

## *Feinstaubemissionen aus Biomasse-Kleinfeuerungen und mögliche Primärmaßnahmen für deren Minimierung*

**Thomas Brunner**



COMET  
Competence Centers for  
Excellent Technologies

### **Inhalt**

- **Zum Thema Feinstaubbildung in Biomassefeuerungen in Österreich in den vergangenen Jahren durchgeführte Forschungsprojekte - Überblick**
- **Allgemeines zur Feinstaubsituation in Österreich**
- **Feinstaubbildung in Biomasse-Kleinfeuerungen**
- **Feinstaubemissionen aus Biomasse-Kleinfeuerungen**  
Vergleich von Altanlagen mit Anlagen, die dem Stand der Technik entsprechen
- **Möglichkeiten zur weiteren Minderung der Feinstaubemissionen aus Biomasse-Kleinfeuerungen durch Einsatz von Primärmaßnahmen**

## Einleitung

bioenergy2020+

- Seit mehr als 10 Jahren werden
  - am **Institut für Prozess- und Partikeltechnik, TU Graz**
  - bei der **BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH** und
  - bei **BIOENERGY 2020+** (vormals Austrian Bioenergy Centre)nationale und internationale F+E Projekte bezüglich der Feinstaub(Aerosol)-Bildung in Biomassefeuerungsanlagen und bezüglich deren Reduktion durchgeführt.
- Am Beginn standen dabei Arbeiten zu **mittelgroßen Anlagen und Großanlagen** im Mittelpunkt.
- Seit 5 Jahren wird das Thema verstärkt für **Biomasse-Kleinfeuerungen** behandelt.



COMET  
Competence Centers for  
Excellent Technologies

## Ausgewählte Projekte zum Thema Feinstaubemissionen aus Biomasse-Feuerungen

bioenergy2020+

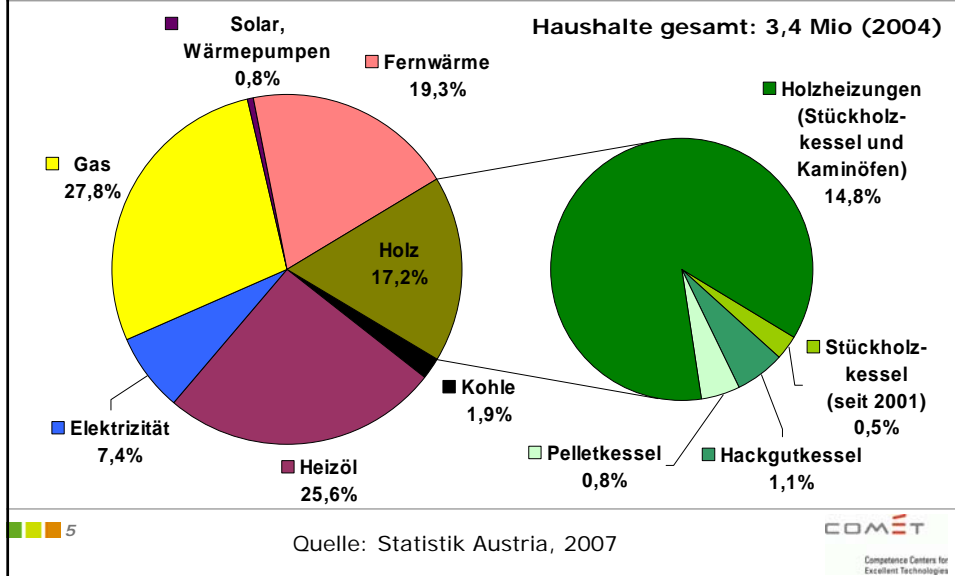
- **Aerosols in fixed-bed biomass combustion – formation, growth, chemical composition, deposition, precipitation and separation from flue gas – *BIO-Aerosols***  
EU FP5, 03/2000 - 05/2003
- **Ash and aerosol related problems in biomass combustion and co-firing – *BIOASH***  
EU FP6, 03/2004 - 02/2007
- **Feinstaubemissionen aus Biomasse-Kleinfeuerungen**  
BIOENERGY 2020+, 2005 - 2007
- **ERA-NET Biomass-PM**  
ERA-NET Bioenergy, 2008
- **Untersuchung des Gesundheitsgefährdungspotentials von Feinstaubemissionen aus Biomasse-Kleinfeuerungen**  
BIOENERGY 2020+, seit Anfang 2008



COMET  
Competence Centers for  
Excellent Technologies

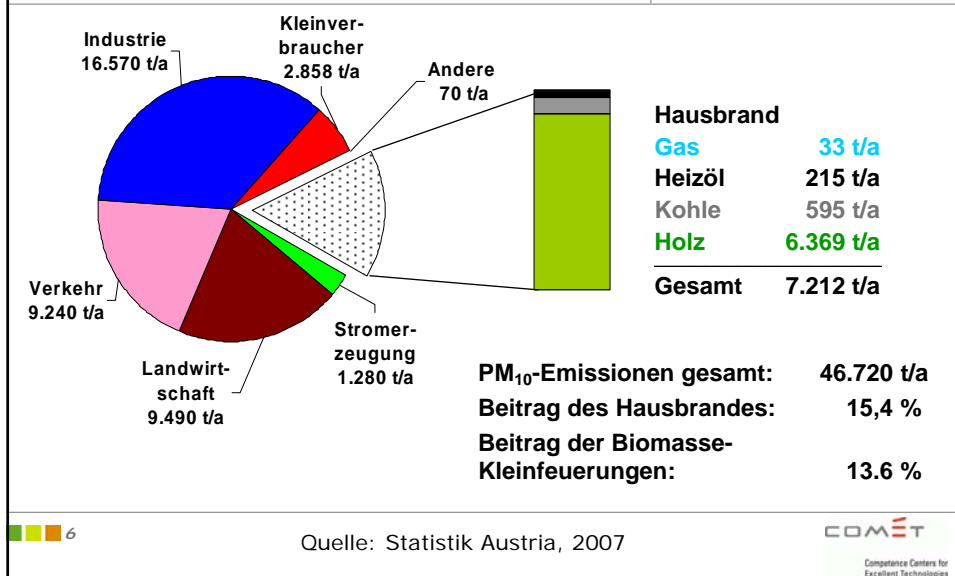
## Hauptheizsysteme in österreichischen Haushalten (Stand 2004)

bioenergy2020+



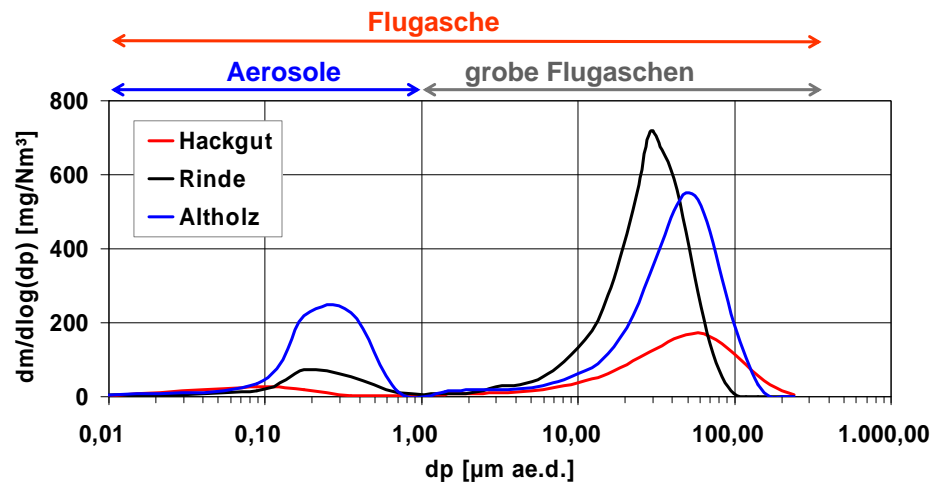
## PM<sub>10</sub>-Emissionsquellen in Österreich (Stand 2004)

bioenergy2020+



**Kategorisierung von  
Staubemissionen aus  
Biomassefeuerungen (I)**

bioenergy2020+



7

Ergebnisse von Testläufen an Rostfeuerungsanlagen;  
Daten bezogen auf trockenes Rauchgas und 13 Vol. % O<sub>2</sub>

COMET  
Competence Centers for  
Excellent Technologies

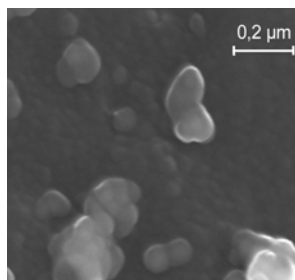
**Kategorisierung von  
Staubemissionen aus  
Biomassefeuerungen (II)**

bioenergy2020+

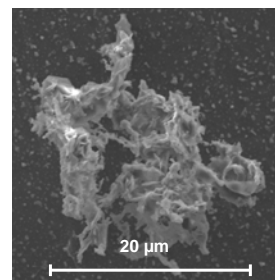
**Organische  
Aerosole, Russ**



**Anorganische Aerosole**  
(K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, KCl, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, ZnO, ...)



**Grobe Flugaschen**  
(CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, ...)



Links: Agglomerat aus organischen Aerosolen und Russpartikeln  
(Kaminofen bei schlechten Ausbrandbedingungen; Brennstoff: Buchenholz)

Mitte und rechts: anorganische Aerosole und grobe Flugaschen  
(Rostfeuerung bei gutem Ausbrand; Brennstoff: Buchenhackgut)

Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop

8

COMET  
Competence Centers for  
Excellent Technologies

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

bioenergy2020+

➤ **Grobe Flugaschenpartikel**

- Aufwirbelung von Brennstoff-, Aschen- und Holzkohlenpartikeln vom Brennstoffbett und Austrag aus dem Feuerraum mit dem Rauchgas

➤ **Anorganische Aerosole**

- Freisetzung anorganischer Komponenten aus dem Brennstoff in die Gasphase (relevante Elemente: K, S, Cl, Na, Zn, Pb)
- Gasphasenreaktionen (Bildung von z.B.  $K_2SO_4$ , KCl, ZnO etc.)
- Partikelbildung durch Nukleation und Partikelwachstum durch Kondensation und Agglomeration

➔ **Starke Abhängigkeit der gebildeten Aerosolmasse von der chemischen Zusammensetzung des Brennstoffes (Gehalt an aerosolbildenden anorganischen Verbindungen bzw. deren Freisetzung aus dem Brennstoff in die Gasphase)**



COMET

Competence Centers for  
Excellent Technologies

***Staub- und Feinstaubbildung  
während der  
Biomasseverbrennung (II)***

bioenergy2020+

➤ **Kohlenstoffhaltige Aerosole (mit Ausnahme von Karbonaten)**

- Resultieren aus unvollständiger Verbrennung

**Man unterscheidet zwischen**

- organischen Aerosolen (kondensierte Kohlenwasserstoffe)
- Russpartikeln

➔ **Können durch Optimierung des Ausbrandes weitgehend vermieden werden**



COMET

Competence Centers for  
Excellent Technologies

## Aerosolbildung in alten bzw. nicht automatisch geregelten Biomasse-Kleinfeuerungen

bioenergy2020+

Kaminofen



Stückholzkessel  
(alte Technologie)

- Oft Naturzugsysteme
- Unzureichende oder fallweise keine Verbrennungsregelung
- Einfache Feuerraumgeometrien
- Keine ausgereiften Luftstufungskonzepte
  - ➔ schlechte Durchmischung der Verbrennungsluft mit den Rauchgasen
- Chargenweiser Betrieb mit Phasen bei denen sehr schlechte Ausbrandbedingungen vorherrschen (während Anbrennphase und Hauptbrennphase)
  - ➔ Vergleichsweise hohe CO- und org.C-Emissionen
  - ➔ Hohe Emissionen an organischen Aerosolen und Russpartikeln

11

COMET

Competence Centers for  
Excellent Technologies

## Alte Biomasse-Kleinfeuerungen - Emissionsfaktoren für Gesamtstaub

bioenergy2020+

### Aktuell in Österreich geltende Gesamtstaub-Emissionsfaktoren für Kleinfeuerungsanlagen

	Brennstoff	Emissionsfaktor Staub [mg/MJ]
Ofen <sup>1)</sup>	Holz	148
Ofen <sup>1)</sup>	Kohle	153
Ofen <sup>2)</sup>	Heizöl extraleicht	<0,5
Kessel <sup>1)</sup>	Holz	90
Kessel <sup>1)</sup>	Kohle	94
Kessel <sup>2)</sup>	Heizöl extraleicht	<0,5
Kessel <sup>2)</sup>	Heizöl leicht	2

Erläuterungen: 1) Anlagenbestand in Österreich in 1997/98  
2) Anlagenbestand in Österreich in 1993-1995  
Quelle: Umweltbundesamt, 2004

12

COMET

Competence Centers for  
Excellent Technologies

## Aerosolbildung in modernen automatisch geregelten Biomasse-Kleinfeuerungen

bioenergy2020+



Hackgutkessel  
Quelle: KWB



Stückholzkessel  
Quelle: Fröling

- **Mikroprozessor gesteuert**  
(Leistungs- und Verbrennungsregelung)
- **Optimierte Feuerraum- und Luftstufungskonzepte**  
(Primär- und Sekundärverbrennungszone mit getrennter Verbrennungsluftzufuhr)
- **Optimierte Vermischung der Verbrennungsluft mit den Rauchgasen und ausreichende Verweilzeiten bei hohen Temperaturen für einen annähernd vollständigen Ausbrand**
- ➔ **Verbesserter Ausbrand**  
(niedrige CO und org.C Emissionen)
- ➔ **Hauptsächlich anorganische Aerosolemissionen**
- ➔ **Kaum Emissionen an organischen Aerosolpartikeln und Russ** (vornehmlich während der Start-up Phase)

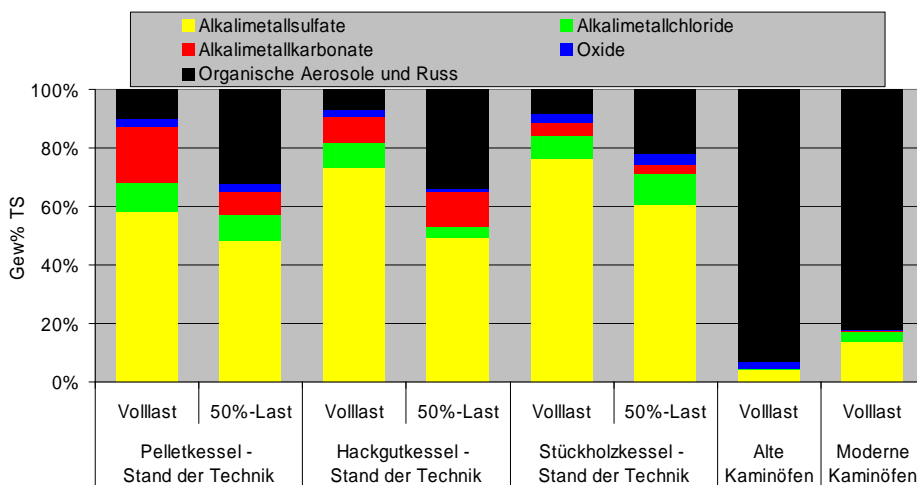
13

COMET

Competence Centers for Excellent Technologies

## Durchschnittliche chemische Zusammensetzungen von Aerosolemissionen aus BM-Kleinfeuerungen

bioenergy2020+



14

COMET

Competence Centers for Excellent Technologies

## Moderne Biomasse-Kleinfeuerungen – Emissionsfaktoren für Gesamtstaub und Feinstaub

bioenergy2020+

- **Mittlere Gesamtstaubemissionen** während des stationären Nenn- und Teillastbetriebes (bezogen auf tr. Rauchgas und 13 Vol% O<sub>2</sub>):
  - Stückholzkessel: 8 mg/MJ (12 mg/Nm<sup>3</sup>)
  - Pelletkessel: 10 mg/MJ (15 mg/Nm<sup>3</sup>)
  - Hackgutkessel: 25 mg/MJ (38 mg/Nm<sup>3</sup>)
- Üblicherweise sind mehr als 90% der Gesamtstaubemissionen den Feinstaubemissionen (PM<sub>10</sub>) zuzuordnen.
- **PM<sub>10</sub>-Emissionsfaktoren** für einen gesamten Tagesbetriebszyklus (inklusive An- und Abfahren sowie Lastwechsellvorgängen)
  - Stückholzkessel: <20 mg/MJ
  - Pelletkessel: <20 mg/MJ (für Weichholzpellets)
  - Hackgutkessel: 20-30 mg/MJ (je nach Brennstoff-K-Gehalt)
  - Kaminofen: 25-50 mg/MJ (Mittelwert aus 4 Abbränden inklusive Anzünd-Batch)

15

COMET

Competence Centers for  
Excellent Technologies

## Primärmaßnahmen zur weiteren Staubemissionsminderung – Allgemeines

bioenergy2020+

- In den vergangenen Jahren konnten durch entsprechende F+E-Arbeiten **weitreichende Verbesserungen hinsichtlich der Reduktion von Emissionen** (CO, org.C, Feinstaub) aus Biomasse-Kleinfeuerungen erzielt werden.
- **Weitere F+E-Arbeiten**, speziell bezüglich der Reduktion von Feinstaubemissionen, sind jedoch notwendig.
- Dazu sollten in erster Linie **Primärmaßnahmen** zur Emissionsminderung weitgehend ausgenutzt werden, da diese
  - die Emission bereits in ihrer Entstehung mindern können und
  - in der Regel kostengünstiger sind als Sekundärmaßnahmen.

16

COMET

Competence Centers for  
Excellent Technologies



*Primärmaßnahmen zur weiteren  
Staubemissionsminderung –  
Zielsetzungen*

bioenergy2020+

- Weitgehende Vermeidung der Bildung **grober Flugaschenpartikel**.
- Möglichst vollständige Vermeidung der Bildung **organischer Aerosole** und Oxidation von **Russpartikeln** durch Ausbrandoptimierung.
- Entwicklung neuer Verbrennungstechnologien, die die Bildung **anorganischer Feinstaubemissionen** durch die Reduktion der K-Freisetzung im Vergleich zum derzeitigen Stand der Technik deutlich reduzieren.
- Entwicklung von **Anlagenkonzepten und Regelungskonzepten**, die das Erreichen dieser Zielsetzungen nicht nur bei Nennlastbetrieb sondern **auch bei Teillast und Lastwechselbetrieb** ermöglichen.
- Bei **Ausnutzung aller Optimierungspotentiale** sollten Staubemissionen  $< 10 \text{ mg/Nm}^3$  (trockenes Rauchgas, 13 Vol% O<sub>2</sub>) für automatisch geregelte Feuerungen möglich sein.

17

COMET  
Competence Centers for  
Excellent Technologies

*Implementierung von  
Primärmaßnahmen zur weiteren  
Staubemissionsminderung*

bioenergy2020+

- **CFD (Computational Fluid Dynamics = Numerische Strömungssimulation)** bieten sich als effizientes Werkzeug zur Implementierung/Optimierung von Maßnahmen zur Emissionsreduktion an.
  - Möglichkeit, den Verbrennungsprozess im Detail zu analysieren
  - Analyse der Geschwindigkeits- und Temperaturverteilungen im Feuerraum sowie der Verbrennungsreaktionen
  - Optimierung von Feuerraumgeometrien und Luftführungsstrategien
  - Die Berechnungsergebnisse werden visualisiert  
→ Basis für ein verbessertes Verständnis des Prozesses
  - Unterschiedliche Lastzustände und Brennstoffeigenschaften (z.B. Brennstoff-Wassergehalt) können berücksichtigt werden
- **CFD Simulationen können klassische experimentelle Entwicklung zwar nicht ersetzen, aber sie können den Entwicklungsprozess maßgeblich beschleunigen und die Grundlage für den Bau von optimierten Prototypen für Testläufe schaffen.**

18

COMET  
Competence Centers for  
Excellent Technologies

*Primärmaßnahmen zur Reduktion  
von groben Flugaschenemissionen*

bioenergy2020+

- **Grobe Flugaschen** entstehen durch Aufwirbelung von Brennstoff-, Aschen- und Holzkohlepartikeln vom Brennstoffbett.
- In Biomasse-Kleinf Feuerungen ist ihr Anteil an den Emissionen im Vergleich zu Großfeuerungsanlagen gering, trotzdem besteht Optimierungspotential.
- Die Bildung grober Flugaschenemissionen kann vermieden werden durch:
  - besonders ruhige Brennstoffbettführung
  - optimierte Brennstoffbettdurchströmung
  - optimierte Feuerraumgeometrie mit Absetzzonen, in denen aufgewirbelte Brennstoff-, Aschen- und Holzkohlepartikel wieder abgeschieden werden können (→ CFD-gestützte Optimierung)

19

COMET  
Competence Centers for  
Excellent Technologies

*Primärmaßnahmen zur Reduktion  
von organischen  
Feinstaubemissionen und Russ*

bioenergy2020+

- Feinstaub, der als Resultat von **unvollständigem Gasphasenausbrand** entsteht (**organischer Feinstaub**), ist prinzipiell durch folgende Maßnahmen weitgehend vermeidbar:
  - richtige Feuerraumgestaltung
  - gute Luftstufung (auch bei Teillastbetrieb)
  - gute Durchmischung der Verbrennungsluft mit den Rauchgasen (auch im Teillastbetrieb)
  - hohe Feuerraumtemperaturen (>800°C) und ausreichende Verweilzeiten der Rauchgase im heißen Feuerraum bei Nenn- und Teillastbetrieb
  - eine auf diese Maßnahmen abgestimmte Anlagenkonzeption und Regelung, die auch bei Anfahr-, Lastwechsel- und Teillastbetrieb möglichst gute Voraussetzungen für einen annähernd vollständigen Ausbrand schafft

20

COMET  
Competence Centers for  
Excellent Technologies

## Primärmaßnahmen zur Reduktion von anorganischen Feinstaubemissionen

bioenergy2020+

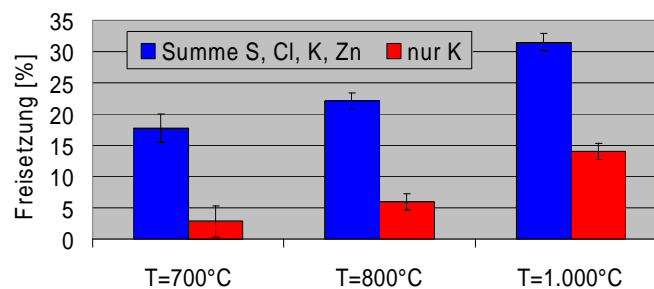
- Die Bildung von **anorganischen Feinstaubemissionen** hängt bei der Verbrennung chemisch unbehandelter Biomasse weitergehend von der **Freisetzung von K** aus dem Brennstoff in die Gasphase ab.
- Mit steigender Temperatur steigt die K-Freisetzung.
- Feuerungskonzepte, die auf eine Reduktion der anorganischen Feinstaubemissionen abzielen, müssen somit darauf ausgerichtet sein, K möglichst effizient in die Grobmasche einzubinden.  
**Mögliche Strategien:**
  - Brennstoffbettkühlung
  - Extreme Luftstufung

21

COMET  
Competence Centers for  
Excellent Technologies

## Reduzierte K-Freisetzung aus dem Brennstoffbett durch niedrigere Betttemperaturen

bioenergy2020+



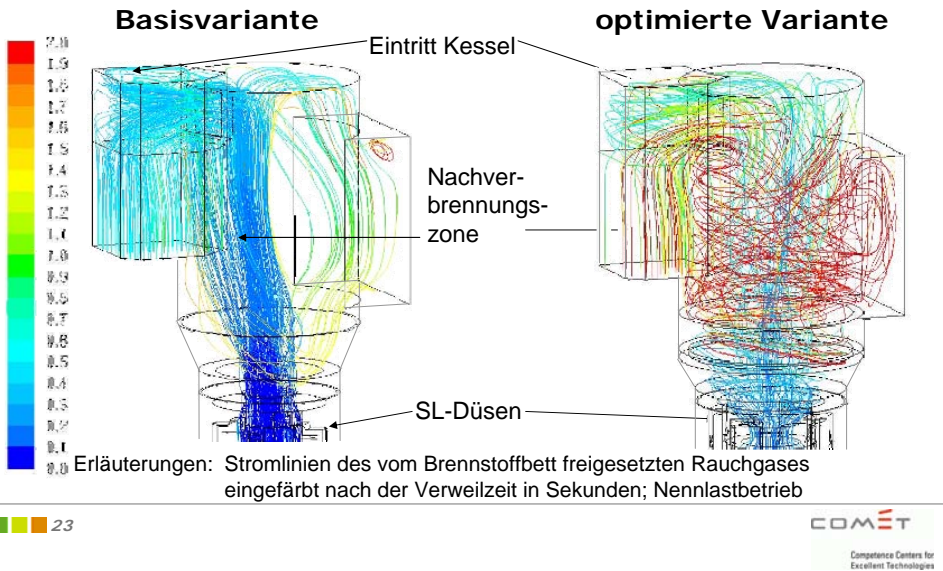
Erläuterungen: Freisetzung aerosolbildender Elemente (Summe von S, Cl, K, Zn) sowie von Kalium aus dem Brennstoff in die Gasphase für verschiedene Betttemperaturen bei der Holzkohleverbrennung; Ergebnisse von Testläufen an einem Laborreaktor

22

COMET  
Competence Centers for  
Excellent Technologies

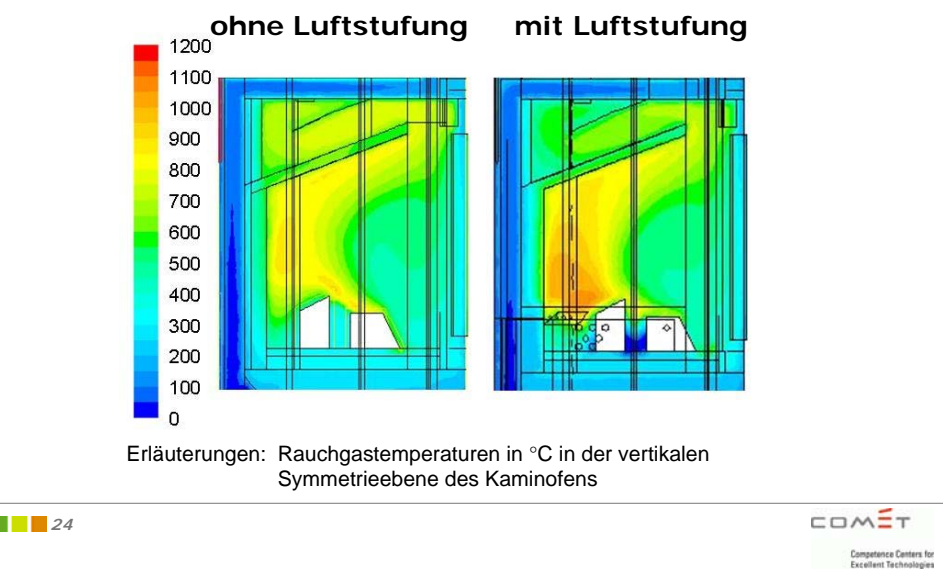
**Beispiel I: Optimierung der Vermischung des Rauchgases mit der Verbrennungsluft in Pelletkesseln**

bioenergy2020+



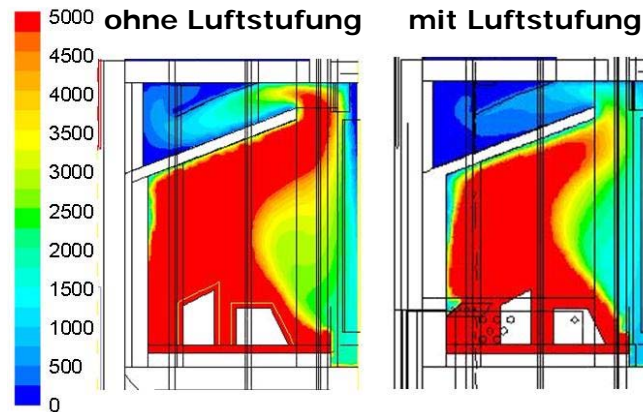
**Beispiel II: Implementierung von Luftstufung in Kaminöfen (I)**

bioenergy2020+



## Beispiel II: Implementierung von Luftstufung in Kaminöfen (II)

bioenergy2020+



Erläuterungen: CO-Konzentrationen im Rauchgas in ppm in der vertikalen Symmetrieebene; erzielte Emissionsreduktionen durch die Implementierung der Luftstufung: CO: 1.900 mg/MJ → <670 mg/MJ; Feinstaub: 35 mg/MJ → 20 mg/MJ

25

COMET  
Competence Centers for  
Excellent Technologies

## Zusammenfassung und Schlussfolgerungen (I)

bioenergy2020+

- **Biomasse-Kleinfeuerungen** decken in Österreich ca. 18% der Hauptheizsysteme ab, sind aber für ca. 88% der PM<sub>10</sub>-Emissionen des Hausbrands verantwortlich.
- Die große Anzahl alter in Betrieb befindlicher Feuerungen ist für den hohen Anteil an den PM<sub>10</sub>-Emissionen verantwortlich.
- Während **alte Biomassekessel und Öfen 90 mg/MJ bzw. 148 mg/MJ** an PM<sub>10</sub> emittieren, konnten durch stetige technologische Weiterentwicklung die PM<sub>10</sub>-Emissionen **moderner Biomassekessel und Öfen** in den Bereich von **20 bis 50 mg/MJ** abgesenkt werden.
- Es muss daher im Sinne einer nachhaltigen, CO<sub>2</sub>-neutralen Wärmeversorgung unter Berücksichtigung der notwendigen PM<sub>10</sub>-Emissionsreduktionen **generell empfohlen** werden, **alte Biomassefeuerungen durch neue zu ersetzen** und dies auch entsprechend zu fördern.

26

COMET  
Competence Centers for  
Excellent Technologies

- Trotz des derzeit schon sehr hohen technologischen Entwicklungsstandes von Biomasse-Kleinfeuerungstechnologien sind **weitere Verbesserungen**, speziell bezüglich der Staubemissionsreduktion notwendig.
- Dabei sollte auf eine möglichst vollständige Vermeidung der Emissionen an
  - **groben Flugaschen und**
  - **organischen Aerosolen**sowie eine weitgehende Reduktion der
  - **anorganischen Aerosolemissionen**abgezielt werden.
- Bei Ausnutzung der vorhandenen technologischen Potentiale sollten die Gesamtstaubemissionen für zukünftige automatisch geregelte **Low-Dust-Biomasse-Kleinfeuerungen** bei **<10 mg/Nm<sup>3</sup>** bzw. **<7 mg/MJ** liegen.



***Danke für Ihre  
Aufmerksamkeit***

**Dipl.-Ing. Dr. Thomas Brunner**  
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz, Austria  
TEL.: +43 (316) 48130013; FAX: +43 (316) 4813004  
Email: [thomas.brunner@bioenergy2020.eu](mailto:thomas.brunner@bioenergy2020.eu)  
HOMEPAGE: <http://www.bioenergy2020.eu>