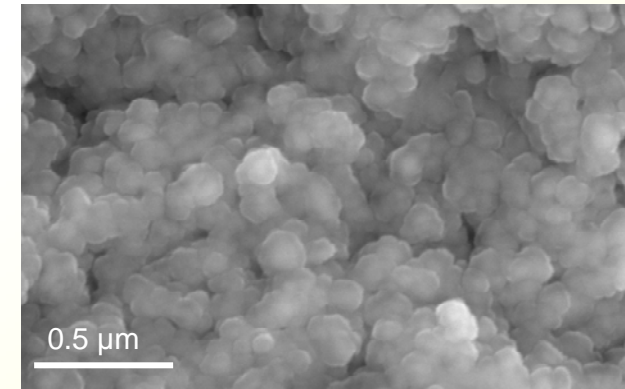
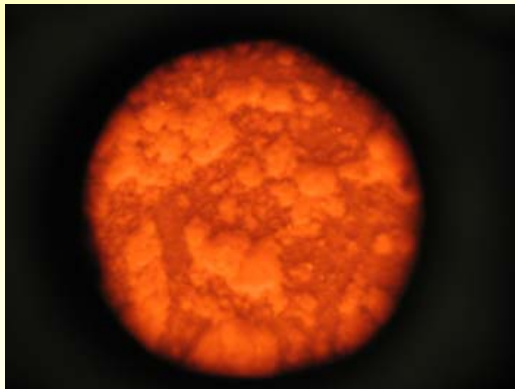


Durchführung von Aerosolmessungen mit einem speziell entwickelten Hochtemperaturimpaktor in einer Müllverbrennungsanlage

Prof. Dipl.-Ing. Dr. Ingwald Obernberger



BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH

TEL.: +43 (316) 481300; FAX: +43 (316) 4813004

E-MAIL: office@bios-bioenergy.at

Homepage: <http://www.bios-bioenergy.at>



bioenergy2020+



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Inhalt

- **Hintergrund und Zielsetzungen**
- **Grundsätzliches zur Flugaschen- und Aerosolbildung in Festbrennstoff-Feuerungen**
- **Der Hochtemperaturimpaktor und seine Einsatzmöglichkeiten**
- **Methodik der durchgeführten Messungen an der Müllverbrennungsanlage der GKS Schweinfurt GmbH**
- **Ergebnisse von Messungen und Analysen**
- **Schlussfolgerungen**



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Hintergrund und Zielsetzungen (I)

- **Probleme, die bei der Verbrennung von Brennstoffen mit hohem Aschegehalt (Hausmüll, Altholz, Stroh und anderen landwirtschaftlichen Brennstoffen) auftreten:**
 - Aschenschmelze, Verschlackungen
 - Depositionsbildung
 - Korrosion
 - Erosion
 - Staubemissionen

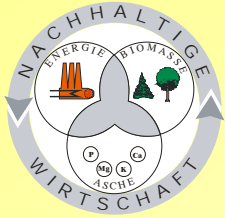
- **Untersuchungen, die sich mit der Bildung und Charakterisierung von Flugaschen auseinandersetzen, sind von grundlegender Bedeutung für die Konzeption, Auslegung und den Betrieb von Feuerungsanlagen.**



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Hintergrund und Zielsetzungen (II)

- **Hochtemperatur-Partikelmessungen im heißen Feuerraum sowie im Kessel mit einem eigens für solche Untersuchungen entwickelten Hochtemperaturimpaktor (HTI) können maßgeblich zum besseren Verständnis der ablaufenden Partikelbildungsprozesse (Aerosolbildung) beitragen.**
- **Durchführung von Hochtemperaturmessungen und Probenahmen mittels neu entwickelten HTI an 4 verschiedenen Messstellen im Kessel einer Feuerungslinie der Müllverbrennungsanlage der GKS Schweinfurt, um nähere Erkenntnisse zur Aerosolbildung im Zuge der Müllverbrennung zu erlangen.**



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Staub- und Feinstaubemissionen aus Festbrennstofffeuerungen

Aerosole (Feinstaub)

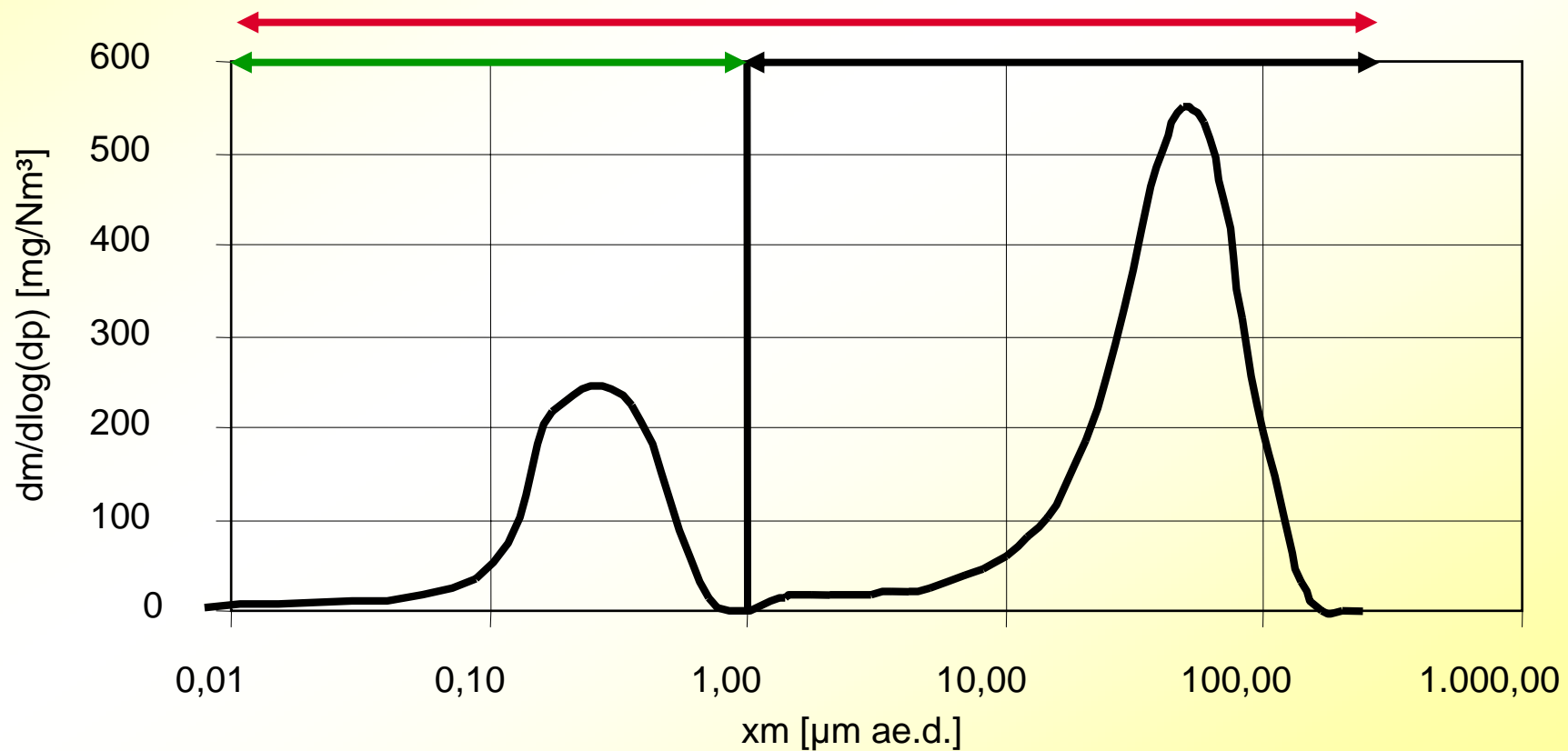
Partikel < 1 μm

Grobe Flugaschen

Partikel > 1 μm

Gesamtstaub

Summe aus Aerosolen und groben Flugaschen





BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Staub- und Feinstaubbildung während der Verbrennung

➤ **Grobe Flugaschen entstehen durch Aufwirbelung von**

- Aschepartikeln,
- Holzkohlepartikeln und
- Brennstoffpartikeln

vom Brennstoffbett und nachfolgenden Austrag mit dem Rauchgas.

➤ **Aerosole (Partikel $<1 \mu\text{m}$) entstehen**

- hauptsächlich durch Nukleation und Kondensation partikelbildender Dämpfe
- zu einem geringeren Ausmaß durch thermische Fragmentierung von mineralischen Strukturen

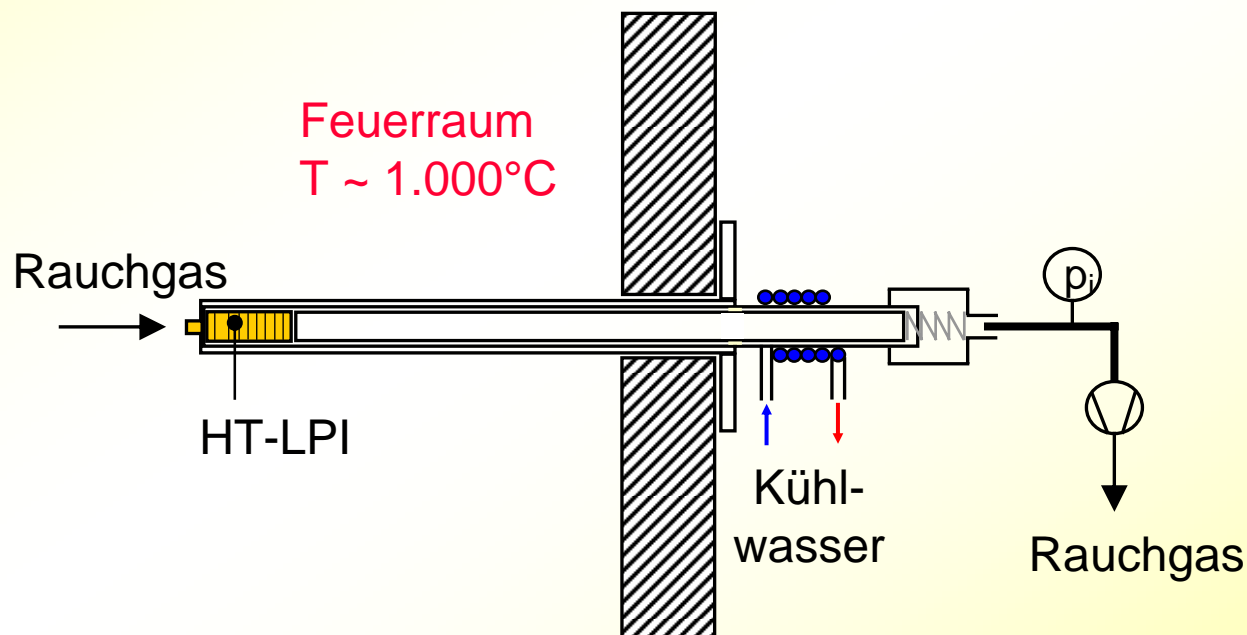


BIOS

BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Hochtemperaturimpaktor (HTI) – Allgemeines

- Entwicklung des Instituts für Prozess- und Partikeltechnik, TU Graz
- Niederdruck-Kaskadenimpaktor, der für in-situ Messungen bei bis ca. 1.000°C eingesetzt werden kann
- Bestimmung der Konzentration und Korngrößenverteilung von Aerosolen im heißen Rauchgas
- Möglichkeit der nachfolgenden strukturellen und chemischen Analyse



Blick durch den äußeren
Mantel in den Feuerraum



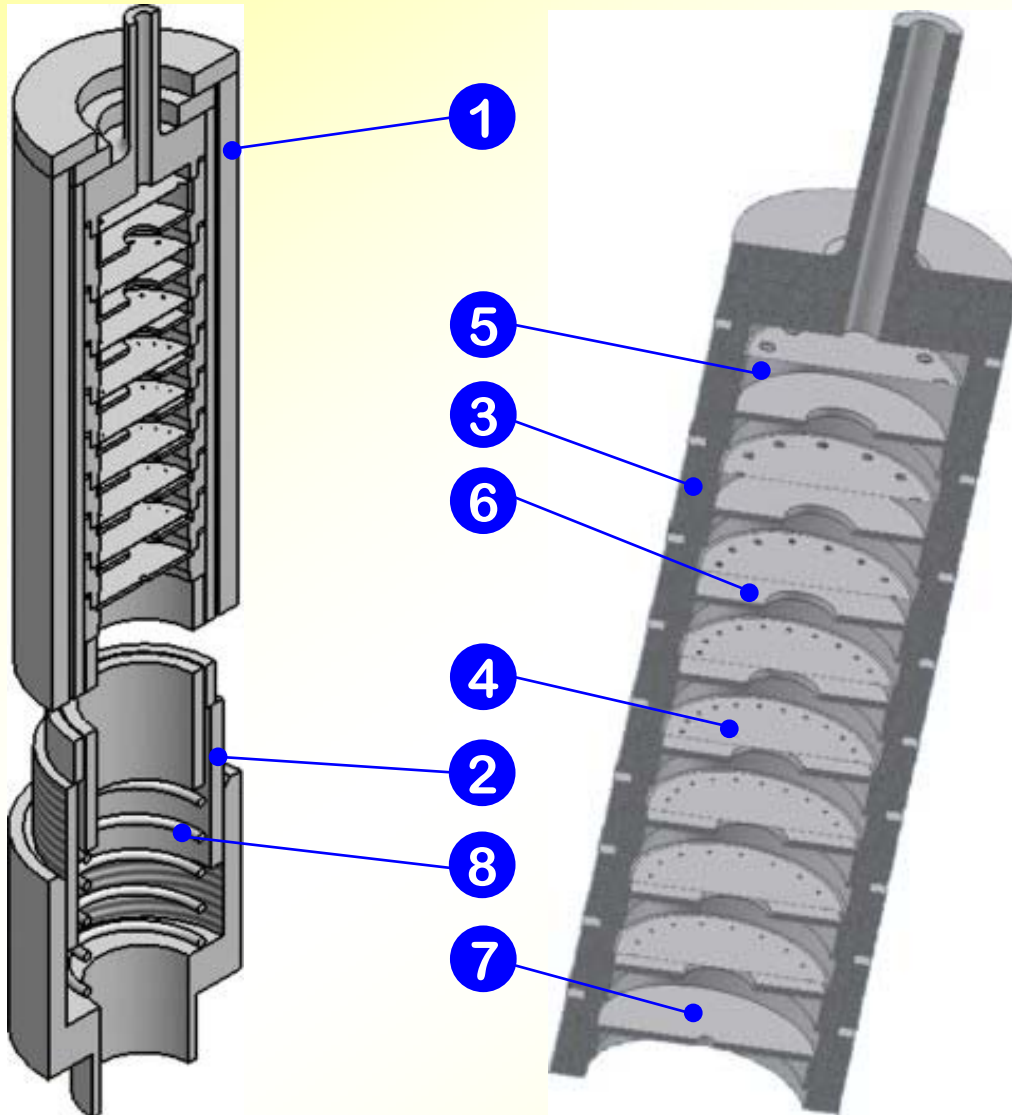
HTI nach der Messung



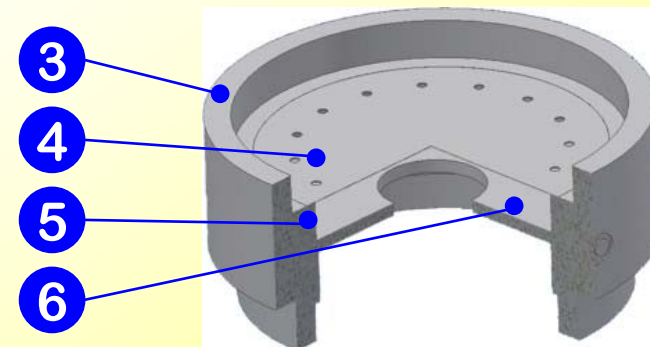


BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Hochtemperaturimpaktor (HTI) – Konzept



- 1 Äußerer Mantel
- 2 Innerer Mantel
- 3 Stufengehäuse
- 4 Düsenplatte
- 5 Distanzring
- 6 Prallplatte
- 7 Kritische Düse
- 8 Feder





BIOES

BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Hochtemperaturimpaktor (HTI) – Komponenten und Materialien



Stufengehäuse

temperaturbeständiger Stahl



Dichtung

SiO₂



Düsenplatte

Inconel 600



Distanzring

temperaturbeständiger
Stahl



Abscheidefolie

Platin



Prallplatte

temperaturbeständiger
Stahl

Mantelrohre

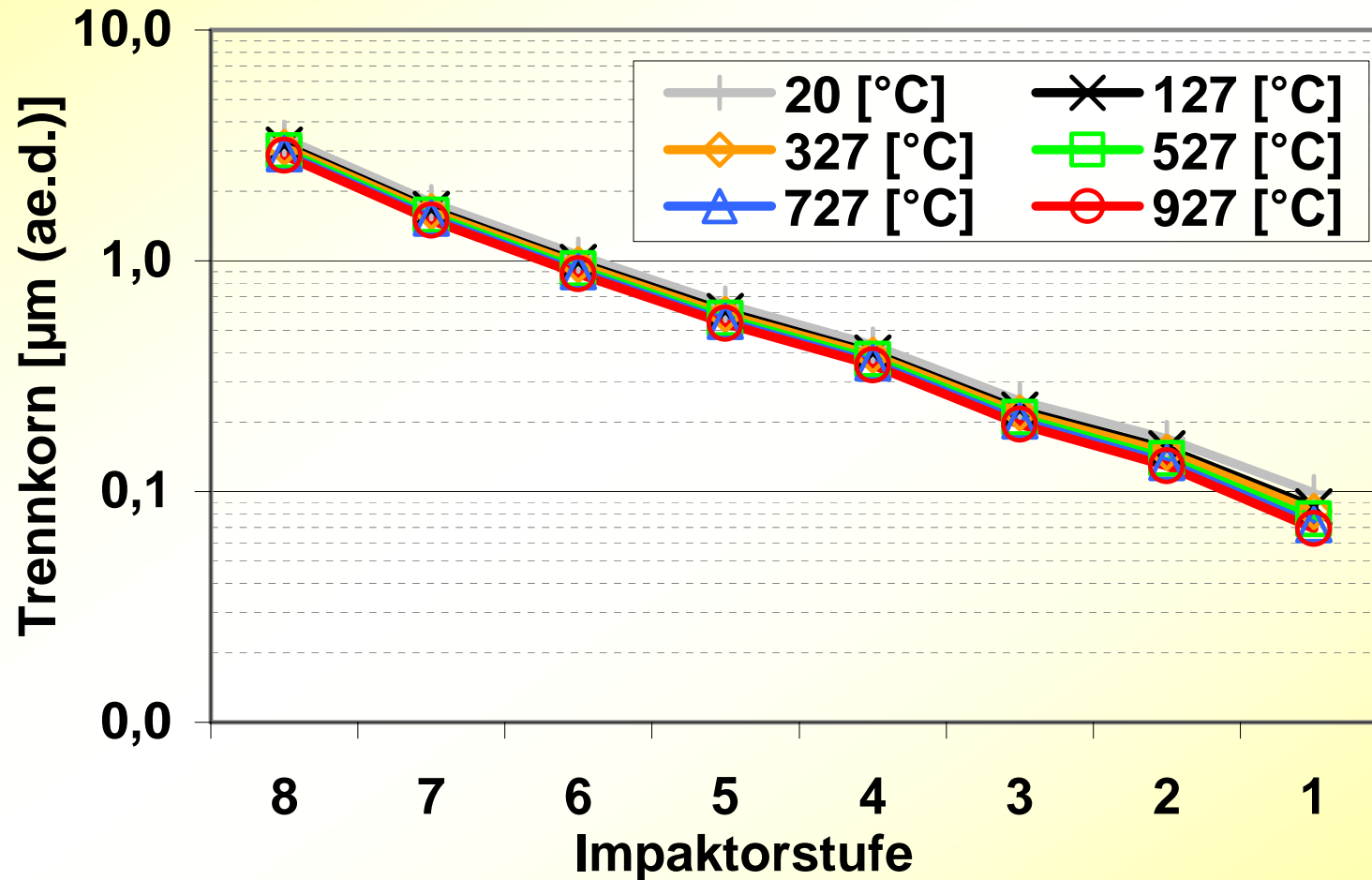
temperaturbeständiger Stahl





BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Hochtemperaturimpaktor (HTI) – Designdaten (Trennkörner der Stufen)



Nominaler Durchfluss: 10,05 l/min (bei 20°C)



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Hochtemperaturimpaktor (HTI) – Validierung und Test

➤ Kalttests

- Mikroskopische Überprüfung der effektiven Düsendurchmesser (mittels Lasertechnik gebohrt)
- Bestimmung der Durchflussraten sowie der Drücke zwischen den einzelnen Stufen und Vergleich mit den Auslegungsdaten

➤ Validierung

- Testläufe mit Hackgut an einer 180 kW Rostfeuerungsanlage
- Vergleich der HTI-Messergebnisse mit parallel durchgeführten Messungen mit einem konventionellen Niederdruck-Kaskadenimpaktor (die Messungen wurden im Rauchgas nach Kessel bei ca. 200°C durchgeführt)

	Korngrößenbereich [µm]	MW [mg/Nm ³]	s
HTI	0,16 – 1,11	11,2	2,1
BLPI	0,18 – 1,41	11,9	1,5

Erläuterungen:

- BLPI ... konventioneller Niederdruck-Kaskadenimpaktor
- alle Konzentrationen bezogen auf trockenes Rauchgas und 13 Vol.% O₂
- MW ... Mittelwert; s ... Standardabweichung



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

HTI-Messungen an der MVA der GKS Schweinfurt – Methodik

- **Es wurden HTI-Messungen an 4 Messstellen an der Feuerungslinie 2 durchgeführt.**
 - Bestimmung der Konzentrationen sowie der Korngrößenverteilungen von Aerosolen.
 - Nachfolgende Bestimmung der Partikelzusammensetzungen mittels nasschemischer und SEM/EDX Analysen.
- **Die verwendeten Messstellen wurden entlang des Rauchgasweges durch den Kessel gewählt, um die Auswirkung des Temperaturprofils der Rauchgasströmung auf die Aerosolbildung entsprechend untersuchen zu können.**
- **Es wurde an drei aufeinanderfolgenden Messtagen zumindest eine Messung pro Messstelle durchgeführt.**
- **Die Rauchgastemperaturen an den Messstellen 1 bis 3 wurden vor den HTI-Messungen mittels Absaugpyrometer bestimmt. Es erfolgte ein Abgleich der Messdaten der nächstgelegenen anlageninternen Temperaturmessung mit den Ergebnissen dieser Pyrometermessungen.**



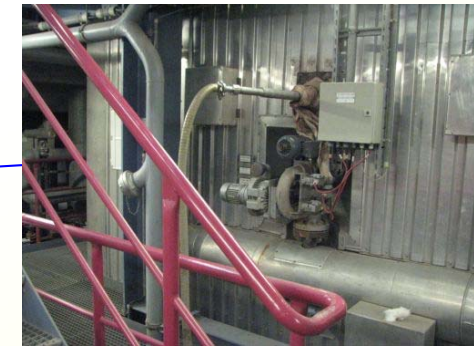
BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

HTI-Messungen an der MVA der GKS Schweinfurt – Messstellenbeschreibung

Messposition 2. Zug



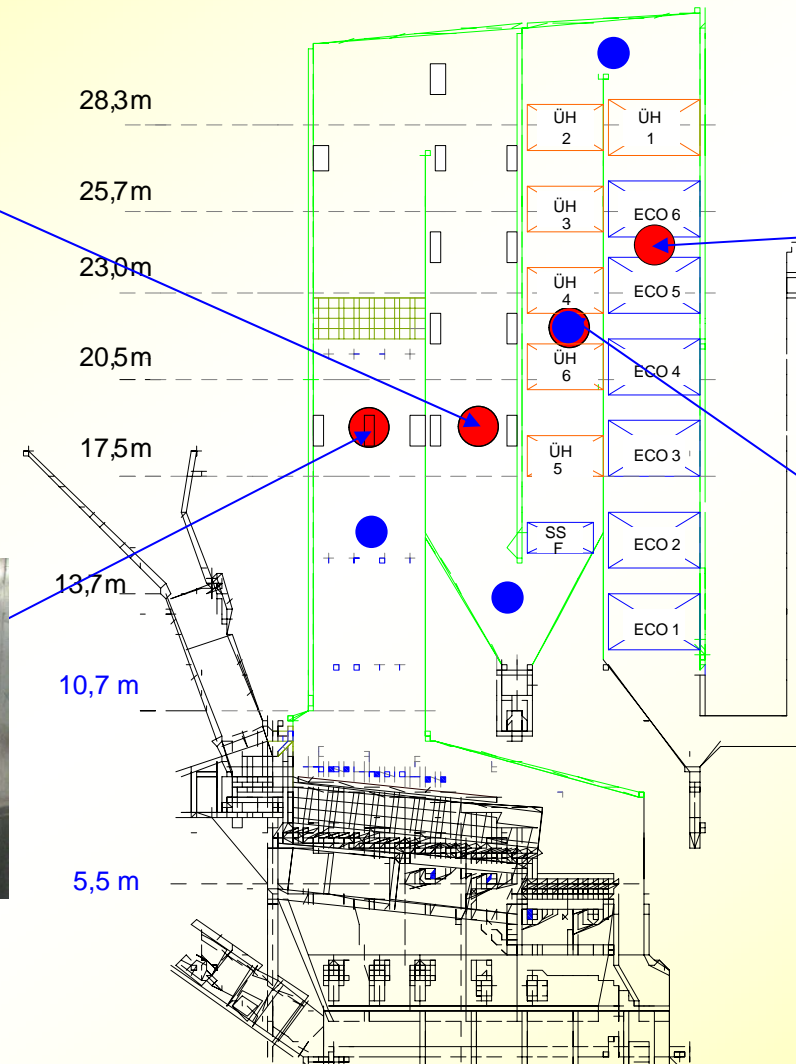
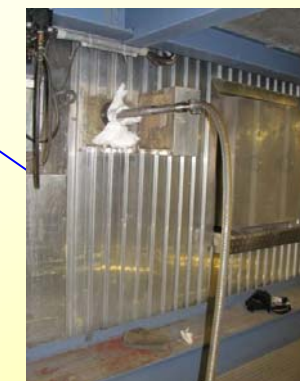
Messposition 4. Zug



Messposition 1. Zug



Messposition 3. Zug

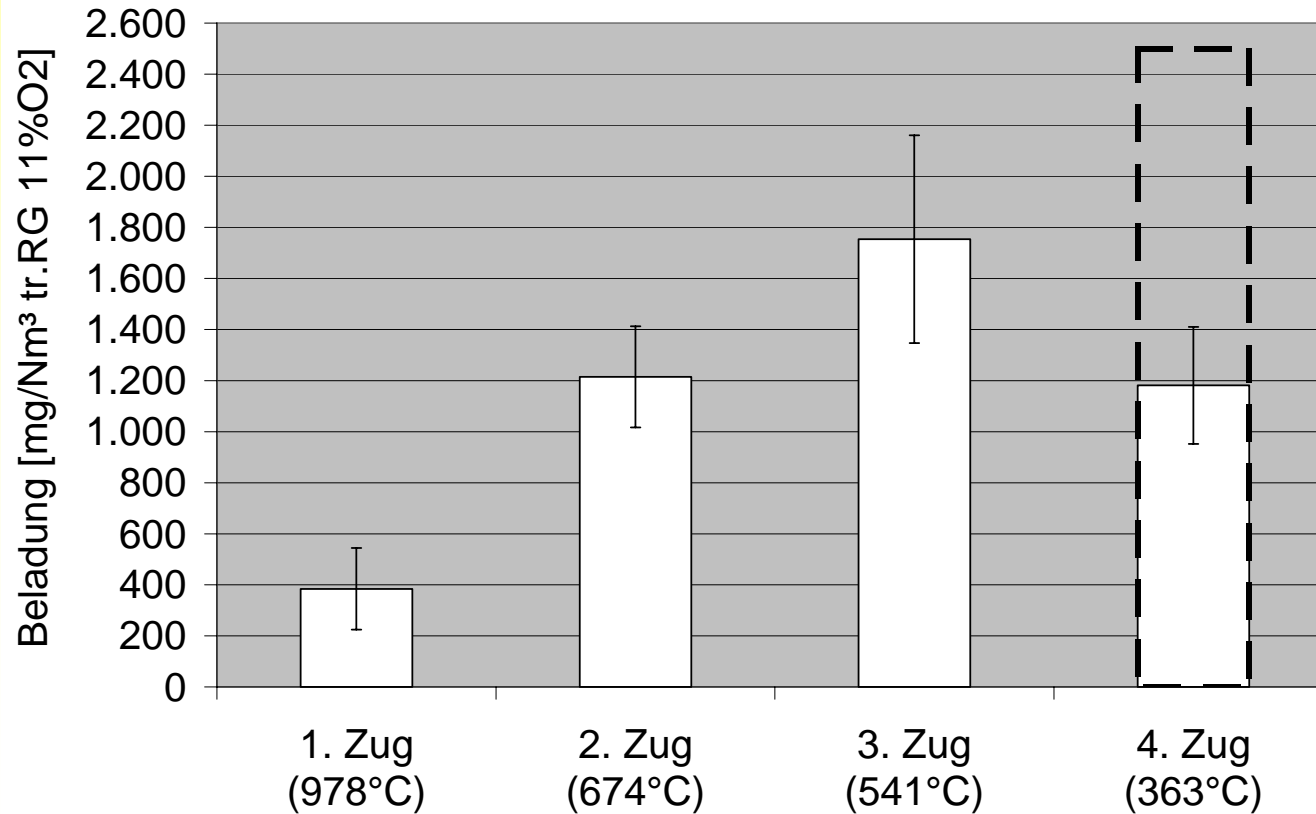


● Für die Auswertung verwendete
Temperaturmessungen



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Aerosolkonzentrationen an den einzelnen Messstellen



Erläuterungen: Summe der Beladungen auf den HTI-Stufen 1 bis 5 (in Abhängigkeit von der Probenahmetemperatur umfassen diese Stufen die Partikel $< 0,85$ bis $< 0,96 \mu\text{m}$);
alle Daten bezogen auf trockenes Rauchgas und 11 Vol% O₂;

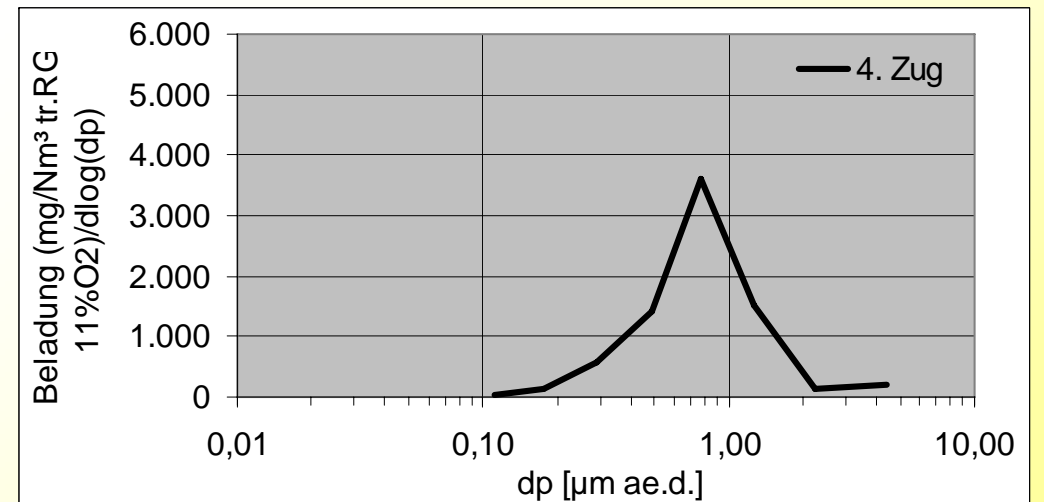
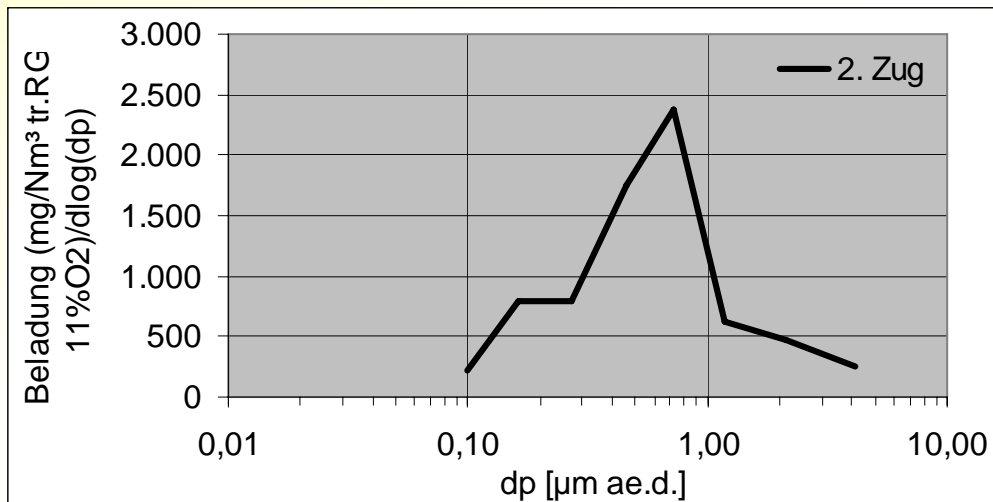
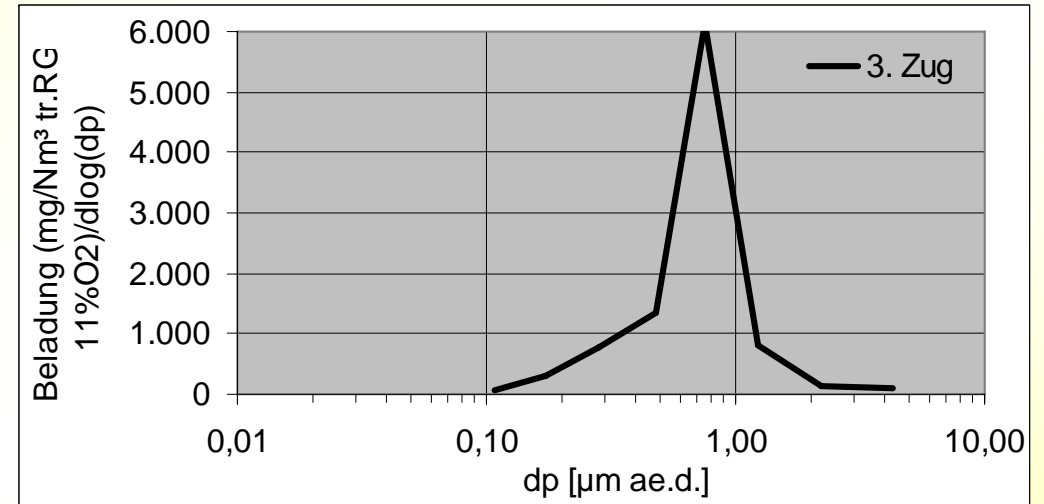
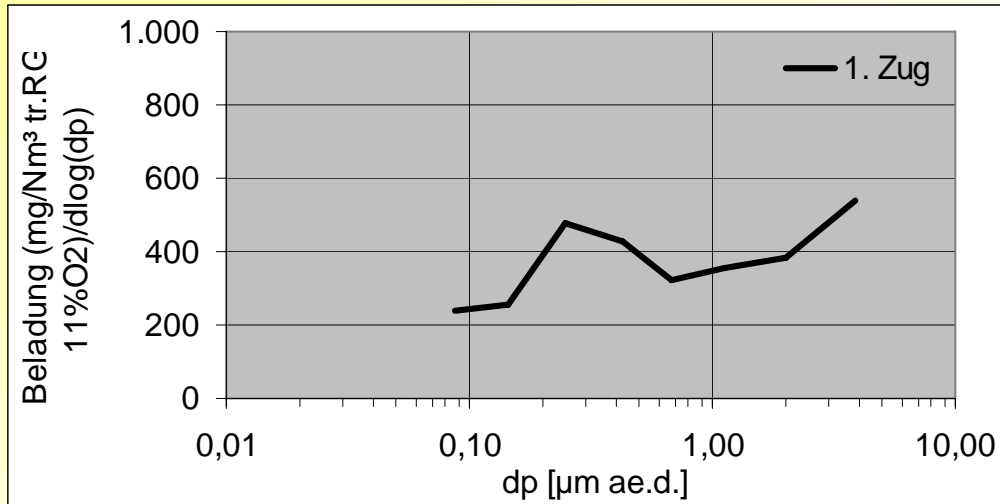
Mittelwerte und Standardabweichungen aus jeweils 3 Einzelmessungen;

- - ... aus den chemischen Analysen abgeleitete erwartete Partikelkonzentration im 4. Zug¹⁴



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Mit dem HTI an den einzelnen Messstellen bestimmte Korngrößenverteilungen



Erläuterungen: ae.d. ... aerodynamischer Durchmesser; alle Daten bezogen auf trockenes Rauchgas und 11 Vol% O₂; Mittelwerte aus 3 Einzelmessungen



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Gravimetrische Auswertungen der HTI Messungen – Partikelbildung / Partikelwachstum (I)

- **Deutliche Zunahme der Partikelkonzentrationen mit abnehmenden Rauchgastemperaturen von Messstelle 1 bis 3**

Messstelle 1:	983°C	384 mg/Nm ³
Messstelle 2:	674°C	1.214 mg/Nm ³
Messstelle 3:	541°C	1.754 mg/Nm ³

- **Abnahme der Partikelkonzentrationen zwischen Messstelle 3 und 4 auf 1.181 mg/Nm² dürfte auf eine ungünstige Strömungsverteilung unmittelbar vor der Messstelle zurückzuführen sein (Strähnenbildung von Russbläuserspühlluft).**
- **Aerosolkonzentration an der Messstelle im 4. Zug abgeleitet aus den chemischen Analysen der an den einzelnen Messstellen gezogenen Partikelproben: ca. 2.500 mg/Nm³**



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Gravimetrische Auswertungen der HTI Messungen – Partikelbildung / Partikelwachstum (II)

- **Ausgeprägtes Partikelwachstum im Bereich zwischen den Messstellen im 1. Zug und im 2. Zug**
 - 1. Zug: Verteilungsmaximum zwischen 0,18 und 0,33 μm
 - 2. Zug: Verteilungsmaximum zwischen 0,58 und 0,90 μm
 - Agglomerationseffekte
 - Hoher Anteil von Oberflächenkondensation von Aschendämpfen (Aerosolkonzentration steigt von durchschnittlich 384 auf 1.214 mg/Nm^3)

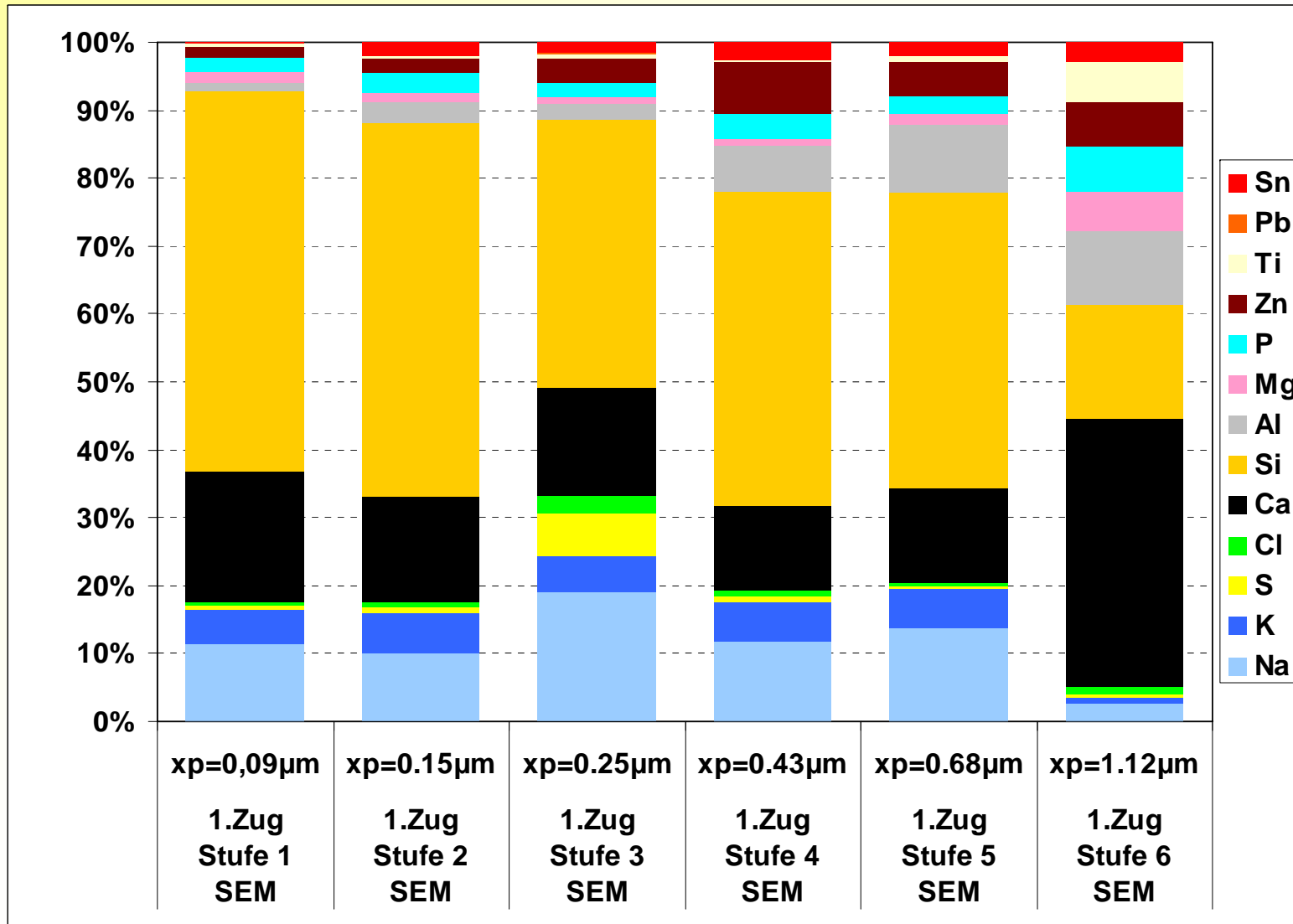
- **Geringeres Partikelwachstum zwischen der Messstelle im 2. Zug und der Messstelle im 3. Zug**
 - Verteilungsmaximum im 3. Zug: zwischen 0,60 und 0,96 μm
 - Kondensation von Aschendämpfen nimmt ab und das Partikelwachstum geht somit ebenfalls zurück (die Partikelmasse steigt von 1.214 auf 1.754 mg/Nm^3)

- **Kaum Partikelwachstum zwischen den Messpunkten im 3. und im 4. Zug**
 - Laut chemischen Analysen weitere Kondensation von aschebildenden Dämpfen



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Ergebnisse von SEM/EDX Analysen – Messstelle 1 (I)



x_p ... mittlerer
aerodynamischer
Durchmesser der
Partikel auf der
jeweiligen HTI-Stufe

Mittlere Rauchgas-
temperatur an der
Messstelle: 978°C

Daten in Atom%
ohne Berück-
sichtigung von O₂



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

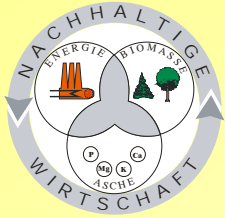
Ergebnisse von SEM/EDX Analysen – Messstelle 1 (II)

➤ **Verhältnismäßig hohe Konzentrationen an Ca und Si**

- Hohe Temperaturen und stark reduzierende Atmosphären während des Ausbrands in den Brennstoffpartikeln
 - teilweise Reduktion schwerflüchtiger Metalle zu gasförmigen Suboxiden (z.B. SiO , Al_2O) oder elementaren Metallen
- Diffusion an die Oberfläche
 - Bildung von Oxiden (SiO_2 , Al_2O_3 , MgO und CaO)
 - diese bilden auf Grund ihrer niedrigen Sättigungsdampfdrücke sofort Partikel im Korngrößenbereich von wenigen nm durch Nukleation
- Partikelwachstum bis zur Messstelle 1 durch Koagulation

➤ **Mit steigender Korngröße Anstieg der Mg-, Al- und Ca-Konzentrationen**

- Thermische Fragmentierung mineralischer Strukturen



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Ergebnisse von SEM/EDX Analysen – Messstelle 1 (III)

➤ Zn-Partikelbildung

- Zn wird unter reduzierenden Bedingungen am Rost elementar in die Gasphase freigesetzt.
- Sobald Sauerstoff zur Verfügung steht, bildet sich ZnO, das dann auf Grund seines sehr niedrigen Sättigungsdampfdruckes sofort Partikel bildet.

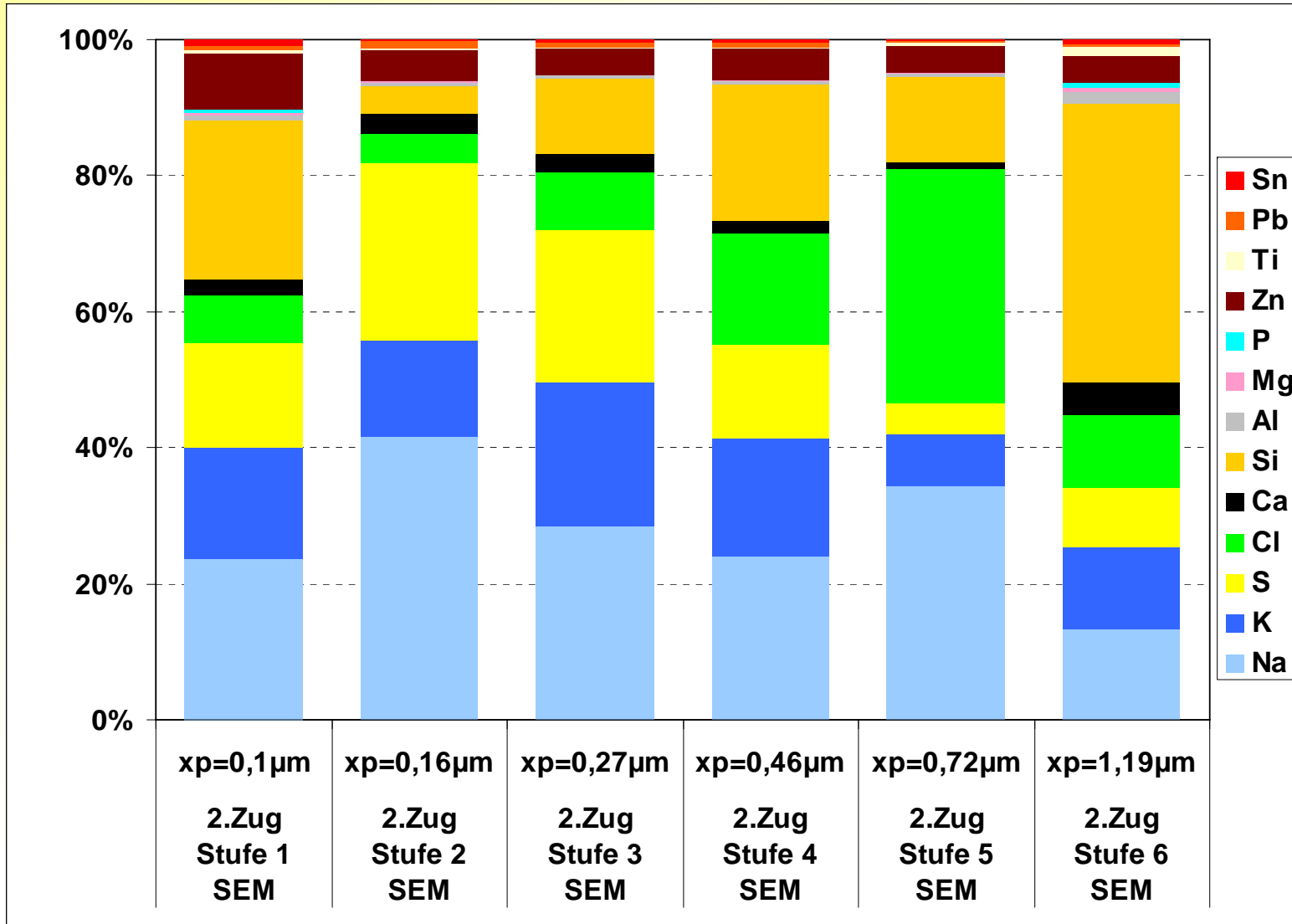
➤ Alkalimetall-Partikelbildung

- Bildung von Na_2SO_4 Partikeln durch Nukleation (Stufe 3) (sollte thermodynamisch gesehen zwischen 1.100 und 1.200°C, also bereits vor der Messstelle 1 einsetzen).
- Kondensation anderer K- und Na-Verbindungen (u.U. KOH) im gesamten Korngrößenbereich.



BIOENERGIESYSTEME GmbH
 Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Ergebnisse von SEM/EDX Analysen – Messstelle 2 (I)



x_p ... mittlerer
 aerodynamischer
 Durchmesser der
 Partikel auf der
 jeweiligen HTI-Stufe

Mittlere Rauchgas-
 temperatur an der
 Messstelle: 674°C

Daten in Atom%
 ohne Berück-
 sichtigung von O₂



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Ergebnisse von SEM/EDX Analysen – Messstelle 2 (II)

- **Nukleation und Kondensation von Alkalimetallchloriden und -Sulfaten**
 - Abkühlung des Rauchgases im 1. und 2. Zug der Feuerung.
 - Übersättigung von Na_2SO_4 , K_2SO_4 , NaCl und KCl sowie daraus resultierend Nukleation bzw. Kondensation auf Oberflächen bereits bestehender Partikel.
 - Kondensation löst Nukleation auf Grund sinkender Übersättigungsraten (langsame Abkühlung) und großer Anzahl bereits zur Verfügung stehender Oberflächen als dominierenden Phasenübergangsmechanismus ab.

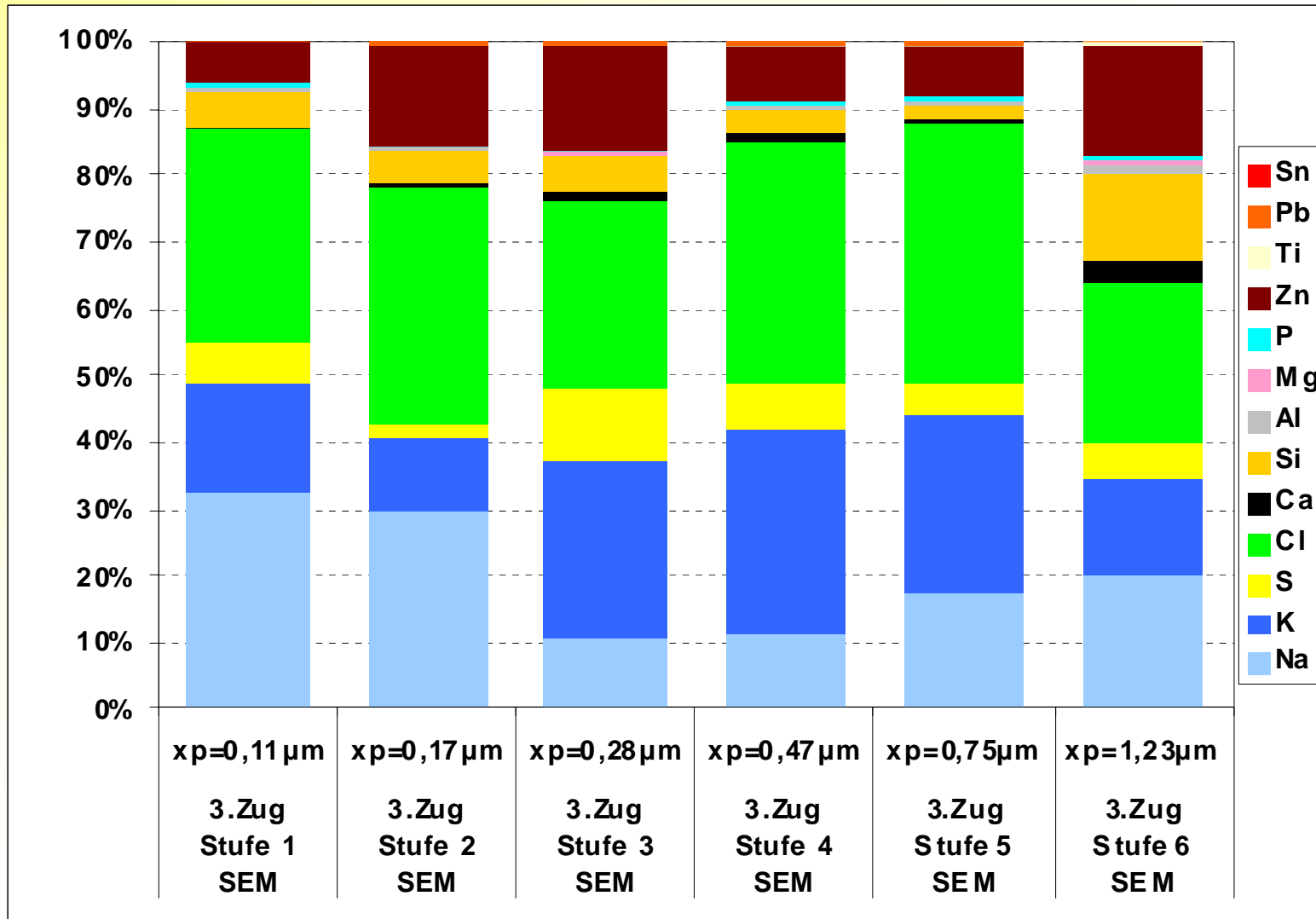
- **Kondensation von Zn-Verbindungen (höchstwahrscheinlich ZnCl_2) auf Oberflächen bereits bestehender Partikel**

- **Konzentrationen an schwer flüchtigen Aschenbildnern (Ca, Si, Mg, Al) sinken deutlich**
 - Bildung der Si-, Ca-, Mg- und Al-haltigen Partikel ist bereits knapp nach Austritt aus dem Brennstoffbett abgeschlossen → Verdünnung mit kondensierenden Aschedämpfen → Absinken der Konzentrationen



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Ergebnisse von SEM/EDX Analysen – Messstelle 3 (I)



x_p ... mittlerer
aerodynamischer
Durchmesser der
Partikel auf der
jeweiligen HTI-Stufe

Mittlere Rauchgas-
temperatur an der
Messstelle: 541°C

Daten in Atom%
ohne Berück-
sichtigung von O₂



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

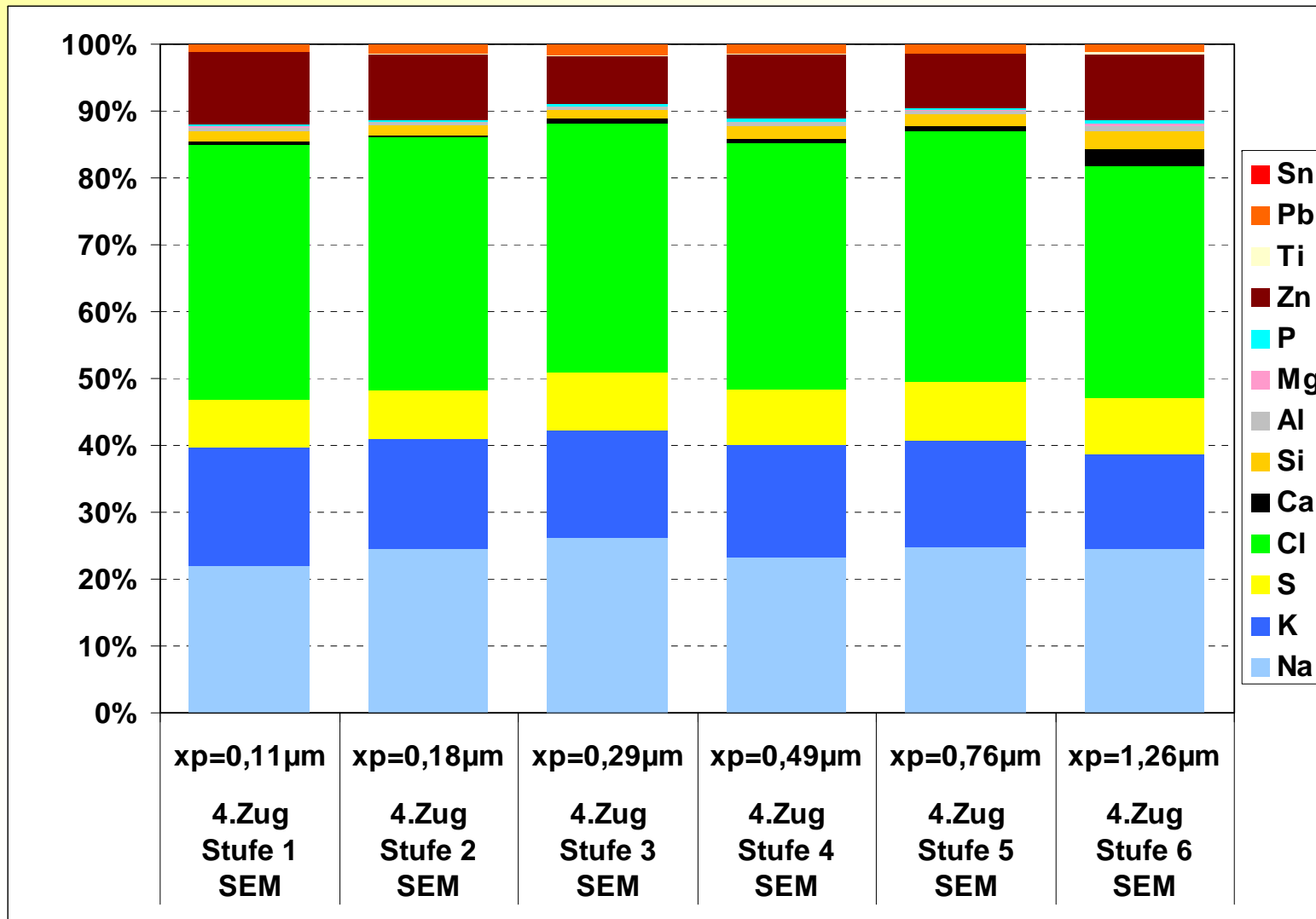
Ergebnisse von SEM/EDX Analysen – Messstelle 3 (II)

- **Deutlich erhöhte Zn-, K- und Cl-Konzentrationen.**
- **KCl hat im Vergleich zu NaCl einen höheren Sättigungsdampfdruck, wodurch KCl-Kondensation erst bei niedrigeren Temperaturen einsetzt.**
- **Zn dürfte als $ZnCl_2$ gebunden sein**
Die Analysen zeigen, dass mehr Cl vorhanden ist als zur Bindung der nicht als Sulfat gebundenen K- und Na-Anteile notwendig ist.
- **Einsetzen der Kondensation von Pb-Verbindungen**
Im vorliegenden Temperaturbereich höchstwahrscheinlich PbO oder $PbCl_2$.
- **Weiteres Absinken der Si-, Ca-, Mg- und Al-Konzentrationen**
Fortschreitende Verdünnung durch Kondensation leicht flüchtiger Aschenbildner.



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Ergebnisse von SEM/EDX Analysen – Messstelle 4 (I)



x_p ... mittlerer
aerodynamischer
Durchmesser der
Partikel auf der
jeweiligen HTI-Stufe

Mittlere Rauchgas-
temperatur an der
Messstelle: 363°C

Daten in Atom%
ohne Berück-
sichtigung von O₂



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

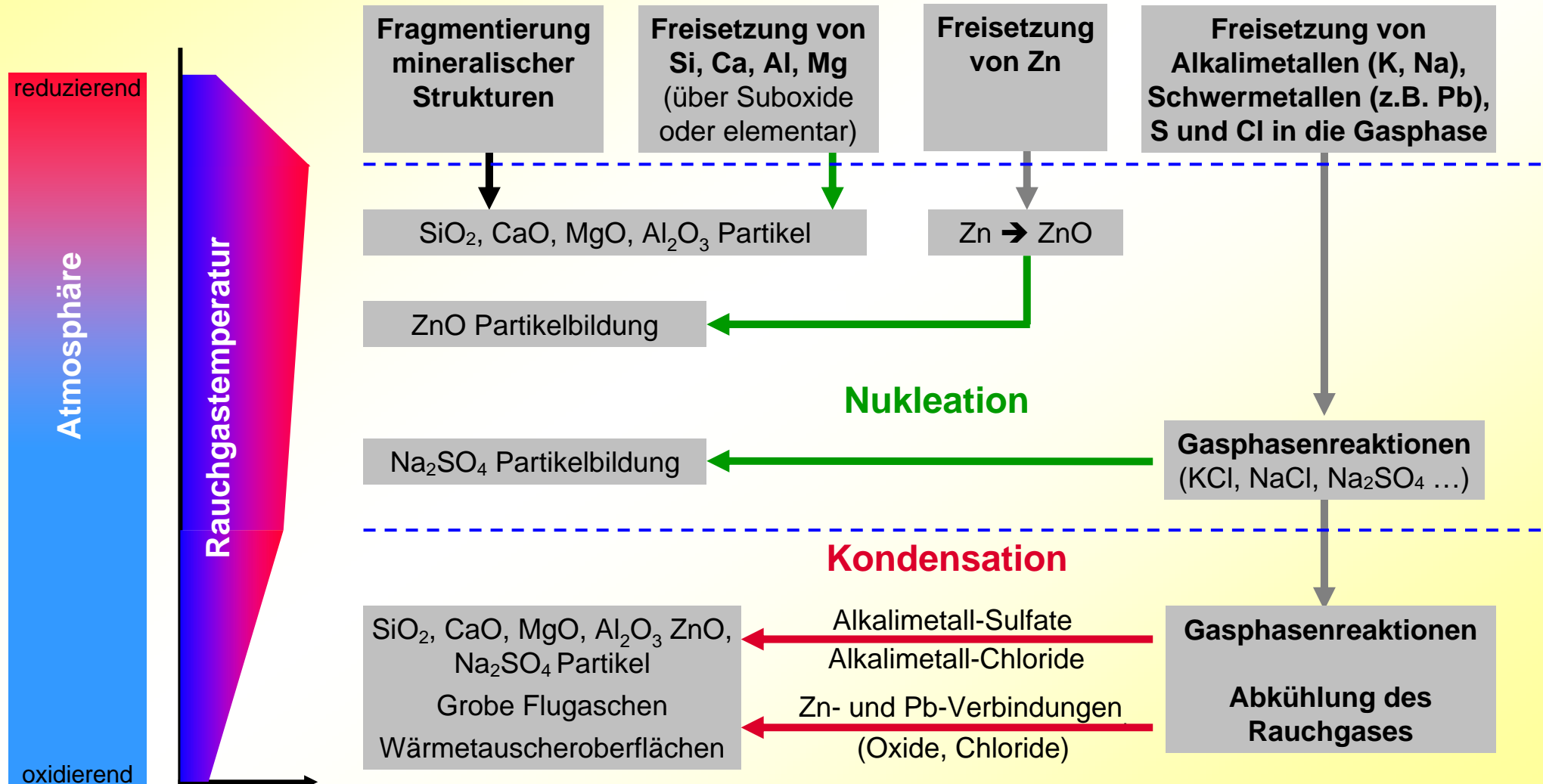
Ergebnisse von SEM/EDX Analysen – Messstelle 4 (II)

- **Über alle Stufen ist eine relativ konstante Zusammensetzung zu erkennen**
→ wahrscheinlich ein Resultat weiterer Agglomerations- und Kondensationseffekte
- **Hauptbestandteile der Partikel:**
 - K- und Na-Chloride
 - K- und Na-Sulfate (in geringeren Konzentrationen)
- **Zn ist hauptsächlich in Chloriden gebunden.**
- **Im Vergleich zur Messstelle 3 höhere Pb-Konzentrationen**
 - Pb-Verbindungen, speziell PbCl_2 erreichen erst bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen ihre Sättigungsdampfdrücke.
 - Deshalb beginnen sie üblicherweise erst im Bereich des Economisers in erheblichen Mengen zu kondensieren.
 - Aus den Elementbilanzen über die einzelnen Impaktorstufen lässt sich ableiten, dass ein Großteil des Pb als Chlorid gebunden ist.



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Schlussfolgerungen – Partikelbildung im Zuge der Müllverbrennung





BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Schlussfolgerungen (I)

- **Kondensation von Cl-haltigen Verbindungen setzt im Bereich zwischen der Messstelle im 1. Zug und der Messstelle im 2. Zug, also noch vor Eintritt in die Überhitzer ein.**
- **Cl-Verbindungen, die bereits vor den Überhitzern als Aerosole vorliegen, sind bezüglich der Depositionsbildung und der Hochtemperatur-Chlor-Korrosion von eher untergeordneter Bedeutung.**
(Deposition nur durch Thermophorese möglich)
- **Bereich zwischen Messstelle 2 und 3 (zwischen den Überhitzerbündeln)**
 - Massive Kondensation von Alkalimetall- und Schwermetallchloriden.
 - In diesem Abschnitt kondensiert ca. doppelt so viel Cl (auf Masse bezogen) wie zwischen Messstelle 1 und 2 und bildet Partikel.
 - Es besteht somit auch ein entsprechend hohes Potential für die direkte Kondensation von Chlorverbindungen auf den Überhitzerrohren bzw. den bereits gebildeten Depositionen.



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Schlussfolgerungen (II)

- **Speziell am Beginn der Durchströmung der Überhitzer wird die Depositionsbildung durch Oberflächenkondensation zusätzlich durch den hohen Temperaturunterschied zwischen Rohr- bzw. Depositionsoberfläche und Rauchgas verstärkt.**
- **Die Alkalimetall- und Schwermetallchloride tragen zu einer Absenkung der Aschenschmelzpunkte bei**
 - Die Depositionsoberflächen enthalten höhere Anteile an geschmolzenen Phasen und werden somit „klebriger“.
 - Depositionswachstum wird beschleunigt.
- **Die gemessenen Daten liefern wertvolle Erkenntnisse bzgl. der Aerosolbildung in Müllverbrennungsanlagen und stellen eine wichtige Basis für die Weiterentwicklung und die Validierung von Aerosol- und Depositionsbildungsmodellen dar.**
- **Weiters liefern die Ergebnisse wichtige Informationen bzgl. der zu erwartenden chemischen Zusammensetzungen von Depositionen (insbesondere von wandnahen Belägen) in den einzelnen Kesselsektionen²⁹**



BIOENERGIESYSTEME GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz



***Danke für Ihre
Aufmerksamkeit***

Prof. Dipl.-Ing. Dr. Ingwald Obernberger
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz, Austria
TEL.: +43 (316) 481300; FAX: +43 (316) 4813004
Email: obernberger@bios-bioenergy.at
HOMEPAGE: <http://www.bios-bioenergy.at>