

Partikelprobenahme in Feuerung und Kessel zur Charakterisierung korrosions- und belagskritischer Flugstäube

S. Schumacher¹, C. Asbach¹, J. Lindermann¹, B. Stahlmecke¹,
T. Zeiner¹, T. van der Zwaag¹, H. Nordsieck², R. Warnecke³

¹ Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA), Duisburg

² bifa Umweltinstitut GmbH, Augsburg

³ GKS Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH, Schweinfurt

1. Einleitung

Die Hochtemperatur-Korrosion in Kesseln und Feuerungen von Müllverbrennungsanlagen verursacht einen besonders hohen Verbrauch an Ressourcen. Dies betrifft zum einen den Einsatz metallischer Werkstoffe für Kessel, Wärmetauscher und Rohrleitungen, zum anderen korrosionsbedingte Beschränkungen hinsichtlich der Erzielung eines optimalen Wirkungsgrades und maximaler Verfügbarkeit.

In vergleichbaren Anlagen finden sich trotz ähnlicher Brennstoffzusammensetzung zum Teil drastische Unterschiede in den Korrosionsraten, die bisher nicht erklärt werden können. Ziel des Projektes VOKos (Effizienzsteigerung durch verfahrenstechnisch optimierende Korrosionsschutzkonzepte in Verbrennungsanlagen mit heterogenen Festbrennstoffen) ist es, die Ursachen und Prozesse bei der Korrosion besser zu verstehen, um im Anschluss Maßnahmen zu deren Reduktion ergreifen zu können.

Von großer Bedeutung für die Korrosion ist die Partikelphase im Rauchgas. Ein wesentlicher Schritt ist deshalb deren Untersuchung in einer realen Anlage. Dieses Vorhaben birgt große Herausforderungen: Zum einen muss das Probenahmesystem hohen Temperaturen bis zu 1250°C und stark korrosiven Bedingungen standhalten. Zudem enthält das bei der Verbrennung entstehende Aerosol Partikel sehr unterschiedlicher Größe (von etwa 10 nm bis über 1 mm) und komplexer chemische Zusammensetzung. Dieses breite Spektrum muss mit der Messmethode erfasst werden können. Weiterhin befindet sich das Aerosol im Verlauf des Kessels durch Abkühlung in ständiger Veränderung. So finden stets Kondensation gasförmiger Bestandteile auf bereits vorhandenen Partikeln und ggf. Nukleation von Partikeln aus der übersättigten Gasphase statt. Um bei der Messung den tatsächlichen Zustand des Aerosols bei der jeweiligen Temperatur im Kessel einzufrieren, ist es somit essentiell solche Effekte bei der Probenahme selbst zu vermeiden.

Bisher wurde zur Untersuchung des Aerosols hauptsächlich die folgende Methode eingesetzt: Das Aerosol wird aus dem Kessel abgesaugt und zügig verdünnt, um Kondensation und Nachreaktionen zu vermeiden. Das verdünnte und gekühlte Aerosol steht dann für konventionelle Aerosolmesstechnik zur Verfügung. Wie in Abschnitt 2 beschrieben, wurden mit dieser Methode bereits wichtige Erkenntnisse gewonnen, jedoch können Artefakte die Messungen stark beeinflussen. In den Abschnitten 3 und 4 wird hingegen eine

artefaktminimierende Probenahmetechnik vorgestellt, die Partikel direkt im Heißgas auf Probenträgern sammelt und sie in einer inerten Atmosphäre abkühlt.

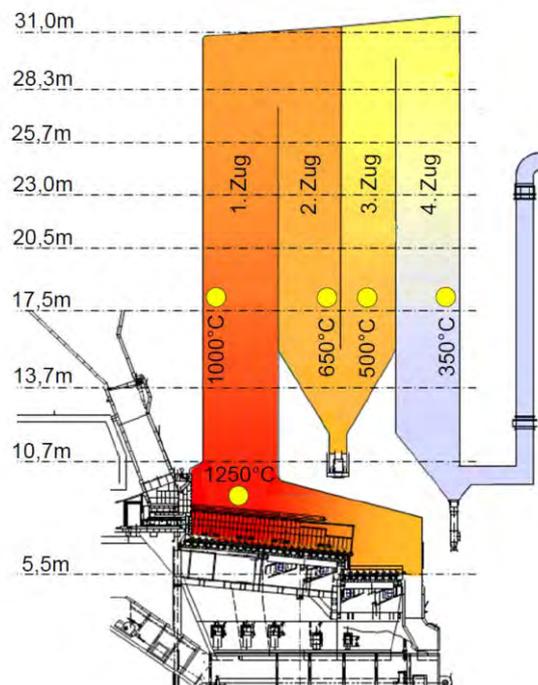


Abbildung 1: Kesselschnitt einer Linie des GKS mit farblich dargestelltem Temperaturverlauf. Gelbe Punkte markieren die Lage der untersuchten Messstellen.

Die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen wurden an der Müllverbrennungsanlage des Gemeinschaftskraftwerks Schweinfurt (GKS) GmbH durchgeführt. 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 bei der Verbrennung des Abfalls freigesetzte Wärme wird in einem Vertikalkessel mit vier Zügen zur Produktion von Heißdampf genutzt. In Abbildung 1 ist ein Kesselschnitt der Anlage mit den Positionen der Messstellen gezeigt.

2. Vorherige Arbeiten

Das Rauchgasaerosol in Feuerung und Kessel der GKS Anlage wurde in vorherigen Projekten mittels einer Verdünnungssonde eingehend untersucht [Deuerling2010]. Der schematische Aufbau der dabei genutzten Sonde ist in Abbildung 2 gezeigt.

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.

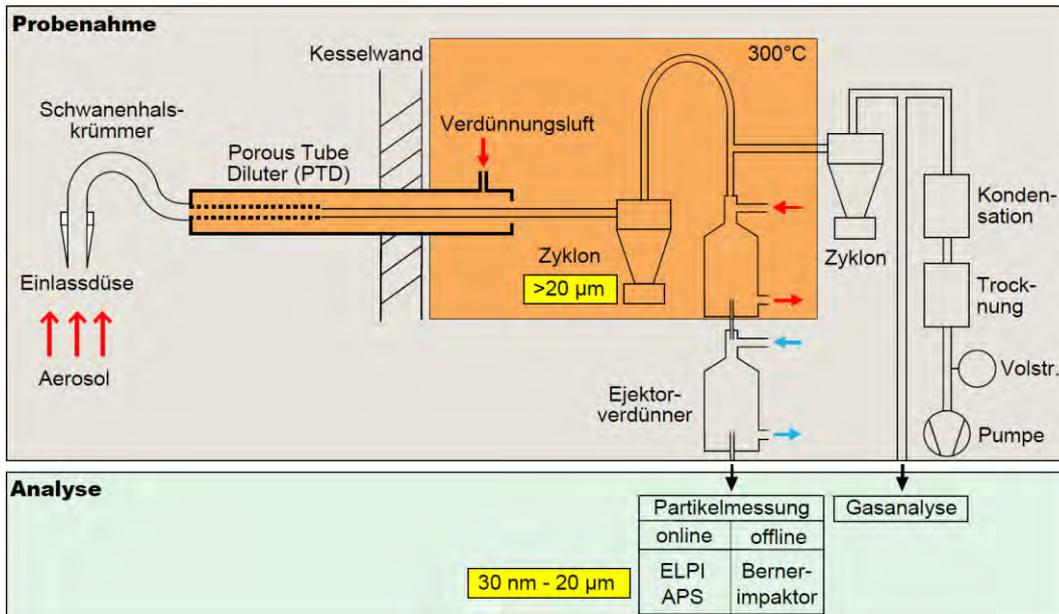


Abbildung 2: Schematischer Aufbau der Verdünnungssonde.

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 zweistufigen 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.

Durch Messungen mit der Verdünnungssonde an verschiedenen Anlagen konnte gezeigt werden, dass große Primärpartikel¹ eher nicht die vordringliche Rolle bei der Korrosion spielen, da sie nur geringe Chlorbestandteile aufweisen. Auf der anderen Seite kommen durch Nukleation, Kondensation und Agglomeration gebildete nanoskalige Sekundärpartikel sowohl in Anlagen mit starker als auch in Anlagen mit geringer Korrosion vor und sind somit vermutlich nicht maßgeblich für die Korrosion. Auch die Gasphase zeigt keine signifikanten Unterschiede, um die stark unterschiedlichen Korrosionsraten zu erklären.

Somit liegt die Vermutung nahe, dass die Hauptursache im Bereich chloridhaltiger mittelgroßer Partikel (ca. 1 bis 25 µm) zu suchen ist. Diese lassen sich mit der Verdünnungsmethode jedoch schlecht untersuchen, da die meist klebrigen Partikel bereits im Schwanenhalskrümmer abgeschieden werden und somit der Aerosolmesstechnik nicht mehr zur Verfügung stehen. Darüber hinaus sind die Ergebnisse je nach Temperatur im Kessel mehr oder weniger stark von Artefakten durch Kondensation von Salzdämpfen während

¹ Primärpartikel bezeichnen hier bereits aus dem Brennbrett ausgetragene Partikel, während Sekundärpartikel erst im Verlauf des Kessels entstehen.

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 $1:10^7$ benötigt würde. Diese ist technisch schwer umsetzbar und würde zudem die vorhandene Partikelkonzentration zu stark verdünnen, um noch messbar zu sein.

Diese beiden Nachteile der Methode werden in der in Abbildung 3 gezeigten Größenverteilung deutlich, die im zweiten Zug gemessen wurde. Die Verteilung ist dominiert von Partikeln mit einem Durchmesser von etwa 300 nm, die zusammen eine Massenkonzentration von etwa 1 g/m^3 ausmachen und vermutlich im Wesentlichen als Artefakt bei der Probenahme entstanden sind. Im Bereich der mittelgroßen Partikel gelangen hingegen kaum Partikel bis zu den Aerosolmessgeräten. Dafür wurde jedoch im Schwanenhalskrümmer eine Partikelmassenkonzentration von etwa 1 g/m^3 gefunden, die vermutlich größtenteils auf Abscheidung mittelgroßer Partikel zurückzuführen ist.

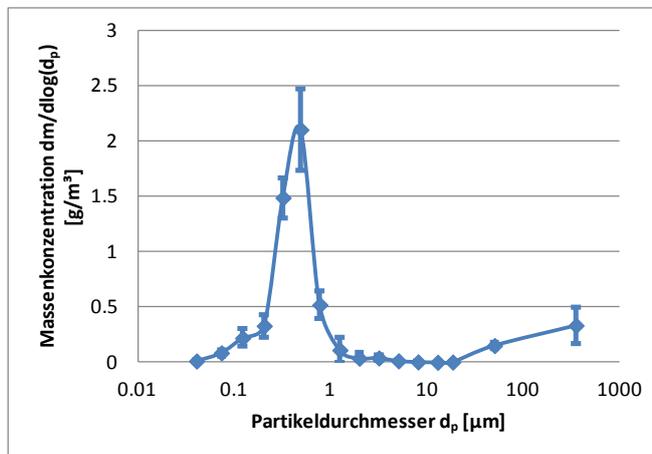


Abbildung 2: Charakteristische Massenkonzentrationsverteilung im 2. Zug gemessen mit den Aerosolmessgeräten der Verdünnungssonde.

Die Partikelprobenahme mit der Verdünnungsmethode birgt noch weitere Nachteile: Es besteht ein hoher Aufwand bei Aufbau und Betrieb, sodass nur etwa eine Probenahme pro Tag möglich ist. Desweiteren kann die chemische Zusammensetzung nur als Mittelwert für verschiedene Partikelgrößenklassen bestimmt werden. Dies hat zwar den Vorteil mit wenig Aufwand für makroskopische Substanzmengen möglich zu sein, jedoch geht dabei Information über die chemische Zusammensetzung und Morphologie einzelner Partikel verloren. Diesbezügliche Unterschiede können Einfluss auf die Korrosionseigenschaften haben, da sie Unterschiede in der Abscheidung auf den Wärmeübertragern, in der Struktur des Belags und im Stoffaustausch mit der Umgebung verursachen.

3. Entwicklung einer artefaktminimierten Probenahme

Um die oben beschriebenen Nachteile zu vermeiden und Artefakte weitgehend zu minimieren, 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. Ein Schema der Sonde ist in Abbildung 4 gezeigt. Die Sonde wur-

de 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.

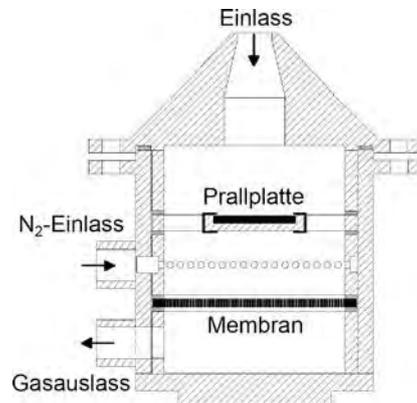


Abbildung 4: Querschnitt der Probenahmesonde zur Veranschaulichung der beiden Stufen der Partikelsammlung.

Es wurden verschiedene Medien getestet, wobei sich galvanisch gewachsene Nickelmembranen mit wohldefinierten Poren von 10 µm Durchmesser und 50 µm Abstand (entsprechend 4% Porosität) als am besten geeignet erwiesen haben. Diese wurden vom Fraunhofer-Institut UMSICHT in Oberhausen gefertigt. Sowohl die Prallplatte als auch die Nickelmembran sind rasterelektronenmikroskopisch (REM) auswertbar, sodass sich Morphologie und chemische Eigenschaften der einzelnen Partikel analysieren lassen.

Um die Artefakte 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 die 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 und dem Einschwenken der Sonde um 90° in den Rauchgasstrom beginnt zeitlich genau definiert die Probenahme, die mit dem Wiedereinschalten des Stickstoffstromes und dem Ausschwenken der Sonde beendet wird. Da die Probenahme nahezu isotherm mit der Umgebung erfolgt, ist Kondensation auf den Probenträgern weitgehend ausgeschlossen.



Abbildung 5: Zusammengebaute Sonde vor und direkt nach Einsatz bei 1250°C.

Abbildung 5 zeigt die Sonde vor und nach Einsatz bei etwa 1250°C im Feuerraum. Mittels einer Halterung wird die Sonde an einer wassergekühlten Lanze befestigt, um sie in den Kessel einzuführen. Durch die Fertigung aus temperatur- und korrosionsbeständigem Edelstahl ist die Sonde mehrfach verwendbar. Die Farbe der Glut am Einlass zeigt, dass die Sonde im Inneren die höchste Temperatur besitzt und nahezu thermisches Gleichgewicht mit der Umgebung im Kessel angenommen werden kann. Für zukünftige Messungen ist der Einbau eines Thermolements geplant, um dies zu quantifizieren.

Das Abscheideverhalten des Impaktors wurde mittels numerischer Strömungssimulation (CFD) charakterisiert, da sich die Auslegung außerhalb des Geltungsbereichs der klassischen Impaktortheorie befindet. Diese Abweichung von der üblichen Auslegung ist notwendig, um bei der im Kessel vorherrschenden Anströmgeschwindigkeit von 4,5 m/s isokinetisch zu sammeln und dennoch einen Cutoff-Durchmesser von mehr als 10 µm zu erreichen. Die Ergebnisse der CFD-Simulationen in Abbildung 6 zeigen eine scharfe Trennkurve des Impaktors. Die ausgeprägte Temperaturabhängigkeit der Abscheidung wird hauptsächlich durch die sich temperaturabhängig unterschiedlich ausbildende Strömung des Aerosols im Impaktor verursacht. Die Ergebnisse der CFD-Simulationen sollen demnächst mittels eines Laboraufbaus experimentell gestützt werden.

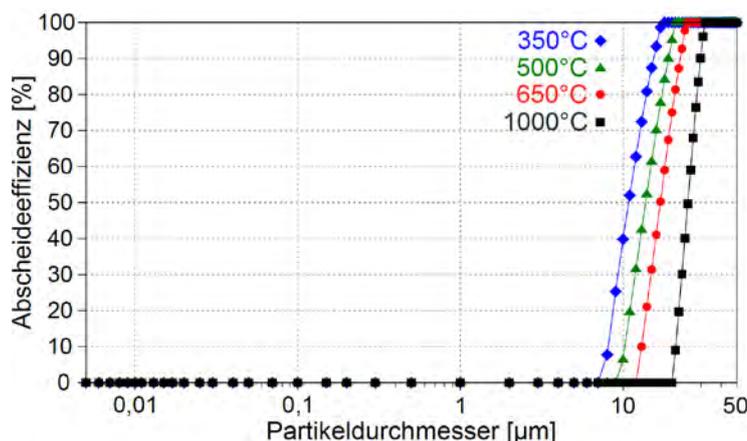


Abbildung 6: Abscheidecharakteristik des Impaktors ohne anschließende Membran für verschiedene Temperaturen.

Um von der im REM bestimmten größenabhängigen Partikelzahl auf der Membran auf die luftgetragene Größenverteilung der Partikel im Rauchgas rückzuschließen, ist es notwendig auch die Abscheideeffizienz der Membran selbst zu kennen. Dazu wurden weitere CFD-Simulationen durchgeführt. Die Ergebnisse für eine Membran mit 10 µm Porendurchmesser und 15 µm Dicke sind in Abbildung 7 gezeigt. Die verwendete Anströmgeschwindigkeit von 10 cm/s ist durch die Isokinetik und die Impaktorgeometrie vorgegeben. Die Berechnungen wurden im Temperaturbereich zwischen 350°C (vierter Zug) und 1000°C (erster Zug) durchgeführt.

Alle Partikel mit mehr als 10 µm geometrischem Durchmesser werden vollständig abgeschieden, da sie die Poren nicht passieren können. Für Partikel zwischen etwa 1 µm und 10 µm dominiert die Abscheidung durch die Trägheit der Partikel (Impaktion). Da die räumliche Ausdehnung der Partikel in der gleichen Größenordnung wie der Porendurch-

messer der Membranen liegt, wurde diese zusätzlich berücksichtigt (Interzeption). Zwischen etwa 100 nm und 1 µm zeigen die Kurven ein breites Minimum mit einer minimalen Effizienz von etwa 0,1%, da hier kein effizienter Abscheidemechanismus wirksam ist. Aufgrund der hohen Konzentration an Partikeln in diesem Größenbereich ist eine Auswertung der Daten nichtsdestotrotz möglich.

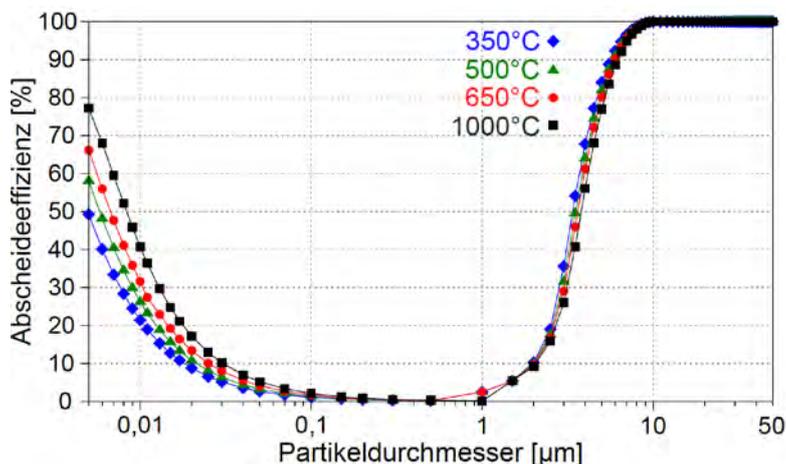


Abbildung 7: Abscheidecharakteristik der Membran ohne vorgeschalteten Impaktor für verschiedene Temperaturen.

Für noch kleinere Partikel steigt die Effizienz aufgrund von Diffusionsabscheidung wieder an. Basierend auf vorhandener Literatur zu ähnlichen Filtermaterialien [Manton1978, Manton1979] wurde eine Fit-Funktion zur mathematischen Beschreibung des Kurvenverlaufs entwickelt. Mit dieser können die im REM bestimmten Partikelzahlen gewichtet werden, um auf die luftgetragenen Konzentrationen rückzuschließen.

4. Erste Ergebnisse

Im Laufe einer Messkampagne wurden Proben an allen fünf in Abbildung 1 gezeigten Messstellen genommen. Die Auswertung der Daten ist zurzeit in Arbeit, sodass hier nur ein Überblick über vorläufige Ergebnisse aus Einzelmessungen gegeben werden kann.

Abbildung 8 zeigt qualitativ den Verlauf der Belegung der Filtermembran über die vier Züge. Alle Substrate wurden jeweils 20 s beprobt. In der gewählten Vergrößerung lässt sich gut die Belegung mit mittelgroßen Partikeln einschätzen. Während im ersten Zug nur eine sehr geringe Belegung mit solchen Partikeln zu verzeichnen ist, ist die Belegung im zweiten und dritten Zug deutlich höher. Die Membran im vierten Zug ist dominiert von Filterkuchen aus submikronen Partikeln, die sich haubenförmig über alle Poren setzen.

Mehr Details lassen sich auf den stärker vergrößerten Aufnahmen in Abbildung 9 erkennen. Im ersten Zug sind wiederum einige mittelgroße Partikel zu finden, während die Oberfläche weitgehend frei von kleineren Partikeln ist. Die Inhomogenitäten und die leicht körnige Struktur der Oberfläche sind auf Oxidation des Nickelsubstrats bei der hohen Temperatur von 1000°C zurückzuführen, die sich jedoch nicht negativ auf die Verwendbarkeit auswirkt.

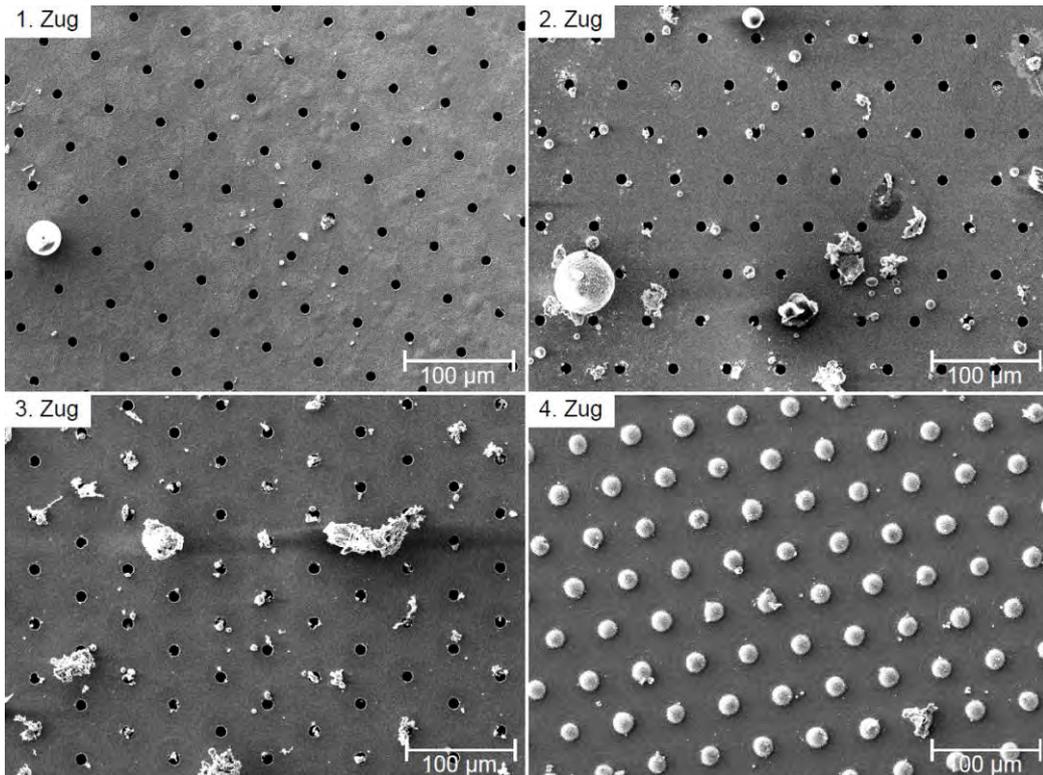


Abbildung 8: REM-Aufnahmen der auf der Membran abgeschiedenen Partikel in allen vier Zügen (Bildgröße jeweils 480 µm x 360 µm).

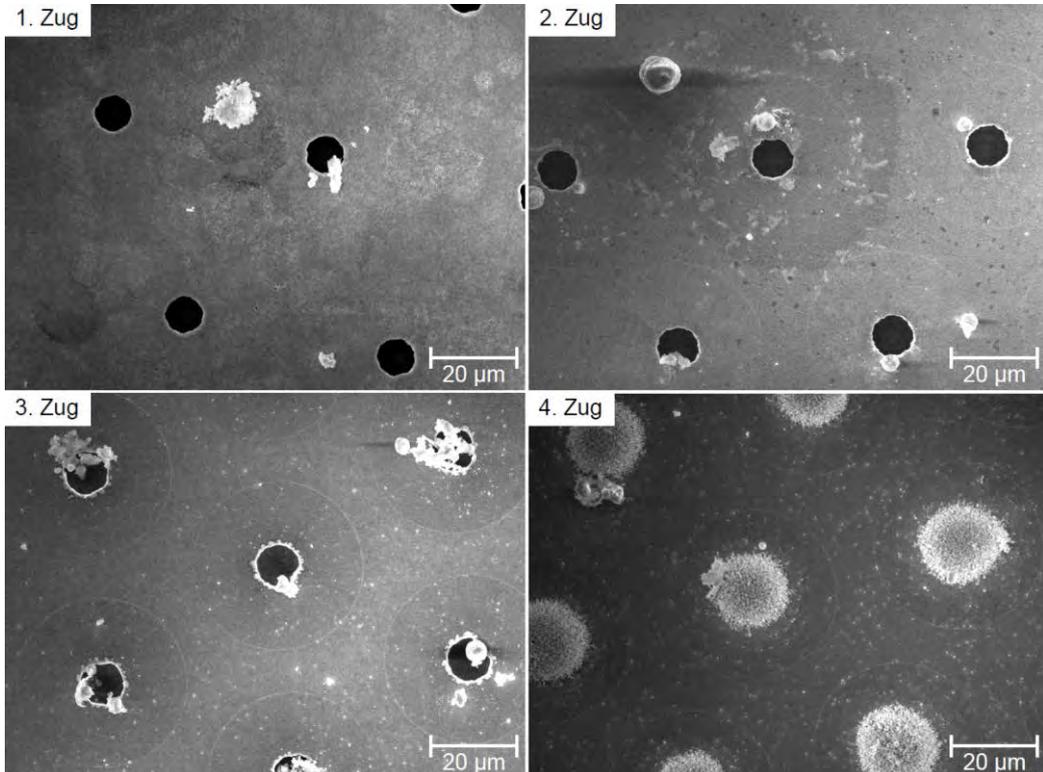


Abbildung 9: REM-Aufnahmen der auf der Membran abgeschiedenen Partikel in allen vier Zügen (Bildgröße jeweils 120 µm x 90 µm).

Auch im zweiten Zug ist die Oberfläche weitgehend frei von submikronen Partikeln. Eine Ausnahme bilden vereinzelt dunkel erscheinende konzentrische Bereiche um größere Partikel, die mit einer Ansammlung von kleinen Partikeln einhergehen. Diese Bereiche lassen sich als Reste einer schmelzflüssigen Hülle der Partikel interpretieren, die beim Auftreffen der Partikel zerfließt und teilweise als Partikel auskondensiert.

In dritten Zug sind bereits deutlich mehr submikrone Partikel auf der gesamten Membranfläche und insbesondere als Dekoration der Porenrändern zu finden. Im vierten Zug hat die Zahl der submikronen Partikel schließlich soweit zugenommen, dass sich bei der Probenahmedauer von 20 s bereits ein vollständiger Filterkuchen über den einzelnen Poren ausgebildet hat, wie bereits in Abbildung 8 zu erkennen war.

Als Zusammenfassung dieser qualitativen Analyse lässt sich sagen, dass Kondensationseffekte durch die Probenahme offenbar weitgehend unterdrückt werden können, da im ersten und zweiten Zug kaum submikrone Partikel zu finden sind. Im dritten und vierten Zug steigt die Zahl an kleinen Salzpartikeln jedoch deutlich an, da diese hier durch die Abkühlung im Kessel bereits auskondensiert sind.

Die mittelgroßen Partikel im Bereich einiger Mikrometer lassen sich mit der vorgestellten Methode effizient sammeln. Abbildung 10 zeigt dazu eine erste Bestimmung der Anzahl- und Massenkonzentrationen (unter Annahme kugelförmiger Partikel mit einer mittleren Dichte von 2200 kg/m^3) für eine Messung im zweiten Zug. Es wurden dabei zunächst lediglich Partikel mit Durchmessern größer $1 \mu\text{m}$ berücksichtigt.

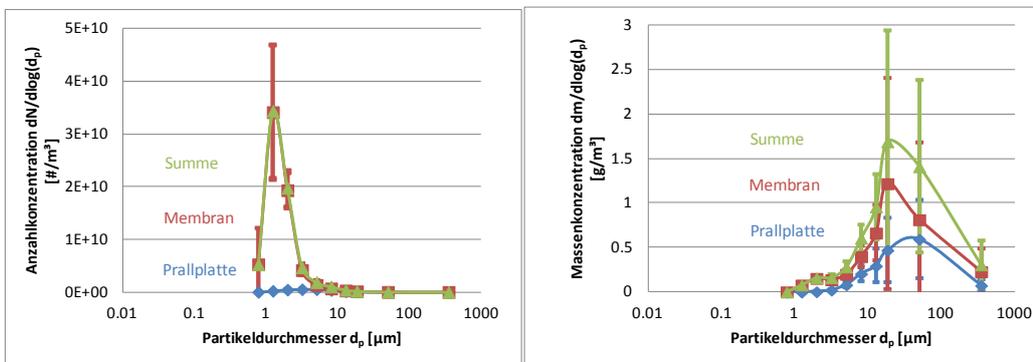


Abbildung 10: Exemplarische Anzahl- und Massenkonzentrationsverteilung im 2. Zug für Partikel größer $1 \mu\text{m}$.

Die Anzahlkonzentration der Partikel auf der Membran steigt zu kleineren Durchmessern hin kontinuierlich an bis zu einem Maximum bei etwa $2 \mu\text{m}$ (rote Kurve). Der Abfall in der untersten Größenklasse ist ein vorläufiges Artefakt durch die Festsetzung des Grenzdurchmessers von $1 \mu\text{m}$. Die Massenkonzentrationsverteilung wird dominiert von mittelgroßen Partikeln mit Durchmessern zwischen etwa 10 und $100 \mu\text{m}$. Deren aufsummierte Konzentration beläuft sich auf $(1,3 \pm 0,6) \text{ g/m}^3$ und ist somit von vergleichbarer Größenordnung wie die Konzentration im Einlasskrümmer der Verdünnungsmethode von 1 g/m^3 .

Neben den Partikeln auf der Membran wurden auch die Partikel auf der Prallplatte berücksichtigt (blaue Kurve in Abbildung 10). In der Massenkonzentration ergibt sich ein

ähnliches Bild wie bei der Membran. Die beiden Verteilungen können einfach summiert werden (grüne Kurve), um ein Gesamtbild über die Partikelkonzentration zu erhalten.

Abschließend sollen nun noch erste Ergebnisse der chemischen Partikelanalyse gezeigt werden, welche mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) durchgeführt wurde. Die Röntgenspektren wurden mit den Emissionslinien der relevanten Elemente gefittet und daraus die jeweiligen Massenanteile bestimmt. Da sich das gesamte Signal immer aus dem Signal des Partikels und einem Untergrundsignal zusammensetzt, wurde eine Separation in die beiden Anteile durchgeführt. Sauerstoff wurde nicht berücksichtigt, da er Bestandteil von Substrat und Partikel ist und somit nicht eindeutig separiert werden kann. Beispiele für Messungen in den ersten beiden Zügen sind in Abbildung 11 gezeigt.

Im ersten Zug ist die chemische Zusammensetzung im betrachteten Partikelgrößenbereich relativ konstant. Den größten Anteil machen Calcium und verschiedene Metalle/Halbleiter wie Magnesium, Aluminium, Silizium, Titan, Chrom, Eisen und Zink aus. Der geringe Anteil an Anionen wie Chlor, Schwefel, Phosphor und Fluor zeigt, dass die obigen Elemente zum größten Teil als Oxide vorliegen. Zudem finden sich nur sehr geringe Anteile an den Alkalimetallen Natrium und Kalium. Dies entspricht den Erwartungen, da Natrium- und Kaliumchlorid bei 1000°C nur gasförmig vorliegen sollten. Im Vergleich zur Verdünnungssonde, die auch im ersten Zug große Mengen an Salzen findet, konnte hier die unerwünschte Kondensation somit weitgehend unterdrückt werden.

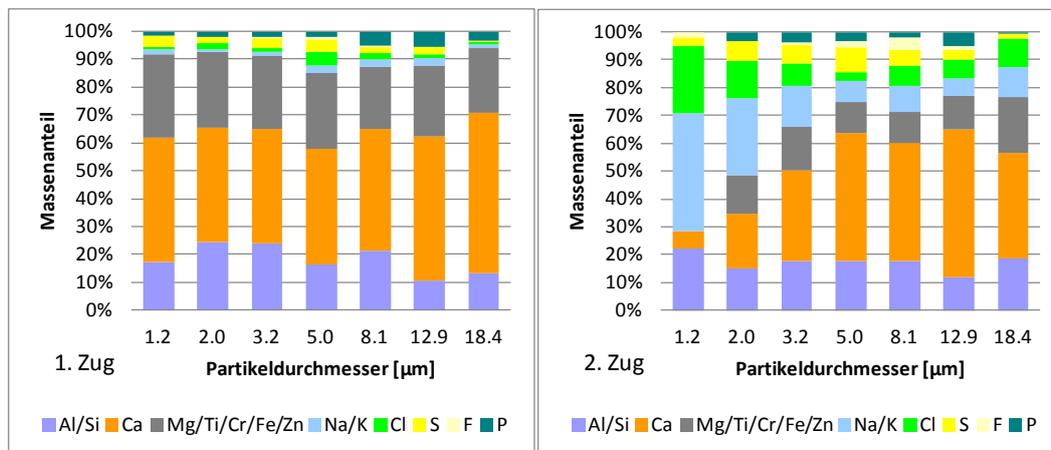


Abbildung 11: Größenaufgelöste chemische Partikelzusammensetzung im 1. und 2. Zug (ohne Berücksichtigung von Sauerstoff).

Im zweiten Zug sind bereits hingegen substantielle Mengen an Salzen vorhanden, da hier die Kondensation durch Abkühlung im Kessel bereits teilweise stattgefunden hat. Besonders hoch ist der Anteil an Salzen bei kleineren Partikeln. Die größeren Partikel zeigen eine ähnliche chemische Zusammensetzung wie im ersten Zug, jedoch mit leicht erhöhtem Salzanteil. Diese Beobachtung ist charakteristisch für das Aufkondensieren einer Salzsicht auf bereits vorhandene Partikel: Bei kleinen Partikeln macht sie einen größeren Anteil im Vergleich zum Volumen aus als bei größeren Partikeln, sodass für kleinere Partikel ein höherer Salzanteil als für größere Partikel zu erwarten ist.

5. Zusammenfassung

Mit dem Ziel der Erforschung der Korrosionsursache in Kesseln von Müllverbrennungsanlagen wurden zwei verschiedene Ansätze vorgestellt. Vergleichende Messungen an verschiedenen Anlagen mit einer Verdünnungssonde liefern Hinweise, dass mittelgroße Partikel mit Durchmessern zwischen 1 und 25 µm einen wesentlichen Beitrag zur Korrosion liefern. Für die Messung gerade dieser Partikel ist die Verdünnungsmethode allerdings schlecht geeignet, da die klebrigen Mikropartikel bereits im Einlasskrümmer abgeschieden werden. Zudem ist die Messung bei hohen Temperaturen durch die unvermeidbare Kondensation von Salzdämpfen beeinflusst.

Deshalb wurde eine zweite Methode zur direkten Partikelprobenahme im Heißgas entwickelt. Das temperatur- und korrosionsbeständige Design ermöglicht eine problemlose Mehrfachverwendung der Sonde. Mittels einer Prallplatte und einer galvanisch gewachsenen Nickelmembran als Probenträger konnten damit insbesondere effizient klebrige Mikropartikel gesammelt und untersucht werden. Die chemische Analyse zeigt, dass die Partikel nennenswerte Chloridanteile aufweisen und somit mit für die Korrosion verantwortlich sein können. Die Abscheidung an der Membran wurde mittels CFD simuliert, sodass für den gesamten relevanten Temperaturbereich Abscheidekurven zur Verfügung stehen. Mit deren Hilfe lassen sich aus den im REM gemessenen Partikelkonzentrationen die luftgetragenen Anzahl- und Massenkonzentrationsverteilungen bestimmen.

Als nächste Schritte erfolgen eine vollständige Auswertung der Daten, insbesondere der Anzahl- und Massenkonzentrationsverteilungen und chemischen Zusammensetzungen. Entscheidend ist hier auch die quantitative Erfassung der submikronen Partikel. Auf Basis der Daten lässt sich dann die Entwicklung der Partikelphase im Verlauf des Kessels umfassend charakterisieren. Durch Vergleichsmessungen an anderen Anlagen mit anderer Korrosionsrate ist es das Ziel, die korrosionsrelevanten Spezies zu identifizieren und entsprechende Maßnahmen zu deren Reduktion einzuleiten.

Literatur

C.F. Deuerling et al. (2010): *Aerosol Sci. Technol.* **44**, 1

M.J. Manton (1978): *Atmos. Environ.* **12**, 1669

M.J. Manton (1979): *Atmos. Environ.* **13**, 525

Danksagung

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

Wir danken Ilka Gehrke und Dennis Schlehuber vom Fraunhofer-Institut Umsicht in Oberhausen für die Empfehlung und Fertigung der galvanisch gewachsenen Nickelmembranen als Probenträger.