

Brennstoffdiagnose mit Hilfe der PartikelGitterNetzSonde

Martin Pohl, Christopher Thiel, Michael Beckmann und Wolfgang Spiegel

1.	Einleitung	115
2.	Hintergrund der Betrachtungen	116
3.	Charakterisierung der mineralischen Bestandteile im Abgas.....	118
4.	Methode der Partikelgitternetzsonde zur Charakterisierung der mineralischen Substanz im Abgas.....	121
5.	Einsatz der Partikelgitternetzsonde	125
5.1.	Allgemeiner Überblick zum Einsatz der Partikelgitternetzsonde	125
5.2.	Experimentelle Untersuchungen von modifizierten Biomasse-Brennstoffen im Batch-Reaktor	127
5.3.	Experimentelle Untersuchung einer Kohle unter Oxyfuel-Bedingungen in unterschiedlichen Anlagen	130
6.	Zusammenfassung und Ausblick	132
7.	Quellen	133

Bei der Verbrennung fester Brennstoffe resultieren Verschmutzungs-, Verschlackungs- und Korrosionsvorgänge aus dem Zusammenspiel von Brennstoffeigenschaften und Prozessbedingungen. Insbesondere die mineralischen Bestandteile sind hierfür verantwortlich. Mit der Methode der Partikelgitternetzsonde¹ können die mineralischen Bestandteile in Abhängigkeit von Konzentration und Temperatur entlang des Abgaswegs sichtbar gemacht und charakterisiert werden. Der nachfolgende Beitrag stellt die Methode vor und zeigt Ergebnisse von Untersuchungen in unterschiedlichen Anlagen beim Einsatz von biogenen als auch fossilen Brennstoffen.

1. Einleitung

Aus ökologischer, aber auch aus ökonomischer Sicht ist es erforderlich, eine hohe Energieeffizienz und eine hohe Verfügbarkeit der Strom- und Wärmeerzeugung in Brennstoff befeuerten Kraftwerken zu erzielen. Vor allem beim Einsatz von Biomassebrennstoffen, Ersatzbrennstoffen und Abfällen stehen diesen Zielen die Belagsbildung und das damit verbundene Korrosionspotential dieser Brennstoffe gegenüber.

¹ Zum Patent angemeldet

Das Belagsbildungs- und Korrosionspotential wird zunächst bestimmt durch die aus dem Brennstoff freigesetzten festen, flüssigen und gasförmigen mineralischen Komponenten, welche sich auf den kälteren Wärmeübertragungsheizflächen absetzen, damit Beläge bilden und ihre korrosive Wirkung entfalten. Für eine Bewertung der korrosiven Wirkung der entstehenden Beläge sind dabei detaillierte Kenntnisse der entsprechenden Vorläufersubstanzen (charakterisiert z.B. durch Form, Größe, Aggregatzustand und Chemie der Partikel) von Bedeutung. Im realen Anlagenbetrieb werden die ablaufenden Teilschritte von der Freisetzung korrosiver Substanzen über die Ablagerung auf den Rohrwänden/Rohren bis hin zur Abzehrung der Rohre der Wärmeübertrager durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst.

Eine Möglichkeit diese freigesetzten mineralischen Substanzen in Abhängigkeit von Konzentration und Temperatur entlang des Abgaswegs sichtbar zu machen und zu beurteilen, ist die von den Autoren entwickelte Methode der Partikelgitternetzsonde.

Zur Entnahme der mineralischen Substanz im Abgas wird ein Köpertressengewebe als Substrat genutzt. Dieses Gewebe, bezeichnet als Partikelgitternetz, ist gleichzeitig Proben-träger bei der Analyse der abgelagerten Bestandteile mit Hilfe von Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX), d.h. die Ablagerungen auf dem Gewebe können, so wie sie entnommen wurden, sichtbar gemacht werden. Direkt ablesen lassen sich auf der belegten Partikelgitternetzsonde grundlegende Partikeleigenschaften wie Größe und Grundform. Durch Punkt- und Flächenmessungen mit Hilfe von REMEDX können chemische Analysen einzelner Partikel und Partikel-Ansammlungen durchgeführt werden und damit die elementare Zusammensetzung der Partikel direkt bestimmt werden.

2. Hintergrund der Betrachtungen

Bei der Verbrennung eines Brennstoffes finden neben der Umwandlung der organischen Brennstoff-Substanz und einer damit einhergehenden Energiefreisetzung auch Prozesse in der nichtbrennbaren mineralischen Substanz² statt. Die stattfindenden Prozesse lassen sich wie folgt einteilen [1]:

- Zersetzung von Mineralien in einfachere Verbindungen (z.B. CaCO_3 in CaO),
- Bildung von neuen Mineralien in der Verbrennungszone,
- Verschmelzung, Verflüssigung und
- Verflüchtigung (Sublimation) einzelner Verbindungen und Bildung von Aerosolen.

Diese Prozesse finden nicht getrennt voneinander statt, sondern stehen in Wechselwirkung miteinander, in Abhängigkeit von den jeweiligen Prozessbedingungen. Die jeweils dominierenden Prozesse sind dabei abhängig von den chemischen Eigenschaften und der Bindung (leicht oder stark verwachsen mit der Brennstoffsubstanz, gebunden als anorganische Substanz in der organischen Brennstoffsubstanz oder als Fremdstoff) der mineralischen Substanz des jeweiligen Brennstoffes.

² Mineralische Bestandteile: Unter dem Begriff *Mineralstoff* versteht man eigentlich nur die Minerale selbst, nicht dagegen die gesamte anorganische Substanz (u.a. Schwermetalle), die wie später noch erläutert z.B. auch organisch gebunden vorliegen kann (z.B. durch Pflanzen aufgenommene Nährstoffe). Im Rahmen dieses Beitrages werden die anorganischen und die mineralischen Bestandteile zusammen als mineralische Substanz bezeichnet.

Bei der Betrachtung des Belagsbildungs- und Korrosionsverhaltens eines Brennstoffes sind demnach, neben den belagsbildenden- und korrosionsrelevanten Komponenten in der mineralischen Substanz des Brennstoffes, die abhängig von Haupteinflussgrößen [2] des Verbrennungsprozesses:

- in das Abgas freigesetzten festen, flüssigen und gasförmigen mineralischen Bestandteile,
- die sich daraus im weiteren bildenden Beläge auf den Wärmeübertragungsflächen und
- die Interaktion der Belagsbestandteile mit den Werkstoffen

zu betrachten.

Die Partikelfreisetzung bei der Verbrennung erfolgt im Allgemeinen dadurch, dass Partikel (fest oder schmelzflüssig) aufgrund z.B. der Strömungsgeschwindigkeit mitgerissen werden. Mineralische Bestandteile können aber, wie weiter vorn beschrieben, auch gasförmig freigesetzt werden und dann Aerosole, durch den Aggregatswechsel bilden.

Der Transport der mineralischen Bestandteile zur Rohrwand bzw. zum Rohr und die Ablagerung erfolgt grob entweder durch [3, 4, 5]:

- Impaktion und Interzeption, also durch Auftreffen der flüssigen und festen Partikel,
- Thermophorese (Thermodiffusion) infolge hoher Temperaturgradienten im Abgas und
- Diffusion der desublimierbaren bzw. kondensierbaren Bestandteile in der Gasphase.

Darüber hinaus muss davon ausgegangen werden, dass weiteren Abscheidemechanismen, wie Gravitation, Wirbelträchtigkeit, Elektrophorese, Scherkraft und Koagulation [6], ebenfalls eine gewisse Bedeutung zukommt.

Die Voraussetzungen zur Haftung von Partikeln an Oberflächen sind gegeben, wenn folgende zwei Bedingungen erfüllt sind:

- Die Haftenergie, welche bei der Ablösung zu überwinden ist, muss größer sein, als die aus dem elastisch-plastischen Stoß zur Verfügung stehende elastische Energie.
- Die Haftkraft, welche das Partikel an der Oberfläche festhält, muss größer sein, als die von der Strömung auf das Partikel ausgeübte Trennkraft.

Das Haftenbleiben bei der Berührung der Ablagerungsoberflächen ist demnach abhängig von Masse und Geschwindigkeit (Impuls) der auftreffenden Partikel, sowie einer gewissen *Klebrigkeit* (Haftkraft) von Partikel- oder Aufschlagsoberfläche.

Das Spektrum der Beläge reicht dabei von einem recht lockeren, hochporösen Aufbau über eine versinterte, weniger poröse Struktur, bis hin zu schmelzflüssigen Ablagerungen. Das damit verbundene Korrosionspotential ist dabei wesentlich von der stofflichen Zusammensetzung der Ablagerung sowie deren Temperaturniveau, dem Temperaturgradient und den Stofftransportvorgängen (z.B. Diffusion, Partialdrücke usw.) abhängig. Innerhalb der Beläge hängen die korrosiven Eigenschaften vor allem

von den auftretenden Elementverbindungen, dem vorliegenden Aggregatzustand und der für Reaktionen notwendigen Aktivierungsenergie ab. Somit existiert ein qualitativer, wechselseitig wirkender Zusammenhang zwischen der Bildung und dem Aufbau von Ablagerungen, den auftretenden Korrosionserscheinungen sowie der in der Belagsschicht vorliegenden Verteilung der Temperatur und entsprechend auch der Wärmestromdichte [7].

Die Beläge behindern die Wärmeübertragung im Dampferzeuger, was zu einer Verschiebung des Temperaturprofils im Dampferzeuger und zu einer Erhöhung der Austrittstemperatur des Abgases aus dem Dampferzeuger führen kann. Insbesondere hinsichtlich des störungsfreien Betriebs der nachgeschalteten Apparate der Abgasreinigung führt die Erhöhung der Abgastemperatur dazu, dass die geplanten Reisezeiten nicht erreicht werden (Verringerung der Verfügbarkeit). Aufgrund der höheren Abgastemperaturen erhöhen sich auch die Abgasverluste und damit sinkt der Wirkungsgrad der Anlage über die Reisezeit (Verringerung der Energieeffizienz). Stattfindende Korrosionserscheinungen führen zu einem Materialabtrag der wasser- bzw. dampfführenden metallischen Werkstoffe und haben somit ebenfalls Einfluss auf die Verfügbarkeit und bedingen auch einen höheren Instandhaltungsaufwand.

Eine Risikoabschätzung des Belagsbildungs- und Korrosionspotentials beim Einsatz eines Brennstoffes ermöglicht es Entscheidungen zur Brennstoffauswahl, -aufbereitung und -mischung zu treffen. Grundsätzlich bestehen Möglichkeiten, eine Diagnose zum Belagsbildungs- und Korrosionspotential von Brennstoffen vor, während und nach dem Einsatz des Brennstoffes in einem Kraftwerk durchzuführen. Unterschieden werden kann dabei grob in:

- Diagnose am Brennstoff,
- Diagnose im Kraftwerks-Betrieb und
- Diagnose durch stetige Begleitung bei Stillständen.

3. Charakterisierung der mineralischen Bestandteile im Abgas

In Abbildung 1 sind die Kategorien und die jeweiligen Merkmale zur Charakterisierung der mineralischen Bestandteile im Abgas dargestellt. Auf diese wird im Folgenden näher eingegangen. Die Charakterisierung der mineralischen Bestandteile bildet dabei die Grundlage zur Bewertung des Belagsbildungs- und Korrosionspotentials der im Abgas vorhandenen mineralischen Bestandteile.

Die Systematik hinsichtlich der Bindung der mineralischen Bestandteile im Brennstoff wurde in [8] bereits vorgestellt. Demnach kann die im Brennstoff gebundene mineralische Substanz in

- anorganische Bestandteile in den organischen Verbindungen der Brennstoffsubstanz,
- mineralische Bestandteile in der organischen Substanz (grob zu unterteilen in Salze und Oxide, Silikate, Carbonate usw.) und
- Fremdstoffe (isolierte Partikel)

unterteilt werden. Neben der mineralischen Substanz im Brennstoff sind weitere Stoffströme (Einsatzstoffe) zu betrachten, welche einen Einfluss auf die sich im Abgas befindenden mineralischen Bestandteile haben. Zu nennen sind dabei die zusätzlich zugeführten Hilfsstoffe (Additive) z.B. zur Heißgasentschwefelung, zur Intensivierung der Sulfatierungsprozesse oder zur Einbindung von Alkalien in der Aschematrix, welche als einfache oder komplexe mineralische Verbindungen zugeführt werden können und das Oxidationsmittel. Das Oxidationsmittel kann dabei direkt durch z.B. in der Luft (aus anthropogenen und natürlichen Quellen [9]) vorhandene Aerosole oder durch eine Abgasrückführung (z.B. ohne vorherige Entstaubung) zur Erhöhung der Partikelfracht im Abgas beitragen oder indirekt durch die sich einstellenden Prozessbedingungen bei der Zugabe des Oxidationsmittels und den dadurch stattfindenden Prozessen (Freisetzung, Verflüchtigung) in der mineralischen Substanz bei der Verbrennung des Brennstoffes.

Zuführung von mineralischen Bestandteilen in die Anlage				
Einsatzstoff (Herkunft)	Brennstoff	Hilfsstoffe (Additive)		Oxidationsmittel
Mineralische Substanz im Brennstoff (Bindung, Chemie)	anorganische Bestandteile in den organischen Verbindungen der Brennstoffsubstanz	mineralische Bestandteile in der organischen Brennstoffsubstanz		Fremdstoffe
		Salze	Oxide, Silikate, Carbonate	
Mineralische Substanz in Hilfsstoffen (Additive)	einfache Verbindungen		komplexe Verbindungen	
Mineralische Substanz im Oxidationsmittel	in der zugeführten Luft (auch z.B. sauerstoffangereicherte Luft) als Oxidationsmittel vorhandene mineralische Bestandteile			Mineralische Bestandteile im rückgeführten Abgas
	aus anthropogenen Quellen (Industriestäube, Ruß, ...)	aus natürlichen Quellen (Bodenstaub, Seesalz, Vulkanstaub, ...)		
Umwandlung der mineralischen Bestandteile abhängig von den Prozessbedingungen				
Partikel-freisetzung; Partikelbildung und Wachstum	durch die jeweiligen Bedingungen mitgerissene Partikel (Strömung)		gasförmige Freisetzung	
			Koagulation, Nucleation, Agglomeration	Kondensation, Desublimation
Nachreaktionen der freigesetzten Partikel (z.B. mit dem Abgas oder der Partikel untereinander usw.)				
Aggregatzustand	fest	flüssig (schmelzflüssig)	gasförmig (nicht gesättigt, gesättigt bzw. übersättigt)	
Größe	grob bis sehr grob (> 10 µm)	fein (1 µm bis 10 µm)	sehr fein (< 1 µm)	
Grundform	sphärisch		kristallförmig	unregelmäßig geformt
	als Einzelpartikel		als Agglomeration	
Chemie	chemische Elemente und Verbindungen			
Transport zur Oberfläche (Ablagerung)	Diffusion (Temperatur- und Konzentrationsgradient)	Impaktion	Andere (z.B. Gravitation, Wirbelträchtigkeit, Elektrophorese, Scherkraft und Koagulation)	

Abb. 1: Kategorien und Merkmale zur Beschreibung der mineralischen Substanz im Abgas (zwischen den einzelnen horizontalen Untergliederungen bestehen zunächst keine vertikal ablesbaren Beziehungen)

Quelle: Pohl, M.: Methode zur Charakterisierung der freigesetzten mineralischen Bestandteile eines Brennstoffs mit Hilfe der Partikelgitternetzsonde. In: Diss. (eingereicht), Technische Universität Dresden, 2013

Im Weiteren werden Kategorien vorgestellt, welche es ermöglichen mineralische Bestandteile im Verbrennungsabgas zu charakterisieren, also nach der Umwandlung der mineralischen Substanz im Brennstoff, welche wiederum von den Prozessbedingungen abhängig ist.

Partikelfreisetzung, Partikelbildung und Wachstum

Die Partikelfreisetzung bei der Verbrennung erfolgt im Allgemeinen dadurch, dass

- Partikel (fest oder schmelzflüssig) aufgrund der Strömungsbedingungen mit dem Abgas mitgerissen werden oder
- mineralische Bestandteile aufgrund der stattfindenden Umwandlung bei der Verbrennung oder direkt bei der Verbrennung, gasförmig freigesetzt werden und dann Aerosole durch Aggregatswechsel bilden. Die Aggregatswechsel, d.h. die Bildung und weiterführend das Wachstum der Partikel (Nucleation, Koagulation, Agglomeration) findet aufgrund von Kondensations- und/oder Desublimationsprozessen statt.

Aggregatzustand

Aus der Freisetzung und Bildung kann abgeleitet werden, dass die mineralischen Bestandteile im Abgas fest, flüssig oder gasförmig (im Abgas gelöste Dämpfe, die abhängig vom Partialdruck und der Temperatur bei Erreichen der Sättigungstemperatur (bzw. bei Übersättigung), Partikel durch Aggregatswechsel bilden) vorliegen können.

Größe

Die Partikel im Abgas lassen sich nach der Größe kategorisieren. Die Unterteilung kann dabei in grobe bis sehr grobe Partikel ($>10\ \mu\text{m}$), feine Partikel ($1\ \mu\text{m}$ bis $10\ \mu\text{m}$) und sehr feine Partikel ($<1\ \mu\text{m}$) erfolgen. Feine bis sehr grobe Partikel sind meist Partikel, welche mit dem Abgas mitgerissen wurden, wobei sehr feine Partikel meist Partikel sind, welche sich aus der Gasphase gebildet haben. Diese können aber auch zu feinen Partikeln ($>1\ \mu\text{m}$ bis $10\ \mu\text{m}$) anwachsen (Agglomeration, Koagulation). Im Weiteren unterscheidet sich der Transport der Partikel zu den Ablagerungsoberflächen hinsichtlich der Größe, was ebenfalls mit den drei groben Größenmerkmalen beschrieben werden kann, darauf wird später noch näher eingegangen.

Grundform

Die Partikel im Abgas können verschiedene Grundformen aufweisen. Diese können in sphärische Partikel, kristallförmige Partikel und in unregelmäßig geformte Partikel unterteilt werden. Sphärische Partikel können z.B. Silikatschmelzkügelchen sein, d.h. durch schnelle Aufheizung und folgender Abkühlung gebildete Tröpfchen. Als kristallförmige Partikel werden regelmäßig geformte Partikel bezeichnet, diese können z.B. schon in kristalliner Form im Brennstoff vorliegen (z.B. Quarzsand). Die unterschiedlich geformten Partikel können als Einzelpartikel im Abgas oder als Agglomeration einzelner oder mehrerer Partikel vorliegen. Agglomerierte Partikel haften aneinander, das Haften kann dabei über Festkörperbrücken (Sinter- und Schmelzbrücken, oder aufgrund von

auskristallisierten Bindemitteln) oder Anziehungskräfte ohne Materialbrücke (van der Waals Kraft, elektrostatisch) erfolgen [11].

Chemie

Neben den genannten Kategorien ist die Chemie hinsichtlich der jeweiligen Elemente und Verbindungen eine weitere Kategorie zur Beschreibung der mineralischen Substanz im Abgas. Die Chemie der mineralischen Substanz bestimmt maßgeblich das Verhalten dieser hinsichtlich der stattfindenden Aggregatswechsel.

Insbesondere Alkali- und Schwermetalle in Verbindung mit Chlor oder Schwefel können gasförmig im Abgas transportiert werden und auf dem Abgasweg in Partikel umgewandelt werden. Bei den fest bzw. flüssig freigesetzten Partikel (mit dem Abgas mitgerissen Partikel) handelt es sich meist um Gläser, Oxide, Silikate usw..

Transport zur Oberfläche (Ablagerung)

Die bei der Kategorisierung der Partikelgrößen schon erwähnte Kategorie des Transportes zur Ablagerungsoberfläche kann wie folgt unterteilt werden:

- Diffusionstransport aufgrund von Temperatur- oder Konzentrationsgradienten, Trägheitsabscheidung durch Impaktion, wobei der Übergang zwischen beiden Mechanismen als fließend zu betrachten ist und
- andere Mechanismen, wie z.B. Gravitation, Wirbelträgheit, Elektrophorese, Scherkraft und Koagulation.

Die Impaktion ist vor allem für grobe bis sehr grobe Partikel ($>10\ \mu\text{m}$) der Haupttransportmechanismus zu den Oberflächen, hingegen ist die Diffusion der Haupttransportmechanismus für sehr feine Partikel ($<1\ \mu\text{m}$) bzw. für die als Dampf vorliegenden gasförmig gelösten mineralischen Bestandteile im Abgas.

Die Ablagerung erfolgt grob also entweder durch Desublimation und Kondensation aus der Gasphase, abhängig von Partialdruck und Oberflächentemperatur, durch Thermophorese infolge hoher Temperaturgradienten im Abgas oder durch Auftreffen der flüssigen und festen Partikel auf den Heizflächen (Impaktion). Das Haftenbleiben ist dabei abhängig von Masse und Geschwindigkeit (Impuls) der auftreffenden Partikel, sowie von einer gewissen Klebrigkeit der Partikel- oder Aufschlagsoberfläche. Die Klebrigkeit wird vom Schmelzverhalten (Kategorie Aggregatzustand), also über die Temperatur und die Zusammensetzung (Kategorie Chemie) der Partikel, bestimmt.

Mit Hilfe dieser hier vorgestellten Kategorien und den dazugehörigen Merkmalen lassen sich die im Abgas mitgeführten mineralischen Bestandteile charakterisieren. Diese Kategorien werden im Weiteren dazu genutzt, um die mit Hilfe der Partikelgitternetzsonde erfassten mineralischen Bestandteile im Abgas zu charakterisieren.

4. Methode der Partikelgitternetzsonde zur Charakterisierung der mineralischen Substanz im Abgas

Zur Entnahme der mineralischen Substanz im Abgas wird ein Köpertressengewebe als Substrat genutzt. Dieses Gewebe, bezeichnet als Partikelgitternetz, ist gleichzeitig

Probenträger bei der Analyse der abgelagerten Bestandteile mit Hilfe von REM-EDX, d.h. die Ablagerungen auf dem Gewebe können, so wie sie entnommen wurden, sichtbar gemacht werden. Direkt ablesen lassen sich auf der belegten Partikelgitternetzsonde, nach der Vergrößerung z.B. mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskopes (REM), die Größe und die Grundform der abgelagerten Partikel. Durch Punkt- und Flächenmessungen mit Hilfe von REM-EDX können chemische Analysen einzelner Partikel und Partikel-Ansammlungen durchgeführt werden, d.h. die Chemie der Partikel kann auch direkt bestimmt werden.

Im Folgenden werden die Mechanismen der Ablagerung der im Abgas transportierten mineralischen Substanz auf der Partikelgitternetzsonde beschrieben. Der Transport zur Ablagerungsoberfläche ist dabei eine Kategorie zur Beschreibung der mineralischen Substanz im Abgas. Mit Hilfe der im Folgenden dargestellten Ablagerungsmechanismen sind aufgrund der Lage der mit der Partikelgitternetzsonde erfassten mineralischen Bestandteile im Abgas weitere Aussagen hinsichtlich der Charakterisierung dieser möglich.

Das Partikelgitternetz besteht, wie beschrieben, aus gewebten Metalldrähten in Köpertressenbindung mit einem Drahtdurchmesser (Schussdraht) von etwa 20 µm. Charakteristisch bildet sich zwischen den obenliegenden zwei nahezu parallel, s-förmig verlaufenden Schussdrähten (im Weiteren als Drahtoberfläche bzw. Draht bezeichnet) eine Masche mit Poren aus (im Weiteren als Masche bezeichnet). Die Gewebeoberfläche kann somit in Masche und Draht unterteilt werden (siehe Abbildung 2).

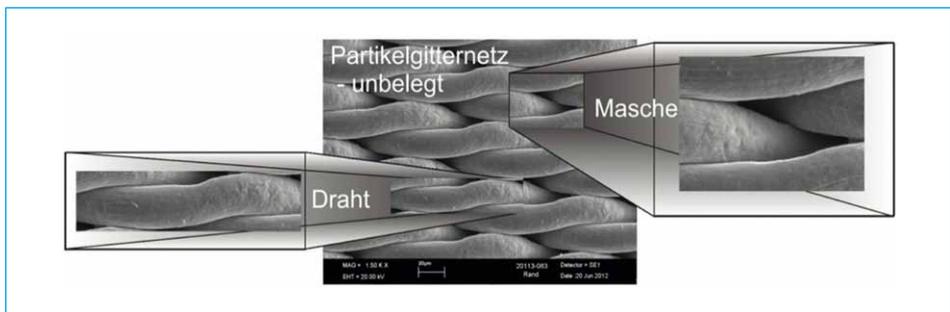


Abb. 2: Unterteilung der Oberfläche in Maschen und Drahtoberflächen (REM-Aufnahme eines unbelegten Partikelgitternetzes)

Quelle: Pohl, M.: Methode zur Charakterisierung der freigesetzten mineralischen Bestandteile eines Brennstoffs mit Hilfe der Partikelgitternetzsonde. In: Diss. (eingereicht), Technische Universität Dresden, 2013

Im Folgenden werden die Transportmechanismen in die Masche und zum Draht als Modellvorstellung dargestellt. Das Abgas wird durch die Partikelgitternetzsonde nahezu isokinetisch abgesaugt, die Partikelgitternetzsonde ist dabei auf Abgastemperatur temperiert, um verfälschende Kondensations- und Desublimationseffekte zu vermeiden. Das aufgespannte Drahtgewebe wirkt dabei als Filter. D.h. das Abgas durchströmt das Drahtgewebe und die im Abgas transportierten ablagerungsfähigen Bestandteile lagern sich auf dem Partikelgitternetz ab. Wie beschrieben stehen für die Ablagerung der mineralischen Bestandteile die Maschen oder die Drahtoberflächen zur Verfügung.

In Abbildung 3 sind die Modellvorstellungen des Transportes zur und der Abscheidung auf der Partikelgitternetzsonde dargestellt. Die Geometrie des Köpertressengewebes wurde zur Veranschaulichung vereinfacht (zweidimensionale Darstellung). Zum Transport und zur Ablagerung in die Maschen führen die folgenden Mechanismen:

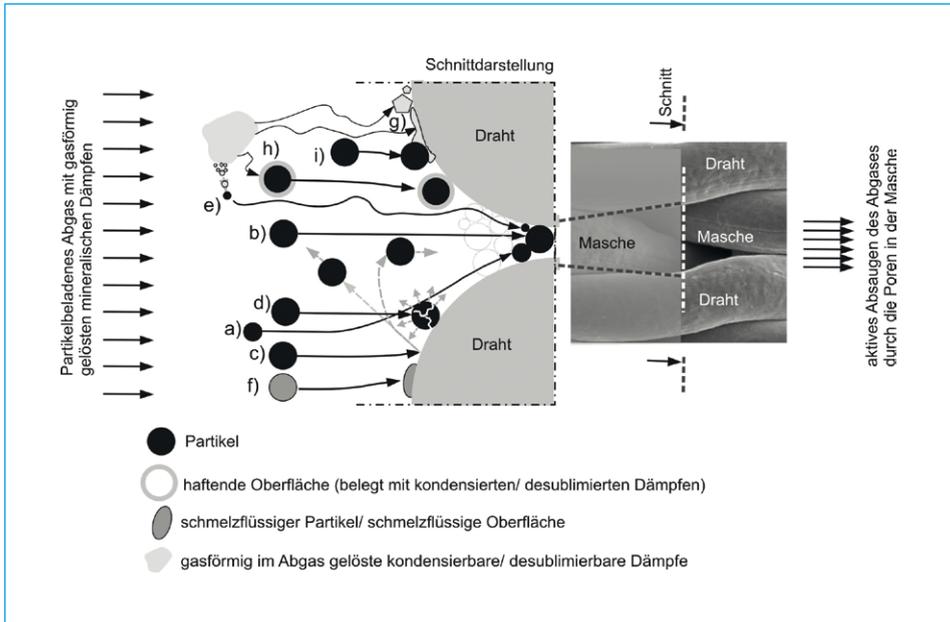


Abb. 3: Schematische Darstellung der Modellvorstellung zur Ablagerung bei der Erfassung der im Abgas transportierten mineralischen Bestandteile mit der Partikelgitternetzsonde (Partikel idealisiert in sphärischer Grundform dargestellt)

Quelle: Pohl, M.: Methode zur Charakterisierung der freigesetzten mineralischen Bestandteile eines Brennstoffs mit Hilfe der Partikelgitternetzsonde. In: Diss. (eingereicht), Technische Universität Dresden, 2013

- Partikel, die der Strömungsänderung des Abgases auf dem Weg in die Masche folgen können (meist sehr feine und feine Partikel) werden direkt in die Maschen gesaugt. Sind die Partikel größer als die Porenöffnung (oder ist die Pore bereits belegt) lagern sie sich in der Masche ab.
- Die Partikel, die aufgrund ihrer Lage zur Masche der Partikelgitternetzsonde bei der Beprobung keine Strömungsänderung vollziehen müssen, gelangen direkt in die Masche. Grundsätzlich ist es bei diesem Mechanismus auch möglich, dass sich potentiell haftende Partikel (schmelzflüssig) in der Masche abscheiden.
- Partikel, die der Strömungsänderung nicht folgen können, treffen auf der Drahtoberfläche auf. Sind die Haftkräfte geringer als der Impuls aus dem elastisch-plastischen Stoß beim Aufprallen und geringer als die von der Strömung auf das Partikel ausgeübte Trennkraft, so prallen die Partikel ab. Dabei können diese zurück ins Abgas gelangen oder in der Hauptströmung in Richtung Masche transportiert werden.

- d) Partikel, die der Strömungsänderung nicht folgen können, treffen auf der Drahtoberfläche auf. Durch den Impuls beim Auftreffen können die Partikel, je nach Eigenschaften (z.B. Porosität), in mehrere kleine Partikel zerfallen. Die kleinen Partikel können dann wiederum der Strömungsrichtung folgen und werden in der Masche abgeschieden.
- e) Dieser Mechanismus gleicht dem von a). Getrennt dargestellt ist dieser aufgrund der Bildungsmechanismen der meist sehr feinen Partikel. Im Fall e) bilden sich die Partikel aus den gasförmig gelösten mineralischen Dämpfen über homogene/ heterogene Kondensation bzw. Desublimation im Abgas. Liegen diese nach der Bildung als feste Partikel im Abgas vor, können diese den Strömungsbedingungen folgen (geprägt durch die Brownsche Molekularbewegung) und in die Masche gelangen.

Neben dem Transport in die Masche der Partikelgitternetzsonde ist es auch möglich, dass es zu einer Ablagerung auf der Drahtoberfläche kommt. Folgende Mechanismen sind dafür zuständig:

- f) Schmelzflüssige Partikel, die der Strömungsänderung des Abgases nicht folgen können, treffen auf den Draht, an welchem sie aufgrund von sich ausbildenden Festkörperbrücken haften bleiben. Die Drahtoberfläche ist damit der exklusive Ort für die Abscheidung der schmelzflüssigen Bestandteile bzw. Partikel mit schmelzflüssigen Oberflächen auf der Partikelgitternetzsonde.
- g) Berührt das Abgas die Drahtoberflächen und die darin übersättigt vorliegenden gelösten Dämpfe, können an diesem Keim direkt Aerosol-Partikel oder Schmelzen gebildet werden und somit diesen nicht mehr löslichen Anteil der Dampf-Fracht dort abscheiden (Kondensation bzw. Desublimation). Die Drahtoberfläche ist damit der exklusive Ort für die Abscheidung der desublimierbaren bzw. kondensierbaren Stofffracht auf der Partikelgitternetzsonde.
- h) Heterogene Kondensationseffekte auf Partikeln können dazu führen, dass sich haftende Oberflächen auf den Partikeln ausbilden und diese auf dem Draht abgeschieden werden. Im Vergleich zu Fall e) lagern sich diese Partikel auf der Drahtoberfläche ab.
- i) Der unter g) vorgestellte Mechanismus führt dazu, dass auch wie unter c) dargestellt nicht haftende Partikel auf der Partikelgitternetzsonde abgelagert werden.

Die dargestellten Transport- und Ablagerungsmechanismen beruhen dabei auf Impaktions- und Diffusionseffekten. Andere Abscheidemechanismen werden zunächst vernachlässigt, können jedoch eine Rolle spielen. Thermophoretischer Transport zur Partikelgitternetzsonde kann aufgrund der Temperierung der Partikelgitternetzsonde auf Abgastemperatur vernachlässigt werden.

Die auf der Partikelgitternetzsonde erfassten mineralischen Bestandteile können nach der Lage auf dem Partikelgitternetz wie folgt eingeteilt werden:

- Ablagerungen in der Masche,
- Ablagerungen auf dem Draht und
- aufgrund der Partikel-Größe ($>20\ \mu\text{m}$) nicht direkt einordenbare Partikel.

Die Lage der Partikel kann grob in Masche und Draht unterteilt werden. Auf der Partikelgitternetzsonde lagern sich die mineralischen Bestandteile des Abgases selektiv ab:

- auf der Drahtoberfläche,
 - * die haftenden Partikel (schmelzflüssige Partikel/Partikel mit schmelzflüssigen Oberflächen) und
 - * die gesättigt/übersättigt vorliegenden Dämpfe im Abgas und
- in den Maschen die festen meist nicht klebrigen Partikel.

Die Lage der erfassten mineralischen Bestandteile auf der Partikelgitternetzsonde ist somit abhängig von den Eigenschaften der erfassten Partikel, so dass aufgrund der Lage, Größe, Grundform und der Chemie dieser Partikel, indirekt auch Aussagen zum Aggregatzustand bei und vor der Entnahme und hinsichtlich der Partikelfreisetzung und Bildung möglich sind. Mit Hilfe der Methode der Partikelgitternetzsonde ist es möglich, die sich im Abgas befindenden mineralischen Bestandteile brennstoff-, prozess- und ortsaufgelöst zu charakterisieren.

5. Einsatz der Partikelgitternetzsonde

5.1. Allgemeiner Überblick zum Einsatz der Partikelgitternetzsonde

Die Zielstellung der Partikelgitternetzsonden-Methode ist es, die bei der Verbrennung aus einem Brennstoff freigesetzten festen, flüssigen und gasförmigen Komponenten, welche sich im weiteren auf den kälteren Wärmeübertragungsheizflächen absetzen können, damit Beläge bilden und u.U. ihre korrosive Wirkung entfalten, zu charakterisieren.

Das Korrosionspotential der entstehenden Beläge ist dabei wesentlich von der stofflichen Zusammensetzung der Ablagerung sowie dem Temperaturniveau, dem Temperaturgradient und den Stofftransportvorgängen abhängig.

Mit Hilfe der Partikelgitternetzsonde ist es möglich, ortsaufgelöst die sich im Abgas befindenden Partikel sichtbar zu machen und diese näher hinsichtlich ihrer Eigenschaften zu beschreiben. Die dadurch möglichen Aussagen zu den Belagsbildungseigenschaften (z.B. Ablagerungsfähigkeit) und der Korrosivität der sich aus diesen Partikeln bildenden Beläge kann wiederum als schnelle Entscheidungshilfe, für den Anlagenbetreiber und den Anlagenplaner vor dem großtechnischen Einsatz dienen. Der **Nutzen** besteht insbesondere darin, dass Risiken bestimmter Brennstoffe in Kombination mit der Anwendung im Vorfeld eingegrenzt und abgeschätzt werden können, z.B.

- hinsichtlich der Qualität der einzusetzenden Biomasse-Brennstoffe,
- hinsichtlich der Annahme bestimmter Abfallfraktionen in einer Abfallverbrennungsanlage/Ersatzbrennstoffanlage oder
- auch hinsichtlich der Qualität der einzusetzenden Kohlen

im Zusammenhang z.B. zu

- dem Wartungs- und Instandhaltungsaufwand,
- der Versorgungs- oder Entsorgungssicherheit oder
- emissionstechnischen Änderungen.

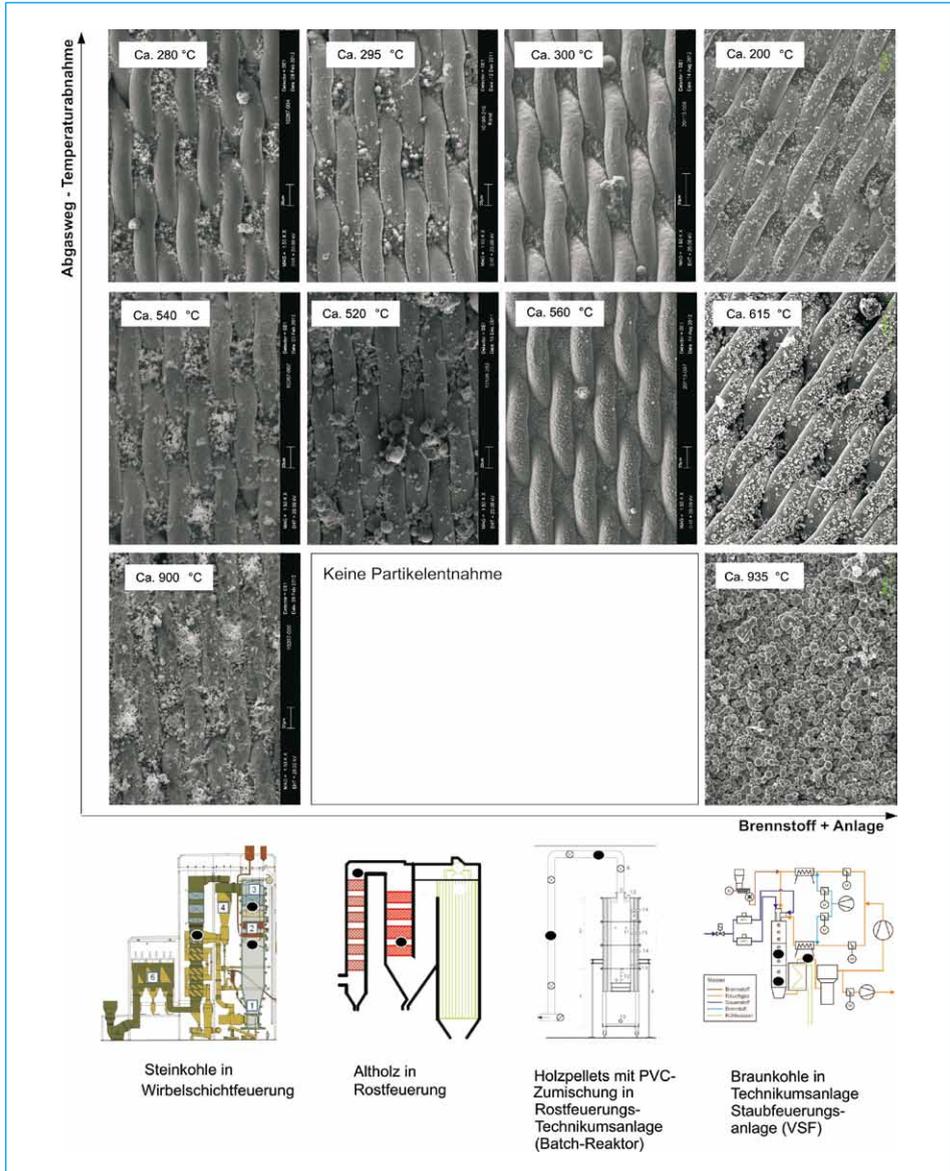


Abb. 4: Partikelgitternetze zur Beprobung der mineralischen Substanz im Abgas unter Variation der Anlage und dem jeweiligen Brennstoff und abhängig vom Probenahmeort (Temperaturniveau entlang des Abgasweges)

Diese Risikofrühab-schätzung hinsichtlich des Belagsbildungs- und Korrosionspotentials beim Einsatz eines Brennstoffs ermöglicht es Entscheidungen zur Brennstoffauswahl, -aufbereitung und -mischung zu treffen, ebenso wie zur Auswahl und Kombination von passiven Schutzmaßnahmen, zur Feuerungs-führung und zur Wahl der Leitgrößen der Feuerungsleistungsregelung für einen optimal energieeffizienten Betrieb z.B. unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten.

In Abbildung 4 sind verschiedene Partikelgitternetze dargestellt, welche in unterschiedlichen Anlagen (Kraftwerke und Versuchsanlagen), an unterschiedlichen Orten entlang des Abgasweges (entsprechend bei unterschiedlichen Temperaturniveau und unterschiedlichen Konzentrationen) und beim Einsatz unterschiedlicher Brennstoffe (fossile Brennstoffe, Biomasse-Brennstoffe, modifizierte Brennstoffe) zur Beprobung der mineralischen Substanz im Abgas eingesetzt wurden. Auf die Untersuchungen im Batch-Reaktor mit modifizierten Brennstoffen und auf die Untersuchungen mit Braunkohle wird im Folgenden detaillierter eingegangen.

5.2. Experimentelle Untersuchungen von modifizierten Biomasse-Brennstoffen im Batch-Reaktor

Im Batch-Reaktor wurden Erkundungsverbrennungen mit Industrie-Holzpellets durchgeführt. Dabei wurden die Holzpellets ohne Zumischung und mit Zumischung von NaCl bzw. mit PVC untersucht. Die Untersuchungsergebnisse wurden in [8] vorgestellt. Zusammengefasst wurde festgestellt, dass davon ausgegangen werden kann, dass die gefundenen Partikel als NaCl-, KCl-, Na₂SO₄-, K₂SO₄- Salze bzw. als Mischphasen gebunden sind. Dies unterscheidet sich je nach Zumischung wie folgt:

- der Schwefelgehalt ist bei den Versuchen mit den Holzpellets ohne Zumischung am größten (hier sind die Alkalien zum Großteil sulfatisch gebunden) der Chlorgehalt nimmt bei der Zumischung von NaCl und PVC zu (chloridische Bindung überwiegt, da die Fracht an chloridischen Salzen zunimmt) der Kaliumgehalt nimmt bei der Zumischung von NaCl und PVC zu, d.h. mehr Kalium wird aus dem Brennstoff gelöst und freigesetzt (auch bestätigt durch Bilanz der Rückstände).

Diese Unterschiede aufgrund der jeweiligen Zumischung haben auch Auswirkungen auf das jeweilige Ablagerungsverhalten der mineralischen Bestandteile im Abgas. In Abbildung 5 sind die Partikelgitternetze, welche bei den Versuchen mit NaCl bzw. PVC-Zumischung eingesetzt wurden dargestellt. Deutlich zu erkennen ist der Unterschied hinsichtlich der zwei Temperatur-Niveaus. Bei der kälteren Probenahmestelle (Abbildung 5 rechts) ist die Drahtbelegung im Vergleich zu der heißen Probenahmestelle (Abbildung 5 links) geringer. Zurückzuführen ist das darauf, dass die Ablagerung auf dem Draht bei den heißeren Temperaturen (~ 550 °C) aufgrund des weiter vorn vorgestellten Ablagerungsmechanismus g) stattgefunden hat. D.h. ein Teil der im Abgas als Dampf gelösten mineralischen Fracht an Salzen ist bei diesem Temperatur-Niveau gesättigt bzw. übersättigt und lagert sich durch Kondensations- bzw. Desublimationseffekte auf dem Draht ab (Aggregatswechsel). Entlang des Abgasweges nimmt die Temperatur des Abgases weiter ab und aufgrund von homogenen aber auch heterogenen

Kondensations- bzw. Desublimationseffekten nimmt die Fracht an gasförmig gelösten Dämpfen immer weitere ab. Dementsprechend nimmt die Fracht an sehr feinen Partikeln welche sich dabei aufgrund der Effekte bilden zu. An der kälteren Position (~ 310 °C) spielt der Ablagerungsmechanismus g) nur noch eine untergeordnete Rolle und Ablagerungsmechanismus e) überwiegt. Hinsichtlich der Belagsbildung bedeutet das, dass insbesondere bei diesem Temperaturniveaus mit einer erhöhten Belagsbildung zu rechnen ist.

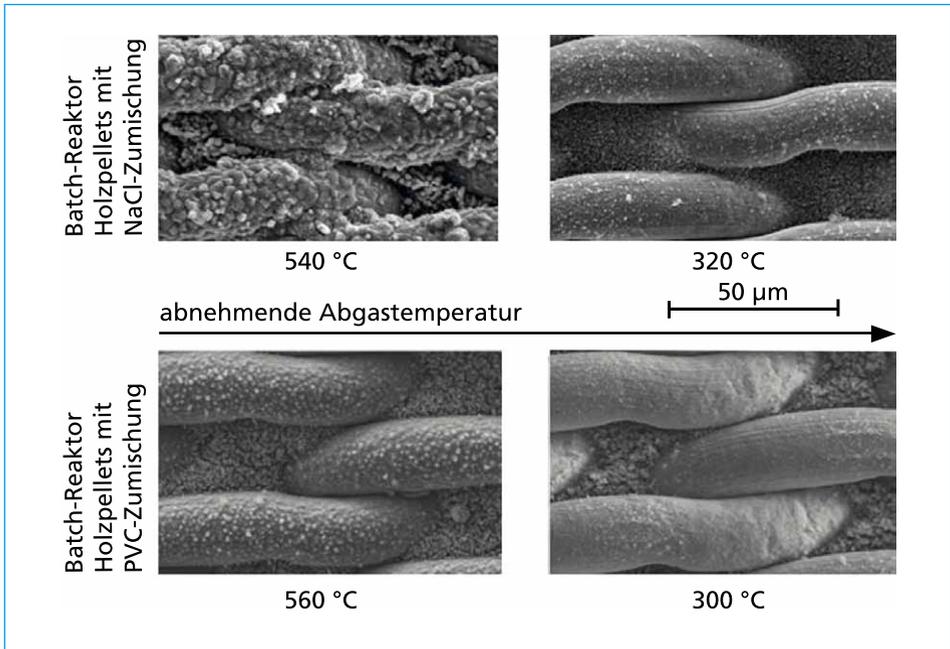


Abb. 5: Vergleich der Partikelgitternetze bei Variation der Brennstoff-Zumischung

Im Weiteren wurden im Batch-Reaktor ein Belagsmonitor³ in der Brennkammer während des Versuches mit NaCl Zumischung in der Brennkammer eingebaut. Dieser Belagsmonitor wurde an der Spitze auf 400 °C gekühlt. Das umströmende Abgas hat dabei Temperaturen von über 800 °C. Wie in Abbildung 6 dargestellt ist insbesondere an der aktiv gekühlten Spitze des Belagsmonitors (400 °C) bis hin zu einer Temperatur des Monitors von etwa 600 °C eine weiße Schicht zu erkennen, welche mit zunehmender Temperatur des Monitors immer geringer sichtbar wird. Untersuchungen an der 600 °C - Position zeigen, dass wie auch schon mit der Partikelgitternetzsonde ermittelt, diese Beläge aus Natrium, Kalium und Chlor bestehen. Die im Abgas gasförmig gelösten Salze lagern sich bevorzugt auf dem gekühlten Abschnitt des Belagsmonitors ab. D.h. überstreicht das heiße Abgas den gekühlten Belagsmonitor (< 630 °C), finden ähnlich wie bei der Partikelgitternetzsonde an der ~ 550 °C Position auf dem Abgasweg Kondensations- und Desublimationseffekte auch bei heißeren Abgastemperaturen (bei

³ Zum Patent angemeldet

entsprechender Abkühlung des Abgases beim Überstreichen der gekühlten Oberflächen) statt, welche zum Aufbau eines weißen Belages, bestehend aus den kondensierten/desublimierten Salzen führen.

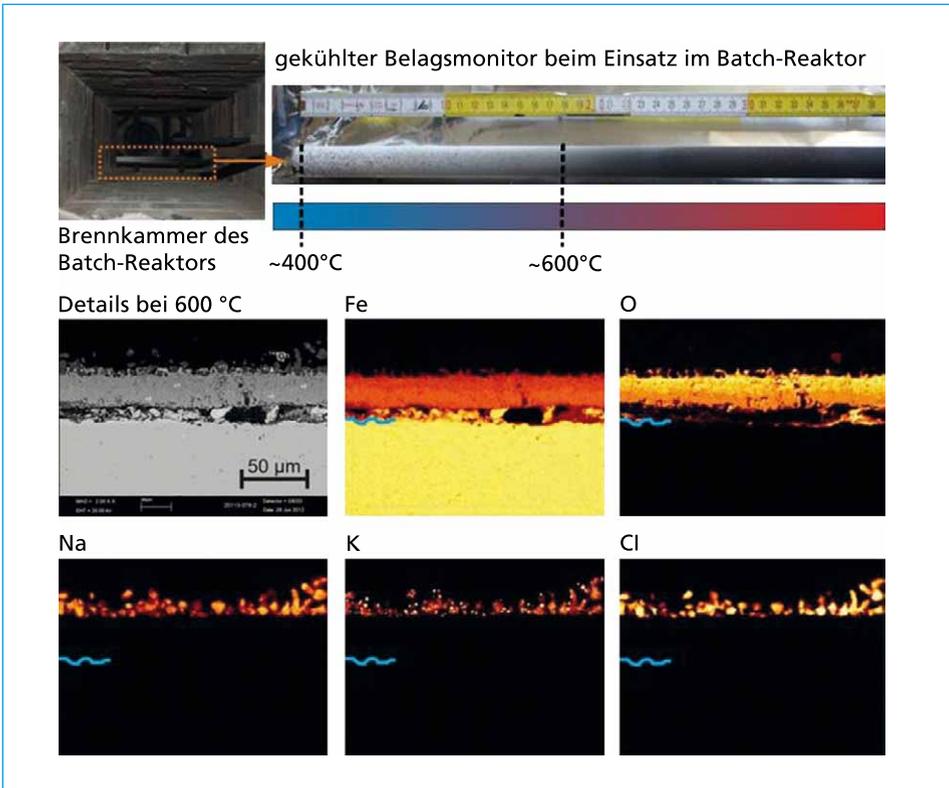


Abb. 6: Belagsaufbau auf dem gekühlten Belagsmonitor beim Einsatz von Holzpellets mit Zumischung von NaCl

Die hier anhand der *Modellbrennstoffe* (Zumischung von NaCl und PVC) dargestellten Aussagen, welche mit Hilfe der *Partikelgitternetzsonde* (Analyse der mineralischen Bestandteile im Abgas) als auch mit dem Belagsmonitor (Analyse des Belagsaufbaus) ermittelbar sind, lassen sich auch auf *reale* Brennstoffe übertragen, die Komplexität ist dabei zunächst abhängig vom eingesetzten Brennstoff, im Weiteren aber natürlich von den jeweiligen Prozessbedingungen (Temperaturen, Sauerstoffpartialdruck und den weiteren Haupteinflussgrößen des Verbrennungsprozesses). Die mit Hilfe der Partikelgitternetzsonde in Versuchsanlagen (z.B. Batch-Reaktor) ermittelbaren Brennstoffeigenschaften erweitern dabei die in z.B. [12] dargestellten Laboruntersuchungen (und z.B. den daraus ermittelbaren Kennzahlen) zur Diagnose des Belagsbildungs- und Korrosionspotentials eines Brennstoffes.

Im Weiteren werden Untersuchungen vorgestellt, die bei gleichem Brennstoff (Lausitzer Trockenbraunkohle) in unterschiedlichen Anlagen durchgeführt wurden, um Aussagen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse zu ermitteln.

5.3. Experimentelle Untersuchung einer Kohle unter Oxyfuel-Bedingungen in unterschiedlichen Anlagen

Mit der Partikelgitternetzsonde wurden Untersuchungen an Feuerungsanlagen verschiedener Bauart und Größe mit verschiedenen Brennstoffen durchgeführt. In diesem Beitrag sollen die Untersuchungen an zwei mit Braunkohlenstaub gefeuerten Anlagen dargestellt werden. Beide Anlagen wurden im Oxyfuel-Modus betrieben.

Tabelle 1: Betriebsparameter

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

Die erste Anlage ist eine 50 kW_{th}-Versuchsanlage (VSF) des Instituts für Energietechnik an der TU Dresden. Die Anlage besitzt einen Draldeckenbrenner und ist zur Abbildung des Oxyfuel-Prozesses mit einer Rezirkulationsstrecke ausgerüstet. Details zur Anlage finden sich

z.B. in [13]. Zur Unterstützung der Versuche im 50 kW-Maßstab und zur Übertragung der Methode auf Großanlagen wurden Untersuchungen an der 30 MW_{th}-Oxyfuel-Pilotanlage Schwarze Pumpe (OxPP) durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung der Oxyfuel-Pilotanlage findet sich z.B. in [14].

Beide Versuchsanlagen wurden mit schwefelarmen Lausitzer Trockenbraunkohlenstaub betrieben (Brennstoffzusammensetzung siehe [15]). Es wurden ähnliche Betriebsbedingungen hinsichtlich Oxyfuelpunkt und Restsauerstoffgehalt im Abgas eingestellt (siehe Tabelle 1) und Partikel mit Hilfe der Partikelgitternetzsonde bei ähnlichen Abgastemperaturen aus der jeweiligen Anlage abgesaugt. Die Absaugzeit betrug zwischen 2 und 5 Sekunden.

Abbildung 7 zeigt je ein mit Partikeln beladenes Gitternetz aus der Versuchsanlage (VSF) und der Pilotanlage (OxPP). Die Partikel lassen sich nach den oben genannten Eigenschaften (Größe, Form, chemische Zusammensetzung, Lage auf dem Gitternetz) in verschiedene Klassen einteilen. Eine Klasse bilden beispielsweise große sphärische Partikel mit hohen Anteilen von Kalzium und Silizium. Daneben finden sich sphärische Partikel von mittlerer Größe, in denen ebenfalls hohe Anteile von Kalzium vorhanden sind, in denen aber kein Silizium auftritt. Die sphärische Form deutet darauf hin, dass diese Partikel in der Feuerung bereits den geschmolzenen Zustand durchlaufen haben und erstarrt sind. Des Weiteren sind kantige, teils kristallförmige Partikel in mittlerer bis großer Größe zu finden. Diese Partikel weisen hohe Silizium-Anteile bei Abwesenheit von Kalzium auf. Analog zu den sphärischen Partikeln weist hier die kantige Form darauf hin, dass diese Partikel den schmelzflüssigen Zustand auf ihrem Weg durch die Feuerung nicht erreicht haben. Neben den mittleren bis großen Partikel finden sich feine Partikel, die sich hauptsächlich auf der Drahtoberfläche sowie auf anderen größeren Partikeln angelagert haben. Der Vergleich der Partikelgitternetze zwischen Versuchsanlage und Pilotanlage zeigt keine signifikanten Unterschiede, die auf die Anlagengröße zurückzuführen wären.

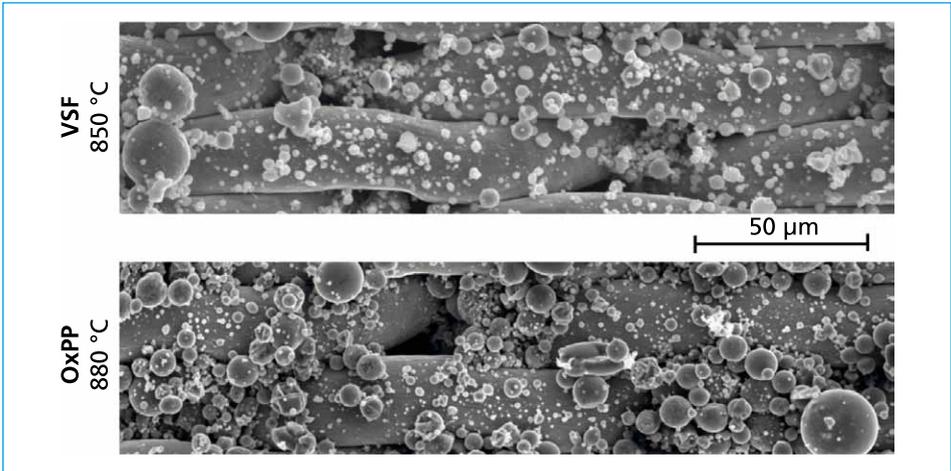


Abb. 7: Vergleich der Partikelgitternetze zwischen VSF und OxPP

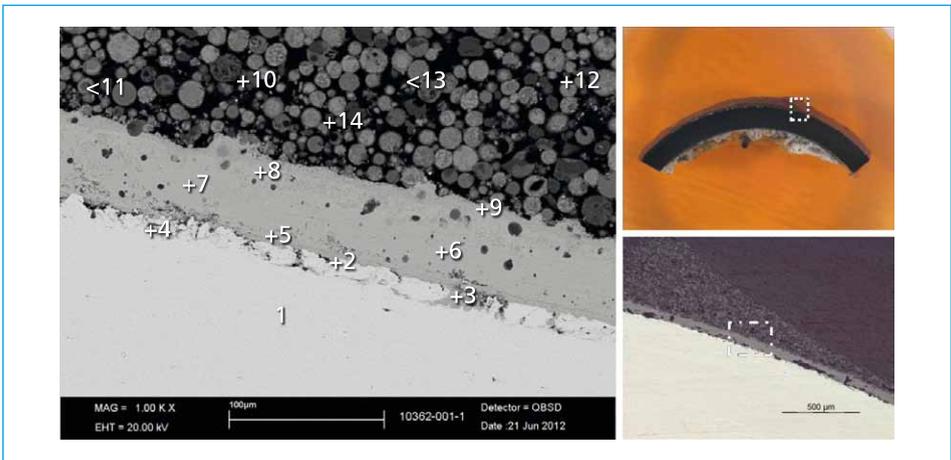


Abb. 8: Belagsaufbau auf dem gekühlten Belagsmonitor.

Zur Unterstützung der Untersuchungen mit der Partikelgitternetzsonde wurde ein gekühlter Belagsmonitor in der Pilotanlage eingesetzt. Der gekühlte Belagsmonitor wurde an der gleichen Stelle wie die Partikelgitternetzsonde bei der gleichen Abgastemperatur eingesetzt und auf eine Oberflächentemperatur von 550 °C gekühlt. Abbildung 8 zeigt den Belagsaufbau nach einer Zeit von 16 h. Neben dem Grundwerkstoff und der Oxidschicht des Sondenmaterials sind einzelne Partikel im Belag zu erkennen. Diese Partikel weisen dieselben Eigenschaften auf wie die auf der Partikelgitternetzsonde an dieser Stelle gefundenen Partikel.

Die Analyse der elementaren chemischen Zusammensetzung des Belags (Abbildung 9) zeigt zunächst ähnliche Ergebnisse wie die Analyse der Partikel auf der Partikelgitternetzsonde. Es finden sich Partikel mit hohen Anteilen von Kalzium oder Silizium, sowie Partikel die beide Elemente enthalten.

Auffällig ist ein schwefelhaltiger Saum an der Oberfläche der Partikel mit hohem Kalzium-Anteil. Dieser Saum konnte auf der Partikelgitternetzsonde nicht beobachtet werden und scheint somit ein Resultat der längeren Verweilzeit der Depositionssonde im Abgasstrom zu sein.

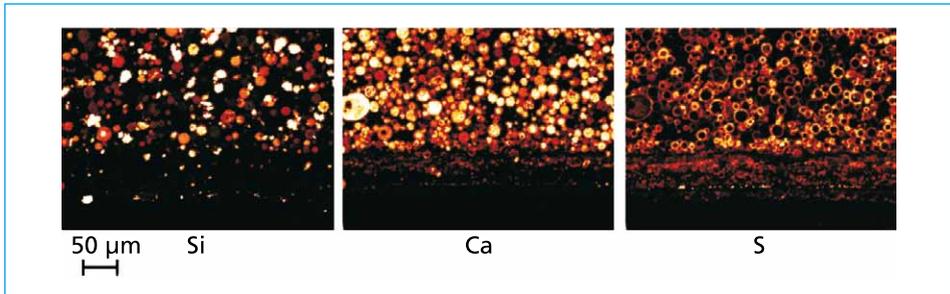


Abb. 9: EDX-Analyse des Belagsaufbaus auf dem gekühlten Belagsmonitor

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Methode der Partikelgitternetzsonde eröffnet die Möglichkeit die mineralischen Substanzen in Abhängigkeit von Konzentration und Temperatur entlang des Abgaswegs einer Feuerungsanlage sichtbar zu machen und hinsichtlich ihrer Größe, Form und elementarer chemischer Zusammensetzung zu charakterisieren. Die Lage der Partikel kann grob in Masche und Draht unterteilt werden. Auf der Partikelgitternetzsonde lagern sich die mineralischen Bestandteile des Abgases selektiv ab:

- auf der Drahtoberfläche,
 - * die haftenden Partikel (schmelzflüssige Partikel/Partikel mit schmelzflüssigen Oberflächen) und
 - * die gesättigt/übersättigt vorliegenden Dämpfe im Abgas und
- in den Maschen die festen meist nicht klebrigen Partikel.

Die Lage der erfassten mineralischen Bestandteile auf der Partikelgitternetzsonde ist somit abhängig von den Eigenschaften der erfassten Partikel, so dass aufgrund der Lage, Größe, Grundform und der Chemie dieser Partikel, indirekt auch Aussagen zum Aggregatzustand bei und vor der Entnahme und hinsichtlich der Partikelfreisetzung und Bildung möglich sind. Mit Hilfe der Methode der Partikelgitternetzsonde ist es somit möglich, die sich im Abgas befindenden mineralischen Bestandteile brennstoff-, prozess- und ortsaufgelöst zu charakterisieren.

Mit der Partikelgitternetzsonde wurden experimentelle Untersuchungen an mehreren Feuerungsanlagen durchgeführt, auf welche beispielhaft im Rahmen dieses Beitrages eingegangen wird. Ziel ist es dabei die Bandbreite der Einsatzmöglichkeiten und die Übertragbarkeit der Ergebnisse aufzuzeigen.

Derzeit laufen weitere Untersuchungen mit Brennstoffen unterschiedlicher Herkunft und Zusammensetzung. Ziel dieser Untersuchungen ist es, den im ersten Abschnitt

dieses Beitrages dargestellten Weg vom Brennstoff hin zum Belag weiter zu ergründen, jeweils abhängig von der mineralischen Substanz im Brennstoff und den Prozessbedingungen und die Methode der Partikelgitternetzsonde weiter zu validieren.

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse entstammen dem Vorhaben Entwicklung einer praxisorientierten Methode zur Charakterisierung von Biomassebrennstoffen im Hinblick auf das Korrosionspotential in Feuerungsanlagen, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt und dem Verbundforschungsprojektes ADECOS-Komponenten, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie sowie den Projektpartnern ALSTOM, Babcock Borsig Steinmüller, Clyde Bergemann, E.ON, EnBW, EVN und Vattenfall.

Hinweis

Dieser Beitrag wurde auch im Rahmen der 6. Freiburger Fachtagung Dampferzeugerkorrosion, 19.-20.09.2013 in Freiberg, vorgestellt.

7. Quellen

- [1] Zelkowski, J.: Kohleverbrennung – Brennstoff, Physik und Theorie, Technik. In: 2. Auflage 2004, Band 8 der Fachbuchreihe Kraftwerkstechnik, VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V.
- [2] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte. In: Teubner-Reihe UMWELT, B. G. Teubner GmbH, Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden 2001, S. 222 ff.
- [3] Gumz, W.; Kirsch, H.; Mackowsky, M. T.: Schlackenkunde: Untersuchungen über die Minerale im Brennstoff und ihre Auswirkungen im Kesselbetrieb. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag, 1958
- [4] Raask, E.: Mineral Impurities in Coal Combustion: Behaviour, Problems, and Remedial Measures. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1985
- [5] Benson, S. et al.: Predicting ash behavior in utility boilers. In: Energy & Fuels, 7. Jg. 1993, Nr. 6, pp. 746-754
- [6] Sager, C.: Der Partikeltransport in turbulent durchströmten Rohrleitungen. Dissertation 2007, Universität Duisburg-Essen
- [7] Grahl, S.: Charakterisierung von Ablagerungen an Membranwänden von Dampferzeugern. Dissertation 2013, TU Dresden
- [8] Pohl, M.; Beckmann, M.; Herzog, T.; Spiegel, W.; Kaiser, M.; Brell, J.: PartikelGitterNetzSonde – Korrosionsdiagnose bei der Verbrennung schwieriger Brennstoffe. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 10. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013, S. 339-358
- [9] Ebert, M.: Chemische Charakterisierung mariner und kontinentaler Aerosolpartikel mit Hilfe der Totalreflexions-Röntgenfluoreszenzanalyse und der hochauflösenden Rasterelektronenmikroskopie. In: Dissertation 1999, TU Darmstadt
- [10] Pohl, M.: Methode zur Charakterisierung der freigesetzten mineralischen Bestandteile eines Brennstoffs mit Hilfe der Partikelgitternetzsonde. In: Diss. (eingereicht), Technische Universität Dresden, 2013

- [11] Stieß, M.: Mechanischen Verfahrenstechnik 1 und 2. In: Springer Verlag, Berlin, 1995
- [12] Pohl, M.; Bernhardt, D.; Beckmann, M.; Spiegel, W.: Brennstoffcharakterisierung zur vorraus-schauenden Bewertung des Korrosionsrisikos. In: SAXONIA Standortentwicklungs- und -ver-waltungsgesellschaft mbh (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion 2011. Nossen, 2011, S. 67-83
- [13] Thiel, C.; Bernhardt, D.; Pohl, M.; Beckmann, M.: Kreislaufelemente bei einer 50 kWth-Braun-kohlestaubfeuerung unter Oxyfuel-Bedingungen. In: M. Beckmann; Hurtado, A. (Hrsg.): Kraft-werkstechnik – Sichere und nachhaltige Energieversorgung, Band 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011, S. 117-130
- [14] Burchhardt, U.; Lysk, S.; Kosel, D., Biele, M., Jacoby, J.: Betriebserfahrungen und Ergebnisse aus der Oxyfuel-Forschungsanlage von Vattenfall. In: Beckmann, M.; Hurtado, A. (Hrsg.): Kraft-werkstechnik – Sichere und nachhaltige Energieversorgung, Band 1. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009, S. 237-253
- [15] Thiel, C., Pohl, M., Beckmann, M., Herzog, T.; Spiegel, W.: Untersuchungen zur Ableitung der Verschmutzungs- und Verschlackungsneigung unter Oxyfuel-Bedingungen am Beispiel der Lausitzer Trockenbraunkohle. In: Beckmann, M.; Hurtado, A. (Hrsg.): Kraftwerkstechnik – Sichere und nachhaltige Energieversorgung, Band 4. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012, S. 367-376

Apparate- und Anlagenbau



WALLSTEIN

■ ■ ■ WE KNOW HOW



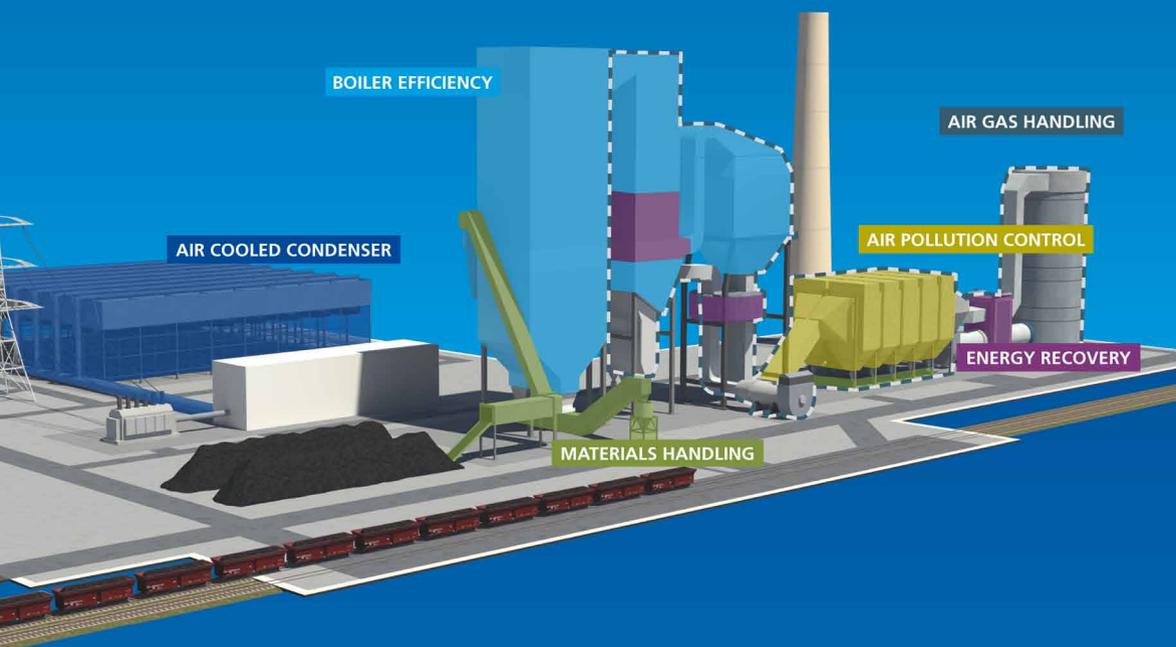
- **Engineering, Konstruktion, Fertigung, Abwicklung, Montage, Inbetriebnahme und Wartung**
- **industrielle Wärmerückgewinnung, Systeme zur Wärmeverschiebung und -auskopplung inklusive Systemtechnik**
- **Wärmeaustauscher in sämtlichen Bauformen und Ausführungen z. B. Gas-Gas-WT, DaGaVo, KoGaVo, LuVo**
- **korrosionsbeständige Materialien: Edelstähle, Sonderlegierungen (Nickelbasis) und Kunststoffe, Glas-, PPS- und Kunststoffrohre sowie -auskleidungen**

Wallstein Ingenieur GmbH

Hubertusstraße 44
D-45657 Recklinghausen

Tel.: +49 (0)2361 1047-0 info@wallstein.de
Fax: +49 (0)2361 1047-47 www.wallstein.de

Zertifiziert nach: DIN EN ISO
9001/14001/13485, AD2000 - HPo, TRD
201, DIN EN 3834-2 (729-2)/ 18 800-7, DIN
EN 288-3/ 15614-1, DIN EN 287-1/ 9606,
Fachbetrieb nach §19l WHG, SCC, SeSaM



CLEAN ENERGY SOLUTIONS

Sechs Geschäftsfelder – ein Ziel

CLEAN: Leistungsfähige Kesselreinigung, optimierte Entaschung, zuverlässige Lenkung und Reinigung der Rauchgase und nachhaltige Energierückgewinnung für eine hohe Anlagenverfügbarkeit und Effizienz bei geringerer Umweltbelastung.

ENERGY: Boiler Efficiency, Materials Handling, Air Pollution Control, Energy Recovery und Air-Gas Handling – Sie profitieren von einem einzigartigen Produktprogramm entlang Ihrer gesamten Wertschöpfungskette im Verbrennungsprozess.

SOLUTIONS: Prozesssteuerung, Prozesssimulation, thermodynamische Bilanzierung in Echtzeit – nutzen Sie Engineering-Kompetenz, verfahrenstechnisches Know-how und Serviceleistungen eines starken Lösungspartners, der sich weltweit für Ihre thermischen Prozesse stark macht.