

# Feinstaubbildung in Holzfeuerungen und Gesundheitsrelevanz im Vergleich zu Dieseleruss

Norbert Klippel und Thomas Nussbaumer



# Übersicht

1. Wie entsteht Feinstaub bei der Verbrennung von Holz ?
2. Wie hoch sind die Emissionen ?
3. Grössenverteilung der Stäube
4. Chemische Zusammensetzung
5. Abschätzung der Gesundheitswirkung durch biologische Zelltests
  - Automatische Feuerungen > 100 kW
  - Kleinf Feuerungen: Stückholz- und Pelletöfen < 20 kW
6. Schlussfolgerungen:
  - Wie gut ist die heutige Technik, wo sind die grössten Emittenten ?
  - Empfehlungen für eine saubere Nutzung von Biomasse

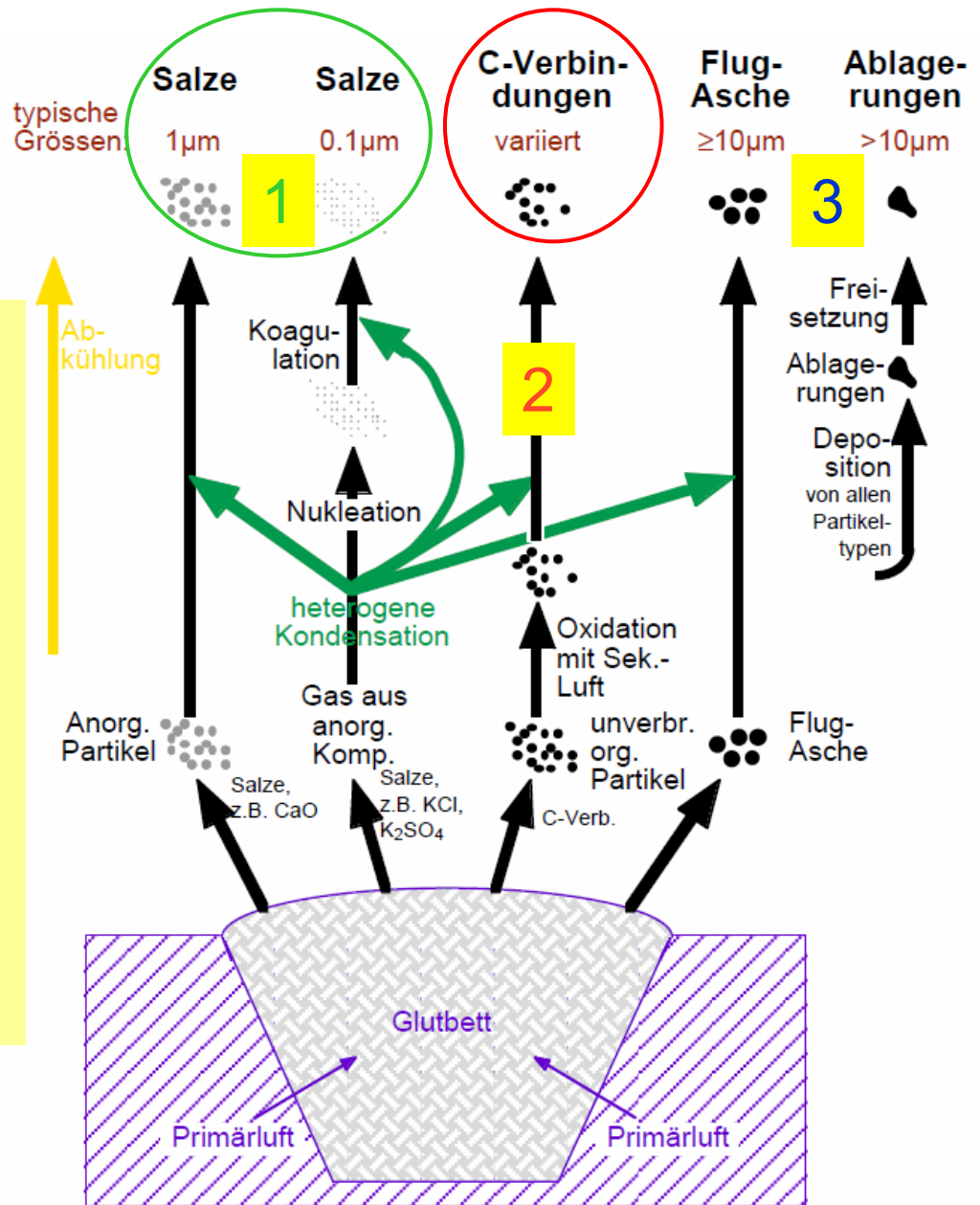
# Partikelbildung bei Holzverbrennung

1. vollständige Verbrennung:  
anorganische Salze  
KCl, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CaSO<sub>4</sub>, ...

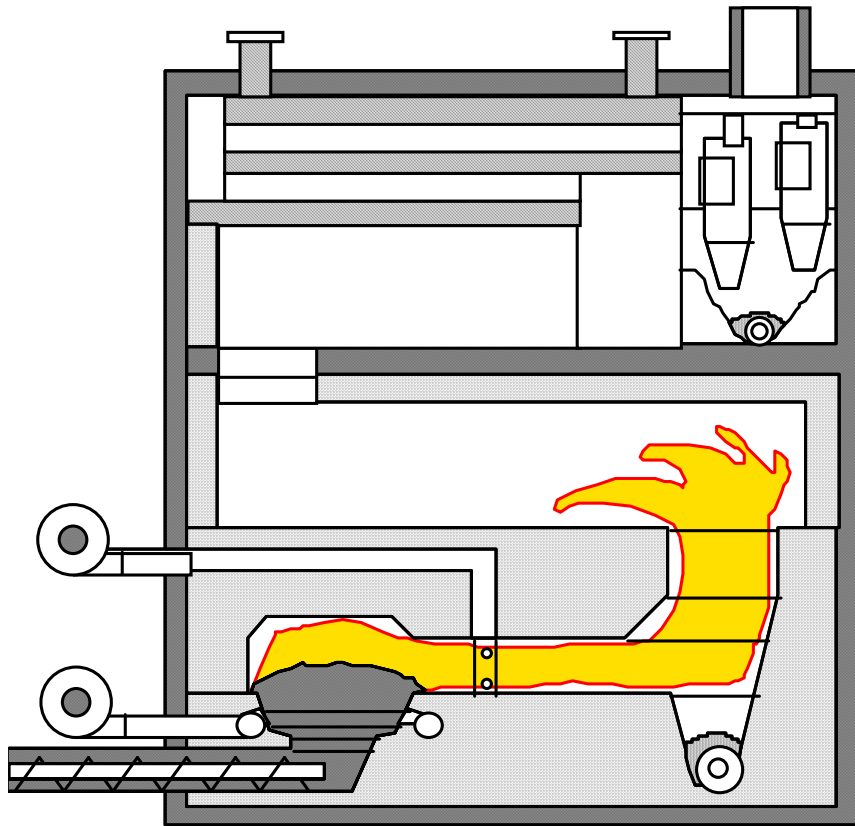
2. unvollständige Verbrennung:  
Russ, Kohlenwasserstoffe:

50 mg/m<sup>3</sup> Emission sind nur  
0.5‰ des Brennstoffs (!)

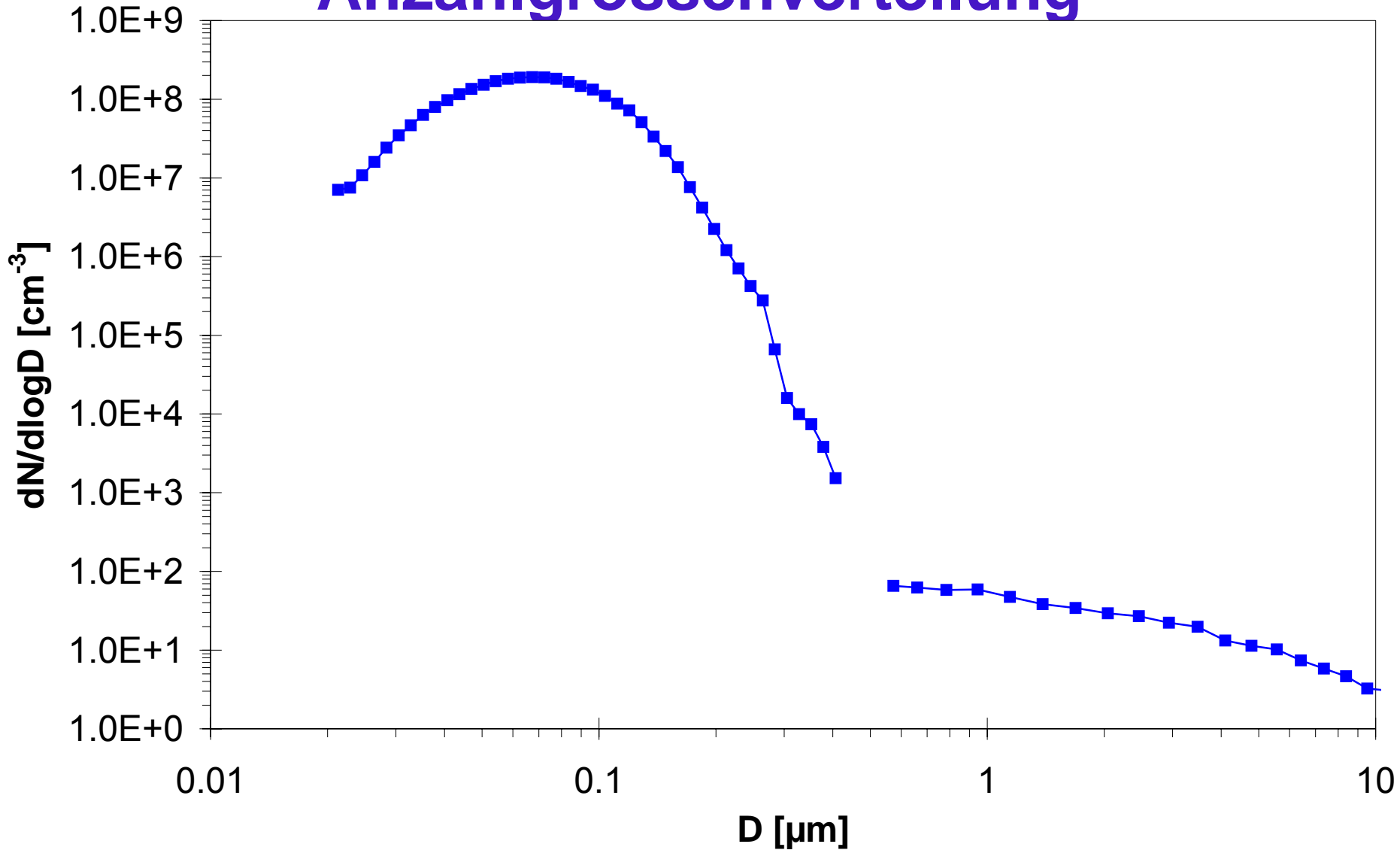
3. Aufwirbelung von Asche:  
Grobpartikel > 10 µm



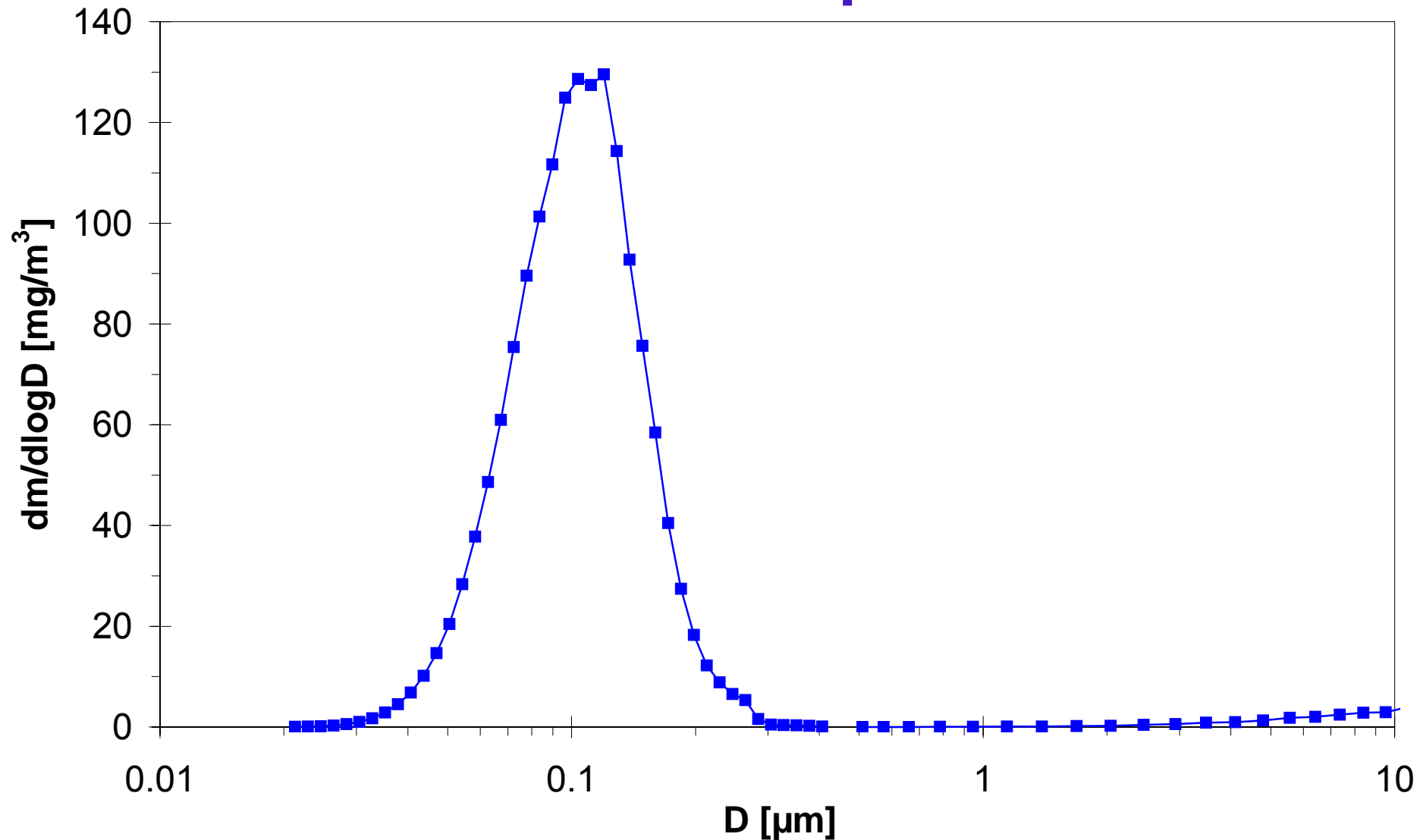
# Automatische Holzfeuerungen



# Automatische Feuerung: Anzahlgrößenverteilung



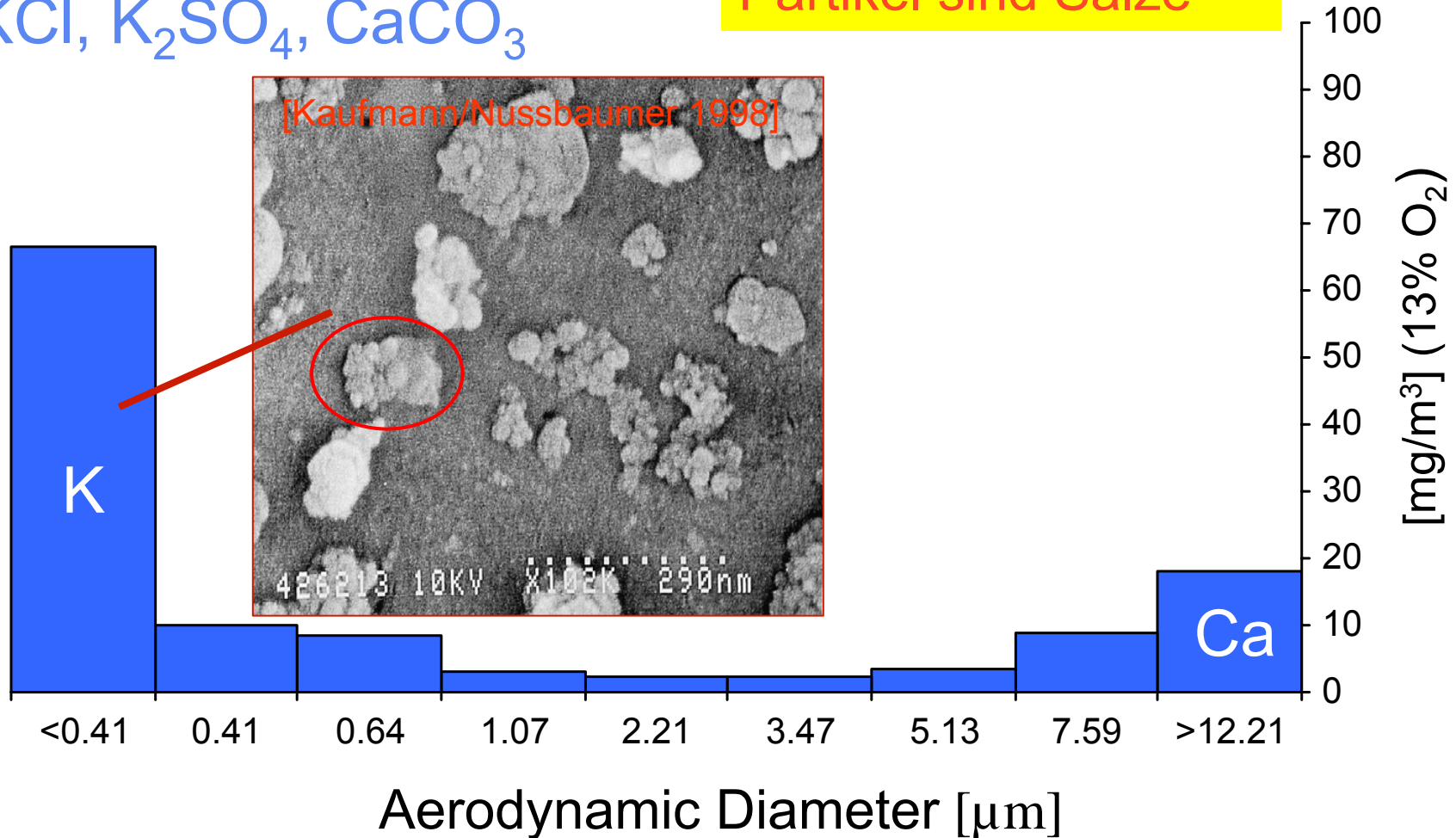
# Automatische Feuerung: Partikelmassenspektrum



# Automatische Feuerungen

K, Ca, Na, Cl, S.. →  
KCl, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CaCO<sub>3</sub>

Hauptbestandteil der  
Partikel sind Salze



[Oser et al. 2000]

Verenum

# Probennahme für biologische Tests und chemische Analysen

**Diesel-  
Partikel**

**Partikel aus  
automatischer  
Holzfeuerung**

**0.5 g** particle mass

**2 g** particle mass

# Kleinf Feuerungen ( < 20 kW)

## Konventionelle Öfen

moderner Ofen  
mit  
Qualitätssiegel

einfacher  
Metallofen  
(ohne  
Qualitätslabel)



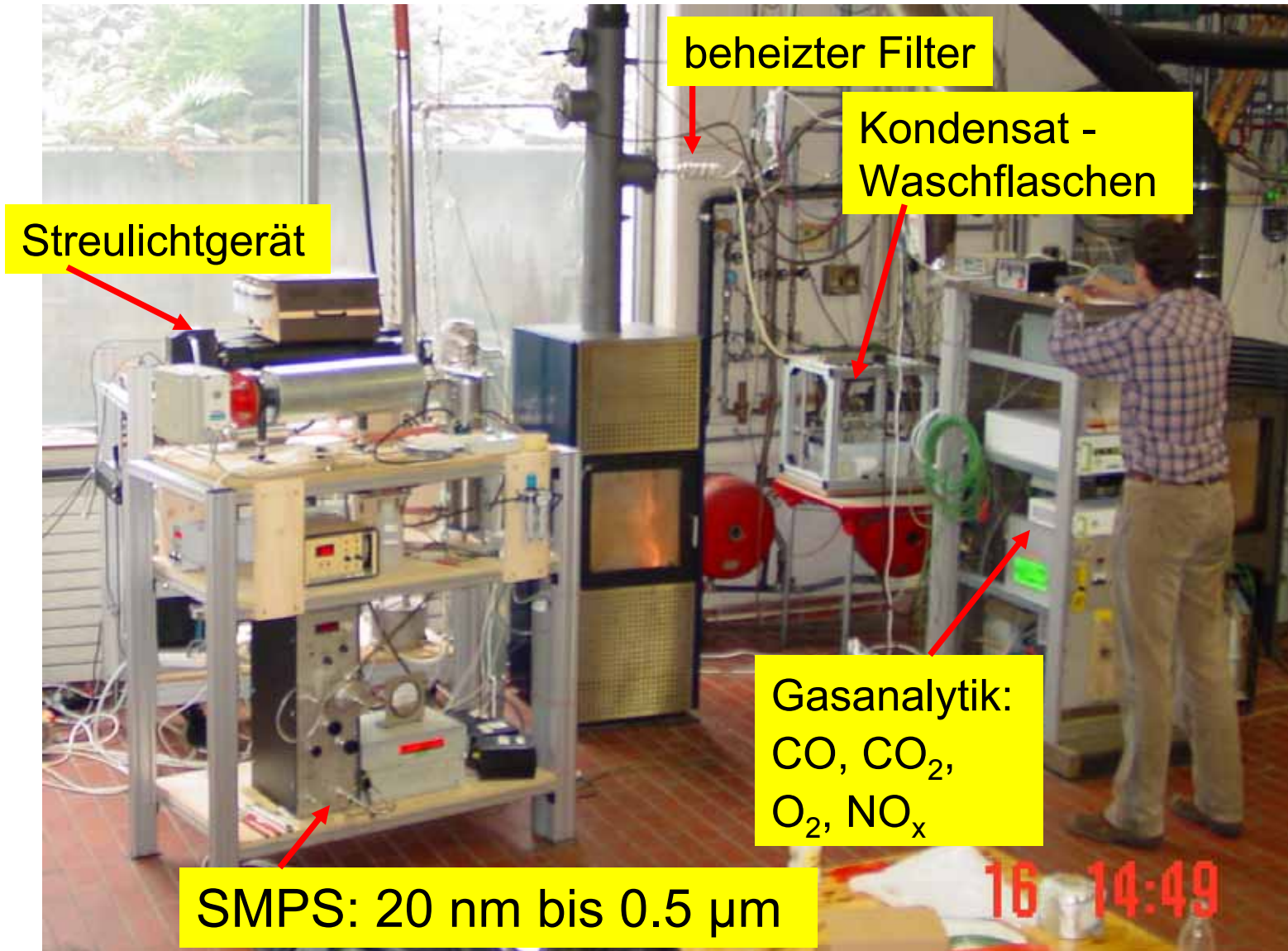
## Stückholzofen mit zweistufiger Verbrennung



## Pelletofen



# Laboraufbau zur Partikelmessung



# Kleinf Feuerungen ( < 20 kW)

## Konventionelle Öfen

moderner Ofen  
mit  
Qualitätssiegel

einfacher  
Metallofen  
(ohne  
Qualitätslabel)



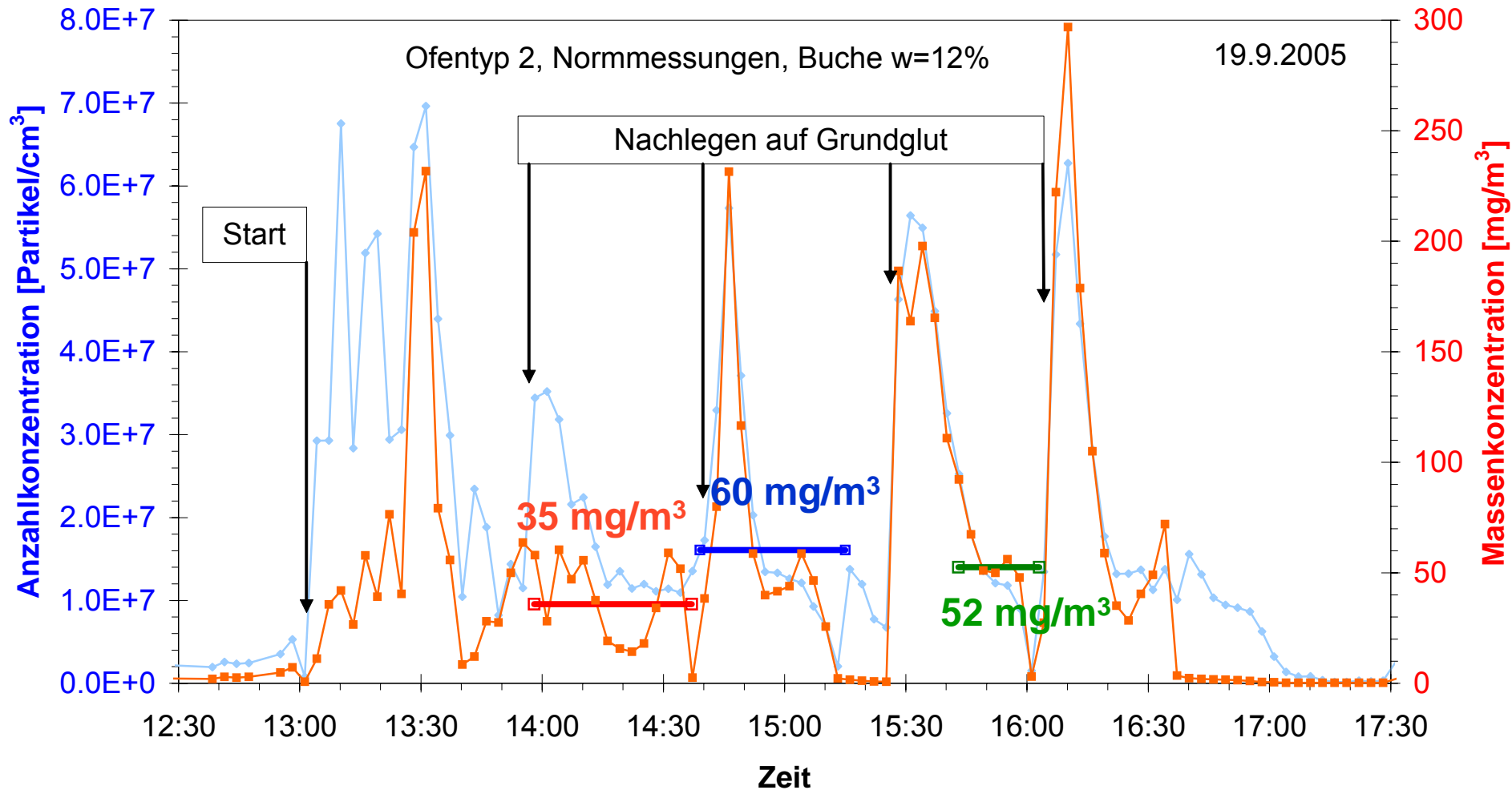
Stückholzofen  
mit zweistufiger  
Verbrennung



Pelletofen

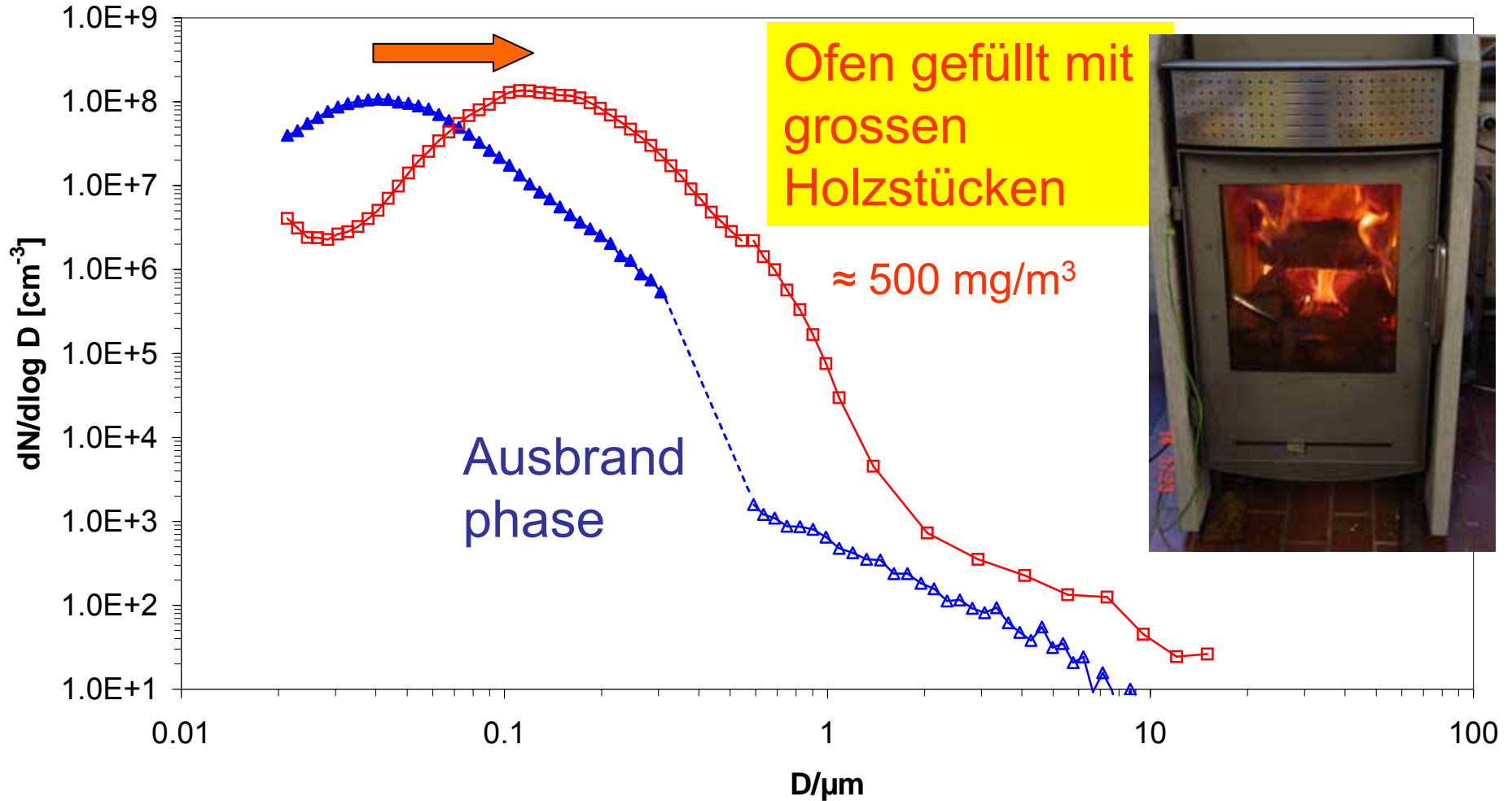


# Zeitlicher Verlauf der Emissionen Cheminéeofen mit schweizer Qualitätssiegel



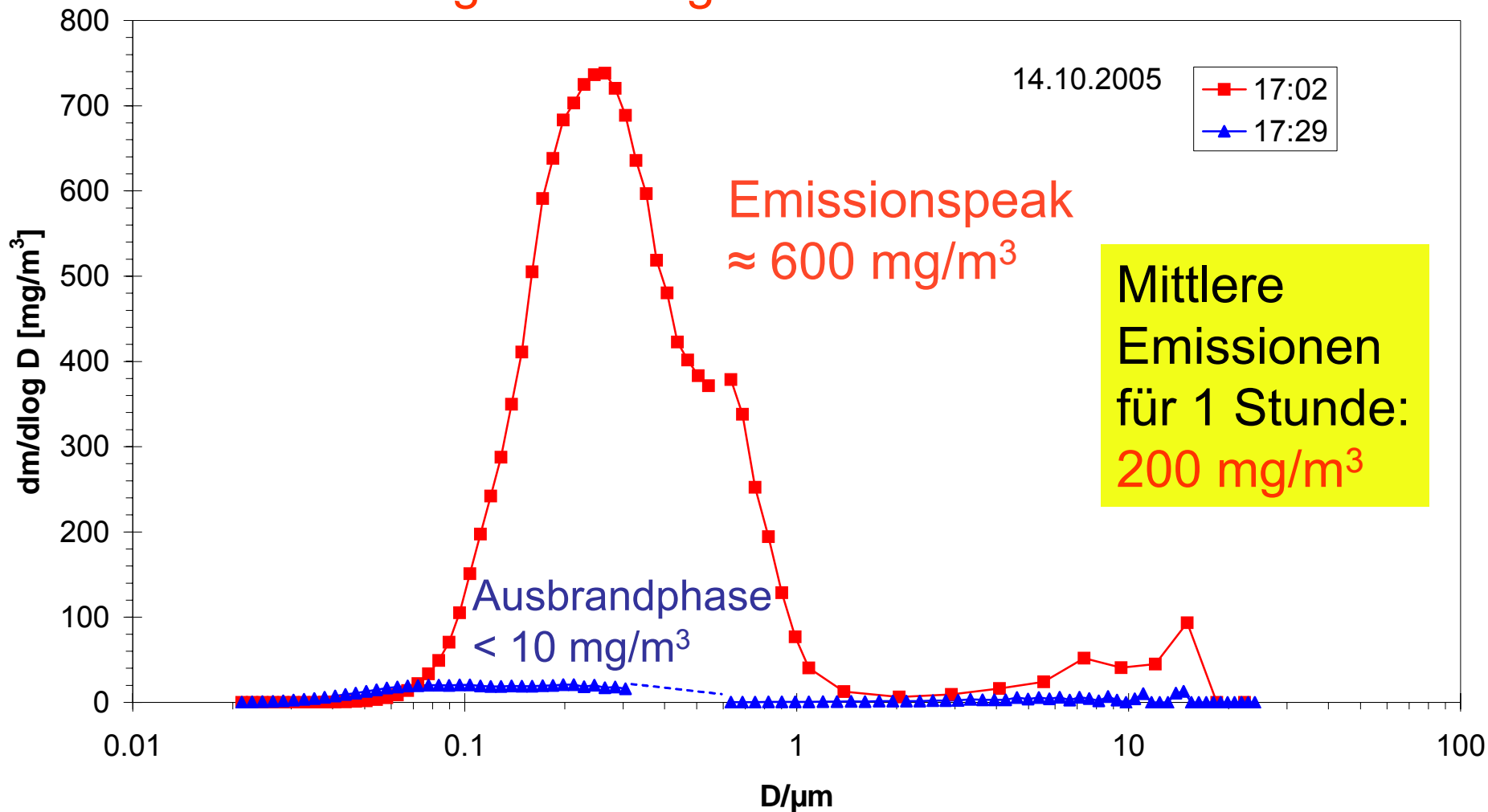
# Cheminéeofen mit schweizer Qualitätssiegel

## Partikelanzahlgrössenverteilung



# Partikelmassenverteilung

Ofen gefüllt mit grossen Holzstücken

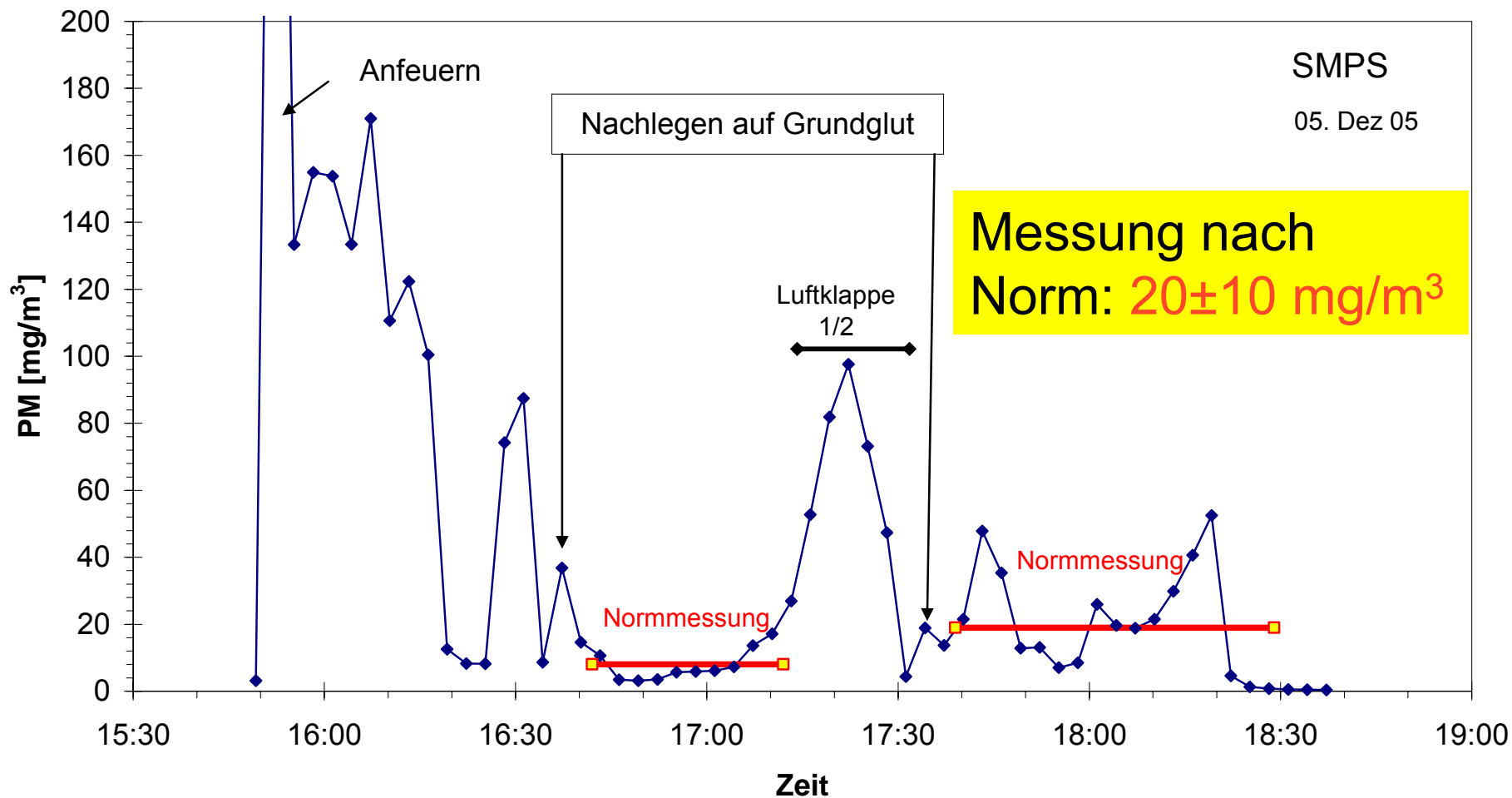


# Kleiner Metallofen



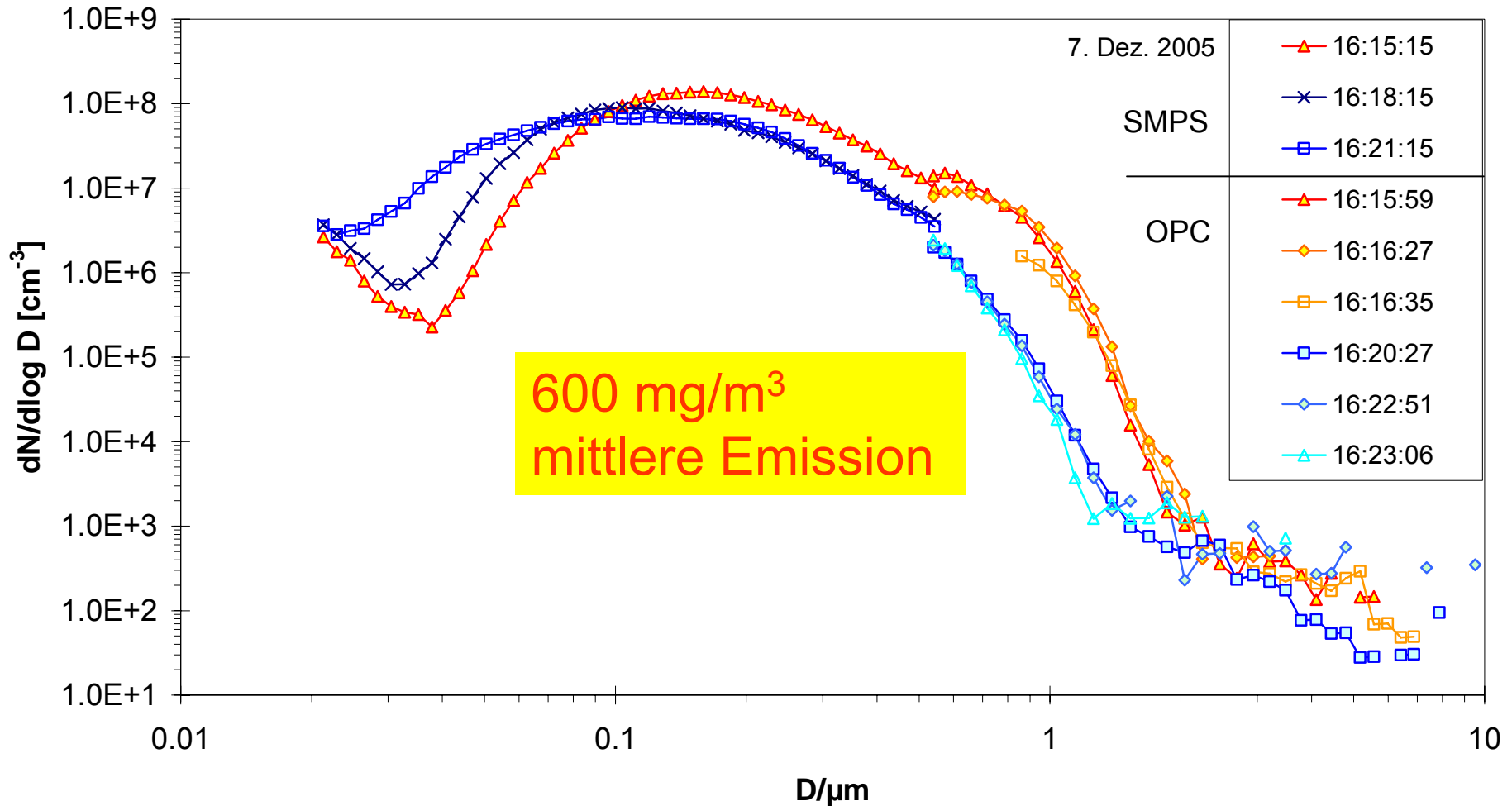
- Normmessung nach Prüfbedingungen für Qualitätssiegel
- Betrieb mit schlechtem Brennstoff (feuchtes Holz)
- Sehr schlechter Betrieb mit Luftmangel

# Zeitlicher Verlauf, Normmessung



# Betrieb mit feuchtem Holz mit ungünstigen Eigenschaften

Chilenische Buche, Wassergehalt 16-33%



# Sehr schlechter Betrieb mit Luftmangel

Auszug aus der Bedienungsanleitung eines importierten Ofens:

- “Um eine gute Verbrennung während der ganzen Nacht zu gewährleisten, machen Sie das folgende:
- (a) Erreichen Sie eine gute Glut auf der Basis des Feuers.
  - (b) **Legen Sie dementsprechend eine volle Ladung von neuem Brennholz nach.**
  - (c) Sobald als die nachgelegten Scheiter ebenfalls Feuer fangen, **stellen Sie den Luftregulierungshebel auf “Low“.**”

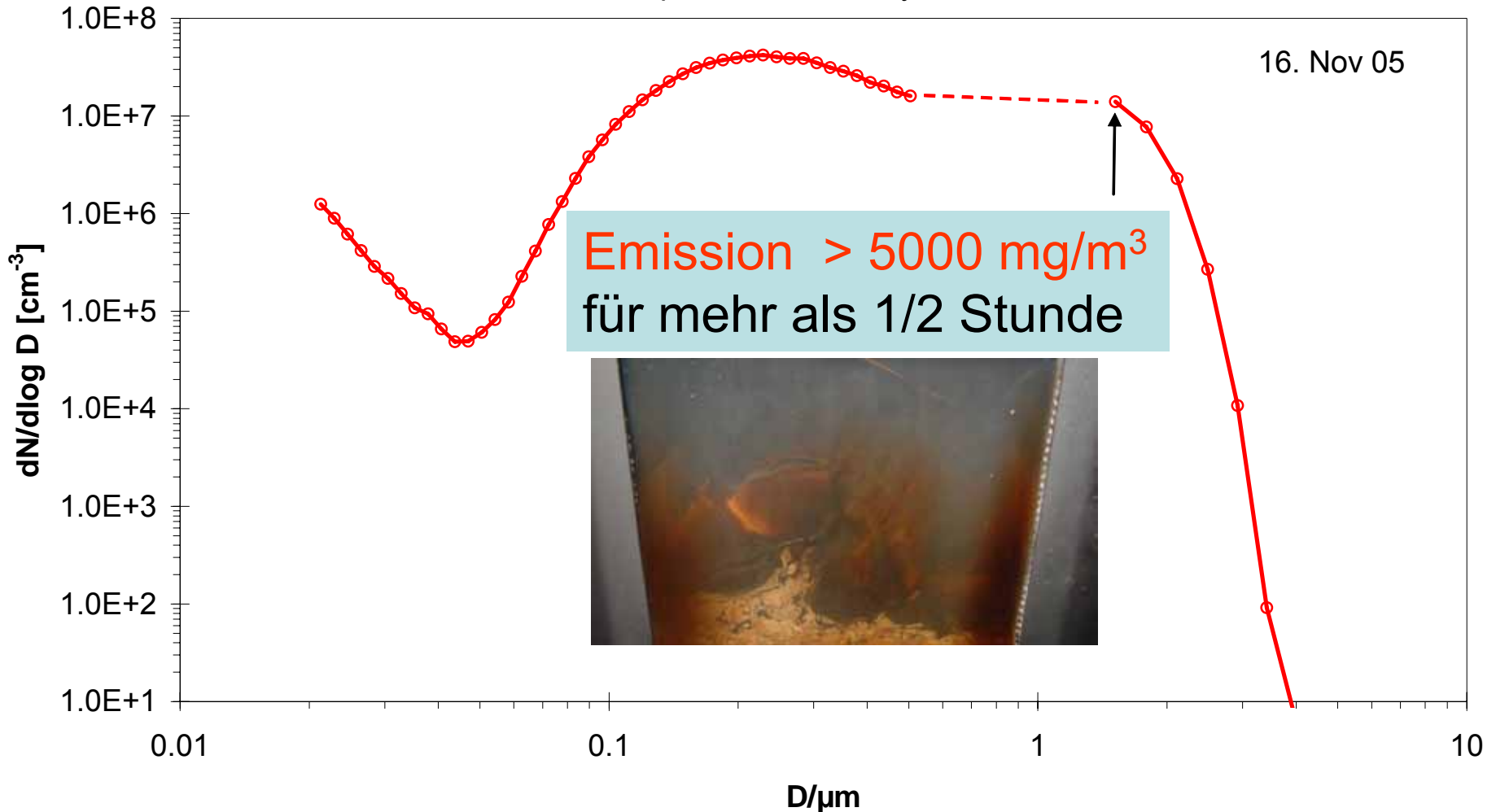


# Sehr schlechter Betrieb mit Luftmangel

SMPS/OPC Number Size Distribution

Wood stove operated under very bad conditions

16. Nov 05



# Sehr schlechter Betrieb mit Luftmangel

Inhalt der Kondensat-Waschflaschen nach dem beheizten Filter  
(Filterdurchbruch durch hohe Beladung)



# Kann eine Kleinf Feuerung zuverlässig mit tiefen Emissionen betrieben werden?

- Ja, wenn der Betreiber alle ½ Stunde kleine trockene Holzstücke nachlegt und für genügend Luftzufuhr sorgt
- Ist das praxisgerecht?
- Gibt es auch technische Lösungen für kontinuierlichen Betrieb ?

# Stückholzofen mit **zweistufiger** Verbrennung



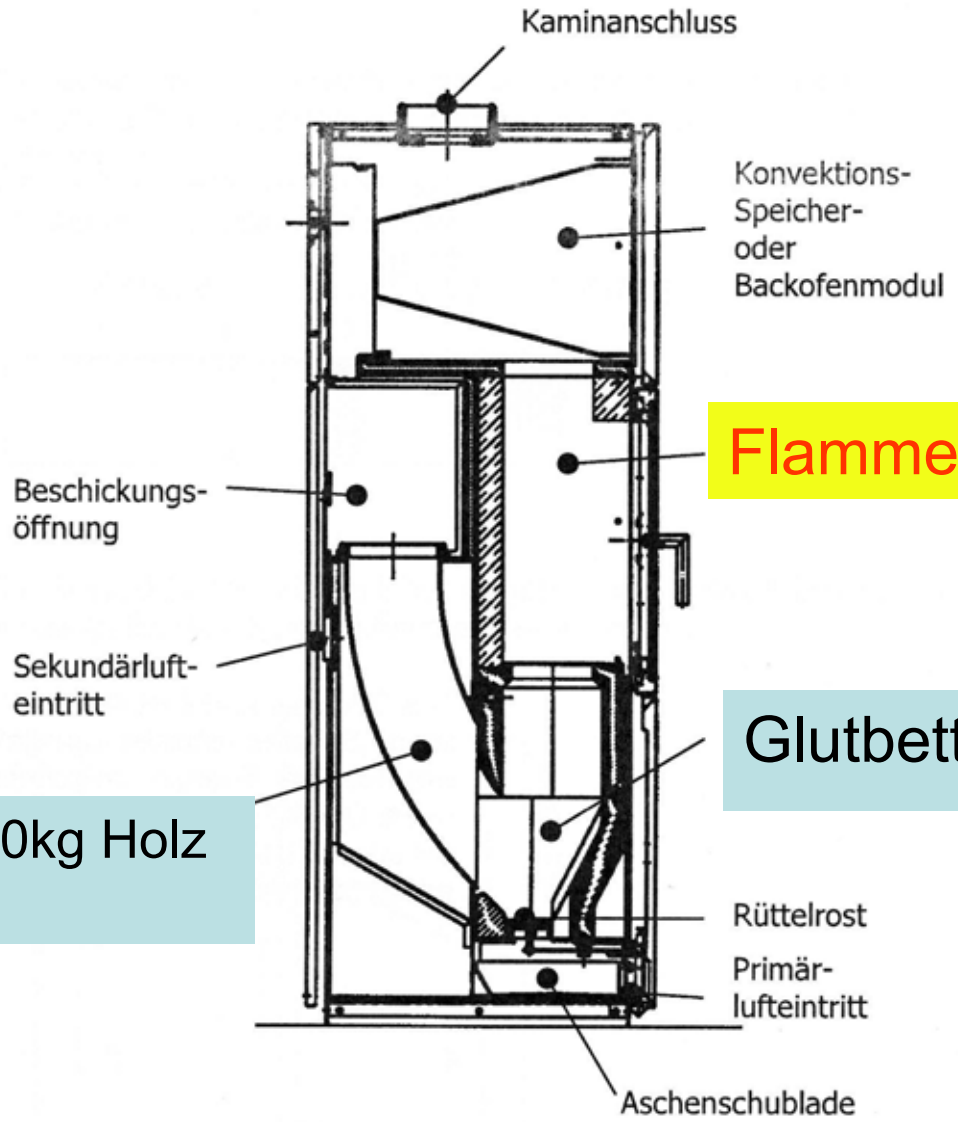
Sekundärluftdüsen für vollständigen Ausbrand



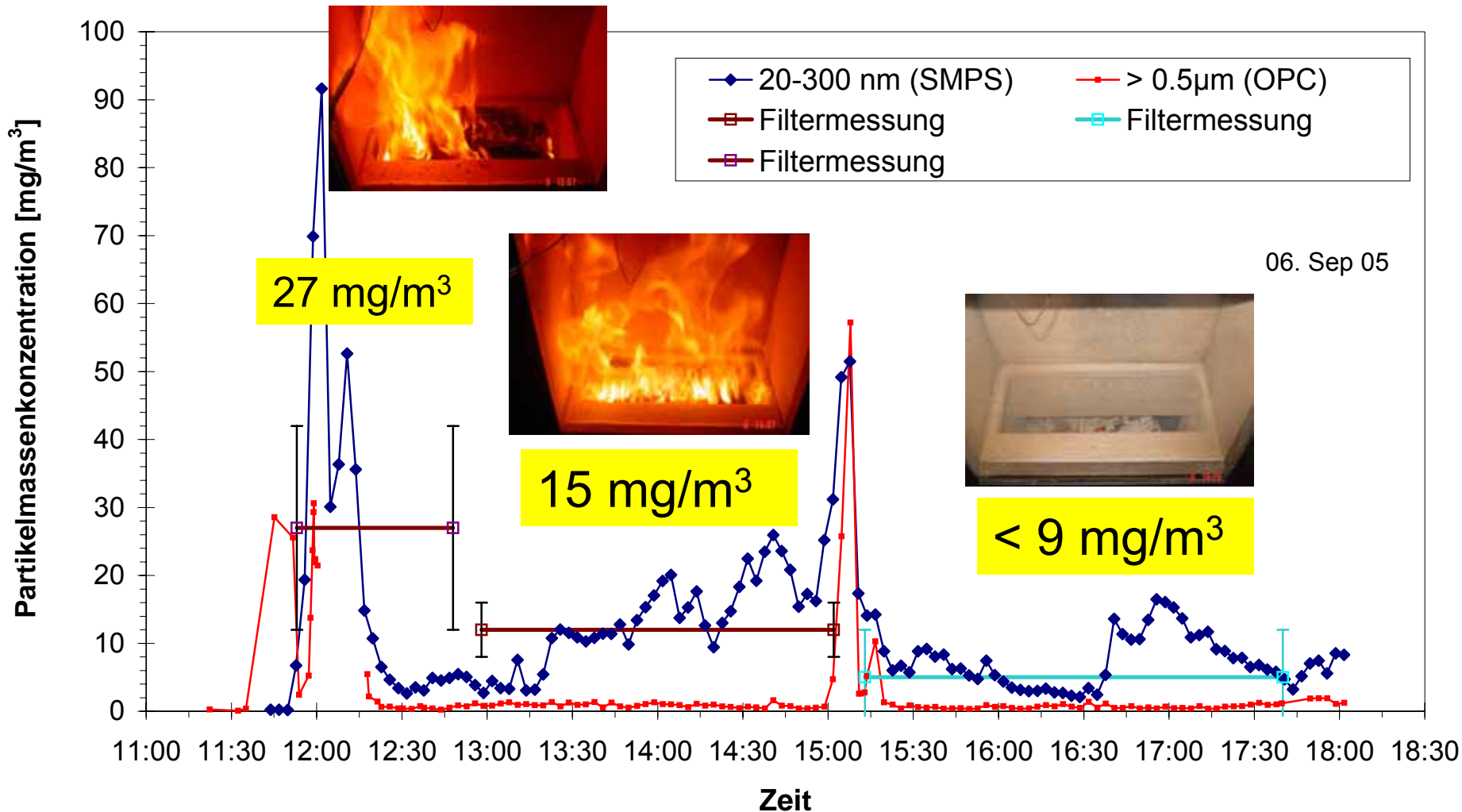
Glutbett mit Primärluft,  
Füllschacht für > 10kg Holz  
auf Rückseite



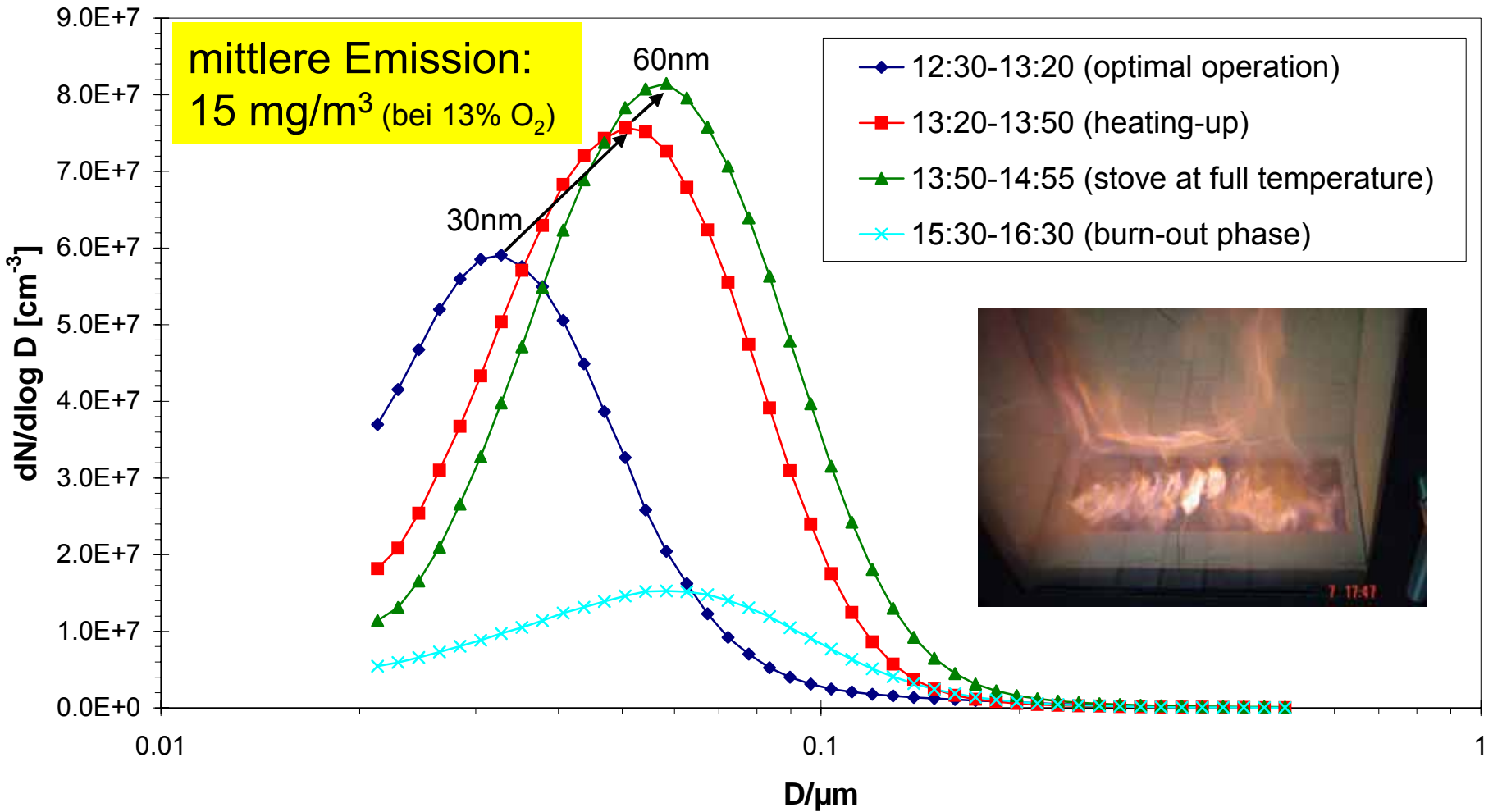
# Stückholzofen mit **zweistufiger** Verbrennung



# Stückholzofen mit **zweistufiger** Verbrennung: zeitlicher Verlauf der Partikelemissionen

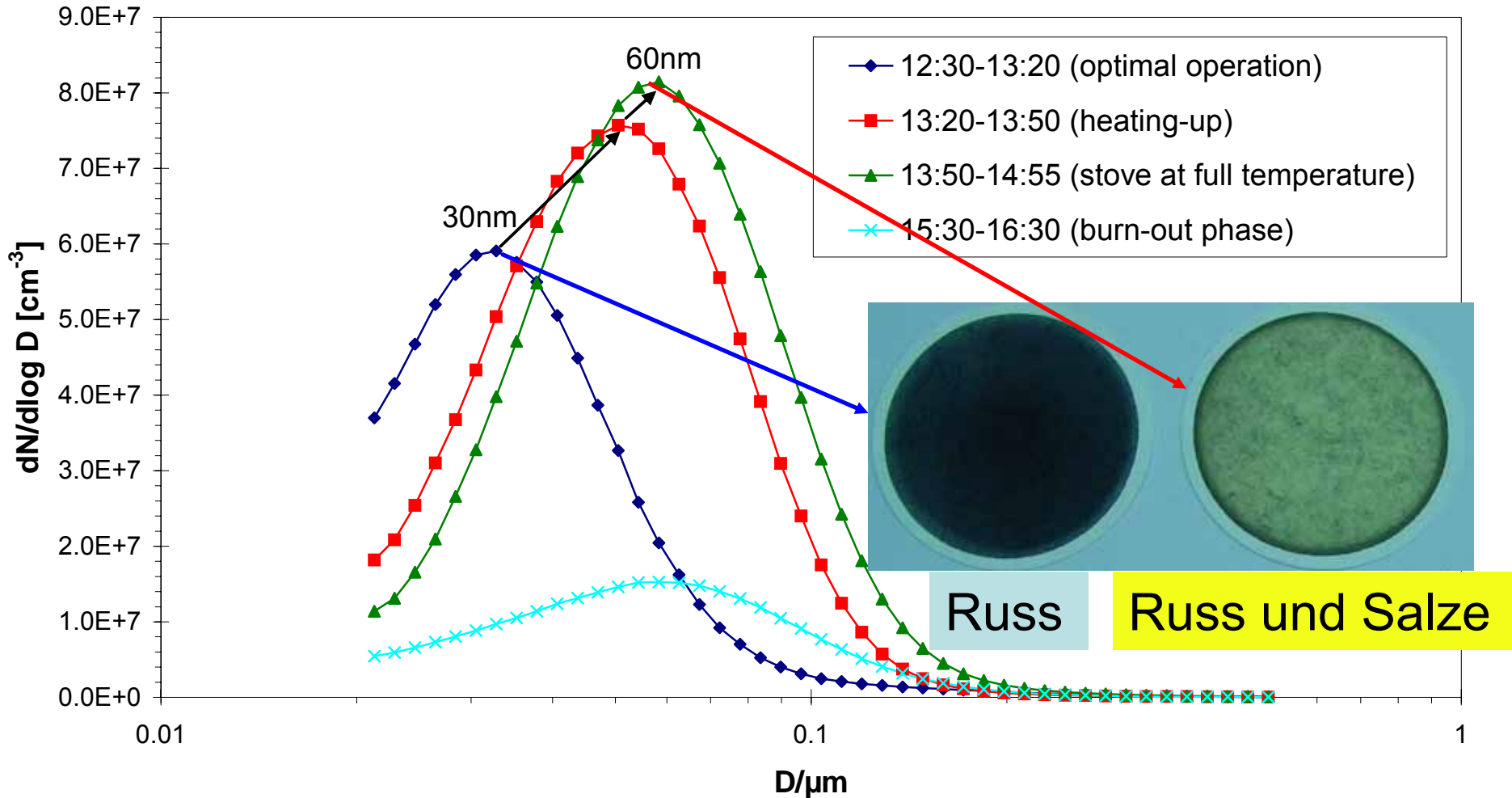


# Stückholzofen mit **zweistufiger** Verbrennung: Partikelgrößenverteilung

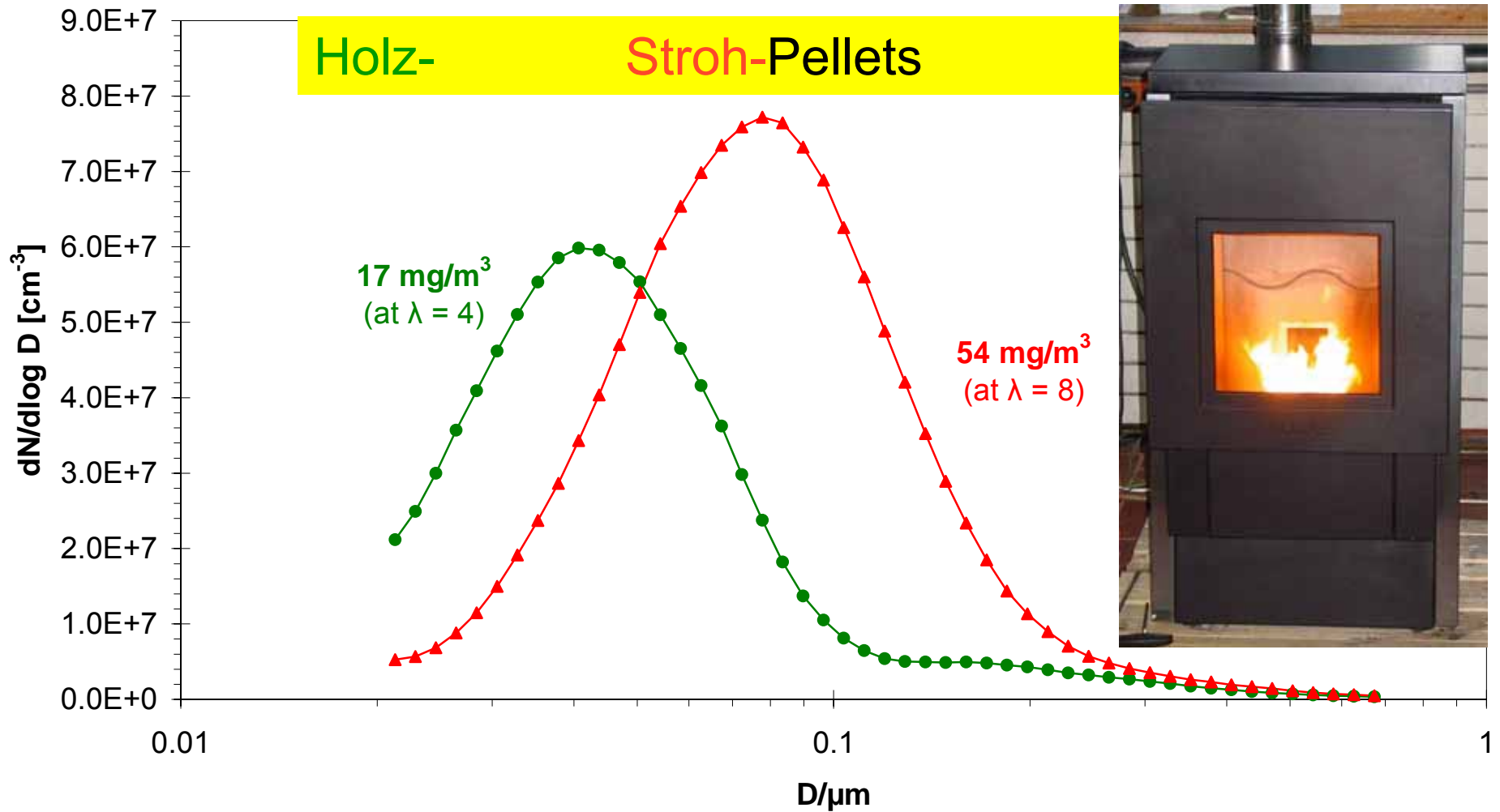


# Stückholzofen mit **zweistufiger** Verbrennung: Größenverteilung und Filterproben bei verschiedener Temperatur

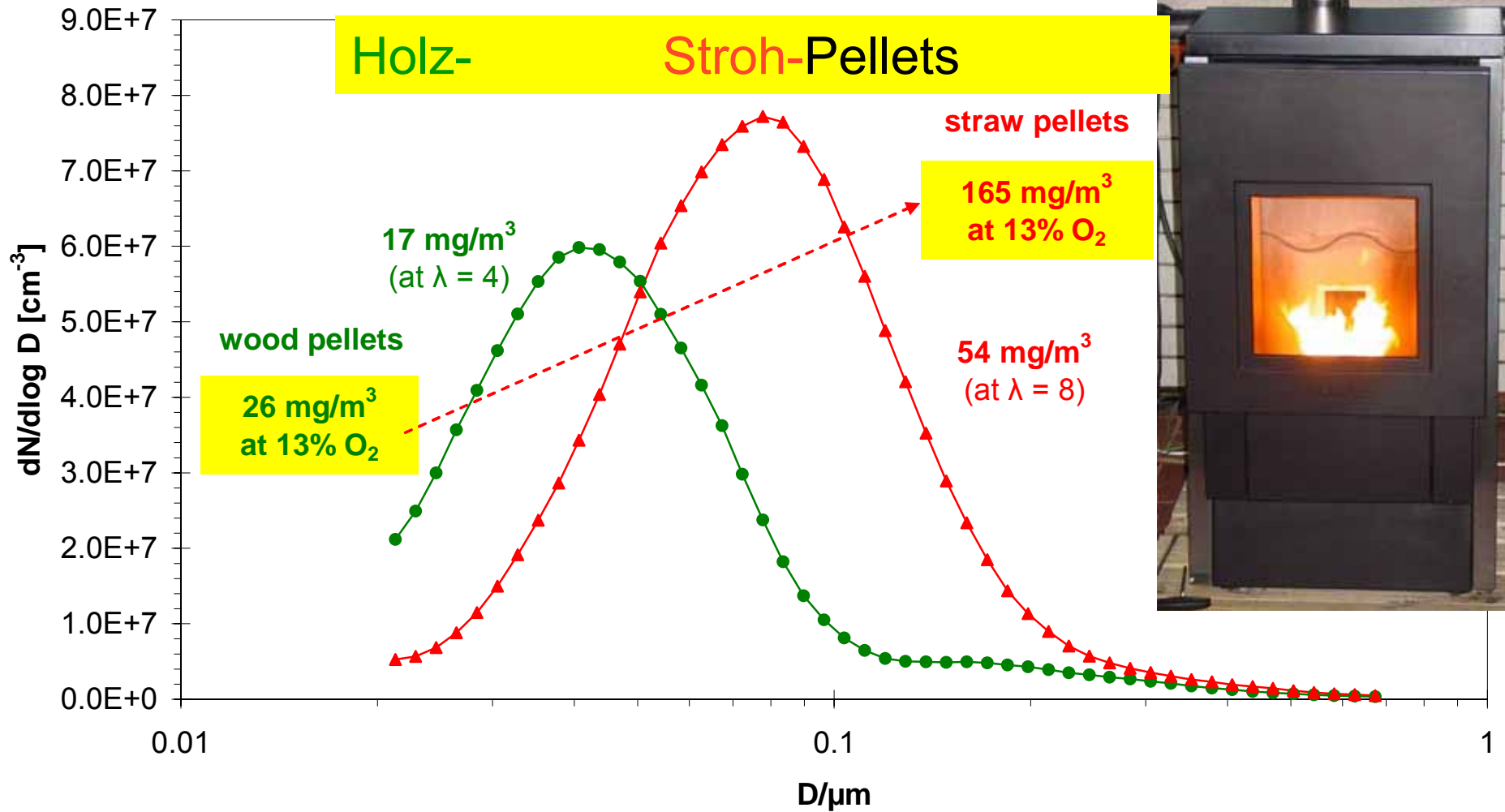
Continuous operation under stable conditions



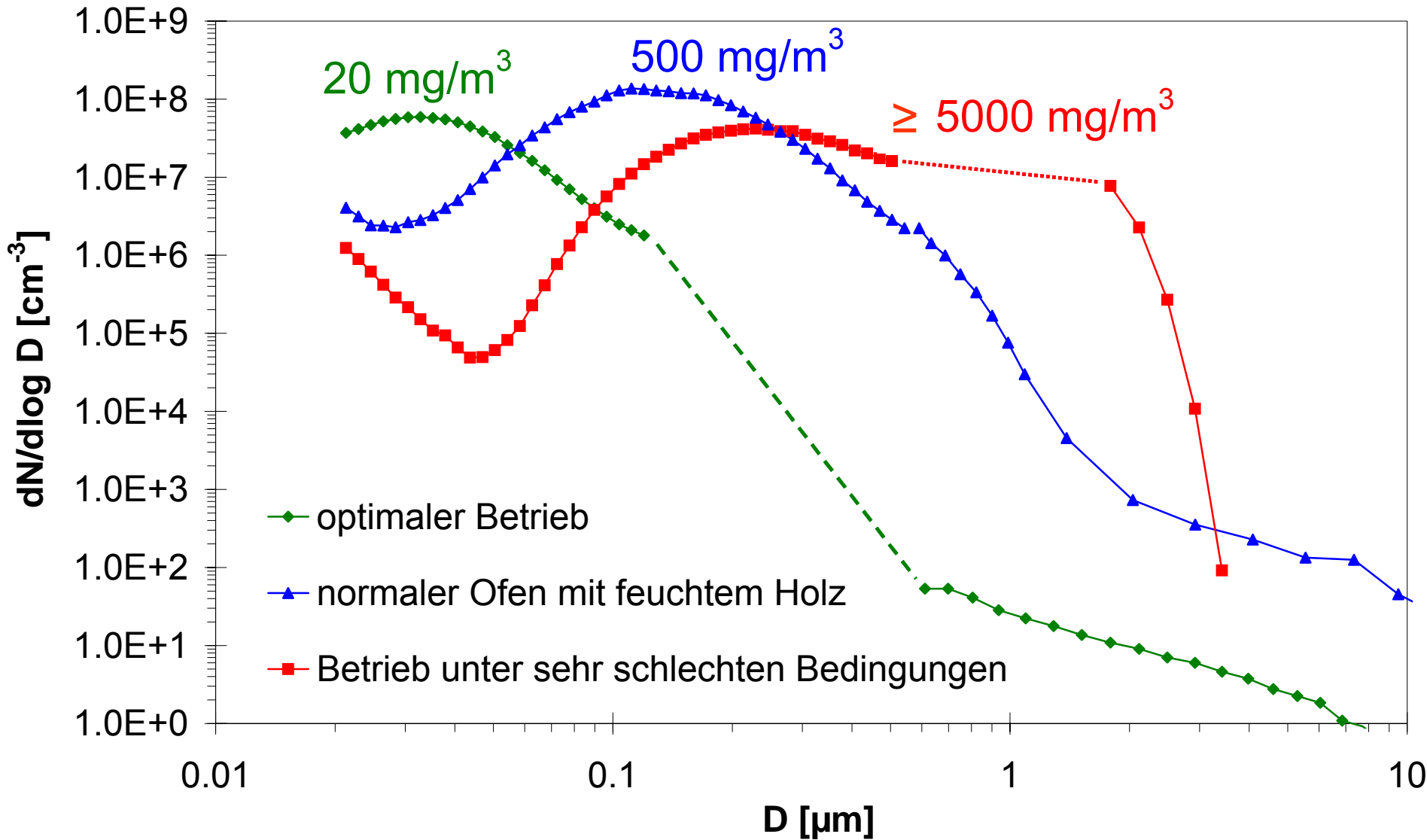
# Pelletofen



# Pelletofen



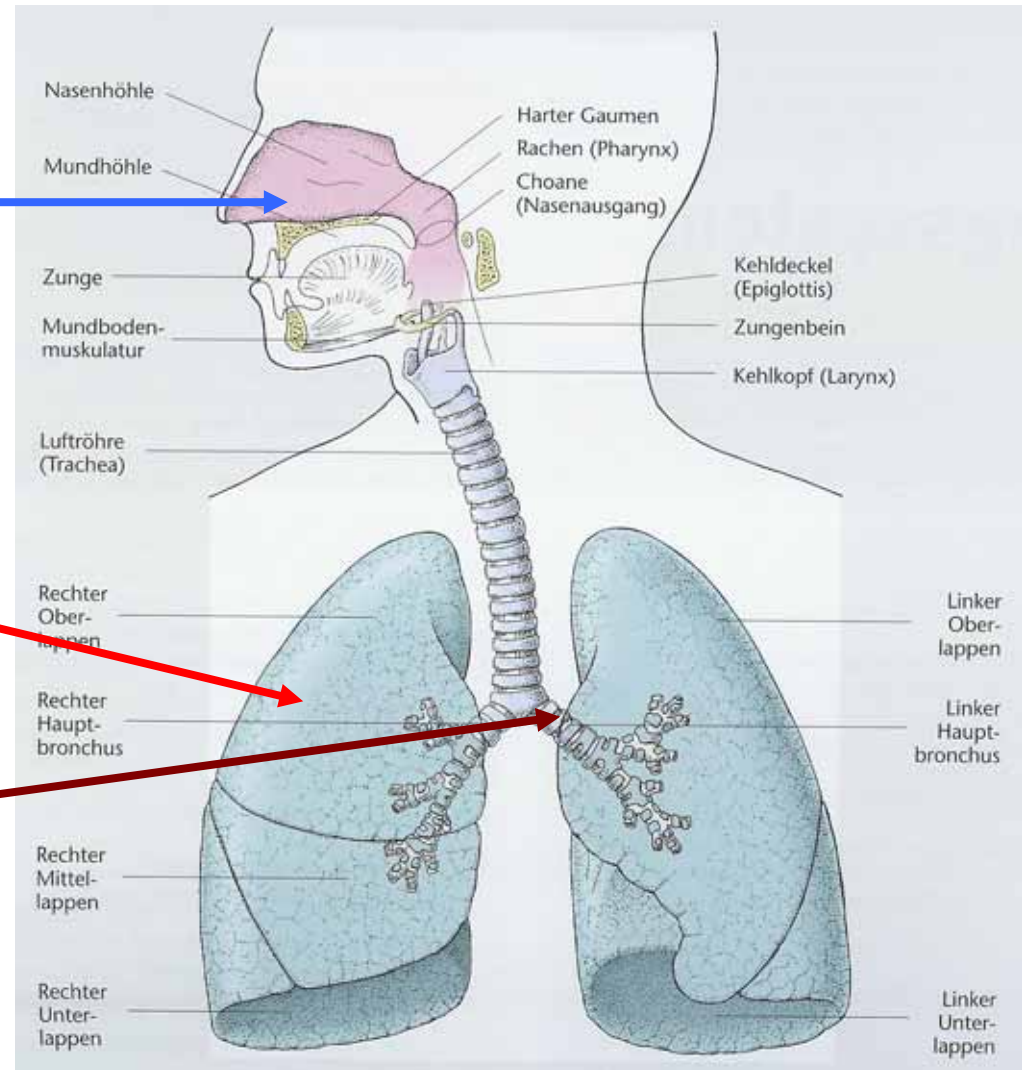
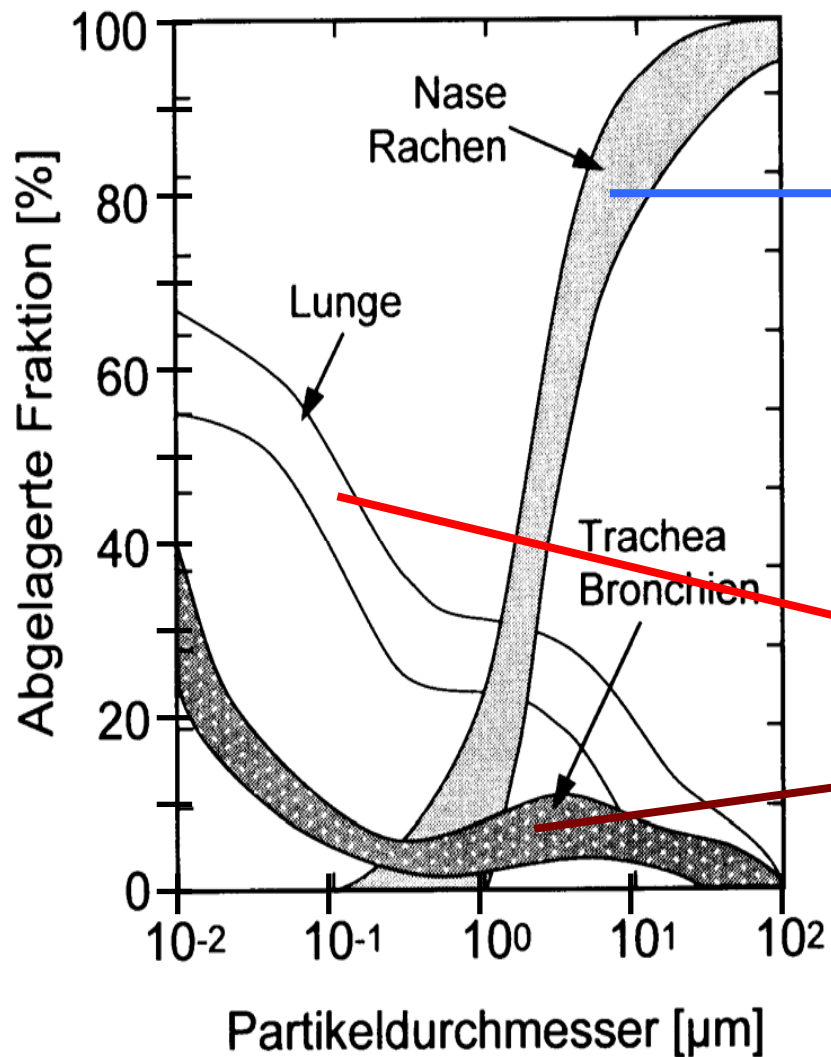
# Zusammenfassung: Partikelspektren von kleinen Öfen



# Welche Emissionen sind relevant für die Gesundheit?

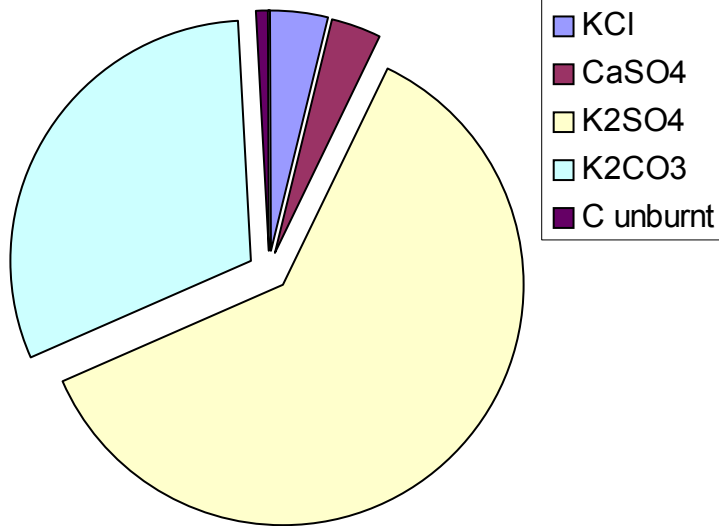
- Verschiebung der Emissionspeaks abhängig vom Betrieb
- Alle Emissionen sind dominiert von Partikeln  $\leq 2.5 \mu\text{m}$ , sogar bei  $5000 \text{ mg/m}^3$
- Chemische Zusammensetzung ist bei schlechter Verbrennung anders als bei automatischen Feuerungen

# Partikelabscheidung in den Atmungsorganen



# Chemische Zusammensetzung der Partikel von verschiedenen Holzfeuerungen

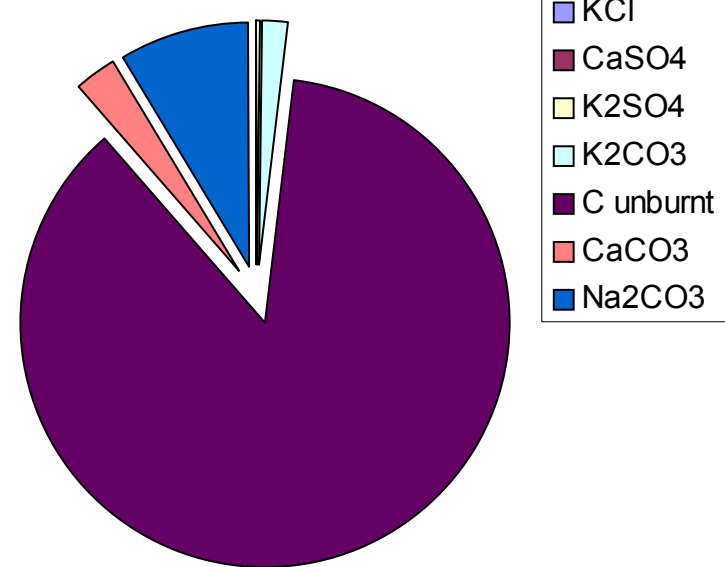
## Automatische Feuerung



Anorganische Salze,  
< 2.5% Kohlenstoff

von 100 mg/m<sup>3</sup> Emission  
sind nur 2.5 mg/m<sup>3</sup> Russ

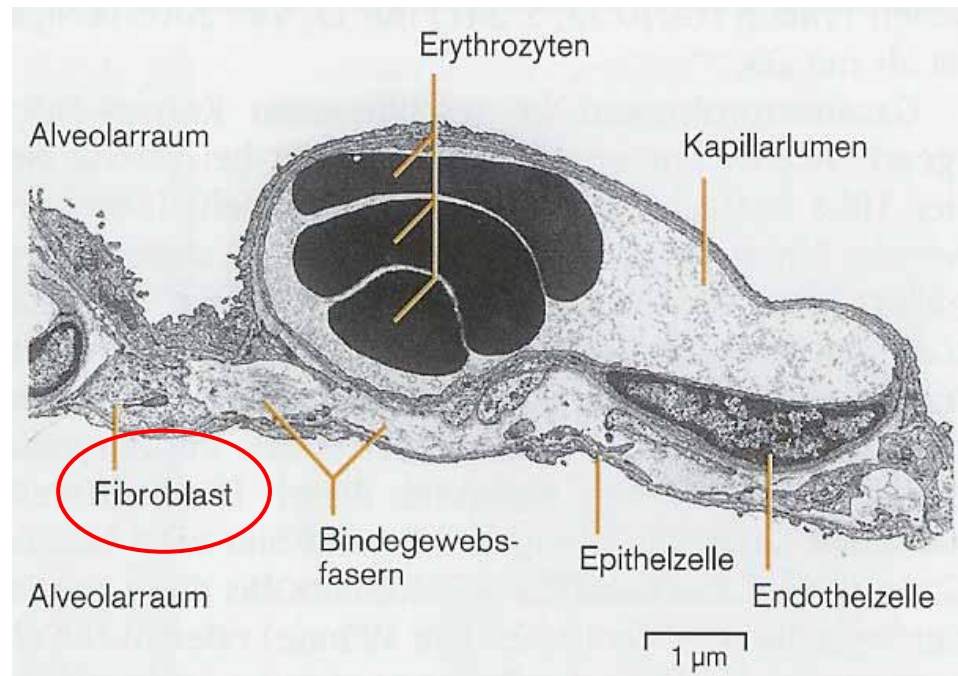
## Holzofen bei sehr schlechter Betriebsweise



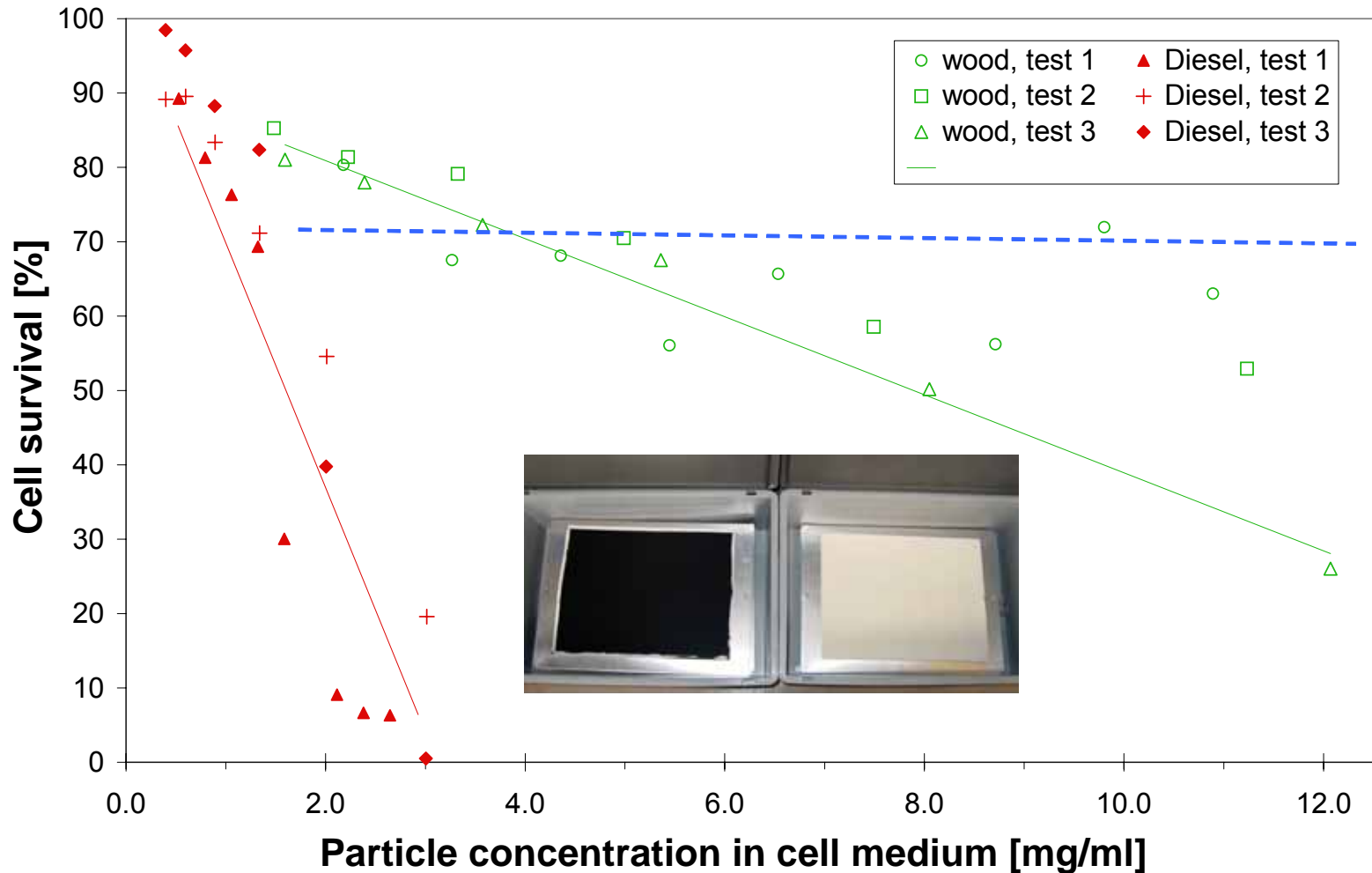
Hauptsächlich  
unverbrannter  
Kohlenstoff (Russ)

# Abschätzung der Gesundheitswirkung

- Partikel  $< 2.5\mu\text{m}$  gelangen in die unteren Atemorgane: Lunge und kleine Bronchien
- Biologische Wirksamkeit getestet mit Lungen-Fibroblastzellen des Chinesischen Hamsters

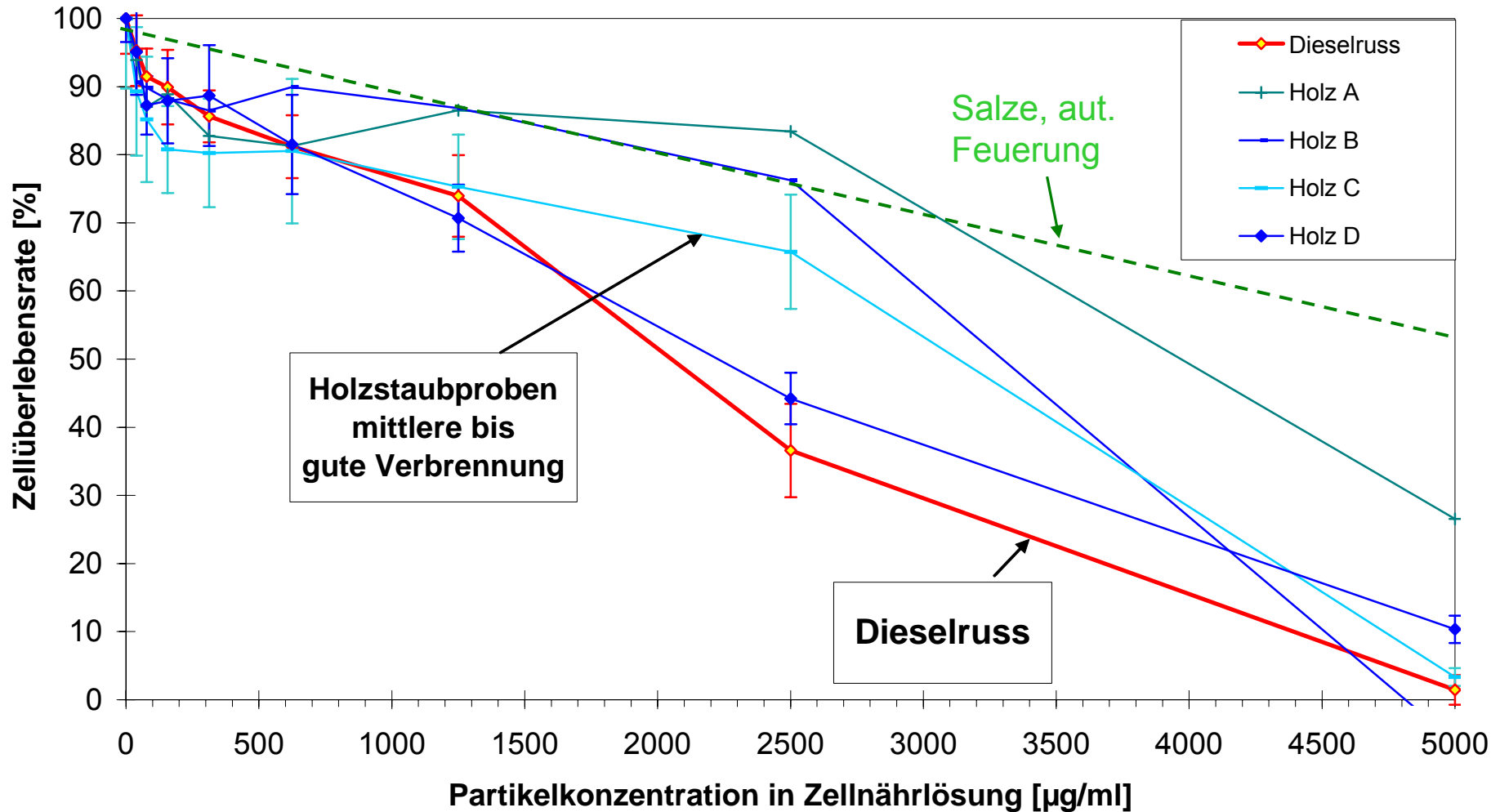


# Zellüberlebensrate bei Staub aus automatischer Holzfeuerung und Dieseleruss



# Zellüberlebensrate in Abhängigkeit der Partikelkonzentration

## Staub aus gut betriebenen Kleinf Feuerungen



# Proben von sehr schlechtem Betrieb mit Luftmangel

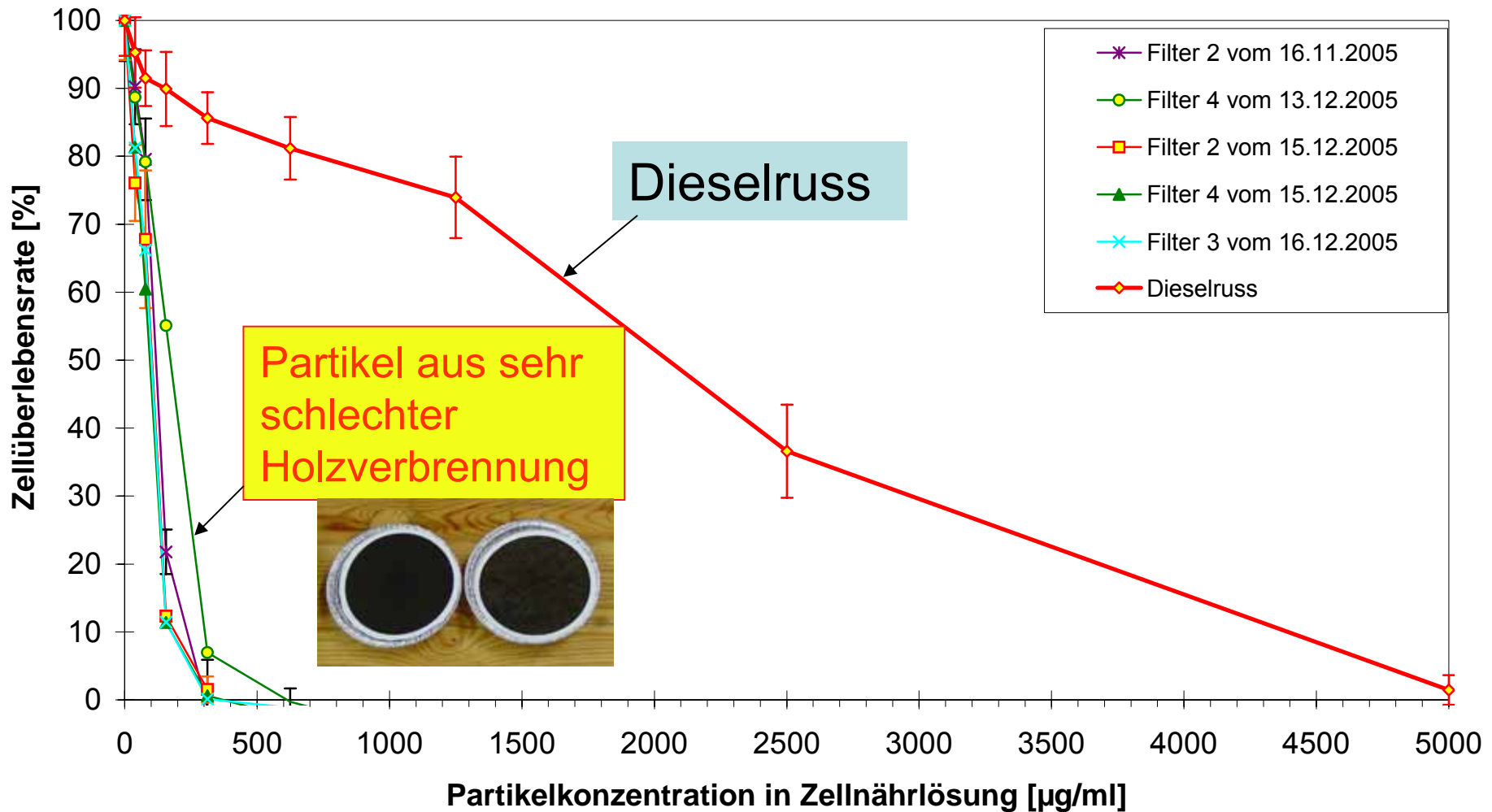
Partikelemissionen  $\gg 1 \text{ g/m}^3$

CO emissions  $\approx 1 \%$

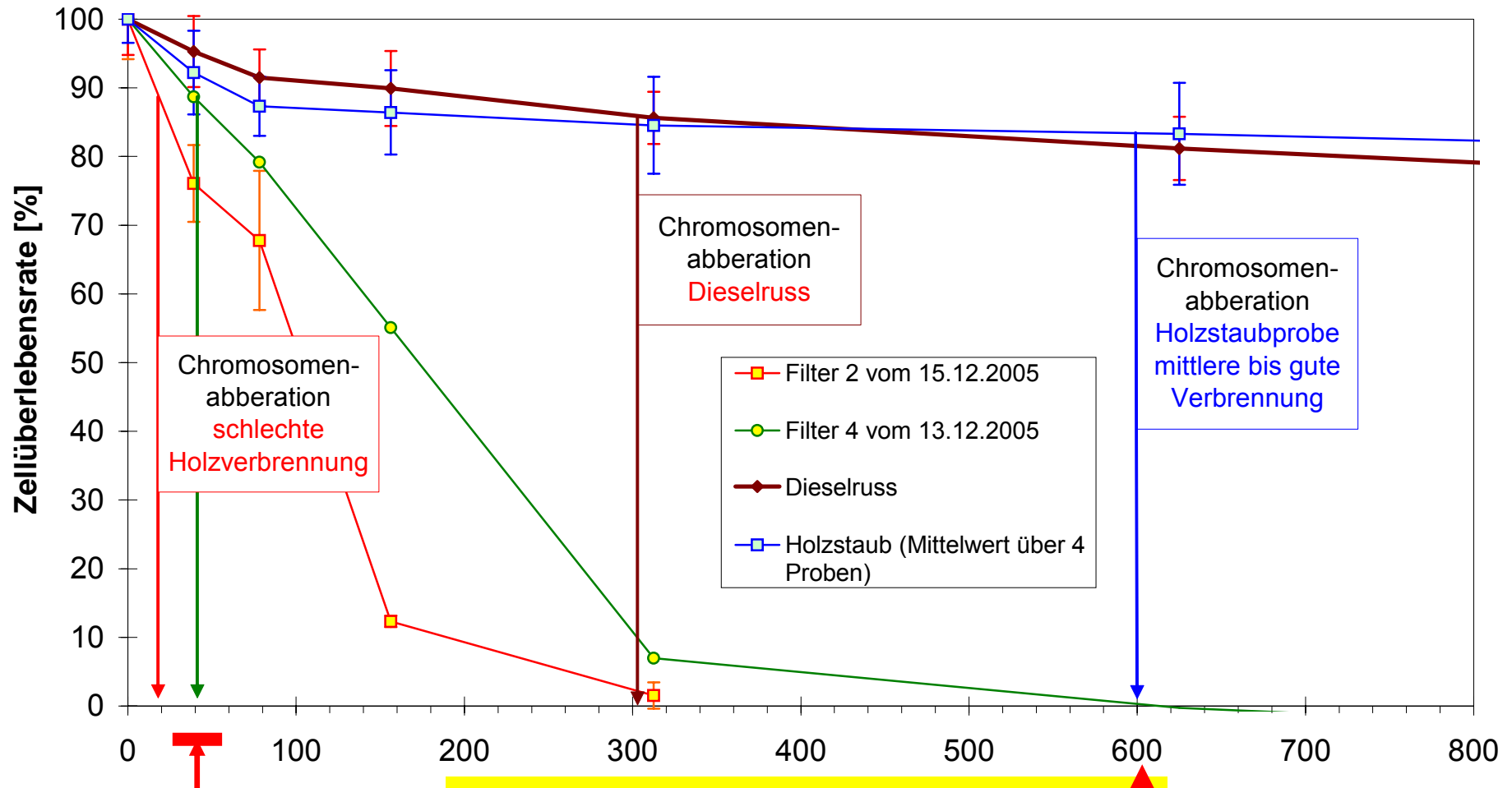


# Zellüberlebensrate in Abhängigkeit der Partikelkonzentration

## Staub aus gut betriebenen Kleinf Feuerungen



# Schwellenkonzentrationen für Chromosomendefekte (Krebsrisiko)



Feinstaubepisode  
Jan./Feb. 2006 in Schweiz

London-Smog 1952

# Inhalt polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe

PAK pro Menge Staub		Holzofen schlechter Betrieb	Diesel
Naphthalin	mg/kg	13	42
Acenaphthylen	mg/kg	129	7.1
Acenaphthen	mg/kg	17	< 3
Fluoren	mg/kg	173	< 3
Phenanthren	mg/kg	231	3.7
Anthracen	mg/kg	65	< 3
Fluoranthen	mg/kg	154	< 3
Pyren	mg/kg	170	< 3
Chrysen	mg/kg	54	< 3
Benzo(a)anthracen	mg/kg	44	< 3
Benzo(b )fluoranthen	mg/kg	30	< 3
Benzo(k)fluoranthen	mg/kg	11	< 3
Benzo(a)pyren	mg/kg	25	< 3
Indeno(1,2,3-cd)pyren	mg/kg	9	< 3
Dibenzo( a,h)anthracen	mg/kg	< 8	< 3
Benzo(g,h,i)perylen	mg/kg	< 8	< 3
<b>Summe PAK</b>	<b>mg/kg</b>	<b>1120</b>	<b>53</b>



# Schlussfolgerungen

- Salze aus automatischen Holzfeuerungen sind weniger toxisch als Dieseleruss
- **Unvollständige Verbrennung** von Holz führt zu
  - übermässigen Feinstaub-Emissionen (bis zu 100 mal mehr als korrekter Betrieb)
  - Russpartikel mit polyzyklischen Kohlenwasserstoffen
  - **Partikel sind 10mal toxischer** als Dieseleruss und kanzerogen
- **Technische Lösungen** zur zuverlässigen sauberen Verbrennung von Holz sind **vorhanden**:
  - zweistufige Verbrennung
  - Pelletfeuerungen

# Partikelemissionen von kleinen Öfen

- Sehr grosse Bandbreite der Partikelemissionen:  
15 mg/m<sup>3</sup> bis 5000 mg/m<sup>3</sup>
- Konventionelle Stückholzöfen
  - erreichen  $\leq 50 \text{ mg/m}^3$  bei Optimalbetrieb oder bei heutiger Prüfnorm
  - sehr grosser Einfluss des Betreibers auf Emissionen
  - Emissionen in der Praxis können signifikant höher liegen als bei Prüfung für heutiges Qualitätssiegel
- Stückholzöfen mit zweistufiger Verbrennung und Pelletöfen erreichen typisch  $\leq 30 \text{ mg/m}^3$  und sicher  $\leq 100 \text{ mg/m}^3$  bei geringem Betreibereinfluss
- Diese Vorteile
  - waren bisher nicht genügend bekannt,
  - werden bisher vom Gesetzgeber nicht belohnt.
  - noch kein Marktdurchbruch für zweistufige Verbrennung



# Bedeutung der Emissionsfaktoren

- Hochnebelwetterlage für 10 Tage
- Obergrenze 900 m, Wohnort 400 m ü. Meer
- Verfügbare Luftsäule 500 m Höhe
- Staub-Grenzwert von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  soll eingehalten werden
- Darf ich meinen Cheminéeofen noch betreiben?
  - Wieviel Luft braucht es zur Verdünnung?
  - Wie gross ist die benötigte Fläche bei 500 m Höhe?
  - Leistung 8 kW für 5 Stunden pro Tag
  - 14 kg Holz pro Tag



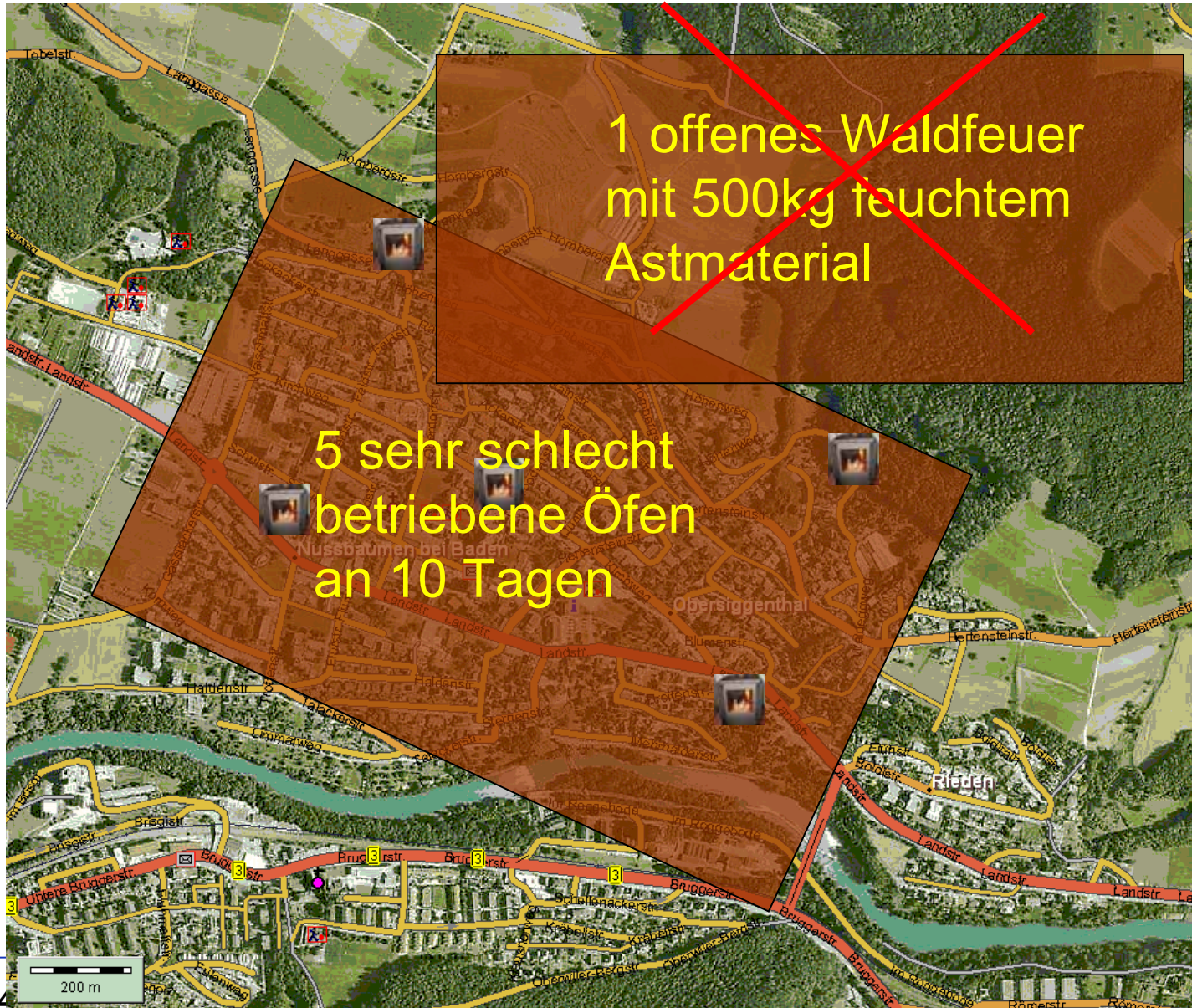
**Was können wir verbessern?**



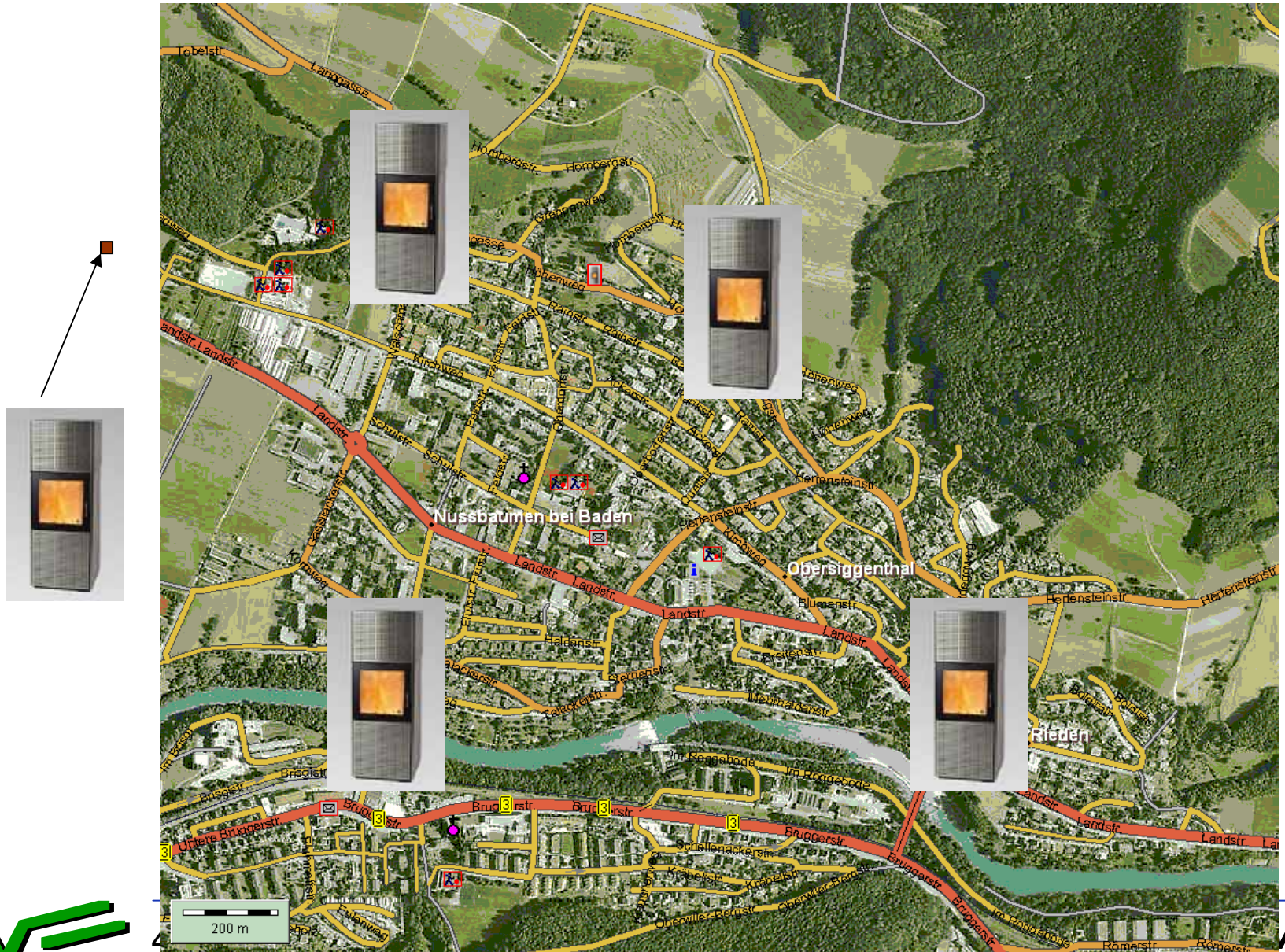




# Bedeutung der Emissionsfaktoren



# Moderne Technik führt zu tiefen Immissionen



# Empfehlungen

- Unvollständige Verbrennung immer vermeiden !
- Keine offene Verbrennung von Waldabfällen
- Korrekter Betrieb von Kleinanlagen fördern
  - Schulung der Betreiber
  - Kontrollen der Emissionen mit vereinfachten Messmethoden
- Umsetzung und Förderung der **technisch möglichen Lösungen**
  - Qualitätssiegel für einen realitätsnahen Betrieb mit zuverlässig tiefen Emissionen
  - ...





# Danksagung

- Bundesamt für Energie, Bern
- Bundesamt für Umwelt, Bern
- Direktion für Entwicklung und Zusammenarbeit, Bern (DEZA)
  
- RCC Cytotest Cell Research, Darmstadt, Deutschland
- Müller Feuerungen, Balsthal, Schweiz
- Tiba AG, Bubendorf, Schweiz
- EMPA Dübendorf, Schweiz
- Bachema Chemische Laboratorien, Schlieren, Schweiz
- Alstom Technology Center, Schweiz

# Anhang:

## Berechnung der Beispiele für die Immisionsbelastung



# Emissionsfaktoren Beispiel 1

- Prototyp-Stückholzofen oder ideal betriebener Ofen oder Pelletsfeuerung mit  $25 \text{ mg/m}^3$ 
  - Abgasmenge:  $27 \text{ m}^3/\text{h}$
  - 5 h Betrieb/Tag  $\rightarrow 135 \text{ m}^3/\text{Tag}$
  - Verdünnungsluftbedarf:  $68\,000 \text{ m}^3/\text{Tag}$
  - Fläche  $135 \text{ m}^2$  (mal 500 m Höhe) pro Tag benötigt
  - Flächenbedarf nach 10 Tagen:  **$1\,350 \text{ m}^2$**



## Emissionsfaktoren Beispiel 2

- In einer Gemeinde mit 5000 Einwohnern gibt es 5 Betreiber mit sehr hohen Staub-Emissionen von 5 000 mg/m<sup>3</sup>
  - Abgasmenge in 10 Tagen: 6 800 m<sup>3</sup>
  - Verdünnungsluftbedarf: 680 000 000 m<sup>3</sup>
  - benötigte Fläche 1 360 000 m<sup>2</sup> (1.4 km<sup>2</sup>)
  - Vergleich: Ortskern hat 1.5 km<sup>2</sup>



## Emissionsfaktoren Beispiel 3

- Waldarbeiter verbrennen 500 kg feuchtes Astmaterial unter starker Rauchentwicklung mit Staub-Emissionen von 5 000 mg/m<sup>3</sup>
  - Abgasmenge an 1 Tag: 5 000 m<sup>3</sup>
  - Verdünnungsluftbedarf: 500 Millionen m<sup>3</sup>
  - benötigte Fläche 1 000 000 m<sup>2</sup> (1 km<sup>2</sup>)

