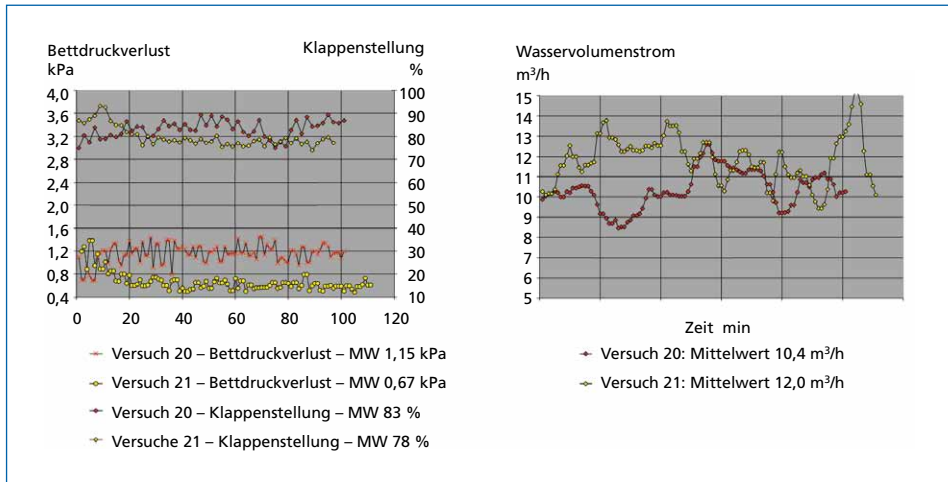


Bild 17: Einfluss der Bettichte auf die Wassereindüsung

3.3.3. Weitere Versuche

Im Zuge des Auftrags zur Optimierung der ZWS-REA Pilsen wurden weitere umfangreiche Messungen an der Anlage durchgeführt. Dabei wurden wesentliche Betriebsparameter und -konzepte wie zum Beispiel

- Bettdruckverlust,
- Wassereindüsung,
- Additivdosierung und Produktrezirkulation,
- Reingastemperatur

variiert, um das Anlagenverhalten unter verschiedenen Randbedingungen aufnehmen zu können. Die auf diese Weise gesammelten Betriebsdaten dienen zum einen zur weiteren Validierung der CFD-Simulationen. Sie versetzen die das Unternehmen aber auch in die Lage die von ihr erarbeiteten Weiterentwicklungen der ZWS-Technologie an Hand von Daten einer realen Anlage hin auf Effizienz und Alltagstauglichkeit zu überprüfen.

3.3.4. Nachbildung der ZWS-REA Pilsen

Die nachfolgend diskutierten Ergebnisse basieren auf der CFD-Simulation der ZWS-REA Pilsen.

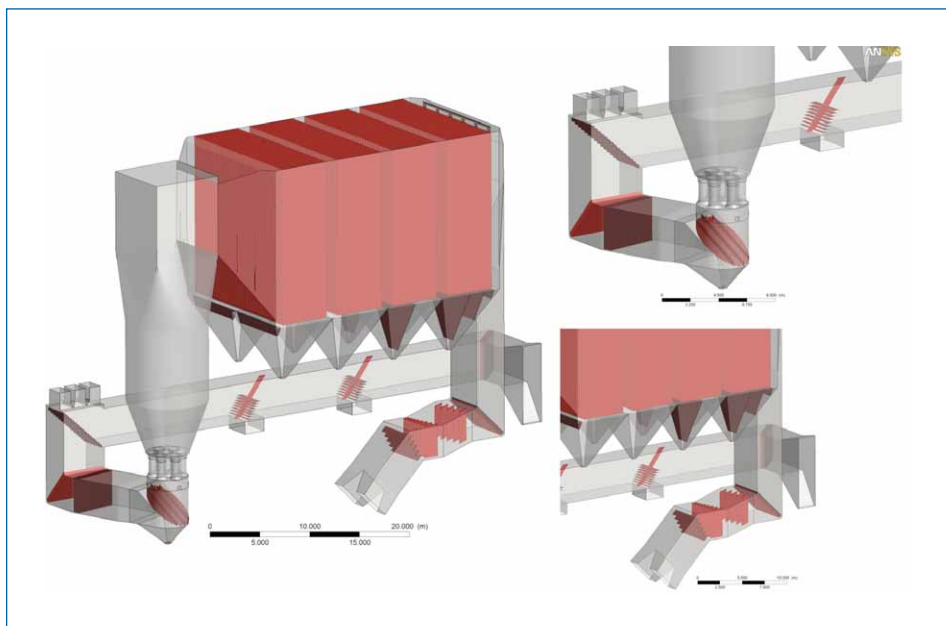


Bild 18: Detailliertes 3D CFD-Modell der ZWS-REA Pilsen

Die Simulation umfasst neben dem eigentlichen ZWS-Absorber und der Mehrfach-Venturi-Düse die komplette Situation der Anströmung sowie das nachgeschaltete Elektrofilter inklusive Reingasabströmung bis zum Gebläse-eintritt. Das 3D-Modell des ZWS-Absorbers (Bild 18) muss zur numerischen Berechnung mit einem Rechengitter versehen werden, auf dem die Differentialgleichungen diskretisiert werden können. Dieses Rechengitter besteht aus einem hybriden Netz, wobei der ZWS-Absorber strukturiert vernetzt ist. Die Anzahl der Elemente beträgt etwa 12 Mio. Bei der Erstellung des Gitters werden alle relevanten Einbauten im Kanal (Leitbleche etc.) detailliert nachgebildet.

3.3.5. Ergebnisse

Bild 19 zeigt die Gasgeschwindigkeitsverteilung auf ausgewählten Schnitten durch die simulierte Anlage einschließlich des nachgeschalteten Filters und der Rohgaskanäle. Die Farbverteilung repräsentiert dabei die Gasgeschwindigkeit von langsam (blau) bis schnell (rot).

Zur Berechnung der Gasgeschwindigkeiten wird das zuvor vorgestellte Modell eingesetzt, um die Strömungsverhältnisse vor allem im Absorber korrekt zu erfassen. Wesentlich hierfür ist die bereits diskutierte Verknüpfung von Gas- und Partikelfeld innerhalb der ZWS-REA-Simulation bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Wasser-eindüsung und Verdampfung. Durch die integrale Simulation der gesamten Anlage ist es zudem möglich, die Beaufschlagung des nachgeschalteten Filters zu prüfen und gegebenenfalls zu optimieren. Möglich ist dies nur, da die CFD-Simulation die Feststoffverteilung am Absorberaustritt berechnet, ohne die eine Filteroptimierung nicht möglich wäre.

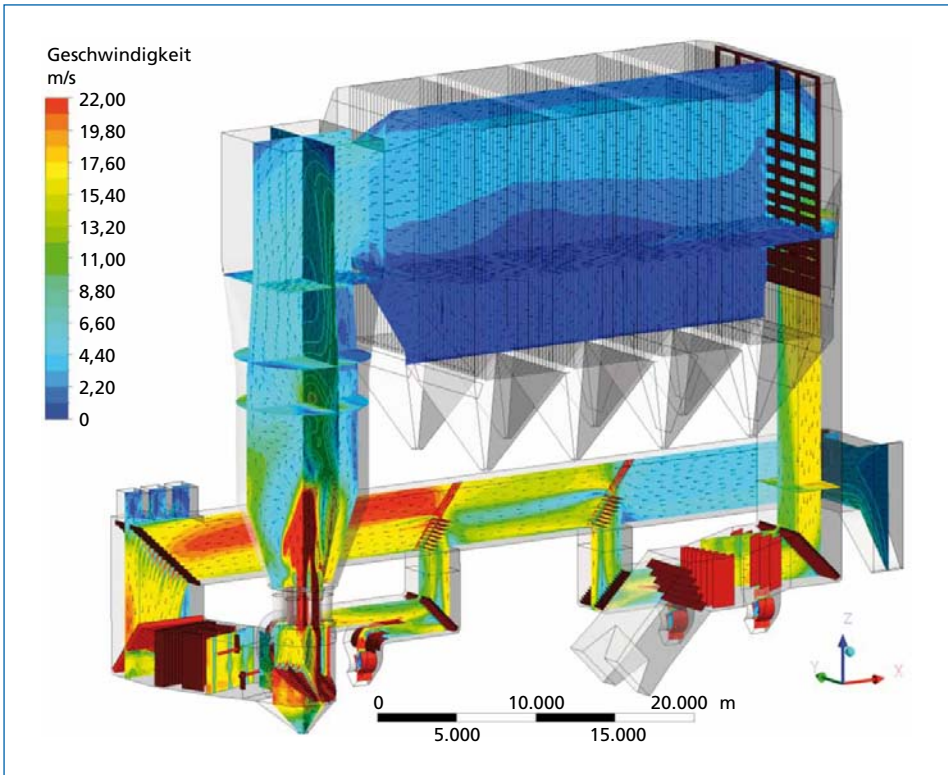


Bild 19: Gasgeschwindigkeitsfeld in der simulierten ZWS

Zur Validierung der Simulationen dienen unter anderem die umfangreichen Messungen an der ZWS-REA Pilsen. Beispielhaft soll hier das Gasgeschwindigkeitsprofil der Reingasmessung mit der CFD-Simulation verglichen werden. Die Messung basiert auf einem 50 Messpunkte umfassenden Gitter, dessen einzelne Messpunkte in Bild 20 als Kreuze markiert sind. Das Bild macht deutlich, dass die Ergebnisse der CFD-Simulation und der Messungen sehr gut übereinstimmen.

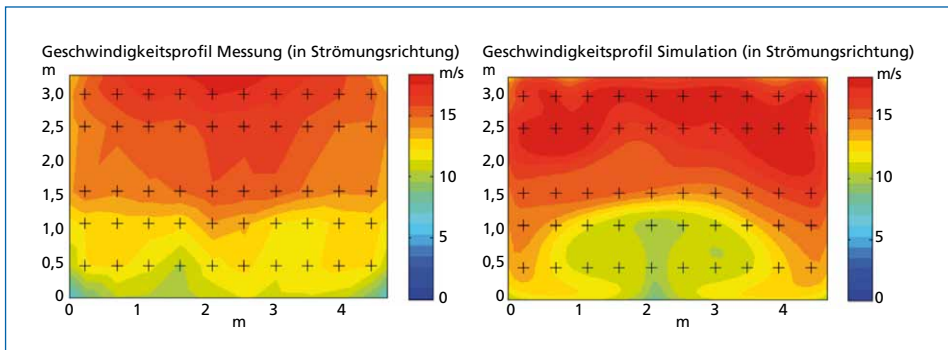


Bild 20: Gasgeschwindigkeitsfeld Reingas: Messung und Simulation

Für das Verständnis des Prozesses ist, wie bereits erwähnt, die Temperaturführung ein entscheidender Parameter. Auch die Temperaturverteilung innerhalb der REA lässt sich mittels der entwickelten und validierten CFD-Simulationsmethode zur Bild der ZWS-REA eindrucksvoll zeigen.

Bild 21 ist – analog zur Gasgeschwindigkeitsverteilung im Bild 19 – die Gastemperaturverteilung der Anlage dargestellt. Die Farbverteilung repräsentiert dabei die Gastemperatur von kalt (blau) bis warm (rot).

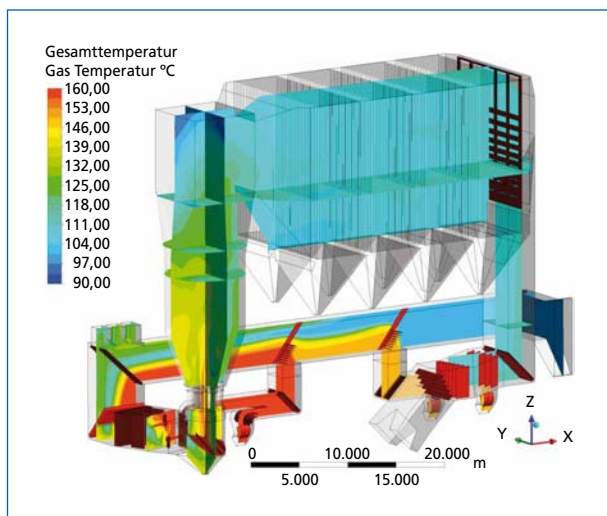


Bild 21:

Gastemperaturfeld in der simulierten ZWS

Deutlich ist die schlechte Vermischung der unterschiedlichen Gastemperaturen im Rohgaskanal zu erkennen, vor allem das kalte Rezirkulationsgas (Reingas aus dem Kamin) zieht sich bis in den Absorber.

Maßgeblich mit verantwortlich für die Temperaturführung innerhalb des Absorbers ist die Wassereindüsung. Daher wird die Wassereindüsung auch mit einer hohen Detailgenauigkeit in der CFD-Simulation modelliert. Dazu gehört vor allem die detaillierte Beschreibung der Wasserdüse hinsichtlich Tropfendurchmesserspektrum (Bild 22) und Düsenparametern, wie Sprühwinkel, Tropfenaustrittsgeschwindigkeit, Position, Sprührichtung und Volumenstrom.

Hier greift das Unternehmen auf die jahrelange Erfahrung bei der CFD-Simulation von nassen REA-Absorbern nach dem Kalkstein- und Seewasserverfahren zurück [6], [4].

Gleichzeitig ist es von entscheidender Bedeutung, die Verdampfung der Wassertropfen ebenfalls in der CFD-Simulation zu beschreiben. Genutzt wird dazu ein zweigeteiltes Modell, das den Übergang der Tropfen vom Wasser in die Gasphase unterhalb und oberhalb des Siedepunktes separat beschreibt. Der entscheidende Parameter in dieser Beschreibung ist der Tropfendurchmesser, daher die detaillierte Beschreibung des Tropfenspektrums in der CFD-Simulation. Denn die eingedüsten Wassertropfen

verdampfen nicht instantan, sondern wärmen sich erst auf bis sie verdampfen. Dieser Vorgang ist stark von der Tropfengröße abhängig. Dabei werden die Tropfen vom Gasstrom mitbewegt, d.h. der gesamte Vorgang der Verdampfung ist zeitabhängig. Damit kann es sein, dass die Wassertropfen im ZWS-Absorber nicht vollständig verdampfen, wenn die Tropfen der Wassereindüsung zu groß sind oder die Wassereindüsung falsch positioniert ist.

Emissionsminderung

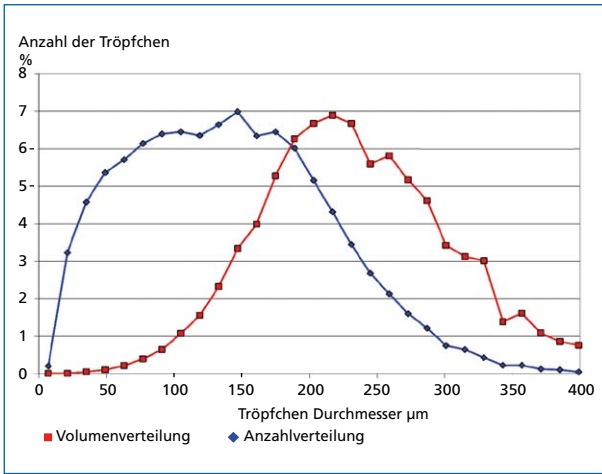


Bild 22:

Beispiel für ein Tropfenspektrum

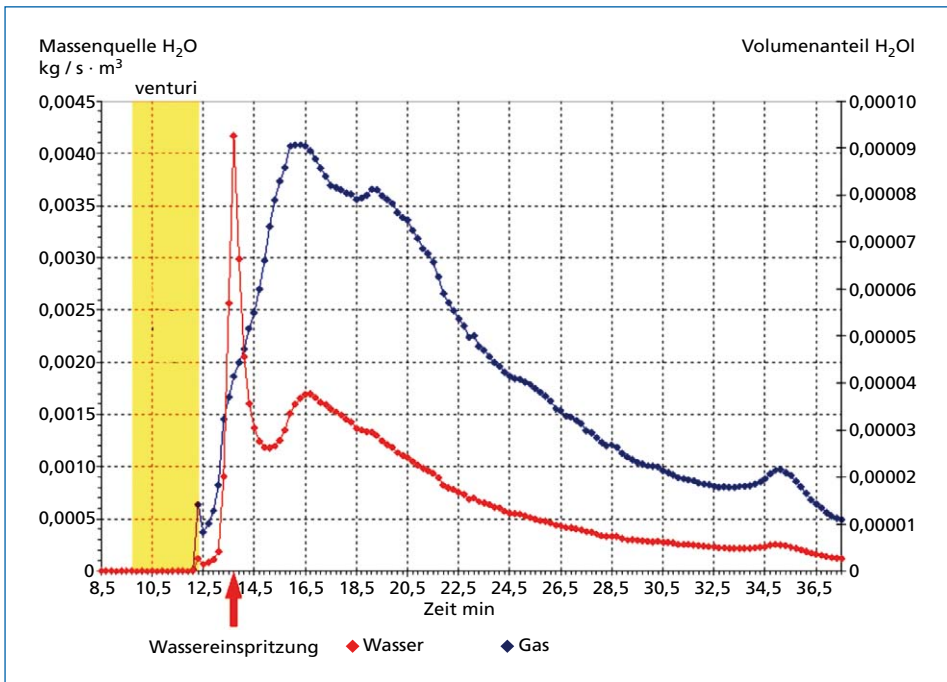


Bild 23: Tropfenverdampfung

Dass die Verdampfung nicht instantan ist, zeigt Bild 23. Hier ist über der Höhe des Absorbers (x -Achse) auf der linken y -Achse die Massenquelle an verdampften Wasser (blau) und auf der rechten y -Achse die Volumenanteil an flüssigem Wasser (rot) aufgetragen, beides jeweils als flächengewichtete Mittelwerte.

Deutlich ist zu erkennen, dass man auf Höhe der Wassereindüsung die höchsten Volumenanteile flüssigen Wassers findet (rote Kurve). Das Maximum der Verdampfung (blaue Kurve) ist aber erst etwa 4 m oberhalb der Wassereindüsung zu finden.

4. Zusammenfassung

Für die Neuauslegung und Optimierung großtechnischer Anlagen zur Rauchgasentschwefelung gewinnt die numerische Simulation dieser Prozesse zunehmend an Bedeutung. Durch die Simulation können Prozesse besser und detaillierter erfasst und Zusammenhänge deutlich gemacht werden. Mit Hilfe dieses detaillierten Verständnisses können Rauchgasreinigungsanlagen effizienter und optimaler ausgelegt werden. Auch bei Altanlagen ist es so möglich, Optimierungspotenzial zu identifizieren und auf die Anlage zugeschnittene Konzepte zur Optimierung zu erarbeiten.

5. Literatur

- [1] Bautsch, C.: Zur Modellierung, Simulation und Optimierung von Rauchgasentschwefelungswäschern Dr. Hut Verlag, Germany, 2011
- [2] Bier, L. L., Sauer, H.; Bennewart, W.: Bau und Betrieb einer Kalkhydratanlage für die REA des Kraftwerkes Siersdorf, ZKG Zement•Kalk•Gips 45, vol.6, 1992, S. 285-288
- [3] ERCOFTAC: Best Practice Guidelines for Computational Fluid Dynamics of Dispersed Multi-phase Flows, Version 1, 2008
- [4] Feldkamp, M., Dickamp, M.; Moser, C.: Influence of the Nozzle Arrangements in Wet FGD Scrubbers, Power Plant Air Pollutant Control *Mega* Symposium, Baltimore, MD, USA, 2006
- [5] Feldkamp, M., Dickamp, M.; Moser, C.: CFD Simulation of ESPs and Fabric Filters – State of the Art and Applications, 11th International Conference on ESP, Hangzhou, China, 2008
- [6] Feldkamp, M., Fahlenkamp, H.: Modellierung physikalischer Wechselwirkungen in Sprühturm-wäschern der Kraftwerkstechnik, Grundlagen der Rauchgasreinigung, Haus der Technik, Essen, Germany, 2005
- [7] Feldkamp, M.: Simulation der Zwei-Phasen-Strömung in REA-Sprühturmwäschern Fossil befeuerter Kraftwerke, Shaker Verlag, Germany, 2008
- [8] Konieczek, H.-U.; Schmidt, R.: Umweltentlastendes Heizkraftwerk – Ein Projekt zur EXPO 2000, WLB Wasser, Luft und Boden vol. 6, 2000, S. 46-48 [11] Sauer, H.; Sparwald, V.; Wendt, G.: Betriebserfahrungen mit der Abgasreinigungsanlage nach dem System VAW/Lurgi, Erzmetall 35, No. 12, 1982, S. 605-609
- [9] Leuschke, F.; Baege, R.; Chunyuan, L.; Yi, J.: The Future of CFB FGD in China, 2nd China International DSDN Conference, Beijing, China, 2006
- [10] Merkblatt für Bauart, Betrieb und Wartung von Rauchgasentschwefelungsanlagen, VGB Power Tech, 1. Aufl., (2007)

- [11] Sauer, H.; Sparwald, V.; Wendt, G.: Betriebserfahrungen mit der Abgasreinigungsanlage nach dem System VAW/Lurgi, *Erzmetall* 35, No. 12, 1982, S. 605-609
- [12] Sauer, H.; Anders, R.: Betriebserfahrungen mit der trockenen Rauchgasentschwefelung (System ZWS) im Braunkohle-Kraftwerk Borken, *VGB Kraftwerkstechnik* 69, vol. 10, 1989, S. 1018-1023
- [13] Sauer H.; Baege, R.; Herden, H.: *New Aspects of CFB Technology for Flue Gas Cleaning, Power-Gen Europe*, Milan, 2002
- [14] Sauer, H.; Leuschke, F.; Baege, R.; Yi, J.: What is possible to achieve on flue gas cleaning using the CFB technology?, 8th International Conference on CFB, Hangzhou, China, 2005

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, Margit Löschau (Hrsg.):

Immissionsschutz, Band 5

– Recht – Umsetzung – Messung – Emissionsminderung –

ISBN 978-3-944310-23-7 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

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

Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2015

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

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

Erfassung und Layout: Sandra Peters, Ginette Teske, Anne Kuhlo

Druck: Beltz Bad Langensalza GmbH

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

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

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