

# Charakterisierung korrosionsrelevanter Partikel in Kesseln von Müllverbrennungsanlagen

S. Schumacher<sup>1</sup>, J. Lindermann<sup>1</sup>, B. Stahlmecke<sup>1</sup>, D. Jarzyna<sup>1</sup>,  
A. Khot<sup>1</sup>, T. van der Zwaag<sup>1</sup>, H. Nordsieck<sup>2</sup>, R. Warnecke<sup>3</sup>, C. Asbach<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA), 47229 Duisburg

<sup>2</sup> bifa Umweltinstitut GmbH, 86167 Augsburg

<sup>3</sup> GKS Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH, 97424 Schweinfurt

## 1. Einleitung

Die Hochtemperaturkorrosion in Kesseln von Müllverbrennungsanlagen ist verbunden mit einem besonders hohen Verbrauch an Ressourcen. Dies betrifft zum einen den Einsatz metallischer Werkstoffe, zum anderen korrosionsbedingte Beschränkungen hinsichtlich der Erzielung eines optimalen Wirkungsgrades und maximaler Verfügbarkeit. Ziel des Projektes VOKos (Effizienzsteigerung durch verfahrenstechnisch optimierende Korrosionsschutzkonzepte in Verbrennungsanlagen mit heterogenen Festbrennstoffen) ist es, die Ursachen der Korrosion besser zu verstehen, um im Anschluss Maßnahmen zu deren Reduktion ergreifen zu können.

Es ist bekannt, dass die Hochtemperaturchlorkorrosion ein wesentlicher Korrosionsmechanismus in Kesseln von Müllverbrennungsanlagen ist. Jedoch findet man in vergleichbaren Anlagen trotz ähnlicher Brennstoffzusammensetzung teils drastische Unterschiede in den Korrosionsraten, was bisher nicht vollständig verstanden ist. Da die alleinige Anwesenheit von chlorhaltigen Gasen wie beispielsweise HCl die hohen Korrosionsraten nicht erklären kann, besteht jedoch der begründete Verdacht, dass die Partikelphase im Rauchgas eine wesentliche Rolle spielt. Ein notwendiger Schritt zu einem besseren Verständnis ist somit die Untersuchung des Aerosols in einer realen Anlage, was jedoch große Herausforderungen birgt: Zum einen muss das Probenahmesystem zur Sammlung der relevanten Partikel hohen Temperaturen bis zu 1250°C und stark korrosiven Bedingungen standhalten. Zudem enthält das bei der Verbrennung entstehende Aerosol Partikel sehr unterschiedlicher Größen (von etwa 10 nm bis über 1 mm) und komplexer chemischer Zusammensetzung. Dieses breite Spektrum muss mit dem Probenahmesystem erfasst und ausgewertet werden können. Weiterhin befindet sich das Aerosol im Verlauf des Kessels in ständiger Veränderung. So findet beispielsweise während der Abkühlung stets Kondensation gasförmiger Bestandteile aus der übersättigten Gasphase statt. Um bei der Sammlung den tatsächlichen Zustand des Aerosols bei der jeweiligen Temperatur im Kessel einzufrieren, ist es somit essentiell, solche Effekte bei der Probenahme selbst zu vermeiden.

Es haben sich im Wesentlichen zwei Methoden etabliert, die eine Untersuchung des Aerosols über einen weiten Größenbereich ermöglichen und dabei Artefakte weitgehend reduzieren bzw. die Möglichkeit bieten, diese im Nachhinein zu korrigieren. Dies sind zum einen

Messungen mit einer Verdünnungssonde, die das Aerosol isokinetisch aus dem Kessel abgesaugt und mit einem porösen Rohr (porous tube diluter, PTD) zügig kühlt und verdünnt, um es konventioneller Aerosolmesstechnik zugänglich zu machen [Deuerling2010]. Zum anderen wurde im Rahmen des Projektes VOKos ein neues Konzept erarbeitet, das es erlaubt, die Partikel bereits im Heißgas auf Oberflächen für eine anschließende Charakterisierung zu sammeln (im Folgenden „Heißgasprobenahme“ genannt) [Schumacher2016, Schumacher2017a, Schumacher2017b]. Darüber hinaus nutzten Brunner et al. einen Hochtemperaturkaskadenimpaktor, um die Partikel im Kessel größenfraktioniert zu sammeln [Brunner2013]. Diese Methode ist jedoch nur für Partikel kleiner etwa 1 µm geeignet, da das Aerosol senkrecht zur Strömungsrichtung abgesaugt wird, was die Sammel-effizienz für große Partikel aufgrund ihrer Trägheit drastisch reduziert. Untersuchungen mit einer Partikelgitternetzsonde ermöglichen zwar die qualitative Untersuchung der Morphologie und chemischen Zusammensetzung des Aerosols, lassen jedoch keine Rückschlüsse auf Partikelgrößenverteilung und Konzentration zu [Thiel2015].

Im Rahmen dieses Artikels sollen die Ergebnisse aus Messungen mit der Verdünnungssonde und der Heißgasprobenahme miteinander verglichen werden, wobei Gründe für mögliche Abweichungen eingehend diskutiert werden. Basierend auf dieser Diskussion wird ein nach aktuellem Kenntnisstand gültiges Gesamtbild für die Größenverteilung und chemische Zusammensetzung des Aerosols im Kesselverlauf erarbeitet. Dieses wird schließlich mit den Ergebnissen an einer Vergleichsanlage mit niedrigerer Korrosionsrate verglichen, um mögliche Ursachen für die Unterschiede auszumachen.

## 2. Messmethoden

Zunächst sollen die beiden hier verwendeten Messmethoden näher vorgestellt werden. Beide haben jeweils ihre Vor- und Nachteile. Bei der Verdünnungssonde besteht ein hoher Aufwand bei Aufbau und Betrieb, sodass nur etwa eine Probenahme pro Tag möglich ist. Die Heißgasprobenahme erlaubt hingegen mehrere Messungen zu Tag, die jedoch mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) aufwendig auszuwerten sind. Mit der Verdünnungssonde kann die chemische Zusammensetzung nur als Mittelwert für verschiedene Partikelgrößenklassen bestimmt werden. Dies ist zwar mit relativ wenig Aufwand für makroskopische Substanzmengen möglich, jedoch geht dabei Information über die chemische Zusammensetzung und Morphologie einzelner Partikel verloren. Diesbezügliche Unterschiede können prinzipiell Einfluss auf die Korrosionseigenschaften haben, da sie Unterschiede in der Abscheidung, in der Struktur des Belags und im Stoffaustausch mit der Umgebung verursachen. Hier liegt eine Stärke der Heißgasprobenahme, bei der die Eigenschaften individueller Partikel untersucht werden können, was jedoch wiederum sehr kurze Sammelzeiten und damit eine niedrige statistische Basis bedingt.

### 2.1 Verdünnungssonde

Der schematische Aufbau der hier verwendeten Verdünnungssonde ist in Abb. 1 gezeigt und soll im Folgenden kurz beschrieben werden. Nähere Details zu Methode und Mess-

verfahren finden sich in [Deuerling2010]. Da die Probenahmesonde horizontal (d.h. senkrecht zum Rohgasstrom) in den Kessel eingeführt wird, ist zunächst eine Umlenkung des Aerosols um 90° mittels eines Schwanenhalskrümmers notwendig. Direkt hinter dem Einlasskrümmer ist ein poröses Rohr (porous tube diluter, PTD) platziert, durch dessen Wände vorgewärmte partikelfreie Luft gepresst wird. Die durch die Wände radial eintretende Luft verdünnt das angesaugte Aerosol schnell und homogen und kühlt es gleichzeitig auf 300°C ab.

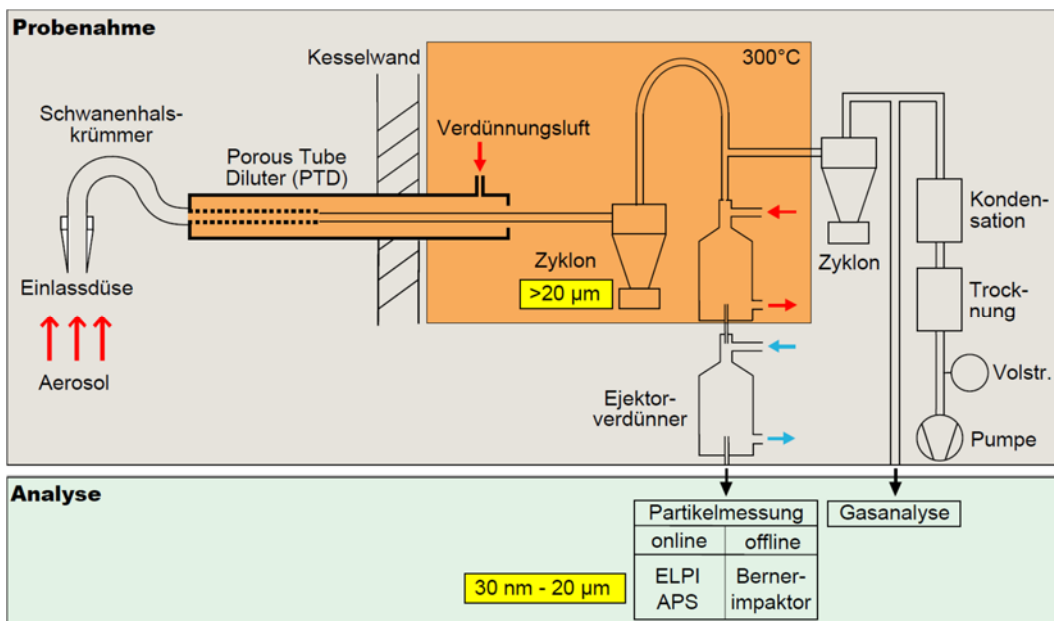


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Verdünnungssonde.

Das verdünnte Aerosol durchläuft einen Zyklon mit 20 µm Cutoff-Durchmesser, der zum einen als Staubvorabscheider zum Schutz der Messinstrumente und zum anderen zur Beprobung der Grobstaubfraktion dient. Im Anschluss wird mit einem isokinetischen Teiler ein Teilstrom für die Partikelanalyse vom Hauptstrom abgetrennt. Dieser wird in einem zwei-stufigen Ejektorverdünner weiter verdünnt und auf unter 100°C abgekühlt. Hinter dem zweiten Ejektor befindet sich ein weiterer isokinetischer Teiler, der eine parallele Beschickung verschiedener Impaktoren und Aerosolmessgeräte ermöglicht. Der Hauptstrom wird in einem zweiten Zyklon weiter entstaubt und ein danach abgezogener Teilstrom zur Gasanalyse verwendet. Der Hauptstrom des verdünnten Gases wird nach Trocknung mit einer Pumpe abgesaugt.

Die Messung mit der Verdünnungssonde birgt zwei wesentliche Nachteile: Zum einen werden die meist klebrigen Partikel ab einer Größe von wenigen Mikrometern zu einem Großteil bereits im Schwanenhalskrümmer abgeschieden werden und stehen somit der Aerosolmesstechnik nicht mehr zur Verfügung. Darüber hinaus sind die Ergebnisse je nach Temperatur im Kessel mehr oder weniger stark von Artefakten durch Kondensation von Salzdämpfen während der Abkühlung in der Sonde beeinflusst. Berechnungen zeigen,

dass bei Temperaturen oberhalb von 600°C zur Vermeidung der Nukleation und Kondensation von Salzen eine Verdünnung in der Größenordnung 1:10<sup>7</sup> benötigt würde. Diese ist technisch schwer umsetzbar und würde zudem die vorhandene Partikelkonzentration zu stark verdünnen, um noch messbar zu sein.

Um die Ergebnisse mit anderen Messmethoden vergleichbar zu machen, müssen diese Artefakte somit zunächst korrigiert werden. Dazu wird zum einen die im Krümmer gefundene Massenkonzentration anhand ihrer chemischen Zusammensetzung auf die einzelnen Partikelgrößenklassen aufgeteilt. Um die bei der Probenahme kondensierten Alkalichloride herauszurechnen, wird die Menge kondensierbarer Salze bei der jeweiligen Probenahmetemperatur berechnet und oberflächenproportional auf die Partikel verteilt. Experimentell zeigt sich jedoch, dass deutlich mehr Salz auf den groben Partikeln zu finden ist, als es ihr vergleichsweise geringer Anteil an der Gesamtoberfläche erwarten lässt. Dies kann zum einen an der Agglomeration zwischen feinen und groben Partikeln (Scavenging) liegen, die entsprechend mehr Salz auf die groben Partikel transportiert, zum anderen an einer möglichen Unterschätzung des Oberflächenanteils der groben Partikel bei der Annahme kugelförmiger Partikel. Da diese Effekte schwer theoretisch zu erfassen sind, wurde der Korrekturalgorithmus entsprechend um empirische Faktoren erweitert. Weiterhin wird korrigiert, dass durch die artifizielle Kondensation auch eine Veränderung der Korngröße eintritt.

## 2.2 Heißgasprobenahme

Um die zuvor beschriebenen Artefakte weitgehend zu minimieren, wurde im Rahmen des Projektes VOKos eine neue Methode zur Sammlung der Partikel im Heißgas entwickelt. Ein Schema der Probenahmesonde ist in Abb. 2 gezeigt. Die Sonde wurde als zweistufiges System ausgelegt: Zunächst werden größere Partikel aufgrund ihrer Trägheit auf der Prallplatte eines Impaktors abgeschieden, um ein schnelles Zusetzen des darunterliegenden Filtersubstrats zu vermeiden. Letzteres wird zur Sammlung der verbleibenden, kleineren Partikel verwendet.

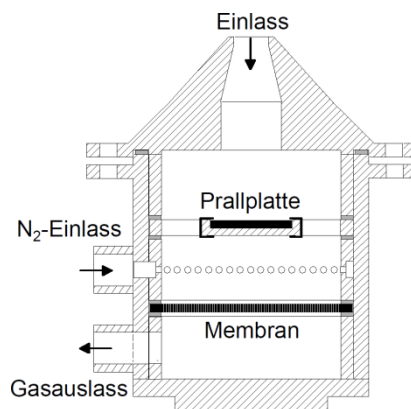


Abbildung 2: Querschnitt der Probenahmesonde zur Veranschaulichung der beiden Stufen der Partikelsammlung.

Als Filtermedium haben sich galvanisch gewachsene Nickelmembranen mit wohldefinierten Poren von 10 µm Durchmesser und 50 µm Abstand (entsprechend 3,6% Porosität) als

geeignet erwiesen. Diese wurden vom Fraunhofer-Institut UMSICHT in Oberhausen gefertigt. Sowohl die Prallplatte als auch die Nickelmembran sind rasterelektronenmikroskopisch auswertbar, sodass sich Morphologie und chemische Eigenschaften der gesammelten Einzelpartikel analysieren lassen. Um von der im REM bestimmten größenabhängigen Partikelzahl auf die luftgetragene Konzentration der Partikel im Rauchgas rückzuschließen, wird diese mit der Abscheideeffizienz der Membran, die sich aus CFD-Simulationen ergibt, gewichtet.

Um Kondensationsartefakte bei der Probenahme zu minimieren, wird die Sonde vor und nach der Probenahme mit reinem, vorgeheiztem Stickstoff im Überschuss gespült. Bei eingeschaltetem Stickstoffvolumenstrom wird die Sonde in den Kessel eingeführt und zunächst für einige Minuten auf Umgebungstemperatur vorgeheizt. Dabei verhindert der Stickstoffstrom, dass Partikel oder Gase aus dem Kessel in die Sonde gelangen, unterstützt dadurch, dass der Sondeneinlass senkrecht zum Rauchgasstrom gedreht wird. Mit dem Ausschalten des Stickstoffstromes unmittelbar nach Einschwenken der Sonde in den Rauchgasstrom beginnt zeitlich genau definiert die Probenahme, die mit dem Wiedereinschalten des Stickstoffstroms und dem Ausschwenken der Sonde beendet wird. Da die Probenahme nahezu isotherm mit der Umgebung erfolgt, ist Kondensation auf den Probenträgern weitgehend ausgeschlossen.

### **3. Messungen an einer Müllverbrennungsanlage**

Im Laufe mehrerer Messkampagnen wurden Untersuchungen an der Müllverbrennungsanlage des Gemeinschaftskraftwerks Schweinfurt (GKS) GmbH durchgeführt. In Abb. 3 ist ein Kesselschnitt der Anlage mit den Positionen der Messstellen gezeigt. Es wurden Messungen im Feuerraum bei 1250°C sowie den vier Zügen zwischen 250 und 950°C durchgeführt, wobei im Folgenden nur die Messungen im Kessel betrachtet werden.

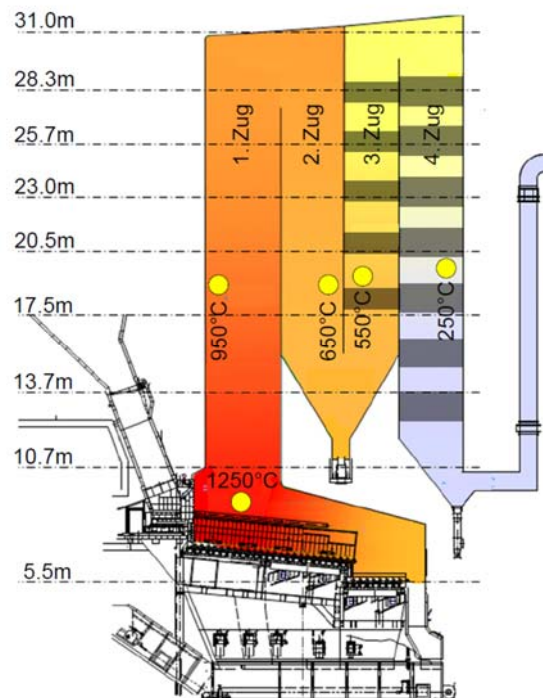


Abbildung 3: Kesselschnitt einer Linie des GKS mit farblich dargestelltem Temperaturverlauf. Die Überhitzerrohrbündel sind durch graue Felder angedeutet, während gelbe Punkte die Lage der untersuchten Messtellen markieren.

Die Anlage verfügt über drei weitgehend baugleiche Verbrennungslinien mit separater Abgasreinigung. Die Verbrennung des Abfalls erfolgt auf einem Vorschubrost, unter dem in fünf Zonen die Verbrennungsluft durch Gebläse zugeführt wird. Die Feuerung wird im Gegenstrom betrieben. Zudem werden Sekundärluft und rezirkuliertes Abgas seitlich in den Verbrennungsraum eingeleitet. Die freigesetzte Wärme wird in einem Vertikalkessel mit vier Zügen zur Produktion von Heißdampf genutzt.

### 3.1 Vergleich der gemessenen Partikelgrößenverteilungen

Im Folgenden sollen die Partikelmassengrößenverteilungen, die zum einen mit der Verdünnungssonde, zum anderen mit der Heißgasprobenahme gemessen wurden, miteinander verglichen werden. Die jeweiligen Ergebnisse gemittelt über sämtliche durchgeführten Einzelmessungen sind in Abb. 4 dargestellt. Beide Methoden zeigen übereinstimmend, dass das Aerosols eine bimodale Größenverteilung aufweist mit einer Feinfraktion im Größenbereich einiger 100 nm und einer Grobfraktion mit einem Maximum zwischen etwa 10 und 100 µm. Im Bereich zwischen etwa 1 und 5 µm liegt ein ausgeprägtes Minimum, in dem nur ein geringer Anteil der Gesamtpartikelmasse zu finden ist.



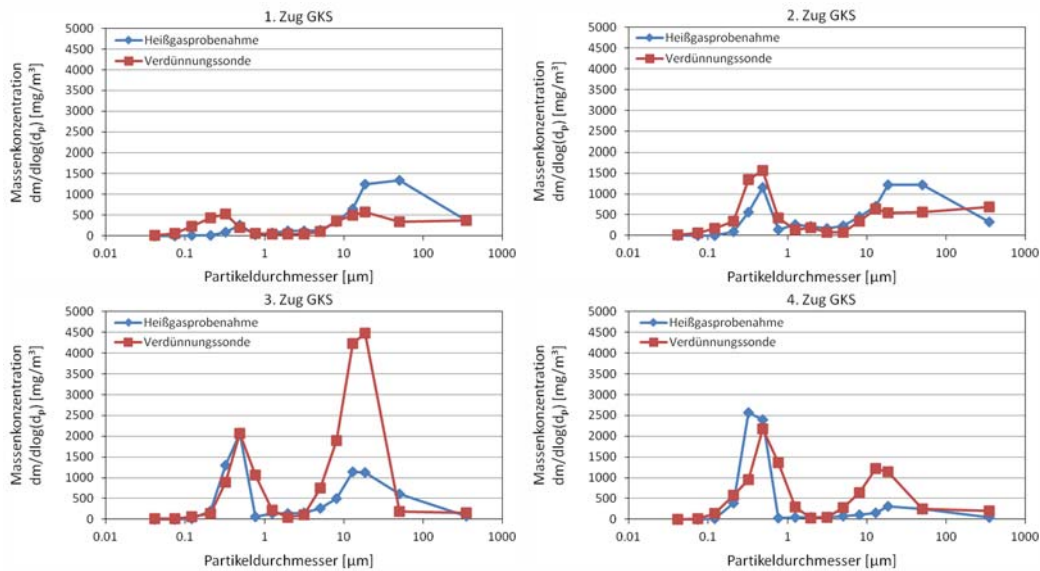


Abbildung 4: Partikelmassengrößenverteilungen in den vier Zügen des Kessels des GKS gemessen mit der Heißgasprobenahme (blau) und der Verdünnungssonde (rot).

Im Detail ergeben sich jedoch einige Unterschiede zwischen den beiden Messmethoden. So zeigt sich insbesondere im ersten Zug, dass bei der Heißgasprobenahme offenbar Partikel bis etwa  $0,4 \mu\text{m}$  im Vergleich zur Messung mit der Verdünnungssonde deutlich unterrepräsentiert sind. Dies lässt sich dadurch erklären, dass bei der manuellen Analyse der REM-Bilder solch kleine Partikel teilweise irrtümlich nicht mitgezählt werden, da sie sich nur schlecht vom Untergrund unterscheiden lassen, während sie bei der Messung mit der Verdünnungssonde vom elektrischen Niederdruckimpaktor (ELPI) erfasst werden. Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse der Verdünnungssonde im Größenbereich zwischen  $0,04$  und  $0,4 \mu\text{m}$  wird dadurch bestätigt, dass von Brunner et al. durchgeführte Messungen mit einem Hochtemperaturkaskadenimpaktor dort gut übereinstimmende Ergebnisse liefern [Brunner 2013].

Eine weitere Diskrepanz zeigt sich speziell in der Größenklasse um  $0,77 \mu\text{m}$ , bei der die Heißgasprobenahme deutlich weniger Partikel findet als die Verdünnungssonde, was zu einer scheinbaren Verschmälerung der Feinfraktion führt. Dies ist ein systematischer Fehler, der durch den Wechsel von stark vergrößerten REM-Bildern zur Zählung sehr kleiner Partikel zu weniger vergrößerten REM-Bildern zur Zählung größerer Partikel bedingt ist. Es hat sich gezeigt, dass dies für die entsprechende Größenklasse entweder zu einer starken Unter- oder Überschätzung der Partikelmasse führt.

Im Größenbereich um  $10 \mu\text{m}$  sieht die Verdünnungssonde im dritten und vierten Zug deutlich höhere Partikelmassenkonzentrationen als die Heißgasprobenahme. Eine starke Massenzunahme in diesem Größenbereich im Kesselverlauf ist jedoch nicht konsistent zu erklären ist, da (i) eher eine Abnahme durch Verluste an Umlenkungen und Strömungshindernissen zu erwarten ist, (ii) Kondensation auf die groben Partikel nicht entscheidend die Masse erhöhen sollte und (iii) ein Entstehen des neuen Maximums der Massenkonzentra-

tion durch Agglomeration gleichzeitig zu einer deutlichen Massenabnahme in der Feinfraktion führen sollte, was ebenfalls nicht zu beobachten ist. Hinzu kommt, dass sich die mit der Verdünnungssonde bestimmte chemische Zusammensetzung in diesem Größenbereich (siehe Abschnitt 3.2) nicht harmonisch in das Gesamtbild einfügt, während die für die Heißgasprobenahme der Fall ist. Insgesamt erscheinen hier die Ergebnisse der Heißgasprobenahme, die zudem speziell zur Vermessung dieses Größenbereichs ausgelegt wurde, somit plausibler. Dass die Verdünnungsmethode aufgrund der starken Abscheidung mittelgroßer, klebriger Partikel im Einlasskrümmer eine bekannte Schwäche aufweist, die womöglich mit der entsprechenden Korrektur nicht ideal kompensiert wird, mag zudem auch die Ursache dafür sein, dass die Heißgasprobenahme in den ersten beiden Zügen hier höhere Konzentrationen findet.

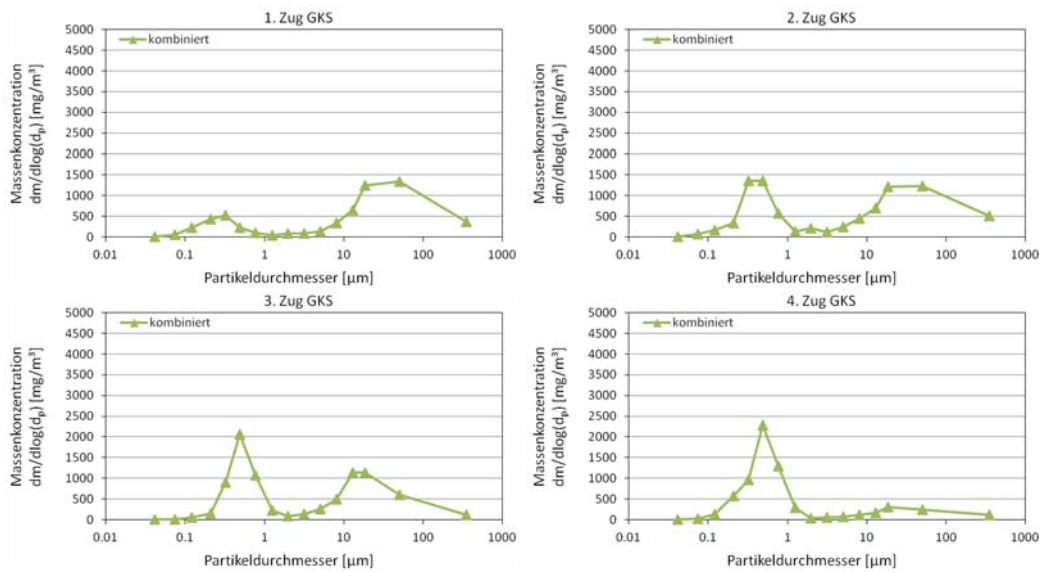


Abbildung 5: Partikelmassengrößenverteilung in den vier Zügen des GKS-Kessels kombiniert aus Messungen mit der Verdünnungssonde und der Heißgasprobenahme.

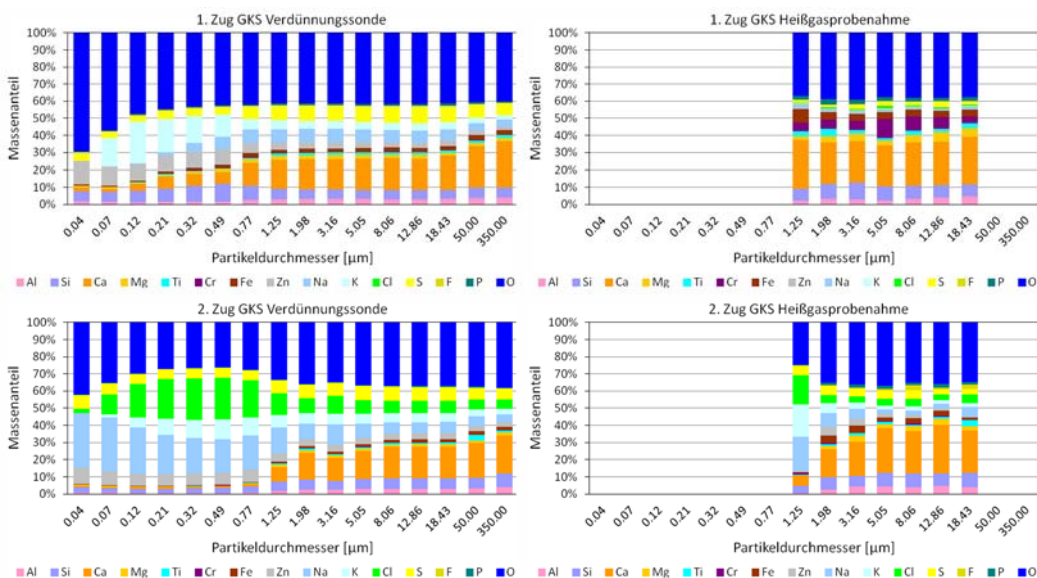
Basierend auf der zuvor geführten Diskussion, wurden die Ergebnisse der beiden Messmethoden wie in Abb. 5 gezeigt zusammengeführt, sodass sich ein Gesamtbild ergibt, das nach aktuellem Wissensstand die reale Entwicklung der Partikelgrößenverteilung im Kesselverlauf widerspiegelt. Bis 0,4 µm wurden nur die Daten der in diesem Größenbereich verlässlicheren Verdünnungssonde berücksichtigt. Zwischen 0,4 und 4 µm liefern beide Methoden prinzipiell vergleichbare Ergebnisse, sodass hier ein Mittelwert zwischen den beiden Methoden gebildet wurde. Dabei wurde die bei der Heißgasprobenahme methodenbedingt diskriminierte Partikelgrößenklasse bei 0,77 µm durch Interpolation zwischen der darunter und darüber liegenden Größenklassen angenähert. Im Größenbereich zwischen 4 und 100 µm liefert die Heißgasprobenahme plausiblere Ergebnisse, sodass hier die Daten dieser Methode verwendet werden. In der Größenklasse um 350 µm liegen beide Methoden wieder nah beieinander, sodass hier der Mittelwert aus beiden Methoden verwendet wird.

### 3.2 Vergleich der chemischen Zusammensetzung



Ebenso wie die Größenverteilungen, sollen nun auch die mit den beiden Messmethoden erhaltenen chemischen Zusammensetzungen der Partikel miteinander verglichen werden. Bei der Verdünnungssonde wurden die einzelnen Stufen des Kaskadenimpaktors sowie der Inhalt von Zyklon und Krümmer chemisch untersucht, sodass sich hier Zusammensetzungen für den gesamten betrachteten Größenbereich ergeben. Dabei wurden Kondensationsartefakte wieder herausgerechnet und der Inhalt des Krümmers anhand der chemischen Zusammensetzung auf die verschiedenen Größenklassen aufgeteilt. Bei der Heißgasprobenahme wurden die auf den Membranen gesammelten Partikel mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) chemisch untersucht. Da Partikel kleiner 1 µm ein sehr niedriges Signal-zu-Untergrund-Verhältnis aufweisen und Partikel größer 25 µm sehr selten sind, sind die Verteilungen auf den Bereich zwischen etwa 1 und 25 µm eingeschränkt. Die Ergebnisse sind in Abb. 6 gezeigt.

Beide Methoden zeigen übereinstimmend, dass die Partikel im Wesentlichen zum einen aus verschiedenen Oxiden wie bspw. SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oder TiO<sub>2</sub> bestehen, zum anderen aus Alkalichloriden, deren Anteil im Kesselverlauf durch Kondensation deutlich zunimmt und hauptsächlich auf die feinen Partikel konzentriert ist. In dem mit beiden Methoden vermessenen Größenbereich zwischen etwa 1 und 25 µm ergeben sich jedoch auch hier gewisse Abweichungen. So zeigt die Messung mit der Verdünnungssonde im ersten Zug eine höhere Konzentration an Alkalisulfaten, die womöglich auch bei der Probenahme auskondensiert sind und bei der Korrektur nicht berücksichtigt wurden. Die Heißgasprobenahme weist hingegen ungewöhnlich hohe Anteile an Fe und insbesondere Cr auf. Zurzeit wird untersucht, ob dies ein Artefakt durch Abplatzen von Oxidpartikeln von der Innenseite des stählernen Sondengehäuses sein könnte.



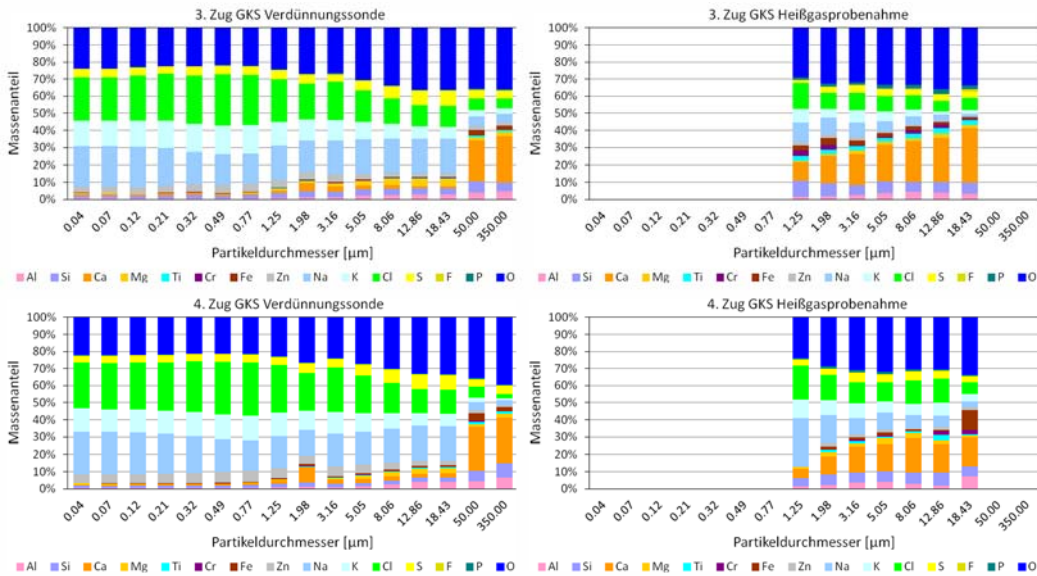


Abbildung 6: Größenaufgelöste chemische Zusammensetzung in den vier Zügen des GKS gemessen mit Verdünnungssonde (links) bzw. Heißgasprobenahme (rechts).

Im zweiten Zug stimmen die Ergebnisse im Rahmen der zu erwartenden Schwankungen gut miteinander überein, während sich im dritten und vierten Zug eine deutliche Diskrepanz zwischen den beiden Messmethoden zeigt. Während die Heißgasprobenahme einen recht kontinuierlichen Übergang zwischen den salzreichen submikronen Partikeln und den calciumreichen groben Partikeln liefert, findet die Verdünnungssonde hier sehr salzreiche Partikel mit nahezu größenunabhängiger Zusammensetzung. Da solch hohe Salzanteile in diesem Größenbereich und auch ein drastischer Bruch in der chemischen Zusammensetzung zwischen den Größenklassen bei 18 und 50 µm nicht plausibel zu erklären ist, bestätigt die chemische Betrachtung unsere obige These, dass die Heißgasprobenahme in diesem Größenbereich verlässlichere Ergebnisse liefert. Eine genaue Erklärung der Ursache für die starken Abweichungen ist zurzeit noch in Diskussion.

In Abb. 7 wurden basierend auf der obigen Diskussion die Ergebnisse der beiden Methoden so kombiniert, dass zwischen 1 und 25 µm die Resultate der Heißgasprobenahme und ansonsten die der Verdünnungssonde verwendet wurden. Zu großen Partikeln hin ergibt sich ein sehr konsistentes Bild, während um 1 µm noch ein deutlicher Bruch in der chemischen Zusammensetzung zu verzeichnen ist, der weiterer Diskussion bedarf.

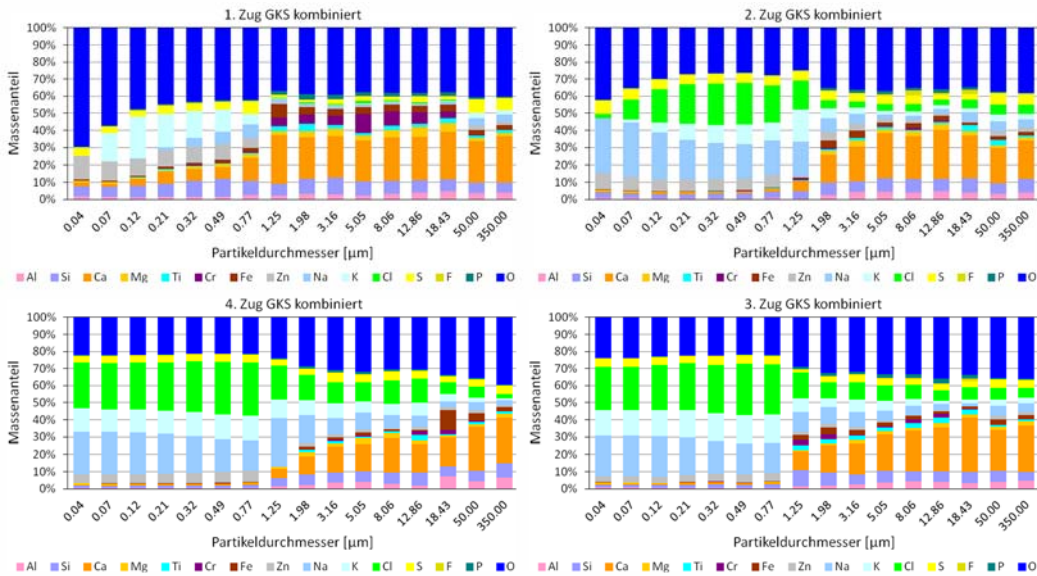


Abbildung 7: Größenaufgelöste chemische Zusammensetzung in den vier Zügen des GKS kombiniert aus Messungen mit Verdünnungssonde und Heißgasprobenahme.

#### 4. Messungen an einer Vergleichsanlage

Um den Einfluss von Partikelgrößenverteilung und chemischer Zusammensetzung auf die Korrosion im Kessel weiter zu ergründen, wurden Messungen an einer weiteren Anlage durchgeführt, die deutlich geringere Korrosionsraten aufweist. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Anlagen besteht in der Art der Feuerung, die an der Vergleichsanlage im Gegensatz zum GKS als Gleich- statt Gegenstromfeuerung ausgelegt ist. Gemäß dem oben beschriebenen Schema zur Zusammenführung der Daten der beiden Messmethoden zeigen Abb. 7 und 8 die Partikelgrößenverteilung und chemische Zusammensetzung im Kesselverlauf für die Vergleichsanlage.

Insgesamt zeigt sich beim Vergleich der beiden Anlagen ein ähnliches Bild, sowohl in Bezug auf die Partikelgrößenverteilungen als auch auf die chemische Zusammensetzung. Ein auffälliger Unterschied zwischen GKS und Vergleichsanlage liegt jedoch darin, dass auf Partikeln zwischen etwa 1 und 25 µm prozentual deutlich weniger Cl zu finden ist. Im zweiten Zug ist dies lediglich der Tatsache geschuldet, dass die Messung bei einer höheren Temperatur (700°C statt 650°C) durchgeführt wurden, im dritten und vierten Zug bei nahezu identischen Temperaturen weist dies jedoch auf einen tatsächlich geringeren Chlorgehalt hin. Der geringe prozentuale Chlorgehalt zusammen mit der niedrigeren Massenkonzentration im mittleren Partikelgrößenbereich im Vergleich zum GKS, kann ein erster Hinweis zu Erklärung für die stark unterschiedlichen Korrosionsraten sein, da gerade Partikel in diesem Größenbereich mit hoher Effizienz auf den Überhitzerrohrbündeln abgeschieden werden. Nach einer genauen Ursache für die Unterschiede zwischen den beiden Anlagen wird derzeit noch gesucht.

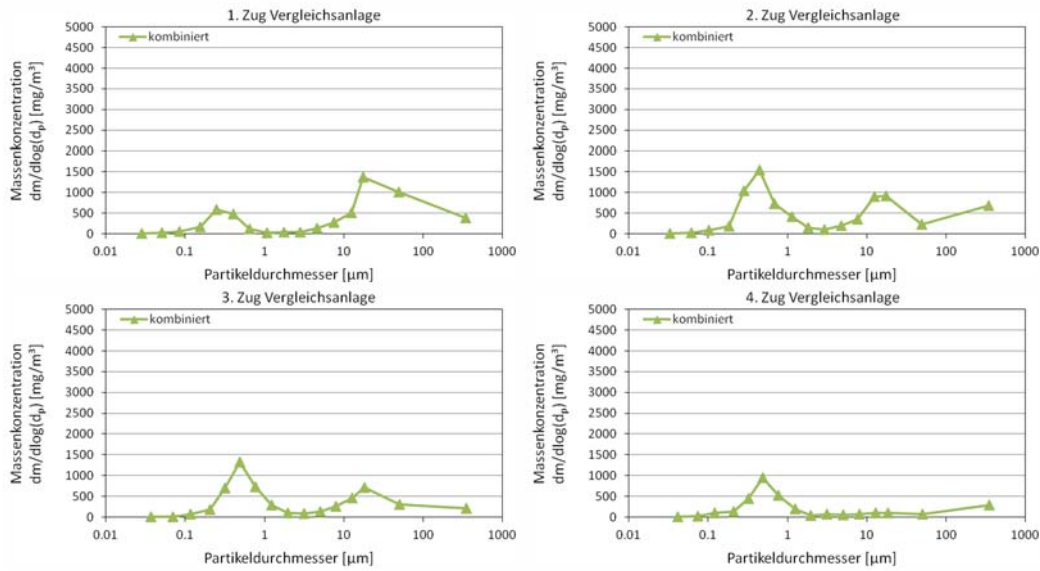


Abbildung 8: Partikelmassengrößenverteilung in den vier Zügen der Vergleichsanlage kombiniert aus Messungen mit Verdünnungssonde und Heißgasprobenahme.

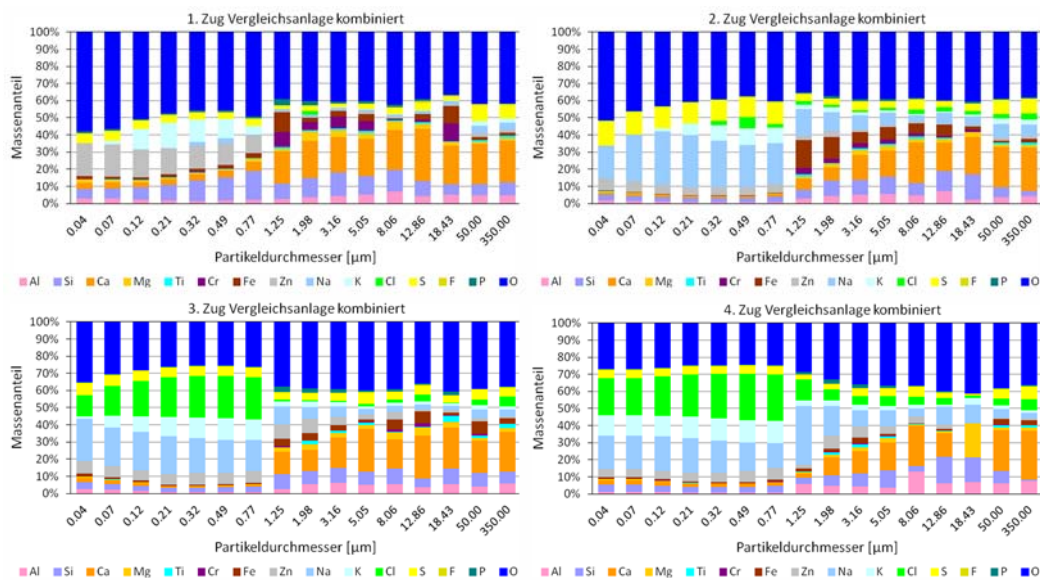


Abbildung 9: Größenaufgelöste chemische Zusammensetzung in den vier Zügen der Vergleichsanlage kombiniert aus Messungen mit Verdünnungssonde und Heißgasprobenahme.

#### 4. Zusammenfassung

Es wurden zwei Messverfahren zur Untersuchung des Aerosols im Kessel einer Müllverbrennungsanlage, nämlich mittels einer Verdünnungssonde sowie eine direkte Heißgasprobenahme, miteinander verglichen. Beide Methoden finden übereinstimmend eine bimodale Größenverteilung mit einer Feinfraktion, die hauptsächlich aus kondensierten Salzen besteht und deren Konzentration im Kesselverlauf deutlich zunimmt, und eine Grobfraktion,

die vom Rost freigesetzte Primärpartikel sowie größere Agglomerate enthält. Abweichungen zwischen den Methoden wurden diskutiert und darauf basierend ein Gesamtmodell zur Beschreibung des Aerosols im Kessel entwickelt, das die jeweiligen Vorteile der beiden Verfahren kombiniert. Es wurden Vergleichsmessungen an einer weiteren Anlage mit geringerer Korrosionsrate durchgeführt. Unterschiede in der von mittelgroßen Partikeln transportierten Chloridfracht zwischen den beiden Anlagen liefern einen ersten Ansatzpunkt, um die unterschiedlichen Korrosionsraten zu verstehen.

### Literatur

T. Brunner, J. Fluch, I. Obernberger, R. Warnecke, Investigations of aerosol formation pathways during MSW combustion based on high-temperature impactor measurements, *Fuel Process. Technol.* 105 (2013) 154

C. Deuerling, J. Maguhn, H. Nordsieck, R. Warnecke, R. Zimmermann, Measurement System for Characterization of Gas and Particle Phase of High Temperature Combustion, *Aerosol Sci. Technol.* 44 (2010) 1

S. Schumacher, J. Lindermann, B. Stahlmecke, A. Khot, T. Zeiner, T. van der Zwaag, H. Nordsieck, R. Warnecke, C. Asbach, Particle sampling in boilers of waste incineration plants for characterizing corrosion relevant species, *Corros. Sci.* 110 (2016) 82

S. Schumacher, J. Lindermann, B. Stahlmecke, A. Khot, T. van der Zwaag, H. Nordsieck, R. Warnecke, C. Asbach, Charakterisierung korrosionsrelevanter Partikel in Feuerraum und Kessel von Müllverbrennungsanlagen, *Gefahrstoffe - Reinhalt. Luft* 77 (2016) 82

S. Schumacher, J. Lindermann, A. Khot, D. Jarzyna, B. Stahlmecke, H. Nordsieck, R. Warnecke, C. Asbach, An Artifact-Minimizing Method for Total Dust Sampling and Chemical Characterization of Industrial High-Temperature Aerosols, online verfügbar bei *Aerosol Sci. Technol.* unter <http://dx.doi.org/10.1080/02786826.2017.1330534> (2017)

C. Thiel, M. Pohl, S. Grahl, M. Beckmann, Characterization of mineral matter particles in gasification and combustion processes, *Fuel* 152 (2015) 88

### Danksagung

Das Projekt VOKos (Effizienzsteigerung durch verfahrenstechnisch optimierende Korrosionsschutzkonzepte in Verbrennungsanlagen mit heterogenen Festbrennstoffen) wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert (FKZ 03X3589).