

# Untersuchungen zur Ableitung der Verschmutzungs- und Verschlackungsneigung unter Oxyfuel-Bedingungen am Beispiel von Lausitzer Trockenbraunkohle

Christopher Thiel, Martin Pohl, Michael Beckmann und Wolfgang Spiegel

1.	Einleitung.....	367
2.	Partikelgitternetzsonde .....	369
3.	Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse.....	372
4.	Zusammenfassung und Ausblick.....	374
6.	Literatur.....	375

Bei der Verbrennung fester Brennstoffe resultieren Verschmutzungs- und Verschlackungsvorgänge aus dem Zusammenspiel von Brennstoffeigenschaften und Prozessbedingungen. Der nachfolgende Beitrag zeigt Untersuchungen an aus zwei Oxyfuel-Anlagen unterschiedlicher Leistungsklassen gesammelten Partikeln und vergleicht diese hinsichtlich Morphologie und elementarer Zusammensetzung. Die Partikel wurden an mehreren Stellen entlang des Rauchgaswegs der beiden Anlagen mithilfe der Partikelgitternetzsonde gesammelt.

## 1. Einleitung

In Anlagen zur Verbrennung fester Brennstoffe treten unabhängig von Luft- oder Oxyfuel-Betriebsweise Verschmutzungs- und Verschlackungsphänomene auf, die auf das Zusammenwirken von Brennstoffeigenschaften und Prozessparametern zurückzuführen sind. Es bilden sich Beläge auf Strahlungsheizflächen und konvektiven Heizflächen, die den Wärmeübergang an Speisewasser bzw. Dampf beeinträchtigen, und zur Korrosion der eingesetzten Werkstoffe beitragen können. Beeinflusst werden die Verschmutzungs- und Verschlackungsvorgänge vor allem durch die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Brennstoffs (chemische Zusammensetzung, Anteil der flüchtigen Bestandteile, Heizwert, usw.) und hier besonders durch die inerten mineralischen Bestandteile. Daneben sind weitere Einflussgrößen wie Prozesstemperatur, Verweilzeiten oder Durchmischung von Bedeutung, die von den betriebsbedingten, feuerungstechnischen und konstruktiven Gegebenheiten der jeweiligen Anlagen abhängen.

Der mineralische Anteil des Brennstoffs besteht aus anorganischen Elementen, die entweder in organisch gebundener Form oder als Minerale vorliegen. Bei der Verbrennung werden diese Bestandteile als feste Partikel oder auch in flüssiger oder, bei Komponenten mit niedrigem Dampfdruck, gasförmiger Phase freigesetzt. Die Ablagerung erfolgt entweder durch Kondensation aus der Gasphase, abhängig von Partialdruck und Oberflächentemperatur, durch Thermophorese infolge hoher Temperaturgradienten im Rauchgas oder durch Auftreffen der flüssigen und festen Partikel auf den Heizflächen. Das Haftenbleiben

ist dabei abhängig von Masse und Geschwindigkeit der auftretenden Partikel, sowie einer gewissen Klebrigkeit von Partikel- oder Aufschlagsoberfläche. Demgegenüber steht eine gewisse Erosionsfähigkeit bei größerer Masse und Geschwindigkeit der Partikel und

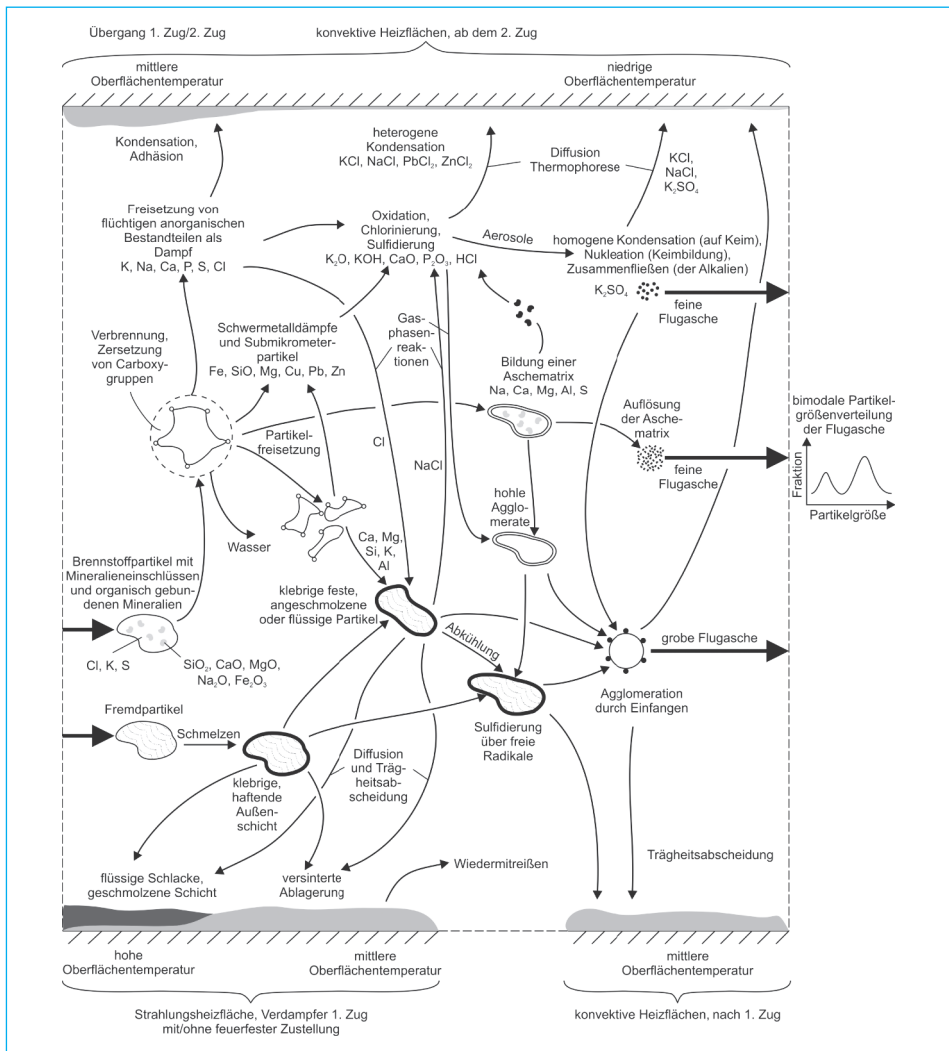


Abb. 1: Mechanismus der Umwandlung mineralischer Kohlebestandteile

aus: Grahl, S.: Charakterisierung von Ablagerungen an Membranwänden von Dampferzeugern. Technische Universität Dresden: Unveröffentlichte Dissertation, 2012

nach:

Byers, R. W.: Fireside Slagging, Fouling and High-Temperature Corrosion of Heat-Transfer Surface due to Impurities in Steam-Raising Fuels. Prog. Energy Combust. Sci. 1996, 22, S. 29-120

Kær, S. K.; Rosendahl, L. A.; Baxter, L. L.: Towards a CFD-based mechanistic deposit formation model. Fuel. 2006, 85, S. 833-848

Obernberger, I.; Brunner, T.; Jöller, M.: Characterisation and formation of aerosols and fly-ashes from fixed-bed biomass combustion. Nussbaumer, T. (Hrsg.): Aerosols from Biomass Combustion, International Seminar at 27 June 2001 in Zurich by IEA Bioenergy Task. 2001, S. 69-74

gleichzeitiger nicht klebriger Oberfläche. Auf die Oberfläche auftreffende Partikel treten also in Wechselwirkung mit bereits auf der Oberfläche haftenden Partikeln. Die Klebrigkeit wird vom Schmelzverhalten und damit der Zusammensetzung der Partikel bestimmt. Abbildung 1 gibt eine Übersicht über die verschiedenen Mechanismen bei der Freisetzung und Ablagerung mineralischer Brennstoffbestandteile. Eine detailliertere Beschreibung der Vorgänge ist z.B. bei Bryers [1] zu finden.

Um das Verschmutzungsverhalten eines Brennstoffs charakterisieren zu können, ist es wichtig die verschiedenen Partikel differenziert zu betrachten. Es gibt verschiedene Verfahren Asche hinsichtlich ihrer Partikel zu untersuchen. Die gängigsten Verfahren beruhen auf der Verwendung eines Rasterelektronenmikroskops gekoppelt mit dem Einsatz von Röntgenspektroskopie zur Analyse der Partikelzusammensetzung. Ein Überblick über die verschiedenen Methoden und die Entwicklung der letzten Jahre ist z.B. in [5] zu finden.

Ein von den Autoren entwickeltes Verfahren ist der Einsatz einer sogenannten Partikelgitternetzsonde, bei der die Partikel über ein engmaschiges Drahtgitternetz aus dem Rauchgasstrom abgesaugt werden [6]. Die Partikel lagern sich in den Maschen des Gitters und auf dem Draht an. Das Gitternetz wird anschließend mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) und Energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) hinsichtlich Morphologie und Zusammensetzung der Partikel untersucht. Die Partikelgitternetzsonde ist ursprünglich für den Einsatz in Müll- und Biomassekraftwerken entwickelt worden [7, 8]. Müll und Biomasse unterscheiden sich in ihren brennstofftechnischen Eigenschaften deutlich von Stein- und Braunkohle, weswegen die unmittelbare Übertragung auf Kohle gefeuerte Anlagen schwierig ist. Das Verfahren soll daher weiterentwickelt und auf die speziellen Anforderungen von Kohle gefeuerten Anlagen angepasst werden. Erste Ergebnisse wurden bereits in [9] gezeigt. Auch der Vergleich zwischen Luft- und Oxyfuel-Bedingungen ist dort bereits behandelt worden. Im vorliegenden Beitrag wird die Anwendung der Partikelgitternetzsonde auf Kohle gefeuerte Anlagen in verschiedenen Maßstäben am Beispiel einer Laboranlage mit 50 kW thermischer Leistung und einer Pilotanlage mit 30 MW thermischer Leistung ausgeweitet.

## 2. Partikelgitternetzsonde

Die Partikelgitternetzsonde besteht aus einer Absaugsonde, deren sich im Rauchgasstrom befindende Öffnung mit einem engmaschigen Drahtgitternetz bedeckt ist. Durch diese Öffnung wird der mit Partikeln beladene Rauchgasstrom an der zu untersuchenden Stelle aus der Anlage abgesaugt. Die Absaugzeit beträgt dabei etwa 5 Sekunden, abhängig von der Partikelbeladung des Rauchgases. Durch die kurze Zeitspanne bildet sich keine geschlossene Partikelschicht auf dem Gitternetz, stattdessen sind die einzelnen Partikel deutlich voneinander zu unterscheiden. Um unerwünschte Kondensations- und Desublimationseffekte zu vermeiden, wird die Gitternetzsonde vor Absaugung der Partikel auf die Rauchgastemperatur vorgewärmt. Beispiele für belegte Gitternetze aus verschiedenen Anlagen und nach Verbrennung von verschiedenen Brennstoffen zeigen Abbildung 2 und Abbildung 3. Bei den Aufnahmen handelt es sich um Sekundärelektronenbilder eines Rasterelektronenmikroskops bei 500-facher Vergrößerung.

Auf dem Gitternetz in Abbildung 2 sind Partikel verschiedener Form und Größe zu erkennen. Die Partikel befinden sich sowohl in den Maschen des Gitters als auch auf dem Draht. Die Partikelprobe wurde aus der Versuchsstaubfeuerungsanlage der TU Dresden bei der Verbrennung von Lausitzer Trockenbraunkohlenstaub unter Oxyfuel-Bedingungen und einer Rauchgastemperatur von 850 °C entnommen. Abbildung 3 zeigt dagegen deutliche Verkrustungen auf dem Drahtgitter. Einzelne größere Partikel kleben auf dem Draht, kleinere Partikel liegen in den Maschen. Diese Partikelprobe entstammt dem Versuchstand Batchreaktor bei Feuerung von mit NaCl dotierten Holzpellets.

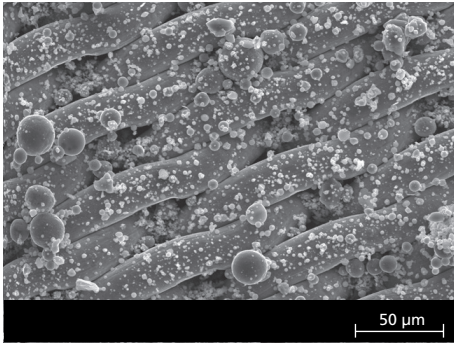


Abb. 2: Gitternetz Braunkohle VSF

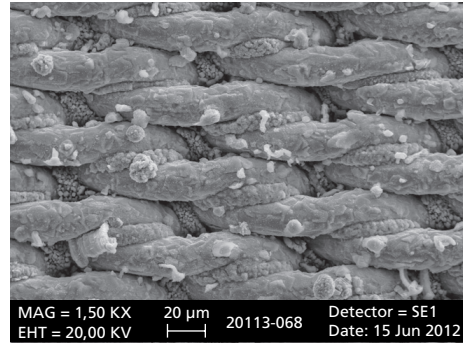


Abb. 3: Gitternetz NaCl-dotierte Holzpellets Batchreaktor

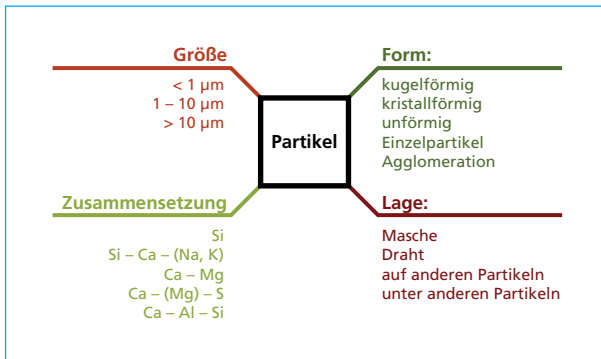


Abb. 4:

Klassifizierung der auf den Gitternetzen gefundenen Partikel

Um einen Brennstoff hinsichtlich seiner Verschmutzungs- und Verschlackungsneigung charakterisieren zu können, ist es sinnvoll die mit Hilfe der Gitternetzsonde gesammelten Partikel zu klassifizieren. Abbildung 4 zeigt ein Klassifizierungsschema hinsichtlich Größe, Form, Lage und elementarer Zusammensetzung der Partikel.

### Partikelgröße

Die Größe der Partikel variiert zwischen etwa 25 µm (auf manchen Partikelgitternetzen auch 50 µm) und < 1 µm. Sie werden in drei Größenklassen von > 10 µm, 1 µm bis 10 µm und < 1 µm eingeteilt. Eine quantitative Aussage zur Partikelgrößenverteilung lässt sich mit dieser Methode nicht treffen, die Ergebnisse sind rein qualitativ zu betrachten.

### Partikelform

Auch die Form der Partikel variiert. Es finden sich kugelförmige und kristalline sowie durch Schmelz- oder Sintervorgänge unförmig gewordene Partikel in allen Größenklassen. Die kugelförmige Gestalt der Partikel lässt darauf schließen, dass diese den schmelzflüssigen Zustand durchlaufen haben oder sich noch in diesem befinden. Kristalline Partikel waren zu keinem Zeitpunkt schmelzflüssig. Partikel können als Einzelpartikel auftreten oder, vor allem die Partikel der kleinen und mittleren Größenklasse, als Agglomeration von mehreren gleichartigen Partikeln.

### Lage der Partikel auf dem Gitternetz

Auf dem Gitternetz in Abbildung 3 ist zu sehen, dass auf dem Draht auffallend viele Partikel mit Durchmessern  $< 1 \mu\text{m}$  zu finden sind, wohingegen sich in den Maschen des Gitternetzes Partikel aller Größenordnungen befinden. Aufgrund der gewebeartigen Struktur des Gitternetzes ist zu erwarten, dass die Partikel bei der Absaugung aus dem Rauchgas dem Weg des geringsten Widerstandes folgen und demzufolge in den Maschen des Gitternetzes hängen bleiben. In der Tat finden sich auf allen untersuchten Partikelgitternetzen in den Maschen auch viele Partikel wieder. Allerdings sind auf allen untersuchten Partikelgitternetzen auch Partikel auf dem Draht des Gitternetzes zu finden. Damit ein Partikel auf einer glatten ebenen oder konvexen Oberfläche haften bleibt, muss entweder die Oberfläche des Partikels selbst *klebrig* sein oder das Partikel muss auf ein bereits auf der Oberfläche anhaftendes *klebriges* Partikel auftreffen. D.h. das Partikel muss sich in einer flüssigen bzw. schmelzflüssigen Phase mit vergleichsweise hoher Viskosität befinden. Die Lage der Partikel auf der Gitternetzsonde ist damit ein Indikator dafür, in welchem Zustand sich das Partikel befindet.

### Elementare Zusammensetzung

Die elementare Zusammensetzung der Partikel wird mittels Energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) bestimmt. Aufgrund der Streuung des im Gitternetzmaterial vorhandenen Eisens und der damit einhergehenden Beeinflussung der Ergebnisse wird das Element Eisen bei der Auswertung der EDX-Analyse vorerst vernachlässigt. Auch hinsichtlich der elementaren Zusammensetzung können wieder verschiedene Klassen definiert werden. Die bei den bisherigen Versuchen gefundenen Partikel bestehen neben Sauerstoff hauptsächlich aus

- Silizium,
- Silizium und Kalzium mit geringen Anteilen an Natrium und/oder Kalium,
- Kalzium und Magnesium,
- Kalzium und Schwefel, teilweise mit Magnesium oder
- Kalzium, Aluminium und Silizium.

Da die Zusammensetzung der mineralischen Bestandteile von Brennstoff zu Brennstoff stark variieren kann, ist davon auszugehen, dass diese Klassifizierung für jeden Brennstoff angepasst werden muss und weitere Klassen beinhalten kann.

Wie das Klassierungsschema zeigt sind die gefundenen Partikel sehr vielfältig. Abbildung 5 gibt verschiedene Beispiele. Eine der am häufigsten vorkommenden Partikelklassen sind große Kugeln mit hohen Massenanteilen an Kalzium und Magnesium (a, c, i, j, p) sowie Kalzium, Magnesium und Schwefel (n, o). Die sphärische Form deutet auf das Durchlaufen der schmelzflüssigen Phase hin. Die Partikel sind allerdings schon vollständig erstarrt und besitzen keine klebrige Oberfläche, worauf die Lage der meisten dieser Partikel in den Maschen des Gitternetzes hinweist (a, c, j, n). Die Partikel i, o und p befinden sich dagegen auf dem Draht. Allerdings ist zu erkennen, dass sich unter diesen noch andere, kleinere Partikel befinden, die die zum Haften notwendige klebrige Oberfläche bereitstellen. Auch die Tatsache, dass auf den großen Partikeln wenige kleine Partikel zu sehen sind, deutet darauf hin, dass die Oberfläche der großen Partikel nicht haftend ist.

Eine weitere Klasse bilden große Partikel mit sehr hohem Siliziumanteil, die klare kristalline Formen (b, g) aufweisen, aber auch eine unförmige Erscheinung haben können (m). Die kristalline Form deutet hier, im Gegensatz zu den kugelförmigen Partikeln, darauf hin, dass diese Partikel den schmelzflüssigen Zustand nicht erreicht haben.

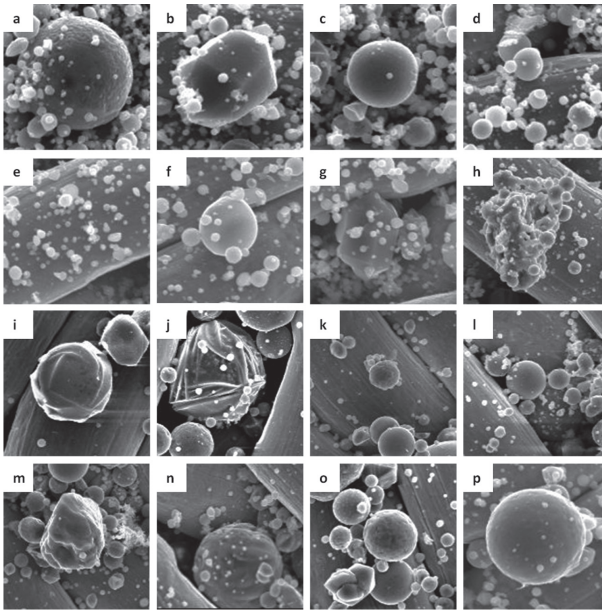


Abb. 5:

Auswahl verschiedener auf den Gitternetzsonden gefundenen Partikel

Partikel, die sich hauptsächlich aus Kalzium, Silizium und Aluminium (d, f, l), teilweise mit Anteilen von Natrium und Kalium (f, l), zusammensetzen, bilden mittlere bis große Kugeln. Sie sind tendenziell eher auf dem Draht zu finden, was auf eine klebrige Partikeloberfläche und damit einen niedrigeren Schmelzpunkt, als bei den ersten beiden betrachteten Klassen, hindeutet.

Bei Partikel h ist keine klare Form mehr erkennbar. Mehrere kleinere bis mittlere Partikel scheinen zu einem großen unförmigen Partikel zusammengeschmolzen zu sein. Dies weist auf einen niedrigen Schmelzpunkt hin, was auch die Lage des Partikels auf dem Draht erklärt, sowie die kleinen Partikel auf der Oberfläche. Die elementare Zusammensetzung des Partikels zeigt hohe Anteile an Kalzium, Magnesium und Schwefel.

Auf dem Draht finden sich vor allem kleine bis mittlere Partikel wieder (e, k). Die Form variiert von kugelförmig bis unförmig, dominierende Elemente sind Kalzium und Schwefel.

### 3. Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse

Die hier gezeigten Partikel wurden in verschiedenen Versuchen an zwei Anlagen unterschiedlicher Größe gesammelt. Die Versuchsstaubfeuerungsanlage (VSF) am Institut für Energietechnik der TU Dresden hat eine Feuerungswärmeleistung von 50 kW<sub>th</sub>. Die Anlage ist zur Verbrennung staubförmiger Brennstoffe ausgelegt und zur Abbildung des Oxyfuel-Prozesses mit einer Rezirkulationsstrecke ausgerüstet. Das Abgas wird vor der Rezirkulation mittels eines Gewebefilters entstaubt. Eine zusätzliche Entschwefelung oder Trocknung des Abgases erfolgt nicht. Details zur Anlage wurden bereits in [9] beschrieben. Die zweite in dieser Untersuchung verwendete Anlage ist die Oxyfuel-Forschungsanlage von Vattenfall in Schwarze Pumpe (OxPP) mit einer thermischen Leistung von 30 MW. Die Anlage besteht aus Luftzerlegungsanlage, Dampferzeuger, Elektrofilter, Rauchgasentschwefelungsanlage, Rauchgaskondensator und CO<sub>2</sub>-Reinigungs- und Verdichtungsanlage. Die Rückführung des Rauchgases zum Brenner des Dampferzeugers erfolgt mit heißer Rezirkulation nach Elektrofilter und vor Rauchgasentschwefelungsanlage. Eine detailliertere Beschreibung dieser Anlage ist in [10-14] zu finden.

Tabelle 1 zeigt die während der Versuche eingestellten Betriebsparameter beider Anlagen. Die Elementar- und Spurenanalyse der in den beiden Versuchsanlagen eingesetzten Kohlen ist in den Tabellen 2 und 3 aufgelistet. Die Ergebnisse der Elementaranalysen sind im analysefeuchten Zustand (an) angegeben, die der Spurenanalyse im wasserfreien Zustand (wf). Es handelt sich bei beiden Kohlen um schwefelarmen Trockenbraunkohlenstaub aus dem Lausitzer Braunkohlenrevier. Die Partikelproben wurden an Stellen mit unterschiedlichen Rauchgastemperaturen gesammelt (Tabelle 4).

	Einheit	VSF	OxPP
Thermische Leistung	kW	50	24.000
O <sub>2</sub> im Oxidanten	Vol.-%, f.	19 – 30	28
O <sub>2</sub> im Abgas	Vol.-%, tr.	5	6

Tab. 1:  
Betriebsparameter

	Einheit	VSF	OxPP
Kohlenstoff	Ma.-% (an)	56,20	57,75
Wasserstoff	Ma.-% (an)	4,09	4,38
Sauerstoff	Ma.-% (an)	22,58	23,05
Stickstoff	Ma.-% (an)	0,87	0,70
Schwefel	Ma.-% (an)	0,69	0,64
Wasser	Ma.-% (an)	9,84	7,45
Asche	Ma.-% (an)	5,73	6,04
Heizwert	MJ/kg (an)	20,875	22,192

Tab. 2:  
Elementaranalyse der eingesetzten Kohlen

	Einheit	VSF	OxPP
Natrium	Ma.-% (wf)	0,095	0,106
Magnesium	Ma.-% (wf)	0,343	0,366
Aluminium	Ma.-% (wf)	0,121	0,105
Silizium	Ma.-% (wf)	0,307	0,560
Chlor	Ma.-% (wf)	0,023	0,030
Kalium	Ma.-% (wf)	0,004	0,012
Kalzium	Ma.-% (wf)	0,928	1,012
Eisen	Ma.-% (wf)	1,075	1,206

Tab. 3:  
Spurenanalyse der eingesetzten Kohle

VSF		OxPP	
VSF-I	850 °C	Level 8	880 °C
VSF-II	200 °C	Level 10	550 °C
VSF-III	300 °C	Level 12	310 °C

Tab. 4:  
Rauchgastemperaturen an den jeweiligen Messstellen

Die Abbildungen 6 bis 9 zeigen Ergebnisse der Sondenversuche in beiden Anlagen. Auf allen Gitternetzen sind Partikel nach den oben aufgeführten Klassen zu finden. An den Messstellen mit den höheren Rauchgastemperaturen (850 °C, Abbildung 6 bzw. 880 °C, Abbildung 8) finden sich kalziumhaltige, kugelförmige Partikel auf den Gitternetzen. Partikel mit hohen Anteilen an Silizium haben dagegen eine kantige Form. Dies lässt darauf schließen, dass Partikel mit höheren Anteilen an Kalzium in der Feuerung bereits den geschmolzenen Zustand durchlaufen haben, wohingegen die Partikel mit hohen Anteilen an Silizium diesen

Zustand nicht erreicht haben. Die Gitternetze bei deutlich geringerer Rauchgastemperatur (Abbildung 7 und Abbildung 9) zeigen keine grundsätzlichen Veränderungen, d.h. es sind keine Partikel zu finden, die sich erst unterhalb einer Rauchgastemperatur von etwa 850 °C bilden. Dieses Ergebnis war zu erwarten, da die in beiden Versuchsanlagen verwendeten Kohlen nur geringe Anteile an Alkalien oder anderen leichtflüchtigen Elementen aufweisen. Der Vergleich von Groß- und Kleinanlage zeigt ähnliche Tendenzen hinsichtlich der gefundenen Partikel. Zur weiteren Entwicklung der Methode und zur abschließenden Beurteilung der Übertragbarkeit auf Kohle gefeuerte Großanlagen sind weitere Versuche auch mit anderen Brennstoffen sinnvoll.

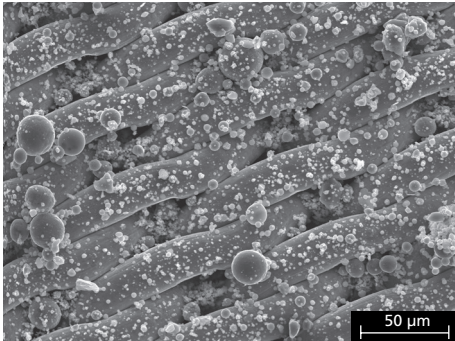


Abb. 6: VSF-I, 850 °C

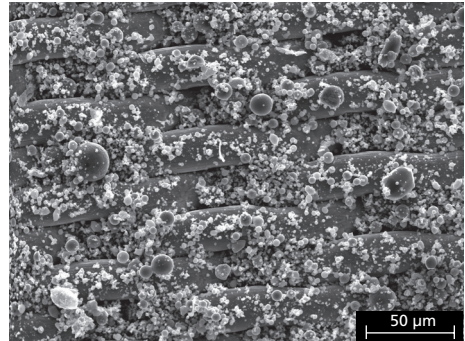


Abb. 7: VSF-II, 200 °C

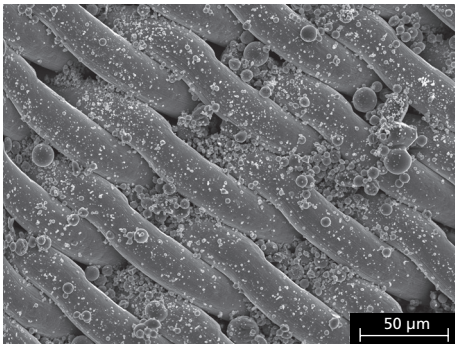


Abb. 8: OxPP Level 8, 880 °C

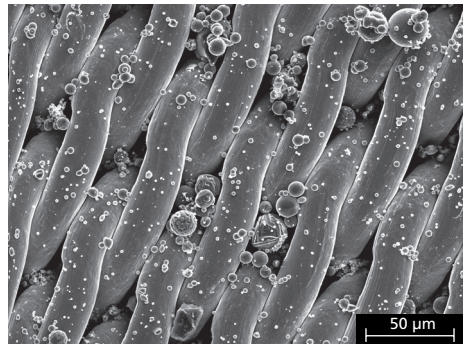


Abb. 9: OxPP Level 12, 310 °C

## 4. Zusammenfassung und Ausblick

Um das Verschmutzungs- und Verschlackungsverhalten von Brennstoffen zu charakterisieren, ist es wichtig das Zusammenspiel von Brennstoffeigenschaften und Prozessbedingungen zu betrachten. Eine Methode dies zu bewerkstelligen stellt die Partikelgitternetzsondentechnik dar. Dabei wird mit Partikeln beladenes Rauchgas über ein engmaschiges Gitternetz aus der zu untersuchenden Anlage abgesaugt. Die Partikel sammeln sich auf dem Gitternetz und können mittels REM und EDX-Spektroskopie hinsichtlich Morphologie und elementarer Zusammensetzung analysiert werden. Auch die Lage der Partikel auf dem Gitternetz spielt eine entscheidende Rolle. Anhand dieser Ergebnisse lassen sich die



gefundenen Partikel klassifizieren sowie Aussagen zur Umwandlungsgeschichte der einzelnen Partikel treffen. Mit der Partikelgitternetzsonde wurden Versuche an der 50 kW<sub>th</sub> Versuchstaubfeuerungsanlage der TU Dresden sowie der 30 MW<sub>th</sub> Oxyfuel-Forschungsanlage von Vattenfall unter Oxyfuel-Bedingungen durchgeführt. Auf allen Gitternetzen wurden ähnliche Partikel gefunden. Auch der Vergleich der Ergebnisse von Groß- und Kleinanlage zeigte jeweils ähnliche Tendenzen. Alle bisherigen Ergebnisse beruhen auf Versuchen mit Lausitzer Trockenbraunkohlenstaub als Brennstoff. Diese ersten Untersuchungen zeigen, dass die Erweiterung der Methode auf Kohle gefeuerte Anlagen sinnvoll erscheint und die Übertragbarkeit grundsätzlich möglich ist. Selbstverständlich erfordert dies weitere Untersuchungen mit verschiedenen Brennstoffen (Biomassen, Ersatzbrennstoffe, verschiedenartige Kohlen usw.) sowie Untersuchungen in Anlagen verschiedener Größenklassen (Laboranlage, Pilotanlage, kommerzielle Anlage).

### Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Verbundforschungsprojekts ADECOS-Komponenten. Die Autoren danken außerdem Herrn Ernst Bäucker für die Unterstützung bei den Analysen mit dem Rasterelektronenmikroskop sowie den Herren Uwe Burchhardt, Dr. Steffen Griebe und Rainer Giering für die Unterstützung bei den Versuchen an der Oxyfuel-Forschungsanlage von Vattenfall.

## 6. Literatur

- [1] Bryers, R. W.: Fireside Slagging, Fouling and High-Temperature Corrosion of Heat-Transfer Surface due to Impurities in Steam-Raising Fuels. *Prog. Energy Combust. Sci.* 1996, 22, S. 29-120
- [2] Grahl, S.: Charakterisierung von Ablagerungen an Membranwänden von Dampferzeugern. Technische Universität Dresden: Unveröffentlichte Dissertation, 2012
- [3] Kær, S. K.; Rosendahl, L. A.; Baxter, L. L.: Towards a CFD-based mechanistic deposit formation model. *Fuel.* 2006, 85, S. 833-848
- [4] Obernberger, I.; Brunner, T.; Jöller, M.: Characterisation and formation of aerosols and fly-ashes from fixed-bed biomass combustion. Nussbaumer, T. (Hrsg.): *Aerosols from Biomass Combustion*, International Seminar at 27 June 2001 in Zurich by IEA Bioenergy Task. 2001, S. 69-74
- [5] Frandsen, F. J.: Ash Research from Palm Coast, Florida to Banff, Canada: Entry of Biomass in Modern Power Boilers. *Energy & Fuels.* 2009, 23, S. 3347-3378
- [6] Pohl, M.; Berhardt, D.; Ncube, S.; Beckmann, M.; Spiegel, W.; Müller, W.: Diagnostic Methods into the Corrosion Potential of Alternative Fuels i.e. Biomass and Refuse Derived Fuels. Saariselkä (FIN) : 29.08.-03.09.2010. Proceedings of the Conference on Impacts of Fuel Quality on Power Production and Environment
- [7] Spiegel, W.: Analyse des Rohgases und der Kesselablagerung zur Beurteilung der Ersatzbrennstoffqualität. Thomé-Kozmiensky, Karl J.; Beckmann, M. (Hrsg.): *Energie aus Abfall*, Band 1. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2006, S. 441-458
- [8] Spiegel, W.; Herzog, T.; Jordan, R.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W. *Korrosion in Biomasseverbrennungsanlagen.* [Hrsg.] K. J. Thomé-Kozmiensky und M. Beckmann. *Energie aus Abfall - Band 5.* Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2008
- [9] Thiel, C.; Bernhardt, D.; Pohl, M.; Beckmann, M.: Kreislaufelemente bei einer 50 kW<sub>th</sub>-Braunkohlestaubfeuerung unter Oxyfuel-Bedingungen. Beckmann, M.; Hurtado, A. (Hrsg.): *Kraftwerkstechnik*, Band 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011, S. 117-130
- [10] Burchhardt, U.; Radunsky, D.: Erfahrungen aus der Planung und Genehmigung der Oxyfuel-Forschungsanlage von Vattenfall. Dresden: 39. Kraftwerkstechnisches Kolloquium. 2007, S. 212-223

- [11] Burchhardt, U.; Radunsky, D.; Jacoby, J.: Erfahrungen aus der Inbetriebnahme und erste Ergebnisse aus der Oxyfuel-Forschungsanlage von Vattenfall. Dresden: 40. Kraftwerkstechnisches Kolloquium, Band 1, 2008, S. 137-150
- [12] Burchhardt, U., Lysk, S., Kosel, D., Biele, M., Jacoby, J. Betriebserfahrungen und Ergebnisse aus der Oxyfuel-Forschungsanlage von Vattenfall. Beckmann, M.; Hurtado, A. (Hrsg.): Kraftwerkstechnik, Band 1. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009, S. 237-253
- [13] Burchhardt, U.; Lysk, S.; Kosel, D.; Griebe, S.; Kass, H.; Preusche, R.: Betriebserfahrungen aus zwei Jahren Testbetrieb der Oxyfuel-Forschungsanlage von Vattenfall. Beckmann, M.; Hurtado, A. (Hrsg.) Kraftwerkstechnik, Band 2. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010, S. 221-239
- [14] Burchhardt, U.; Griebe, S.; Kass, H.; Giering, R.; Preusche, R.: Erfahrungen aus dem Testbetrieb der Oxyfuel-Forschungsanlage von Vattenfall und Ausblick zur Oxyfuel-Technologie. Beckmann, M.; Hurtado, A. (Hrsg.): Kraftwerkstechnik, Band 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011, S. 51-70