



WEGHAUS GMBH



Entwicklungen zur Beschreibung der Geschwindigkeit der Hoch-Temperatur-Chlor-Korrosion

R. Warnecke¹; V. Müller¹; F. Haider²; S. Horn²; S. Maisch²; H. Nordsieck³; M. Weghaus⁴

¹Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH,
Hafenstraße 30, 97424 Schweinfurt

²Universität Augsburg, Institut für Physik,
Universitätsstraße 1, 86135 Augsburg

³BifA GmbH,
Am Mittleren Moos 46, 86167 Augsburg

⁴Weghaus GmbH,
Kirchweg 11, 97297 Waldbüttelbrunn

Feuerung und Kessel – Beläge und Korrosion – in Großfeuerungsanlagen
VDI – Fachkonferenz
Stuttgart, 23.-24.06.2009

Inhalt

| | |
|--|----|
| 1. Grundlegende Überlegungen | 2 |
| 2. Mechanismen der Belagsbildung von Aerosolen | 5 |
| 3. Simulationsergebnisse | 8 |
| 4. Interpretationsansätze | 15 |
| 5. Zusammenfassung und Ausblick | 17 |
| 6. Danksagung | 18 |
| 7. Literatur | 19 |

Referent: Dr.-Ing. Ragnar Warnecke, GKS | Vortrag: Entwicklungen zur Beschreibung der Geschwindigkeit der Hoch-Temperatur-Chlor-Korrosion

1. Grundlegende Überlegungen

Die Wirtschaftlichkeit von Großfeuerungsanlagen mit heterogenen Brennstoffen, d.h. im Wesentlichen Müll-, Biomasse- und Ersatzbrennstoff-Verbrennungsanlagen, ist zu einem nicht unbedeutenden Teil von der Verfügbarkeit von Feuerung und Kessel bestimmt. Diese wiederum werden einerseits besonders durch den durch Ablagerungen an den Wärmeübertragern verursachten Druckverlust (Abbildung 1) und andererseits durch Korrosionsschäden mit der Notwendigkeit des Abfahrens der Anlage (Abbildung 2) bestimmt.

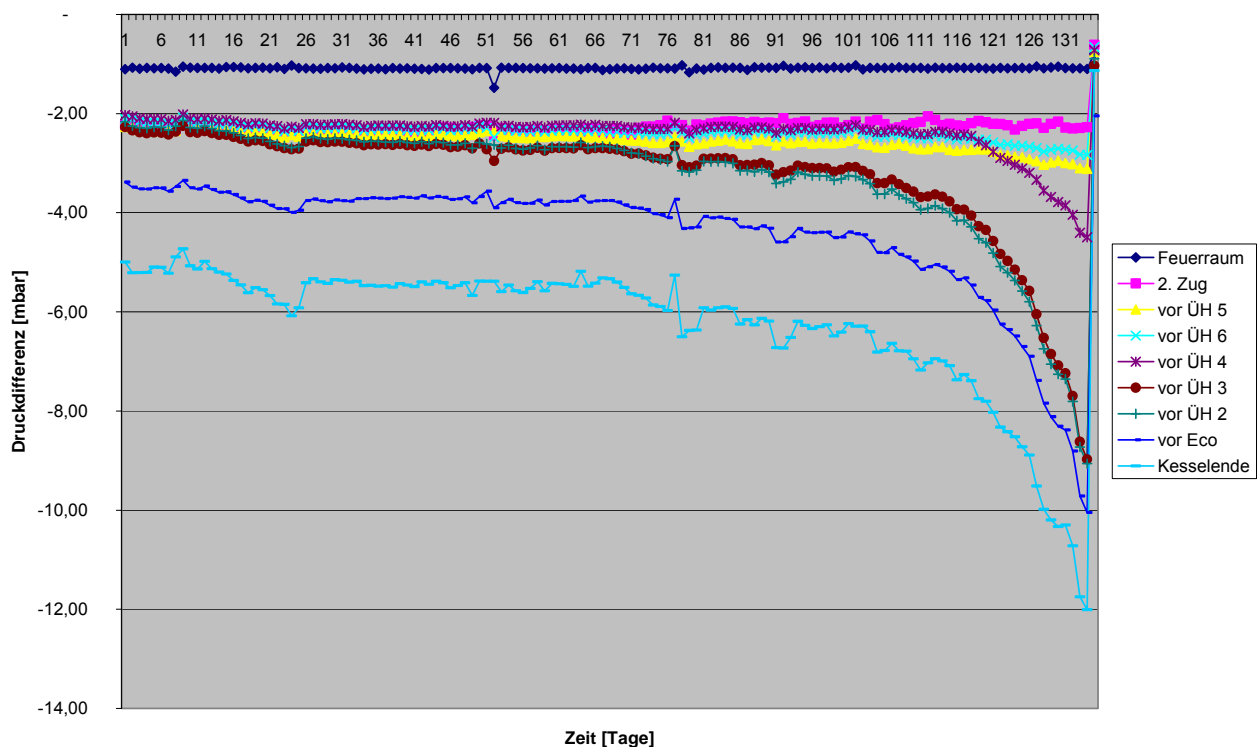


Abbildung 1: Reisezeit-begrenzender Druckanstieg in Feuerung und Kessel

Die Korrosion von Überhitzerrohren steht in direktem Zusammenhang mit dem im Brennstoff enthaltenen Chlor. Dies ergibt sich u.a. aus der Analyse von geschädigten Überhitzerrohren, an deren Korrosionsfront nahezu ausschließlich Chlor (Cl) und Eisen (Fe) zu finden ist (Abbildung 3). Erst dahinter findet sich Schwefel (S) in Verbindung mit Fe und nachfolgend zwei Eisenoxid-Schichten. Von den Eisenoxidschichten ist die Rohrwand-nähere kaum von anderen Elementen durchsetzt. Sie stellt die sogenannte topotaktische Schicht (oberhalb der gelben, gestrichelten Linie) dar und liegt räumlich in dem Bereich, in dem vor der Korrosion noch der ungeschädigte, ursprüngliche Werkstoff des Rohres gelegen hatte. In Richtung der Rauchgas(RG)-Seite schließt sich der Bereich des Eisenoxides an (unterhalb der gelben, gestrichelten Linie), der von insbesondere Alkali (= K, Na)- und Erdalkali(Ca)-Chloriden und -Sulfaten durchsetzt ist und zu Beginn der Korrosion außerhalb des Rohres gelegen hatte (epitaktische Schicht).

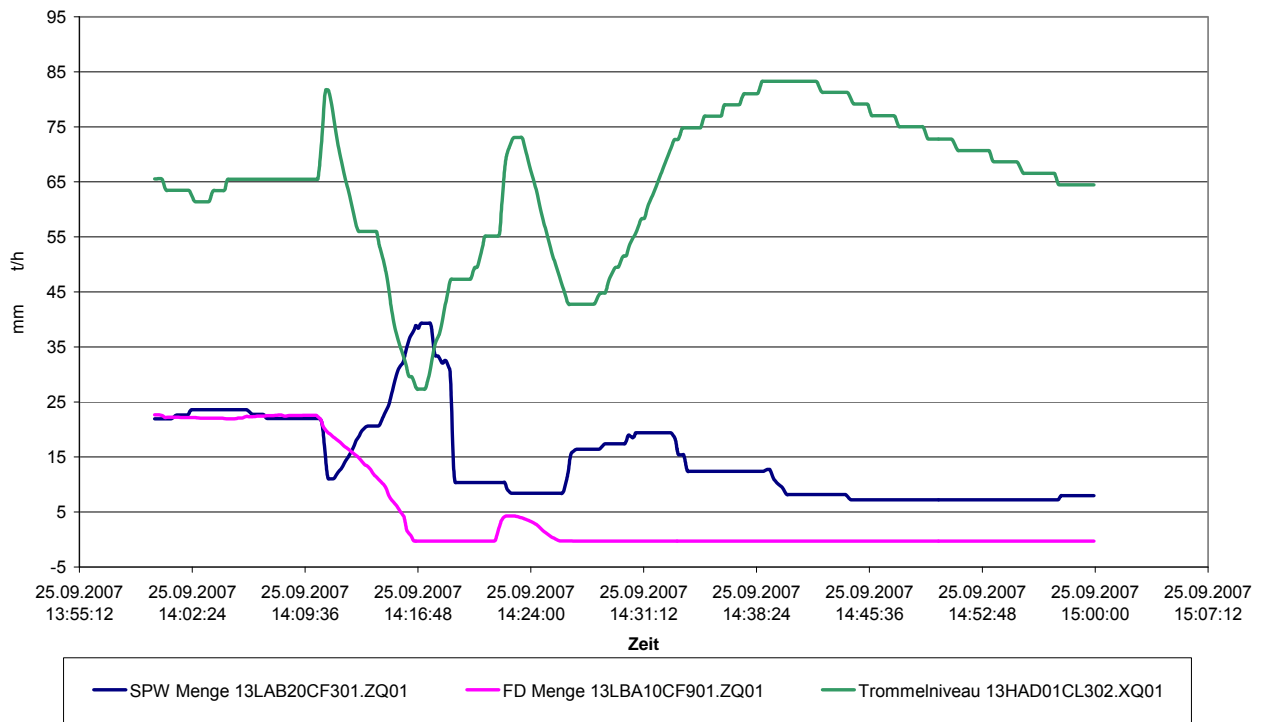


Abbildung 2: Eintritts eines Korrosionsschadens - Dokumentation mittels Wasserdampf-Kreislauf

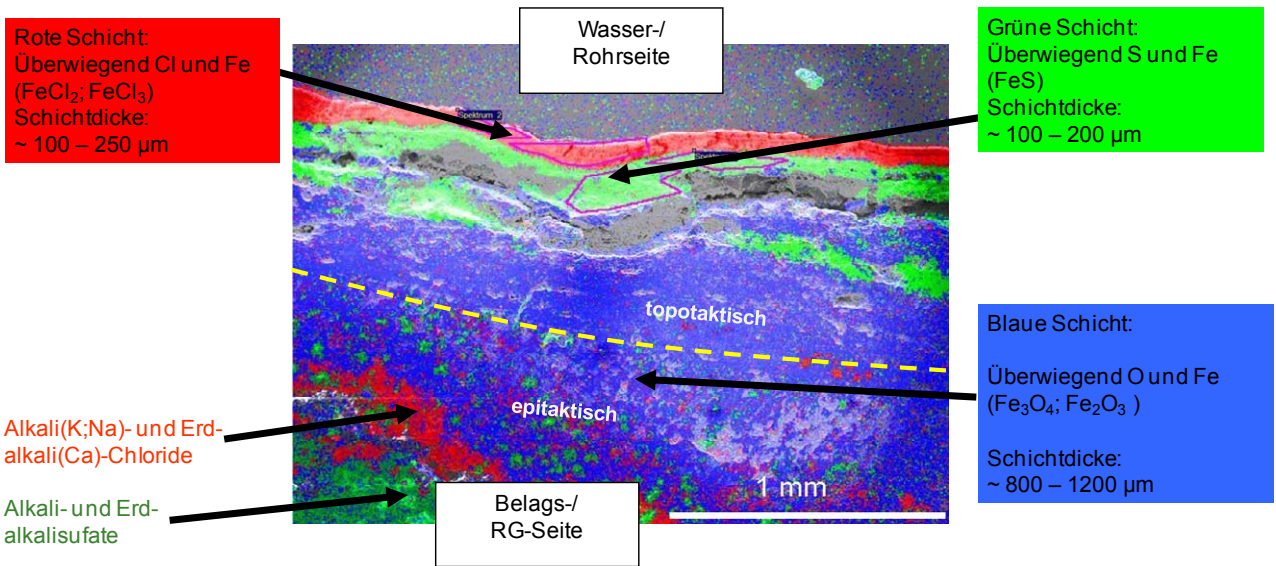


Abbildung 3: Korrosionsfront mit den beteiligten chemischen Elementen

Referent: Dr.-Ing. Ragnar Warnecke, GKS | Vortrag: Entwicklungen zur Beschreibung der Geschwindigkeit der Hoch-Temperatur-Chlor-Korrosion

Grundsätzlich ergibt sich also die Problematik der Korrosion durch die Kombination von Rohrwerkstoff und Chloriden.

In der Vergangenheit sind zahllose Versuche unternommen worden, den Angriffen der Chloride auf das Rohr eine Veränderung des Rohrwerkstoffes entgegenzusetzen. Während dies Vorgehen an den Verdampferwänden durch Verwendung von z.B. Alloy 625 zu einem guten Erfolg geführt hat, konnte noch keine durchschlagende werkstoffliche Lösung für die Überhitzer gefunden werden. Diese Misserfolge führten zu der Überlegung, ob nicht auf den anderen Teil der Problematik, die Chloride, eingewirkt werden kann. Dazu müssen diese jedoch erst charakterisiert und ihr Verhalten verstanden sein. Im Bereich von Müll- und Ersatzbrennstoffanlagen lagen bis vor Beginn der Untersuchungen so gut wie keine Informationen vor, für Biomasse hatte die Gruppe um Obernberger bereits begonnen sich mit der Thematik zu beschäftigen [Obernberger, 2004].

Offensichtlich ist, dass das Chlor aus dem Brennstoff kommt. Zur Herkunft und Freisetzung des Chlors wurde bereits berichtet (siehe z.B.: [Warnecke, 2006] und [Warnecke, 2008]). Grundsätzlich kommen die Chloride aus den Abfallfraktionen in unterschiedlichen Mengen vor (Abbildung 4), aus denen sie zu etwas 90 % auch in der Feuerung freigesetzt werden; rund 10 % verbleiben in der Schlacke.

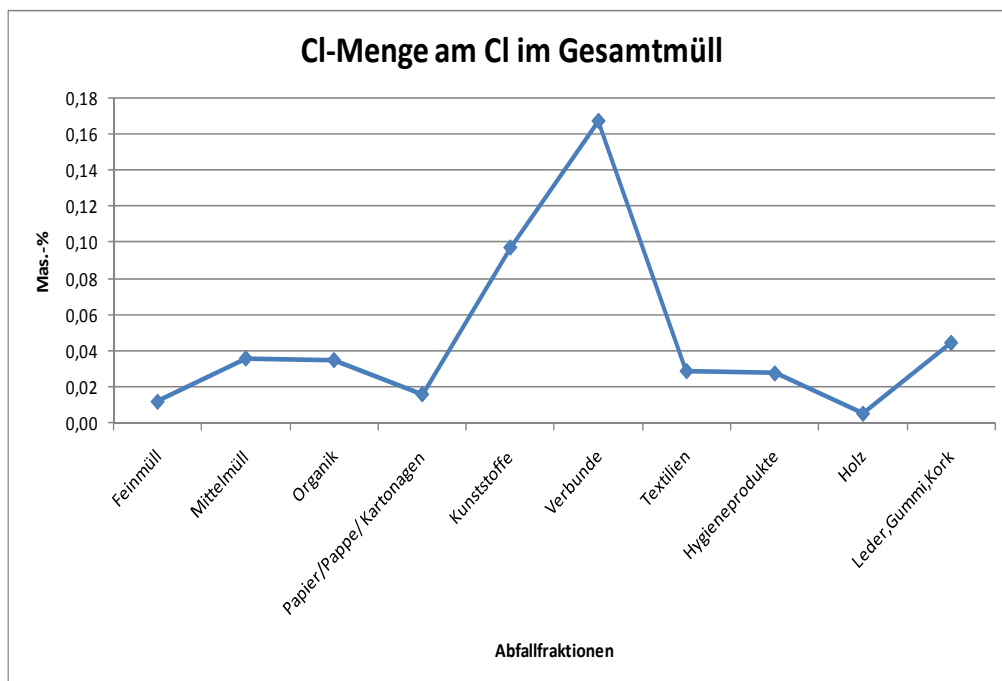


Abbildung 4: Chlor-Anteil in den verschiedenen Hausmüll-Fraktionen

Allerdings sind die Bindungsformen des Chlors sehr unterschiedlich. Abbildung 5 zeigt die Anteile des Chlors nach ihren organischen und anorganischen Bindungspartnern. Derzeit wird davon ausgegangen, dass organisches Chlor bei den sehr hohen Temperaturen in der Feuerung in die Gasphase und dann sicher im Wesentlichen zu HCl umgesetzt wird. Demgegenüber wird anorganisches Chlor außer durch die Gasphase (im Wesentlichen als Alkali(K; Na)- oder Schwermetall(Pb; Zn)-Chlorid) vor Allem als Aerosol in den Kessel getragen.

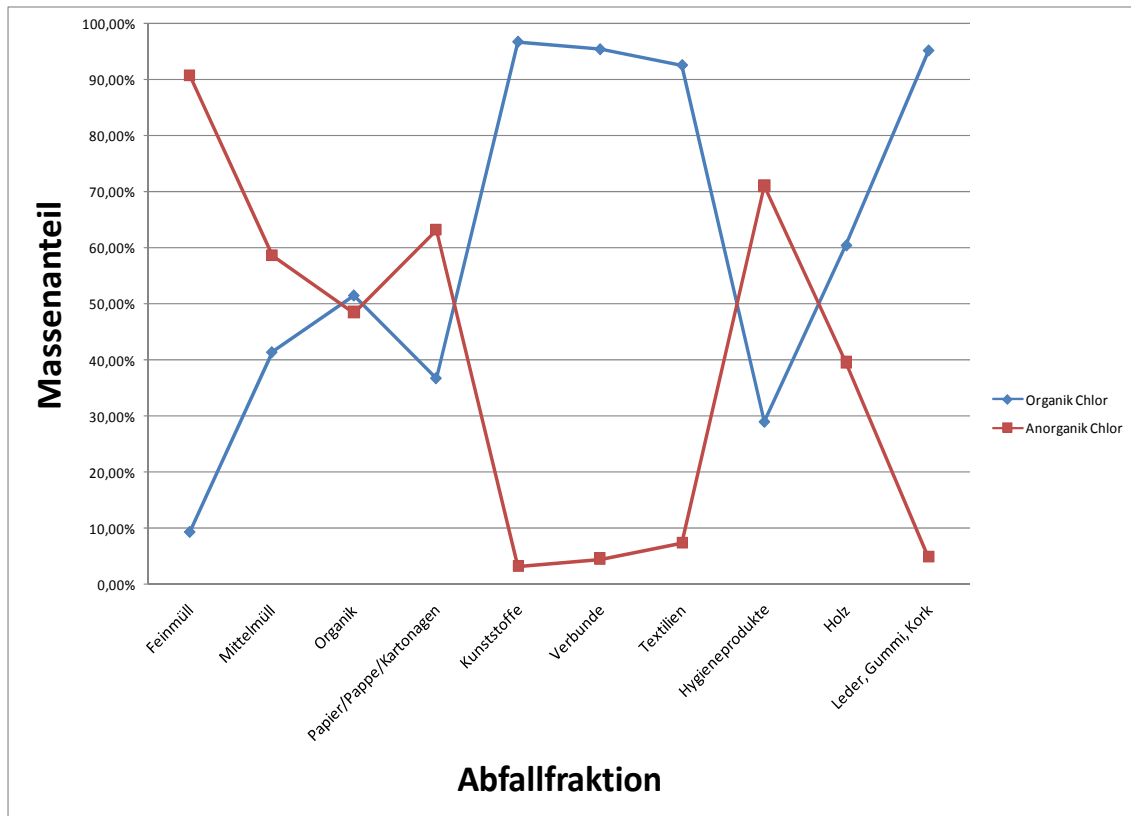


Abbildung 5: Chloranteile in den Abfallfraktionen nach organischem und anorganischem Chlor

2. Mechanismen der Belagsbildung von Aerosolen

Abhängig von der Form in der Chlor freigesetzt wird, also der Chlorphase muss sich auch der Abscheidemechanismus auf dem Überhitzerrohr unterscheiden. Eine Übersicht über die verschiedenen möglichen Phasen zeigt Abbildung 6. Die hier vorliegende Untersuchung basiert auf der Überlegung: Hätte die Chlorphase eine Form, in der es sich gar nicht auf dem Rohr abscheidet, wäre es folglich auch für die Korrosion nicht relevant; und umgekehrt. Das motiviert eine Betrachtung der unterschiedlichen Transport- und Abscheidepfade. Im Folgenden soll der Schwerpunkt auf dem Weg der Aerosolphase liegen.

In den vergangenen Jahren sind zahlreiche Messungen von GKS in der MVA durchgeführt worden, in denen die Partikelgrößenverteilungen und deren jeweilige chemische Zusammensetzung ermittelt wurden (Abbildung 7 und Abbildung 8). Auf der Basis dieser Daten wurden Überlegungen angestellt, welche Mechanismen zu einer Abscheidung auf den Überhitzerrohren bzw. Belägen führen können. Ziel war es, festzustellen, ob es möglicherweise bestimmte Partikel- bzw. Aerosolfractionen gibt, die wenig oder bevorzugt an der Korrosion mitwirken können.

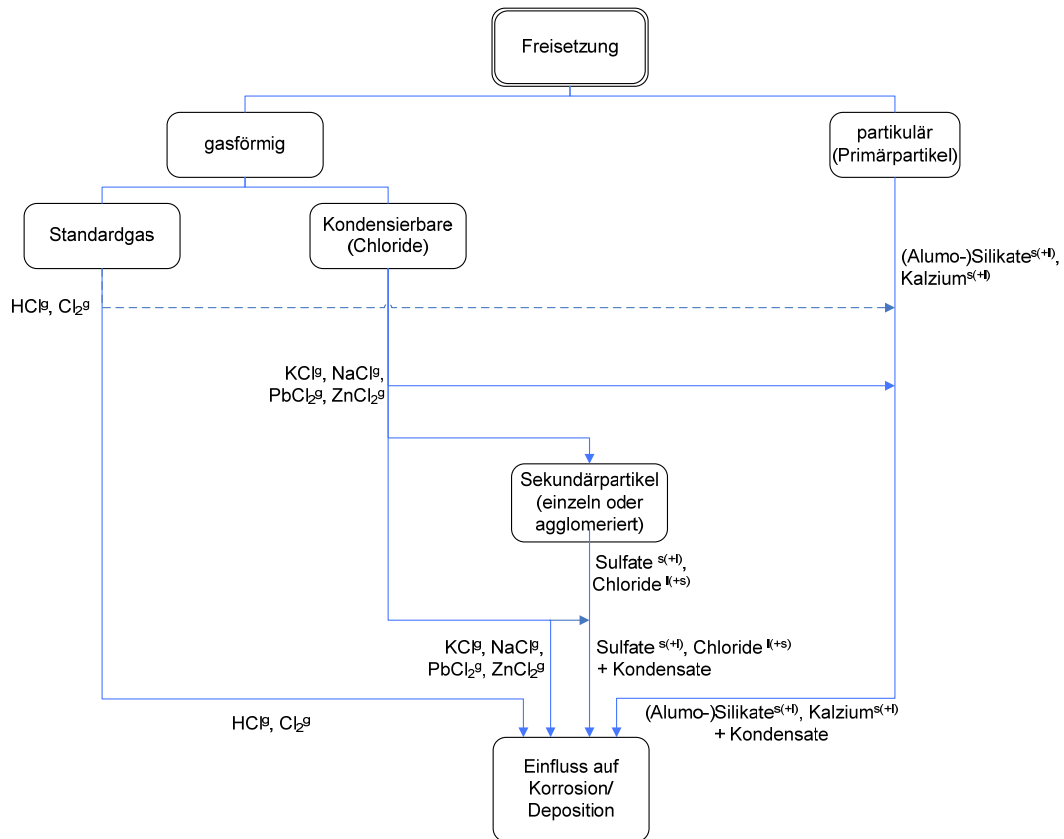


Abbildung 6: Chlorphasen von der Freisetzung aus dem Brennbett bis zur Deposition auf dem Rohr bzw. Belag

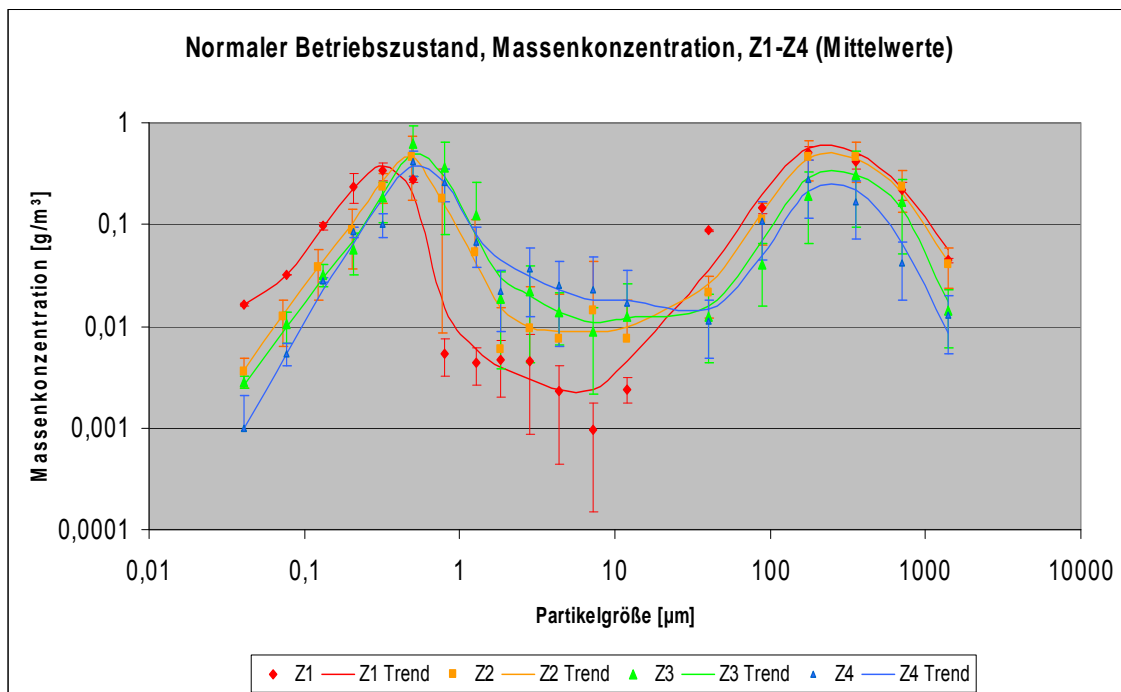


Abbildung 7: Partikelverteilung in den Zügen 1 (Z1) bis 4 (Z4) des GKS

Referent: Dr.-Ing. Ragnar Warnecke, GKS | Vortrag: Entwicklungen zur Beschreibung der Geschwindigkeit der Hoch-Temperatur-Chlor-Korrosion

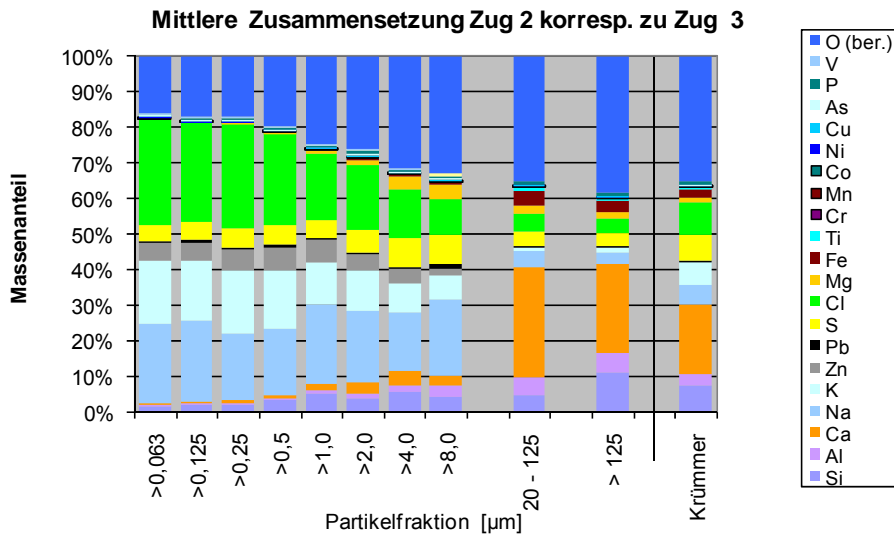


Abbildung 8: Elementarzusammensetzung der verschiedenen Partikelklassen

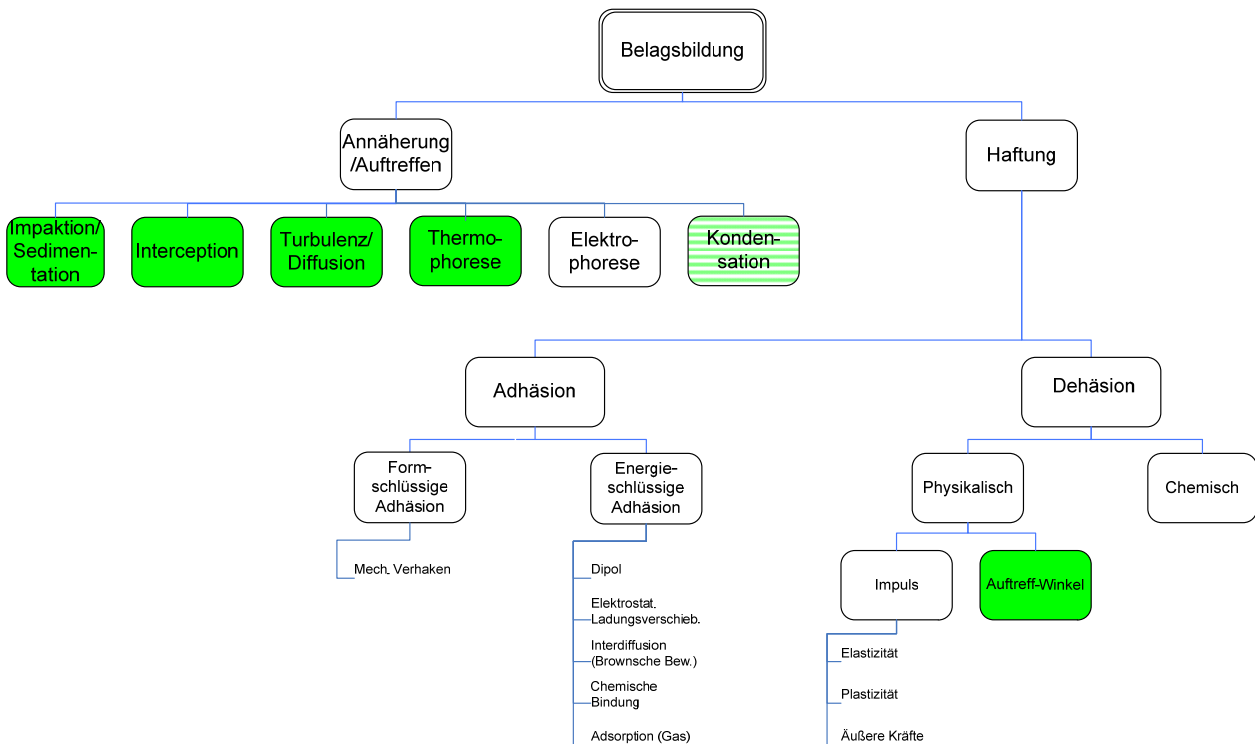


Abbildung 9: Mechanismen der Belagsbildung

Eine eingehende Analyse der Mechanismen führte zur Übersicht in Abbildung 9. Zunächst ergeben sich zwei Hauptmechanismen. Zum Einen muss das Aerosol zur Oberfläche des Rohres bzw. Belages kommen, zum Anderen muss das Aerosol dort auch haften können. Die Mechanismen von „Annäherung/Auftreffen“ sind bei [Benker, 2005] bereits beschrieben worden. Diese Mechanismen können weitestgehend gut mit bekannten physikalischen Grundlagen beschrieben und berechnet werden. Lediglich über die Ladung von Partikeln gibt es keine zuverlässigen Aussagen. Allgemein wird jedoch angenommen, dass die Ladungsreichweite von Aerosolen im Kessel gering ist bzw. nicht vorhanden ist.

Referent: Dr.-Ing. Ragnar Warnecke, GKS | Vortrag: Entwicklungen zur Beschreibung der Geschwindigkeit der Hoch-Temperatur-Chlor-Korrosion

Im Strömungssimulations(CFD)-Programm „CFX“ sind die genannten physikalischen Mechanismen implementiert (die in Abbildung 9 grün unterlegten Kästen) und werden den nachfolgenden Berechnungen zu Grunde gelegt. Die Kondensation ist im Programm noch nicht hinterlegt, konnte jedoch auch in den Partikelmessungen für eine Validierung der Berechnungen nicht selektiv erfasst werden: Die Kondensate sind, bedingt durch das Abkühlen bei der Probenahme, Bestandteile der zur Validierung gemessenen Partikel. Um die Kondensate zukünftig getrennt zu erfassen, wurde eine Vergleichsmessung vorgenommen, die die Kondensate nicht erfasst. Aus der Differenz der beiden Messungen wird man zukünftig die Kondensationsmenge erfassen können. Grundsätzlich können die Mechanismen von „Annäherung/Auftreffen“ gut beschrieben werden.

Weitaus schwieriger gestaltet sich die Beschreibung der „Haftung“ der Partikel am Rohr bzw. am Belag. Stoffdaten über die Adhäsionskräfte sind nicht verfügbar. In [Warnecke, 2006] konnte durch Partikelmessungen gezeigt werden, dass unter Berücksichtigung des Rußblasens netto etwa 25 – 30 % der Flugstäube haften bleiben. Unter der Annahme, dass die Partikel entfernenden Kräfte grob auf die gesamte Oberfläche des Belages wirken, dürften dennoch die Berechnungen den Ist-Zustand abbilden. Es wurde bewusst darauf verzichtet den über thermodynamische Programme berechenbaren schmelzfähigen Aerosolanteil zu bestimmen, da für das Anhaften eher die Oberfläche des Aerosols entscheidend ist, als die Gesamtzusammensetzung. So können oberflächlich anhaftende Schichten zum Haften führen, während das weit überwiegende Partikel aus nicht schmelzendem Material besteht [Horn, 2009]. So wurde zunächst angenommen, dass alle Aerosole beim Auftreffen auf die Oberfläche haften, sofern nicht Dehäsionskräfte die Haftung verhindern. Diese sind einerseits physikalische Kräfte, die durch Impuls bzw. Impulsumwandlung die Aerosole vom Untergrund lösen, z.B. durch Elastizität oder Plastizität, ebenso wie durch äußere Kräfte wie Rußblasen. Diese Effekte wurden in Ermangelung von Stoffdaten ebenfalls vorläufig vernachlässigt. Der Auftreff-Winkel wird in dem Programm berücksichtigt, so dass Partikel mit einem Auftreffwinkel kleiner als 10° nicht mehr haften und die Haftung exponentiell Richtung 90° auf 100% zunimmt. Andererseits können chemische Umwandlungen ebenfalls die Bindung innerhalb des Belages verändern und zu einer weniger festen Bindung oder gar Loslösung von Partikeln führen

Insgesamt dürften trotz der gemachten Einschränkungen die wesentlichen Effekte der Aerosolabscheidung mit dem Programm beschrieben werden.

3. Simulationsergebnisse

Die Simulation erfasst 5 Rohrreihen hintereinander, wobei die nebeneinander liegenden Rohre als symmetrieähnlich angesehen werden, um die Rechenzeit nicht zu stark zu vergrößern (Abbildung 10).

Allerdings sieht die Rohroberfläche bereits nach wenigen Stunden deutlich verändert aus. Am Ende der Reisezeit hat die Belagsoberfläche nichts mehr mit einer Rohroberfläche zu tun (Abbildung 11).

Die Simulation wäre daher nicht aussagekräftig für das wirkliche Geschehen in einem Überhitzerbündel, wenn nicht auch der Belag berücksichtigt würde. Für die Simulation eines wachsenden Belages gibt es jedoch keine Standardlösungen. Durch eine aufwändige Verknüpfung der CFD-Simulation mit einer Gitteranpassung konnte eine Art

„morphing Mesh“ erreicht werden, mit dem das Wachstum des Belages in der CFD-Simulation abgebildet werden konnte (Abbildung 12). Die Ergebnisse der Simulationen decken sich erfreulich gut mit den in der Praxis gefundenen Geometrien.

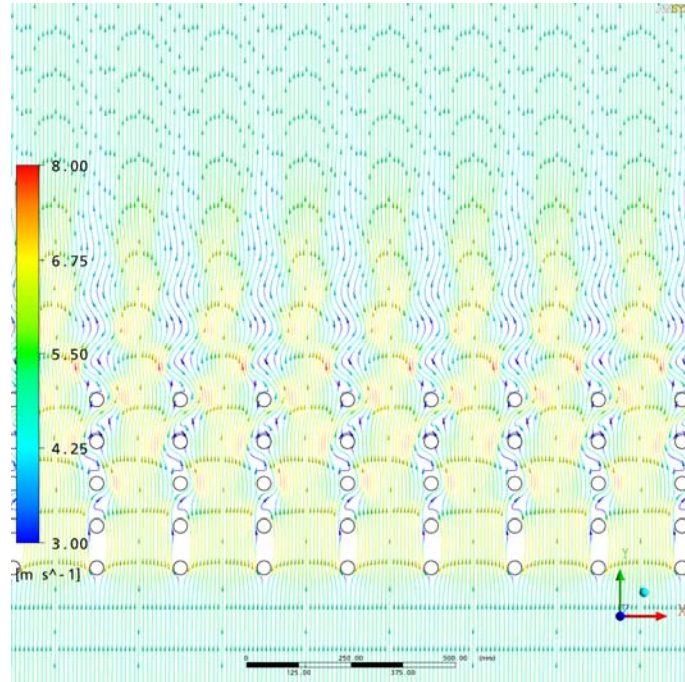


Abbildung 10: Simulation von 5 Rohrreihen hintereinander



Abbildung 11: Reale Beläge eines Überhitzers am Ende der Reisezeit

Referent: Dr.-Ing. Ragnar Warnecke, GKS | Vortrag: Entwicklungen zur Beschreibung der Geschwindigkeit der Hoch-Temperatur-Chlor-Korrosion

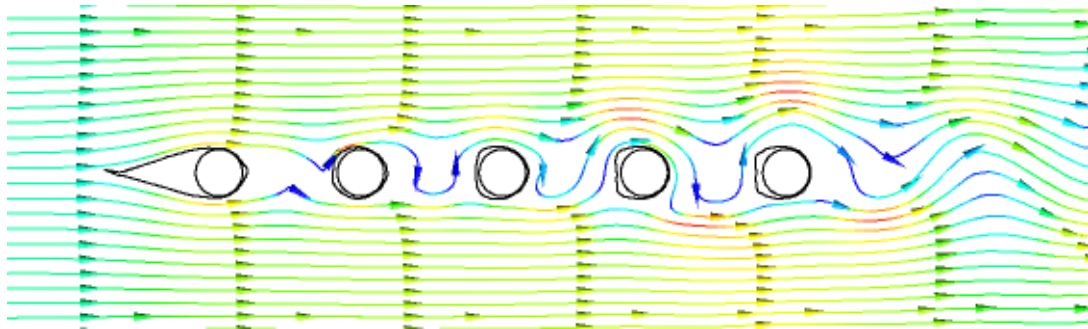


Abbildung 12: Einzelne Rohrreihe mit aufgebautem Belag

Der dynamische Aufbau der Beläge ist an den verschiedenen Rohren sehr unterschiedlich. Außerdem zeigen die Simulationen, dass die Aerosolfraktionen ebenfalls sehr unterschiedlich am Belagsaufbau teilnehmen. Um das zu verdeutlichen, zeigt Abbildung 13 den zeitlich aufgelösten Belagsaufbau. Einige ausgewählte Bilder sind in Abbildung 14 für die 1. Rohrreihe (1.RR) und in Abbildung 15 für die 2. Rohrreihe (2.RR) zusammengestellt. Zu beachten ist, dass zwischen den Abbildungen zur 1.RR und 2.RR ein Faktor 5 in der Skalierung der Mengen dargestellt ist.

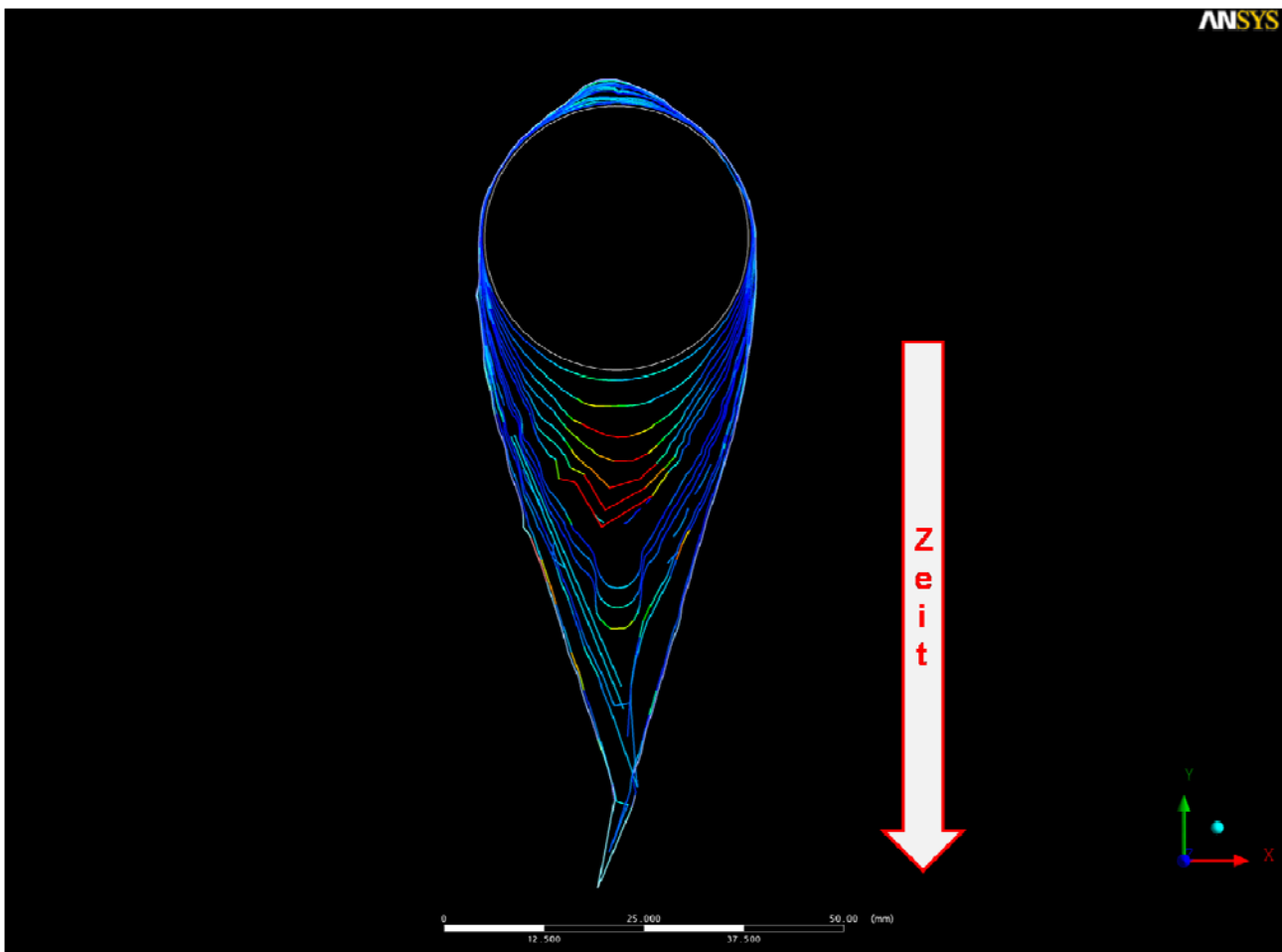


Abbildung 13: Vollständiger Belag eines Rohres der 1. Rohrreihe (1.RR) – die unterschiedlichen Linien verdeutlichen die Grenze des Belages nach einer bestimmten Zeit

Referent: Dr.-Ing. Ragnar Warnecke, GKS | Vortrag: Entwicklungen zur Beschreibung der Geschwindigkeit der Hoch-Temperatur-Chlor-Korrosion

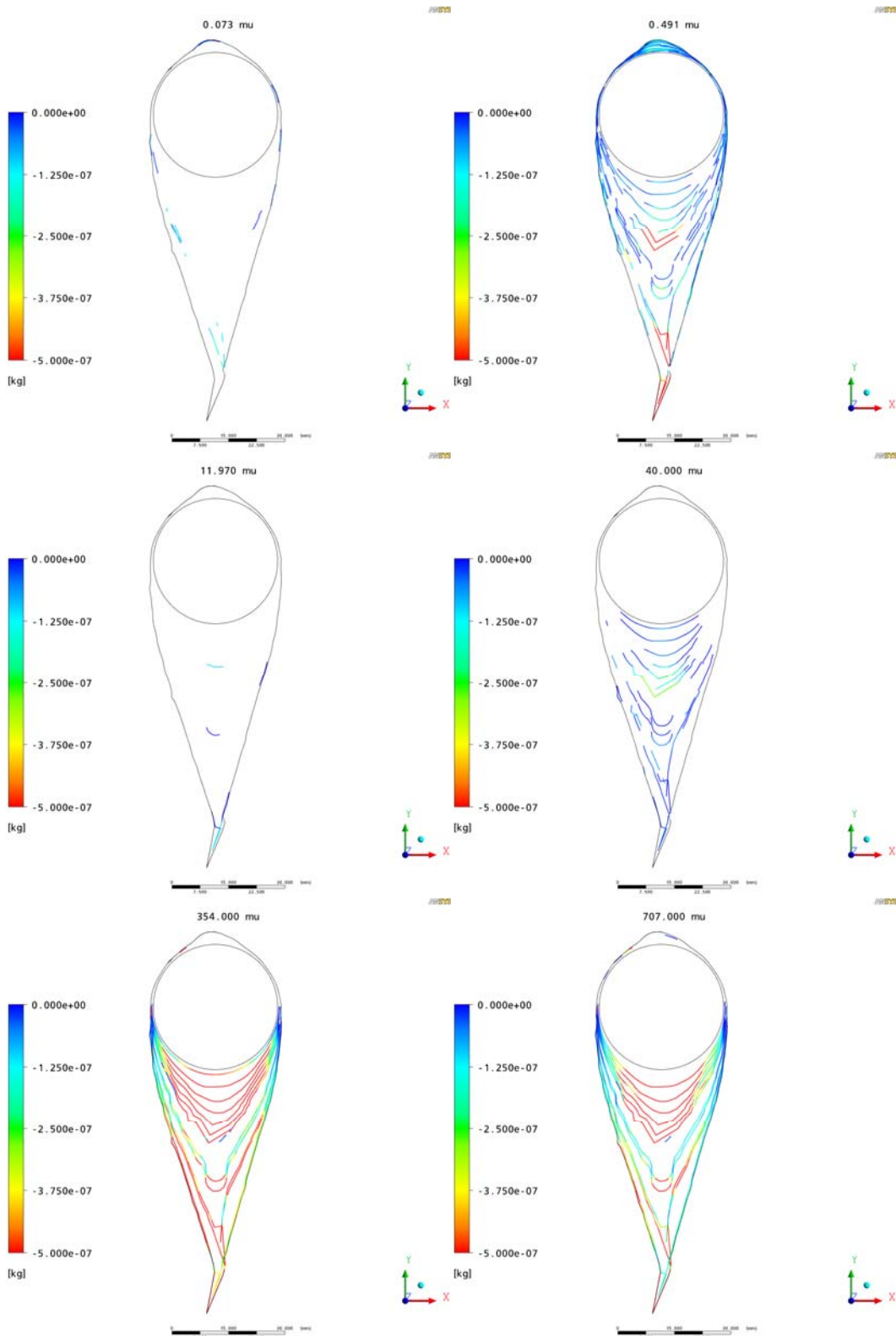


Abbildung 14: Beitrag der verschiedenen Aerosol-Fractionen (von 73 nm bis 707 μ m) am Belagsaufbau der 1. Rohrreihe jeweils in der Zeitentwicklung (Strömungsrichtung von unten nach oben)

Referent: Dr.-Ing. Ragnar Warnecke, GKS | Vortrag: Entwicklungen zur Beschreibung der Geschwindigkeit der Hoch-Temperatur-Chlor-Korrosion

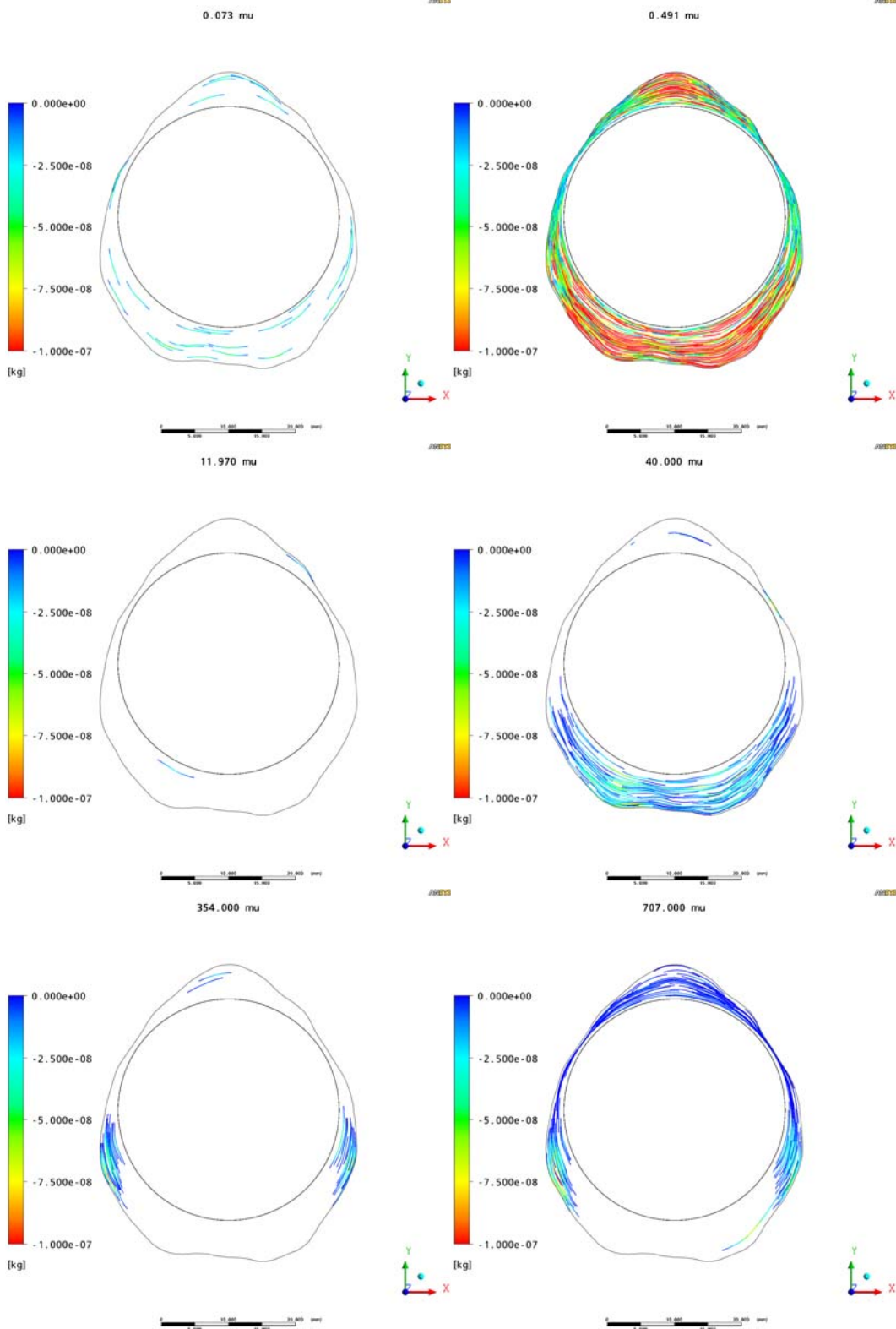


Abbildung 15: Beitrag der verschiedenen Aerosol-Fractionen (von 73 nm bis 707 μ m) am Belagsaufbau der 2. Rohrreihe jeweils in der Zeitentwicklung (Strömungsrichtung von unten nach oben)

Referent: Dr.-Ing. Ragnar Warnecke, GKS | Vortrag: Entwicklungen zur Beschreibung der Geschwindigkeit der Hoch-Temperatur-Chlor-Korrosion

Eindeutig lässt sich auch hier die bimodale Verteilung der Aerosole bei 500 nm und 350 µm erkennen (siehe auch Abbildung 16).

Die sehr kleinen Aerosole im Bereich kleiner 150 nm nehmen quasi nicht an der Belagsbildung teil. Gleiches gilt für den Bereich der mittelgroßen Aerosole um 1 µm bis 10 µm. Einerseits, weil die Abscheidemechanismen (Diffusion, Turbulenz und Thermophorese) nur eine geringe Reichweite haben, andererseits weil die Mengen gering sind. Für den Belag auf der Abströmseite sind die Aerosole um etwa 500 nm vorwiegend verantwortlich. Der immerhin geringe Beitrag der Klasse „707 µm“ für die 2.RR resultiert aus der Sedimentation weniger großer Partikel in den Zwischenräumen zwischen den Rohrreihen. Auffällig ist die besondere Abscheidung der Aerosole um 40 µm. Diese scheiden sich jeweils weit überwiegend auf der 0°-Position der Anströmseite der Rohre ab, dort, wo erfahrungsgemäß die Korrosion am höchsten ist. Hier könnte es sich um eine besonders beachtenswerte Gruppe von Aerosolen handeln. Den Hauptanteil an der Belagsbildung für die 1.RR haben die einige 100 µm-großen Partikel, während in der 2.RR die Nano-Aerosole den Hauptanteil beitragen.

Grundsätzlich zeigt sich in Abbildung 16, dass die bimodale Verteilung der Aerosole nicht unbedingt der Verteilung der Belags-bildenden Aerosole entspricht. Somit liefert die hier vorgestellte Untersuchung weiterführende Erkenntnisse zum Verständnis der Korrosionsvorgänge.

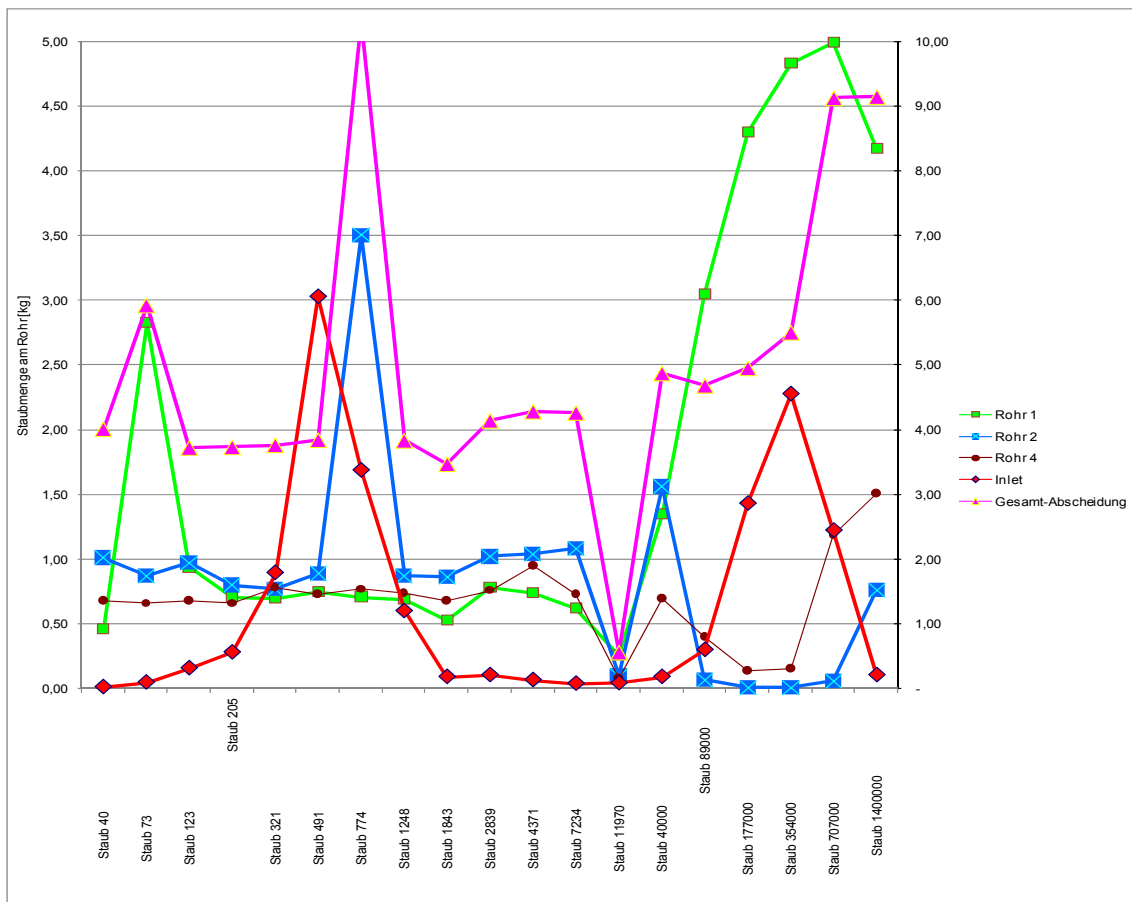


Abbildung 16: Staubmengen und Abscheidemengen nach Aerosolklassen

Referent: Dr.-Ing. Ragnar Warnecke, GKS | Vortrag: Entwicklungen zur Beschreibung der Geschwindigkeit der Hoch-Temperatur-Chlor-Korrosion

Interessante Eindrücke liefert auch die detailliertere Darstellung der zeitlichen Abscheidung der Aerosole. Dazu sind für die 1.RR die größeren Aerosole in Abbildung 17 und für die 2.RR die kleineren in Abbildung 18 dargestellt. Es ist eine merkbliche Fluktuation der Abscheidung über der Zeit zu erkennen.

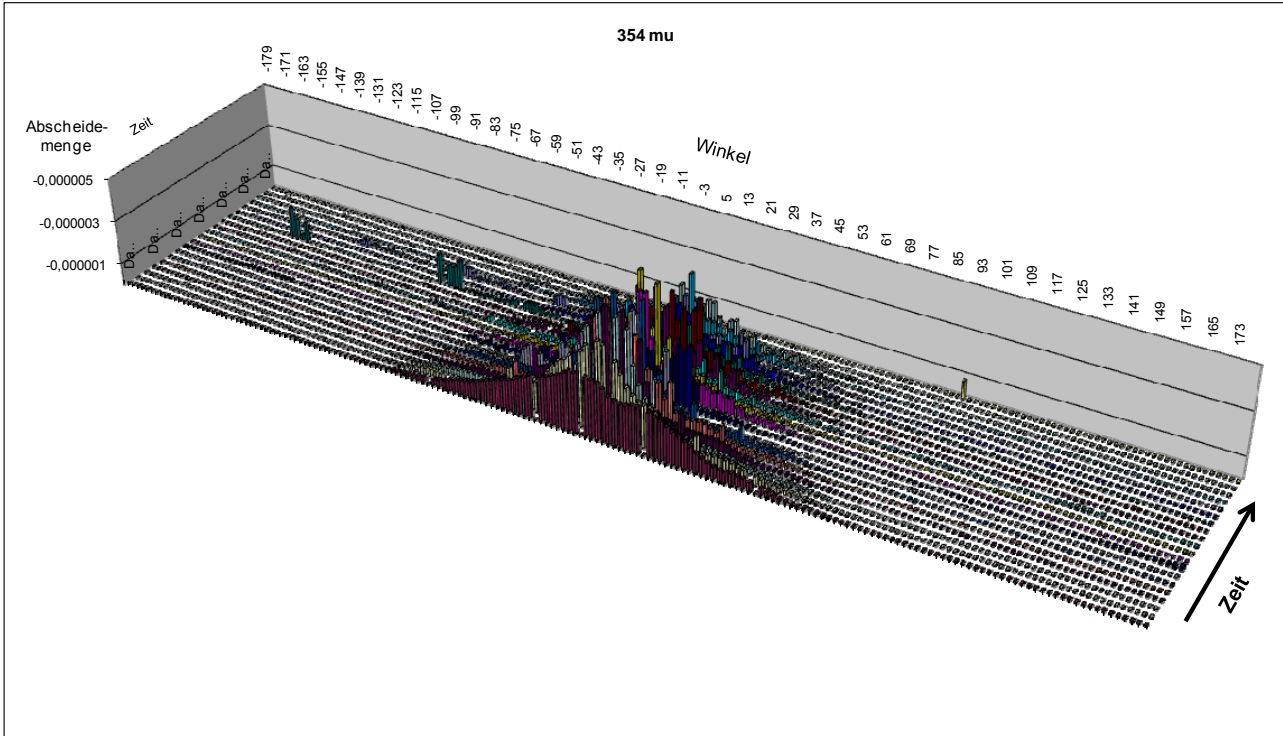


Abbildung 17: Aerosol-Klasse 354 µm der 1.RR

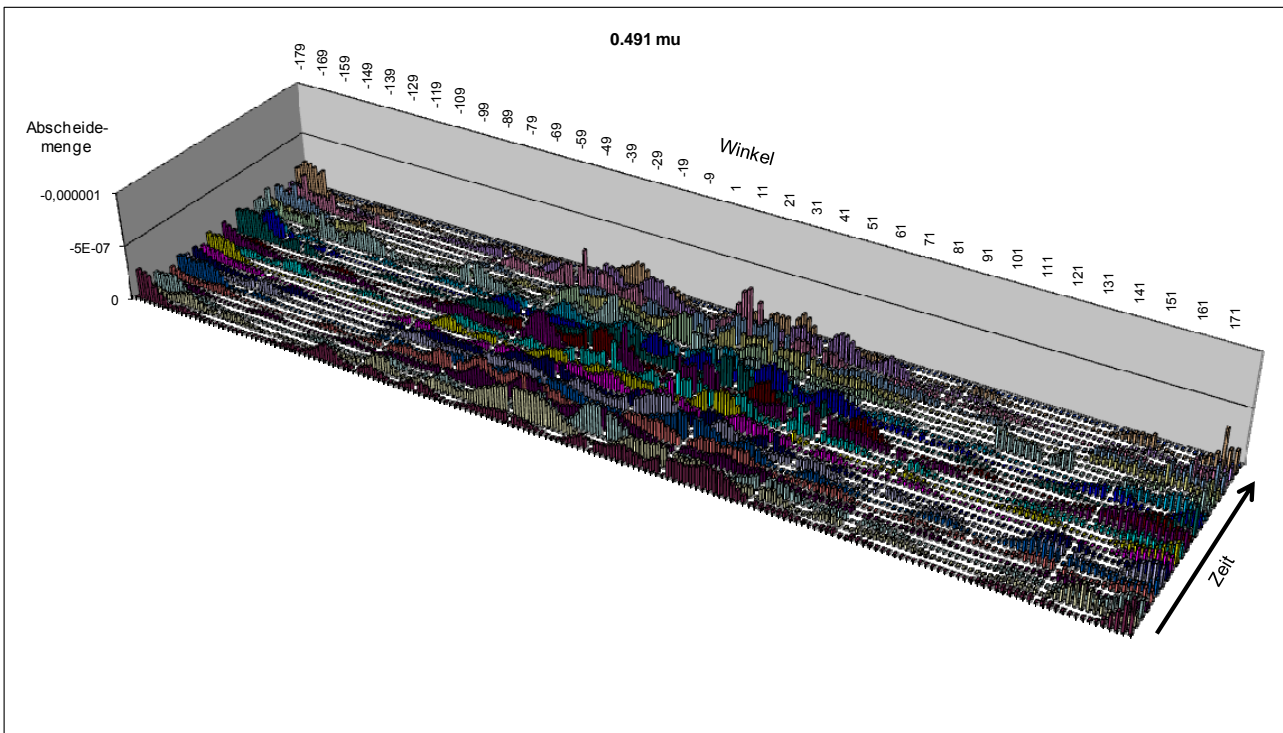


Abbildung 18: Aerosol-Klasse 0,491 µm der 2.RR

Referent: Dr.-Ing. Ragnar Warnecke, GKS | Vortrag: Entwicklungen zur Beschreibung der Geschwindigkeit der Hoch-Temperatur-Chlor-Korrosion

Bei den großen Aerosolen der 1.RR ist zunächst eine breitere Verteilung über dem anströmseitigen Umfang des Rohres zu sehen. Nach einer Grundverschmutzung nimmt die Abscheidung auf der 0°-Position zu, um dann gegen Ende der Reisezeit insgesamt abzunehmen. Letzteres lässt sich aus der immer stromlinienförmigeren Form des Belages und damit geringeren Neigung sich abzuschneiden ableiten.

Demgegenüber ist für die 2.RR keine einheitliche Tendenz feststellbar: Es findet eine an- und abströmseitig ausgeprägte Abscheidung statt, während auf den Rohrflanken (+/- 90°) eher wenig abgeschieden wird.

Dass sich tatsächlich die unterschiedlichen Partikel am Rohr abscheiden, demonstriert eine Messung auf einem definierten Substrat (Abbildung 19).

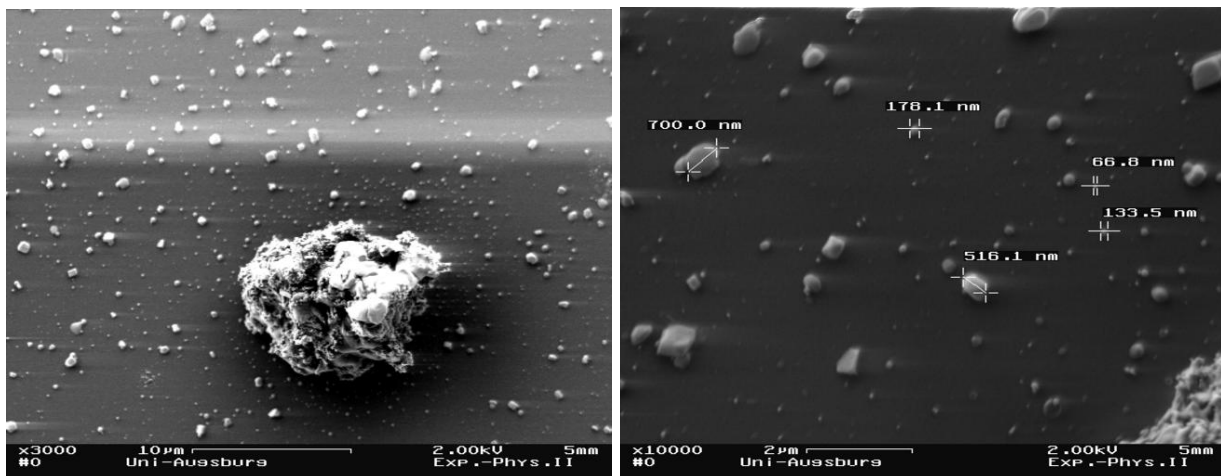


Abbildung 19: Abgeschiedene und vermessene Aerosole

4. Interpretationsansätze

Die Berücksichtigung der Elementen-Zusammensetzung der Aerosole im 2. bzw. 3. Zug (Abbildung 20 und Abbildung 21) führt zu interessanten Auffälligkeiten.

Da die Geometrie der Beläge aus den Simulationen sehr gut mit den Geometrien der Beläge aus der Praxis übereinstimmen, kann zunächst davon ausgegangen werden, dass die Simulationen eine ausreichend gute Nachbildung der Realität darstellt.

Die kleinen Aerosole, die zu einem besonders hohen Anteil aus Chlor bestehen, lagern sich auf der Abströmseite an. Gleichzeitig wird dort im analysierten Belag nur sehr wenig Chlor gefunden (Abbildung 22). Das unterstützt die Vorstellung, dass kleine Partikel auch gut chemisch reagieren können und dass Chlor im Belag freisetzen. Gleichzeitig ist im Allgemeinen die Abströmseite weniger stark von Korrosion betroffen als die Anströmseite (insbesondere gilt dies für die 1.RR). Somit scheint die Sulfatierung/Oxidierung von Chloriden auf der Abströmseite besonders gründlich zu funktionieren ohne das Chlor am Rohr oder im Belag zu halten. Möglicherweise unterscheidet sich hier die Struktur des Belages zwischen An- und Abströmseite signifikant und führt zu einem unterschiedlichen Verhalten bezüglich der Korrosion. Weiterhin sind gerade die chlorhaltigen kleinen Aerosole wenig an der Bildung der Beläge auf der korrosionsgefährdeten Anströmseite beteiligt. Demgegenüber haben die großen Partikel, welche an der Bildung der Beläge auf der Anströmseite überwiegend beteiligt sind, zum Einen weniger Chlor und zum Anderen

im Hinblick auf den Stofftransport eine starke kinetische Hemmung zur Umwandlung der Chloride in ihrem Innern, so dass lediglich auf ihrer Oberfläche kondensierte Alkali-Chloride eine leichte Chlorfreisetzung zulassen. Besonders bemerkenswert ist der Anteil der mittelgroßen Aerosole um etwa 40 µm. Diese lagern sich genau im Bereich der erhöhten Korrosion ab, enthalten „mittelviel“ Chlor und sind gerade noch so klein, dass mit einem Umsatz (aus stofftransport-kinetischer Sicht) ihrer Chloride gerechnet werden kann. Diese dürften auf ihrer Entwicklungsgeschichte keine großen Primärpartikel sein, aber auch keine einfachen Sekundärpartikel. Möglicherweise sind sie Agglomerate aus kleineren Aerosolen.

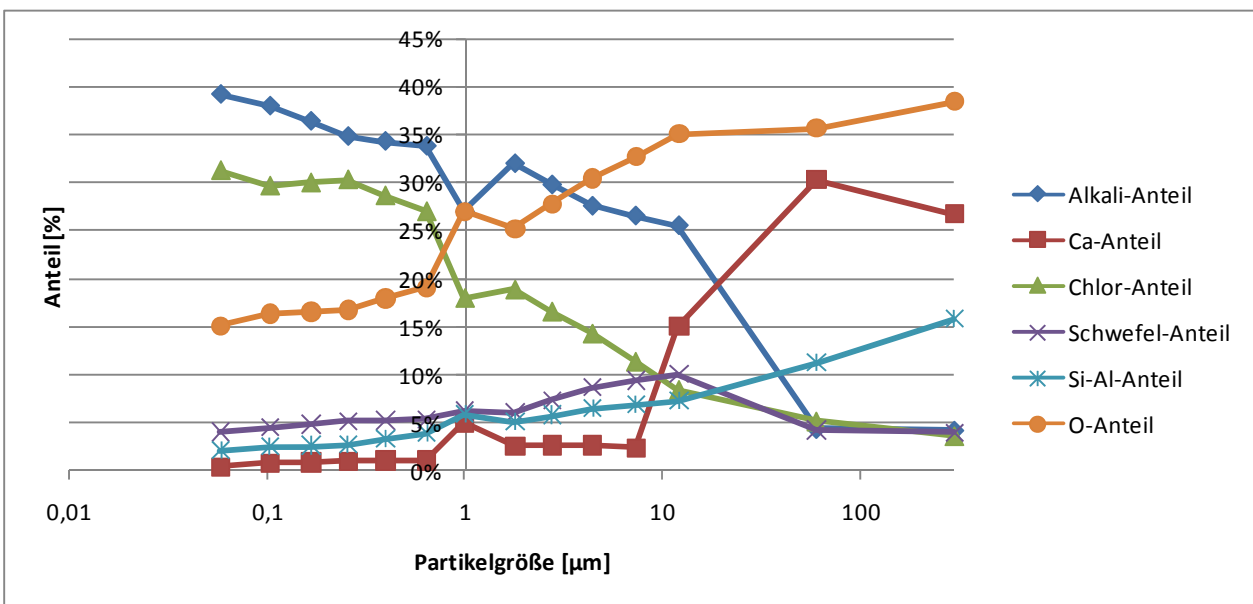


Abbildung 20: Elementverteilung der Aerosolclassen des 2. Zuges

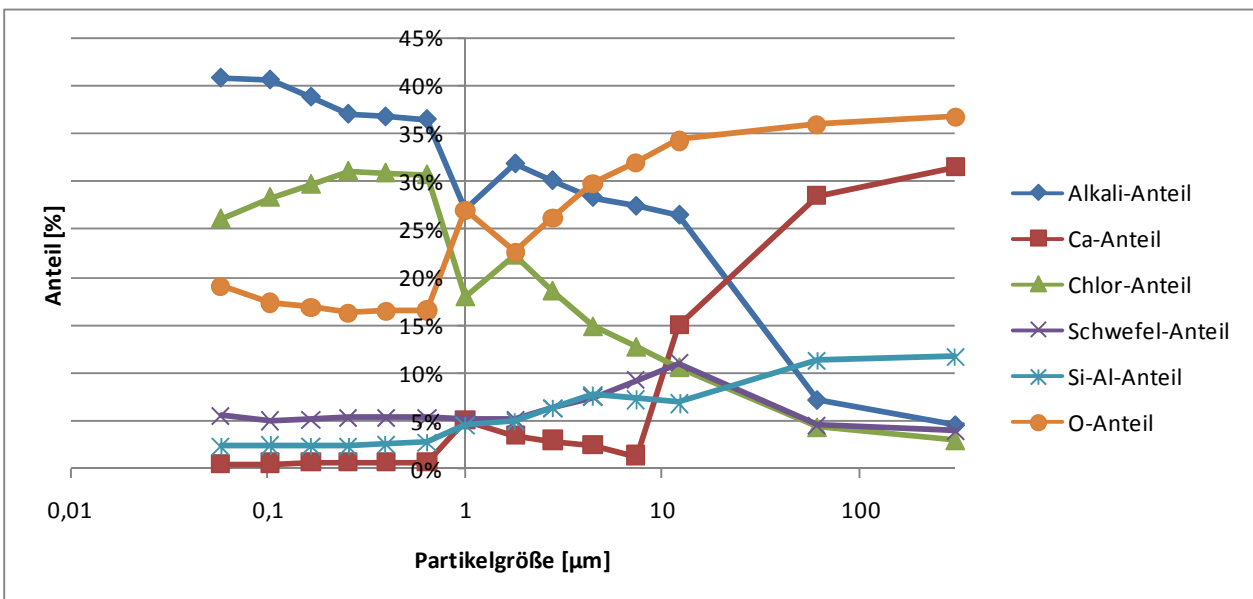


Abbildung 21: Elementverteilung der Aerosolclassen des 2. Zuges

Referent: Dr.-Ing. Ragnar Warnecke, GKS | Vortrag: Entwicklungen zur Beschreibung der Geschwindigkeit der Hoch-Temperatur-Chlor-Korrosion

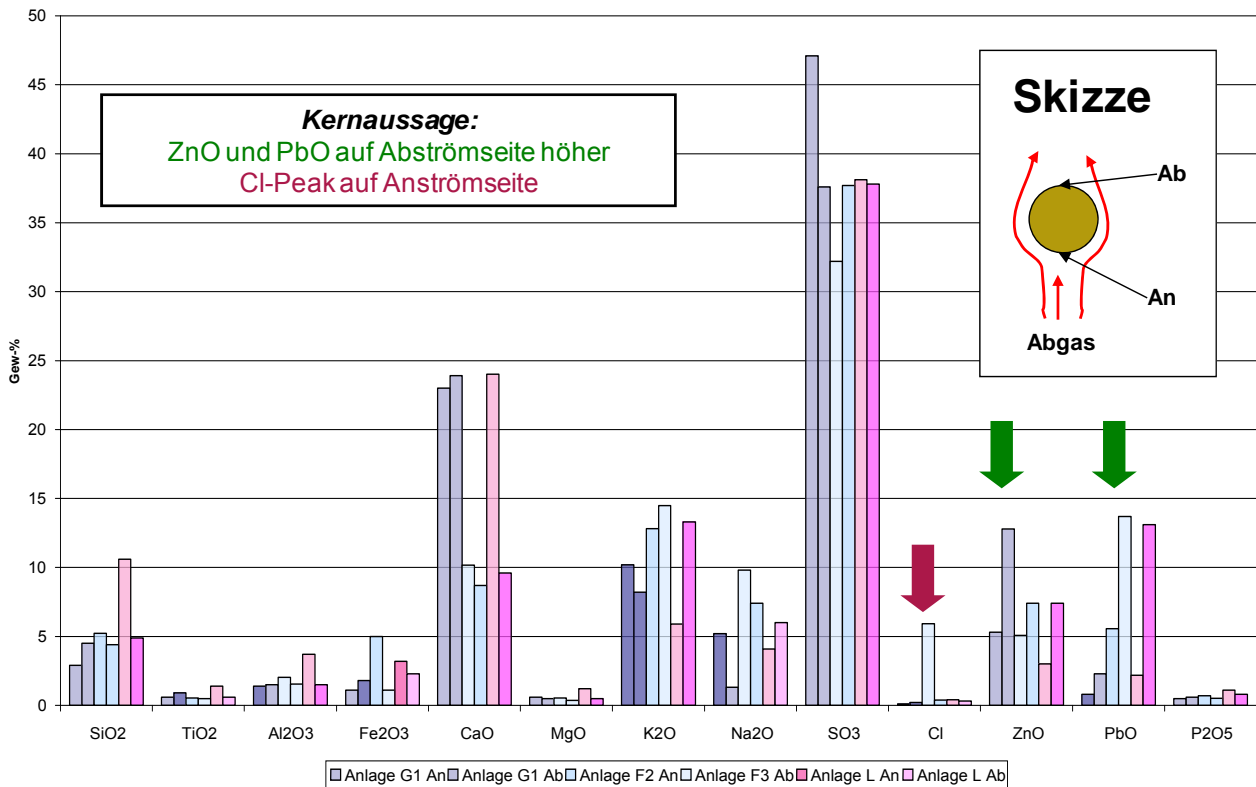


Abbildung 22: Analyse von An- und Abströmseite jeweils eines Überhitzer-Rohres aus unterschiedlichen Anlagen [Harpeng, 2003]

5. Zusammenfassung und Ausblick

Mit den hier vorgestellten Arbeiten wird der Zusammenhang zwischen dem Antransport der Chlor-haltigen Aerosolfracht mit dem Rauchgas und der potentiellen Chlor-Bereitstellung am Korrosionsort hergestellt. Obwohl bisher noch nicht alle physikalischen Effekte vollständig berücksichtigt werden konnten, zeigt sich eine gute Übereinstimmung der simulierten Belagsbildung mit den in der Praxis beobachteten Belagsstrukturen. Die Analyse der Abscheidung der Aerosole zeigt eine von der grundsätzlich im Rauchgas vorhandenen Verteilung der Aerosol-Größenklassen abweichende Abscheide-Verteilung. Sie ist durch die unterschiedlichen Ablagerungsmechanismen bestimmt. Grundsätzlich kann Folgendes beobachtet werden:

- 1. Rohrreihe:
 - auf der Anströmseite führen vorwiegend die großen, chlorarmen Aerosole zur Belagsbildung;
 - etwas chlorreichere mittelgroße Aerosole lagern sich bevorzugt im korrosionsstarken Bereich der Anströmseite ab;
 - chloridreiche Aerosole stellen den weitüberwiegenden Anteil der Beläge auf der korrosionsarmen Abströmseite

- 2. Rohrreihe (und ähnlich auch die nachfolgenden Rohrreihen):
 - Die Hauptabscheideleistung auf An- und Abströmseite wird durch die kleinen, chlorreichen Aerosole bestritten
 - An den Flanken werden bevorzugt die großen Aerosole abgeschieden

Um den definitiven Beitrag der jeweiligen Aerosolkategorie abschließend quantifizieren und dies auch gegen den Einfluss der kondensierbaren Rauchgasbestandteile abgrenzen zu können, müssen einerseits noch die Kondensation auf Oberflächen im Programm implementiert werden und andererseits noch Transport –und Chemie-kinetische Daten über die Aerosole gewonnen werden. Dazu müssen auch noch Arbeiten zur genaueren Beschreibung der Struktur der Partikel sowie der Agglomeration der Aerosole im Rauchgasstrom erfolgen.

Zusammenfassend werden in diesem Themenbereich die folgenden Aufgaben in der nächsten Zeit bearbeitet:

- 1) CFD-Simulation:
 - a. Kondensation von gasförmigen Chloriden auf Oberflächen
 - b. Agglomeration von Aerosolen im Rauchgas
 - c. Nähere Abschätzung des Einflusses von Elektrophorese
- 2) Aerosolcharakterisierung:
 - a. Vergleich der Kondensations- und Nicht-Kondensations-behafteten Aerosolprobenahmen
 - b. IACM-Messungen zur Bestimmung der kondensierbaren Alkali-Chloride
 - c. Ultra-Kurzzeit-Aerosolprobenahmen zur Aerosolstrukturanalyse und zu den Hafteigenschaften
- 3) Kinetik:
 - a. Vermessung der Kinetik Sulfatierung von unterschiedlich großen (Erd)-Alkali-Chlorid-Partikeln
 - b. Laborexperimente mit der Korrosionssonde

6. Danksagung

Ein Teil dieser Arbeiten entstand im Rahmen des vom bayerischen Staatsministerium und der EU geförderten Projektes EFRE-Korr. Insbesondere die Simulationen wurden im Rahmen des von der EU geförderten Projektes NextGenBioWaste erarbeitet. Die Autoren danken dem bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz und der Europäischen Union für die finanzielle Unterstützung, ohne die diese Arbeiten unmöglich gewesen wären.

7. Literatur

[Benker, 2005] BENKER, B.; HARPENG, J.; WARNECKE, R.: Deposition und Permeation. In: VDI-Wissensforum (Hrsg.): *Beläge und Korrosion in Großfeuerungsanlagen beim Einsatz Heizwert- und Schadstoffreicher Fraktionen – Seminar am 14.-15. Juni 2005 in Hannover*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2005

[Harpeng, 2003] HARPENG, J.; WARNECKE, R.: Aussagekraft der Analysen von Belagsproben aus MVA-Kesseln. In: VDI-Wissensforum (Hrsg.): *Beläge und Korrosion in Großfeuerungsanlagen beim Einsatz Heizwert- und Schadstoffreicher Fraktionen – Seminar am 23.-24. Juni 2003 in Göttingen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003

[Horn, 2009] HORN, S.; HAIDER, F.; MAISCH, S.; WARNECKE, R.: Quantifizierte Betrachtung des Stoffübergangs in Belägen und Korrosionsschichten zur Beschreibung der Korrosionsgeschwindigkeit – Teil 2. In: VDI-Wissensforum (Hrsg.): *Feuerung und Kessel - Beläge und Korrosion in Großfeuerungsanlagen – Fachkonferenz am 23.-24. Juni 2009 in Stuttgart*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2009

[Oberberger, 2004] OBERBERGER, I.: Deposition und Korrosion in Biomassefeuerungen. In: VDI-Wissensforum (Hrsg.): *Beläge und Korrosion in Großfeuerungsanlagen – Seminar am 04.-05. Mai 2004 in Göttingen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2004

[Warnecke, 2006] WARNECKE, R.: Stand der Forschung und der Praxiserkenntnisse für die HT-Chlor-Korrosion. In: VDI-Wissensforum (Hrsg.): *Beläge und Korrosion, Verfahrenstechnik und Konstruktion in Großfeuerungsanlagen – Seminar am 25.-26. April 2006 in Würzburg*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2006

[Warnecke, 2008] WARNECKE, R.; DEUERLING, C.; HAIDER, F.; HORN, S.; MAGUHN, J.; MÜLLER, V.; NORDSIECK, H.; WALDMANN, B.; ZIMMERMANN, R.: Chlorhaltige Ersatzbrennstoffe und deren Auswirkung auf den Kessel. In: VDI-Wissensforum (Hrsg.): *Technikforum – Ersatzbrennstoffe für Industrieanlagen – Seminar am 28.-29. April 2008 in Berlin*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2008