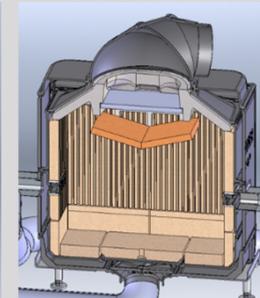
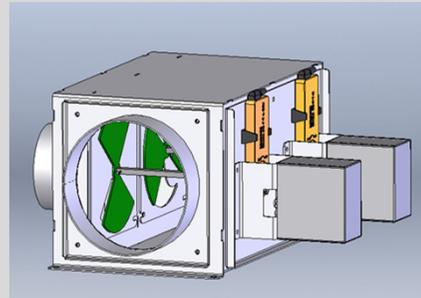


# Techn. Möglichkeiten zur Emissionsminderung nach dem neuesten Stand der Forschung

## Restholz als Wärmequelle

**Heinz Kohler**, Binayak Ojha, Xin Zhang

Inst. für Sensor- and Informationssysteme (ISIS),  
Hochschule Karlsruhe  
Moltkestr. 30, 76133 KARLSRUHE  
Kontakt: [heinz.kohler@h-ka.de](mailto:heinz.kohler@h-ka.de)



*World of Fireplaces 2023, 17. -19. April 2023, Messe Leipzig*

## Verbundprojekte **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe** [SenSTEF 22037214], [UVV 22038718]

---

SenSTEF: Sensorgestützte Verbrennungsluftregelung zur Minimierung der Emissionen von Biomasseheizkesseln

UVV: Emissionsminderungsstrategien zur umweltverträglichen Verbrennung auf Basis von aktuellen Forschungsergebnissen



- Deutsches Biomasseforschungszentrum Leipzig (Biomasseverbrennung, katalytische Abgasreinigung, *Koordination UVV*)



- LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH, Walldorf (Gassensorik)



- Lehrstuhl für Funktionsmaterialien, Universität Bayreuth (Gassensorik)



- Brunner GmbH, Eggenfelden (Feuerstätten, Feldtests)



**BOSCH**

- Robert Bosch GmbH, Karlsruhe (Sensorik, Luftfilter)



**ETE**

EmTechEngineering GmbH

- ETE EmTechEngineering GmbH, Leipzig (Katalysatoren)

**SICK**

Sensor Intelligence.

- Sick AG, Waldkirch (Sensorik, Messtechnik, *Koordination SenSTEF*)



Biomasse-Heizanlagen

- A. P. Bioenergietechnik, Hirschau (Biomasse-Heizkessel)



- Inst. für Sensor- und Informationssysteme (ISIS), HS Karlsruhe (Sensorik, Abgasanalytik, Verbrennungsluftregelung Scheitholz)

**+IKA**

Emissionsminderung der Scheitholzverbrennung... „World of Fireplaces“, 17.-19. 4. 23, Leipzig

Heinz Kohler, Inst. für Sensor- und Informationssysteme (ISIS), Karlsruhe



---

Situation Scheitholzverbrennung:

- **Wärmegewinnung aus Restholz ist nachhaltig!**
- **Emissionen aus Scheitholz-Feuerstätten erheblich zu hoch, stellen Gefahr für Mensch und Umwelt dar!**

Aufgabe:

- **Emissionen durch intelligente Verbrennungsluftregelung und Abgas-Behandlung minimieren.**
- **Verbrennungsqualität/Emissionszustand kontinuierlich überprüfen (Monitoring).**

## Situation

Privathaushalte in Deutschland:

- 12 Million Scheitholz befeuerte Einzelraumfeuerstätten
- 900K Scheitholz befeuerte Zentralheizungen

Aktuell gültige Emissionsobergrenzen (1. BImSchV):

Installation type	CO / mg/m <sup>3</sup>	PM (total) / mg/m <sup>3</sup>
<b>Wood-log fueled single room fireplaces</b>	1250	40
Wood-log fueled central heaters	400	20
Wood-pellet fueled fireplaces with/without water cooling	250 / 250	30 /20
Wood chip fueled central heaters (4kW<NP<500kW)	400	20

Typische Emissionen von Heizölbrennern: ca. 50mg/m<sup>3</sup> CO

# Sensorik: Neue techn. Möglichkeiten zur Reduktion der Emissionen im Abgas

ISIS-Ansatz:

- **Beschreibung des Holz-Verbrennungsprozesses anhand Abgasanalyse**

In-situ – Sensoren:

- **Temperatur** (Thermoelement)



- **Restsauerstoffkonzentration (ROC)**



- **Neu! CO/HC-Gehalt.**



- **Neuartige Verbrennungsluftregelung** → Optimierung Verbrennungsprozess
- Abgas-Behandlung: **Oxidationskatalysator + E-Partikelabscheider**

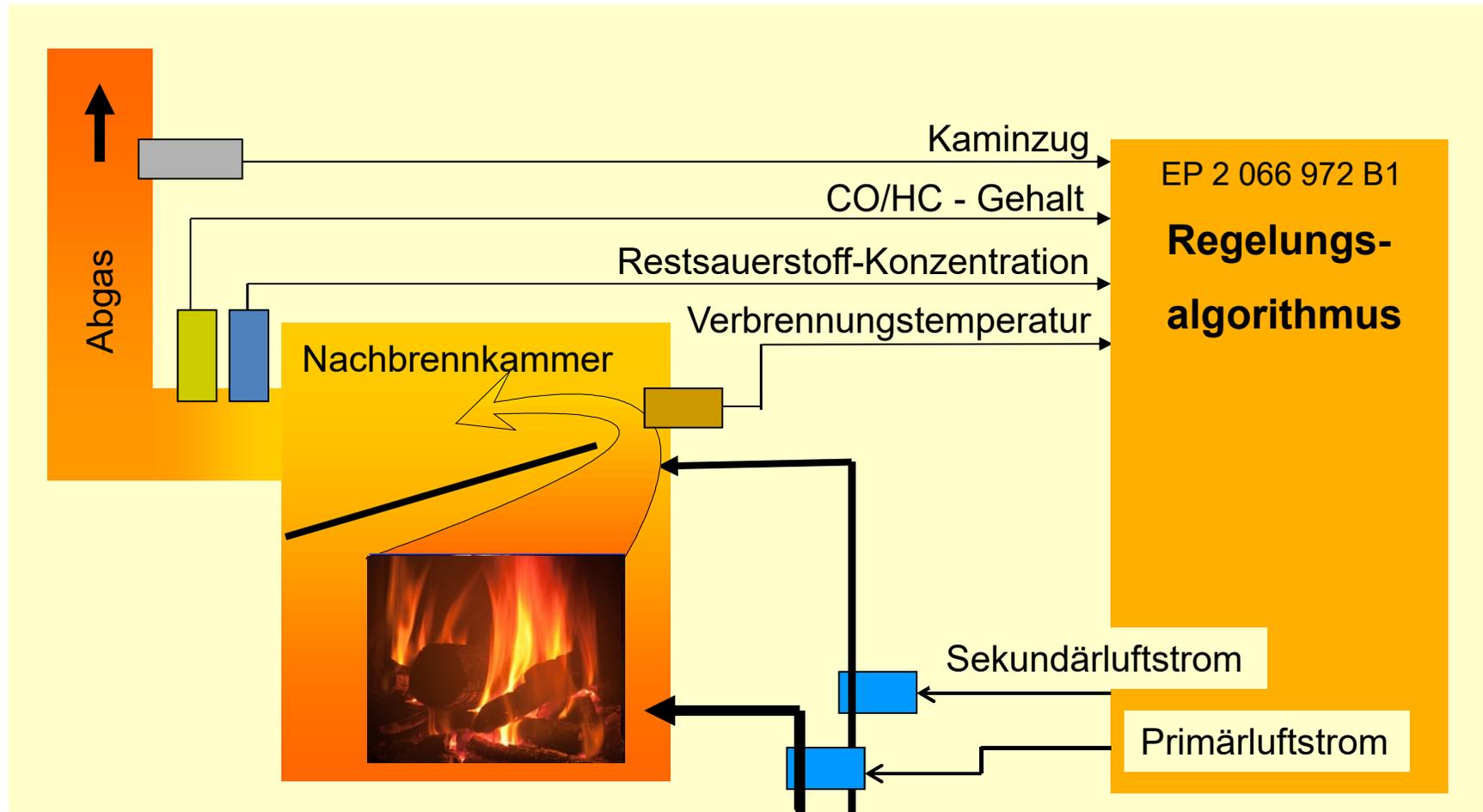
Sensors and Actuators B: Chemical 137 (2009) 32-41  
Extensive reduction of toxic gas emissions of firewood-fueled low power fireplaces by improved in situ gas sensorics and catalytic treatment of exhaust gas<sup>☆</sup>

P. Butschbach<sup>a</sup>, F. Hammer<sup>b</sup>, H. Kohler<sup>a,\*</sup>, A. Potreck<sup>a</sup>, T. Trautmann<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Inst. for Sensorics and Information Systems (ISIS), Karlsruhe University of Applied Sciences, Moltkestr. 30, D-76133 Karlsruhe, Germany  
<sup>b</sup> ESCUBE GmbH & Co. KG, Nobelstr. 15, D-70569 Stuttgart-Vaihingen, Germany

Heinz Kohler, Andreas Potreck, Thomas Trautmann; Verfahren und Vorrichtung zur Verbrennung von Brennstoffen; EP 2 066 972 B1 (2007)

# Reduktion der Emissionen von Scheitholz-Feuerungen – das Konzept



**High-temperature CO / HC gas sensors to optimize firewood combustion in low-power fireplaces**

Binayak Ojha, Navas Illyaskutty, Jens Knoblauch, Muthu Raman Balachandran, and Heinz Kohler  
 Institute for Sensor and Information Systems (ISIS), Karlsruhe University of Applied Sciences,  
 76133 Karlsruhe, Germany

**In situ high-temperature gas sensors: continuous monitoring of the combustion quality of different wood combustion systems and optimization of combustion process**

Heinz Kohler<sup>1</sup>, Binayak Ojha<sup>1</sup>, Navas Illyaskutty<sup>1</sup>, Ingo Hartmann<sup>2</sup>, Christian Thiel<sup>2</sup>,  
 Konrad Eisinger<sup>2</sup>, and Markus Dambacher<sup>3</sup>

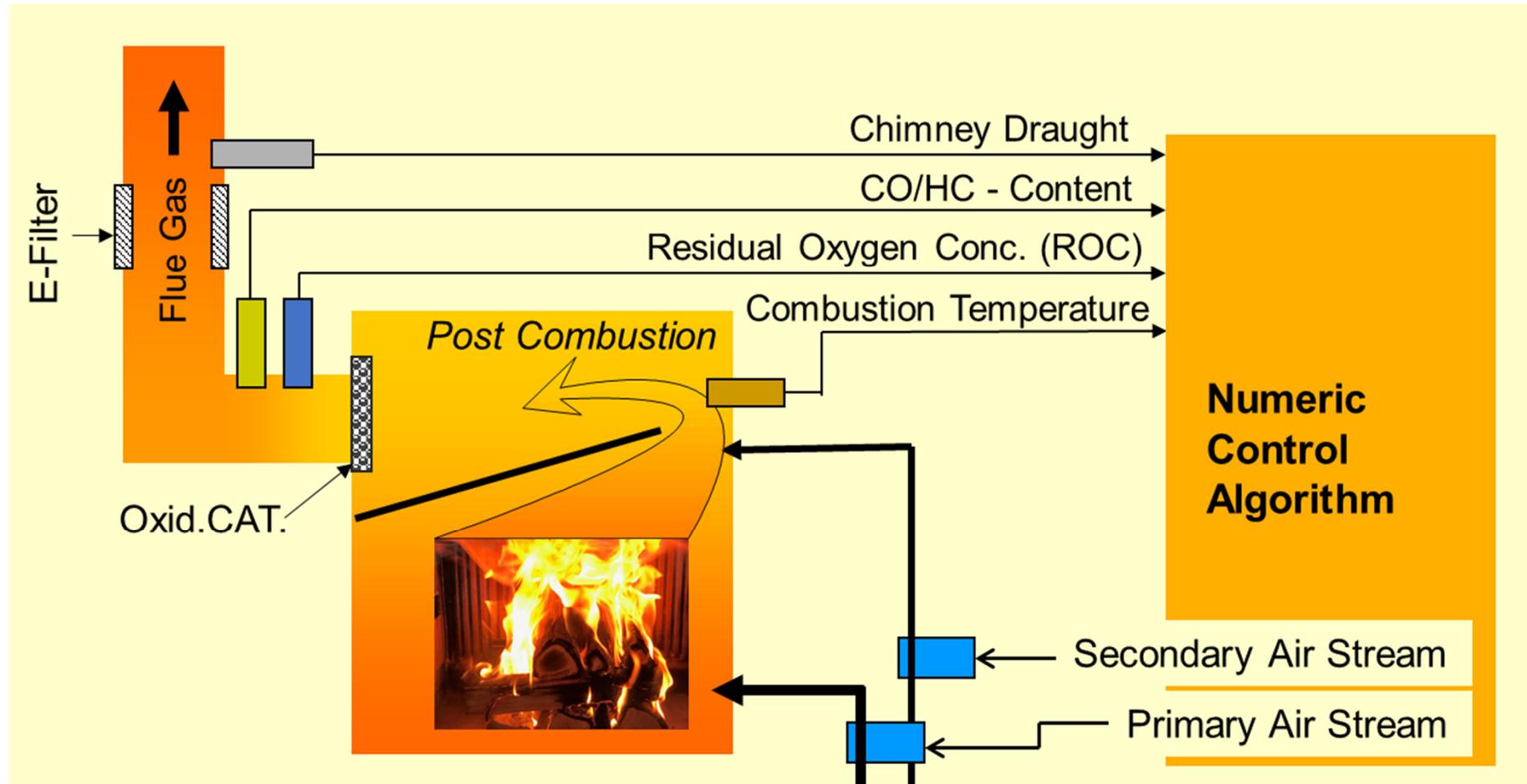


**Emissionsminderung der Scheitholzverbrennung... „World of Fireplaces“, 17.-19. 4. 23, Leipzig**

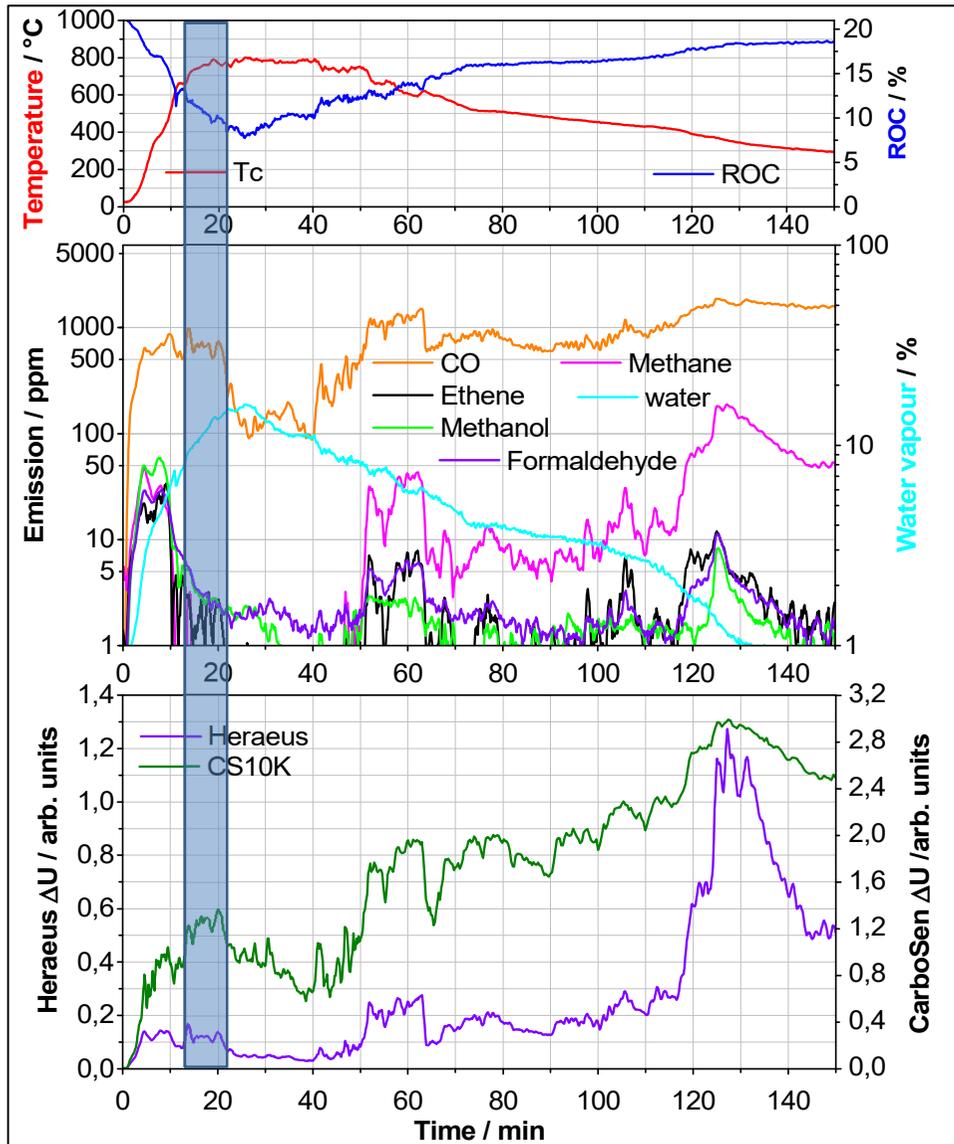
Heinz Kohler, Inst. für Sensor- und Informationssysteme (ISIS), Karlsruhe



# Reduktion der Emissionen von Scheitholz-Feuerungen – Realisierung



# SenSTEF: Why CO/HC – monitoring ?



SF10SK, Brunner GmbH, Eggenfelden  
 Sensors for Tc, ROC, CO/HC, combustion air stream  
**Referencing: HT-FTIR gas analysis system**

**No strong correlation between  
 Combustion Temp. – ROC – CO/HC !**



Sensors for  
**Combustion Temperature**  
**Residual Oxygen Concentration (ROC)**  
**CO/HC-Content**



Emissionsminderung der Scheitholzverbrennung... „World of Fireplaces“, 17.-19. 4. 23, Leipzig

Heinz Kohler, Inst. für Sensor- und Informationssysteme (ISIS), Karlsruhe



# Sensoren zur in-situ Abgas-Analyse

- **Verbrennungstemperatur:** Thermoelement
- **Restsauerstoffkonzentration im Abgas (ROC):** Hochtemperatur-Sauerstoffsensor (Pt/YSZ/Pt - elektrochem. Zelle, Bosch LSU 4.9)
- **CO/HC – Gehalt im Abgas**



**Bisher nicht verfügbar!!!**

## CO/HC-Sensorik



Xin Zhang, *Electrochemical and structural investigations of a layered Au,Pt-YSZ Mixed Potential Gas Sensing Electrode*, Dissertation TU Dresden (2018).

Zhang, X., Kohler H., Guth U.; *Sensors and Actuators B: Chemical* 252 (2017): 554-560

Sensors & Actuators: B. Chemical 342 (2021) 130065



Contents lists available at ScienceDirect  
Sensors and Actuators: B. Chemical

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/snb](http://www.elsevier.com/locate/snb)



Stability improvement of layered Au,Pt-YSZ mixed-potential gas sensing electrodes by cathodic polarization: Studies by steady state and dynamic electrochemical methods

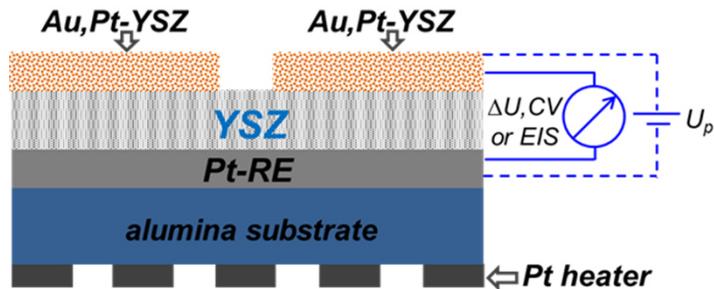


X. Zhang<sup>a,\*</sup>, H. Kohler<sup>a,\*</sup>, M. Schwotzer<sup>b</sup>, U. Guth<sup>c</sup>

# Sensitivitätseigenschaften des Au,Pt-YSZ – CO/HC-Gassensors

Neu!

Weiterentwicklung des Mischpotential Au,Pt-YSZ – CO/HC Abgassensors



**Sensoren altern!**

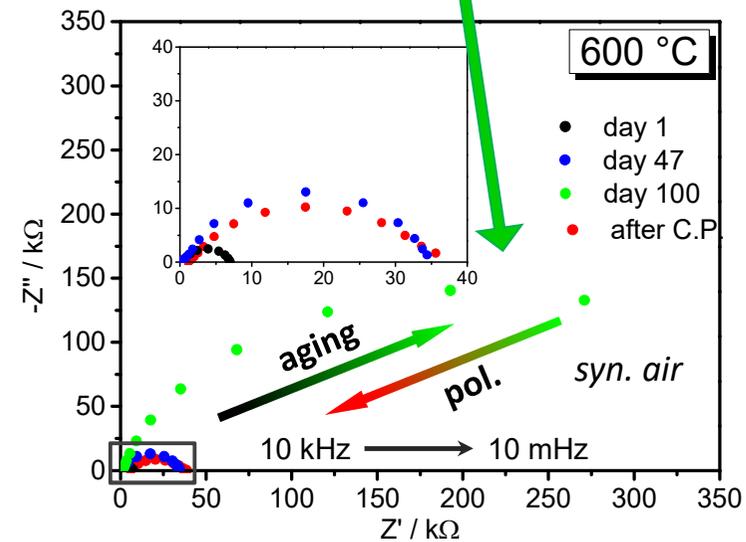
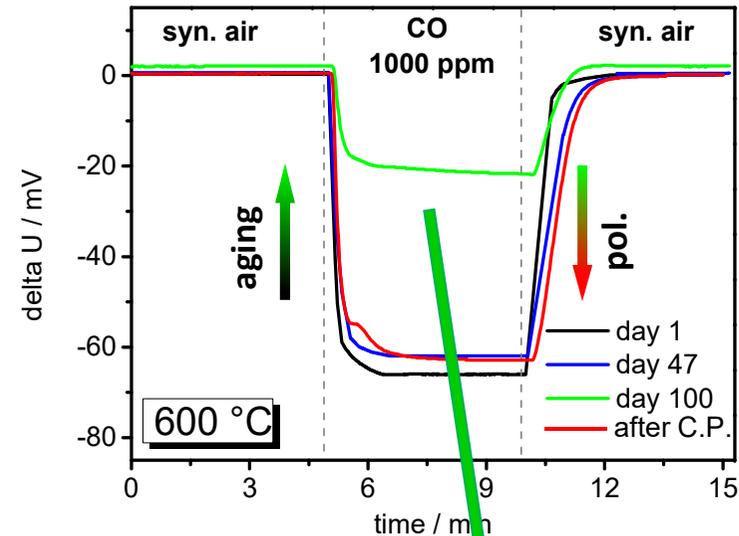
**Strenge Korrelation**

Elektrochemische Impedanz (EIS) ↔ Gas-Sensitivität  
(Diss. Xin Zhang, HS Karlsruhe, TU Dresden)

**Regeneration der Sensoren**

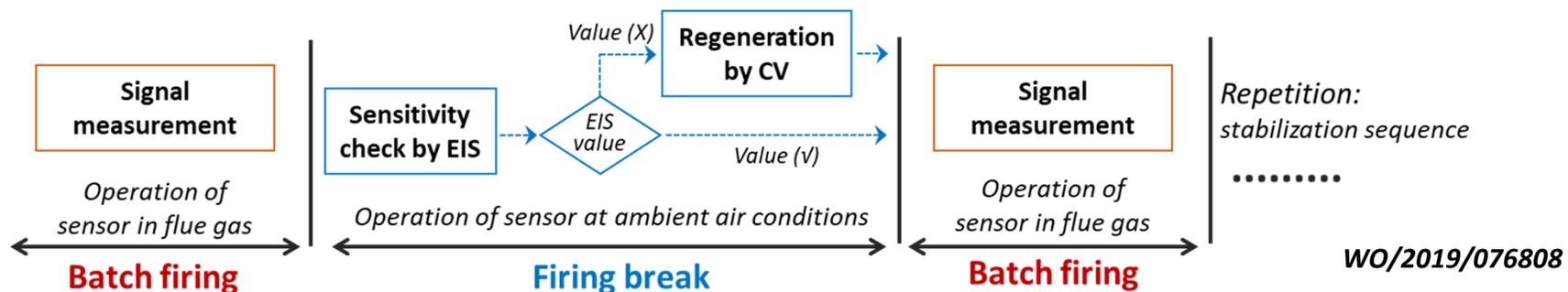
kathodische Polarisation an Umgebungsluft im Abgasrohr (Feuerungspausen)

*H. Kohler, X. Zhang, B. Ojha, U. Guth; Method for operating a mixed potential sensor and method for controlling a combustion system with said sensor, WO 2019 076808 A1*



# Sensitivitätseigenschaften des Au,Pt-YSZ – CO/HC-Gassensors

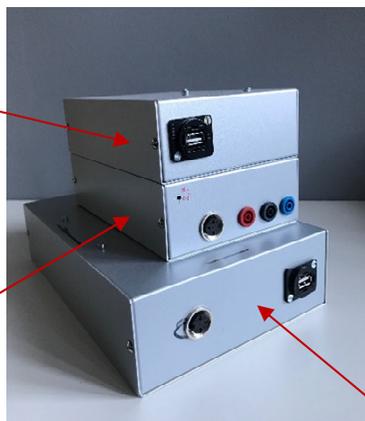
## Sensitivitätsüberwachung und – regenerierung im Abgasrohr in Feuerungspausen



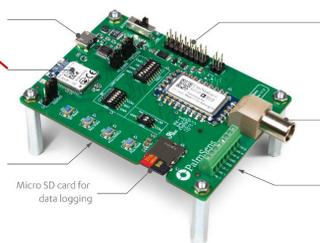
Mega, Arduino AG



Heater control electronics with digital potentiometer



Hardware for on-site sensor regeneration

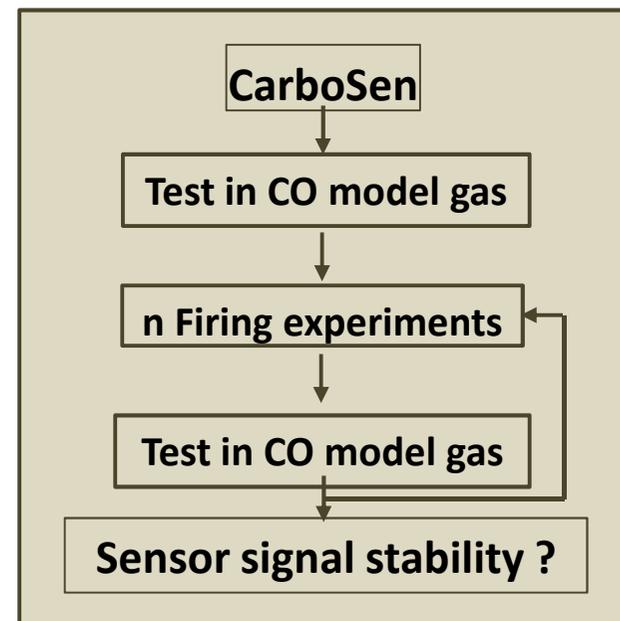
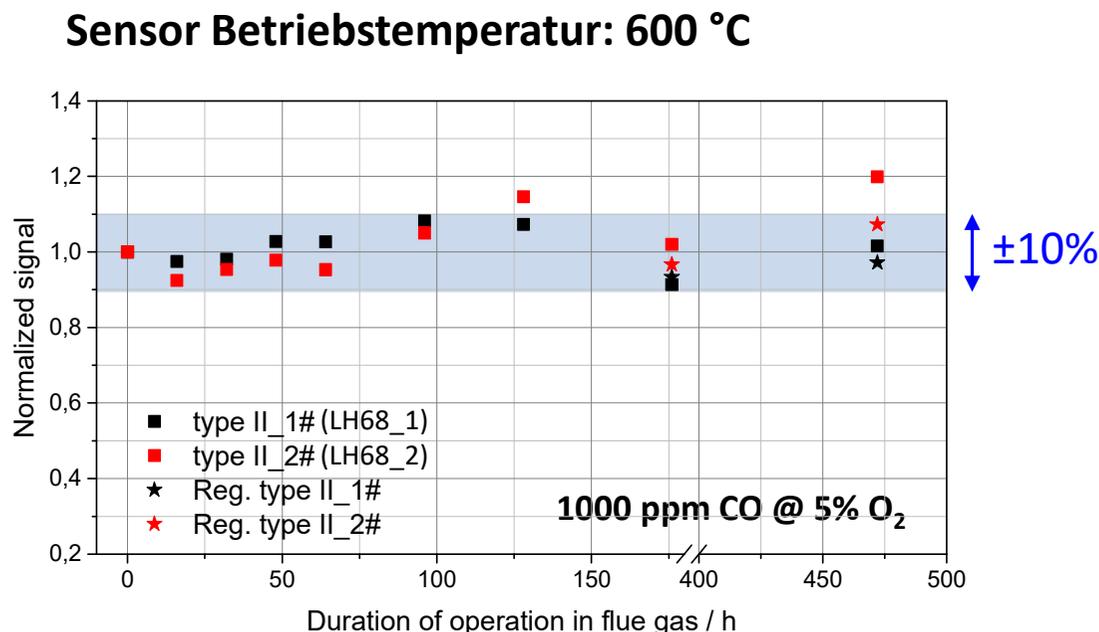


Micro SD card for data logging



Elec.chem. working interface (Emstat Pico Development Kit, Palmsens)

# Sensitivitätseigenschaften des Au,Pt-YSZ – CO/HC-Gassensors



**Stabile Signale über 472 Betriebsstunden im heißen Abgas (~ 120 Feuerungen) !**

**Langzeitstabiler CO/HC-Gassensor (Au,Pt/YSZ/Pt elektrochem Zelle, Lamtec GmbH) jetzt verfügbar!**

# Entwicklung eines neuartigen, automatisierten Feuerungssystems

---

Aufgabe:

- **Richtige Dosierung der Verbrennungsluftströme** (Primär- und Sekundärluft) zu jedem Zeitpunkt eines Scheitholz-Chargenabbrandes
  - unabhängig vom Kaminzug (Witterungseinfluss)
- **Darstellung der aktuellen Verbrennungsqualität (CO/HC-Gehalt im Abgas)**

**Ziel:** Minimierung der Emissionen

## Techn. Realisierung

- Abgassensorik: KAT-Temp., ROC (Bosch), CO/HC (Lamtec (Walldorf))
- automatische Verbrennungsluftregelung (ISIS)
- Oxidationskatalyse (EmTechEngineering GmbH, Leipzig)
- E-Feinstaubabscheider (Öko Tube Inside, OekoSolve AG, Mels (CH))

# Entwicklung eines neuartigen, automatisierten Feuerungssystems

Weiterentwicklung aus Vorprojekt SenSTEF (Projektträger: FNR)

**HKD7, Sensor-Tests und Software-Entwicklung am ISIS**

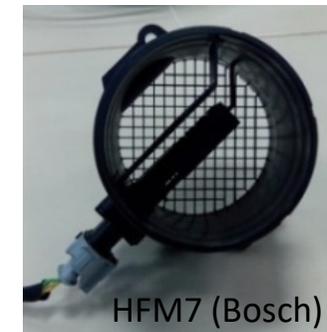
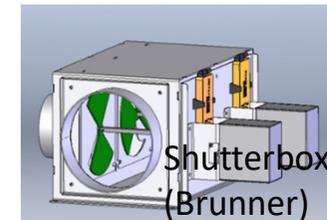
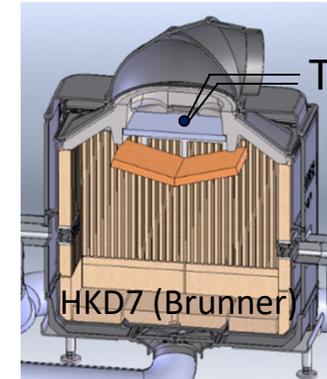


FTIR Abgasanalyse-  
system  
(Gasmet, Ansyco GmbH, Karlsruhe)  
Kaminzug: geregelter  
Abgasventilator (ca. 15Pa)

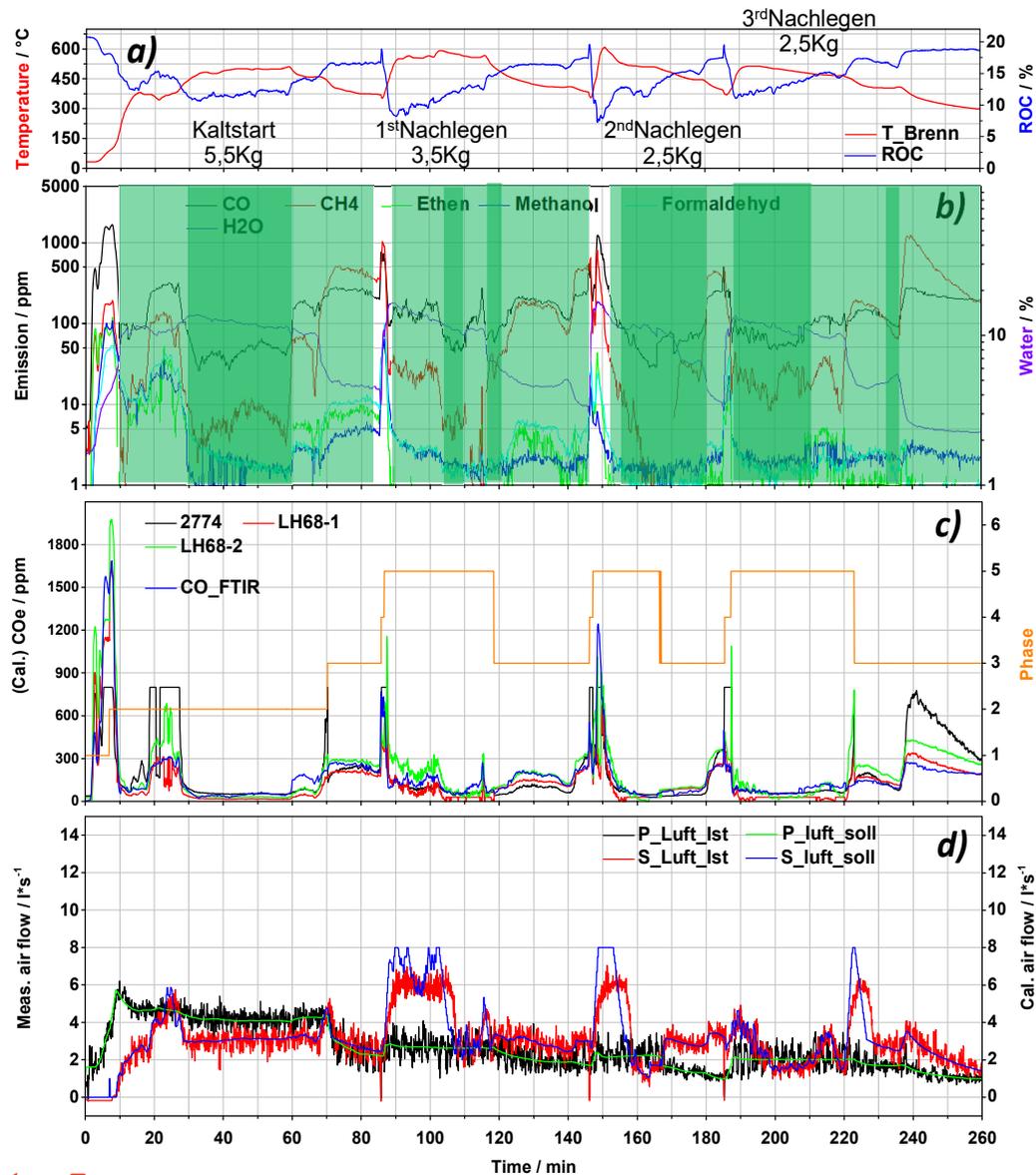
**HKD7, Feldtests 4 Mon. Brunner GmbH, Eggenfelden**



CO-Abgasanalyse  
(Uras 14, ABB Group)  
Feinstaub E-Abscheider  
Kaminzug: Naturzug (4-15Pa)



# Ergebnis Verbrennungsluftregelung am ISIS mit CAT1#



## Ziele

- Parametrisierung der Verbrennungsluft-Regelungsalgorithmen
- Monitoring der Abgasqualität
- Stabilität der Gassensoren

Holzart: Buche

30-300ppm  
 Ca. 40-400 mg/m<sup>3</sup>  
 Rohemissionen CO

≤125 mg/m<sup>3</sup> CO  
 Kein Bezug auf 13% ROC !

Vgl. 1. BImSchV: 1250 mg/m<sup>3</sup>

# Scheitholz-Abbrand-Experimente im Feldtest über vier Monate mit CAT3#

Holzart: Buche

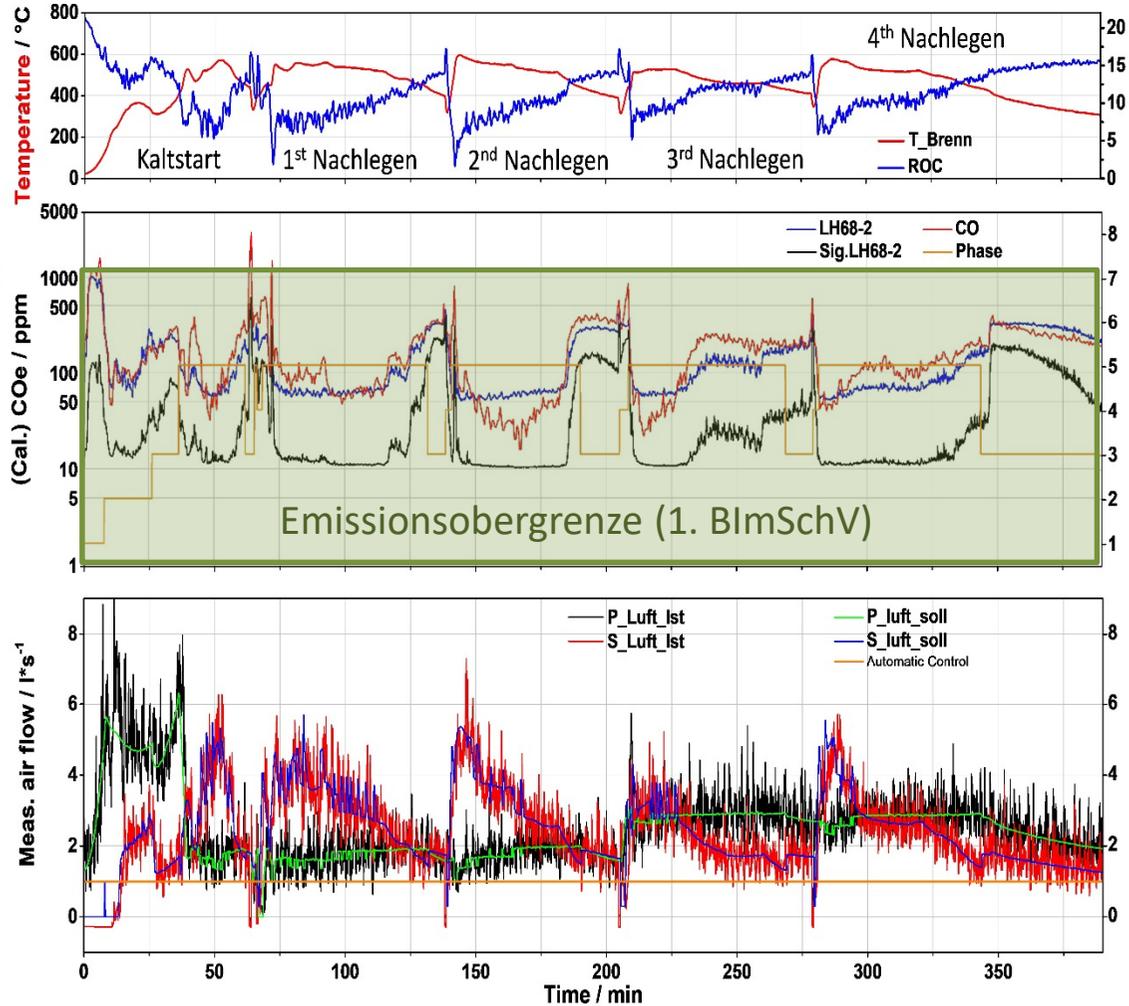
Kaltstart: 5,6 Kg, 7 Stück



1<sup>st</sup> Nachlegen: 3,5 Kg, 3 Stück



2<sup>nd</sup> Nachlegen: 3,5 Kg, 3 Stück



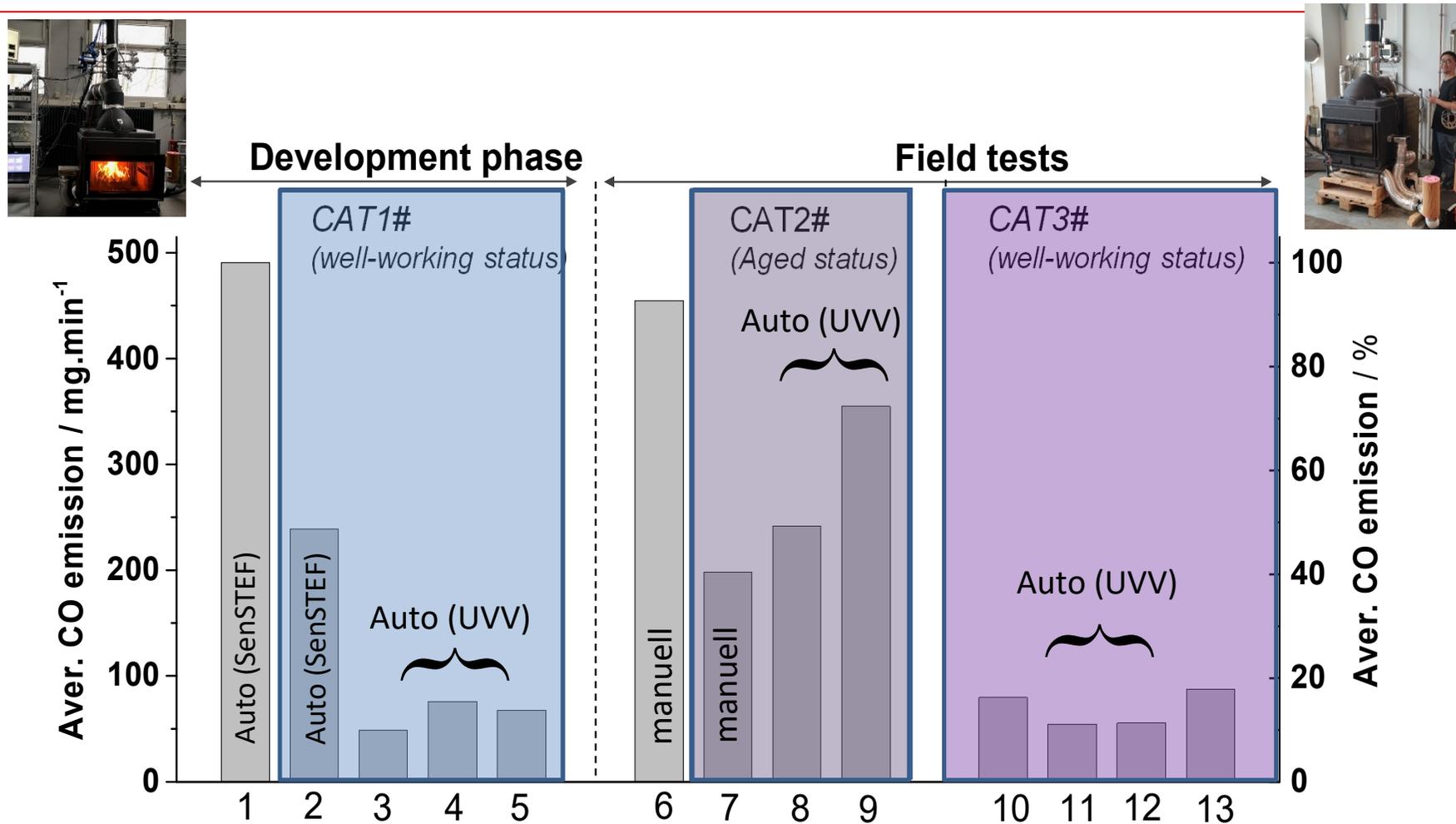
3<sup>rd</sup> Nachlegen: 3,5 Kg, 3 Stück



4<sup>th</sup> Nachlegen: 3,6 Kg, 3 Stück



# Vergleich mittlere relative CO-Gesamtemissionen



Über Gesamtabbrand (ZündPh - HTPH - NachlegePh – AusbrandPh) gemittelt!

Brennstoff: Buchen-Scheitholz

$$COem = (Flow(p) + Flow(s)) \cdot c(CO) / mg/min; Flow / l/min$$

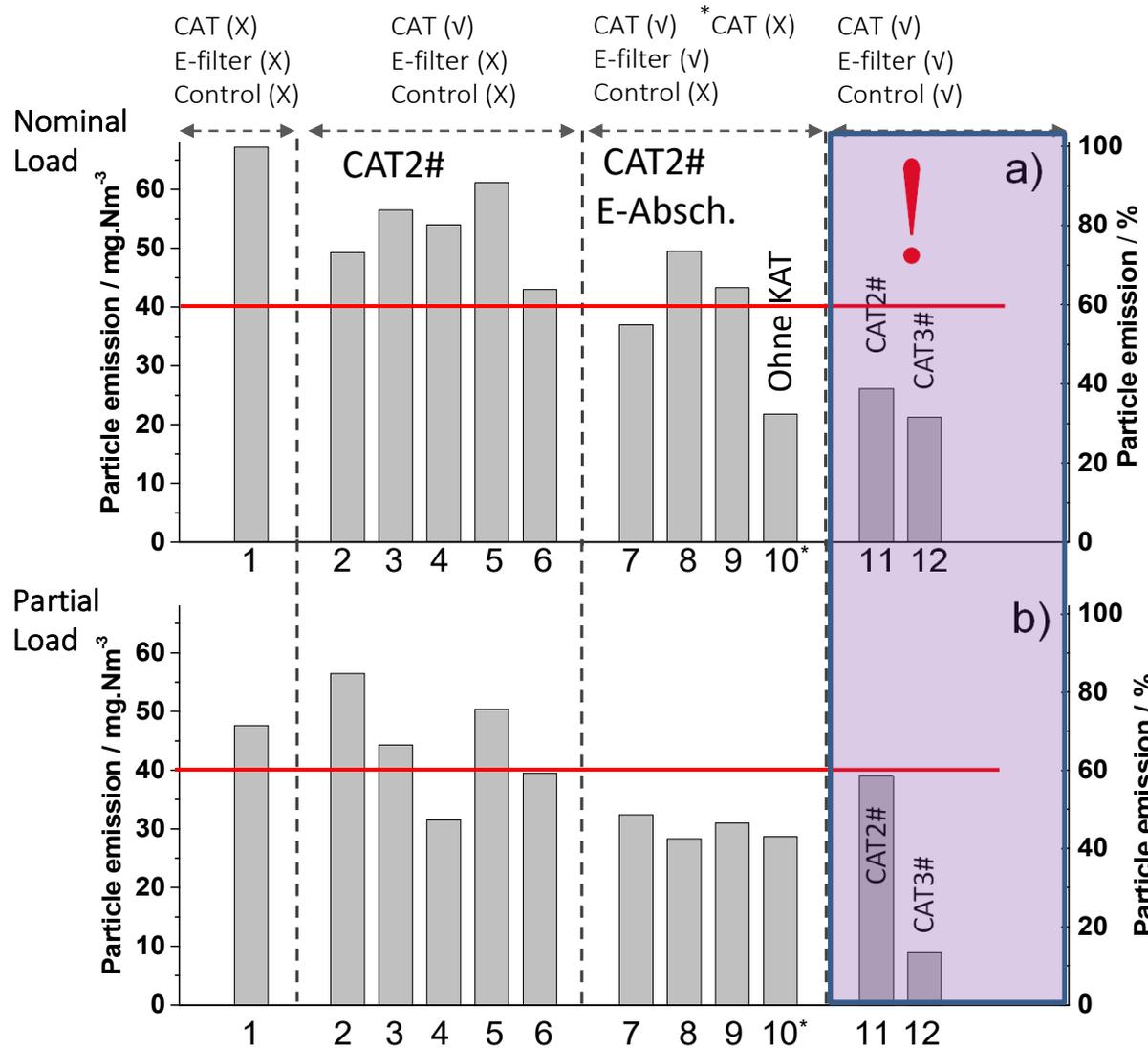


Emissionsminderung der Scheitholzverbrennung... „World of Fireplaces“, 17.-19. 4. 23, Leipzig

Heinz Kohler, Inst. für Sensor- und Informationssysteme (ISIS), Karlsruhe



# Vergleich der Partikel-Emissionen unter versch. Betriebsbedingungen



## E-Abscheider

Öko Tube Inside Fa.  
Ökosolve, Plons (CH)

## Volllast:

Kaltstart: 6kg  
Nachlegen: 6kg

## Nennlast:

Kaltstart 6kg  
Nachlegen: 3,5kg

## Partikelmessungen über 30 min

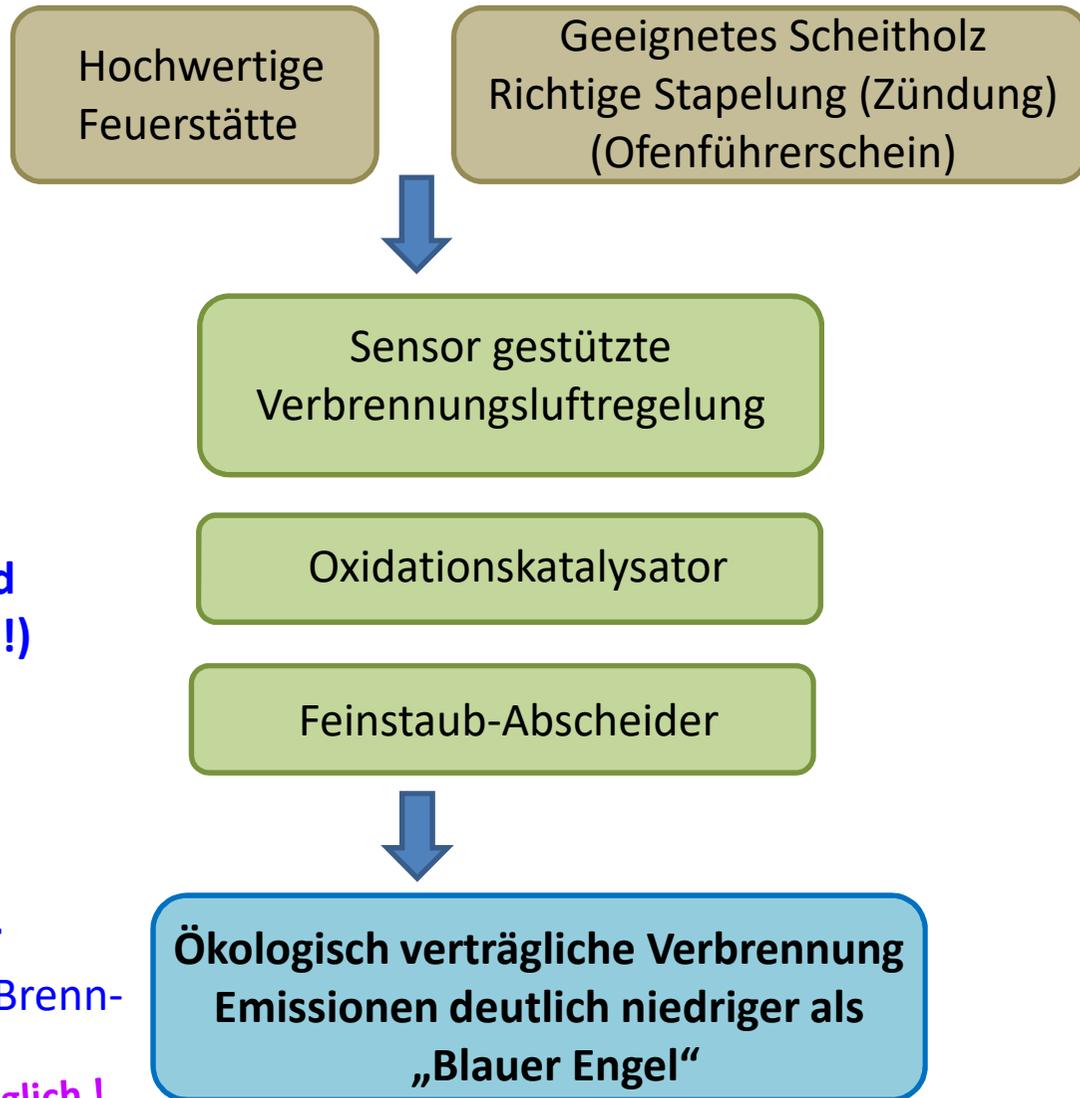
Start: 3min nach  
dem Nachlegen

**1. BImSchV: 40mg.Nm<sup>-3</sup>**

# Fazit und Schlussbemerkungen

## Roadmap zur Minimierung der Emissionen

- Absenkung gasförmige Emissionen (CO) um bis zu 90% und Partikelemissionen um >80% (!)
- Zukunft!  
**Verbrennungsqualität-Monitor**  
(Feuerungsverhalten, mindere Brennholzqualität, Alterung KAT).  
*mit CO/HC-Sensor möglich !*



## Fazit und Schlussbemerkungen

---

### Neue techn. Möglichkeiten zur Minimierung der Emissionen ...

- Seit März 2022: Alle wiss. –techn. Voraussetzungen zur Markteinführung bekannt!
- Alle Bauteile auf dem Markt verfügbar!
- **Ablehnung der Nutzung von Restholz in Scheitholzfeuerstätten kleiner Leistung (Privathaushalte) wg. zu hoher Emissionen zukünftig unbegründet!**
- **Aktuell zu wenig Anreiz für Markteinführung! Rahmenbedingungen seitens des Gesetzgebers (1. BImSchV)**

***Einführung jetzt starten !!!***



**Open access!  
(In Kürze)**

Article

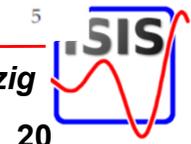
**Extensive Emissions Reduction of Firewood-fueled Low Power Fireplaces: Advanced Combustion Airstream Control System with Long-Term Stable CO/HC Sensor and Oxidation Catalyst**

Xin Zhang <sup>1</sup>, Binayak Ojha <sup>1</sup>, Hermann Bichlmaier <sup>2</sup> Ingo Hartmann <sup>3</sup> and Heinz Kohler <sup>1,\*</sup>

**+IKA**

**Emissionsminderung der Scheitholzverbrennung... „World of Fireplaces“, 17.-19. 4. 23, Leipzig**

Heinz Kohler, Inst. für Sensor- und Informationssysteme (ISIS), Karlsruhe



Förderprojekte der **Fachagentur Nachhaltende Rohstoffe**  
[SenSTEF 22037214], [UVV 22038718]

A close-up photograph of a person's hand holding a small, glowing green globe. The globe has a faint map of the world on it. The words 'Thank you!' are written across the globe in a white, cursive script.

*Thank you!*

**Kontakt:**

Prof. (em.) Dr. rer. nat. Heinz Kohler  
Inst. für Sensor- and Informationssysteme  
Hochschule Karlsruhe  
Moltkestr. 30  
D-76133 KARLSRUHE  
E-Mail: [heinz.kohler@h-ka.de](mailto:heinz.kohler@h-ka.de)  
Tel.: 07223-830408 (home-office)

## Kostenübersicht Emissions-Minderungsmaßnahmen Scheitholzfeuerung (Schätzung) (UVV-Verbundprojekt, Stand Nov. 2022)

Funktionseinheit	Preis	Hersteller/Info
Steuerungselektronik mit hochwertigem Display incl. Shutterbox mit Stellmotoren	1.500.-€	Brunner GmbH, Eggenfelden, Hr. Bichlmaier
Oxidationskatalysator	200.-€	ETE EmTechEngineering GmbH, Hr. Hoferecht
E-Abscheider, Ökosolve (CH)	1.600€	Hr. Bichlmaier
2 Luftmassen-Strömungssensoren λ-Sonde LSU 4.9 2 Luftfilter	160.-€ 150.-€ 40.-€	Bosch GmbH, Hr. Berger
HT- CO/HC-Sensor incl. Betriebselektronik	160.-€	Lamtec GmbH Dr. Hammer
Differenzdrucksensor (Kaminzug)	190.-€	Fühlersysteme eNET GmbH, DMU/A-U/V1
<b>Kostensumme</b>	<b>4000.-</b>	<b>Intelligente Verbrennungsluftregelung und Emissions-Mind.-Maßnahmen (Schätzung)</b>

Zusatzkosten bezogen auf handbetriebene Feuerstätte (5000 Einh./a)