

# **Einfluss physikalischer Effekte auf die Hochtemperatur-Chlor-Korrosion (von Überhitzern in MVA, BVA, EVA etc.)**

R. Warnecke<sup>1</sup>; V. Müller<sup>1</sup>; F. Haider<sup>2</sup>; S. Horn<sup>2</sup>; S. Maisch<sup>2</sup>; H. Nordsieck<sup>3</sup>; M. Weghaus<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH, Hafenstraße 30, 97424 Schweinfurt

<sup>2</sup>Universität Augsburg, Institut für Physik, Universitätsstraße 1, 86135 Augsburg

<sup>3</sup>BifA GmbH, Am Mittleren Moos 46, 86167 Augsburg

<sup>4</sup>Weghaus GmbH, Kirchstr. 11, 97297 Waldbüttelbrunn

## **1. Grundlegende Überlegungen**

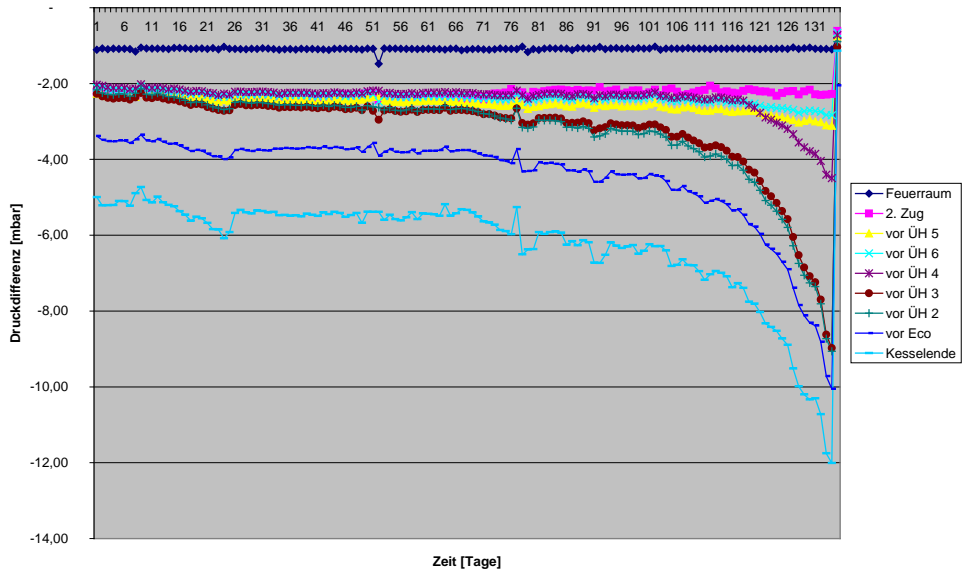
Die Wirtschaftlichkeit von Großfeuerungsanlagen mit heterogenen Brennstoffen, d.h. im Wesentlichen Müll-, Biomasse- und Ersatzbrennstoff-Verbrennungsanlagen, ist zu einem nicht unbedeutenden Teil von der Verfügbarkeit von Feuerung und Kessel bestimmt. Diese wiederum werden einerseits besonders durch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

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).

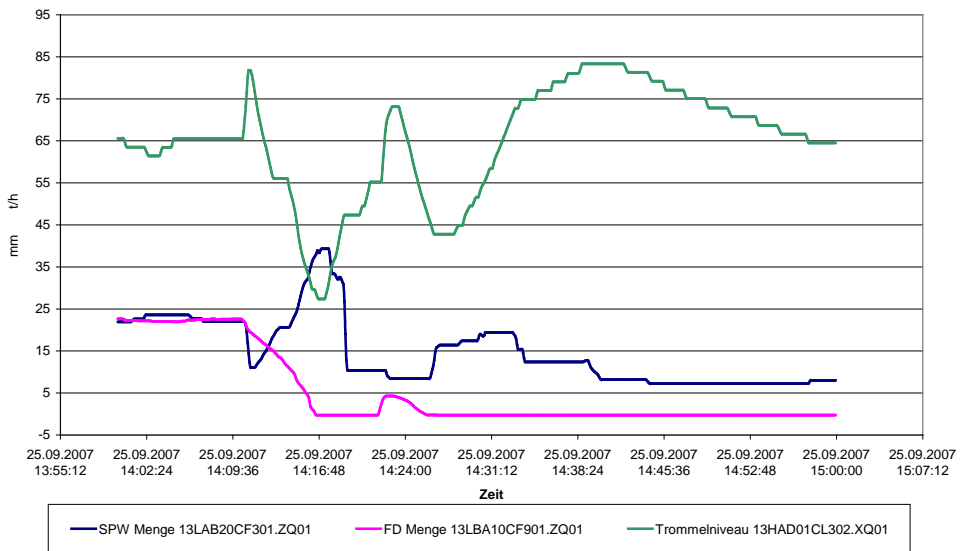
Grundsätzlich ergibt sich also die Problematik der Korrosion durch die Kombination von Rohrwerkstoff und Chloriden.

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 dieser Untersuchungen so gut wie keine Informationen vor. Für Biomasse hatte sich die Gruppe um Obernberger [Obernberger,

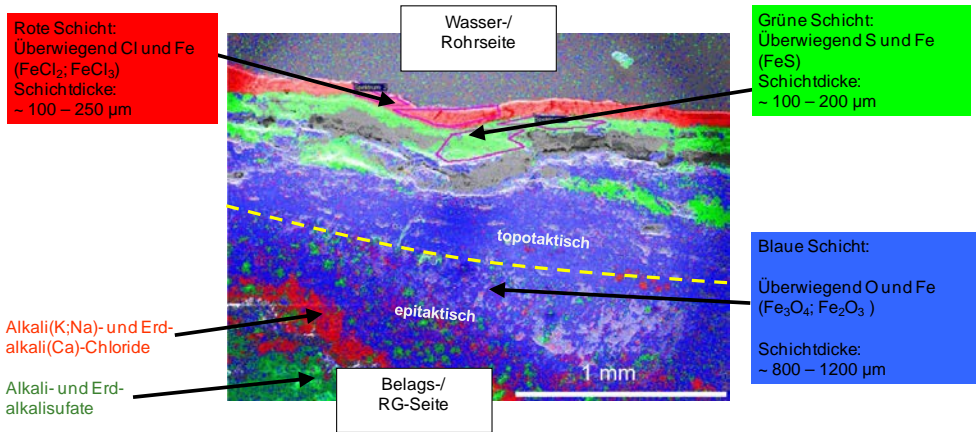
2004] und für Müll [Warnecke, 1999] bereits begonnen sich mit dieser Thematik zu beschäftigen.



**Abbildung 1:** Reisezeit-begrenzender Druckanstieg in Feuerung und Kessel

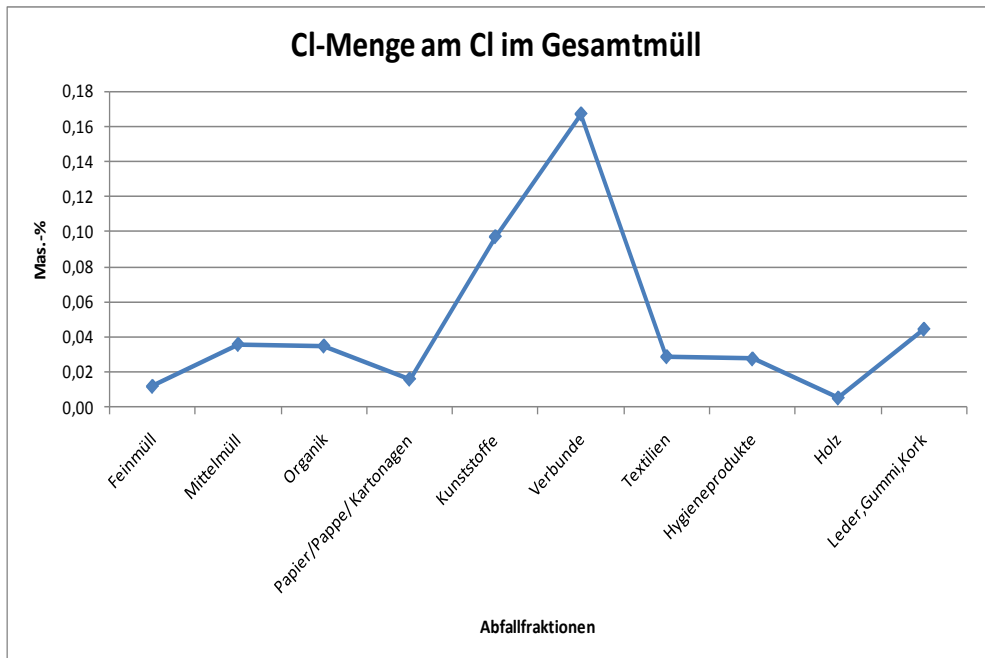


**Abbildung 2:** Eintritts eines Korrosionsschadens: Dokumentation mittels Wasserdampf-Kreislauf (Speisewasser-Menge und Frischdampf-Menge in t/h; Trommelwasserstandniveau in mm)



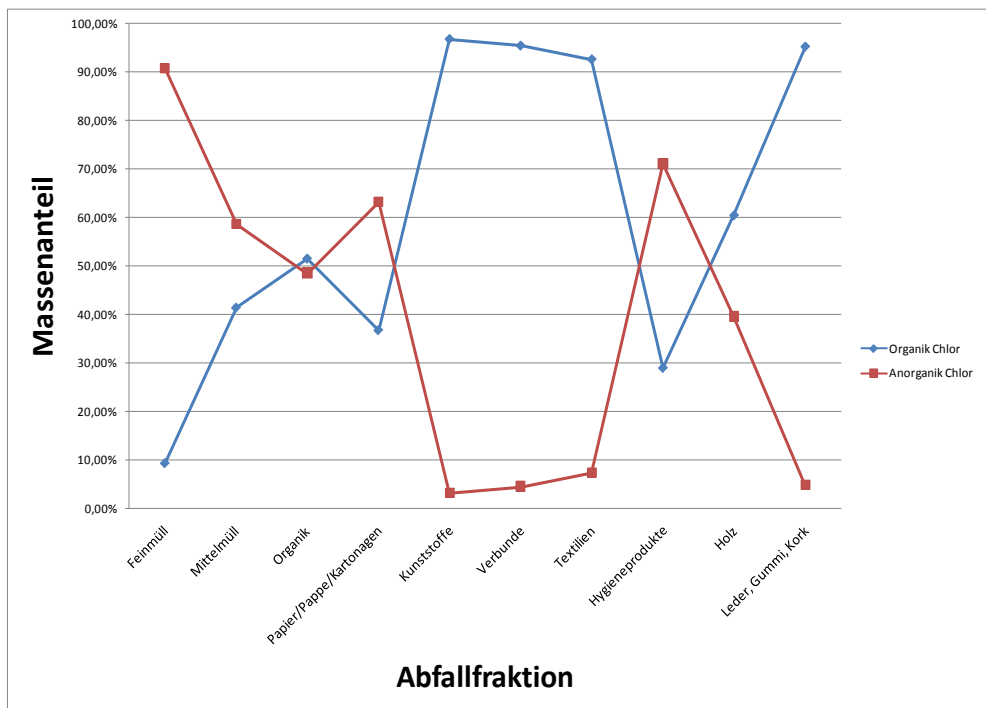
**Abbildung 3:** Korrosionsfront mit den beteiligten chemischen Elementen

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 % in der Feuerung freigesetzt werden; rund 10 % verbleiben in der Schlacke.



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

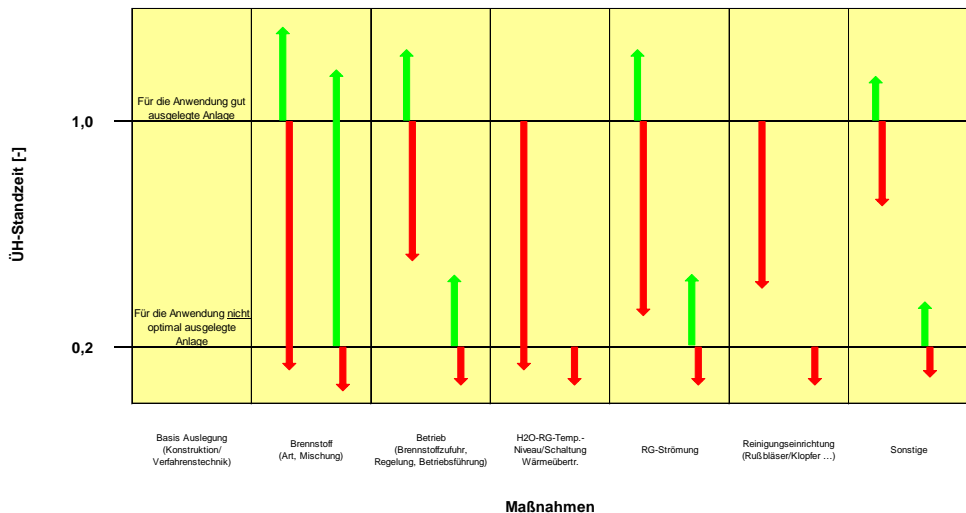
Allerdings sind die Bindungsformen des Chlors im Brennstoff sehr unterschiedlich. Abbildung 5 zeigt die Anteile des Chlors nach ihren organischen und anorganischen Bindungspartnern. Derzeit wird davon ausgegangen, dass organisches Chlor bei den sehr hohen Temperaturen in der Feuerung in die Gasphase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



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

Klar ist, dass diese Freisetzung der Chloride grundsätzlich in allen Feuerungen vonstattengeht. Im Detail werden sich aber Feuerung und Kessel unterscheiden und z.B. jeweils für unterschiedliche Brennstoffe geeignet sein oder eben nicht. Prinzipiell kann also davon ausgegangen werden, dass die Grundausslegung von Feuerung und Kessel einen wesentlichen Teil im Bezug auf die Standzeit der Wärmeübertrager, insbesondere Überhitzer, beiträgt. Ferner sind aber auch andere Einflussgrößen, insbesondere im Kessel, von großer Wichtigkeit im Hinblick auf die Korrosion (Abbildung 6). Wie groß der Einfluss im Einzelnen ist, kann derzeit nur bei einzelnen Maßnahmen direkt quantifiziert werden. Um eine genauere Quantifizierung, insbesondere des Einflusses der Basis-Auslegung, vornehmen zu können, ist es notwendig, mehr über das Verhalten der Partikel zu gewinnen. Einerseits dient dazu die Beschreibung des Verhaltens der Partikel auf dem

Weg zum Überhitzer, über das bereits einiges in den Veröffentlichungen der VDI-Korrosionstagung berichtet wurde. Im Folgenden soll die Abscheidung der unterschiedlichen Partikel am Überhitzer untersucht werden.

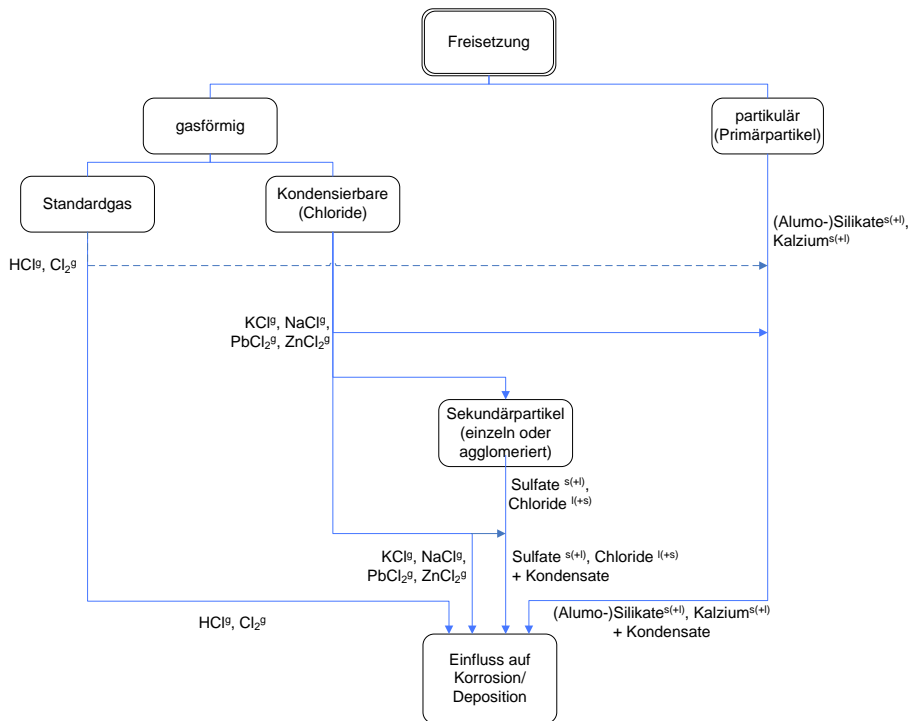


**Abbildung 6:** Tendenzielle Darstellung von verfahrenstechnischen und konstruktiven Maßnahmen im Bezug auf die Veränderung der Standzeit von Überhitzern

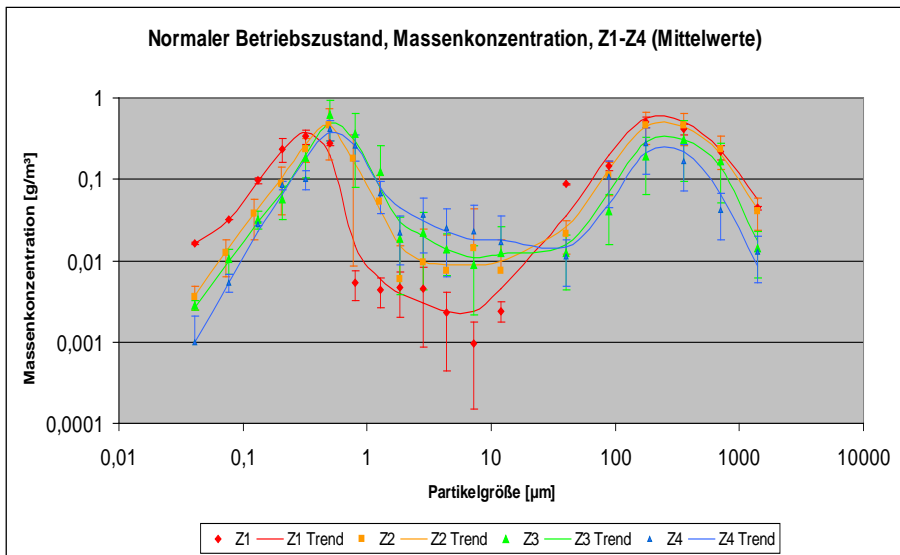
## 2. Mechanismen der Belagsbildung von Aerosolen

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 7. 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 Partikelphase zum bzw. um die Rohre liegen.

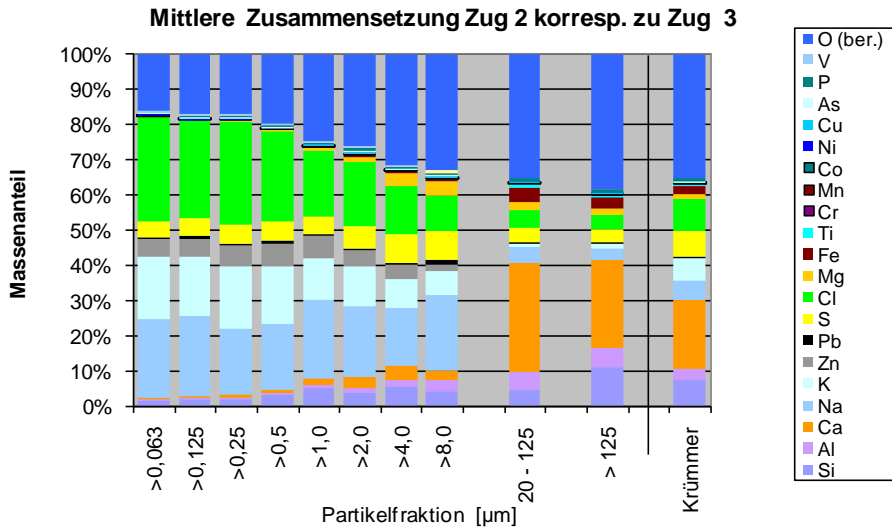
In den vergangenen Jahren sind zahlreiche Messungen von GKS in der MVA durchgeführt worden, in denen die Partikelgrößenverteilungen und deren jeweilige chemische Zusammensetzung ermittelt wurden (Abbildung 8 und Abbildung 9). Hierbei ist zu bedenken, dass die Partikel des kleinen Maximums zumindest im 1. und 2. Zug überwiegend noch nicht als Partikel vorliegen, da sie erst auf Grund der Probenahme kondensieren. Im 3. Zug vor den Überhitzern ist jedoch der Anteil der Kondensierbaren nur noch sehr gering, so dass mit den gemessenen Daten weitergerechnet werden kann. Dies gilt auch für die chemische Zusammensetzung.



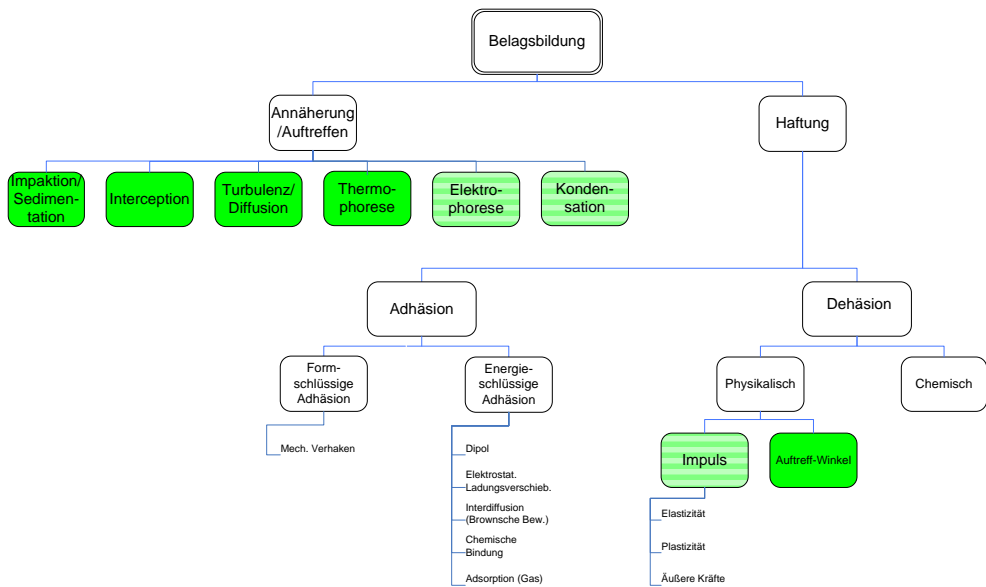
**Abbildung 7:** Chlorphasen von der Freisetzung aus dem Brennbett bis zur Deposition auf dem Rohr bzw. Belag



**Abbildung 8:** Partikelverteilung in den Zügen 1 (Z1) bis 4 (Z4) des GKS



**Abbildung 9:** Elementarzusammensetzung der verschiedenen Partikelklassen



**Abbildung 10:** Mechanismen der Belagsbildung

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.

Eine eingehende Analyse der Mechanismen führte zur Übersicht in Abbildung 10. 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 nur wenige quantifizierbare Aussagen. Allgemein wird jedoch angenommen, dass die Ladungsreichweite von Aerosolen im Kessel in dem hier betrachteten Temperaturbereich gering ist bzw. nicht vorhanden ist [IUTA, 2006]. Im Strömungssimulations(CFD)-Programm „CFX“ sind die genannten physikalischen Mechanismen implementiert (die in Abbildung 10 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 noch 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 die Kondensationsmenge erfasst. 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 – 50 % 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 Kleben führen, während das weit überwiegende Partikel aus nicht schmelzendem Material besteht [Horn, 2009]. Es 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 von 0° noch zu 10 % abgeschieden werden und die Haftung gemäß einer Normalverteilung 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 Partikelabscheidung mit dem Programm beschrieben werden.

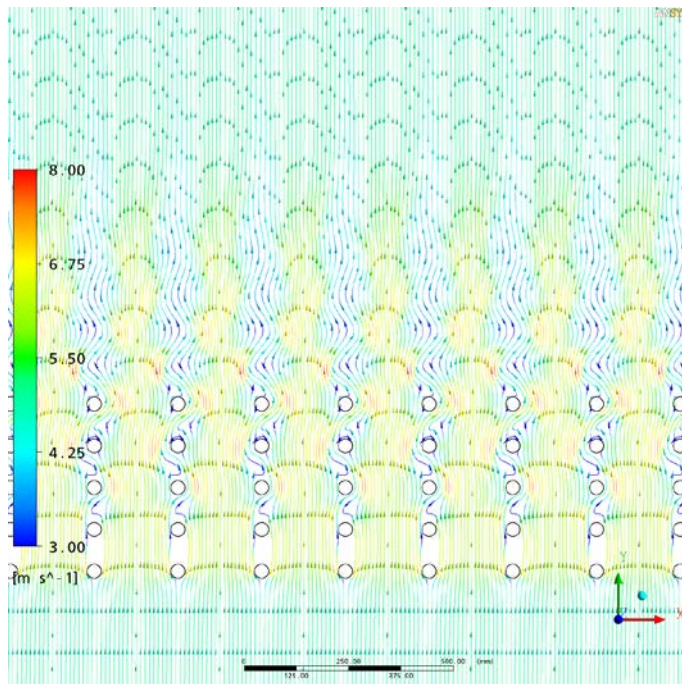
### 3. Simulationsergebnisse

Die Simulation erfasst 5 Rohrreihen hintereinander, wobei die nebeneinander liegenden Rohre als symmetrieähnlich angesehen werden, um die Rechenzeit nicht zu stark zu vergrößern (Abbildung 11).

Allerdings sieht die Rohroberfläche gegenüber dem „jungfräulichen“ Ausgangszustand bereits nach wenigen Stunden deutlich verändert aus. Am Ende der Reisezeit hat die Belagsoberfläche nichts mehr mit einer Rohroberfläche zu tun (Abbildung 12).

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 13).

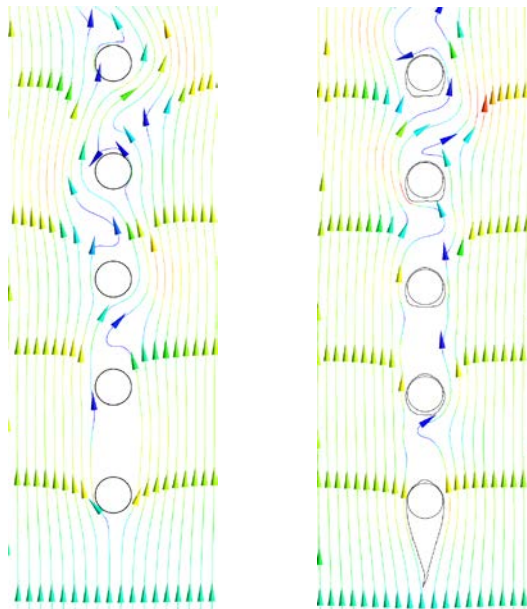
Die Ergebnisse der Simulationen decken sich erfreulich gut mit den in der Praxis gefundenen Geometrien.



**Abbildung 11:** Simulation von 5 Rohrreihen hintereinander



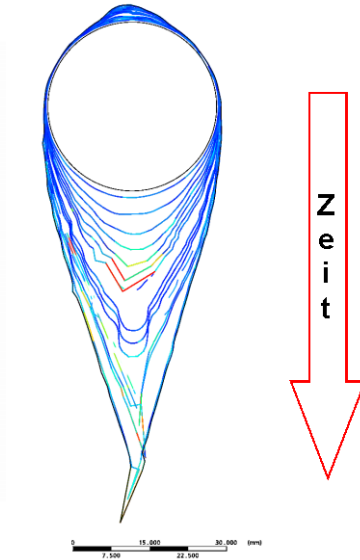
**Abbildung 12:** Reale Beläge eines Überhitzers am Ende der Reisezeit



**Abbildung 13:** Einzelne Rohrreihe blank und mit aufgebautem Belag

Der dynamische Aufbau der Beläge ist an den verschiedenen, hintereinander liegenden Rohren sehr unterschiedlich. Außerdem zeigen die Simulationen, dass die

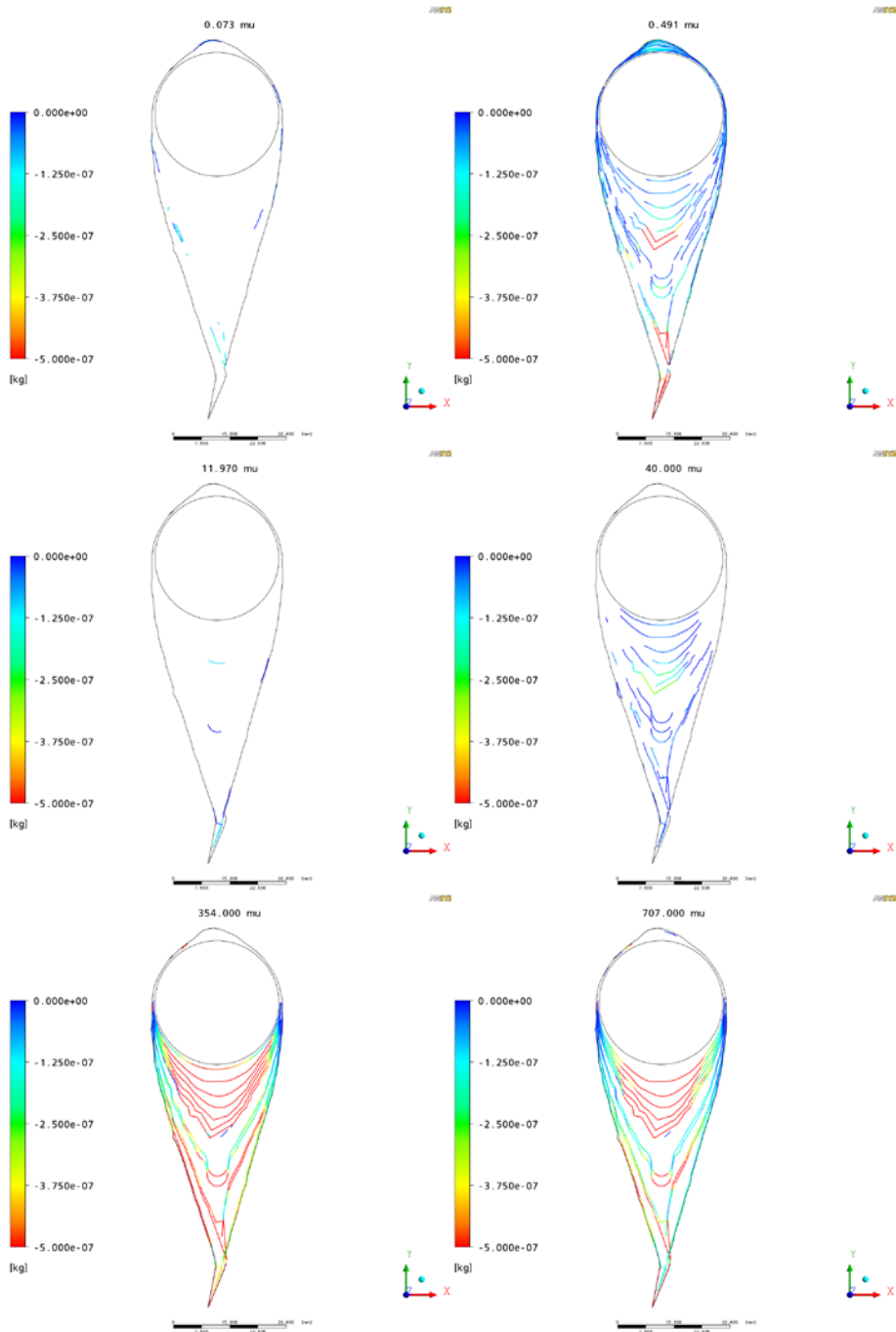
Aerosolfractionen ebenfalls sehr unterschiedlich am Belagsaufbau teilnehmen. Um das zu verdeutlichen, zeigt Abbildung 14 den zeitlich aufgelösten Belagsaufbau. Einige ausgewählte Bilder sind in Abbildung 15 für die 1. Rohrreihe (1.RR) und in Abbildung 16 für die 2. Rohrreihe (2.RR) zusammengestellt. Zu beachten ist, dass zwischen den Abbildungen zur 1.RR und 2.RR ein Faktor 5 in der Skalierung der Mengen dargestellt ist.



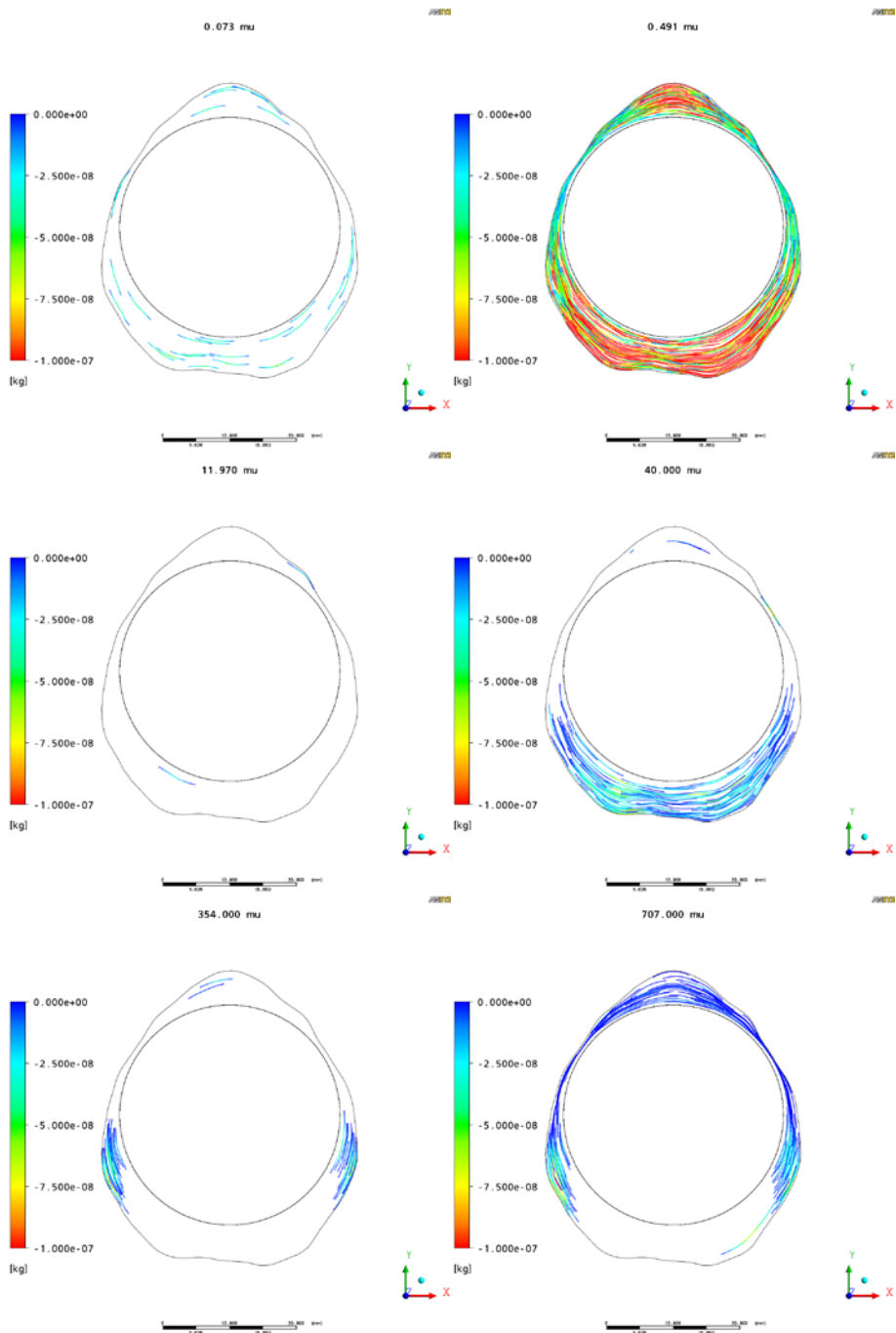
**Abbildung 14:** Vollständiger Belag eines Rohres der 1. Rohrreihe (1.RR) – die unterschiedlichen Linien verdeutlichen die Grenze des Belages nach einer bestimmten Zeit

Eindeutig lässt sich auch hier die bimodale Verteilung der Aerosole bei 500 nm und 350 µm erkennen (siehe auch Abbildung 17).

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.

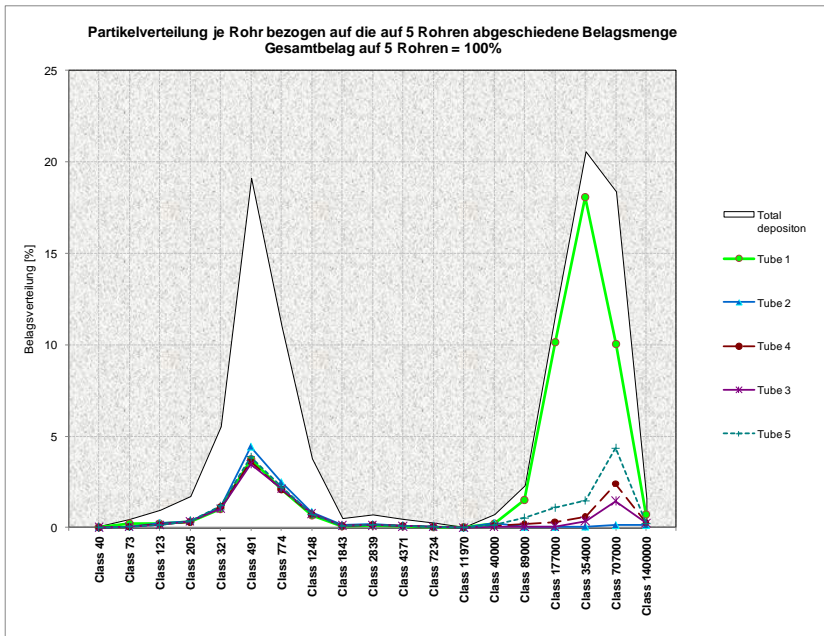


**Abbildung 15:** Beitrag der verschiedenen Aerosol-Fractionen (von 73 nm bis 707 μm) am Belagsaufbau der 1. Rohrreihe jeweils in der Zeitentwicklung (Strömungsrichtung von unten nach oben)



**Abbildung 16:** Beitrag der verschiedenen Aerosol-Fractionen (von 73 nm bis 707  $\mu\text{m}$ ) am Belagsaufbau der 2. Rohrreihe jeweils in der Zeitentwicklung (Strömungsrichtung von unten nach oben)

Grundsätzlich zeigt sich in Abbildung 17, dass die bimodale Verteilung der in den 3. Zug eintretenden Aerosole nicht unbedingt, vor Allem für die hinteren Rohre, der Verteilung der Belags-bildenden Aerosole entspricht. Somit liefert die hier vorgestellte Untersuchung weiterführende Erkenntnisse zum Verständnis der Korrosionsvorgänge.



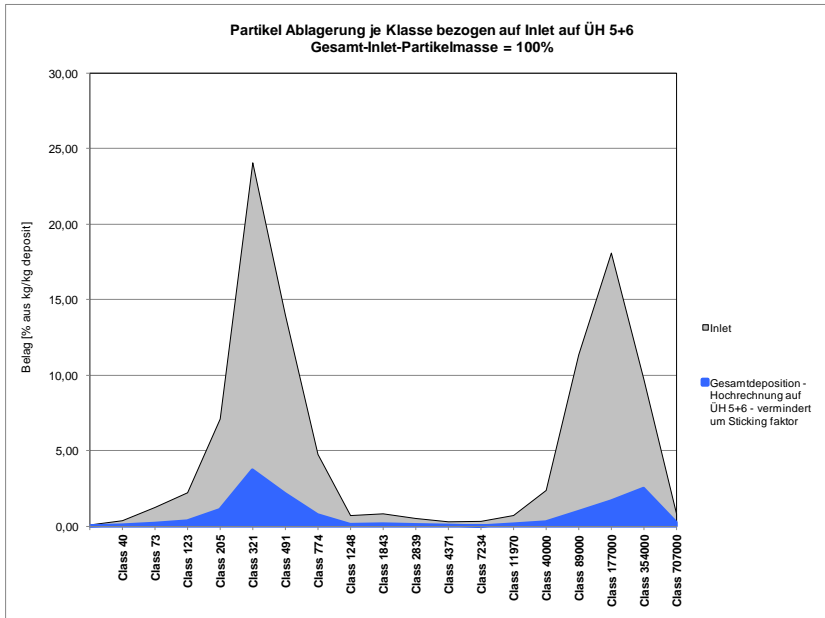
**Abbildung 17:**Partikelverteilung an den ersten 5 Rohren von ÜH 5 nach Partikelklassen

Eine Ermittlung der tatsächlich abgeschiedenen Belagsmengen aus Messungen ergab ein mittleres Belagswachstum von etwa 130  $\mu\text{m}/\text{h}$ . Die CFD-Berechnung der Abscheidung führte zu einem Belagswachstum von rund 200  $\mu\text{m}/\text{h}$ . Daraus ergibt sich, dass von den in der Simulation als anhaftend angenommenen Partikel noch etwa 35 % nicht haften bleiben (d.h. durch z.B. durch einen visko-elastischen Stoß nach dem Auftreffen abprallen). Damit ergibt sich zu dem bereits berücksichtigten Winkeleinfluss ein weiterer „Sticking-Faktor“ von 65 %. Wird zusätzlich berücksichtigt, dass jeder der beiden End-Überhitzer 16 Rohrreihen in Rauchgasrichtung haben, ergibt sich eine Darstellung wie in Abbildung 18. Aus dieser Betrachtung ergibt sich, dass sich etwa 15 Mas.-% der Partikel an den End-Überhitzern abscheiden.

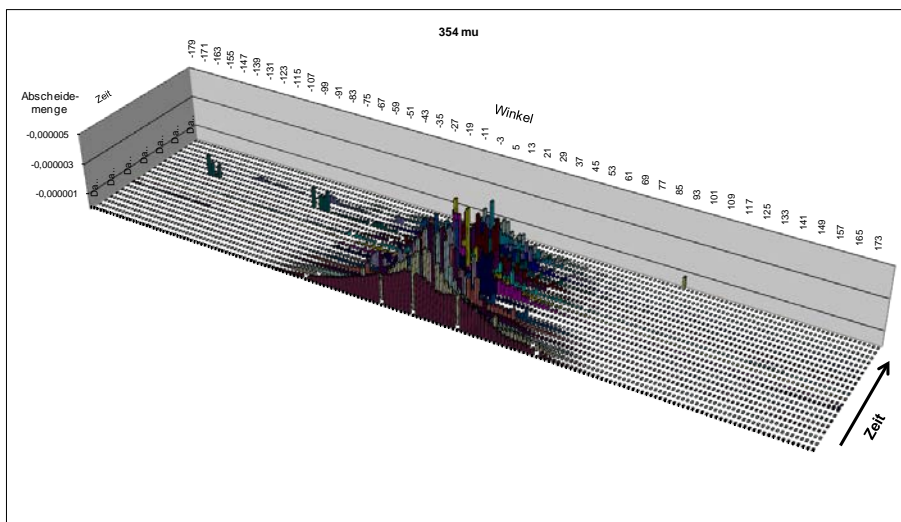
Interessante Eindrücke liefert auch die detailliertere Darstellung der zeitlichen Abscheidung der Aerosole. Dazu sind für die 1.RR die größeren Aerosole in Abbildung 19 und für die 2.RR die kleineren in Abbildung 20 dargestellt. Es ist eine merkliche Fluktuation der Abscheidung über der Zeit zu erkennen.

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

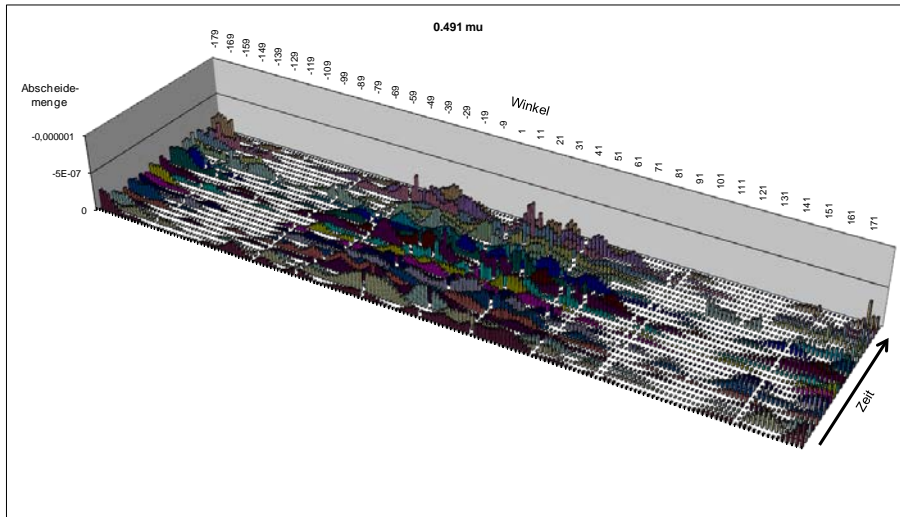
Abscheidung auf der 0°-Position zu, um dann gegen Ende der Reisezeit insgesamt abzunehmen. Letzteres lässt sich aus der immer stromlinienförmigeren Form des Belages und damit geringeren Neigung sich abzuschneiden ableiten.



**Abbildung 18:** Anteil der insgesamt an UH 5 und 6 abgeschiedenen Partikel bezogen auf alle in den 3. Zug eintretenden Partikel



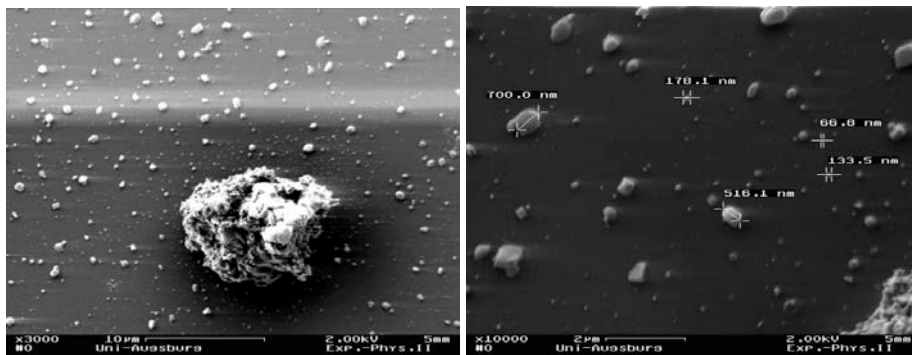
**Abbildung 19:** Aerosol-Klasse 354 μm der 1.RR



**Abbildung 20:** Aerosol-Klasse 0,491 µm der 2.RR

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

Dass sich tatsächlich die unterschiedlichen Partikel am Rohr abscheiden, demonstriert eine Messung der Ablagerungsprodukte auf einem definierten Substrat (Abbildung 21).



**Abbildung 21:** Abgeschiedene und vermessene Aerosole

## 4. Interpretationsansätze

Die Berücksichtigung der Elementen-Zusammensetzung der Aerosole im 2. bzw. 3. Zug (Abbildung 22 und Abbildung 23) 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 25). Das unterstützt die Vorstellung, dass kleine Partikel auch gut chemisch reagieren können und das 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  $\mu\text{m}$ . 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 aus ihrer Entwicklungsgeschichte keine großen Primärpartikel sein, aber auch keine einfachen Sekundärpartikel. Möglicherweise sind sie Agglomerate aus kleineren Aerosolen.

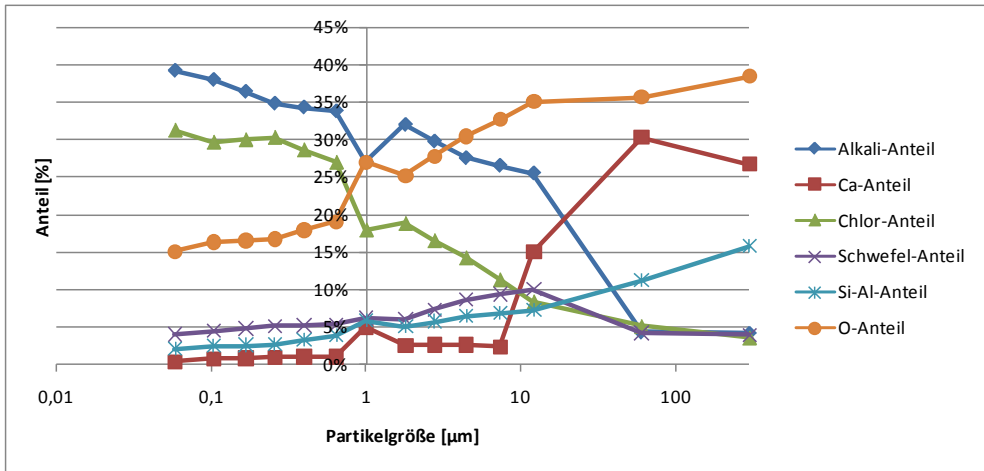


Abbildung 22: Elementverteilung der Partikelklassen des 2. Zuges

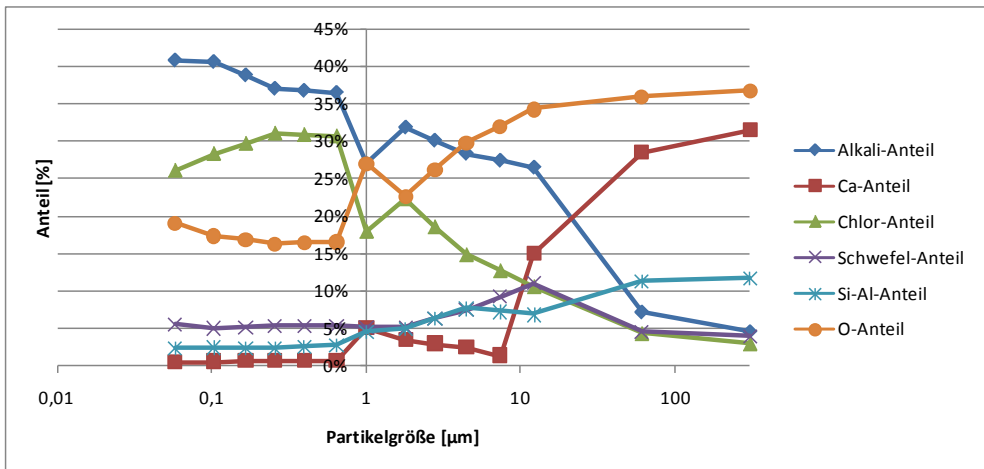


Abbildung 23: Elementverteilung der Partikelklassen des 3. Zuges

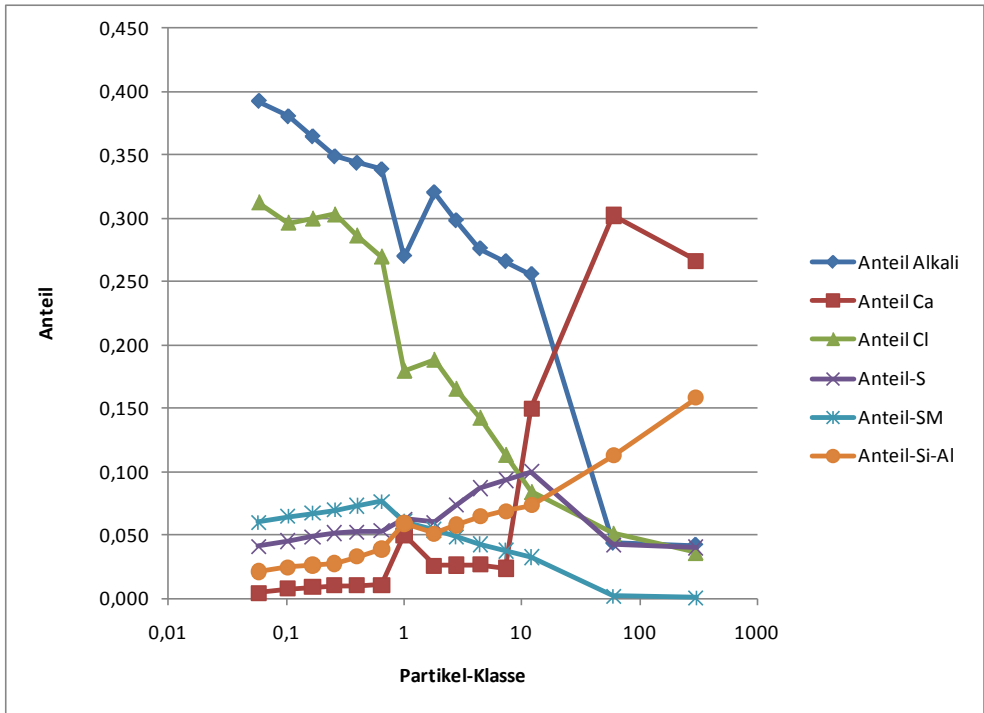


Abbildung 24: Elementverteilung der an den End-Überhitzern abgeschiedenen Partikel

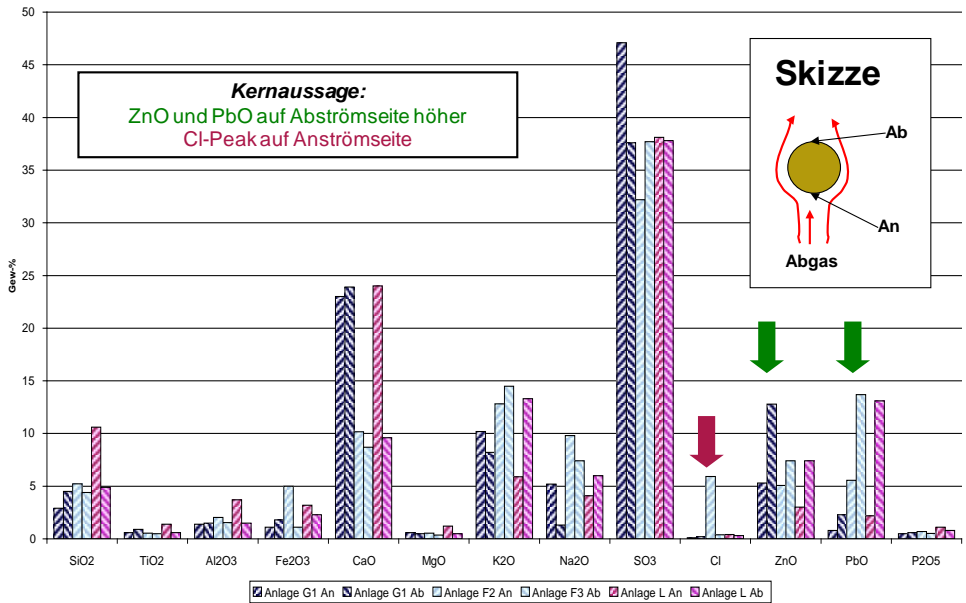


Abbildung 25: Analyse von An- und Abströmseite jeweils eines Überhitzer-Rohres aus unterschiedlichen Anlagen [Harpeng, 2003]

## 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 Aerosolklasse 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. Nukleation durch Kondensation gasförmiger Chloride
  - b. Kondensation von gasförmigen Chloriden auf Oberflächen
  - c. Agglomeration von Aerosolen im Rauchgas
- 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 der Sulfatierung unterschiedlich großer (Erd)-Alkali-Chlorid-Partikel
  - 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 und Gesundheit sowie der Europäischen Union für die finanzielle Unterstützung, ohne die diese Arbeiten unmöglich gewesen wären.

## 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

[IUTA, 2006] Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.; Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik der Universität Karlsruhe: Untersuchung des Einflusses keramischer Dielektrika bei der Entwicklung einer elektrostatischen Feinstpartikelabscheidung für den Kombi-Kraftwerksprozess mit Druckkohlenstaubfeuerung (DKSF). AiF-Abschlussbericht 149 Z/2. AiF: Köln, 2006

[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, 1999] Warnecke, R.: Messungen an unterschiedlichen Messebenen in Feuerraum und 1. Zug der Linien 1 und 3 der MVA XXX. Würzburg: Noell – Interner Bericht, 1999

[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