

# Primärseitige Vermeidung von Emissionen – der nachhaltige Weg

**Prof.Dipl.-Ing.Dr. Ingwald Obernberger**



**BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH**

**Innfeldgasse 21b, A-8010 Graz, Austria**

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

**E-MAIL: [office@bios-bioenergy.at](mailto:office@bios-bioenergy.at)**

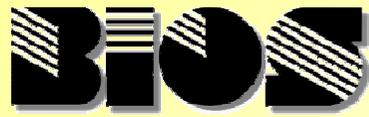
**HOME PAGE: <http://www.bios-bioenergy.at>**



**BIOENERGIESYSTEME GmbH**  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

## Inhalt

- **Zielsetzungen**
- **Brennstoffcharakterisierung und brennstoffseitige Primärmaßnahmen**
- **Feuerungs- und regelungstechnische Primärmaßnahmen**
- **Umsetzung von Low-Emission Feuerungskonzepten**
- **Zusammenfassung und Schlussfolgerungen**



BIOENERGIESYSTEME GmbH  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

# Zielsetzungen bei der Entwicklung von Low-Emission Biomasse- Feuerungskonzepten

- **Einsatz intelligenter Feuerungs- und Regelungstechnik**  
➔ Vermeidung der Emissionen direkt während der Verbrennung
- **Vermeidung von sekundärseitigen Maßnahmen, wo immer es möglich ist**
- **Primärmaßnahmen sind typischerweise immer deutlich kostengünstiger als Sekundärmaßnahmen**
- **Entwicklungsrichtung: fast „Zero-Emission-Biomassefeuerung“**



**BIOENERGIESYSTEME GmbH**  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

---

# **Brennstoffcharakterisierung und brennstoffseitige Primärmaßnahmen**



BIOENERGIESYSTEME GmbH  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

## Einleitung

- **In der jüngeren Vergangenheit wurden verschiedene Methoden zur Verbesserung der feuerungstechnischen Eigenschaften von so genannten problematischen Biomasse-Brennstoffen entwickelt**
  - Leaching
  - Torrefikation
  - Gezieltes Mischen von Brennstoffen mit unterschiedlichen feuerungstechnischen Eigenschaften („Fuel Blending“)
  - Zumischung von Additiven
- **Speziell bzgl. aschebedingter Probleme können durch Zumischung von anorganischen Additive aus problematischen Brennstoffen „Design Brennstoffe“ mit deutlich verbesserten Verbrennungseigenschaften erzeugt werden**
- **Um die zielgerichtete Definition derartiger Design-Brennstoffe für Festbettfeuerungen zu unterstützen, wurde eine neue systematische Bewertungsstrategie entwickelt, die auf fortschrittlichen Brennstoff-Charakterisierungswerkzeugen beruht.**



BIOENERGIESYSTEME GmbH  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

# Strategie zur Bewertung der feuerungstechnischen Eigenschaften von Brennstoff/Additiv-Mischungen (II)

## Schritt 1

### Verbrennungstechnische Charakterisierung

- Brennstoff
  - Brennstoff-Additiv-Mischung
- mittels**
- chemischen Analysen
  - Evaluierung von Brennstoff-Indexen

- Erstabschätzung wie aschebezogene Brennstoffeigenschaften durch Additive beeinflusst werden können
- Identifikation von geeigneten Additiven und Additivierungsraten

- Qualitative Informationen

## Schritt 2

### Thermodynamische Hochtemperatur Gleichgewichtsberechnungen

- Brennstoffe
- Brennstoff-Additiv-Mischung

### Verbessertes Verständnis des Einflusses von Additiven auf

- Aschenbildung
- Ascheschmelzverhalten
- Freisetzung von aschebildenden Elementen

- Semi-quantitative Informationen

## Schritt 3

### Verbrennungstests in Laborreaktoren

- mit ausgewählten Brennstoff-Additiv-Mischungen

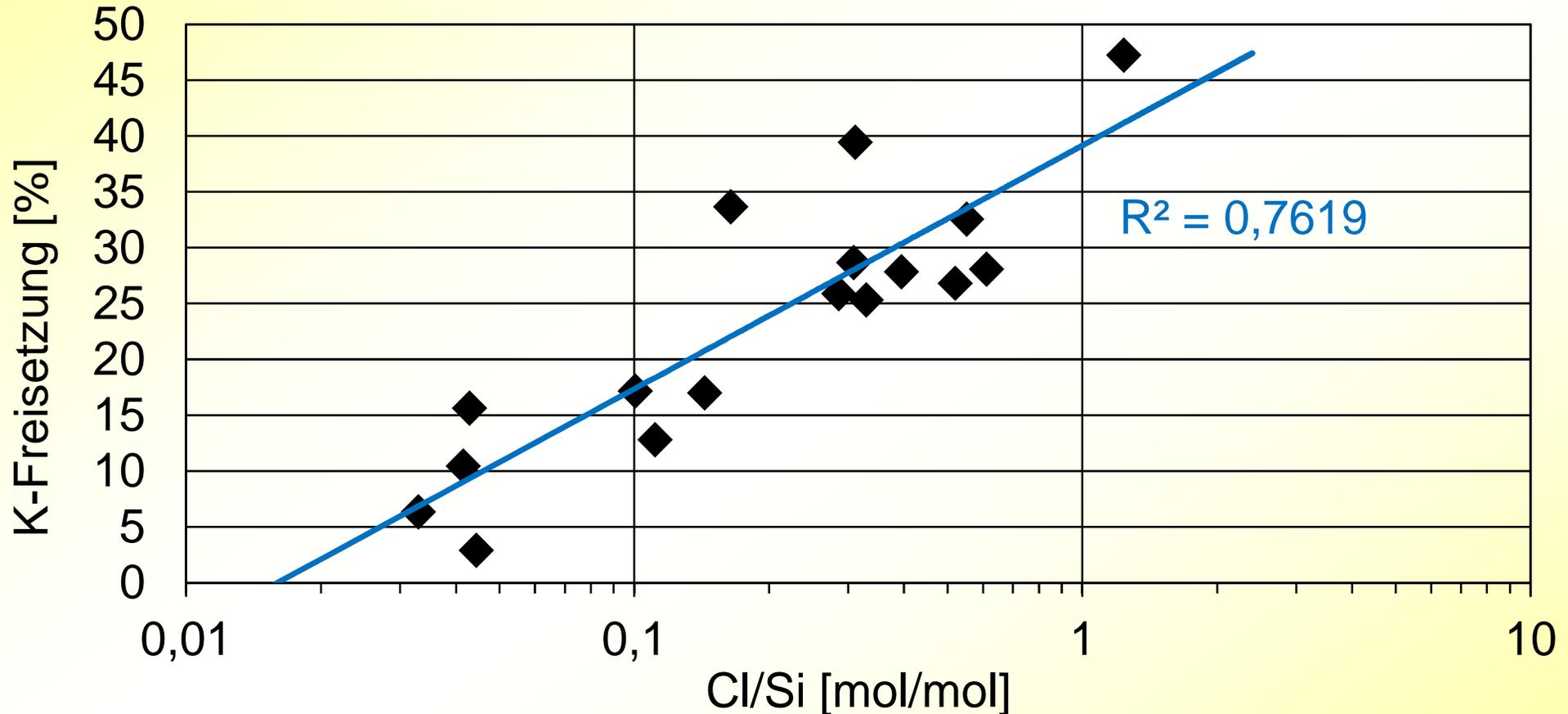
- Informationen zum Verbrennungsprozess
- Freisetzungsdaten bzgl. N-Verbindungen sowie anorganischer Elemente (K, Na, S, Cl)
- Indikationen bzgl. Ascheschmelzverhalten

- Quantitative Informationen



BIOENERGIESYSTEME GmbH  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

# Brennstoffindexe – Abschätzung der K-Freisetzung in die Gasphase auf Basis des molaren Verhältnisses Cl/Si

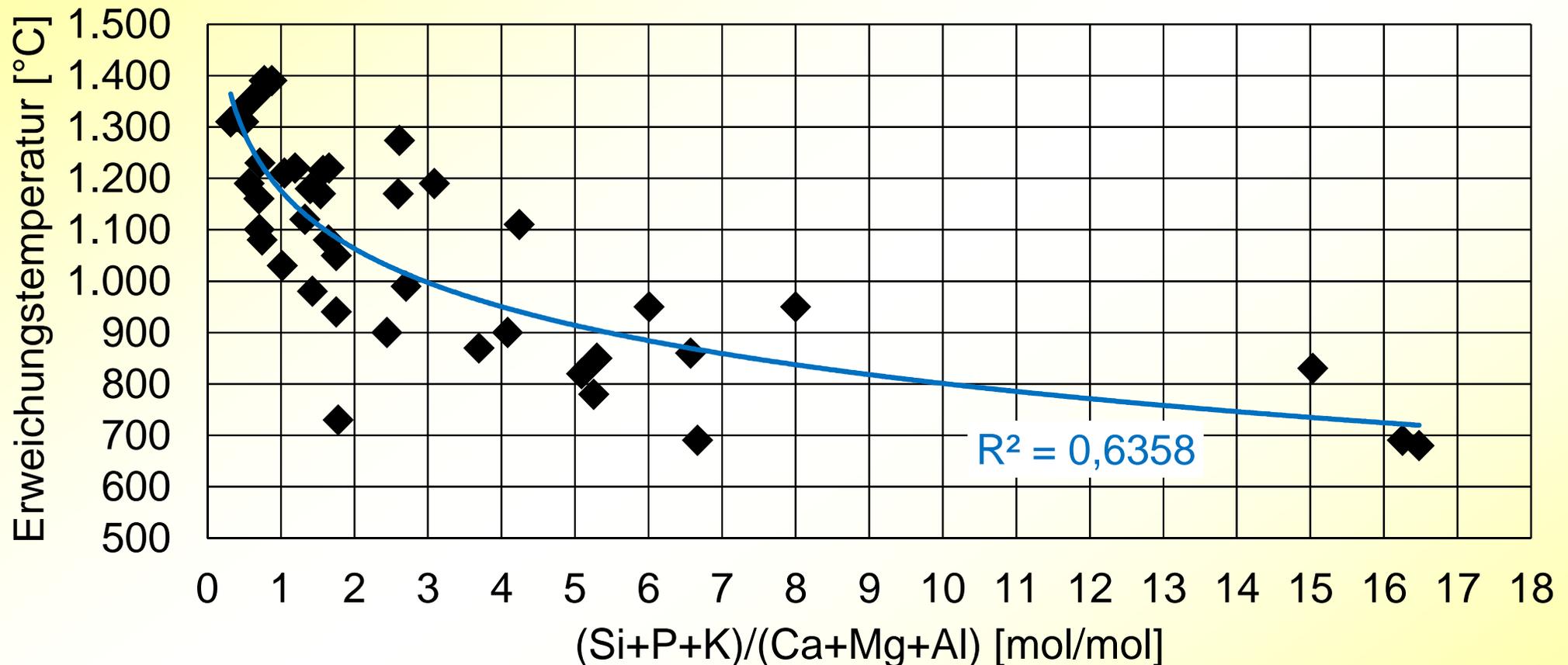


Erläuterungen: Daten aus Labor-Reaktor-Testläufen mit holzartigen und halmgutartigen Brennstoffen;  
Quelle: Brennstoffdatenbank der BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH



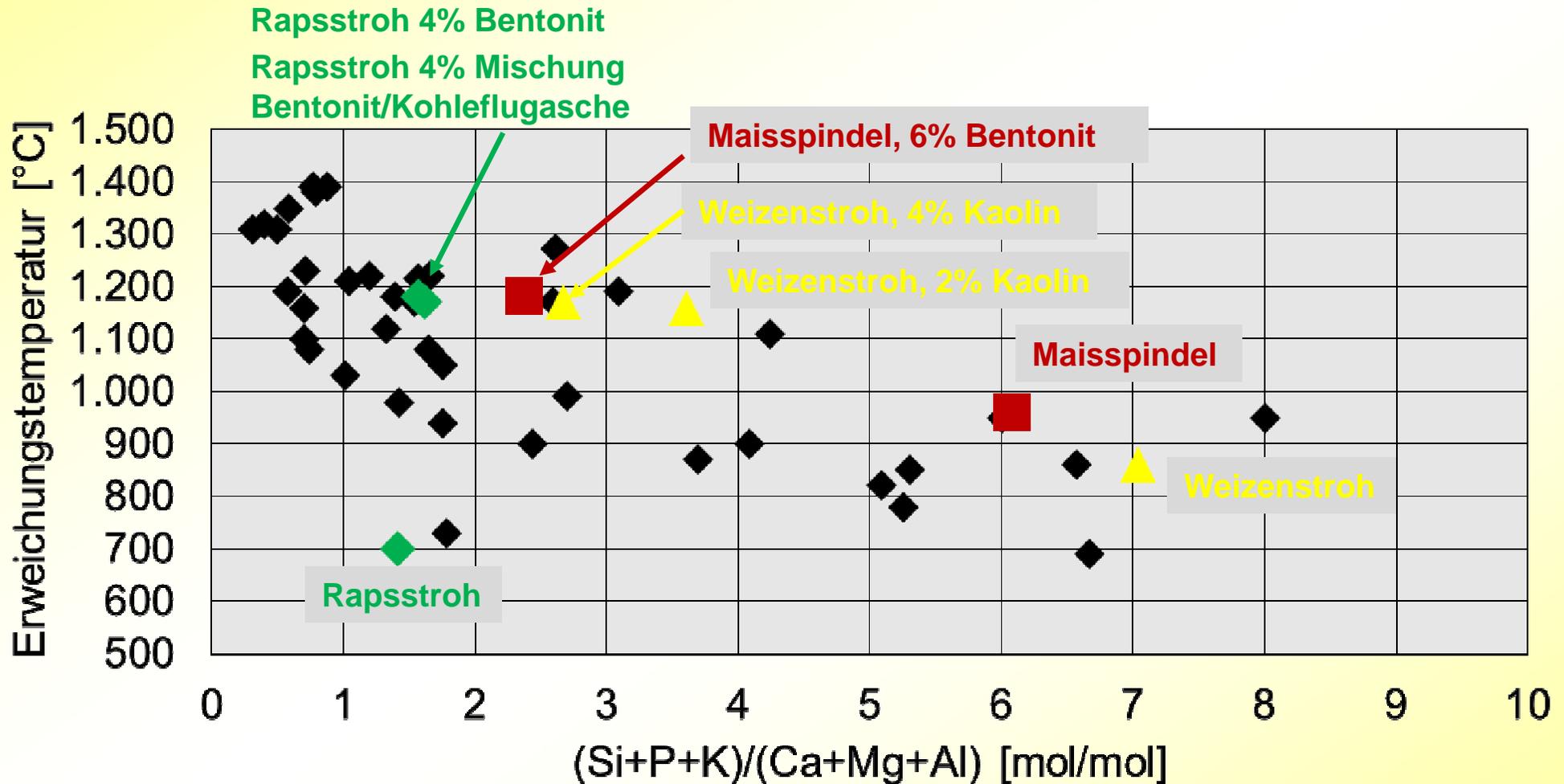
BIOENERGIESYSTEME GmbH  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

# Brennstoffindexe – Abschätzung des Aschenschmelzverhaltens auf Basis des mol. Verhältnisses $(Si+P+K)/(Ca+Mg+Al)$

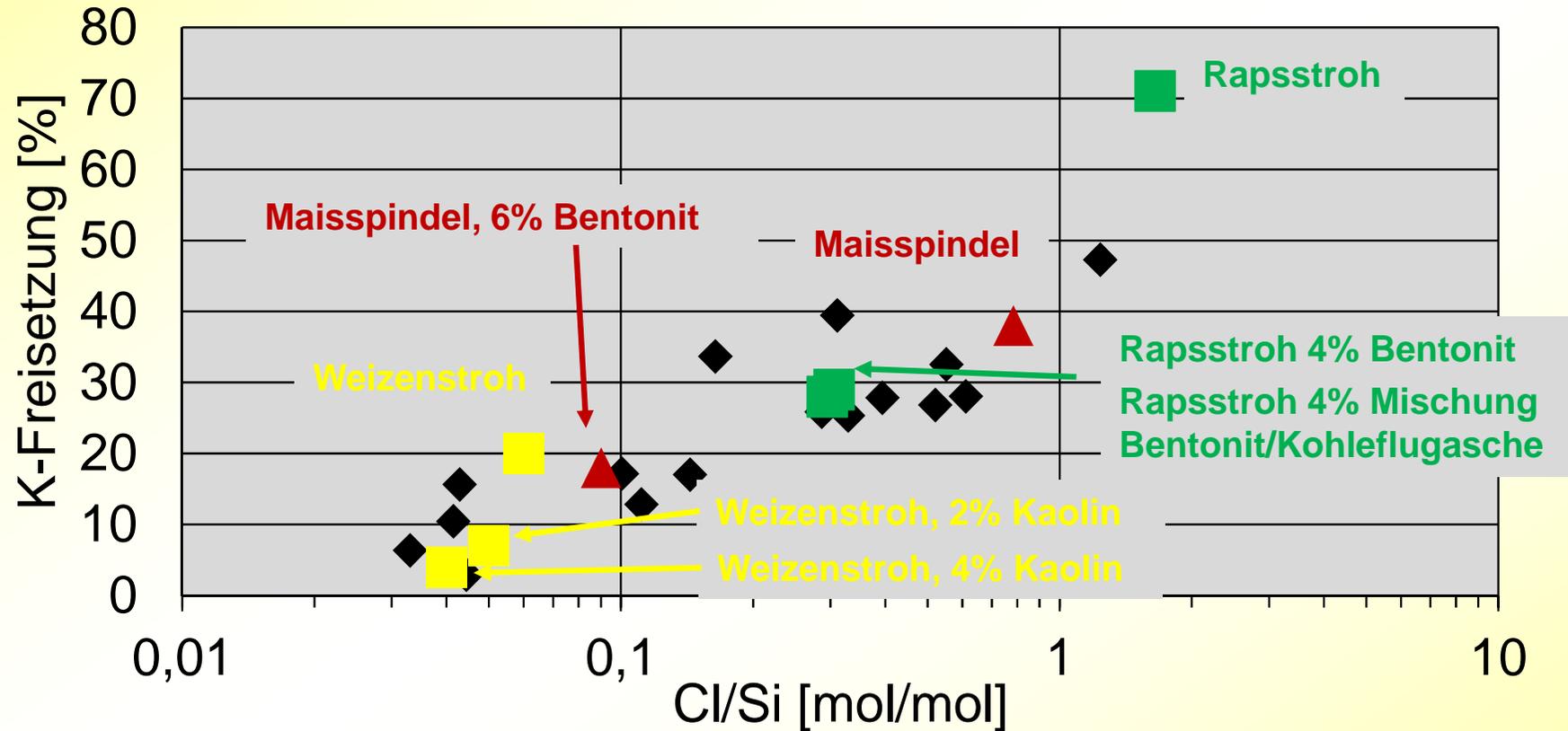


Erläuterungen: Vergleich des Brennstoff-Index mit der Aschenerweichungstemperatur nach CEN/TS 15370-1;  
Quelle: Brennstoffdatenbank der BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH

# Beeinflussung des Aschenschmelzverhaltens durch Additivierung



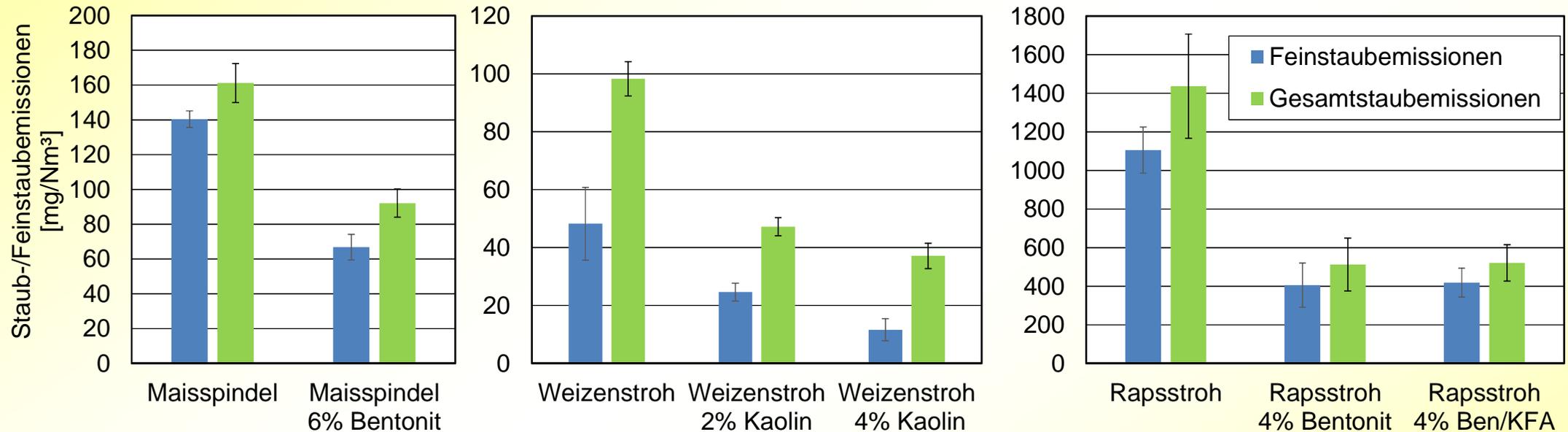
Erläuterungen: Daten aus Testläufen an einer 180 kW Flachschrubstfeuerung; Vollastbetrieb;  
Aschenerweichungstemperatur gemäß CEN/TS 15370-1;  
Schwarze Markierungen: Datenbank-Werte der Biomasse-Brennstoffdatenbank der  
BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH



Erläuterungen: Daten aus Testläufen an einer 180 kW Flachschiebrostfeuerung; Vollastbetrieb;  
Schwarze Markierungen: Datenbank-Werte der Biomasse-Brennstoffdatenbank der BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH

# Einfluss der Brennstoffadditivierung auf Staub- und Feinstaubemissionen

## ➤ Staub- und Feinstaubemissionen am Kesselaustritt



Erläuterungen: Daten aus Testläufen an einer 180 kW Flachschiebrostfeuerung; Volllastbetrieb;  
Ben ... Bentonit; KFA ... Flugasche aus der Steinkohlenverbrennung;  
Emissionen bezogen auf trockenes Rauchgas und 13 Vol% O<sub>2</sub>

## ➤ Reduktion der Staub- und Feinstaubemissionen um mehr als 50%



**BIOENERGIESYSTEME GmbH**  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

---

# Feuerungs- und regelungstechnische Primärmaßnahmen



BIOENERGIESYSTEME GmbH  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

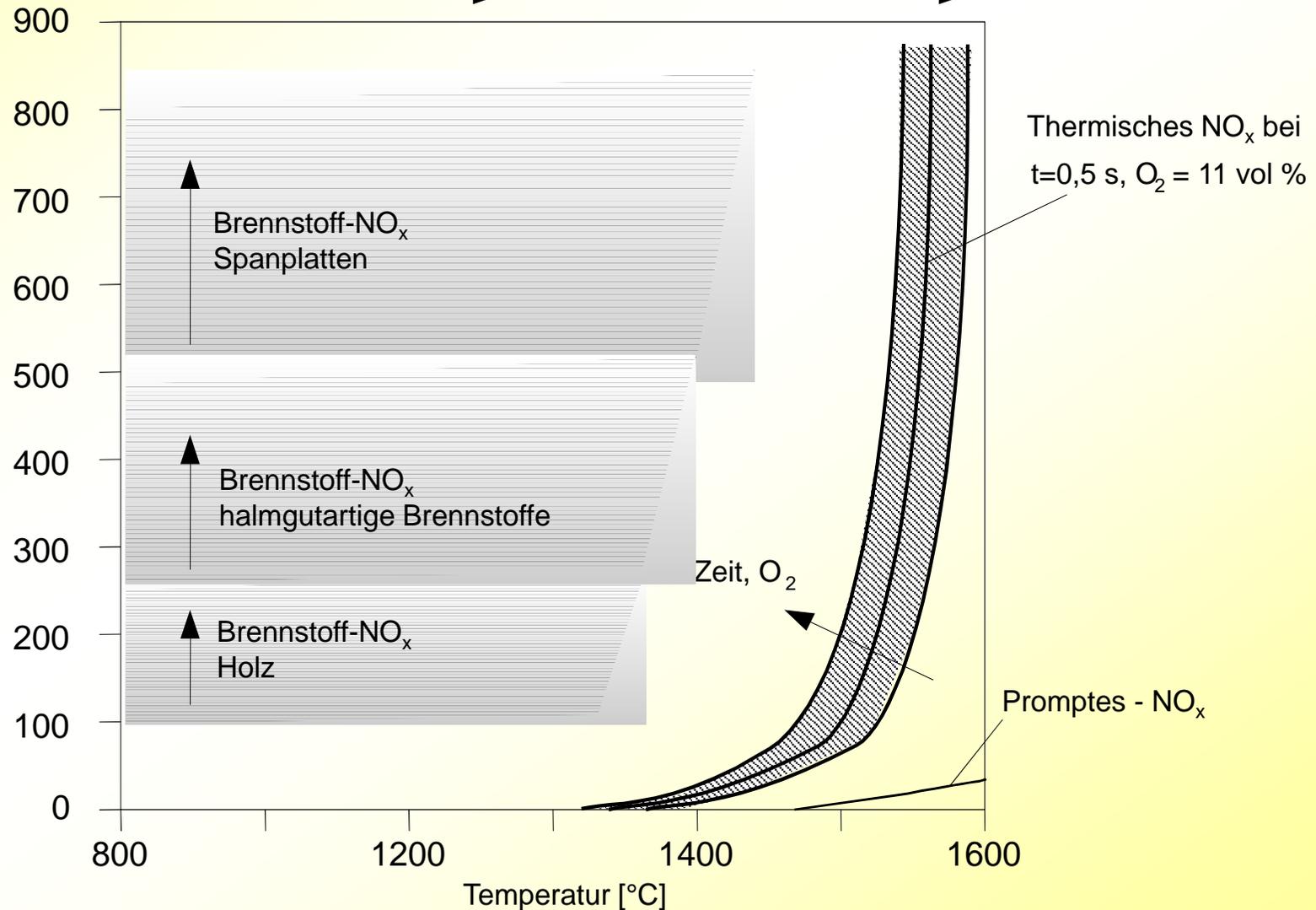
# NO<sub>x</sub>-Emissionen – Abhängigkeit vom Brennstoff und der Verbrennungstemperatur

NO<sub>x</sub> als NO<sub>2</sub> bei 11% O<sub>2</sub>

[mg/m<sup>3</sup>]

Biomasseverbrennung –  
typischer Bereich

Thermisches NO<sub>x</sub> und promptes NO<sub>x</sub>



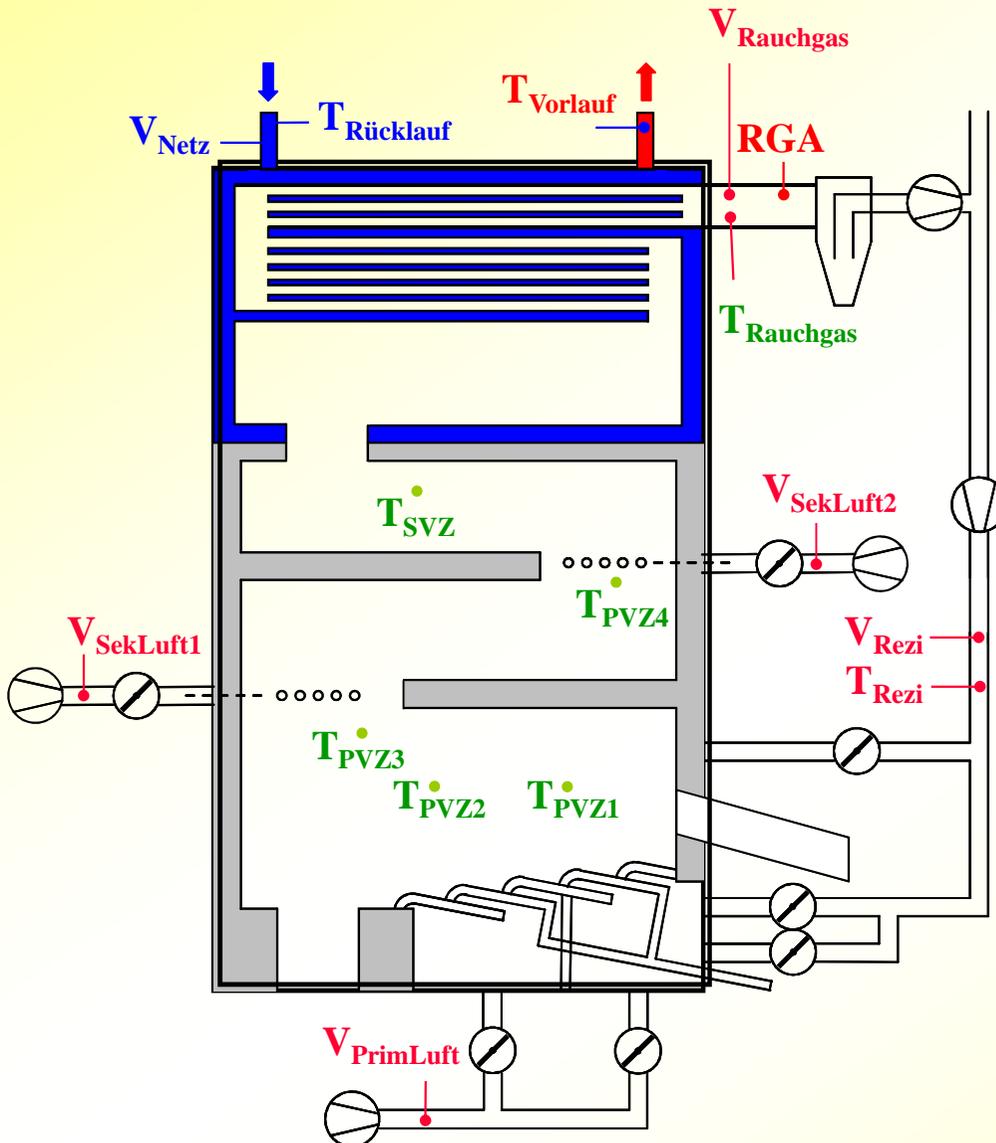


BIOENERGIESYSTEME GmbH  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

# **Einflussparameter auf die NO<sub>x</sub>-Bildung – Testlaufergebnisse**

- **Ergebnisse von Testläufen an einer 180 kW Rostfeuerung zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Parameter auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen.**
- **Untersuchte Parameter und Parametervariationen**
  - **Verbrennungsluftverhältnis in der Primärverbrennungszone ( $\lambda_{PVZ}$ ):** 0,4 – 1,4
  - **Verweilzeit der Rauchgase in der PVZ:** lange oder kurze PVZ
  - **Temperatur in der PVZ:** 900°C, 1,000°C, 1,100°C
  - **Rauchgasrezirkulation:** unter oder über Rost
  - **Falschlufteinträge wurden bestimmt und bei der Berechnung der effektiv vorliegenden Verbrennungsluftverhältnisse berücksichtigt**
- **Pro Testlauf wurde ein Parameter geändert**
- **Alle Testläufe wurden bei ca. 150 kW Kesselleistung durchgeführt**
- **Gesamtverbrennungsluftverhältnis ( $\lambda_{tot}$ ): ca. 1,4**

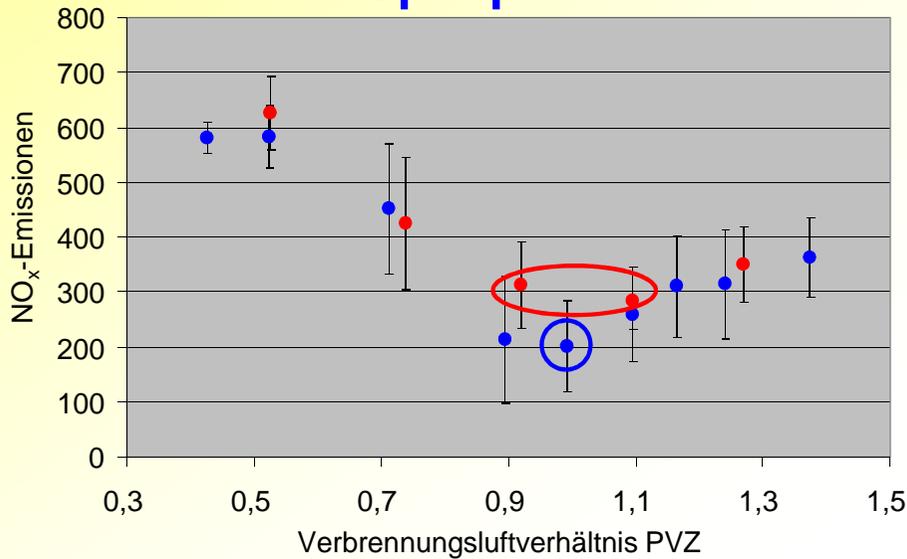
# Einflussparameter auf die NO<sub>x</sub>-Bildung – eingesetzte Versuchsanlage



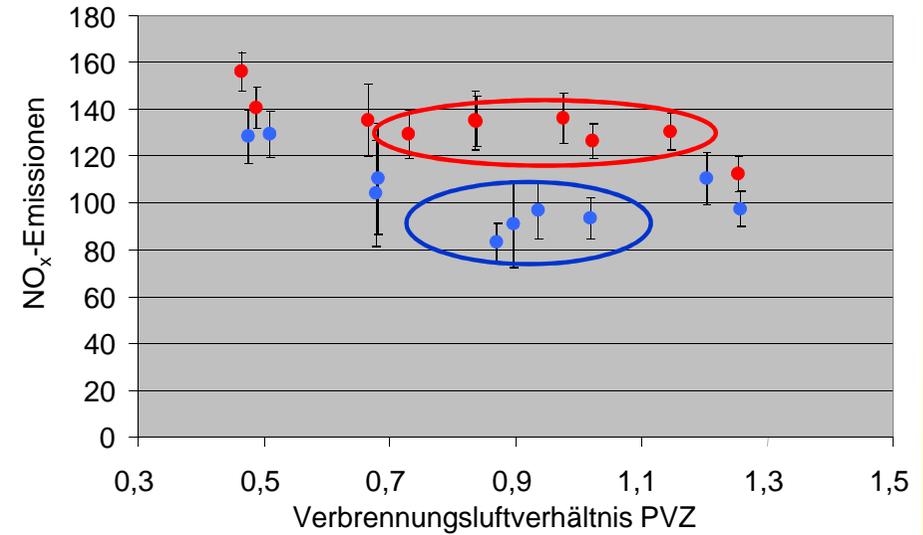
$T_{PVZ1,2,3,4} \dots$	Temperaturen in der Primärverbrennungszone PVZ
$T_{SVZ} \dots$	Temperatur in der Sekundärverbrennungszone (SVZ)
$T_{Rauchgas} \dots$	Rauchgastemperatur
$T_{Rezi} \dots$	Temperatur des rezirkulierten Rauchgases
$T_{Vorlauf}, T_{Rücklauf} \dots$	Vorlauf-/Rücklauftemperatur
$V_{PrimLuft} \dots$	Volumenstrom Primärluft
$V_{SekLuft1,2} \dots$	Volumenstrom Sekundärluft
$V_{Rauchgas} \dots$	Volumenstrom Rauchgas
$V_{Rezi} \dots$	Volumenstrom rezirkuliertes Rauchgas
$V_{Netz} \dots$	Volumenstrom Wasser
RGA ...	Rauchgasanalysator (O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CO, NO, NO <sub>2</sub> )

# Einflussparameter auf die NO<sub>x</sub>-Bildung – Testlaufergebnisse – Einfluss von $\lambda_{PVZ}$ und Verweilzeit

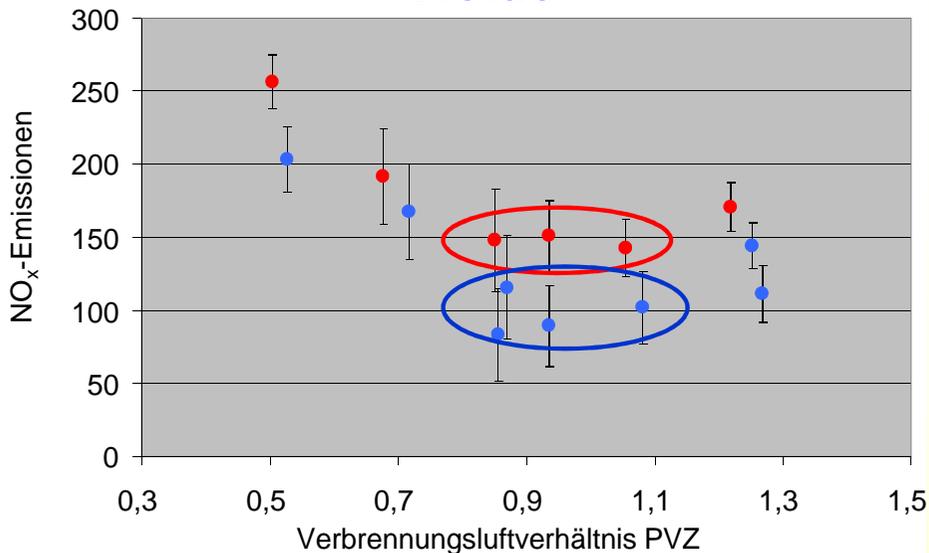
## Spanplatte



## Hackgut (Fichte)



## Weide



NO als NO<sub>2</sub>; Emissionen in mg/Nm<sup>3</sup> bezogen auf trockenes Rauchgas und 13 Vol% O<sub>2</sub>

Blau: Rezi über Rost, T<sub>PVZ</sub>=1.000°C, Volllast, **lange PVZ**

Rot: Rezi über Rost, T<sub>PVZ</sub>=1.000°C, Volllast, **kurze PVZ**

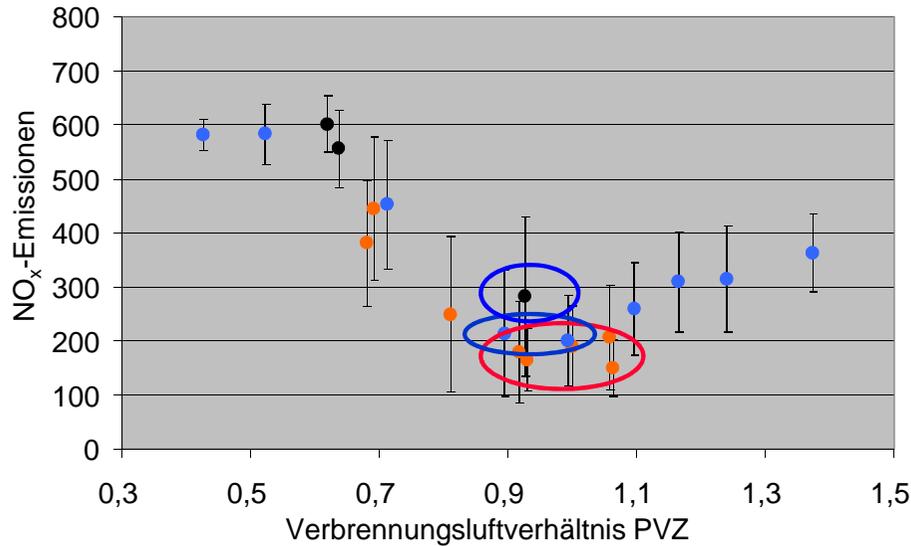
Markierung: Bereich mit den geringsten NO<sub>x</sub>-Emissionen

➔ **NO<sub>x</sub> Emissionen sinken mit steigender Verweilzeit in der PVZ**

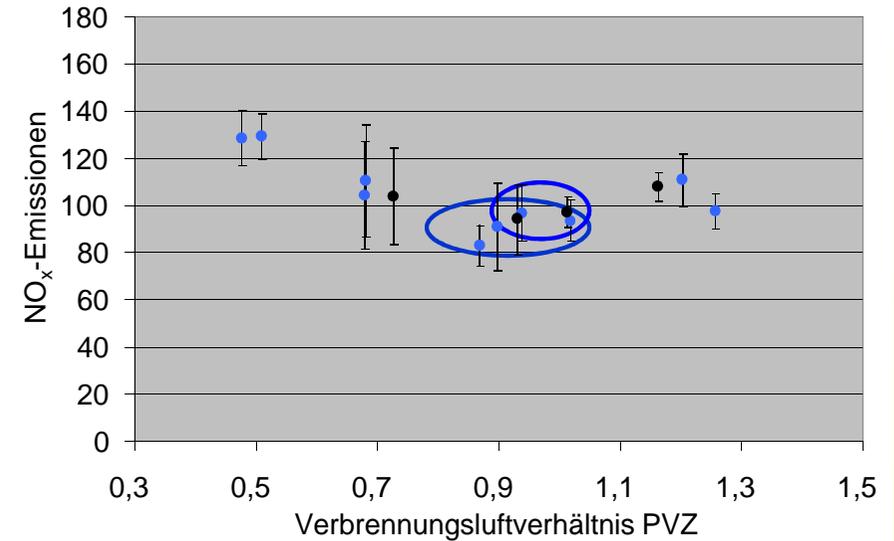
➔ **opt.  $\lambda_{PVZ}$ : zwischen 0,9 und 1,0**

# Einflussparameter auf die NO<sub>x</sub>-Bildung – Testlaufergebnisse – Einfluss von T<sub>PVZ</sub>

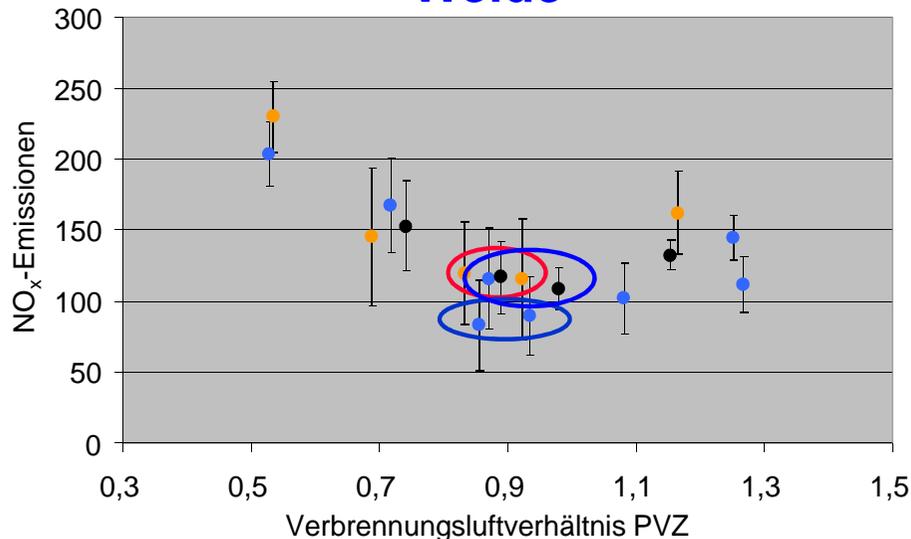
## Spanplatte



## Hackgut (Fichte)



## Weide



NO<sub>x</sub> als NO<sub>2</sub>; Emissionen in mg/Nm<sup>3</sup> bezogen auf trockenes Rauchgas und 13 Vol% O<sub>2</sub>

Schwarz: Rezi über Rost, lange PVZ, Volllast, T<sub>PVZ</sub>=1.100°C

Blau: Rezi über Rost, lange PVZ, Volllast, T<sub>PVZ</sub>=1.000°C

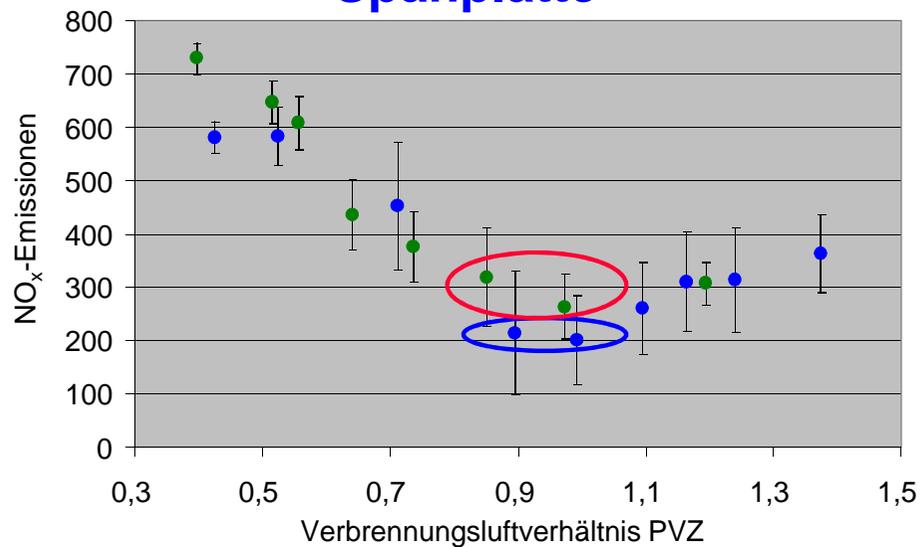
Orange: Rezi über Rost, lange PVZ, Volllast, T<sub>PVZ</sub>=900°C

Markierung: Bereich mit den geringsten NO<sub>x</sub>-Emissionen

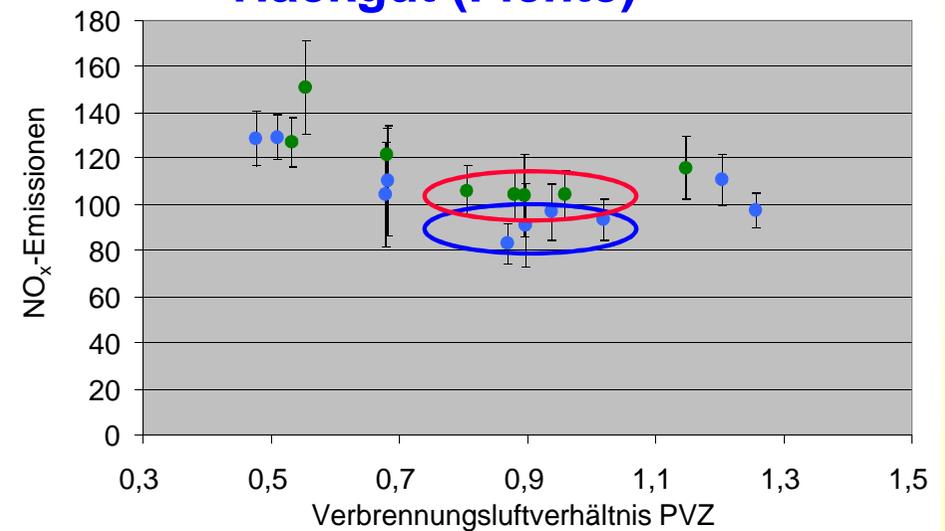
➔ Kein relevanter Einfluss zwischen 900 und 1.100°C auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen

# Einflussparameter auf die $\text{NO}_x$ -Bildung – Testlaufergebnisse – Einfluss der Rauchgasrezirkulation

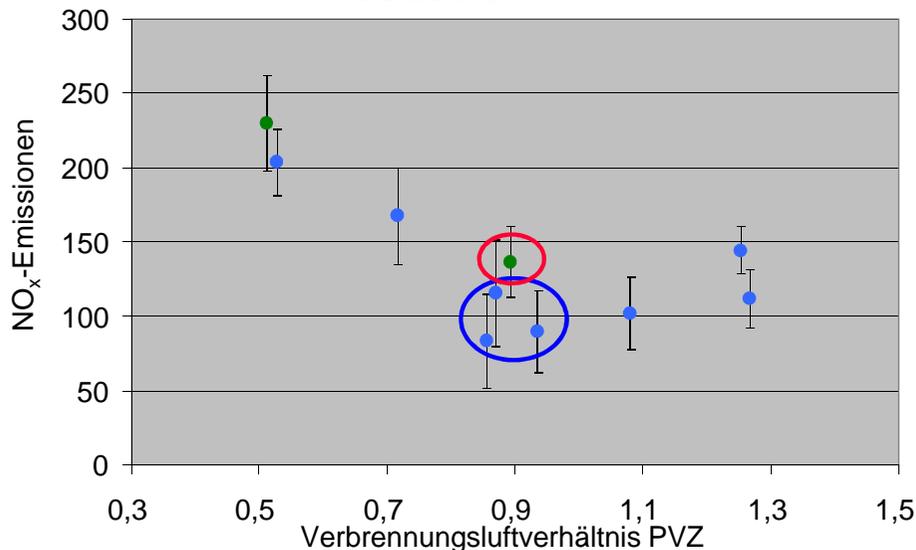
## Spanplatte



## Hackgut (Fichte)



## Weide



$\text{NO}$  als  $\text{NO}_2$ ; Emissionen in  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  bezogen auf trockenes Rauchgas und 13 Vol%  $\text{O}_2$

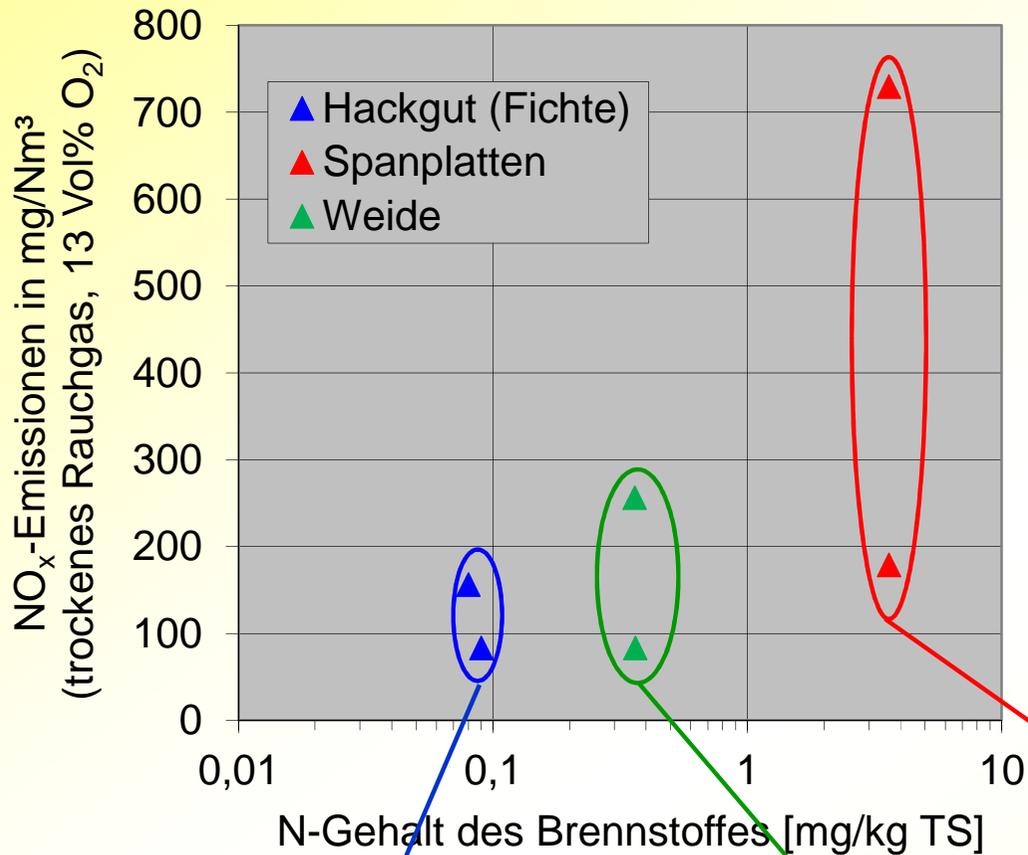
Blau: lange PVZ, Volllast,  $T_{\text{PVZ}}=1,000^\circ\text{C}$   
**Rezirkulation über Rost**

Grün: lange PVZ, Volllast,  $T_{\text{PVZ}}=1,000^\circ\text{C}$   
**Rezirkulation unter Rost**

Markierung: Bereich mit den geringsten  $\text{NO}_x$ -Emissionen

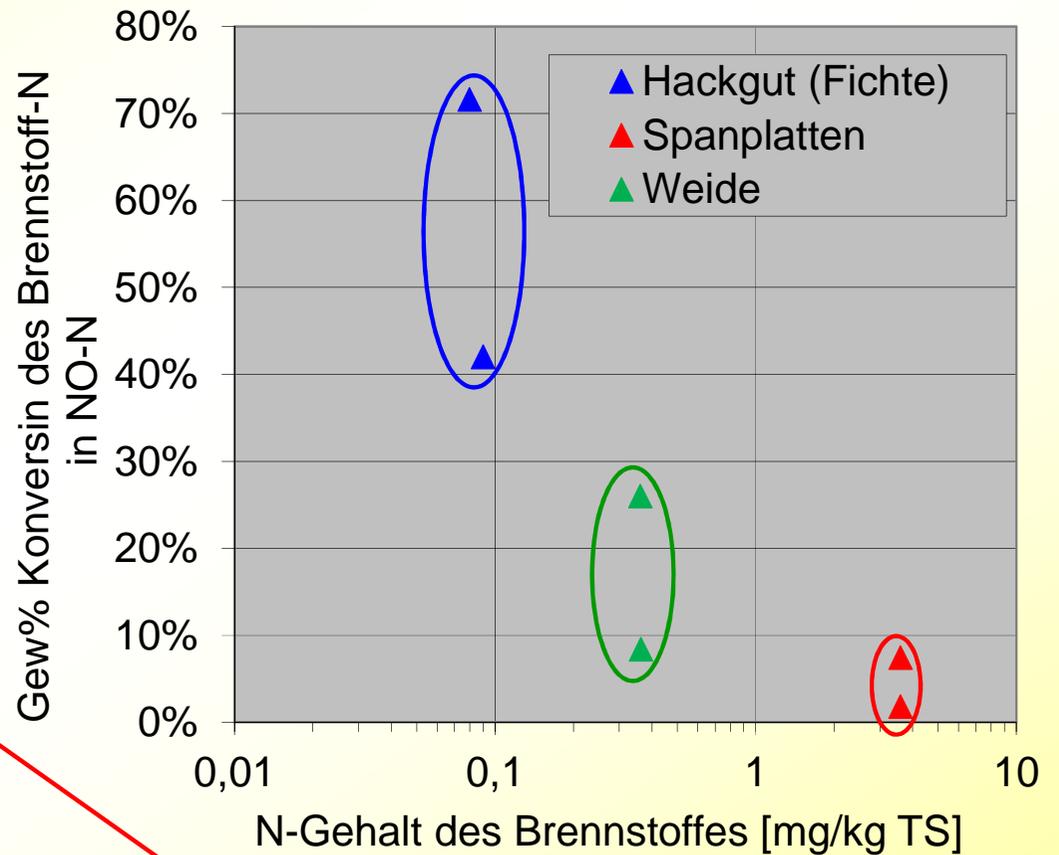
**→ Rauchgasrezirkulation über dem Rost scheint sich vorteilhaft auf die Emissionsreduktion auszuwirken**

# Einflussparameter auf die NO<sub>x</sub>-Bildung – Testlaufergebnisse – Einfluss des eingesetzten Brennstoffes



Bereich der NO<sub>x</sub>-Emissionen bei verschiedenen Betriebsbedingungen die Verbrennung von **Hackgut (Fichte)**

Bereich der NO<sub>x</sub>-Emissionen bei verschiedenen Betriebsbedingungen für die Verbrennung von **Weide**



Bereich der NO<sub>x</sub>-Emissionen bei verschiedenen Betriebsbedingungen für die Verbrennung von **Spanplatten**



BIOENERGIESYSTEME GmbH  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

## Empfehlungen bzgl. Primärmaßnahmen zur Minderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen

- **Betrieb der Reduktionszone bei  $\lambda$  von 0,9 – 1,0**
- **Ausreichende Verweilzeit in Reduktionszone**
- **Der Falschlufteintrag in die Feuerung sollte minimiert und berücksichtigt werden, da ansonsten die Luftverhältnisse nicht regelbar bzw. einstellbar sind**
- **Rauchgasrezirkulation unter und über Rost zur Temperaturkontrolle und zur besseren Durchmischung der Rauchgase sollte eingesetzt werden**
- **NO<sub>x</sub>-Reduktionspotential: 30 – 60%**



BIOENERGIESYSTEME GmbH  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

# Staub- und Feinstaubemissionen aus Biomassefeuerungen

**Aerosole (Feinstaub)**

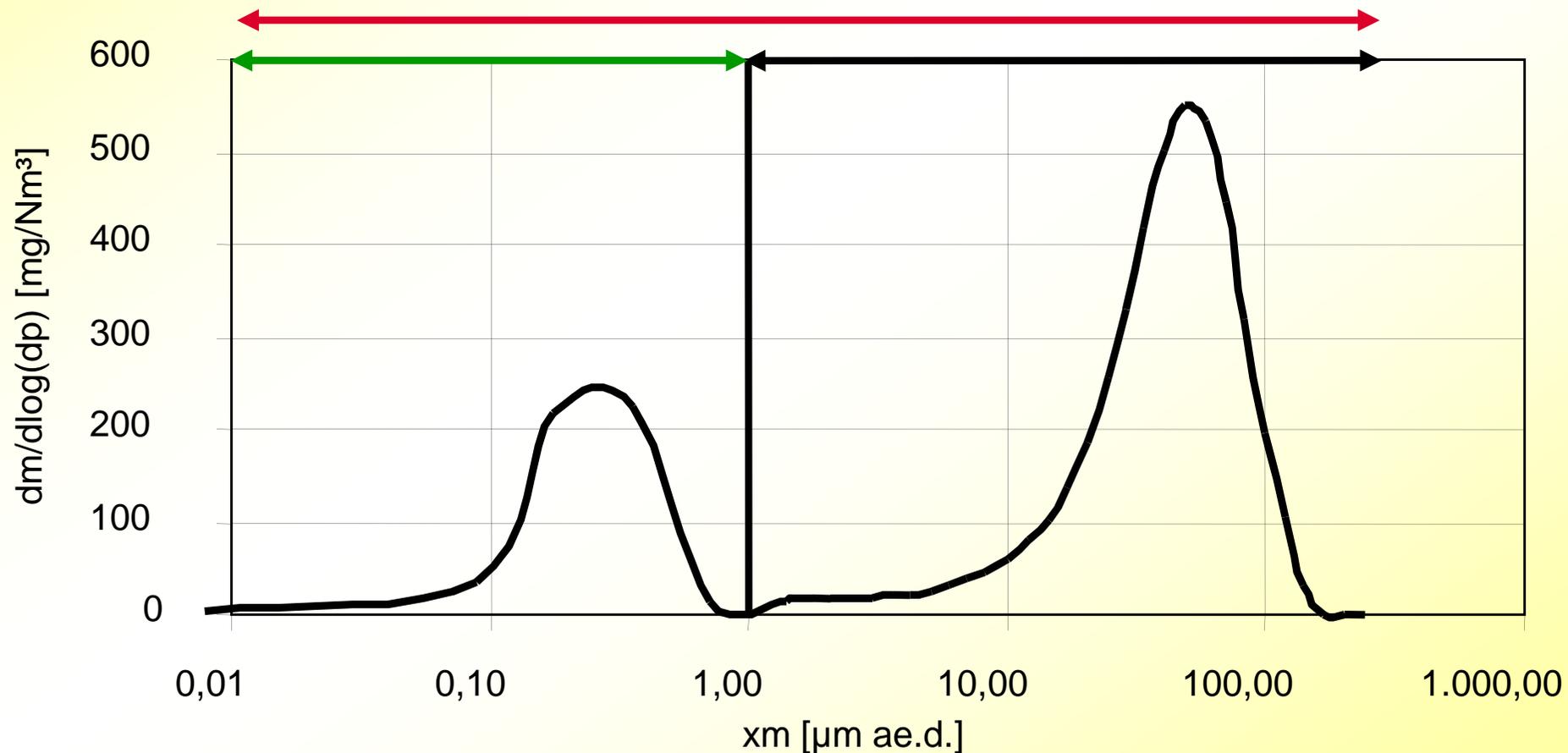
**Partikel < 1  $\mu\text{m}$**

**Grobe Flugaschen**

**Partikel > 1  $\mu\text{m}$**

**Gesamtstaub**

**Summe aus Aerosolen und groben Flugaschen**





BIOENERGIESYSTEME GmbH  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

## **Staub- und Feinstaubbildung während der Biomasseverbrennung (I)**

- **Grobe Flugaschen** entstehen durch Aufwirbelung von
  - Aschepartikeln,
  - Holzkohlepartikeln und
  - Brennstoffpartikeln**vom Brennstoffbett und nachfolgenden Austrag mit dem Rauchgas.**
  
- **Aerosole** entstehen hauptsächlich durch Kondensation partikelbildender Dämpfe.
  
- **Es muss prinzipiell zwischen zwei verschiedenen Arten von Aerosolen (Feinstaub) unterschieden werden:**
  - 1) Aerosole aus **organischen Verbindungen** und Ruß
  - 2) Aerosole aus **anorganischen Verbindungen**

# Staub- und Feinstaubbildung während der Biomasseverbrennung (II)

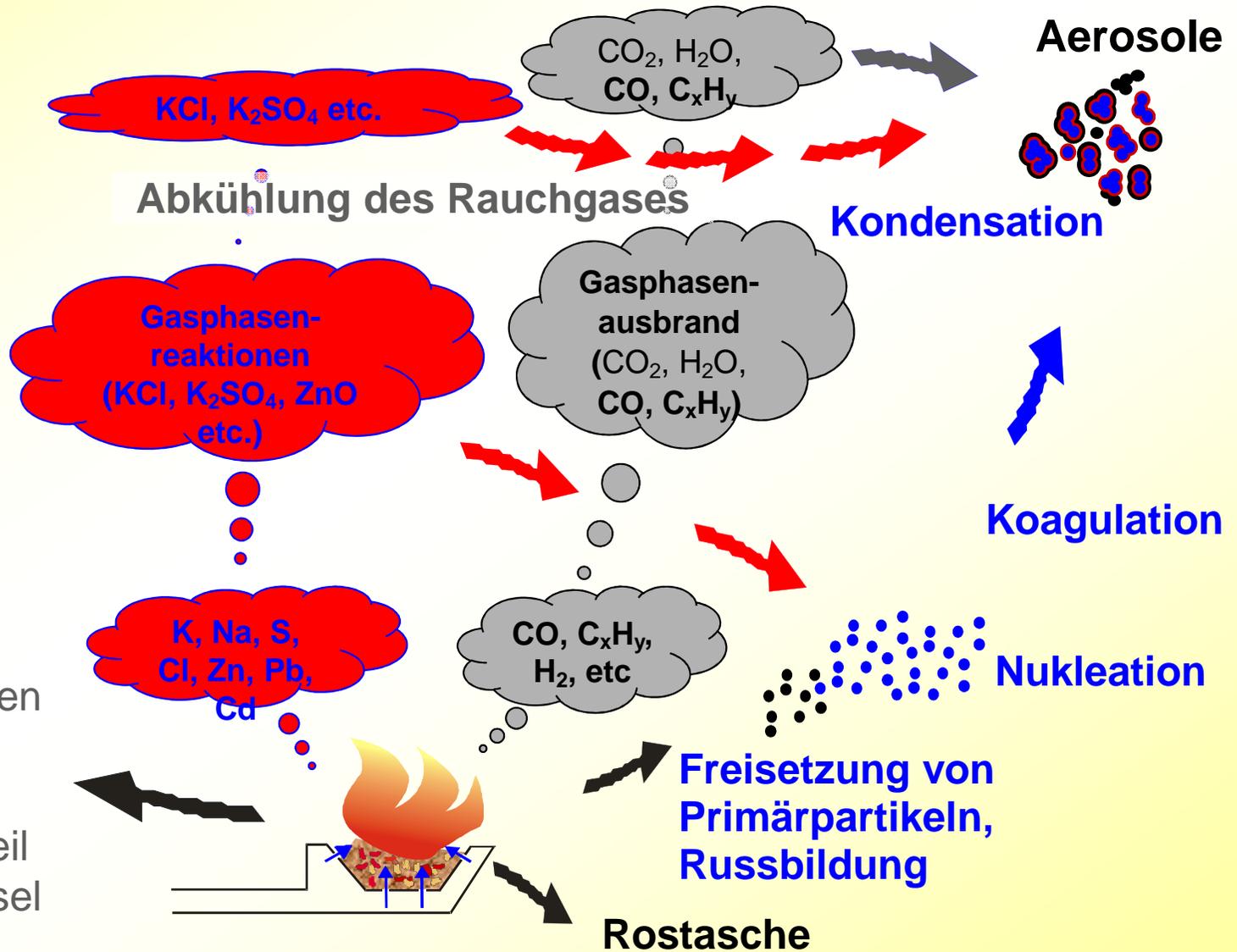
## Grobe Flugaschen



Ein Teil der groben Flugaschen verlässt den Kessel als Emission

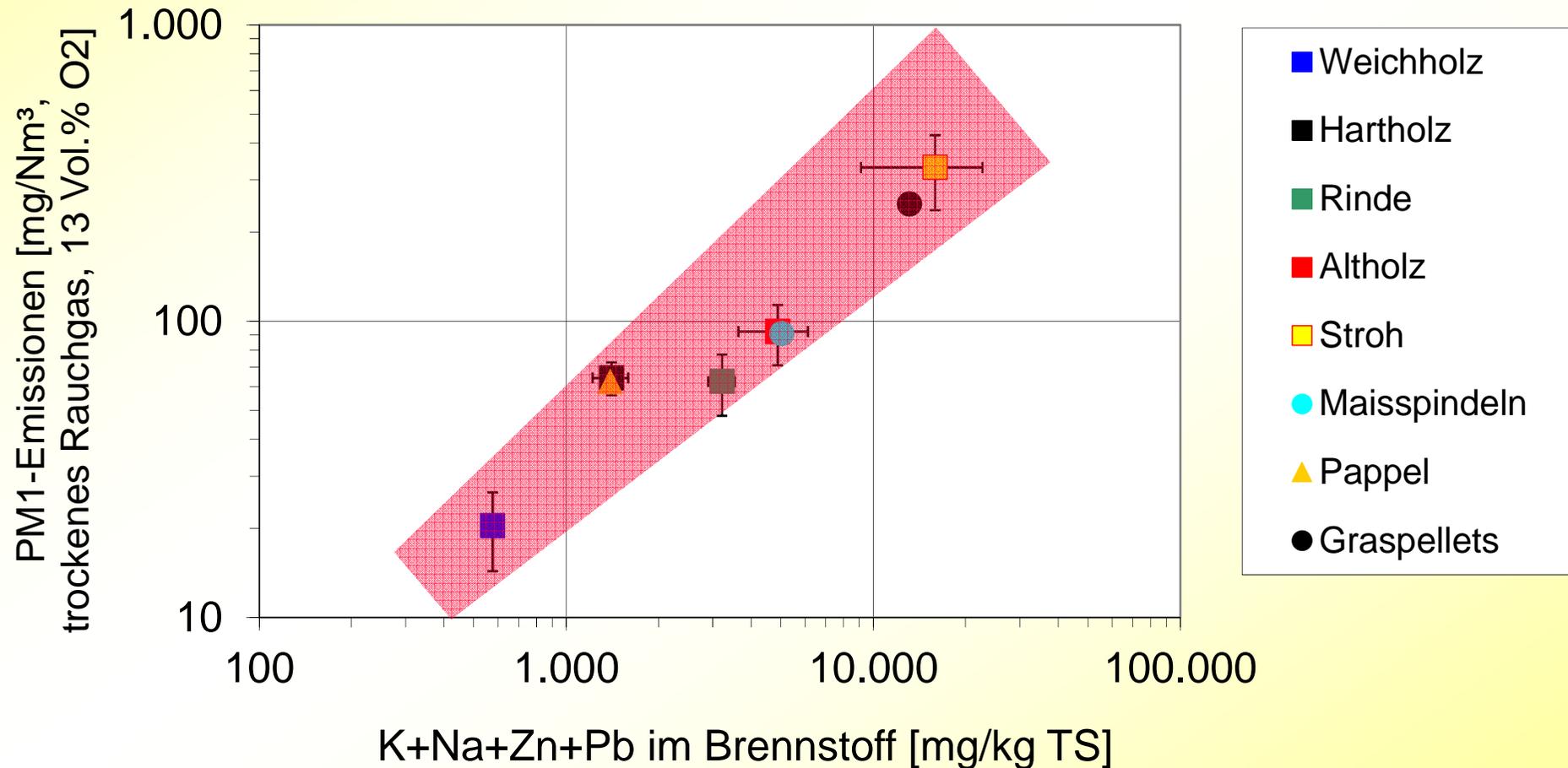


Grobe Flugaschen werden vom Brennstoffbett mit dem Rauchgas ausgetragen und zum Teil im Feuerraum bzw. Kessel wieder abgeschieden



# Einflussfaktoren auf die Bildung von Feinstaubemissionen – Brennstoffzusammensetzung

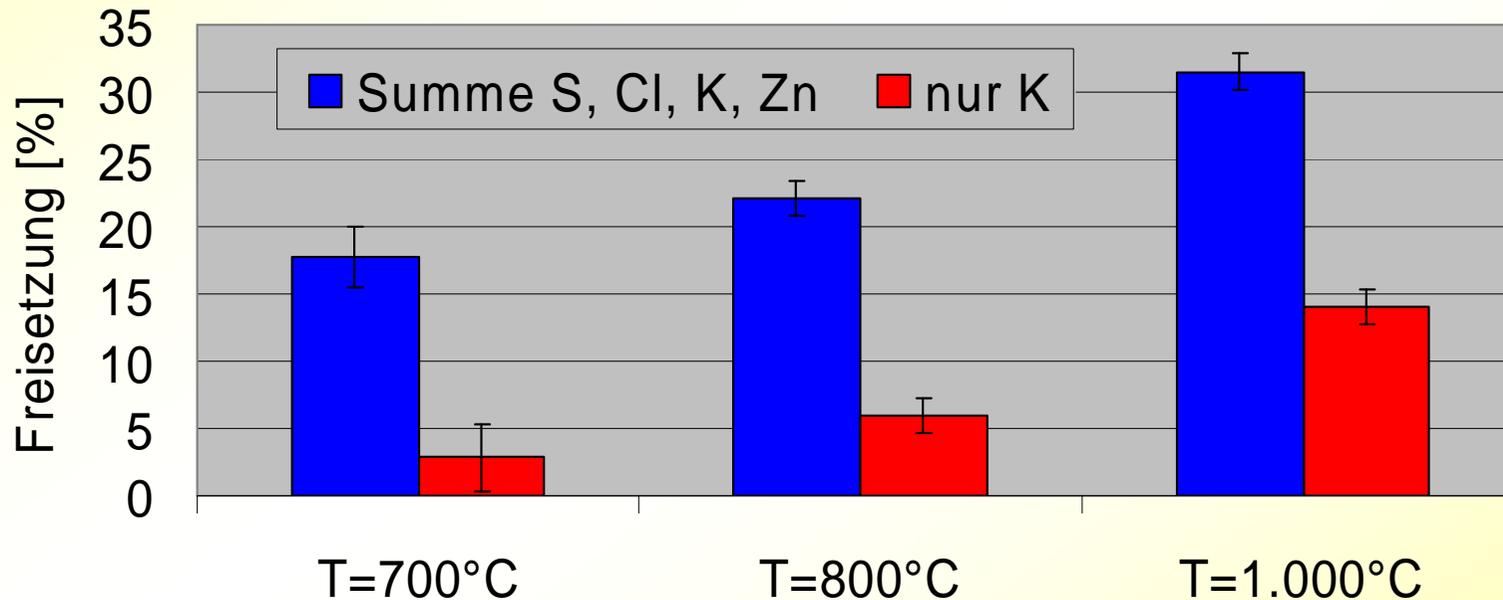
- **Einsatz von Brennstoffen mit vergleichsweise geringen Konzentrationen an anorganischen Aerosolbildnern**  
(Weichholz < Hartholz, Kurzumtriebsholz < Rinde < Altholz < Stroh, Gras)



Erläuterungen: TS ... Trockensubstanz

# Einflussfaktoren auf die Bildung von Feinstaubemissionen – Brennstoffbetttemperatur

- **Reduzierte K-Freisetzung aus dem Brennstoffbett durch niedrigere Betttemperaturen und damit verminderte Bildung anorganischer Aerosole**

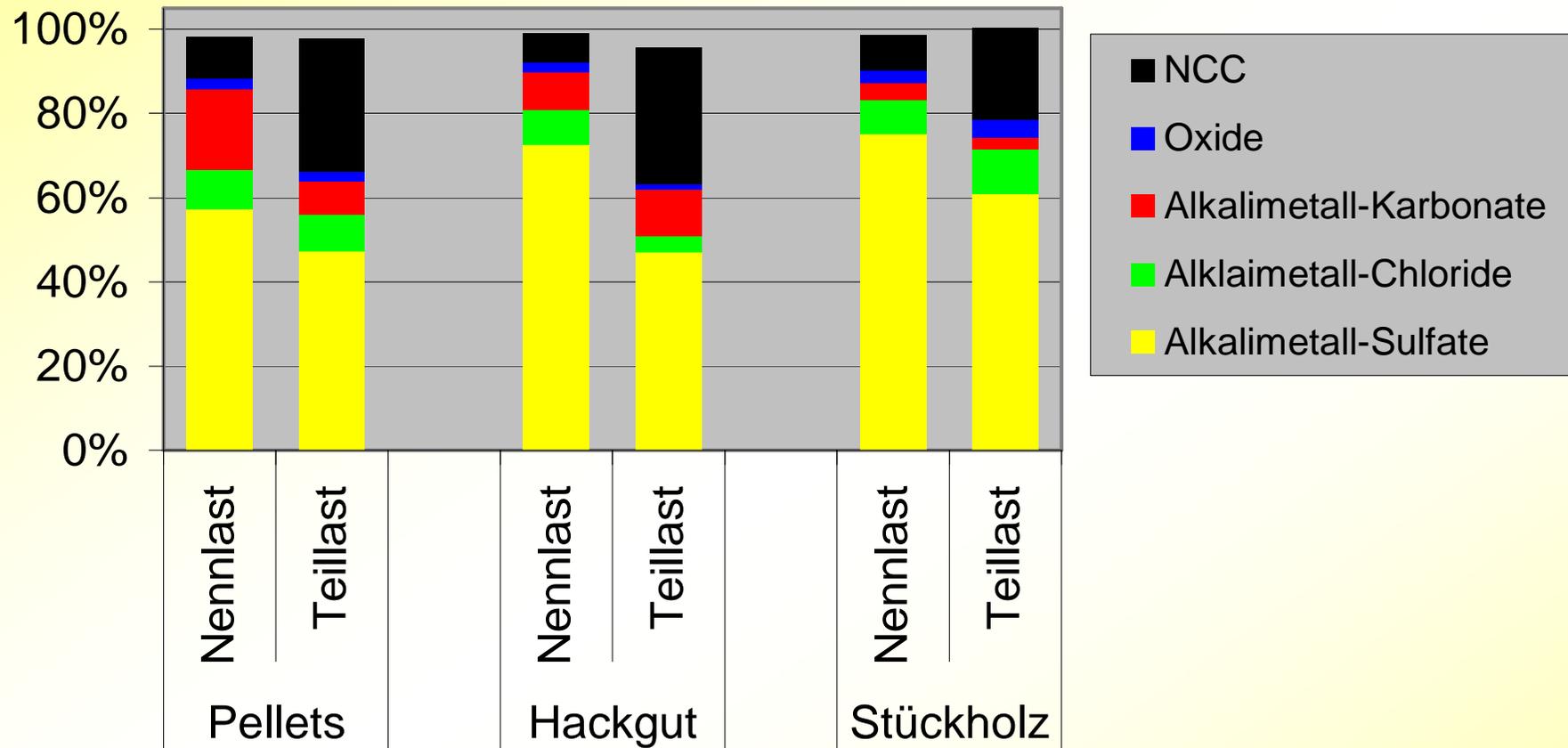


Erläuterungen: Freisetzung der Elemente (Summe von S, Cl, K, Zn) sowie von Kalium aus dem Brennstoff in die Gasphase für verschiedene Betttemperaturen bei der Holzkohleverbrennung; Ergebnisse von Testläufen an einem Laborreaktor



BIOENERGIESYSTEME GmbH  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

# Einflussfaktoren auf die Bildung von Feinstaubemissionen – Ausbrandqualität



Erläuterungen: Konzentrationen in Gew% TS

NCC ... nicht als Karbonat gebundener Kohlenstoff = Summe aus elementarem Kohlenstoff (Russ) und organischen Kohlenstoff

Partikelprobenahme mit Niederdruck-Kaskadenimpaktoren bei stationären Nennlast- und Teillastbetrieb (Teillast = 50% der Nennlast)



BIOENERGIESYSTEME GmbH  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

## Empfehlungen bzgl. Primärmaßnahmen zur Minderung der Staub- und Feinstaubemissionen

- **Realisierung eines Verbrennungskonzeptes mit ruhiger Bettführung und gleichmäßiger Bettdurchströmung**  
➔ Ziel: Reduktion der Bildung grober Flugaschenemissionen
- **Optimierung der Ausbrandbedingungen in allen Lastphasen (CFD-gestützt optimierte Luftführung und Feuerraumgeometrie)**  
➔ Möglichst vollständige Vermeidung der Bildung organischer Aerosole und Oxidation von Rußpartikeln bei Nennlast und Teillast
- **Anwendung extremer Luftstufungskonzepte**  
➔ Reduktion der Brennstoffbetttemperaturen und damit der K-Freisetzung
- **Auf das Gesamtkonzept abgestimmte Anlagenregelung**  
➔ Einstellung optimierter Verbrennungsbedingungen für alle Lastbereiche sowie für Lastwechsel, An- und Abfahrbetrieb



**BIOENERGIESYSTEME GmbH**  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

---

# Umsetzung von Low-Emission Feuerungskonzepten

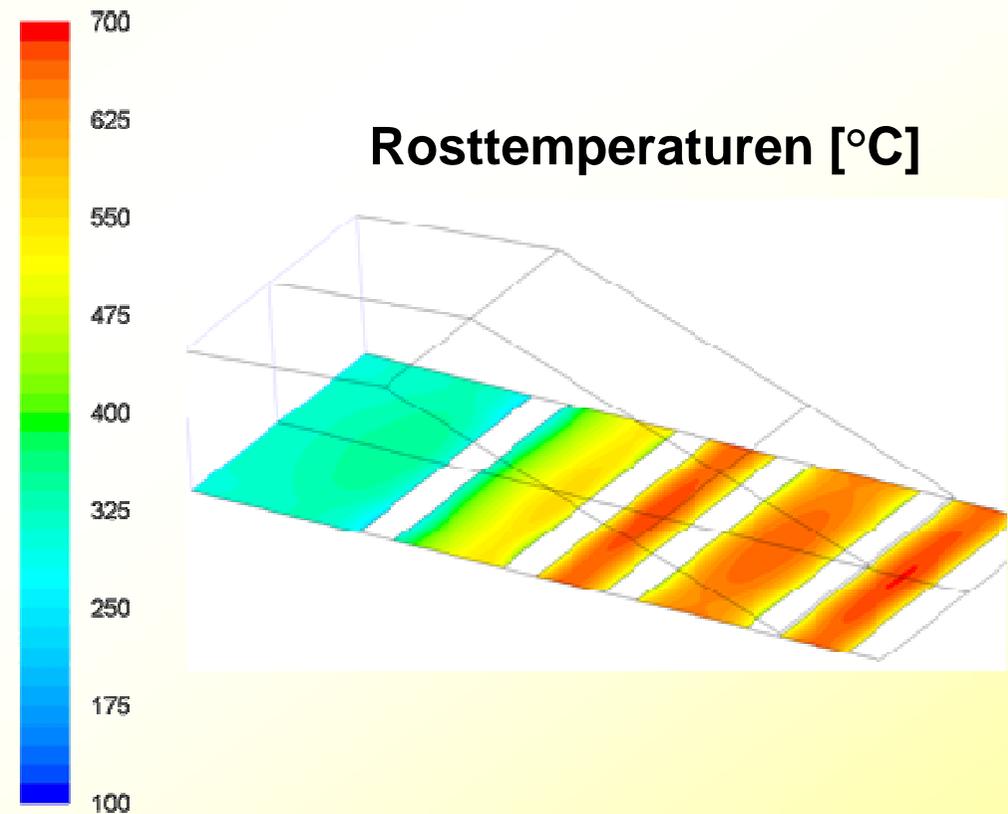
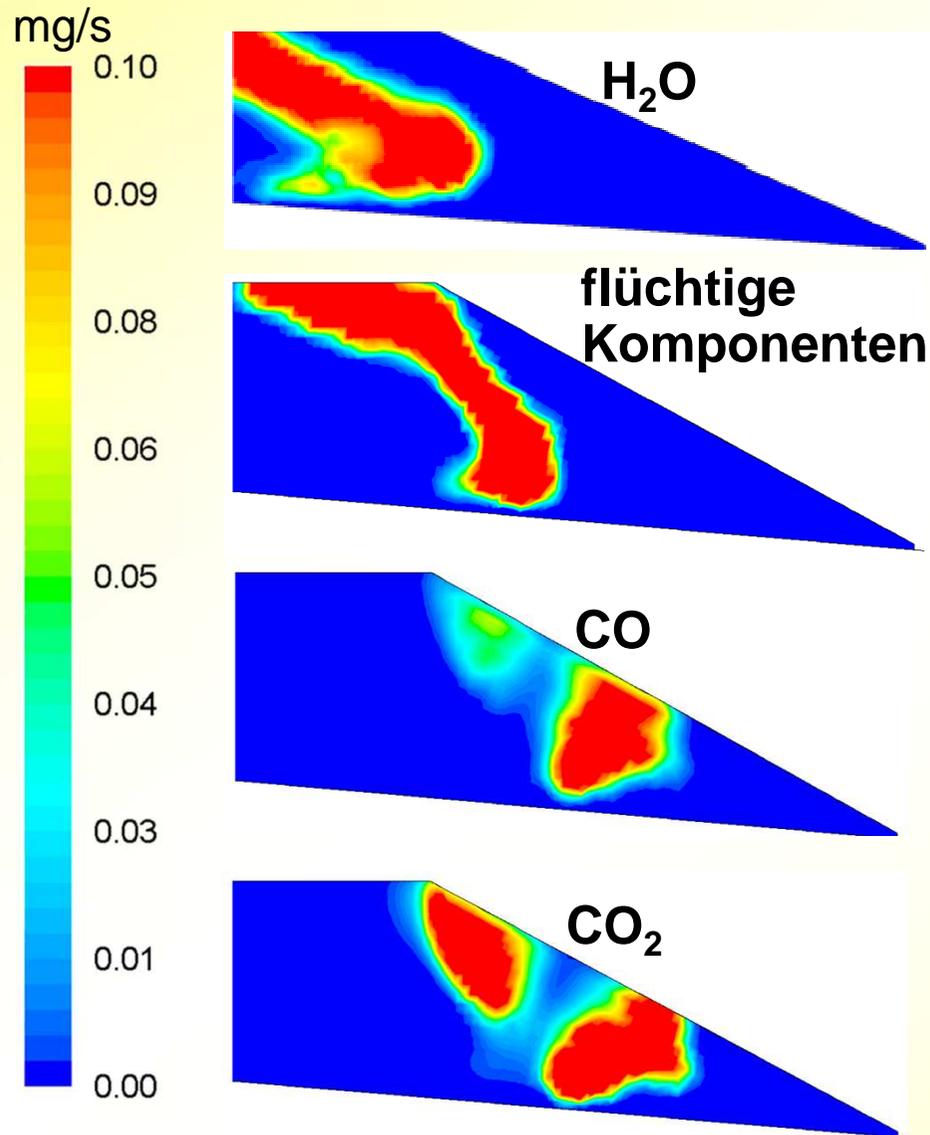


BIOENERGIESYSTEME GmbH  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

## CFD-gestütztes Anlagendesign

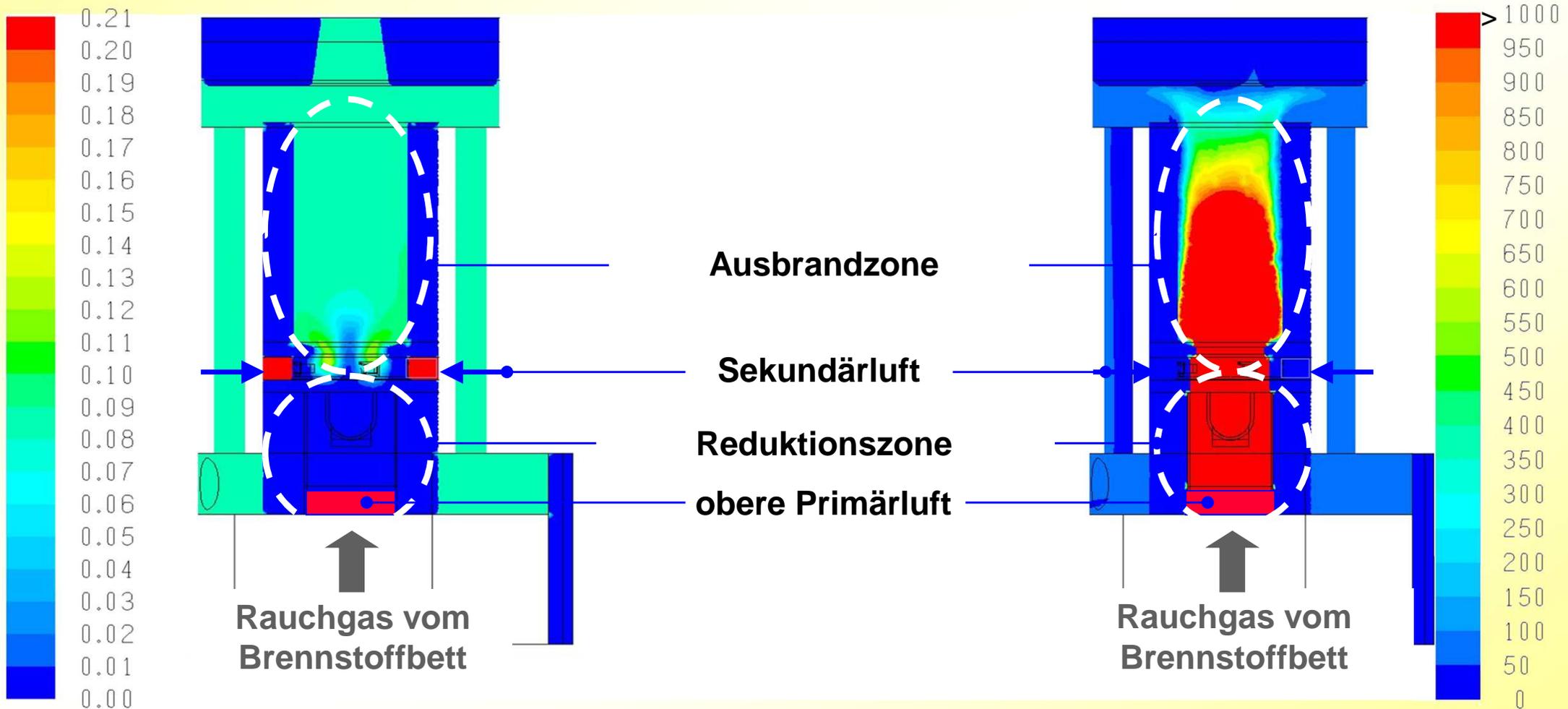
- **CFD Simulationen (CFD: Computational Fluid Dynamics – numerische Strömungssimulation) zur Optimierung**
  - **der Brennstoffbettdurchströmung und der Brennstoffbetttemperaturen**
  - **der Feuerraumgeometrien (inklusive Düsen)**
  - **des Luftstufungskonzeptes**
  - **des Einsatzes von Rauchgasrezirkulation**
  - **der Materialwahl und lokaler Wasserkühlungen bzw. Isolation**

## Freisetzung gasförmiger Komponenten im Brennstoffbett und Rosttemperaturen



Erläuterungen: Simulation des Brennstoffbettes in einer 180 kW Flachschiebrostfeuerung;  
Brennstoff: Hackgut (Weichholz);  
Brennstoff-Wassergehalt: 22 Gew% FS;  
 $\lambda_{\text{Brennstoffbett}}: 0,69$

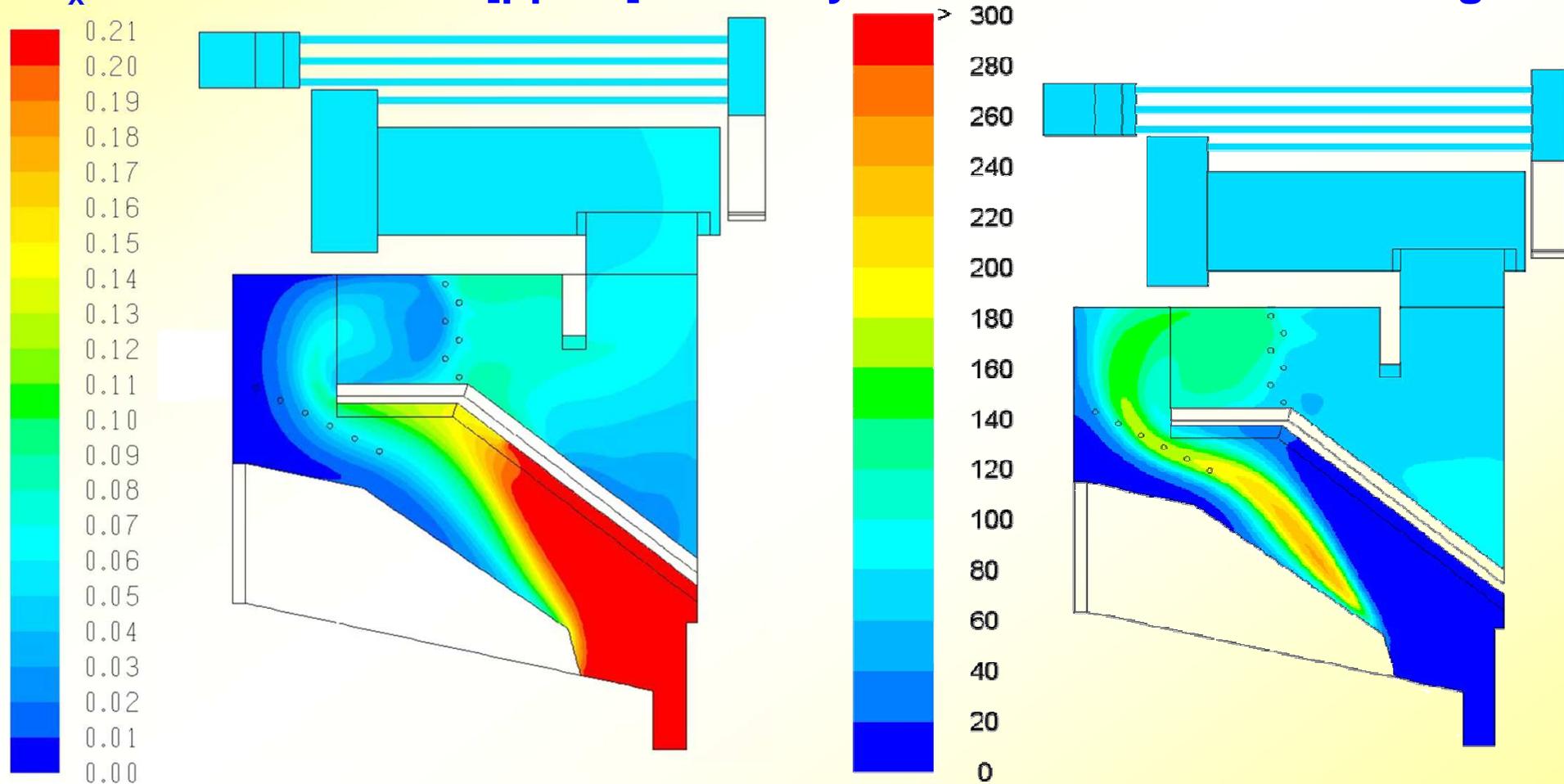
## Luftstufung – O<sub>2</sub>- und CO-Konzentrationsverläufe



Isoflächen der O<sub>2</sub>-Konzentrationen  
[m<sup>3</sup> O<sub>2</sub>/ m<sup>3</sup> RGf] im vertikalen Schnitt  
durch die Feuerungsachse

Isoflächen der CO-Konzentrationen  
[ppmv] im vertikalen Schnitt  
durch die Feuerung

## Isoflächen der O<sub>2</sub>-Konzentrationen [m<sup>3</sup> O<sub>2</sub>/ m<sup>3</sup> RGf] (links) und Isoflächen der NO<sub>x</sub>-Konzentrationen [ppmv] in der Symmetrieebene der Feuerung



Erläuterungen: Kesselnennleistung 700 kW; Brennstoff: Hackgut (Wassergehalt: 60 Gew% FS);  
Modell: EDC / Kilpinen 92 (50 Spezies, 253 Reaktionen)



BIOENERGIESYSTEME GmbH  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

## Zusammenfassung und Schlussfolgerungen (I)

- **Beim Design einer Low-Dust&Low-NO<sub>x</sub>-Biomassefeuerung müssen folgende relevante Aspekte beachtet werden:**
  - Entsprechend angepasste **Geometrie** und **Düsenpositionierung**
  - Einen richtige **Mehrfach-Luftstufung** in Kombination mit **Rauchgasrezirkulation** um
    - das **Brennstoffbett** vergleichsweise **kühl** zu halten
    - in der Brennkammer eine **Reduktionszone** bzgl. NO<sub>x</sub>-Reduktion auszubilden
    - die Ausbrandzone so zu gestalten, dass ein **vollständiger Gas- und Partikelausbrand** erreicht wird und durch hohe **Durchmischungsintensität** der Luftüberschuss minimiert werden kann



BIOENERGIESYSTEME GmbH  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

## Zusammenfassung und Schlussfolgerungen (II)

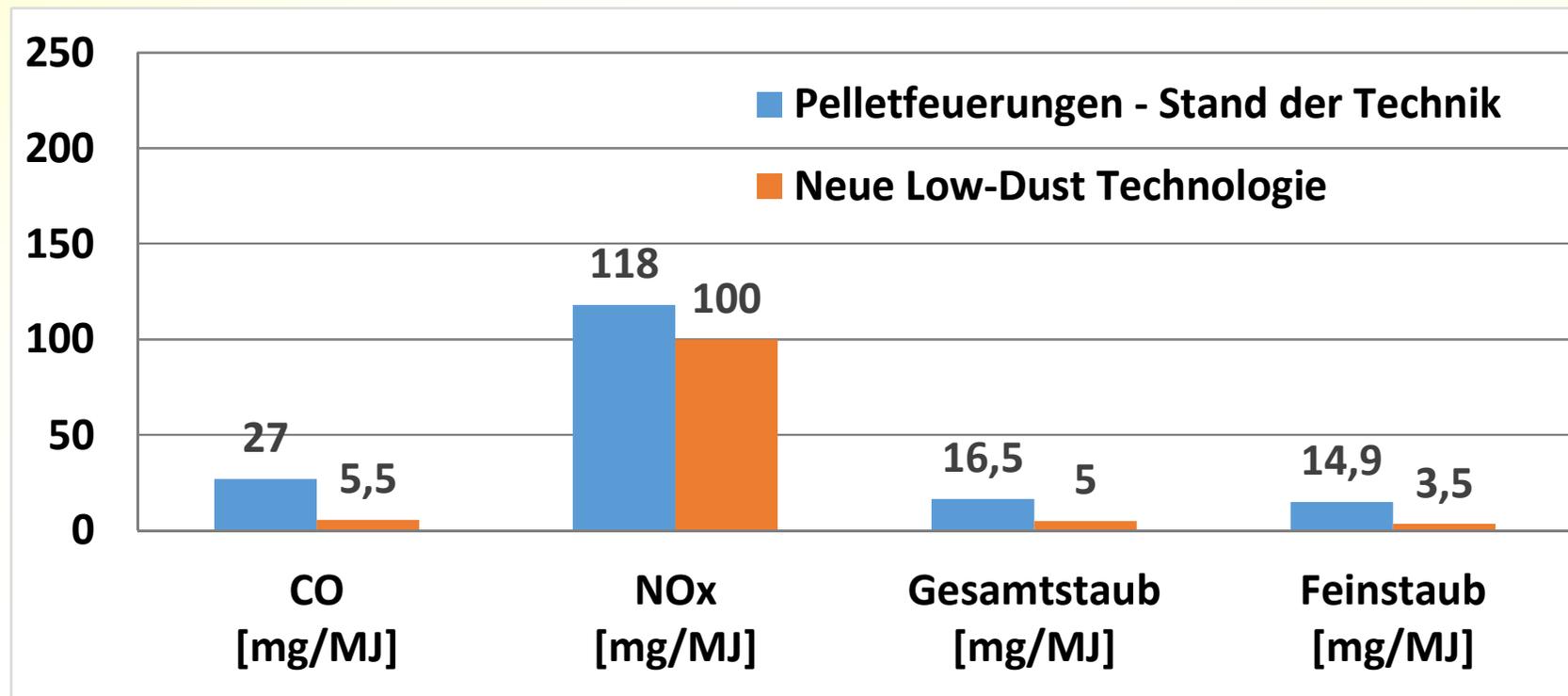
- Nur wer die **Verbrennungsabläufe im Detail versteht** kann sie auch gezielt beeinflussen
- **CFD-Simulationen** der Verbrennungsabläufe im Brennstoffbett und in der Gasphase gemeinsam mit **grundlegendem Verständnis der Verbrennungs- und Aschechemie** stellen die Basis für die gezielte Umsetzung von **Primärmaßnahmen** dar
- Durch die **richtige Rost- und Feuerungsgestaltung** und eine darauf **abgestimmte Regelung** lassen sich die **Partikel- und NO<sub>x</sub>-Emissionen** im Vergleich zum Stand der Technik **wesentlich** reduzieren
- **Low-Dust und NO<sub>x</sub>-Biomassefeuerungen** der Zukunft sollen **ohne Sekundärmaßnahmen** auskommen



BIOENERGIESYSTEME GmbH  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

## Zusammenfassung und Schlussfolgerungen (III)

- **Viessmann in Kooperation mit BIOS** haben in einem bereits durchgeführten F&E-Projekt im Versuchsbetrieb gezeigt, dass dies auch **erreichbar ist** und arbeiten derzeit an der konkreten Umsetzung einer derartigen **Low-Dust&Low-NO<sub>x</sub>-Biomassefeuerungstechnologie** in die **Praxis**





**BIOENERGIESYSTEME GmbH**  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz



***Danke für Ihre Aufmerksamkeit***

**Kontakt:**

**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](mailto:obernberger@bios-bioenergy.at)**

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