

Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA)  
Bereich Luftreinhaltung & Filtration  
Bliersheimer Str. 58-60  
47229 Duisburg



## Anhang 1 des Schlussberichts zum Vorhaben

### **VOKos**

Effizienzsteigerung durch verfahrenstechnisch optimierende  
Korrosionsschutzkonzepte in Verbrennungsanlagen  
mit heterogenen Festbrennstoffen

Förderkennzeichen  
03X3589D

Laufzeit  
01.07.2013 – 30.04.2017

*Unterauftragnehmer:*  
Dr.-Ing. Bernd Benker (Ingenieurbüro Benker)

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Duisburg, Oktober 2017

## **I.1 Aufgabenstellung**

Das Projekt VOKos zielt darauf ab, durch Messungen und Modellierungen die Vorgänge bei der Müllverbrennung zu erfassen und praxistaugliche Vorschläge zur Korrosionsminderung machen zu können. Da die stärkste Korrosion unter Belägen auf der Anströmseite der Rohrbündelwärmetauscher stattfindet, liegt die Vermutung nahe, dass das Verhalten der Partikel (Bildung, Transport, Abscheidung) eine zentrale Rolle spielt. Partikel, die aus dem Brennbett austreten, sowie kondensierbare Gase bewegen sich mit dem Abgasstrom unter ständiger Umwandlung vom Brennbett ausgehend durch den Feuerraum und anschließend durch die Züge des Kessels.

Für die Simulation der Strömung in diesen Gebieten wurde im Rahmen von VOKos von der Weghaus GmbH das kommerzielle Programmpaket CFX eingesetzt. Ziel dieses Teilprojektes war es, als Ergänzung ein Partikelmodell zu entwickeln, zu implementieren und anzuwenden. In der dreidimensionalen Strömungssimulation für eine Feuerung werden größenordnungsmäßig eine Million Zellen betrachtet, in denen nun zusätzlich auch die Umwandlung des Aerosols zu erfassen ist. Als besonders effizientes mathematisches Verfahren wird dafür hier die Momentenmethode (method of moments, kurz MoM) eingesetzt. Sie reduziert den Aufwand zur Darstellung einer breiten Größenverteilung mit etwa 100 Stützstellen auf drei Parameter pro Fraktion („mode“). Wie im Bericht des IUTA dargelegt, ist bei einem typischen Verbrennungsaerosol von einer bimodalen Größenteilung auszugehen, also von nur sechs Parametern, für die Differentialgleichungen gelöst werden müssen.

Die Anwendung des Momentenverfahrens auf bimodale Verteilungen ist in der Literatur beschrieben und auch zu den einzelnen Umwandlungsprozessen liegen Modellgleichungen vor. Die Hauptaufgabe besteht also darin, diese Gleichungen durch aufwendige analytische Umformungen in die Momentendarstellung zu überführen. Dabei sind, um geschlossene Lösungen zu erzielen i.d.R. auch Vereinfachungen der Grundgleichungen nötig. Das so gewonnene System von Differentialgleichungen muss dann numerisch gelöst werden. Dafür war der Solver des Strömungssimulationsprogramms CFX vorgesehen, da dieser auch die nichtlinearen Navier-Stokes-Gleichungen für die Strömung der Gase löst. Jede Modellierung ist nur so gut wie die Qualität der Eingangsparameter. Es wurde dementsprechend ein intensiver Austausch mit den experimentellen Teilprojekten gepflegt, um sicherzustellen, dass aus den aufwendigen Messungen das Maximum an Information gezogen wird.

## **I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Das Ingenieurbüro Benker besitzt umfangreiche experimentelle Erfahrung im Bereich der Aerosolmesstechnik und der effizienten Modellierung von dynamischen Prozessen. Ein wesentlicher Aspekt ist dabei stets die Reduzierung von komplexen rechnergestützten Modellen auf genaue, nutzbare analytische Gleichungen.

## **I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Der Unterauftrag des Ingenieurbüros Benker umfasst verschiedene Arbeitspakete, die sich thematisch den folgenden Positionen zuordnen lassen:

Pos. 1 / AP 6.1

Aufstellen und Validieren der MoM-Gleichungen

Pos. 2 / AP 2.1, 2.7

Kopplung an das Brennbett

Pos. 3 / AP 1.3, 1.4, 1.6, 3.1, 3.7	Abgleich mit Kesselmessungen
Pos. 4 / AP 4.3	Kopplung an das Rohr (Deposition)
Pos. 5 / AP 6.2, 6.5	Auswertung, Dokumentation

Die Partikelmessungen in Feuerraum (AP 1.3) und Kessel (AP 3.1) werden eingehend im Teilschlussbericht des IUTA behandelt. Ebenso stellt der Bericht des bifa Umweltinstituts die Messungen der Gasphase in Feuerraum (AP 1.4) und Kessel (AP 3.2) dar. Das AP 2.1 "Umsetzung der Partikelmessdaten in ein Partikelaustragsmodell" wird im Teilbericht der Weghaus GmbH detailliert beschrieben, um den engen Zusammenhang zu den weiteren Optimierungen am Rostfeuerungsmodell CombAte herzustellen. Ebenso wird AP 4.3 "Berechnungen zum Stofftransport zum/am Belag" im Wesentlichen von der Weghaus GmbH dargestellt. In diesem Teilbericht wird somit der Schwerpunkt auf die Erarbeitung und Anwendung des Momentenverfahrens gelegt.

#### **I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Es wurde im Rahmen des Projekts auf keine Patente zugegriffen. Beispiele für die Literatur-Standardwerke zur Aerosoldynamik sind [1] und [2]. Als Zusammenfassung der Vorarbeiten für das Gesamtprojekt kann [3] dienen. [4] und [5] sind Vorarbeiten des Autors. [6] dient als Grundlage für die Modellierung eines bimodalen Aerosols mit dem MoM-Verfahren. [7] ist die Referenzquelle für einen Großteil der verwendeten Modellgleichungen. In [8] sind die Besonderheiten der Modellierung von turbulenten chemischen Reaktionen erläutert, einschließlich Hinweisen auf numerische Lösungsstrategien. Die übrigen Quellen gegeben ein Einblick in die turbulente Koagulation.

- [1] S.K. Friedlander, „Smoke, Dust and Haze“, John Wiley (1977).
- [2] W.C. Hinds, „Aerosol Technology“, John Wiley (1982).
- [3] C.F. Deuerling, „Untersuchung zum Einfluss von Rauchgas-Aerosolen in Müll- und Biomasse-Verbrennungsanlagen auf die Hochtemperatur-Korrosion der Überhitzer“, Dissertation Uni Rostock (2009).
- [4] B. Benker. R. Warnecke, „Deposition und Permeation“, VDI-Wissensforum "Beläge und Korrosion in Großfeuerungsanlagen", Göttingen (2004).
- [5] S. Montel, „Simulation des räumlichen und zeitlichen Verlaufs von Aerosolverteilungsparametern unter Berücksichtigung von Koagulation und Sedimentation“, Diplomarbeit am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik der TU Clausthal (1996).
- [6] M. Megaridis, R. A. Dobbins, „A Bimodal Integral Solution of the Dynamic Equation for an Aerosol Undergoing Simultaneous Particle Inception and Coagulation“, Aerosol Sci. Tech. 12 (1990) 240-255.
- [7] M. Wilck, „Modal Modelling of Multicomponent Aerosol“, VDI-Verlag (1999)
- [8] Rodney O. Fox, „Computational Models for Turbulent Reacting Flows“, Cambridge University Press (2003)

- [10] P.G. Saffman, J.S. Turner, „On the collision of drops in turbulent clouds“, J. Fluid Mech. 1 16 (1956) 16-30.
- [11] K. Okuyama et al., „Turbulent Coagulation of Aerosols in Pipe Flow“, J. Aerosol Sci. 9 (1978) 399-410.
- [12] Y. Xiong, E. Pratsinis, „Gas Phase Production of Particles in Reactive Turbulent Flows“, J. Aerosol Sci. 22 (1991) 637-655.
- [13] F.E. Kruis, K.A. Kusters, „The Collision Rate of Particles in Turbulent Media“, J. Aerosol Sci. 27 (1996) 263-264.
- [14] T. Elperin et al., „Effect of Raindrop Size Distribution on Scavenging of Aerosol Particles from Gaussian Air Pollution Plumes and Puffs in Turbulent Atmosphere“, Proc. Saf. Environ. Protect. 102 (2016) 303–315.

## **I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Innerhalb des Projekts fand ein reger Austausch mit den andern Projektpartnern statt, insbesondere mit dem Auftraggeber IUTA und der Weghaus GmbH, mit der viele Arbeitspakete gemeinsam behandelt wurden. Eine intensive Zusammenarbeit mit Partnern außerhalb dieses Projektes war hingegen nicht notwendig.

## **II. Eingehende Darstellung des Vorhabens**

### **A Aufstellen und Validieren der Momentengleichungen**

Die analytische Umformung der aus der Literatur bekannten Modellgleichungen in die Momentendarstellung war aufwendig, bereitete aber keine unerwarteten Probleme. Die MoM-Gleichungen für Koagulation und Kondensation im Molekular- und Kontinuumsbereich wurden anschließend in FORTRAN implementiert. Die benötigten Stoffparameter wurden temperaturabhängig hinterlegt. Die auf diesem Weg berechneten Raten von Partikelanzahl und -masse wurden mit den Werten aus Literaturquellen verglichen. Weiterhin wurden die für die Transportgleichungen nötigen Koeffizienten zusammengestellt, wobei die Umformung im Fall des Diffusionskoeffizienten mathematisch anspruchsvoll ist. Für die grobe Partikelfraktion wurde von der ursprünglich vorgesehenen durchgängigen Verwendung von MoM-Gleichungen abgesehen und eine Kombination aus Partikeltracking (für die Bahnkurven und Deposition) und MoM (für die Zusammensetzung) als flexiblere Lösung abgesprochen.

### **B Einbindung des Momentenmodells in CFX**

Bei der Einbindung des Momentenmodells in CFX zeigte sich aufgrund der mehrere Größenordnungen umfassenden relevanten Zeitskalen (siehe Teilschlussbericht der Weghaus GmbH für Details), dass zur Lösung dieser Problemstellung ein Mehrskalensmodell erforderlich wäre, das aber in CFX nicht verfügbar ist. Da zudem für das CFX-Modell relativ große Zellen verwendet werden, könnten lokale Konzentrationsunterschiede übersehen werden und falsche Ergebnisse verursachen. Deswegen wurde das Konzept verfolgt, die Strömung mittels CFD zu berechnen und die Veränderung der Umgebung entlang vieler Stromfäden zu beschreiben. Dazu wurde ein eigener, einfacher Solver geschrieben, um die MoM-Gleichungen für feine Partikel zu

lösen, die sich längs einer Stromlinie bewegen. Es war es zunächst notwendig zu validieren, ob trotz der mit einer solchen Betrachtung einhergehenden Veränderungen das reale System noch ausreichend repräsentiert ist.

### C Betrachtung der Zustandsänderungen längs einzelner Stromlinien

Abb. 1 zeigt für 25 mit dem CFX-Programm bereitgestellte Stromlinien den Temperaturverlauf sowie die NaCl- und KCl-Konzentrationen ohne Berücksichtigung von Kondensation. Dabei zeigt sich, dass abhängig vom Startpunkt die jeweils erreichte Maximaltemperatur in einer Gruppe der Daten etwa 1300 K beträgt, in der anderen aber etwa 2500 K. Die Stromlinien wurden dem entsprechend in zwei Gruppen mit gleicher Skalierung dargestellt (LT „low temperature“ oben, blaue Linien; HT „high temperature“ unten, rote Linien). Lücken in der Nummerierung beruhen auf abgebrochenen Rechenläufen.

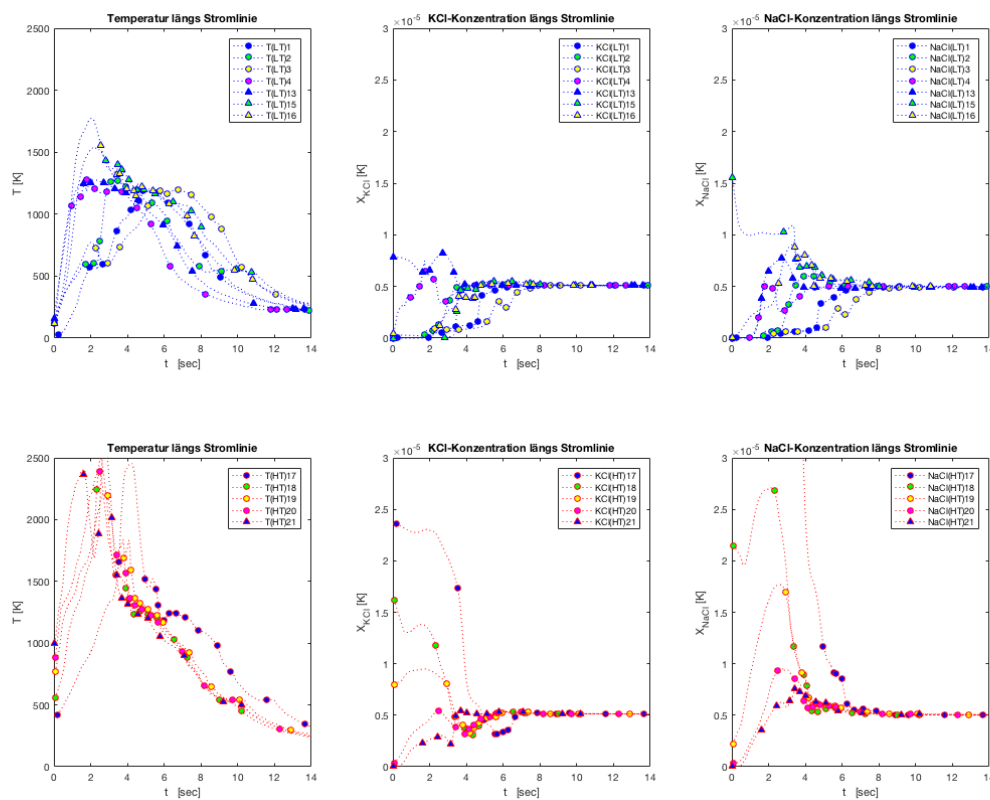


Abb. 1: Zustandsdaten längs einzelner Stromlinien einer CFX-Simulation. Datenquelle: Weghaus GmbH im Rahmen dieses Projektes.

Unter Beibehaltung der Gruppierung wurden die zugehörigen KCl und NaCl-Konzentrationen als Molenbruch dargestellt (Daten für KCl jeweils in der Mitte von Abb.1, Daten für NaCl rechts). Auch hier zeigt sich, gerade bei den hohen Temperaturen, eine sehr große Varianz. Diese Darstellung lässt auf den ersten Blick eine sehr stark ortsabhängige Entwicklung des Aerosols erwarten. Bei aller Komplexität zeigen die Daten in Abb. 1 aber auch, dass sich nach ca. 5 Sekunden durch die turbulente Durchmischung die Unterschiede der Startphase ausgeglichen haben. In Abb. 2 wird die individuelle zeitliche Entwicklung ausgeblendet und stattdessen ein eher thermodynamischer Ansatz gewählt. Dargestellt sind zusammengehörigen Temperatur- und Chloridwerte, der Übersicht halber für ausgewählte Zeitintervalle.

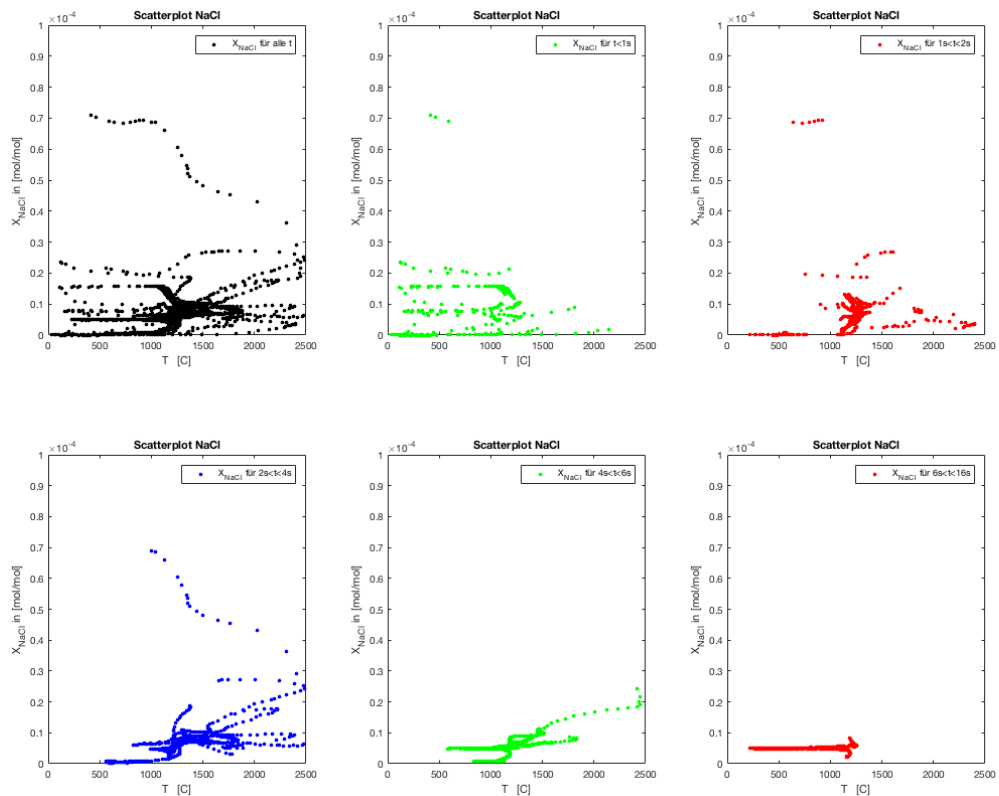


Abb. 2: Zusammengehörige NaCl-Konzentrations- und Temperaturdaten; oben links: Gesamte Datenmenge der CFX-Stromlinie; zeilenweise fortschreitend: Daten für aufeinanderfolgende Zeitfenster.

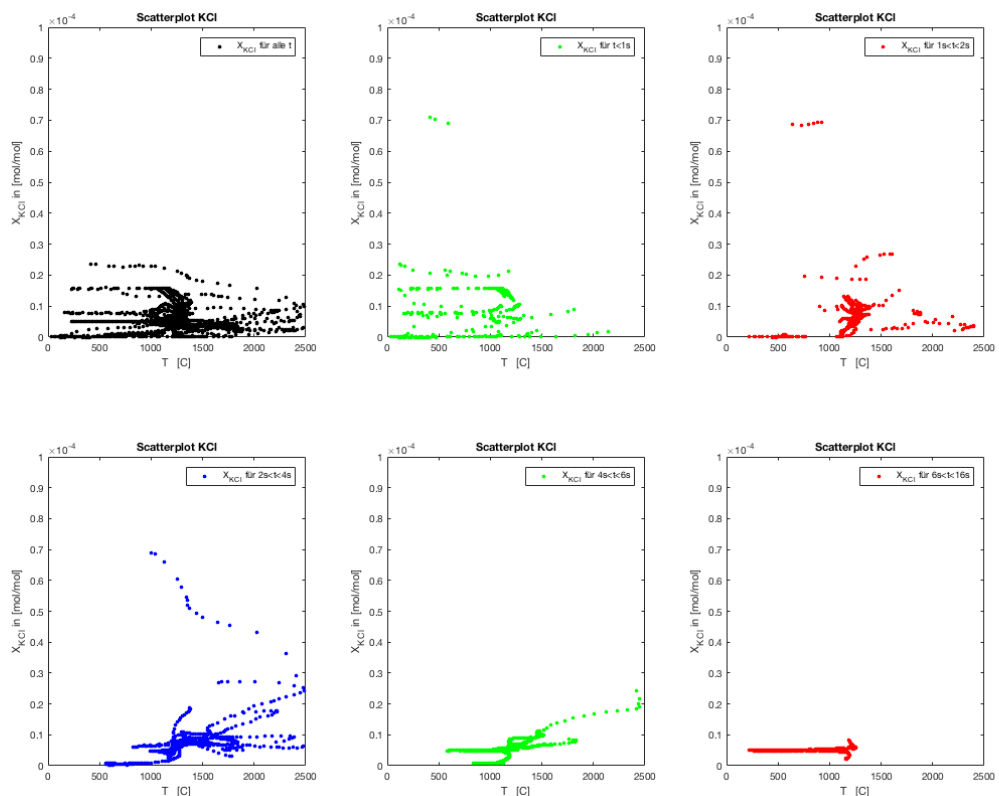


Abb. 3: Zusammengehörige KCl-Konzentrations- und Temperaturdaten; oben links: Gesamte simulierte Datenmenge; zeilenweise fortschreitend: Daten für aufeinanderfolgende Zeitfenster.

Abb. 2 zeigt, dass sich die Vielzahl der Zustände (Abb. 2 oben Mitte) im weiteren Verlauf einengt (Abb. 2 ff.), bis schließlich unterhalb von etwa 1100 °C bei konstanter Konzentration nur noch die Temperatur sinkt. Das in Abb. 2 für NaCl gezeigte Verhalten findet sich völlig analog in Abb. 3 für KCl wieder.

Aus den thermodynamischen Daten von NaCl und KCl ergibt sich, dass unter realistischen Anfangswerten die Kondensation dieser Dämpfe erst unterhalb von 800°C einsetzt (vergl. Zwischenbericht 7, Abb. 27 des IUTA sowie Abb. 4 hier). Die Kondensation der Alkalichloriddämpfe setzt also erst deutlich nach Erreichen einer vollständigen Durchmischung ein. Dies deckt sich mit den Ergebnissen des IUTA, dass die Prozesse für verschiedene Stromlinien nahezu identisch ablaufen, eine eindimensionale Betrachtung also ausreichend ist.

## D Berechnung der Aerosoldynamik mittels des Momentenverfahrens

Die im Verlauf des Projektes entwickelten Momentengleichungen für das Feingut wurden in eine selbstgeschriebene FORTRAN-Routine integriert. Die Übereinstimmung des FPM-Codes (IUTA) mit den eigenen Rechnungen zeigte die Zuverlässigkeit der unabhängig voneinander erzielten Ergebnisse. In Abb. 3 wurden bei den eigenen Rechnungen die Startwerte für die anfängliche Größe der Feinstpartikel  $d_{p,f}$ , deren Volumenkonzentration  $C_{v,f}$  und die Salzfracht  $C_{m,Chloride}$  (NaCl und KCl als Summenparameter) systematisch variiert. Ausgehend von einem realistischen Wert wurden die Rechnungen für jeweils einen kleineren (Faktor 0,3) und größeren Wert (Faktor 3) wiederholt. Als Startwerte wurden so miteinander kombiniert:

Niveau	1	2	3	
$d_{p,f}$	0,003	0,01	0,03	$\mu\text{m}$
$C_{v,f}$	$0,7 \times 10^{-8}$	$2,3 \times 10^{-8}$	$7,0 \times 10^{-8}$	$\text{m}^3/\text{m}^3_{\text{Betr.}}$
$C_{m,Chloride}$	0,3	1	3	$\text{g}/\text{m}^3_{\text{Betr.}}$

In allen Fällen wurde das gleiche Temperaturprofil verwendet (linearer Abfall). Es ergeben sich so 27 Kombinationsmöglichkeiten, deren Bezeichnung in den Legenden sich aus den Niveauparametern in der Reihenfolge  $d_{p,f}$ ,  $C_{v,f}$ ,  $C_{m,Chloride}$  ergibt.

In Abb. 4 oben links wurden für festen Chloridgehalt 1 (niedrigstes Niveau) Menge und Größe der Feinstpartikel variiert, die das Brennbett verlassen. Nur bei logarithmischer Skalenteilung (Abb. 4 unten links) lässt sich der anfängliche Einfluss der Partikelgröße erkennen. Bis zum Einsetzen der Kondensation dominiert dann der Einfluss der Volumenkonzentration der Feinstpartikel. Wegen seines geringen Einflusses bleibt in Abb. 4 oben rechts der Partikeldurchmesser konstant auf Niveau 2 (Referenz). Es ist nun gut zu erkennen, dass nach der Kondensation vor allem die kondensierbare Menge an Chloriden die Lage der Kurven bestimmt.

In Abb. 4 unten rechts wird der Einfluss der Kondensatmenge noch einmal dargestellt. Für feste Partikelparameter  $d_{p,f}$  und  $C_{v,f}$  (jeweils auf Referenzniveau) wird die Chlorid-Konzentration verändert. Man erkennt, wie oben schon gesagt, ihren massiven Einfluss auf die Partikelgröße. Der Kelvin-Effekt wirkt sich auf den Kondensationsbeginn aus: Je höher die Übersättigung, desto eher setzt die Kondensation ein. Weiterhin wurde in der Darstellung auf der Abszisse die Zeit- durch eine Temperaturachse ersetzt. Die negativen Zahlen haben keine inhaltliche Bedeutung, sondern nur die Funktion, die Richtung mit der Zeitachse in Übereinstimmung zu bringen.

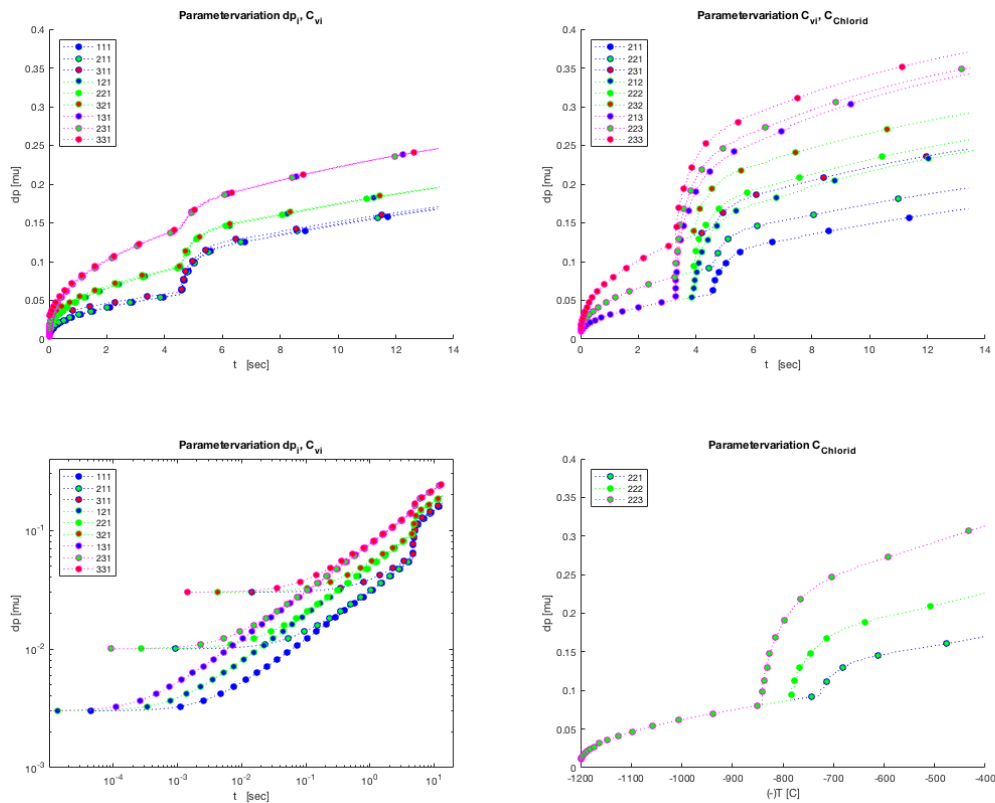


Abb. 4: Verhalten der Feinpartikel gemäß des im Projekt entwickeltem MoM-Verfahrens (ohne Grobfraktion). Bezeichnungen gemäß der Niveauparametern in der Reihenfolge  $d_{p,f} / C_{v,f} / C_{m,\text{Chloride}}$ .

Für die weitere Modellierung ist wesentlich, dass gemäß Abb. 4 unten auch bei ungünstigen Parametern die Kondensation nicht einsetzt, bevor die Temperatur unter  $850^\circ\text{C}$  gesunken ist. Die Kondensation setzt erst ein

- wenn Temperatur und Konzentration vollständig vermischt sind
- nachdem die Feinstpartikel durch Koagulation eine Größe erreicht haben, die nur noch von ihrer Volumenkonzentration und der vergangenen Zeit abhängt

Dementsprechend liegt auch die Anzahlkonzentration  $C_{n,f}$  fest, auf die sich die Kondensatmenge verteilt. Die Gegenwart der groben Partikel ändert an diesen Aussagen aufgrund ihrer geringen Anzahlkonzentration und geringen spezifischen Oberfläche wenig (eigene Abschätzung sowie Berechnung des IUTA mit FPM-Code). Anzahl und Größe der Feinstpartikel nach Durchlauf durch den Kessel sind also in nahezu thermodynamischer Weise durch die Anfangsbedingungen festgelegt.

## E Überlegungen zur turbulenten Koagulation

Die im Rahmen des Projektes von IUTA und bifa gewonnenen Messwerte zeigen bei den groben Partikeln einen Chloridanteil in der Größenordnung von 10% (Massen- und somit näherungsweise auch Volumenanteil), der sich in dieser Größe nicht mit direkter Kondensation oder thermischer Koagulation erklären lässt. Dementsprechend wurde die turbulente Koagulation näher betrachtet als Mechanismus, um die kondensathaltigen Feinpartikel von einigen 100 nm Größe auf dem Grobput abzu-

scheiden. Da die groben Partikeln den turbulenten Wirbeln nur verzögert folgen, stoßen sie mit anderen Partikeln zusammen, die eine geringere Relaxationszeit haben. Saffman und Turner [10] geben die Stoßmechanismen für unterschiedlich große Partikel an, wobei als Vergleichsmaßstab eine charakteristische Wirbelabmessung dient. Hier ergibt eine analytische Rechnung die in Abb. 5 dargestellten Salzanteile der groben Partikel.

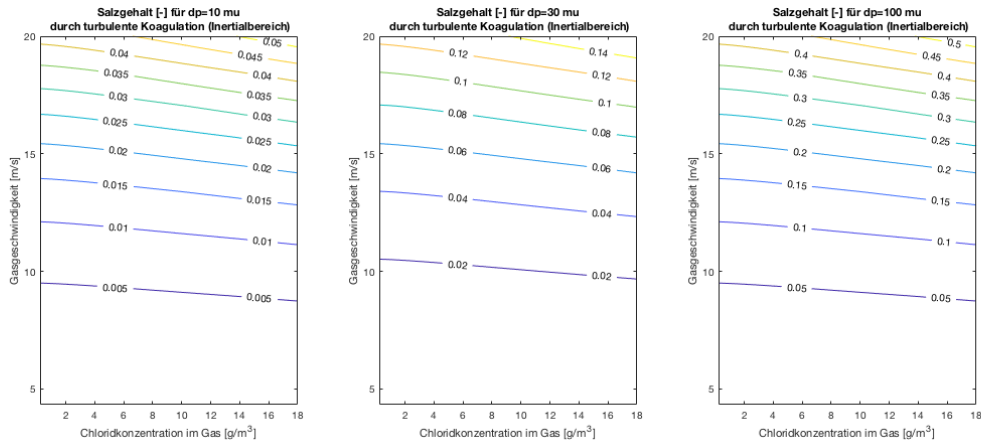


Abb. 5: Salzgehalt der groben Partikel durch turbulente Koagulation als Folge der Partikelträgheit (Saffman-Mechanismus 2).

In Abb. 5 ist zu erkennen, dass im Grobgut mit zunehmender Partikelgröße und Gasgeschwindigkeit eine beachtliche Salzfracht durch Kollision mit dem Feingut aufgenommen wird. Die experimentell gefundene Zusammensetzung ließe sich so gut erklären. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass dieser Ansatz nicht für besonders breite Verteilungen gedacht ist. Ergänzend ist zu berücksichtigen, dass feine Partikel der Kollision mit sehr großen Partikeln ausweichen können. In [2] wird dies bei der Berechnung der Deposition aus feinstaubbeladenen Abgasfahnen durch hindurchfallende Regentropfen modelliert. Unter hohen (aber nicht völlig unrealistischen) Startwerten ergeben sich bei Verwendung der Korrektur Salzfrachten in der beobachteten Größenordnung.

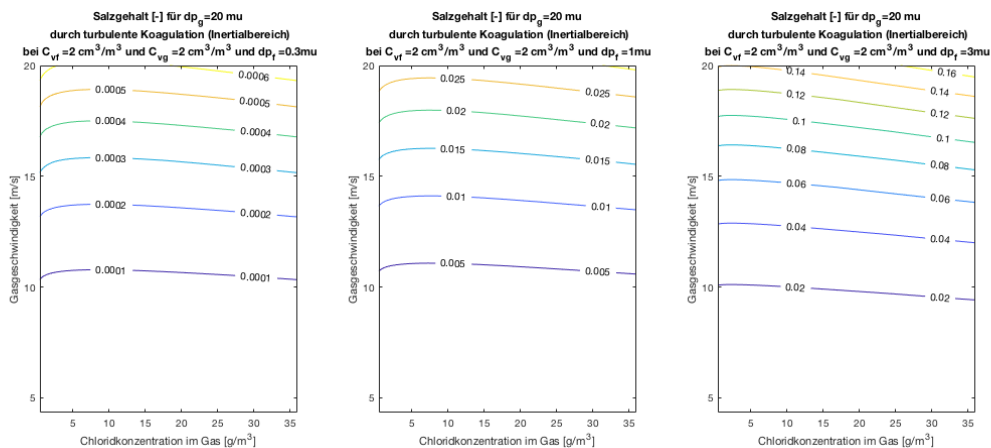


Abb. 6: Salzgehalt der groben Partikel durch turbulente Koagulation als Folge der Partikelträgheit (Saffman-Mechanismus 2, korrigiert, hohe Startwerte).

Als Ergebnis lässt sich zusammenfassen, dass die turbulente Koagulation ein plausibler Mechanismus ist, um den Salzanteil der großen Partikel zu erklären, aber für die hier benötigten Parameter keine zuverlässige Modellgleichung gefunden wurde.

## **F Betrachtung des Stofftransports zum Rohr**

Der gemessene und (unter Vorbehalt) durch Modellrechnung abgeschätzte Salzgehalt der Grobfraction ist von zentraler Bedeutung für den Transport von Chloriden an die Wärmetauscherrohre. Zu vergleichen ist ein Chloridanteil im Grobgut von größenordnungsmäßig 10% bei 100% Auftreffwahrscheinlichkeit am Rohr mit einem Chloridanteil im Feingut von ca. 90% bei nur etwa 2% Abscheidegrad am Rohr. Durch einfache Multiplikation zeigt sich, dass der Chloridmassenstrom über das Grobgut etwa um einen Faktor 10 größer ist als der durch das Feingut verursachte. Trotz des geringeren Salzgehalts des Grobgutes bewirkt die Impaktion als effizienter Abscheidemechanismus, sodass über das Grobgut mehr Chlorid am Rohr abgeschieden wird als über das Feingut. Dies deckt sich mit den Ergebnissen des IUTA.

## **G Ansätze zur Korrosionsminderung**

Unabhängig von den Details des Korrosionsmodells im Nahbereich ist davon auszugehen, dass der Massenstrom der deponierten Alkalichloride eine zentrale Rolle spielt. Nach der Verbrennung sammeln sich die Chloride zwischenzeitlich nahezu vollständig durch Kondensation im Feingut an, das aber kaum auf dem Rohr abgeschieden wird. Die ursprünglich „harmlose“ Grobgutfraktion übernimmt jedoch (sehr wahrscheinlich) durch turbulente Koagulation einen Teil des Feingutes einschließlich der zugehörigen Chloridfracht und bewirkt durch die Impaktionsabscheidung den Transport der Chloride an die Wärmetauscherrohre. Demzufolge sollte eine Verbrennungsführung, die weniger Grobstaub aus dem Bett austrägt, im gleicher Weise zur Minderung der Chloriddeposition auf den Wärmetauscherrohren beitragen und so die Korrosionsrate senken.

## **H Zusammenfassung**

Die mit dem selbstentwickelten Momentenmodell gewonnenen Ergebnisse stimmen gut mit Vergleichsrechnungen des IUTA überein. Das benötigte Temperaturprofil wurde dabei aus dem CFX-Modell importiert und die Anfangsbedingungen für die Partikel aus experimentellen Ergebnissen abgeleitet. Die Berechnungen wurden sowohl für diese Werte als auch für systematische Variationen durchgeführt. Zur Kopplung von Fein- und Grobgut wurde abgeschätzt, ob sich der experimentell (mit breiten Schwankungen) ermittelte Salzgehalt der groben Partikel mit den obengenannten Prozessen erklären lässt. Dies war nicht der Fall, sodass abschließend der Mechanismus der turbulenten Koagulation in Betracht gezogen wurde. Es konnte zahlenmäßige Übereinstimmung erzielt werden, doch zeigte sich vor allem, dass für die Kombination aus technischer Strömung (im Gegensatz zur atmosphärischen Strömungen, insbesondere Wolkenbildung) und Partikeln mit sehr großem Größenunterschied kaum Untersuchungen und keine bewährte Beschreibung vorliegen. Trotz dieser Unsicherheit ließ sich schlussfolgern, dass der Freisetzung von Grobgut aus dem Brennbett eine wichtige Rolle beim Transport von Chloriden zu den Wärmetauschern zukommt.

Auf Basis der im Projekt durchgeführten Arbeiten können die folgenden wichtigsten Aussagen und Folgerungen getroffen werden:

- Wenn die Temperatur des Abgases so niedrig ist, dass die Kondensation der Chloride einsetzt, hat sich das Strömungsprofil über dem Querschnitt völlig verleichmäßig.
- Die Größenverteilung der Feinstpartikel verändert sich zu diesem Zeitpunkt nur noch langsam; sie hängt nicht mehr von den Details (Größenverteilung) im Anfangszustand ab, sondern nur noch von der Partikelmenge (Volumenkonzentration).
- Die Größenverteilung des anschließend durch Kondensation gebildeten Feinpartikelmodos hängt dem entsprechend in nahezu thermodynamischer Weise von wenigen Anfangswerten ab.
- Die Grobpartikel beeinflussen dieses Geschehen durch ihre geringe Anzahl und spezifische Oberfläche nicht wesentlich.
- Der experimentell bestimmte Salzgehalt der groben Partikel wird auf turbulente Koagulation zurückgeführt; die theoretischen Grundlagen zur Modellierung dieses Effekts sind für die hier vorliegenden Parameter jedoch nicht zuverlässig.
- Die groben Partikel treffen mit nahezu 100%-iger Wahrscheinlichkeit auf angeströmte Rohre; für die feinen Partikel gilt das Gegenteil.
- Es sind also die ursprünglich „harmlosen“ Grobpartikel, die die korrosionsrelevanten Chloride an das Rohr transportieren. Ihre Menge sollte sich durch die Verbrennungsführung beeinflussen lassen.

Das übergeordnete Ziel, mit Hilfe der Modellierung des Partikelverhaltens Ansätze zur Korrosionsminderung zu finden, wurde erreicht. Dies geschah jedoch, anders als geplant, nicht durch das Implementieren eines Partikelmodells in CFX. Stattdessen wurden die für diesen Zweck erarbeiteten Routinen erfolgreich „von Hand“ ausgewertet. Darüber hinaus stellte sich heraus, dass bei der turbulenten Koagulation noch Forschungsbedarf besteht.