

5. Fachgespräch

Staubmessverfahren an Kleinfeuerungsanlagen



IMPRESSUM

Herausgegeben von:

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig
Tel.: +49 (0)341 2434 - 112
info@dbfz.de

Förderung:

Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Landwirtschaft, Ernährung
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Geschäftsführung:

Prof. Dr. mont. Michael Nelles (Wissenschaftlicher Geschäftsführer)
Dr. Christoph Krukenkamp (Administrativer Geschäftsführer)

DBFZ Tagungsreader, Nr. 37

5. Fachgespräch „Staubmessverfahren an Kleinfeuerungsanlagen“
3. Februar 2026, Leipzig
ISSN: 2199-9856 (online)
ISBN: 978-3-949807-40-4
DOI: 10.48480/s62b-kb04

Datum der Veröffentlichung: 3. März 2026

Bilder: © Paul Trainer (DBFZ)

Gestaltung: Stefanie Bader / Satz: Paul Trainer

Das DBFZ ist nicht verantwortlich für den Inhalt der eingereichten
Dokumente. Die Verantwortung für die Texte sowie der Bilder/Grafi-
ken liegt bei den Autoren.

Copyright: Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieses Werkes darf
ohne die schriftliche Genehmigung der Herausgebenden vervielfäl-
tigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere
auch die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in
elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf anderen
digitalen Datenträgern.

5. Fachgespräch

Staubmessverfahren an Kleinfeuerungsanlagen

3. Februar 2026, Leipzig

Inhaltsverzeichnis

Impressionen.....	5
Grußwort.....	6

SESSION: PARTIKELZÄHLVERFAHREN - MESSGASKONDITIONIERUNG

Alejandro Keller, Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW)

Gesamtkohlenstoff als alternative Luftqualitätsmetrik für Holzfeuerungsanlagen 10

Mohammad Aleysa, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Probenvorbehandlung zur Staubemissionsbewertung an Biomassefeuerungen 26

Maik Merkel, Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS)

Kalibrierung und Plausibilitätsprüfung von Partikelzählern im Labor- und Feldeinsatz..... 34

Vinicius Berger, Catalytic Instruments GmbH & Co. KG

Vergleich von Anforderungen und Kalibriermethoden für Partikelanzahlmesssysteme verschiedener Emissionsquellen..... 44

SESSION: PRAKTISCHE ERFAHRUNGEN MIT UNTERSCHIEDLICHEN STAUBMESSVERFAHREN

Claudia Schön, Technologie- und Förderzentrum (TFZ)

LangEFeld – Partikelanzahlmessung nach einem elektrostatischen Staubabscheider bei alternierendem Abscheiderbetrieb 58

Miriam Müller, Deutsches Biomasseforschungszentrum

Vergleich der Messung von Partikelanzahl und -größenverteilung von verschiedenen Messgeräten an einem Kaminofen 68

Nico Opitz, Technologie- und Förderzentrum (TFZ)

Schornsteinfegermessgerätevergleich vor und nach elektrostatischen Staubabscheidern beim Betrieb eines Kaminofens 78

Veranstaltende 86

SAVE THE DATE

Die nächste Veranstaltung „Staubmessverfahren an Kleinfeuerungsanlagen“ findet voraussichtlich im Frühjahr 2028 statt.

Weitere Informationen teilen wir Ihnen gesondert auf der Webseite und per E-Mail mit.

Impressionen



Grußwort

Sehr geehrte Teilnehmende des 5. Fachgesprächs „Staubmessverfahren an Kleinfeuerungsanlagen“,

Staubemissionen sind ungewollte Erscheinungen der Verbrennung von Biomasse in Kleinfeuerungsanlagen. Sie haben negative Auswirkungen auf Gesundheit, Umwelt und das Klima. Durch verschiedene Maßnahmen wie Staubabscheider und automatische Regelungen können sie jedoch deutlich abgesenkt werden. Sowohl für die Bewertung der negativen Auswirkungen, wie auch für die Bewertung der Wirksamkeit von Emissionsminderungseinrichtungen müssen Staubemissionen im Labor und im Feld gemessen werden.

In einer Messgeräteausstellung im Rahmen des diesjährigen Fachgesprächs konnte im Technikum des DBFZ Mess- und Kalibriertechnik unterschiedlicher Hersteller teilweise im Betrieb betrachtet werden. Großen Raum nahm hierbei der Erfahrungsaustausch zwischen Herstellern und Anwender:innen einerseits, aber auch zwischen den Anwendenden untereinander ein.

Im Rahmen von sechs Fachvorträgen haben Expert:innen die Frage der Probenvorbehandlung und deren Auswirkung auf die Messergebnisse sowie der Aussagekraft von Partikeln als Metrik für die Luftqualität diskutiert. Es wurden aktuelle Impulse der EU bezüglich der Ökodesignverordnung aufgenommen und Entwicklungsoptionen aufgezeigt. Des Weiteren wurden Methoden zur Kalibrierung und Plausibilitätsprüfung für die Partikelmessstechnik vorgestellt. Einige Vorträge befassten sich mit den Erfahrungen im praktischen Einsatz der Messverfahren. Insbesondere die Vergleichbarkeit der Ergebnisse unterschiedlicher Messgeräte und Messverfahren an Biomassekleinfeuerungen standen im Vordergrund.

Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass für Partikel im Abgasstrom von Kleinfeuerungsanlagen Messverfahren verfügbar sind bzw. sich



Dr. Hans Hartmann und Prof. Dr. Volker Lenz

in der Validierung für diesen Anwendungsfall befinden. Um von Messungen im Abgas auf die Partikel in der Umgebungsluft schließen zu können, besteht noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Die Veranstalter freuen sich, mit der Veranstaltung die fachlich notwendige Diskussion der Messverfahren unterstützen zu können. Das Fachgespräch „Staubmessverfahren an Kleinfeuerungsanlagen“ findet alle 2-3 Jahre statt. Über den nächsten Termin werden wir sie gerne informieren.

Im vorliegenden Tagungsreader finden sich die Abstracts sowie die Präsentationen der Referent:innen. Sollten Sie inhaltliche Rückfragen haben, kontaktieren Sie gerne die ausstellenden Firmen, die Kontaktdaten finden sie im vorliegenden Reader.

Wir bedanken uns herzlich für Ihr Interesse und freuen uns, Sie auf der nächsten Veranstaltung wieder begrüßen zu dürfen!

Dr. Hans Hartmann, TFZ

Prof. Dr. Volker Lenz, DBFZ

Session:

Partikelzählverfahren - Messgaskonditionierung

Alejandro Keller, Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW)

Gesamtkohlenstoff als alternative Luftqualitätsmetrik für Holzfeuerungsanlagen

Alejandro Keller
 Fachhochschule Nordwestschweiz
 Klosterzelgstrasse 2
 5210 Windisch, Schweiz
 Tel.: +41 (0)56 202 74 84
 E-Mail: alejandro.keller@fhnw.ch

Keywords: Gesamtkohlenstoff, Partikelanzahlkonzentration, Emissionsbewertung, Holzfeuerungsanlagen

Die Partikelanzahlkonzentration (PNC), häufig angegeben als Anzahl ultrafeiner Partikel (UFP), hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung als Luftqualitätsmetrik gewonnen und wird heute routinemäßig an Immissionsmessstationen erfasst. Ihr regulatorischer Erfolg geht auf das Europäische Particle Measurement Programme (PMP) zurück, in dessen Rahmen sich PNC als äußerst wirksam zur Kontrolle von Fahrzeugabgasemissionen erwiesen hat und maßgeblich zur breiten Einführung von Partikelfiltern im Straßenverkehr beigetragen hat. Vor diesem Hintergrund wächst das Interesse, PNC-basierte Metriken auch auf andere Verbrennungstechnologien, einschließlich häuslicher Holzfeuerungsanlagen, zu übertragen.

Die Biomasseverbrennung unterscheidet sich jedoch grundlegend von Fahrzeugabgasen, insbesondere hinsichtlich Emissionszusammensetzung, Aerosoldynamik und atmosphärischer Umwandlungsprozesse. Holzfeuerungsanlagen emittieren komplexe und stark variable Gemische aus anorganischen Aschepartikeln, Ruß, organischem Aerosol sowie gasförmigen Vorläuferstoffen mit sehr unterschiedlichen klima- und gesundheitsrelevanten Wirkungen. Diese Komplexität lässt sich mit einer einfachen Kenngröße wie der PNC nicht adäquat abbilden, da diese weitgehend von Verbrennungsqualität, Toxizität

und Klimarelevanz entkoppelt ist. Die Verwendung von PNC als Regulierungsmetrik kann daher unbeabsichtigte Fehlanreize setzen, indem suboptimale Technologien begünstigt oder Fortschritte bei der Verbrennungsoptimierung und Emissionsminderung verzögert werden. In dieser Präsentation werden die wissenschaftlichen Schwächen der PNC als Emissionsmetrik für die Biomasseverbrennung kurz diskutiert.

Aufbauend auf den Ergebnissen des Projekts Next Generation Particle Measurement Method (NG-PMM) schlagen wir den Gesamtkohlenstoff (Total Carbon, TC) als robustere und relevantere Emissionsmetrik für Holzfeuerungsanlagen vor. TC spiegelt unvollständige Verbrennungsprozesse besser wider, korreliert direkter mit gesundheits- und klimarelevanten Emissionskomponenten und zeigt eine höhere Konsistenz mit den Auswirkungen auf die Umgebungsluft, einschließlich der Bildung sekundärer organischer Aerosole. Damit bietet TC eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für zukünftige Emissionsregulierung und Technologiebeurteilung für Holzfeuerungsanlagen.



University of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland
 School of Engineering

member of
 swissuniversities

Gesamtkohlenstoff

Als alternative Luftqualitätsmetrik für Holzfeuerungsanlagen

Alejandro Keller
3. Februar 2026





University of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland
 School of Engineering

member of
 swissuniversities

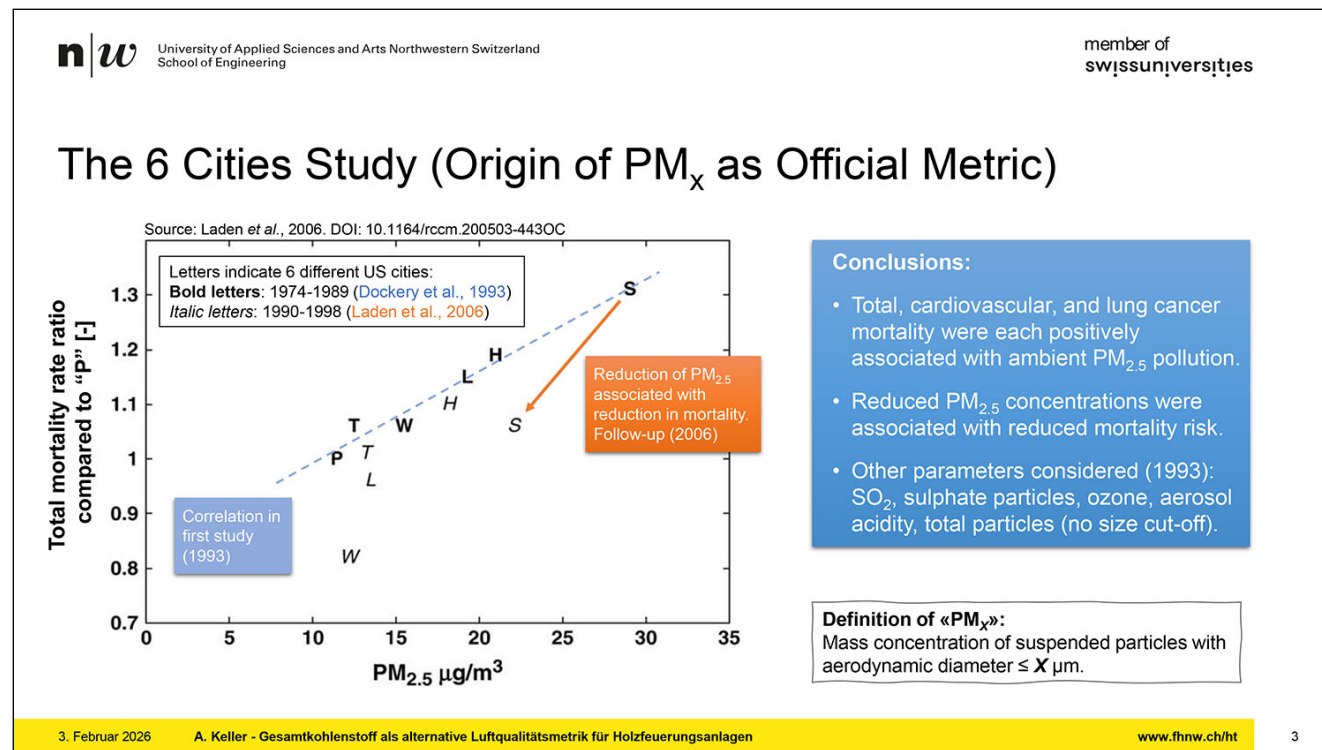
Take Home Message

- Holzfeuerungsanlagen unterscheiden sich grundlegend von Fahrzeugen
- PNC-basierte PMP-Metrik ist für die Holzverbrennung nicht geeignet
- Metriken müssen die Performance der Anlagen widerspiegeln
- Gesundheits- und Klimarelevanz müssen im Zentrum stehen

PNC: Particle Number Concentration
 PMP: Particle Measurement Programme (LKW's und PKW's)

A. Keller zu PNC
 (EcoDesign-Konsultation):


3. Februar 2026
A. Keller - Gesamtkohlenstoff als alternative Luftqualitätsmetrik für Holzfeuerungsanlagen
www.fhnw.ch/ht
2



n|w University of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland
School of Engineering

member of
swissuniversities

EFCA – European Federation of Clean Air and Environmental Protection Associations

About EFCA

EFCA is a non-political, non-governmental and non-profit federation of national associations in Europe active in the field of air pollution control and environmental protection. It aims at working at the interface of science and (European) policy on environmental problems, thus contributing to the identification of solutions with a sound scientific basis, which are technologically feasible, cost-effective and politically acceptable.

Recent Posts

- Ultra Fine Particles - Air Quality and Climate
- Exploring Pollutants of Emerging Concern with Net4Cities

Latest Posts

Newsletter nr 38
Cool as a Christmas gift by Andrzej Jagusiewicz...

11th VERT Forum - e-conference
Technologies and Policies towards Zero-impact Carbon Emissions

Ultra Fine Particles - Air Quality and Climate
International Symposium 2026, June 17th and 18th...

Exploring Pollutants of Emerging Concern with Net4Cities
Net4Cities is a European research project focused...

– [Undifferentiated] mass-based metrics PM₁₀/PM_{2.5} do not properly represent all risks for human health.

– EFCA Supports: fraction-by-fraction approach on particulate matter, both **with respect to size and chemical composition**.

3. Februar 2026 A. Keller - Gesamtkohlenstoff als alternative Luftqualitätsmetrik für Holzfeuerungsanlagen www.fhnw.ch/ht 5

n|w University of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland
School of Engineering

member of
swissuniversities

DIRECTIVE (EU) 2024/2881 on ambient air quality and cleaner air for Europe (23 October 2024)

Aerosol Pollutants to be measured (adapted from tables 1 & 2)

Pollutant	Description
PM ₁₀ , PM _{2.5}	Mass concentration of suspended particles with aerodynamic diameter ≤ X, Y µm
UFP	Ultrafine Particles (Number concentration)
Size distribution of UFP	Size-resolved information about UFP
BC	Black Carbon
Chemical composition of PM _{2.5} (1)	Specific ions: SO ₄ ²⁻ , Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , Ca ²⁺ , NO ₃ ⁻ , K ⁺ , Cl ⁻ , Mg ²⁺
Chemical composition of PM _{2.5} (2)	Elemental Carbon (EC), Organic Carbon (OC)

3. Februar 2026 A. Keller - Gesamtkohlenstoff als alternative Luftqualitätsmetrik für Holzfeuerungsanlagen www.fhnw.ch/ht 4

n|w University of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland
School of Engineering

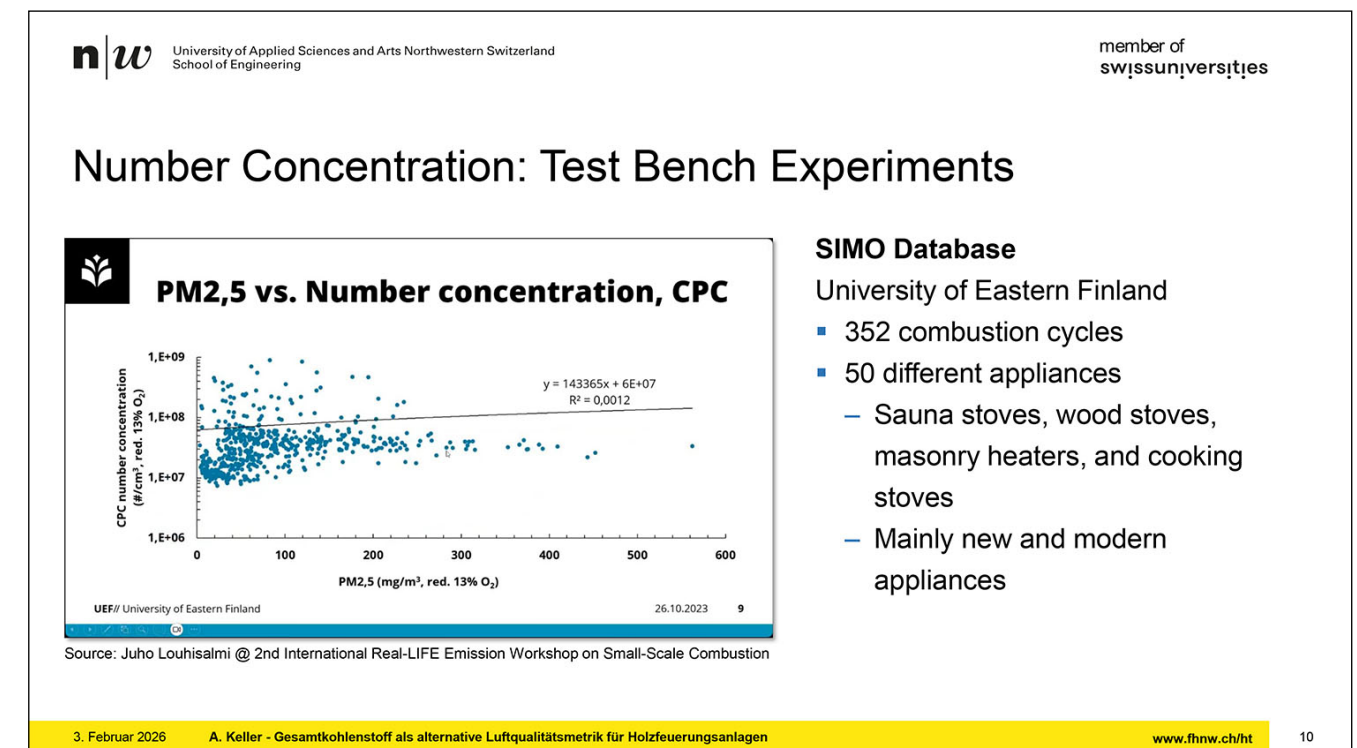
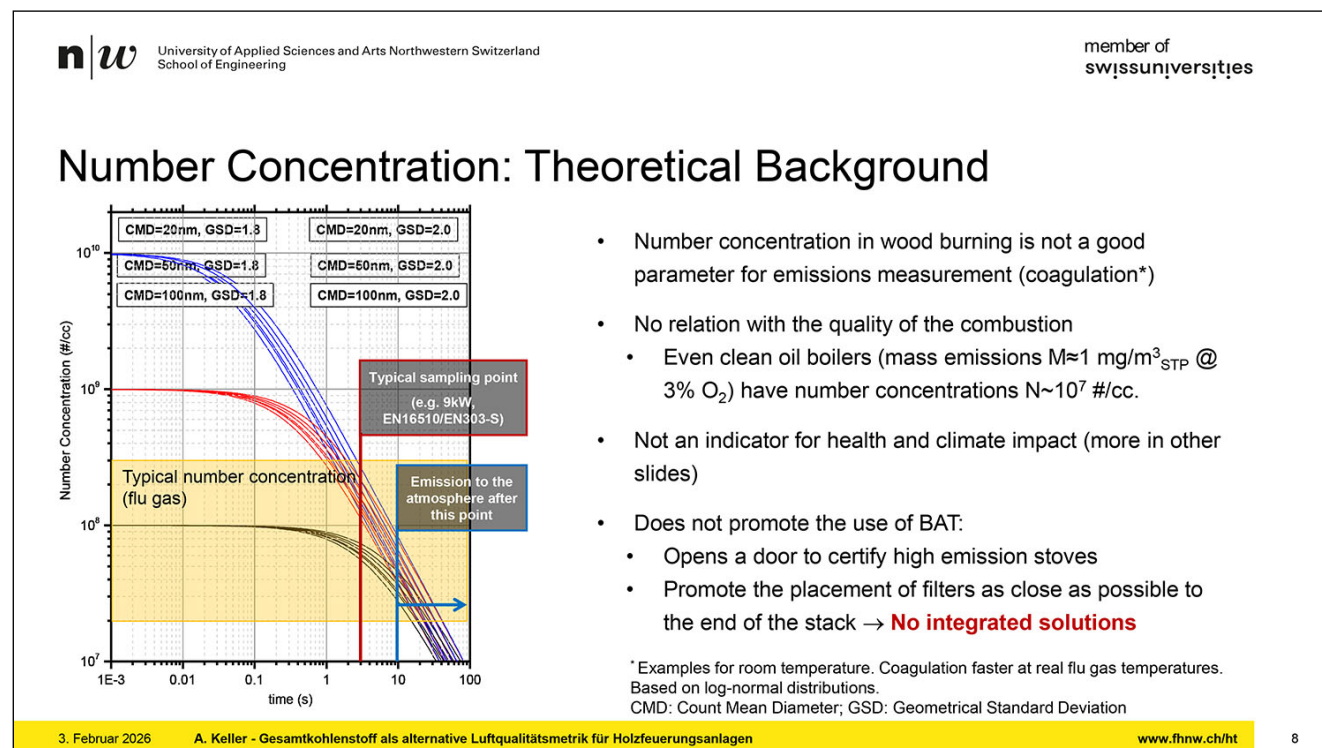
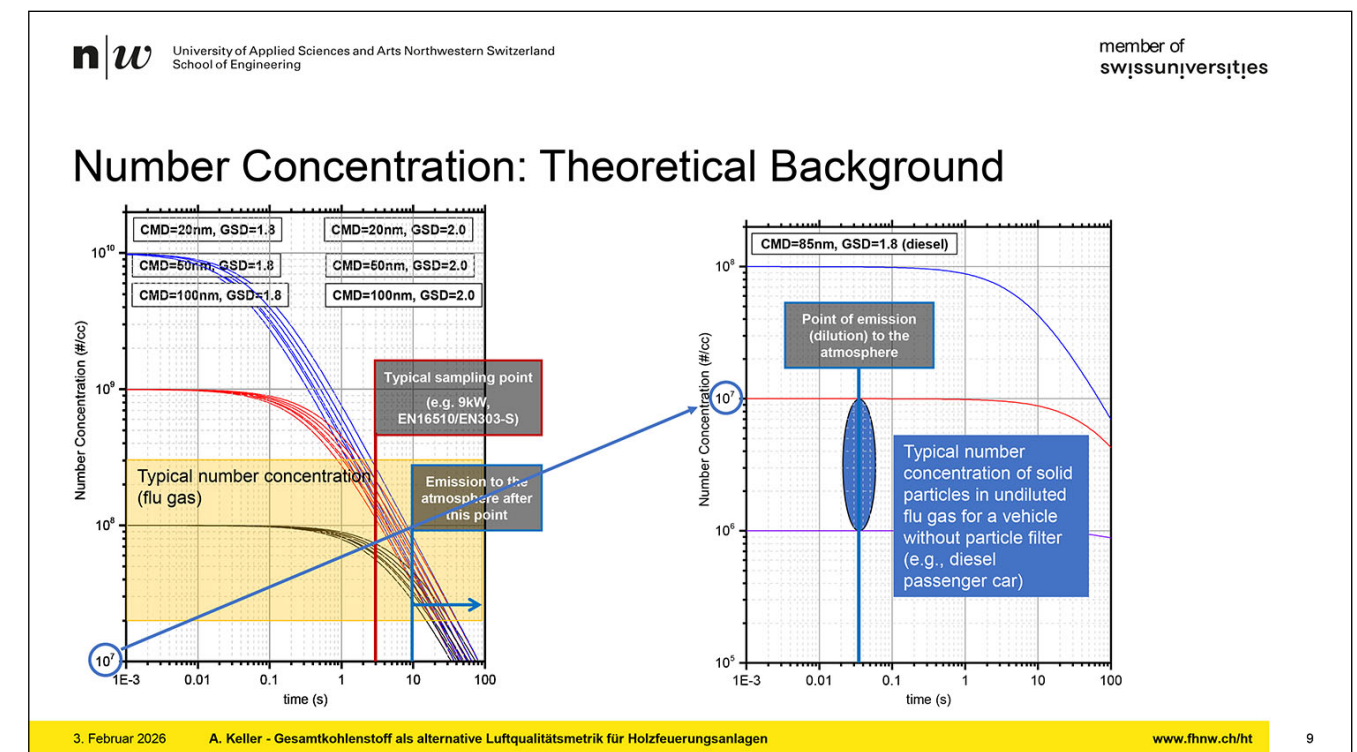
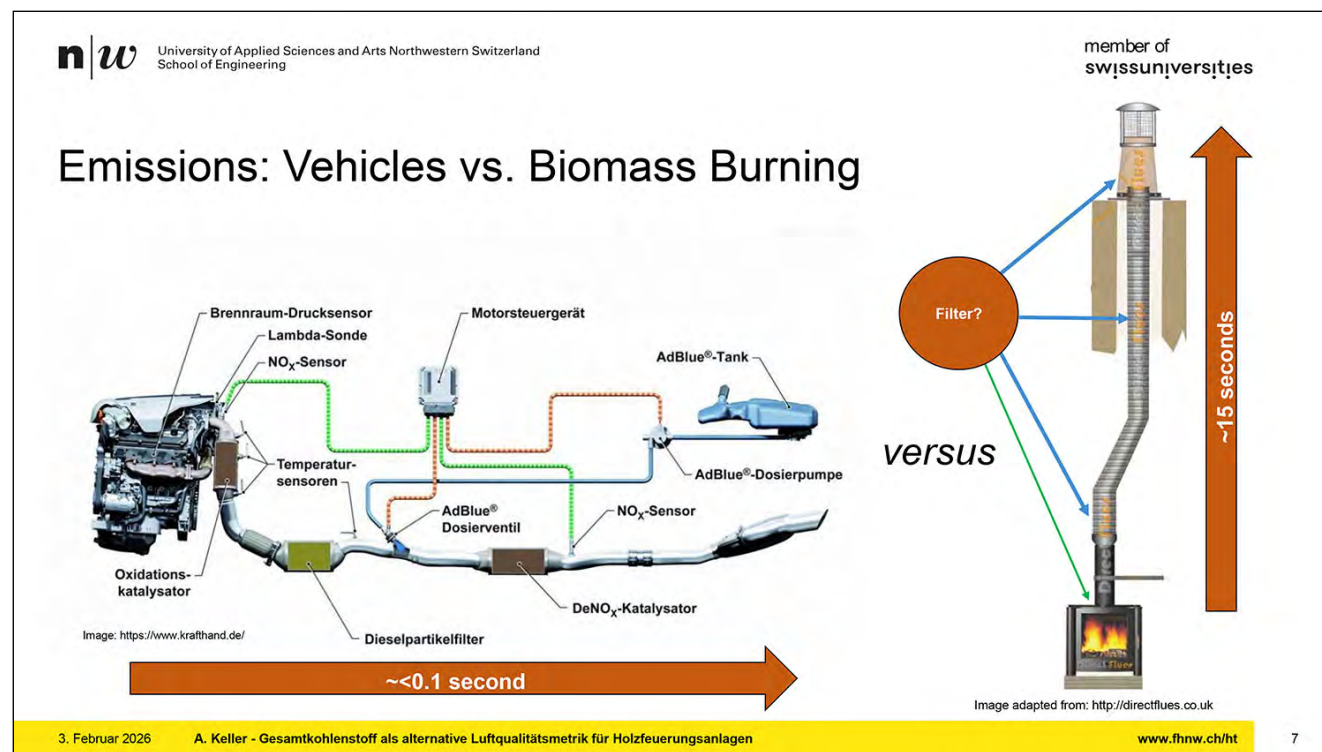
member of
swissuniversities

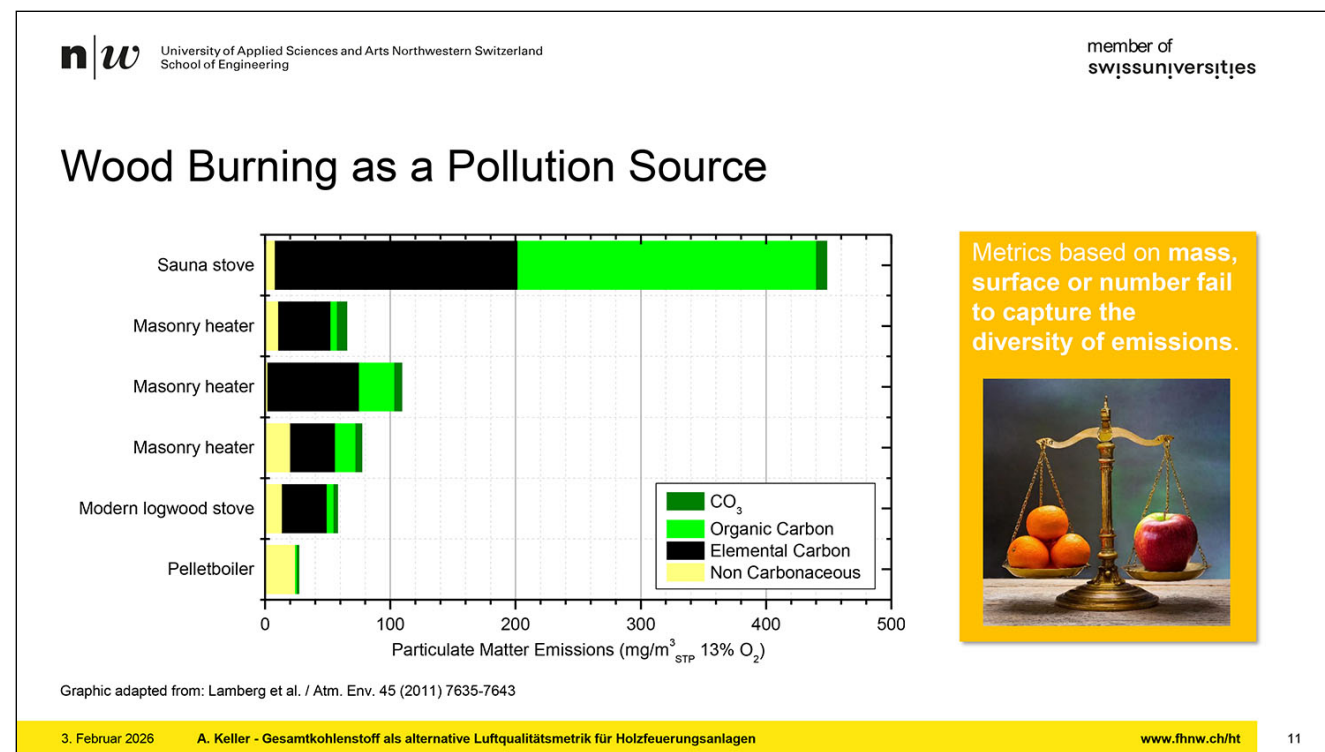
Particle Measurement Programme (PMP): a Success Story

Image: Cachón, ETH Nanoparticle Conference, 2016

- First particle number (PN) emission metric.
- Directly responsible for the introduction of diesel and gasoline particle filters.
- Pragmatic decisions: **Only "solid" particles larger than 23 nm**.
- Repeatability, reproducibility and robustness in focus rather than health impact (PMP reports @ unece.org).
- Development time: 10 years (2001-2010)

3. Februar 2026 A. Keller - Gesamtkohlenstoff als alternative Luftqualitätsmetrik für Holzfeuerungsanlagen www.fhnw.ch/ht 6





n|w University of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland
School of Engineering

member of
swissuniversities

Other Requirements for a NGEMM

Affordable

Traceable

Promote/Compatible w. Best Available Technology

3. Februar 2026 A. Keller - Gesamtkohlenstoff als alternative Luftqualitätsmetrik für Holzfeuerungsanlagen www.fhnw.ch/ht 13

n|w University of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland
School of Engineering

member of
swissuniversities

Biomass Combustion with Future

Resource efficiency

Health

Climate

Focus of a next generation emission measurement method

3. Februar 2026 A. Keller - Gesamtkohlenstoff als alternative Luftqualitätsmetrik für Holzfeuerungsanlagen www.fhnw.ch/ht 12

n|w University of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland
School of Engineering

member of
swissuniversities

Overview of the Consortium

- European consortium led by Swiss institutes (Oekozentrum & FHNW)
- Goal: Modernize emission measurements for wood burning appliances
- 49 European experts, 29 Institutions:
Universities, Research Centers, Notified Bodies (certified test facilities),
Manufacturers, Environmental Agencies
- 3 Workshops held in 2023 → Position Paper
- (Still) Next Step: Start a European project to define and validate a NGEMM

Position Paper

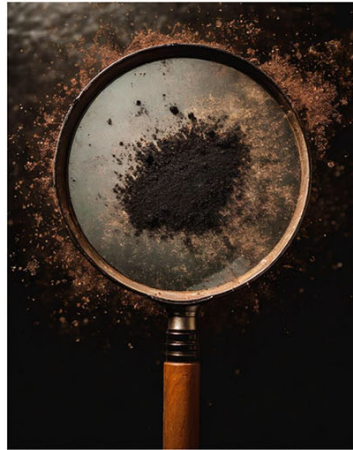
Supported by:

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU
Office fédéral de l'environnement OFEV
Ufficio federale dell'ambiente UFAM
Uffizi federal d'ambient UFAM

3. Februar 2026 A. Keller - Gesamtkohlenstoff als alternative Luftqualitätsmetrik für Holzfeuerungsanlagen www.fhnw.ch/ht 14

Focus on Carbonaceous Particles (Wood Combustion)



- Health relevant
- Contribute to climate change ^a
 - Effect mostly from elemental carbon (EC; soot)
 - Organic carbon (OC) contributes 14%
- Source apportionment (Switzerland)
 - OC concentrations at least as high as EC^b
 - Winter smog episodes: OC ten times more than EC^c
 - **Secondary organic aerosol**: ~ same concentration as primary organics^d

^a Kirchstetter, 2012: 10.5194/acp-12-6067-2012; ^b Gianini, 2012: 10.1016/j.atmosenv.2012.02.036
^c Zotter, 2014: 10.5194/acp-14-13551-2014; ^d Daellenbach, 2017: 10.5194/acp-17-13265-2017

Secondary Organic Aerosols

Dekati® Oxidation Flow Reactor DOFR™



✓ Secondary aerosol formation is relevant for health and environmental impacts

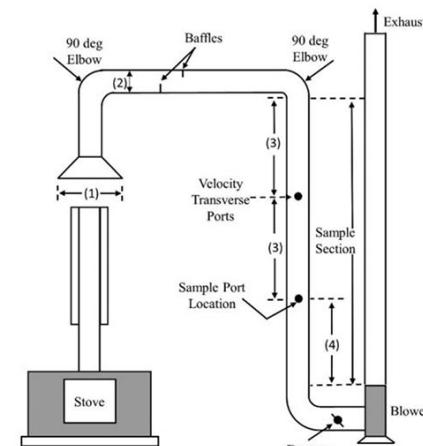
✗ Lack of experience

- Has never been used for, e.g., type approval testing.

✗ In the past very expensive

“Condensables”

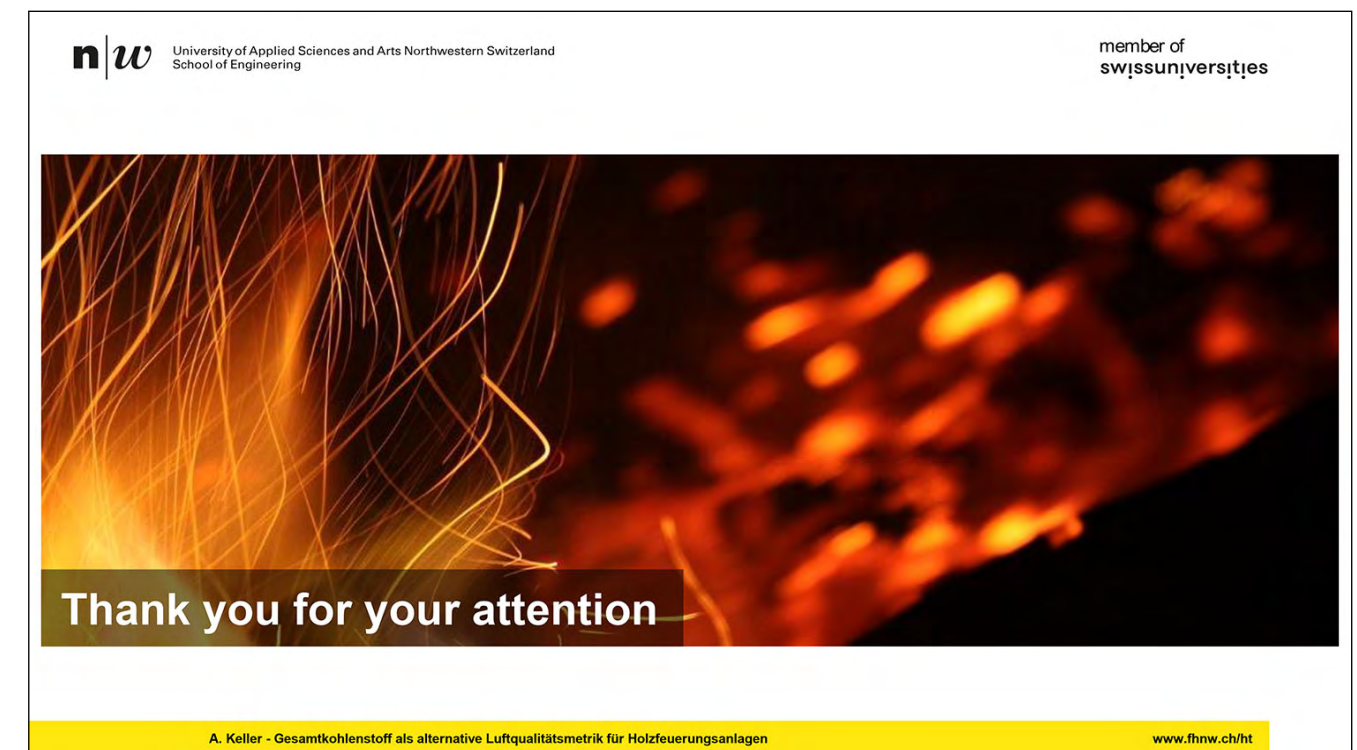
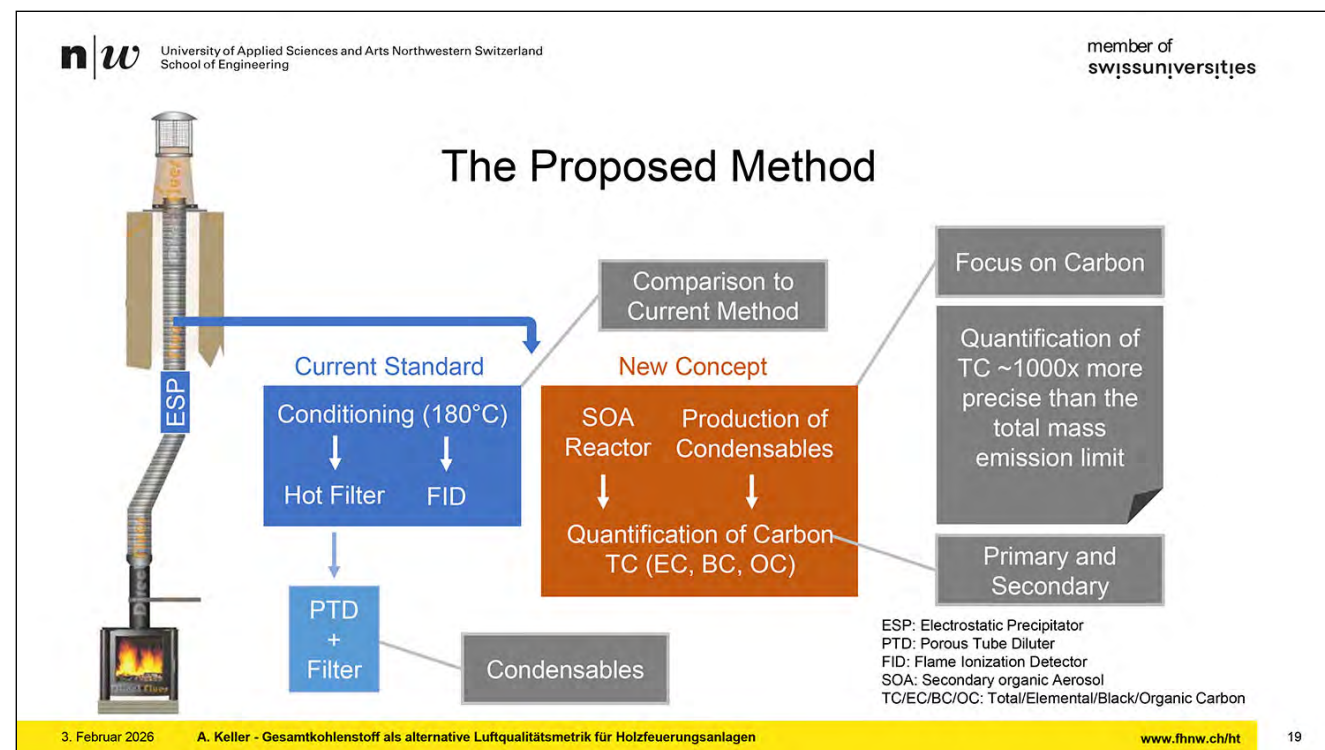
- ✓ Somewhat related to organic aerosol in the atmosphere (after cooling/dilution)
- ✓ May be related to secondary organic aerosol potential
- ✗ No universal definition
 - Definition via measurement method



Summary



Current Standard (Gravimetric PM + Organics through FID)	✗	✗
Number Concentration	✗	✗
Carbonaceous Particles	✓	✓
Condensables	✓	?
Secondary Organic Aerosol	✓	?



Wood burning in Roveredo Switzerland

Wood is used as fuel for 75% of the domestic heating installations in Roveredo Switzerland¹

**OC/TC = 82% (18% EC)
91% of OC from Wood Burning**

¹(Alfarra et al., 2007 Environ. Sci. Technol)

3. Februar 2026 A. Keller - Gesamtkohlenstoff als alternative Luftqualitätsmetrik für Holzfeuerungsanlagen www.fhnw.ch/ht 20

Take Home Message

- Holzfeuerungsanlagen unterscheiden sich grundlegend von Fahrzeugen**
Emissionsentstehung, Zusammensetzung und Umwandlungsprozesse sind nicht direkt vergleichbar.
- PNC-basierte PMP-Metrik ist für die Holzverbrennung nicht geeignet**
Die Übertragung fahrzeugbasierter Lösungen birgt das Risiko von Fehlregulierung.
- Metriken müssen die Performance der Anlagen widerspiegeln**
Regulierung sollte Verbrennungsqualität und reale technische Verbesserungen belohnen.
- Gesundheits- und Klimarelevanz müssen im Zentrum stehen**
Entscheidend sind vor allem Schadstoffe aus unvollständige Verbrennungsprozesse.

PNC: Particle Number Concentration
PMP: Particle Measurement Programme (LKWs und PKWs)

3. Februar 2026 A. Keller - Gesamtkohlenstoff als alternative Luftqualitätsmetrik für Holzfeuerungsanlagen www.fhnw.ch/ht 22

n|w University of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland
School of Engineering

member of
swissuniversities

Total Carbon and Oxidation Reactors

- The TCA-8 from Aerosol d.o.o. measures total carbon semi-online.
- Two sampling heads to avoid measurement downtime
- Limit of detection 0.4 $\mu\text{g-C}$ sampled on the filter




Based on the limit of detection, our systems will be able to detect Total Carbon concentrations as low as $\text{TC}=35 \mu\text{g-C}/\text{m}^3_{\text{STP}}$ *

* Assuming sampling duration of 30 minutes, 1:10 dilution and 1 lpm sampling flow

FHNW, Organic Coating Unit (OCU)



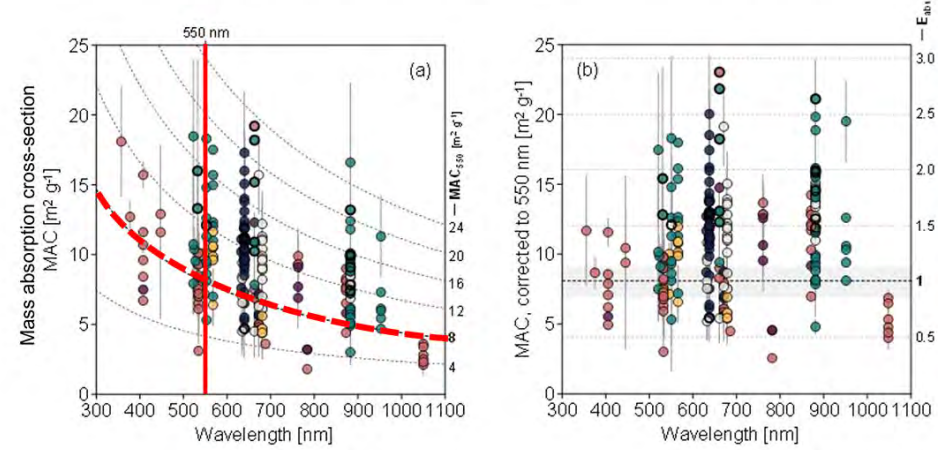
Keller et al. 2022 (OCU): <https://doi.org/10.1080/02786826.2022.2110448>
Keller et al. 2023 (FATCAT): <https://doi.org/10.5194/ar-2023-11>

3. Februar 2026 A. Keller - Gesamtkohlenstoff als alternative Luftqualitätsmetrik für Holzfeuerungsanlagen www.fhnw.ch/ht 23

n|w University of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland
School of Engineering

member of
swissuniversities

Ambient MAC_{BC} extracted from a total of 80 studies



Asmi, et al., (2025) <https://doi.org/10.1038/s41612-025-01288-2>



230 MAC values:
→ Variation 3x
Common language needed!

3. Februar 2026 A. Keller - Gesamtkohlenstoff als alternative Luftqualitätsmetrik für Holzfeuerungsanlagen www.fhnw.ch/ht 25

n|w University of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland
School of Engineering

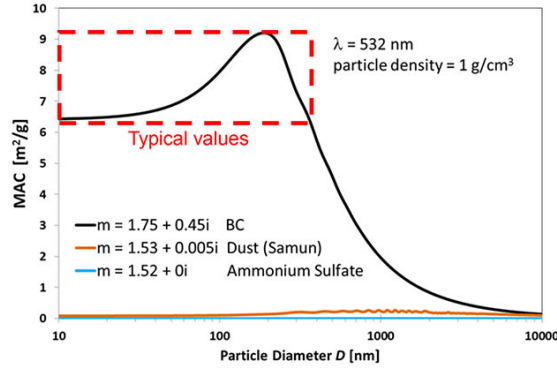
member of
swissuniversities

Do we need standardisation?

DIRECTIVE (EU) 2024/2881 on ambient air quality and cleaner air for Europe (23 October 2024)

“pollutants of emerging concern, such as ultrafine particles, **black carbon**... [shall] be measured at monitoring supersites”

→ in $[\text{g}/\text{m}^3]$



3. Februar 2026 A. Keller - Gesamtkohlenstoff als alternative Luftqualitätsmetrik für Holzfeuerungsanlagen www.fhnw.ch/ht 24

n|w University of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland
School of Engineering

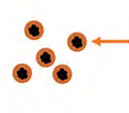
member of
swissuniversities

Atmospherical Aging of Black Carbon

Fresh soot particles



Aged soot particles



Organic coating* causes shape changes and increases light absorption (lensing effect)

Ozone, NO_x, OH + organic vapours

Hours or days of exposure

Seconds of exposure

Keller et al., Aerosol Sci. & Tech., 2022. DOI: 10.1080/02786826.2022.2110448

* Coating not visible in TEM

3. Februar 2026 A. Keller - Gesamtkohlenstoff als alternative Luftqualitätsmetrik für Holzfeuerungsanlagen www.fhnw.ch/ht 26

n|w

University of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland
School of Engineering

member of
swissuniversities

The radiative effects of aerosols

Absorbing aerosols (strong: black carbon; moderate: dust and organic carbon)

- + INPs
- + Direct absorption
- + Above clouds
- Below clouds
- + Positive for high clouds
- Negative for low clouds
- + Deposition on snow
- + Absorbing aerosols above scattering aerosols

Interaction

- + Internal mixing
- Absorbing aerosols below scattering aerosols

Scattering aerosols (sulfate, nitrate, sea salt)

- Direct scattering
- CCNs

Sources: Dust, Phytoplankton, Sea salt

Li, J., Carlson, B.E., Yung, Y.L. et al. Scattering and absorbing aerosols in the climate system. Nat Rev Earth Environ 3, 363–379 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00296-7>

3. Februar 2026

A. Keller - Gesamtkohlenstoff als alternative Luftqualitätsmetrik für Holzfeuerungsanlagen

www.fhnw.ch/ht

27

Mohammad Aleysa, Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP)

Probenvorbehandlung zur Staubemissionsbewertung an Biomassefeuerungen

Dr. Mohammad Aleysa
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
Tel.: +49 (0)711 970-3455
E-Mail: mohammadshayesh.aleysa@ibp.fraunhofer.de

Keywords: Staubemissionsbewertung, Partikel, Messgerät, Verdünnung, Biomassefeuerung

Die Probenvorbehandlung zur Staubemissionsbewertung an Biomassefeuerungen ist entscheidend für eine belastbare und reproduzierbare Partikelmessung. Besonders bei Ultrafeinstaub zeigt sich, dass die Messqualität maßgeblich von Probenahme, Verdünnung und Probenführung abhängt. Diese Partikel unterliegen dynamischen physikalisch-chemischen Veränderungen, beeinflusst durch Konzentration, Temperatur, Feuchte sowie Strömungsbedingungen. Bereits geringe Abweichungen können Kondensations- oder Verdunstungseffekte auslösen und damit Anzahlkonzentration und Größenverteilung verändern.

Aufgrund hoher Partikelkonzentrationen ist eine Verdünnung meist erforderlich. Man unterscheidet interne und externe Verdünnung. Bei der internen Verdünnung wird partikelfreie Luft im Messgerät beigemischt. Das System ist kompakt und mobil einsetzbar, bietet jedoch nur begrenzte Kontrolle über Temperatur, Feuchte und Verdünnungsstabilität. Schwankungen im Abgaszustand beeinflussen den Verdünnungsfaktor direkt. Zudem können kondensierbare organische Bestandteile zusätzliche Partikel bilden.

Die externe Verdünnung, etwa mittels dreistufigem Vakuum-Ejektor, erlaubt eine definierte, häufig zunächst heiße und anschließend kalte Verdünnung. So lassen sich stabile und anpassbare

Verdünnungsfaktoren realisieren. Voraussetzung sind präzise Kalibrierung, z. B. mit Propan, sowie regelmäßige Reinigung der Düsen. Verunreinigungen verändern den Strömungsquerschnitt und verfälschen den Verdünnungsfaktor.

Neben der Verdünnung verursachen Partikelverluste entlang des Probenahmewegs zusätzliche Unsicherheiten. Ultrafeine Partikel diffundieren an Rohrwände, größere unterliegen Trägheits- und Sedimentationseffekten. Elektrostatische Effekte, lange Leitungen oder Temperaturgradienten verstärken diese Verluste. Eine kurze, geradlinige und temperaturkontrollierte Probenführung ist daher erforderlich.

Ein weiterer Aspekt ist die Alterung der Probe. Nach Austritt aus der Brennkammer verändern sich Partikel durch Kondensation, Nukleation, Koagulation oder Verdunstung. Ohne definierte Alterungsbedingungen ist die Messung nur eine Momentaufnahme. Für vergleichbare Ergebnisse sind kontrollierte Aufenthaltszeiten sowie definierte Temperatur- und Verdünnungsbedingungen notwendig. Eine kompakte, standardisierte Lösung hierfür fehlt bislang und zeigt deutlichen Entwicklungsbedarf.





AKUSTIK
© Fraunhofer IBP



ENERGIEEFFIZIENZ
UND RAUMKLIMA
© Fraunhofer IBP



GANZHEITLICHE
BILANZIERUNG
© Shutterstock



HYGROTHERMIK
© iStock



MINERALISCHE
WERKSTOFFE UND
BAUSTOFFRECYCLING
© Shutterstock



UMWELT, HYGIENE
UND SENSORIK
© Fraunhofer IBP

5. Fachgespräch "Staubmessverfahren an Kleinfeuerungsanlagen"

03. Februar 2026
Dr.-Ing. Mohammad Aleysa

Probenvorbehandlung zur Staubemissionsbewertung an Biomassefeuerungen

Agenda



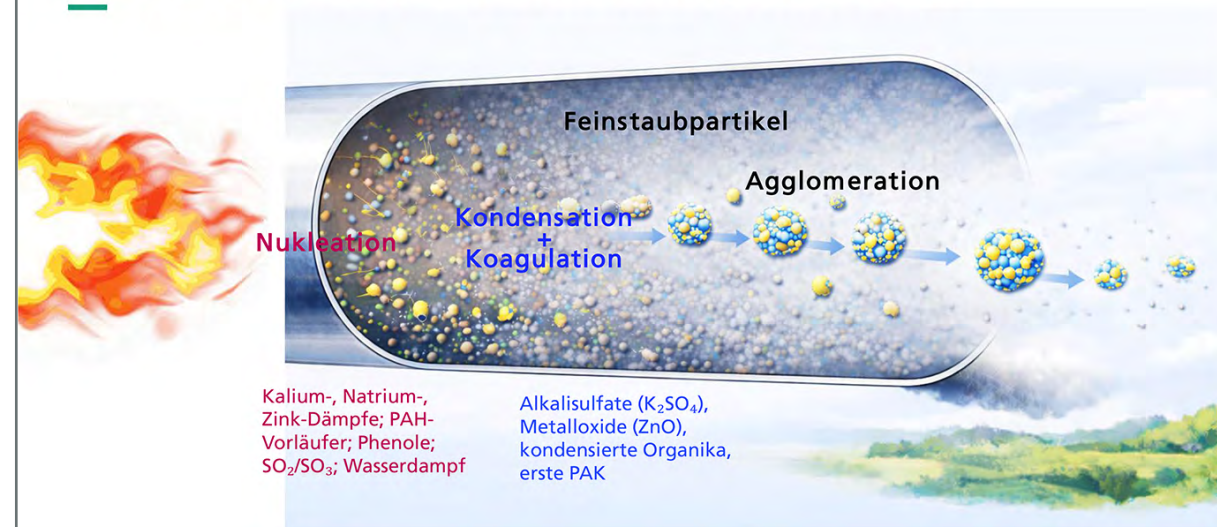
01 Einführung 02 Probenahme mit einer internen bzw. integrierten Verdünnung und mit externer Verdünnung (Vakuum-Ejektor-Verfahren) 03 Partikelverlust bei der Staubzählung	04 Verfahren zur Alterung der Abgasprobe 05 Messungen ohne und mit Alterung der Abgasprobe 06 Zusammenfassung und Ausblick
---	---

Seite 2
01.03.2026
© Fraunhofer IBP
Intern



Messung von Ultrafeinstaub

Ultrafeinstaubbildung bei der Verbrennung von Biomasse

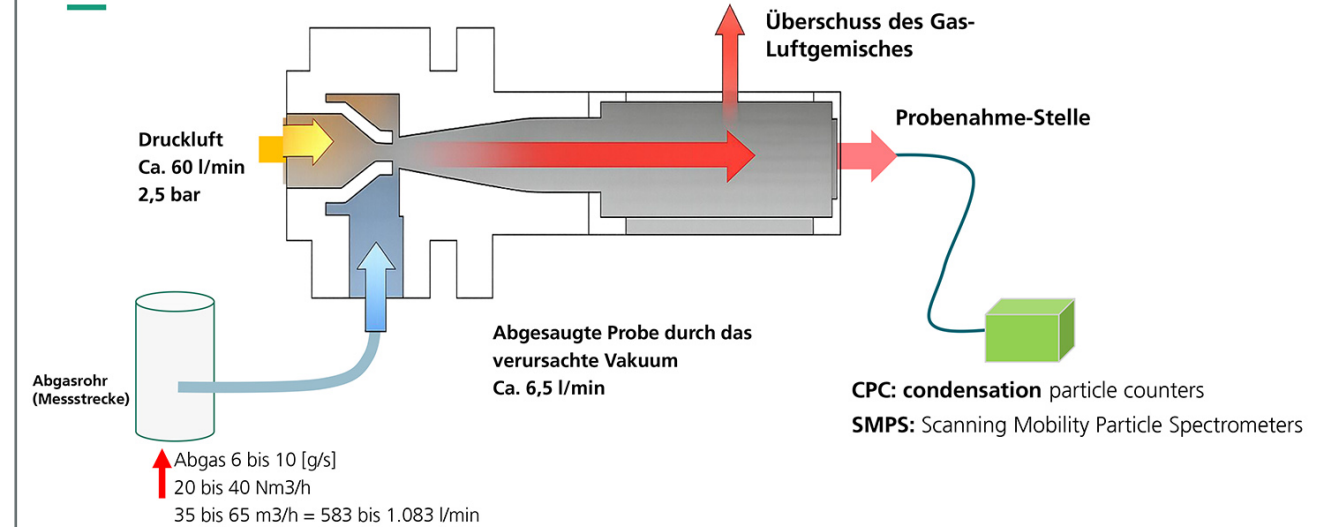


Seite 3 01.03.2026 © Fraunhofer IBP

Intern

Messung von Ultrafeinstaub

Externe Verdünnung mit Vakuum-Ejektor-Verfahren

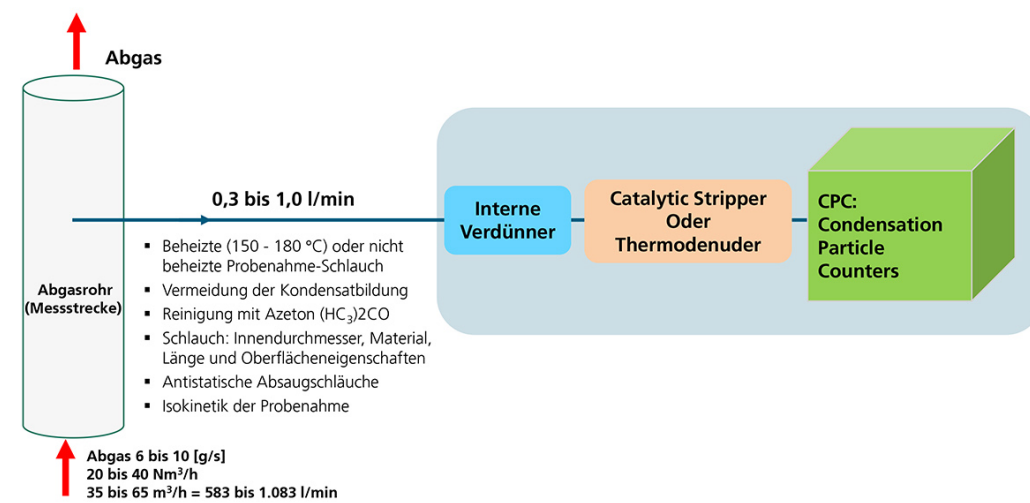


Seite 6 01.03.2026 © Fraunhofer IBP

Intern

Messung von Ultrafeinstaub

Probenahme, interne integrierten Verdünnung



Seite 4 01.03.2026 © Fraunhofer IBP

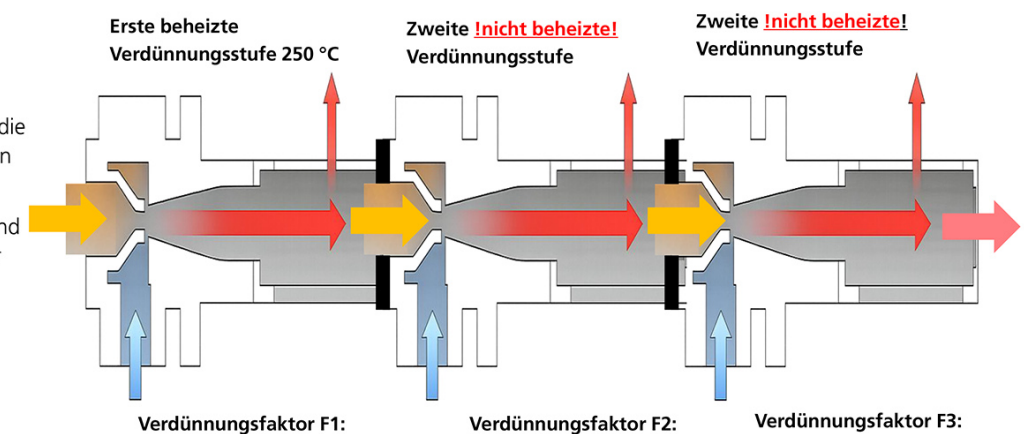
Intern

Messung von Ultrafeinstaub

Externe Verdünnung mit dreistufigem Vakuum-Ejektor-Verfahren

Heißverdünnung der Abgasprobe:

- Heißverdünnung senkt die Taupunkttemperatur von Kohlenwasserstoffen
- Kohlenwasserstoffverbindungen verbleiben in der Gasphase
- Keine Kondensation zu flüssigen oder festen Partikeln
- Keine Erfassung als Partikel in der Messung

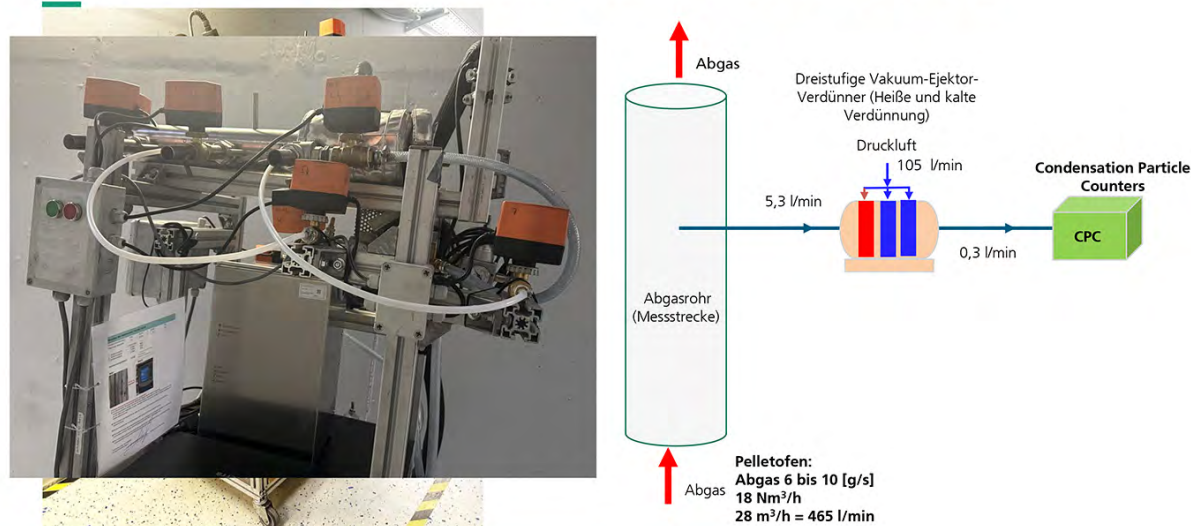


Seite 7 01.03.2026 © Fraunhofer IBP

Intern

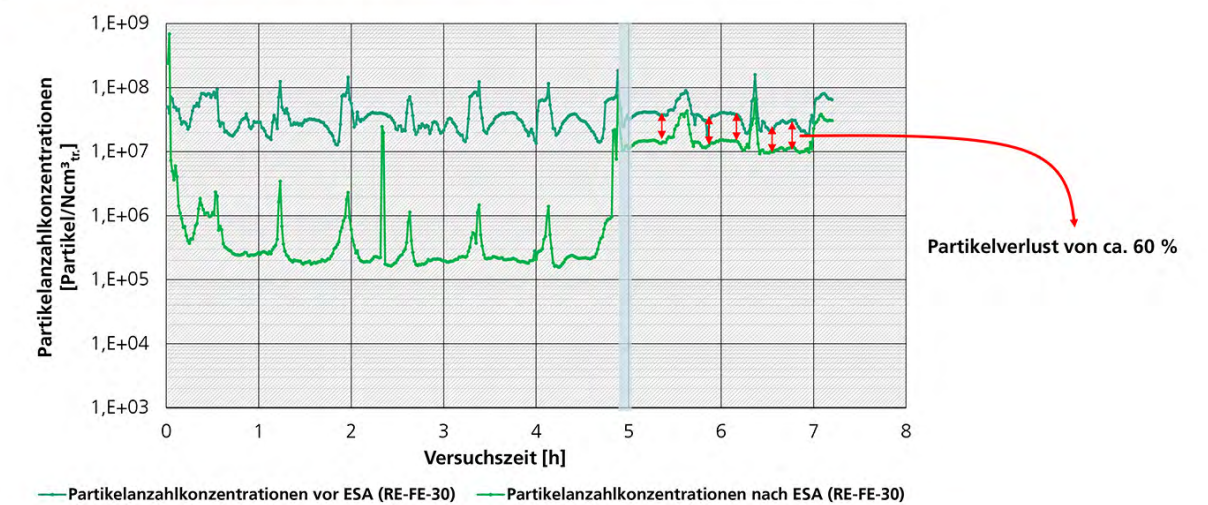
Messung von Ultrafeinstaub

Abgasverdünnung mit dreistufiges Vakuum-Ejektor-Verfahren



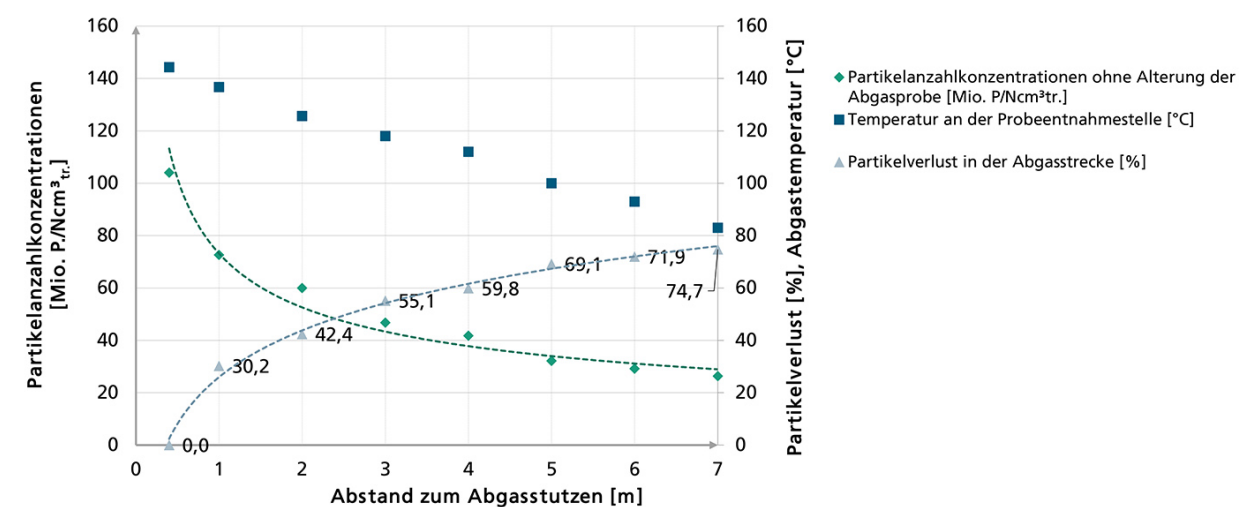
Partikelzählverfahren zur Messung von Ultrafeinstaub

Partikelverlust, Scheitholzofen mit ESA



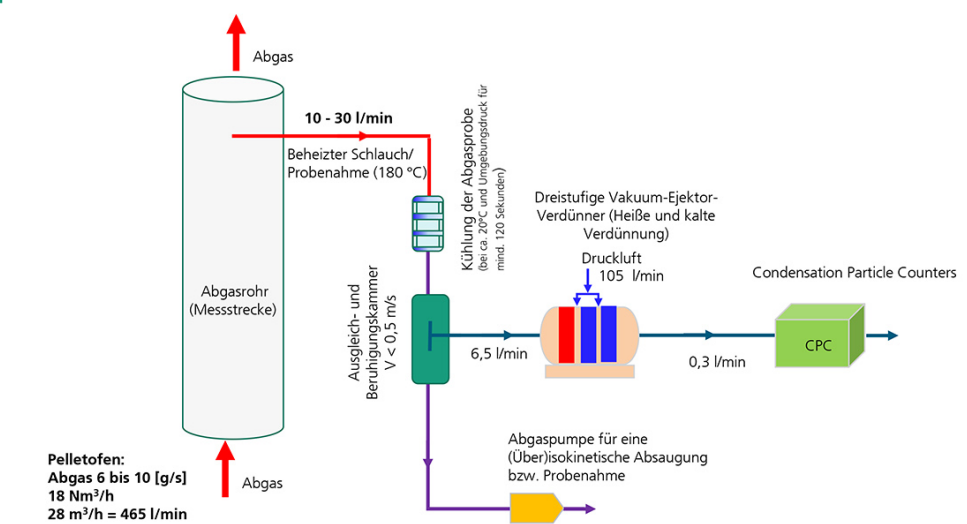
Partikelzählverfahren zur Messung von Ultrafeinstaub

Partikelverlust, Pelletofen



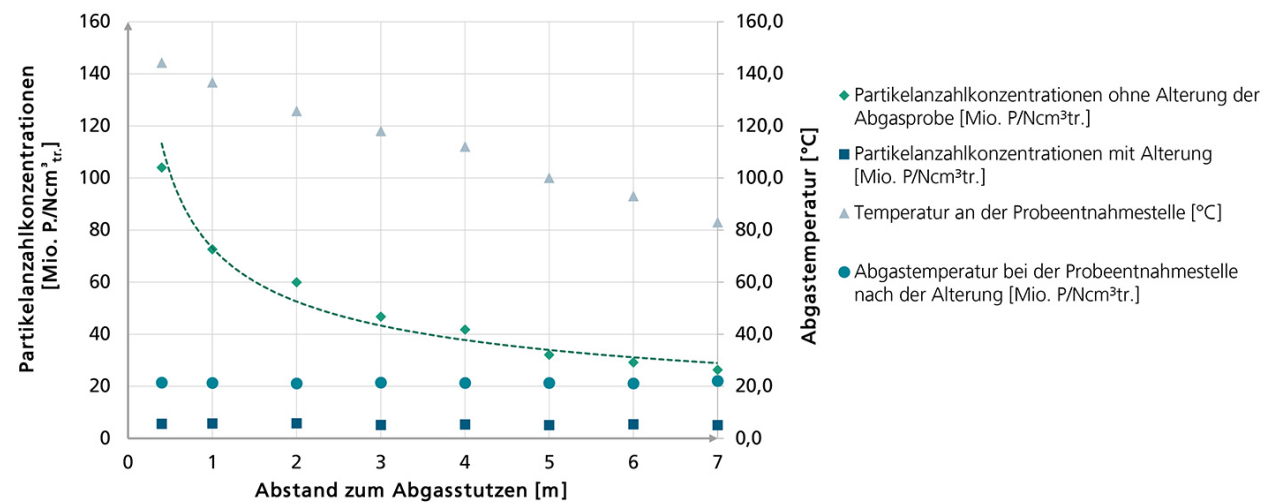
Messung von Ultrafeinstaub

Partikelzählung, Verfahren zur Alterung der Abgasprobe



Partikelzählverfahren zur Messung von Ultrafeinstaub

Messungen nach der Alterung der Abgasprobe



Seite 12 01.03.2026 © Fraunhofer IBP

Intern

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Dr.-Ing. Mohammad Aleysa

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Nobelstr. 12 | 70569 Stuttgart | Germany

Telefon: +49 711 970-3455
mohammad.aleysa@ibp.fraunhofer.de
<https://www.ibp.fraunhofer.de>

Seite 14 01.03.2026 © Fraunhofer IBP

Dr. Aleysa

Intern

Zusammenfassung und Ausblick

- Ultrafeinstaubpartikel unterliegen **hochdynamischen und komplexen Veränderungen**, die maßgeblich von Partikeleigenschaften und -konzentrationen, Abgastemperatur, Abgasfeuchte sowie Strömungs- und Turbulenzbedingungen beeinflusst werden.
- Die Abgasverdünnung ist ein zentraler Einflussfaktor für **Messgenauigkeit und Messstabilität** und muss daher reproduzierbar und kontrolliert erfolgen.
- Eine **Normierung der Probenahme** (Probevolumenstrom, Geometrie und Abmessungen des Probenahmerohrs sowie Art der Verdünnung) ist zwingend erforderlich, um vergleichbare Messergebnisse zu gewährleisten.
- Die externe Verdünnung mittels **dreistufigem Vakuum-Ejektor-Verfahren** ermöglicht eine stabile Messung, setzt jedoch eine **präzise Kalibrierung** der eingesetzten Kalibriergase (z. B. Propan) sowie eine **automatische Reinigung** voraus.
- Eine definierte **Alterung der Abgasprobe** ist notwendig, um reproduzierbare und vergleichbare Messungen von Ultrafeinstaub zu ermöglichen.
- Derzeit fehlt eine **kompakte, standardisierte Einrichtung** zur kontrollierten Führung und Alterung der Abgasprobe, was einen wesentlichen Entwicklungs- und Normierungsbedarf darstellt.

Seite 13 01.03.2026 © Fraunhofer IBP

Intern

Maik Merkel, Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS)

Kalibrierung und Plausibilitätsprüfung von Partikelzählern im Labor- und Feldeinsatz

Maik Merkel
Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS)
Permoserstrasse 15
04318 Leipzig
Tel.: +49 (0)341 2717 7069
E-Mail: merkel@tropos.de

Keywords: Ultrafeine Partikel, CPC, Rückführbarkeit, Kalibrierung

Die Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration rückte in den vergangenen Jahren stärker in den Fokus der öffentlichen Wahrnehmung, auch vor dem Hintergrund der zukünftigen Messverpflichtung ultrafeiner Partikel an Standorten mit einer höheren UFP-Belastung. Somit spielt die Partikelanzahlkonzentration als Variable für die Luftqualität eine wichtige Rolle.

Partikelzählende Messgeräte werden bereits in vielen Netzwerken eingesetzt. Optische Partikelzähler haben allerdings den Nachteil, dass sie speziell den Bereich der ultrafeinen Partikel nicht abdecken. Gerade dieser Partikelgrößenbereich kleiner als 100 nm ist jedoch relevant für epidemiologische Untersuchungen, da sich UFPs negativ auf die menschliche Gesundheit auswirken können.

Um dies messtechnisch zu erfassen, werden weltweit Kondensationspartikelzähler (CPC) zur Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration eingesetzt. Das in den CPCs verwendete Butanol kondensiert auf den Partikeln, um sie zu vergrößern und optisch sichtbar zu machen, damit sie gezählt werden können. Da Partikelzähler in vielen unterschiedlichen Bereichen Anwendung finden, beispielsweise in der Atmosphärenforschung, der Luftqualitätsüberwachung oder der Emissionsprüfung, ist es notwendig, dass diese

Messinstrumente qualitätsgesichert werden und die gewonnenen Messdaten rückführbar sind. Das Weltkalibrierzentrum für Aerosolphysik (World Calibration Centre for Aerosol Physics - WCCAP) als eine Einheit des "Center for Aerosol In-situ Measurements-European Center for Aerosol Calibration and Characterization (CAIS-ECAC)", hat Standardverfahren für Atmosphärenobservatorien etabliert, um qualitativ hochwertige Messungen zu gewährleisten – einschließlich der durch Kondensationspartikelzähler bestimmten Partikelanzahlkonzentration.

Die Normen für CPCs wurden in eine EU-Norm übernommen, deren Fassung unter CN/EN 16976:2023 veröffentlicht wurde. Die erforderlichen Kriterien zur Einhaltung dieser CEN-Norm sind (1) die Zähleffizienz des Partikelzählers bei der Partikelprüfgröße von 40 nm muss mindestens 95 Prozent betragen sowie bei der Prüfgröße von 10 nm muss die Effizienz 50 Prozent erreichen, und (2) bei der Bestimmung der Anzahlkonzentration gegenüber dem Primärstandard darf die Abweichung nicht größer als 5 Prozent sein. Gleichzeitig wurde ein modellspezifischer Kalibrierfaktor eingeführt, um die Schließung zwischen der Zähleffizienz im Plateau des Zählers im Vergleich zum Primärstandard herzustellen.



Kalibrierung und Plausibilitätsprüfung von Partikelzählern im Labor- und Feldeinsatz

Maik Merkel, Kay Weinhold,
Alfred Wiedensohler, Mira Pöhlker

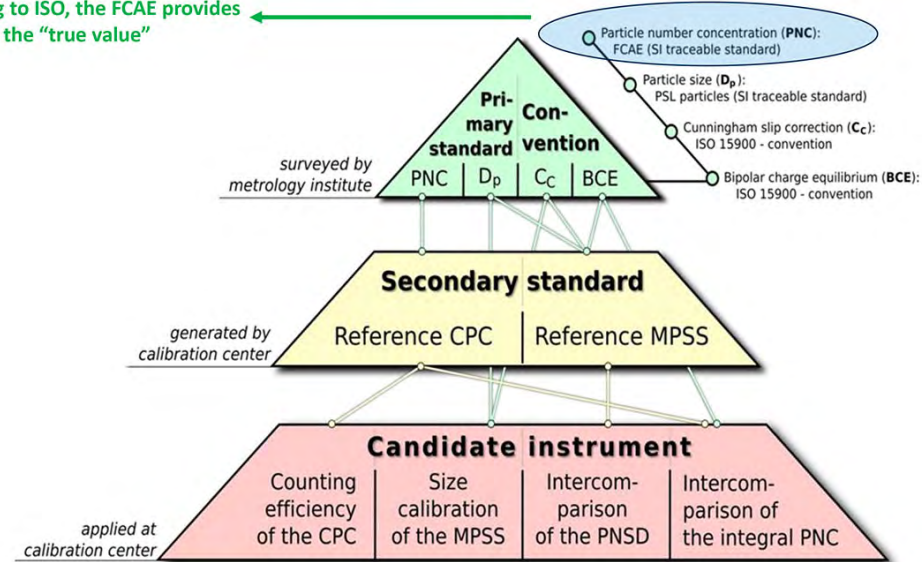
Logos: ACTRIS, WCCAP, ECAC, European Reference Laboratory for Air Pollution, ACMCC, EMC, CCC Cluster Calibration Center

Outline

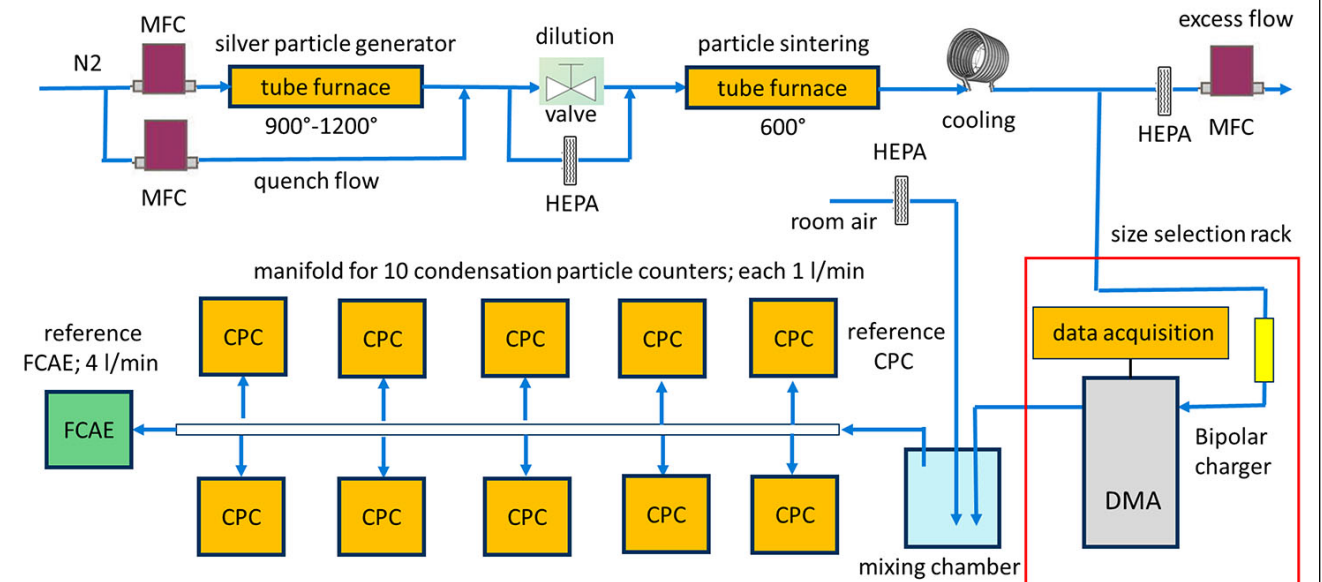
- Kalibrierung und Rückführbarkeit
- Rückführung der Partikelanzahl am Beispiel der CPC Kalibrierung
- Welche Qualitätssicherungsmaßnahmen können gemacht werden?
- Praktische Maßnahmen zur Plausibilitätsprüfung im Feldeinsatz

Kalibrierung und Rückführbarkeit der Partikelanzahl

According to ISO, the FCAE provides the "true value"



CPC Kalibrieraufbau



Rückführung der Partikelanzahl am Beispiel einer CPC Kalibrierung

CPC Kalibrieraufbau – WCCAP



CPC Zähleffizienzkurve – Messdaten

D _p (nm)	EL 3068B (#/cm ³)	Pulse Output							CPC Output	
		N[p] Pulses	N[i] Conc. (#/cm ³)	μ	N[i]*k Conc. (#/cm ³)	μ	N[a] Conc. (#/cm ³)	μ	Conc. (#/cm ³)	μ
40	1068	16603	1018	0.95	1059	0.99	1063	1.00	1066	1.00
30	1110	16975	1041	0.94	1083	0.98	1087	0.98	1090	0.98
20	1451	20678	1267	0.87	1318	0.91	1325	0.91	1330	0.92
14	1682	20251	1241	0.74	1291	0.77	1297	0.77	1301	0.77
11	1662	15109	926	0.56	963	0.58	967	0.58	971	0.58
10	1145	8649	531	0.46	552	0.48	553	0.48	555	0.48
9	1335	7433	456	0.34	474	0.36	475	0.36	477	0.36
8	1623	4810	295	0.18	307	0.19	307	0.19	308	0.19
7	1848	703	43	0.02	45	0.02	45	0.02	45	0.02

Keine interne Korrektur



Quality Assurance UFP @ ACTRIS-WCCAP



CPC Zähleffizienzkurve – Messdaten

D _p (nm)	EL 3068B (#/cm ³)	Pulse Output							CPC Output	
		N[p] Pulses	N[i] Conc. (#/cm ³)	μ	N[i]*k Conc. (#/cm ³)	μ	N[a] Conc. (#/cm ³)	μ	Conc. (#/cm ³)	μ
40	1068	16603	1018	0.95	1059	0.99	1063	1.00	1066	1.00
30	1110	16975	1041	0.94	1083	0.98	1087	0.98	1090	0.98
20	1451	20678	1267	0.87	1318	0.91	1325	0.91	1330	0.92
14	1682	20251	1241	0.74	1291	0.77	1297	0.77	1301	0.77
11	1662	15109	926	0.56	963	0.58	967	0.58	971	0.58
10	1145	8649	531	0.46	552	0.48	553	0.48	555	0.48
9	1335	7433	456	0.34	474	0.36	475	0.36	477	0.36
8	1623	4810	295	0.18	307	0.19	307	0.19	308	0.19
7	1848	703	43	0.02	45	0.02	45	0.02	45	0.02

Übereinstimmung

Berücksichtigung k-Faktor und
Koinzidenz

Quality Assurance UFP @ ACTRIS-WCCAP



CPC Zähleffizienzkurve – Messdaten

D _p (nm)	EL 3068B (#/cm ³)	Pulse Output							CPC Output	
		N[p] Pulses	N[i] Conc. (#/cm ³)	μ	N[i]*k Conc. (#/cm ³)	μ	N[a] Conc. (#/cm ³)	μ	Conc. (#/cm ³)	μ
40	1068	16603	1018	0.95	1059	0.99	1063	1.00	1066	1.00
30	1110	16975	1041	0.94	1083	0.98	1087	0.98	1090	0.98
20	1451	20678	1267	0.87	1318	0.91	1325	0.91	1330	0.92
14	1682	20251	1241	0.74	1291	0.77	1297	0.77	1301	0.77
11	1662	15109	926	0.56	963	0.58	967	0.58	971	0.58
10	1145	8649	531	0.46	552	0.48	553	0.48	555	0.48
9	1335	7433	456	0.34	474	0.36	475	0.36	477	0.36
8	1623	4810	295	0.18	307	0.19	307	0.19	308	0.19
7	1848	703	43	0.02	45	0.02	45	0.02	45	0.02

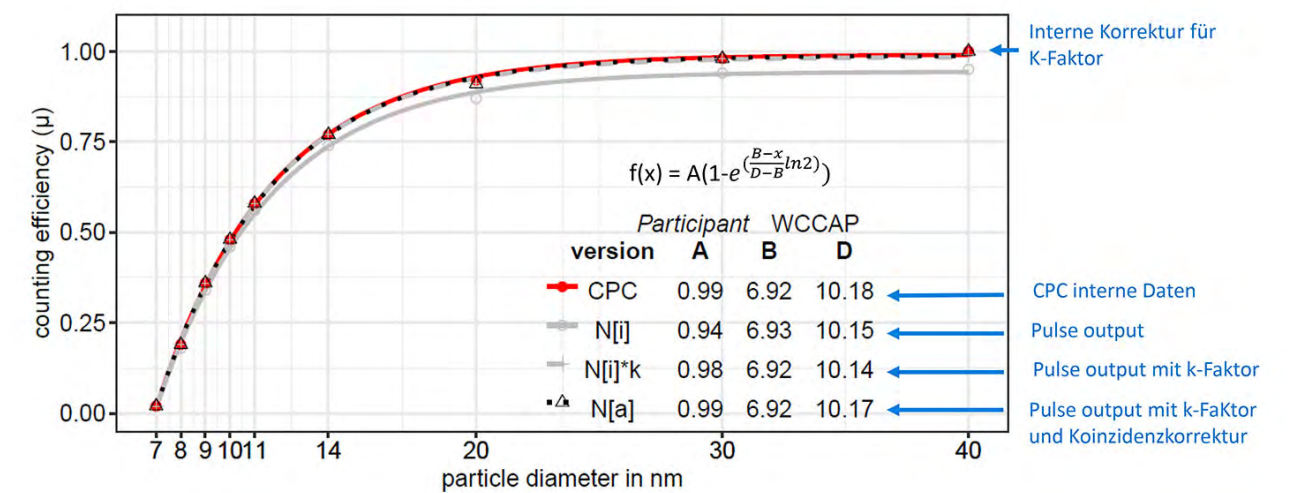
Berücksichtigung k-Faktor



Quality Assurance UFP @ ACTRIS-WCCAP



CPC Zähleffizienzkurve

Interne Korrektur für
k-Faktor

CPC interne Daten

Pulse output

Pulse output mit k-Faktor

Pulse output mit k-Faktor
und Koinzidenzkorrektur

Quality Assurance UFP @ ACTRIS-WCCAP



CPC Linearitätsprüfung – Messdaten

EL 3068B (#/cm ³)	Pulse Output						CPC Output	
	N[p]	N[i]		N[i]*k		N[a]	Conc. (#/cm ³)	μ
	Pulses	Conc. (#/cm ³)	μ	Conc. (#/cm ³)	μ	Conc. (#/cm ³)		
1076	16154	996	0.93	1036	0.96	1040	0.97	0.97
1866	27992	1726	0.93	1795	0.96	1808	0.97	0.97
4062	60158	3709	0.91	3857	0.95	3919	0.96	0.97
8250	120497	7429	0.90	7726	0.94	7979	0.97	0.97
12901	185336	11430	0.89	11887	0.92	12503	0.97	0.97
25376	349953	21571	0.85	22434	0.88	24792	0.98	0.98
50487	643817	39672	0.79	41259	0.82	50539	1.00	0.98

Übereinstimmung

Berücksichtigung k-Faktor und
Koinzidenz

Quality Assurance UFP @ ACTRIS-WCCAP



Problembehebung bei Minderbefund während der Kalibrierung

Temperaturjustierung

Cut-Off-Durchmesser

Intercomparison Results:

Performance Characteristics	Criteria	Candidate	Unit
Concentration response (linearity)	100% ± 5%	81	%
Detection efficiency at < 10 nm	$D_{50} = 10 \pm 1$ nm	9.5	nm
Detection efficiency at < 20 nm	≥ 90%	<u>88</u>	%
Detection efficiency at 40 ± 10 nm	≥ 95%	<u>94</u>	%

* bold = passed; underlined = failed

Linearität

Plateau-Effizienz

Reinigung/Wartung

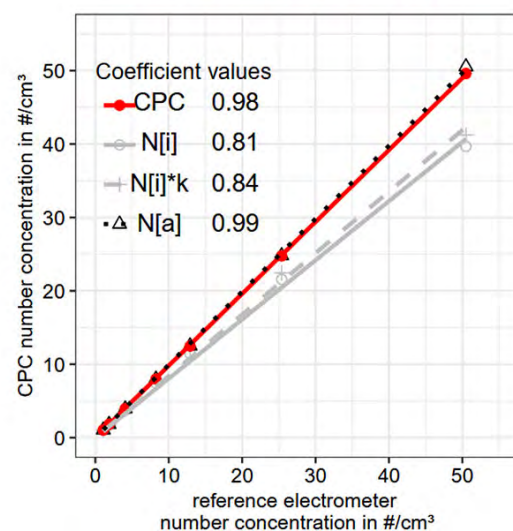


Quality Assurance UFP @ ACTRIS-WCCAP



CPC Linearitätsprüfung

Am Beispiel TSI CPC 3750-10



$$N_a = k \left(\frac{1}{c^2} \left(\frac{1}{N_i} - c \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{c^2} \left(\frac{1}{N_i} - c \right) \right)^2 - \frac{2}{c^2}} \right)$$

 N_a = corrected concentrations (particles/cm³) N_i = pulse concentrations (particles/cm³) k = k-factor: 1.04 for TSI CPC model 3750-10 c = coincidence parameter: $4.2e^{-06}$ 

Quality Assurance UFP @ ACTRIS-WCCAP



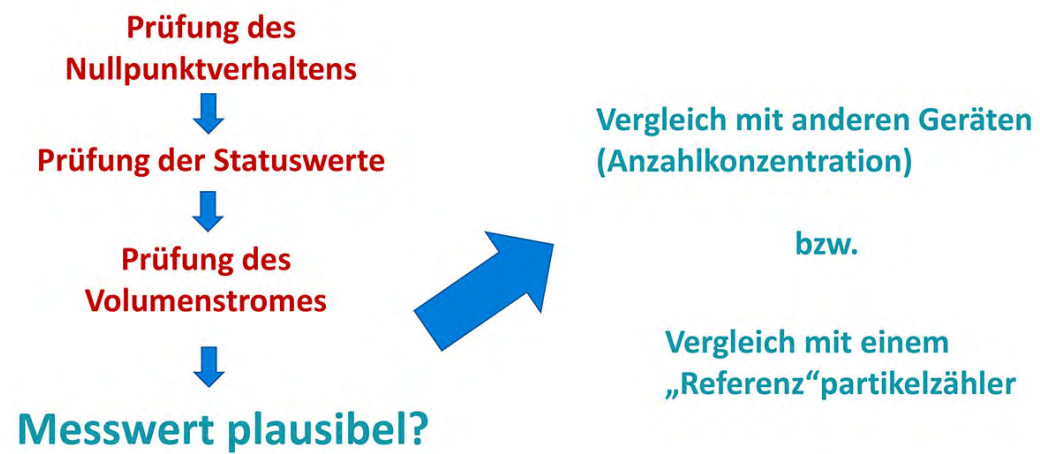
- Praktische Maßnahmen zur Plausibilitätsprüfung
im Feldeinsatz



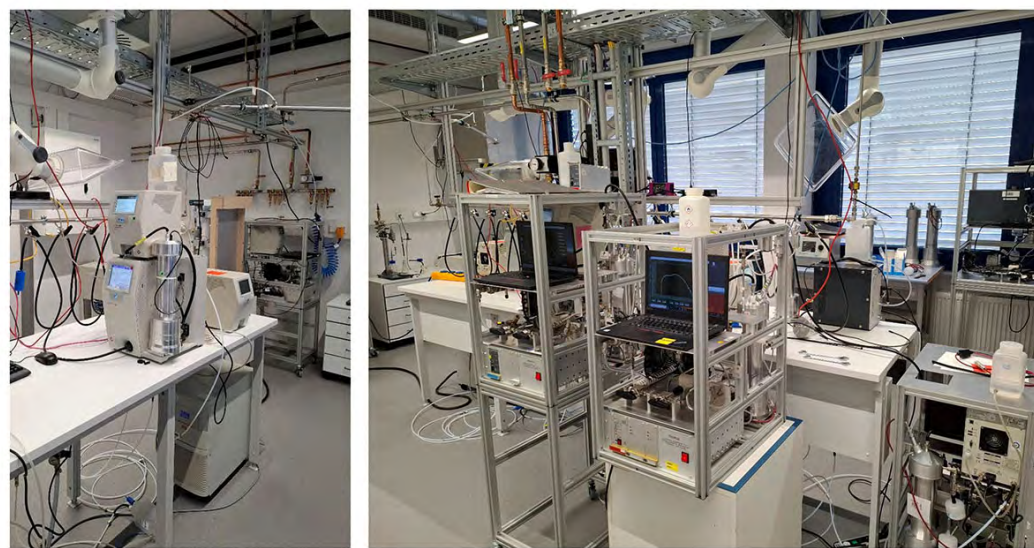
Quality Assurance UFP @ ACTRIS-WCCAP



Praktische Maßnahmen zur Plausibilitätsprüfung im Feldeinsatz



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!



Vinicius Berger, Catalytic Instruments GmbH & Co. KG

Vergleich von Anforderungen und Kalibriermethoden für Partikelanzahlmesssysteme verschiedener Emissionsquellen

Vinicius Berger, P.S. Bauer, M. Dollner, H.J. Schulz, J. Swanson, A. Boies

Catalytic Instruments GmbH & Co.KG

Zellerhornstraße 7,

83026 Rosenheim

Tel.: +49 (0)8031 9017770

E-Mail: info@catalytic-instruments.com

Keywords: Gesamtkohlenstoff, Partikelanzahlkonzentration, Emissionsbewertung, Holzfeuerungsanlagen

Emissionen der Holzfeuerung haben einen hohen Anteil volatiler Bestandteile. Dies macht es anspruchsvoll, mit hoher Wiederholgenauigkeit zu messen, da das Vorhandensein volatiler Partikel stark von den Umgebungsbedingungen der Messung abhängt (Druck, Temperatur, chemischer Gaszusammensetzung, Feuchte). Dabei kann die Konzentration volatiler Partikel oft die Konzentration der festen Partikel um das Mehrfache bis 10-fache überschreiten (sog. Nukleationsmode). In Kombination mit der hohen Variabilität der Entstehungsbedingungen volatiler Partikel ist ein wiederholbarer Messwert in vielen Fällen nur mit sehr großer Messunsicherheit möglich.

Dieses Messtechnikproblem ist aus dem Automotive-Bereich gut bekannt: es bestehen viele Jahre Erfahrung mit Messmethoden und -technik, die im messtechnisch ebenfalls anspruchsvollen Abgas von Verbrennungsmotoren Messresultate mit hinreichend großer Wiederholgenauigkeit vorweisen kann. Seit der Einführung der Abgasnorm Euro 5b im Jahr 2011 wurde die Messvorschrift rechtssicher definiert und seitdem erfolgreich angewendet. Höchste Wichtigkeit hat dabei die Definition des Volatile Particle Removers: ein regulatorisch eng gefasstes Verdünnungssystem mit beheizter Verdampfungsstrecke, dass der Entfernung von volatilen Partikeln dient. Die darauffolgend zu messenden Partikel werden als

fester Ruß im Sinne der Verordnung definiert. Es ergeben sich zwei Anreize, das Vorgehen aus anderen Messkategorien für die Emissionsbestimmung von Kleinfeuerungsanlagen zu übernehmen: zum einen ist die hinreichende Wiederholbarkeit der Messsysteme bereits bestätigt. Zum anderen ist durch die Messung mit derselben Methode der Vergleich der Ergebnisse weit aus einfacher und ergiebiger. Es bleibt zu klären, ob die unsichere Wiederholbarkeit des Musterbrennstoffs Holz als Naturprodukt im Gegensatz zu Normkraftstoff als chemisches Produkt zu einer erhöhten Messunsicherheit beiträgt.

Die hier beschriebene Arbeit gibt einen Überblick über Anforderungen an Partikelanzahlmesssysteme aus verschiedenen Emissionskategorien sowie die Kalibriervorschriften dieser Messsysteme. Darüber hinaus zeigen die Autoren die Vorteile einer Harmonisierung dieser Kalibriermethoden auf. Abschließend wird ein Partikelgenerator vorgestellt, welcher sich u. A. aufgrund der einfachen Bedienbarkeit, hohen Stabilität und Wiederholbarkeit der Aerosolerzeugung sehr gut als Prüfaerosol-Generator einsetzen lässt.



Vergleich von Anforderungen und Kalibriermethoden für Partikelanzahlmesssysteme verschiedener Emissionsquellen

V. Berger, P. S. Bauer, M. Dollner, H.-J. Schulz, A. Boies, J. Swanson

Catalytic Instruments GmbH & Co.KG

5. Fachgespräch "Staubmessverfahren an Kleinfeuerungsanlagen", DBFZ, Leipzig, 3. Februar 2026

Catalytic Instruments
hot technologies · clean solutions

Motivation

• Feinstaub ist schädlich

- kurzfristig
 - Erhöhung von Entzündungswerten im Körper, Verschärfung von z. B. Asthma-Beschwerden
- mittelfristig
 - Lungenerkrankungen, Bluthochdruck
- langfristig
 - Global Warming Potential von Ruß durch Absorption von Sonnenlicht

⇒ Emission von Feinstaub minimieren

⇒ Emissionen messen

⇒ Wie? Welche Metrik?

Partikelmasse
Partikelanzahl
Partikeloberfläche
Lungenabsorbierte Oberfläche
Black Carbon (BC) / Elemental Carbon (EC)
Optische Metriken

Catalytic Instruments
hot technologies · clean solutions

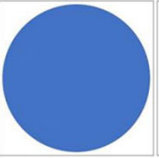
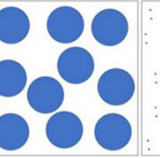
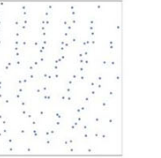
5. Fachgespräch "Staubmessverfahren an Kleinfeuerungsanlagen"

Motivation

- Erfahrungsaustausch
 - Insbesondere was gut funktioniert = PMP-Protokoll
 - Fahrzeugflottenemissionen sinken konstant, neueste Verbrennerfahrzeuge können fahrende Feinstaubfilter sein
 - ⇒ Reglementierung funktioniert!
 - Diese muss allerdings rechtssicher sein ⇒ Wiederholbarkeit
- Wiederholbarkeit von Messergebnissen
- Vergleichbarkeit von Messergebnissen
- Verringerung von Aufwand und Kosten für die Messtechnik durch Harmonisierung von Standards und Methoden

Wieso Partikelanzahl?

- Je kleiner die Partikel, desto tiefer dringen sie in den Körper ein; daher werden kleinere Partikel als gefährlicher eingeschätzt
 - Die Oberfläche der Partikel hat einen Einfluss
- PM-Emissionen von Fahrzeugen konnten bis zur Nachweisgrenze (der vorgeschriebenen Filtermethode) reduziert werden – gleichzeitig stieg die PN-Emission stark an
 - zusätzliche PN-Reglementierung eingeführt (Euro 5b Diesel, 1. September 2011)

	10 µm (Coarse)	2.5 µm (Fine)	0.1 µm (Ultrafine)
			
Total mass	1	1	1
Particle number	1	64	1,000,000
Surface area per particle	1	0.0625	0.0001
Total surface area per mass	1	4	100
	• Filtered in proximal airway • May irritate skin, mucosa	• Reaches peripheral airway • Cannot enter systemic circulation	• Higher adsorbed toxic material on surface • May enter systemic circulation

Schwarz, 28th ETH NPC 2025, Zürich

Emissionsquellen

- Kraftwerke
- Fahrzeuge
- Flugzeuge
- Heizungen
- Kaminöfen



Unvollständige
Verbrennung von
Kohlenwasserstoffen

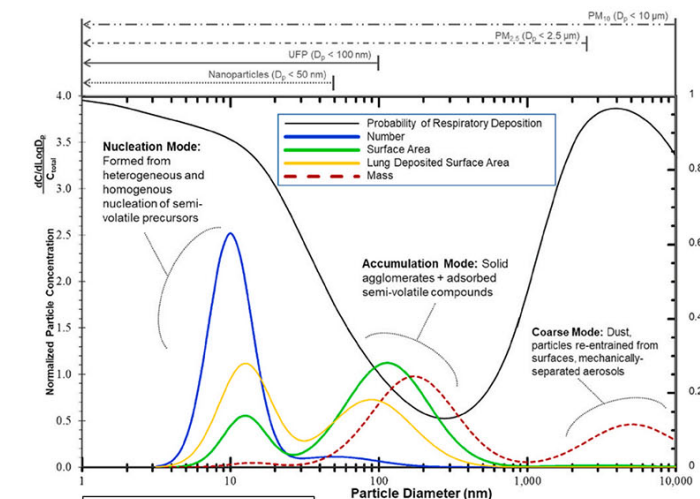


Vielzahl an
Schadstoffen

Hier im Fokus: **Partikelanzahl**
(Particle Number, PN)

Partikelemissionen

Typische Dieselmotor-Partikelemissionen



Kittelson et al., 2022

- Phänomen der drei Partikelmoden zutreffend für viele Verbrennungsprozesse
- U. A. Schwefelanteil* im Brennstoff bzw. Abgas befördert Bildung von Partikeln in der **Nukleationsmode** (< 20 nm):
 - Semi-flüchtige Partikel, stark von Umgebungsbedingungen (p, T, rh) abhängig
 - Deren Partikelanzahl typischerweise ein Vielfaches der Akkumulationsmode (≈ 2-50x)

⇒ schlechte Wiederholbarkeit
Lösung: Messung der non-volatilen Partikelanzahl

*= Kraftstoff 10 ppm, Holz 100 – 2000 ppm, Umweltforschungsplan UBA, 2006

Partikelemissionen nach Particle Measurement Programme

• Volatile Particle Remover (VPR)

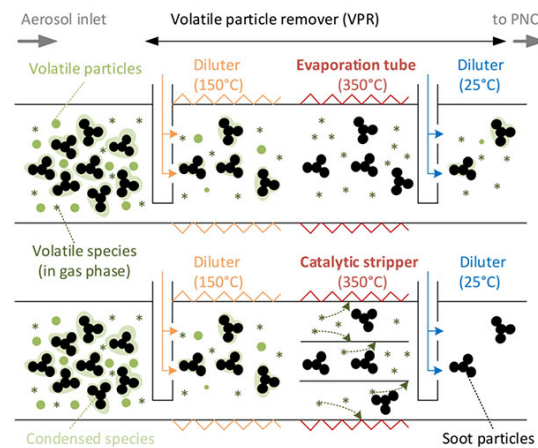


Figure 1. Schematic of volatile particle removers based on evaporation tube (upper panel) and catalytic stripper (lower panel). PNC = particle number counter.

Giechaskiel et al., 2020

• Messung der non-volatilen Partikelanzahl („Solid Particle Number“)

• Funktionsprinzip:

- Heiße Verdünnung des Abgases
- Aufheizen auf 350 °C, Catalytic Stripper
- Abkühlen auf 25 °C

• Wiederholbarkeit seit 2011 bestätigt für PKW- & LKW-Abgas (UNECE R83 & R49)

• Adaptiert in andere Abgasgesetzgebung weltweit

• Adaptiert auf mobile Emissionsmessung

- Real Driving Emissions (01.09.2017)

• Adaptiert auf andere Emissionsquellen

- Flugzeugemissionen (01.01.2023)
- Bremsenemissionen (Euro 7, Nov. 2026)



Anforderungen an PN-Messsysteme PTI

Partikelgröße	23 nm	30 nm	50 nm	70 nm	100 nm	200 nm
Zähleffizienz mindestens	20 %	30 %	60 %	70 %	70 %	50 %
Zähleffizienz maximal	60 %	120 %	130 %	130 %	130 %	200 %

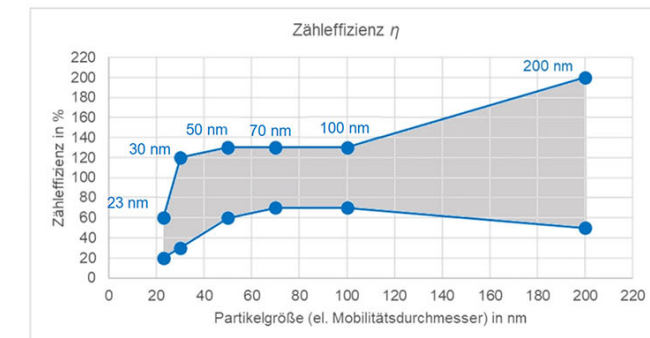


Abbildung: Bereich der geforderten Zähleffizienz für verschiedene Partikelgrößen. Dieser liegt zwischen den beiden Kurven. Zwischen zwei benachbarten Partikelgrößen wird linear interpoliert.

PTB-A 12.16, 2021

• Periodical Technical Inspection (= Hauptuntersuchung PKW)

- Bisher nur Dieselfahrzeuge ab Euro 6, Machbarkeit für Ottomotoren in Prüfung
⇒ Erkennung defekter Dieselpartikelfilter

• Abscheideeffizienz volatiler (nicht-fester) Partikel > 90 %

• Zähleffizienzkurve (Graph links)

- Diffusionsladungs-basiert oder kondensationskernzählerbasiert

• Verdünnung (um Maximalzählrate des Zählers nicht zu überschreiten)

- Nicht vorgeschrieben, resultierende Zählrate 5000 – 500 000 #/cm³

Anforderungen an PN-Messsysteme PMP

• Abscheideeffizienz volatiler (nicht-fester) Partikel

- > 99 % bzw. > 99.9 % Abscheidung von C₄₀H₈₂ (Tetracontan) für PMP-Systeme

• Partikelzählung mittels Kondensationskernzähler (CPC)

- Zähleffizienzkurve (= welche Partikelgrößen werden gemessen)
• Untere Grenze, z. B. 23 nm, 10 nm (z. B. UN GTR 15 = SPN10 & SPN23)

• Verdünnung (um Maximalzählrate des Zählers nicht zu überschreiten)

- Minimum 1:100

• Charakterisierung der Partikelverluste im Verdünnungssystem

- Particle Count Reduction Factor, PCRF; zu bestimmen bei 30, 50 und 100 nm

Anforderungen an PN-Messsysteme Blauer Engel Kaminöfen

Bestimmungseffizienz	
Partikelgröße [nm]	Effizienz
23 +/- 5 %	0,2 – 0,6
50 +/- 5 %	0,6 – 1,3
80 +/- 5 %	0,7 – 1,3

Das Umweltzeichen Blauer Engel, Kaminöfen für Holz, DE-UZ 212, 2020

Zum Vergleich PTI:

Partikelgröße	23 nm	30 nm	50 nm	70 nm	100 nm	200 nm
Zähleffizienz mindestens	20 %	30 %	60 %	70 %	70 %	50 %
Zähleffizienz maximal	60 %	120 %	130 %	130 %	130 %	200 %

• Reglementierung der PN-Emission von Kaminöfen in der EU-Richtlinie EcoDesign 2027?

• Warum nur ähnlich, und nicht identisch zu PTI?

- Harmonisierung spart Aufwand und Geld

• In Anlehnung an die Schweizer Verordnung SR 941.242

• Partikelzählung mittels Kondensationskernzähler ab 23 nm

- oder andere Systeme mit Nachweis der Äquivalenz

• Abscheideeffizienz volatiler Partikel (Tetracontan) > 90 %

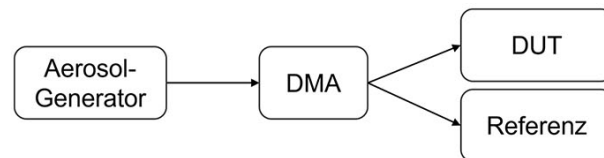
- Thermodenuder oder Catalytic Stripper

• Zähleffizienzkurve (Tabelle links)

• Verdünnung (um Maximalzählrate des Zählers nicht zu überschreiten)

- Nicht vorgeschrieben, resultierende Zählrate im kalibrierten Bereich

Kalibriermethoden



- Kalibrierung durch Vergleich der Messergebnisse Device Under Test und Referenz
 - Monodispers, d. h. eine Partikelgröße pro Messpunkt; z. B. 23, 30, 50, 80, 100 nm
 - Polydispers, d. h. das Aerosol besteht aus einer Größenverteilung von Partikeln
 - Definition über mittlere Größe
- Welches Kalibriermaterial?
- Welcher Aerosolgenerator?

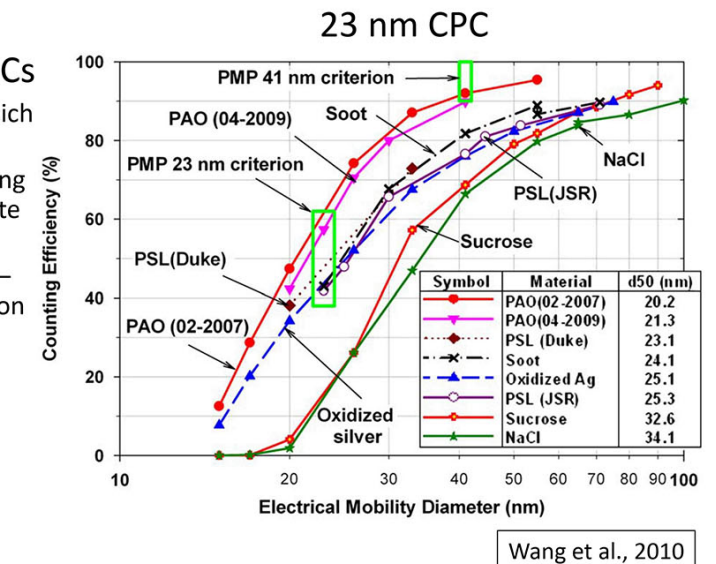
Welches Kalibriermaterial?

- Das Material beeinflusst die Zähleffizienzkurve von 23 nm - CPCs

- Ruß (schwarz) und Silber (blau) verhalten sich ähnlich
- Silber wird seit vielen Jahren zur Kalibrierung von CPCs eingesetzt (metrologische Institute weltweit, TROPOS, etc.)
- Silber ist Kalibriermaterial in der EN16976 – Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration in Außenluft (Immissionsmessung)

- Das Material beeinflusst ladungsbasierte Zähler

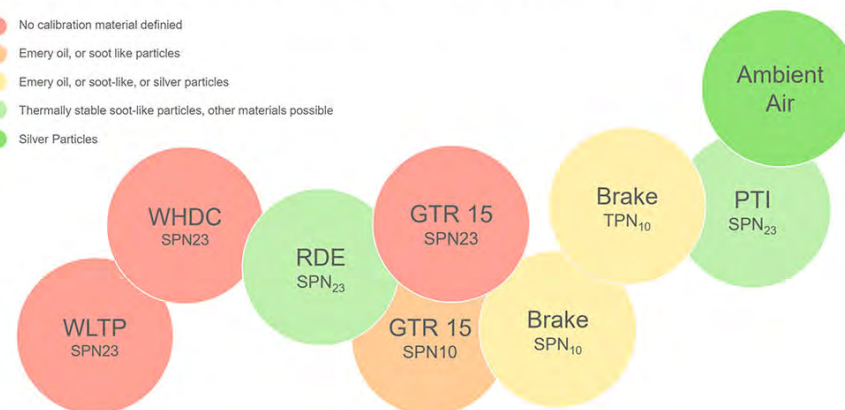
- Vasilatou et al. (METAS), 2023



Welches Kalibriermaterial?

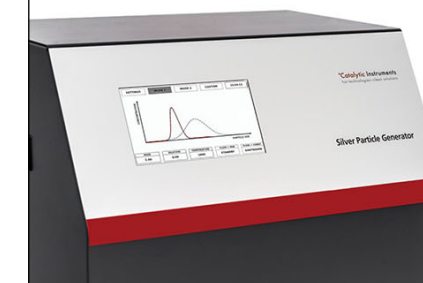
Calibration Materials Not Harmonized

- No calibration material defined
- Emery oil, or soot like particles
- Emery oil, or soot-like, or silver particles
- Thermally stable soot-like particles, other materials possible
- Silver Particles



Harmonisierung von Standards und Methoden

- PMP-Gruppe unternimmt momentan einen europaweiten Messgerätevergleich, um die Kalibriermaterialien Emery Oil, Ruß und Silber zu vergleichen; Abschluss in diesem Jahr
- PTB und Catalytic Instruments haben ein gemeinsames Projekt gestartet, um Silber als Kalibriermaterial für möglichst viele Standards zu ermöglichen
 - Aerosolerzeugung mit dem Silber Particle Generator (SPG)



⇒ großes Potential für Harmonisierung von Standards und Methoden

- Bessere Vergleichbarkeit von Messergebnissen von Emission und Immission
- Verringerung von Aufwand und Kosten

Zusammenfassung

- Die Messung der non-volatilen Partikelanzahl ist ein etablierter Standard mit hoher Wiederholbarkeit für die Vermessung von komplexem Abgas
- Eine Reglementierung von Kaminöfen in derselben Metrik bietet mehrere Vorteile:
 - Bessere Wiederholbarkeit der Messergebnisse, dadurch größere Rechtssicherheit
 - Bessere Abbildung des Gesundheitsrisikos aufgrund höherer Gefährlichkeit kleinerer Partikel, welche von der PM-Messung nahezu nicht erfasst werden
 - Bessere Vergleichbarkeit zu anderen Emissions- und Immissionsmessungen
 - Die Methodik ist durch das Umweltzeichen Blauer Engel Kaminöfen sowie PTI-Messungen erprobt
- Generell besteht großes Potential für Harmonisierung von Standards und Methoden
 - ⇒ Bessere Vergleichbarkeit von Messergebnissen von Emission und Immission
 - ⇒ Verringerung von Aufwand und Kosten

Silver Particle Generator (SPG)



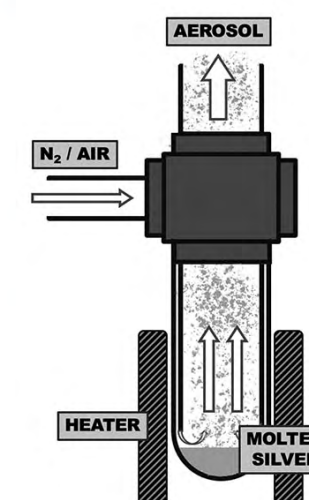
- Standardize and simplify the evaporation-condensation generation method
- Precise, fast and easy control of temperature and flow
- Stable and high repeatability
- Different materials are possible
- Simple exchange of tube set

Vielen Dank!

Vinicius Berger
Zellerhornstr. 7
D-83026 Rosenheim
vinicius.berger@catalytic-instruments.com

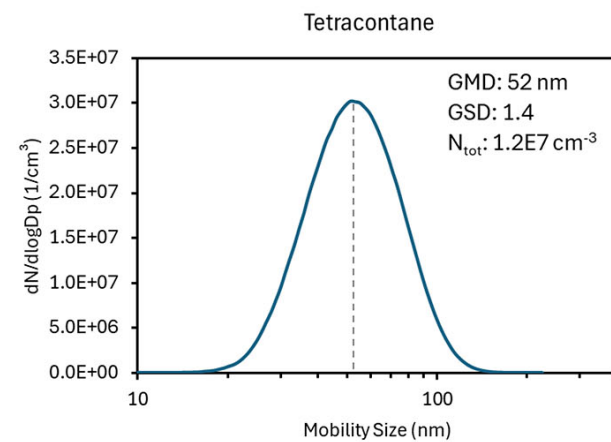


SPG Tube Set



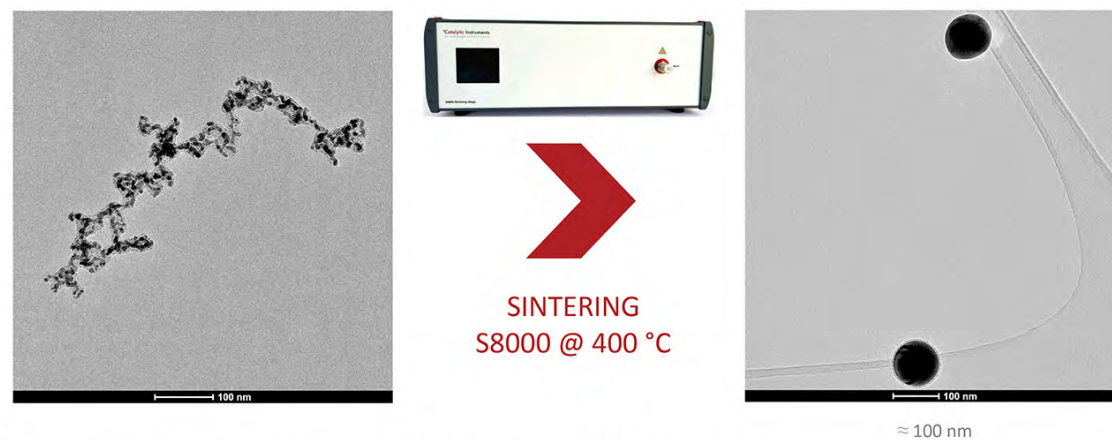
- Ceramics (Alumina) Tubes
- Cleaned by baking
- Tube set for each material possible

Low Temperature Materials (up to 300 °C)



- Tetracontane ($\text{C}_{40}\text{H}_{82}$)
 - PMP Volatile Particle Remover Testing
 - Testing our own Catalytic Strippers (CS)
- Plastics
(similar as Wlasits *et al.*, 2022)

Silver particles



- solid, rather unreactive, normally insoluble
- can be formed to a thermally stable and compact sphere (sintering)

Session:

Praktische Erfahrungen
mit unterschiedlichen
Staubmessverfahren

Claudia Schön, Technologie- und Förderzentrum (TFZ)

LangEFeld – Partikelanzahlmessung nach einem elektrostatischen Staubabscheider bei alternierendem Abscheiderbetrieb

Claudia Schön, Nico Opitz, Dr. Hans Hartmann
Technologie- und Förderzentrum (TFZ)
Schulgasse 18
94315 Straubing
Tel.: +49 (0)9421 300-152
E-Mail: Claudia.schoen@tfz.bayern.de

Keywords: elektrostatische Staubabscheider, Partikelanzahlmessung

Im Rahmen des Projekts „LangEFeld“ wurden Messungen am Prüfstand des TFZ nach DIN/TS 33999-1: 2025 durchgeführt: Bei den gravimetrischen Staubmessungen vor und nach dem Staubabscheider zeigte sich, dass die Abscheidegrade eine große Schwankungsbreite über einen Messtag aufwiesen. Außerdem waren die gemessenen gravimetrischen Abscheidegrade eher niedrig bei durchschnittlich 25 %. Um den Einfluss der Abscheidewirkung auf die Partikelanzahl durch die Messstrecke bzw. den Schornstein auszuschließen, wurde ausschließlich nach dem Abscheider die Partikelanzahl mit CPC und ELPI ermittelt.

Damit dennoch der Vergleich zwischen Roh- und Reingas erfolgen konnte, wurde der Abscheider über den Abbrand in zuvor definierten Zeitintervallen ein- bzw. ausgeschaltet. Die Messungen zeigen, dass bezogen auf die Partikelanzahl mit CPC oder ELPI der Abscheidegrad bei gutem und schlechtem Abgasstaubzustand im Mittel bei über 90 % lag. Es ist jedoch auf eine geeignete Auswertung zu achten, um Übergangsphasen nicht in die Auswertung aufzunehmen. Ein klarer Vorteil beim alternierenden Abscheiderbetrieb liegt in der geringeren Messtechnik und die Effekte, welche durch die Messstrecke bedingt sind, werden gezielt ausgeschlossen.



Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum
für Nachwachsende Rohstoffe



Partikelanzahlmessung nach einem elektrostatischen Staubabscheider bei alternierendem Abscheiderbetrieb

5. Fachgespräch „Staubmessverfahren an Kleinfeuerungsanlagen“

Vortrag am 03.02.2026 in Leipzig

Claudia Schön, Nico Opitz

P 26 B So 004

Inhalt

- Hintergrund
- Methodisches Vorgehen
- Ergebnisse
- Zusammenfassung und Empfehlung

P 26 B So 004

Folie 2
Schön



Hintergrund

- Gravimetrische Bestimmung der Staubemissionen zeigt teilweise Staubbemehrung nach einem aktiven elektrostatischen Staubabscheider aufgrund der Flockenbildung bzw. Re-Entrainment → zeigt nicht die Wirkung eines Staubabscheiders auf die Feinstaubemissionen
- Schwankende Abscheidegrade bei Messungen an Kaminöfen nach DIN/TS 33999-1:2025

Deswegen:

Messung der Partikelanzahl nach einem Staubabscheider durch alternierenden Betrieb, um mit einem Messgerät valide Abscheidegrade ermitteln zu können

P 26 B So 004

Folie 3
Schön

Methodisches Vorgehen (2)

- Kaminofen wurde mit 2 Abbränden aufgeheizt (Abscheider aus)
- Kaminofen sachgemäß (gut) bzw. unsachgemäß (schlecht) für höhere Staubemissionen betrieben
- Zwischen Feuerung und Messstrecke für Abscheider war eine Abkühlstrecke von ca. 4,5 m integriert
- Abscheider Ein bzw. Aus beim Nachlegen, um Einfluss zu berücksichtigen
- Messbereiche:
 - CPC: 23 – 1.000 nm
 - ELPI: 9 – 10.000 nm, aber nur 26-1224 nm berücksichtigt

P 26 B So 004

Folie 5
Schön

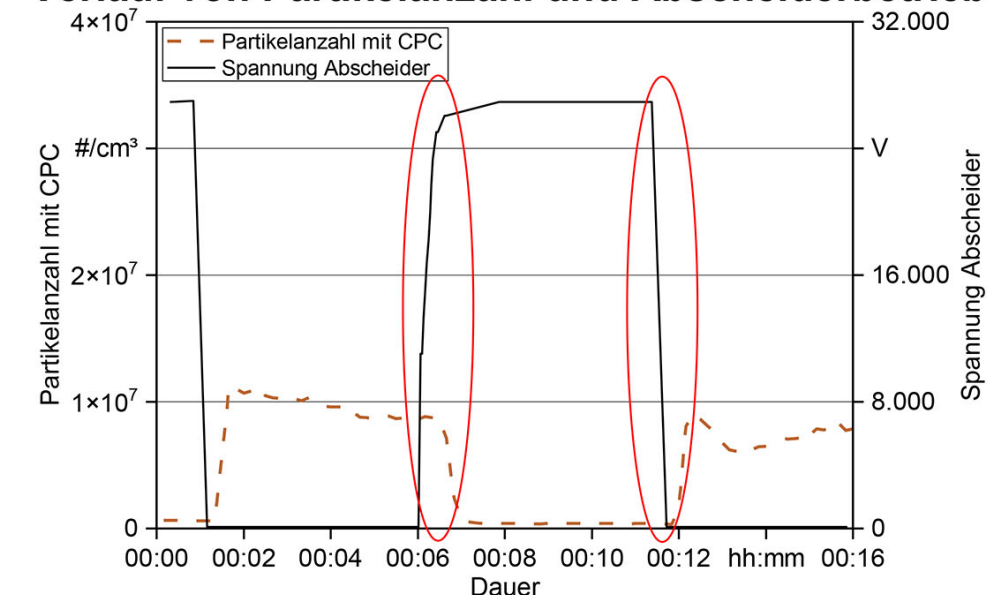
Methodisches Vorgehen (1)

- Partikelzählende Messverfahren (CPC und ELPI) nach dem Abscheider in die Reingas-Messstrecke integriert
- keine simultane Messung vor und nach dem Abscheider → Effekte von Blindabscheidung oder Anzahlveränderung über Messstrecke haben keinen Einfluss auf das Ergebnis → Vorteil!
- Alternierender Betrieb des Abscheiders durch Ein- bzw. Ausschalten der Hochspannung am Staubabscheider alle 5 bzw. 3 Minuten

P 26 B So 004

Folie 4
Schön

Verlauf von Partikelanzahl und Abscheiderbetrieb – 5 Minuten

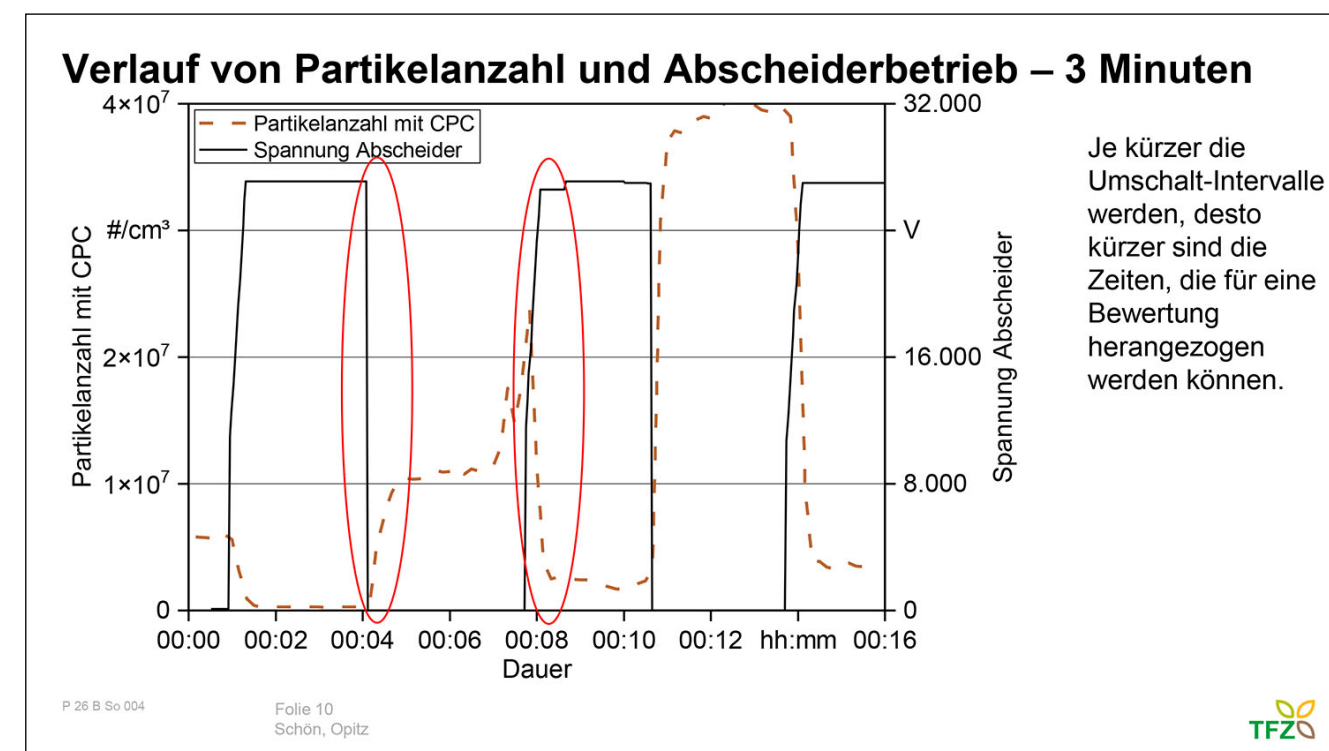
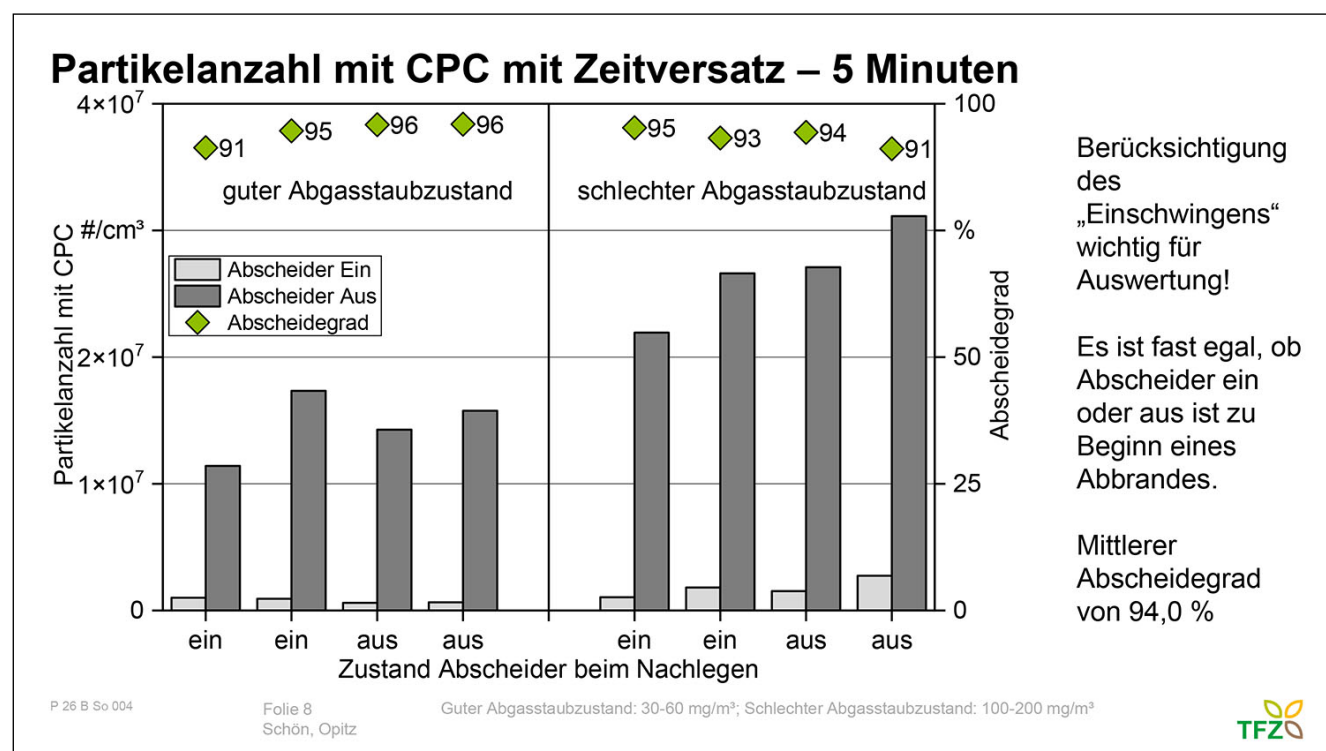
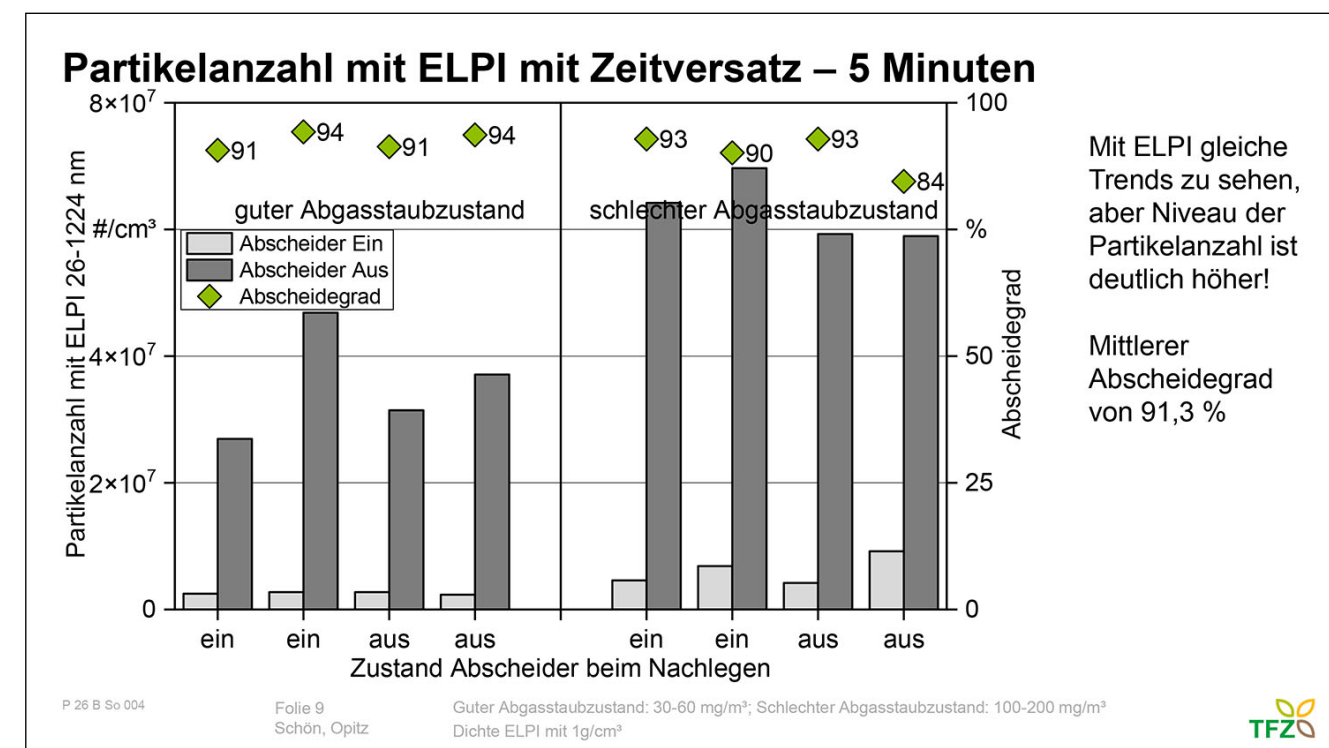
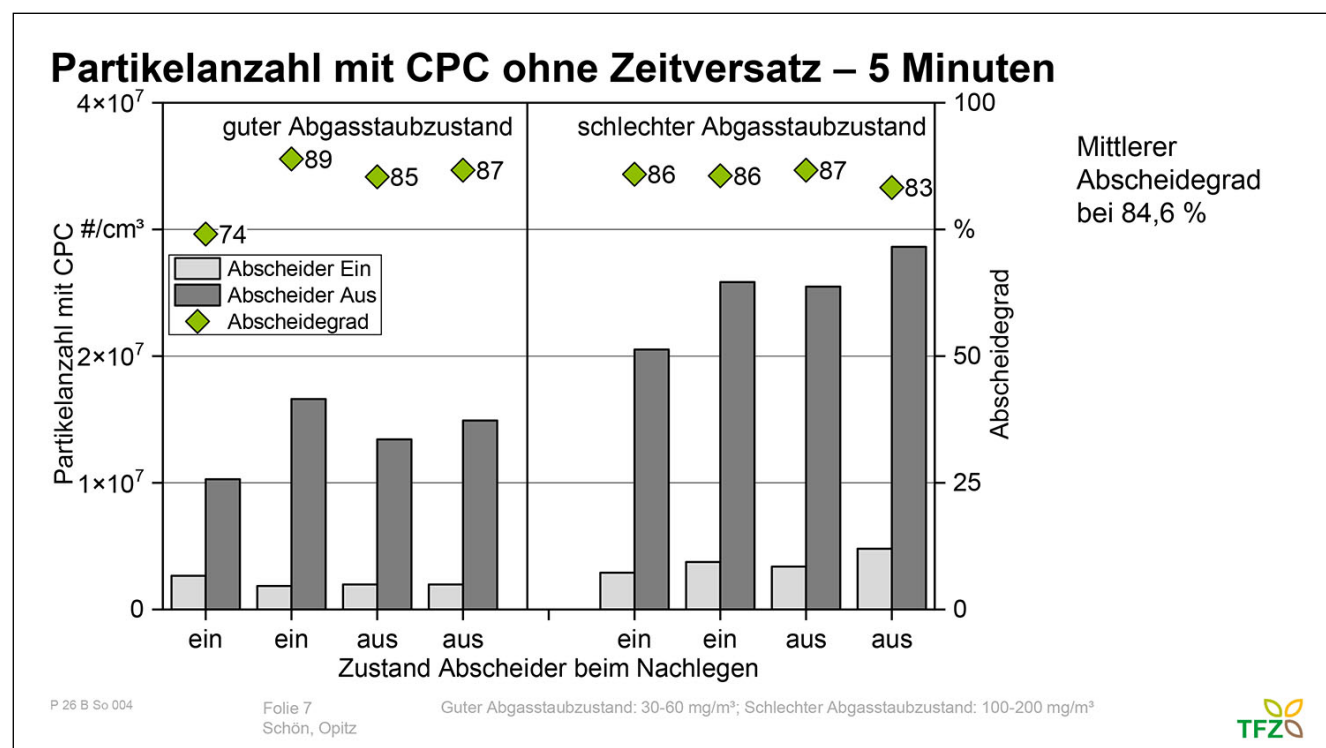


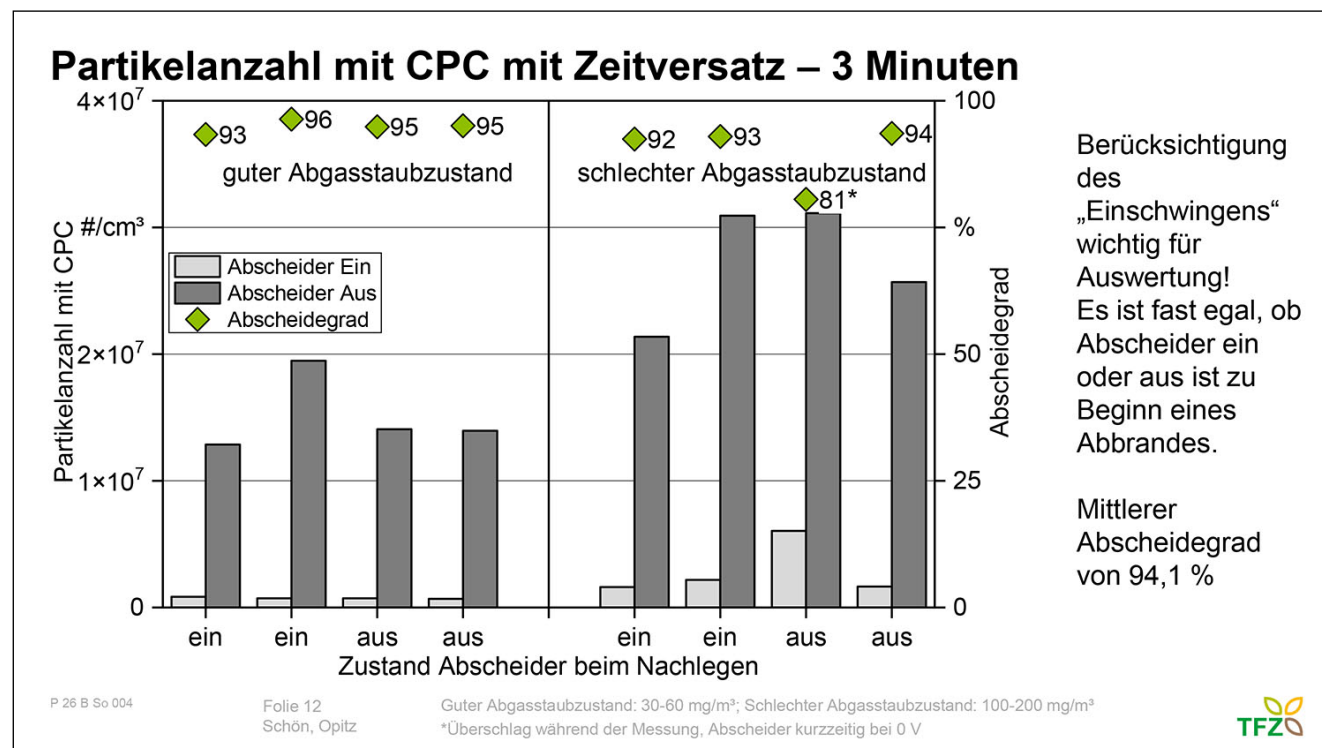
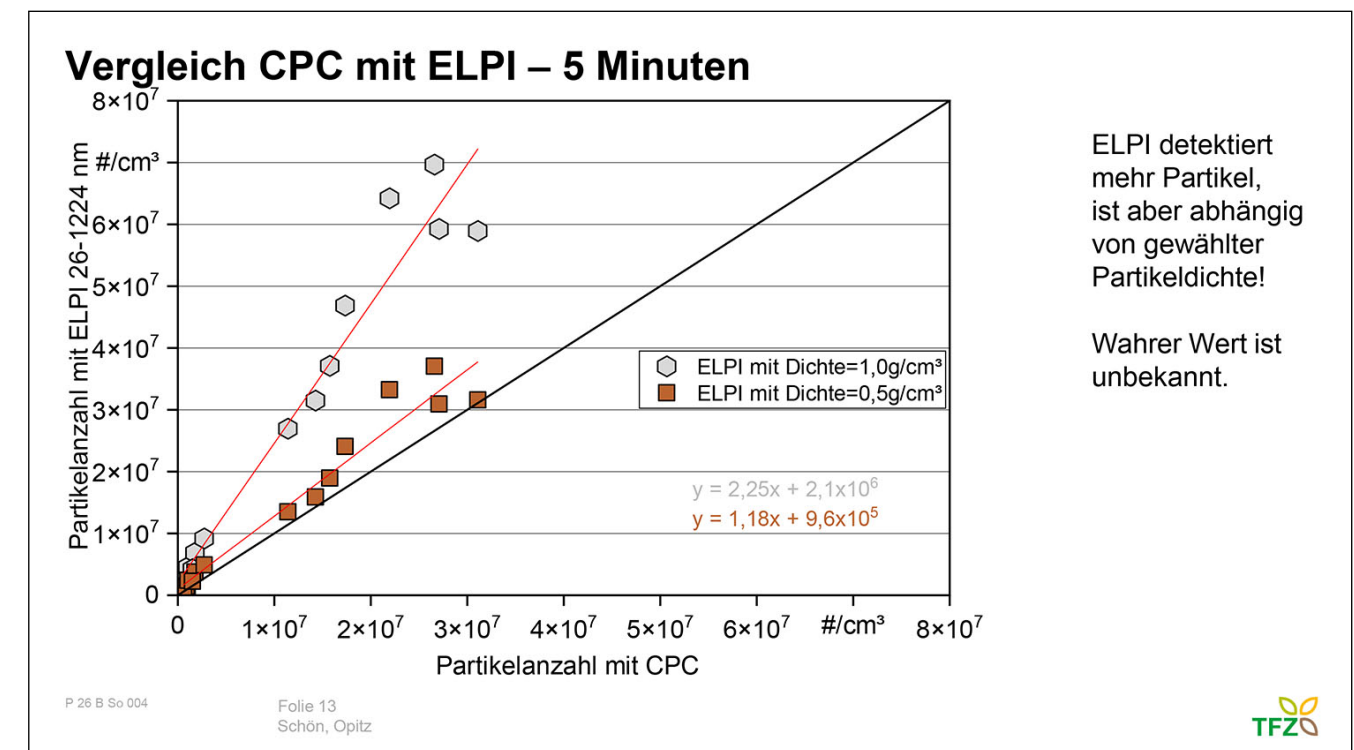
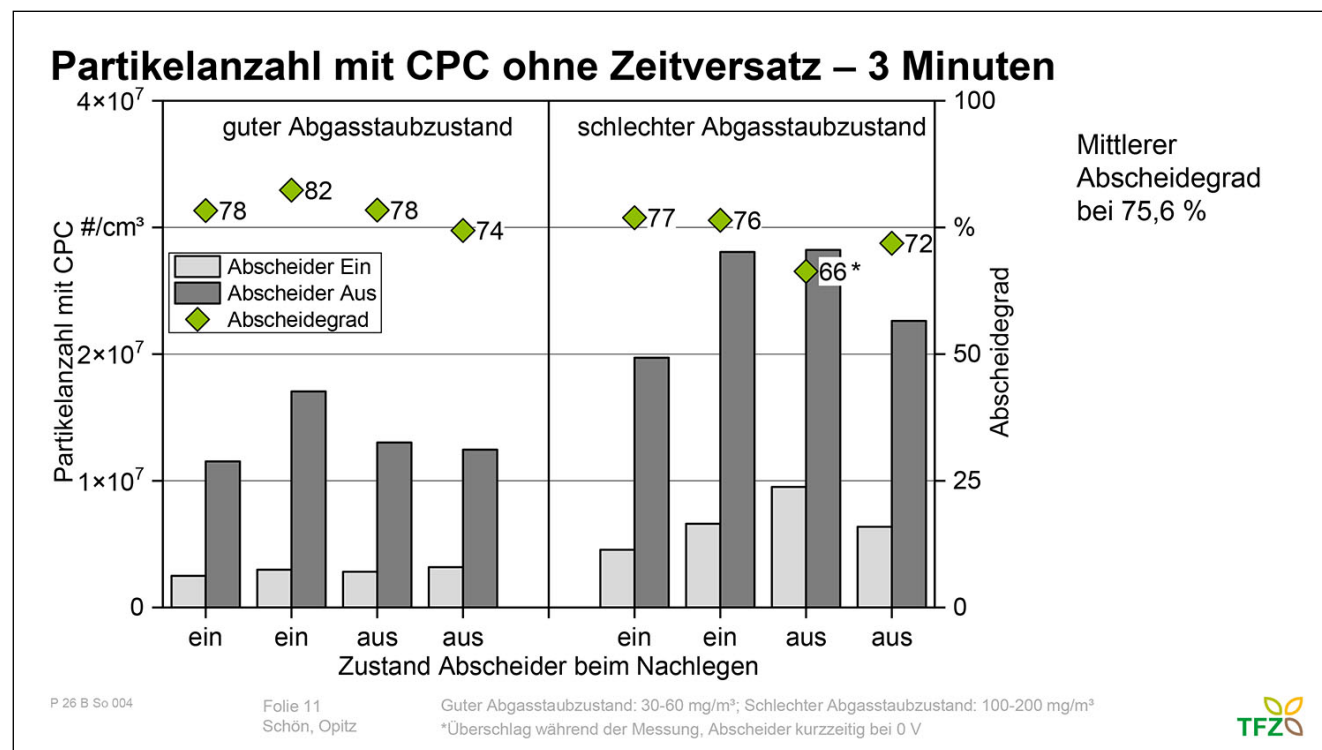
Zeitversatz zwischen Abscheider Ein/Aus bis sich Partikelanzahl am CPC ändert liegt bei ca. 1 Minute.

Zeitversatz sollte für den jeweiligen Aufbau bestimmt werden! Nicht universell!

P 26 B So 004

Folie 6
Schön, Opitz





Zusammenfassung

- Partikelzählung mit CPC und ELPI durchgeführt → bestätigen Wirksamkeit von elektrostatischen Staubabscheidern in vergleichbarer Größenordnung
- Beide zählenden Messverfahren nicht validiert → Validierung für Absolutwerte relevant, weniger beim Abscheidegrad (da relativ)
- Messung nach Abscheider durch EIN/AUS-Betrieb geeignet, somit keine Einflüsse vorgelagerter Messstrecken im Ergebnis enthalten, nur ein Gerät notwendig = Vorteil!
- Intervall von ca. 5 Minuten kann empfohlen werden, „Zeitversatz“ ist zu berücksichtigen!



Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum
für Nachwachsende Rohstoffe



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Claudia Schön
Abteilung Biogene Festbrennstoffe
Technologie- und Förderzentrum
Im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)
Schulgasse 18
94315 Straubing
Tel.: +49 9421 300-152
Fax: +49 9421 300-211
Claudia.schoen@tfz.bayern.de
www.tfz.bayern.de

Projektseite LangEFeld:
<https://www.tfz.bayern.de/biogenefestbrennstoffe/projekte/325102/index.php>




Gefördert durch:



Bundesministerium
für Landwirtschaft, Ernährung
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



P 26 B So 004
Folie 15

Miriam Müller, Deutsches Biomasseforschungszentrum

Vergleich der Messung von Partikelanzahl und -größenverteilung von verschiedenen Messgeräten an einem Kaminofen

Dr. Mirjam Müller¹, Claudia Schön²

¹ DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Torgauer Str. 116 04347 Leipzig

Tel.: +49 (0)341 2434-473

E-Mail: mirjam.mueller@dbfz.de

² Technologie- und Förderzentrum Straubing

Keywords: Biomasseverbrennung, Kaminofen, Partikelanzahl

Im Rahmen von Vergleichsmessungen mit partikelzählenden Messverfahren wurden zwei Feuerungen eingesetzt und direkt in einer Messstrecke nach dem Kaminofen gemessen. Es wurde der Kaminofen Typ Jupiter der Firma Wamsler sowie der 7 kW-Kaminofen Sino L der Firma Spartherm verwendet. Bei der Auswertung der Messergebnisse sind die verschiedenen gerätespezifischen Charakteristika zu beachten. Die CPC-Geräte haben eine stark abfallende Zählfizienz bei Partikeln unter 20 nm. Auch die Plateau-Zählfizienz bei größeren Partikeln kann für jedes Gerät abhängig vom Wartungszustand des Gerätes unterschiedlich sein. Weiterhin sind die unterschiedlichen Messbereiche zu beachten.

Das ELPI gibt eine höhere Anzahlkonzentrationen aus als die Kondensationspartikelzähler (SMPS und einfacher CPC) aufgrund der unterschiedlichen Messbereiche bei den Partikelgrößen und verschiedener Messverfahren. Das ELPI misst den aerodynamischen Durchmesser im Gegensatz zum elektrischen Mobilitätsdurchmesser bei den CPCs. Es ist jedoch eine Anpassung der Messergebnisse beim ELPI in Abhängigkeit von der Partikeldichte möglich. Laut bereits veröffentlichten Analysen bspw. von Leskinen et al. (2014)¹ liegt die Partikeldichte eher bei 0,2-0,5 g/cm³ bei der Holzverbrennung als bei 1 g/cm³. Während der untere Messgrößenbereich – begin-

nend bei 9 nm oder 23/25 nm – einen entscheidenden Einfluss auf die resultierende Partikelanzahl hat, ist der Anteil der Partikel > 800 nm vernachlässigbar in Bezug auf die Größenordnung der Emissionen aus Holzfeuerungen.

Ein Unterschied von etwa 20 % zwischen zwei Geräten gleichen Typs wird bisher als Standard angesehen. Die Abweichungen können aber in Abhängigkeit der Abgasqualität und damit verbundenen Belastung des Messgerätes deutlich höher ausfallen. Vergleichsmessungen zeigten dies nach mehreren Messungen, insbesondere bei den eingesetzten CPCs. Daher ist der Einbezug der Abweichungen bei der Auswertung essentiell für die Ermittlung von Abscheidegraden bzw. Minderungsraten. Für die Ermittlung von Partikelanzahlkonzentrationen muss eine häufige Kalibrierung erfolgen.

[1] Leskinen et al, Environ. Sci. Technol. 2014, 48, 13298–13306, [dx.doi.org/10.1021/es502214a](https://doi.org/10.1021/es502214a)

Deutsches Biomasseforschungszentrum **DBFZ**
gemeinnützige GmbH

Messung von Partikelanzahl und -größenverteilung von verschiedenen Messgeräten an einem Kaminofen

Miriam Müller



5. Fachgespräch "Staubmessverfahren an Kleinfeuerungsanlagen," – Leipzig, 03.02.2026

Inhalt

Analysen

- Emissionsmessungen bei Betrieb von zwei verschiedenen Kaminöfen
- Betrieb der Kaminöfen nach Bedienungsanleitung sowie bei Fehlbedienung
- Vergleich Messgeräte (Messabweichung, Messprinzipien)
- Abgleich Partikelanzahlmessung und gravimetrische Messung

Forschungsprojekten

- UFP-MESS – Messtechnische Erfassung der UFP-Anzahlkonzentration im Abgasstrom aus der Schornsteinmündung von Kleinfeuerungsanlagen (Auftragsprojekt: Umweltbundesamt 2022-2024)
- LangEFeld – Langzeitmonitoring und Funktionalität von Staubabscheidern für Einzelraumfeuerungen im Feld (Forschungsprojekt: FNR 2022-2025)

TROPIS
Leibniz-Institut für Troposphärenforschung

TFZ

Partikelanzahlmessgeräte



Gerätebezeichnung	Aufbau/Messprinzip	Partikelgrößenbereich
MPSS (TROPOS, TSI)	Bipolare Neutralisation, Klassierung nach elektrischer Mobilität, Detektion mit Kondensationspartikelzähler (DMA/CPC)	8,7 bis 835 nm
HC-NPET/NPET (TSI)	Kondensationspartikelzähler (CPC), keine Größenordnung	23 bis 1 µm
ELPI®+ (Dekati)	Aufladung Partikel, Größenklassierung in Kaskadenimpaktor, elektrische Detektion	6 bis 10 µm
Grimm 5412	Kondensationspartikelzähler (CPC), keine Größenordnung	23 nm bis 3 µm

SMPS = MPSS (Mobility Particle Size Spectrometer)
→ offizielle Bezeichnung laut CEN-Richtlinie für atmosphärische Messungen und ACTRIS (Aerosols, Clouds, and Trace gases Research Infrastructure)



© DBFZ
3

- CPC – Messung elektrischer Mobilitätsdurchmesser
- ELPI – Messung aerodynamischer Durchmesser
- Verdünnung mit eDiluter von Dekati/Envilyse sowie GRIMMESS 7917 Emissions-Probenahmesystem

Partikelanzahlmessgeräte



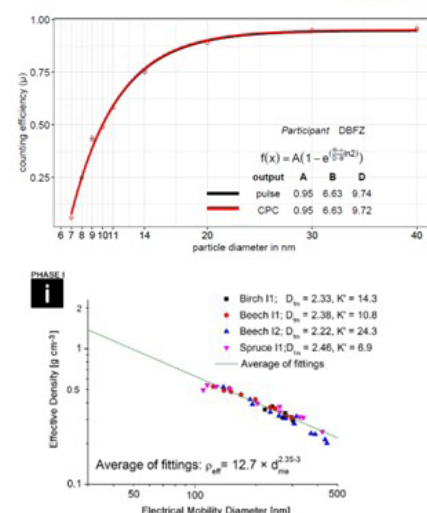
CPC vs. ELPI – Einflüsse auf das Messergebnis

Zähleffizienz größenabhängig bei CPC + Plateau-effizienz

- MPSS → Zähleffizienz im Plateau 95 %, im Bereich unter 20 nm starker Effizienzrückgang als auch größere Messabweichung
- HC-NPET/NPET schon nach wenigen Messungen starker Effizienzverlust → nach Wartung Zähleffizienz bei 69 % (HC-NPET) bzw. 90 % (NPET) im Plateau

Dichteeinfluss bei ELPI

- Einflussfaktor Dichte entscheidender Faktor bei ELPI-Auswertung
- Angenommene Dichte in Vorlage ELPI 1 g/cm³
- Nach Studie Leskinen et al. 2014 stark abhängig von Partikelgröße bei der Holzverbrennung → im relevanten Größenbereich eher bei 0,5 g/cm³



4

Messungen am DBFZ - Messaufbau



- Kaminofen Typ Jupiter der Firma Wamsler
- 2 Vergleichsmessungen im Rahmen mehrerer Versuche zu Partikelanzahlemissionen
- Betrieb in Nenn- und Teillast
- Geräte:
 - 2x Gasanalyse
 - CPC TSI (HC-NPET + NPET)
 - 2xELPI
 - 2x eDiluter (an ELPI und NPET)

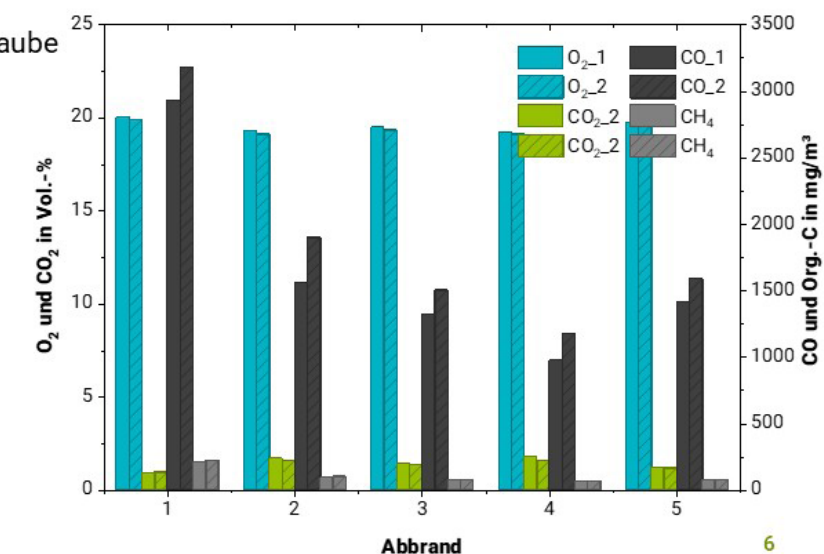


5

Messungen am DBFZ – Resultate 1



- Messort - Nach Verdünnungshaube
- CO und CH₄ auf 13 Vol.-% O₂ bezogen



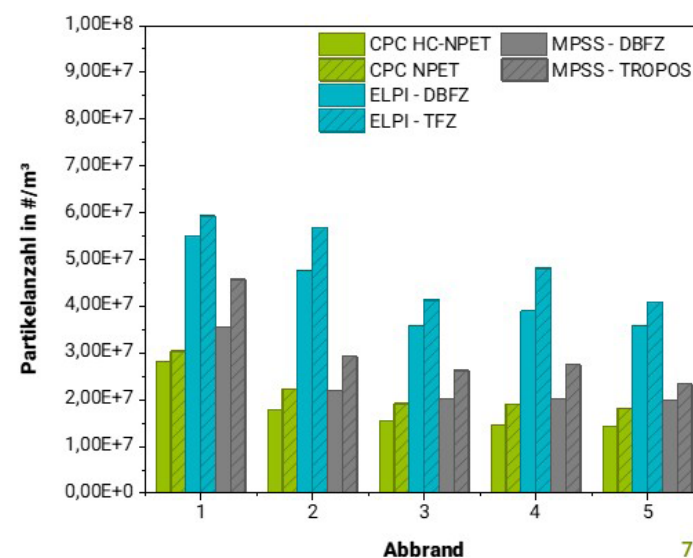
6

Messungen am DBFZ – Resultate 1



- Messort - Nach Verdünnungshaube
- Geräte zuvor beim Hersteller und zur Kalibrierung am TROPOS + fünf Versuchstage

HC-NPET/NPET	0,8
ELPI-DBFZ/ELPI-TFZ	0,9
MPSS DBFZ/TROPOS	0,8



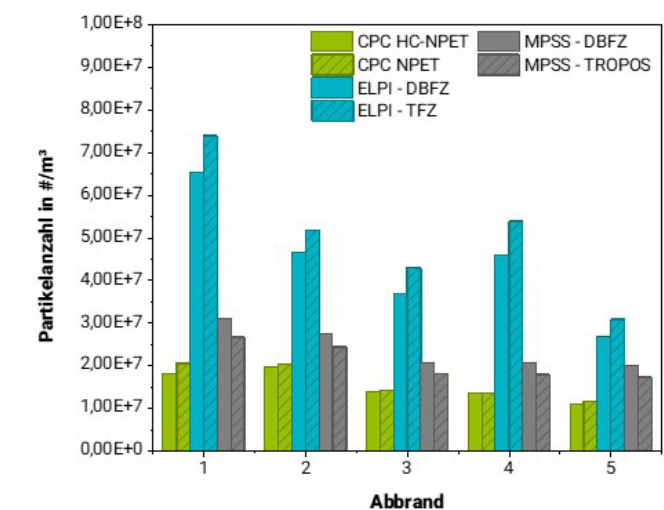
7

Messungen am DBFZ – Resultate 2



- Messort – Messstrecke nach Kaminofen (inkl. Abkühlstrecke)
- 8 weitere Versuchstage nach erster Vergleichsmessung

HC-NPET/NPET	1,0
ELPI-DBFZ/ELPI-TFZ	0,9
MPSS DBFZ/TROPOS	1,15

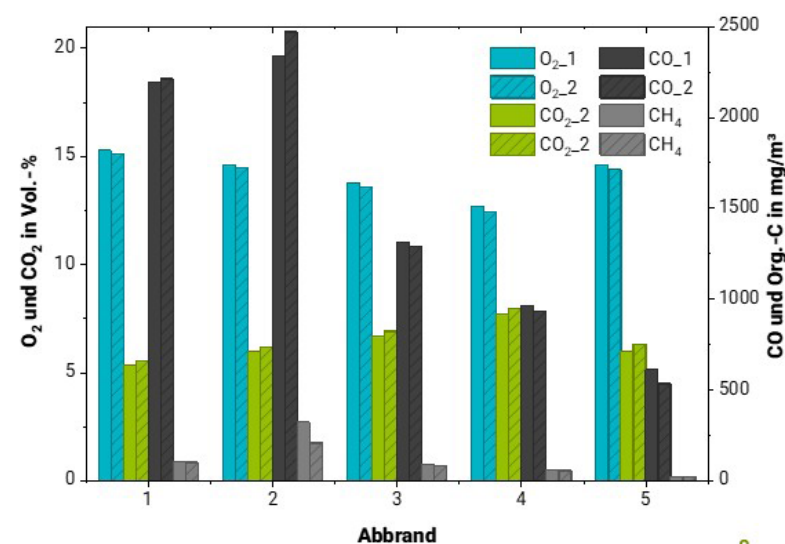


9

Messungen am DBFZ – Resultate 2



- CO und CH₄ auf 13 Vol.-% O₂ bezogen



8

Messungen am TFZ - Messaufbau



- Kaminofen Sino L der Firma Spartherm
- Naturzugschornstein
- Betrieb in Nenn- und Teillast
- Messort – Messstrecke direkt nach Kaminofen
- Geräte:
 - 2x Gasanalyse
 - 1xGravimetr. Staubbmessung
 - CPC Grimm inkl. EES GRIMM
 - CPC TSI (HC-NPET + NPET)
 - 2xELPI
 - 2x eDiluter (an ELPI und NPET)

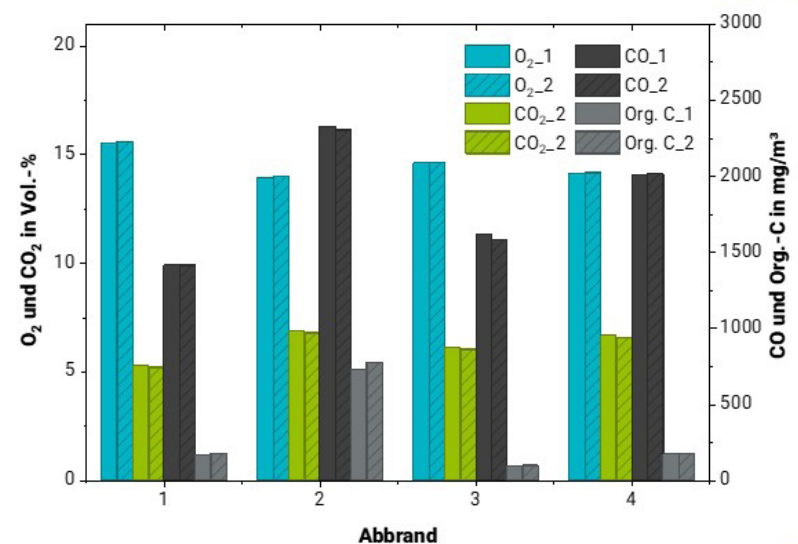


10

Messungen am TFZ – Resultate Gasanalyse



- CO und Org.-C auf 13 Vol.-% O₂ bezogen



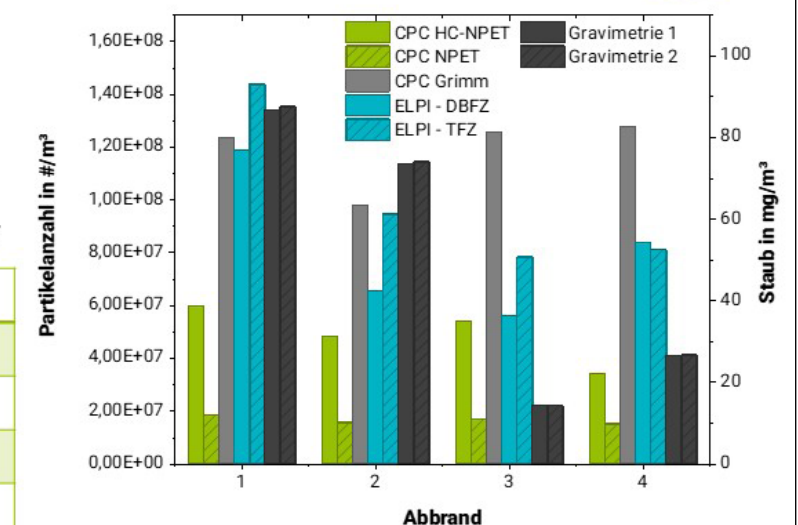
11

Messungen am TFZ - Resultate



- Abbrand 1-3 Geräte gleichen Typs an unterschiedlichen Verdünnern
- Abbrand 4 ELPIs und NPETs jeweils am gleichen Verdünner

HC-NPET/NPET 1-3	3,2
ELPI-DBFZ/ELPI-TFZ 1-3	0,7
HC-NPET/CPC Grimm 1-3	0,5
HC-NPET/NPET 4	2,3
ELPI-DBFZ/ELPI-TFZ 4	1,0

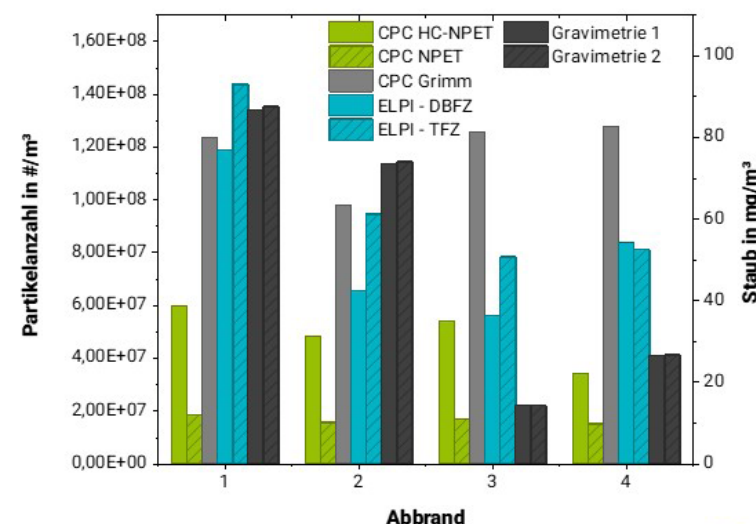


13

Messungen am TFZ - Resultate



- Wartungszustand der Geräte verschieden
- Abbrand 1-3 Geräte gleichen Typs an unterschiedlichen Verdünnern
- Abbrand 4 ELPIs und NPETs jeweils am gleichen Verdünner
- Trend bei gravimetr. Konzentration anders als Partikelanzahl
- Daten bei ELPI > 26 nm



12

Fazit



- ELPIs mit aufwändiger täglicher Reinigung – aber stabilste Resultate über 1 Jahr
- Bei CPCs sehr große Schwankungsbreite der Ergebnisse – häufige Kalibrierung erforderlich
- Effizienz der Verdünner hatte deutlichen Einfluss auf die Messergebnisse
- Partikelanzahl zeigt anderes Verhalten als grav. Staubkonzentration
- Nicht alle Gerätetypen gleiche Tendenz
- Bestimmung von Veränderungen der Partikelanzahl und -größenverteilung mit entsprechenden Kalibrierungen und Vergleichsmessungen möglich
- Bestimmung Partikelanzahlkonzentration hoher Aufwand – Ermittlung von Spezifikationen für Überprüfungs-/Kalibrierprozess

14

Deutsches Biomasseforschungszentrum DBFZ
gemeinnützige GmbH



Smart Bioenergy – Innovationen für eine nachhaltige Zukunft

Kontakt:
Mirjam Müller
Mirjam.Mueller@dbfz.de

**DBFZ Deutsches
Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH**
Torgauer Straße 116
D-04347 Leipzig
Tel.: +49 (0)341 2434-112
E-Mail: info@dbfz.de
www.dbfz.de

Fotos: DBFZ, Jan Gutzeit, DREWAG/Peter Schubert (Titelfolie, rechts), Pixabay / CC0 Public Domain

Nico Opitz, Technologie- und Förderzentrum (TFZ)

Schornsteinfegermessgerätevergleich vor und nach elektrostatischen Staubabscheidern beim Betrieb eines Kaminofens

Nico Opitz, Claudia Schön, Dr. Hans Hartmann
Technologie- und Förderzentrum (TFZ)
Schulgasse 18
94315 Straubing
Tel.: +49 (0)9421 300-137
E-Mail: nico.opitz@tfz.bayern.de

Keywords: elektrostatische Staubabscheider, Partikelanzahlmessung

Im Rahmen des Projekts „LangEFeld“ wurden Messungen am Prüfstand des TFZ nach DIN/TS 33999-1: 2025 durchgeführt: Bei den gravimetrischen Staubmessungen vor und nach dem Staubabscheider zeigte sich, dass die Abscheidegrade eine große Schwankungsbreite über einen Messtag aufwiesen. Außerdem waren die gemessenen gravimetrischen Abscheidegrade eher niedrig bei durchschnittlich 25 %. Um den Einfluss der Abscheidewirkung auf die Partikelanzahl durch die Messstrecke bzw. den Schornstein auszuschließen, wurde ausschließlich nach dem Abscheider die Partikelanzahl mit CPC und ELPI ermittelt.

Damit dennoch der Vergleich zwischen Roh- und Reingas erfolgen konnte, wurde der Abscheider über den Abbrand in zuvor definierten Zeitintervallen ein- bzw. ausgeschaltet. Die Messungen zeigen, dass bezogen auf die Partikelanzahl mit CPC oder ELPI der Abscheidegrad bei gutem und schlechtem Abgasstaubzustand im Mittel bei über 90 % lag. Es ist jedoch auf eine geeignete Auswertung zu achten, um Übergangsphasen nicht in die Auswertung aufzunehmen. Ein klarer Vorteil beim alternierenden Abscheiderbetrieb liegt in der geringeren Messtechnik und die Effekte, welche durch die Messstrecke bedingt sind, werden gezielt ausgeschlossen.



Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum
für Nachwachsende Rohstoffe



Schornsteinfegermessgerätevergleich vor und nach elektrostatischen Staubabscheidern beim Betrieb eines Kaminofens

5. Fachgespräch „Staubmessverfahren an Kleinfeuerungsanlagen“
Vortrag am 03.02.2026 in Leipzig
Nico Opitz, Claudia Schön

P 26 B Op 001

Inhalt

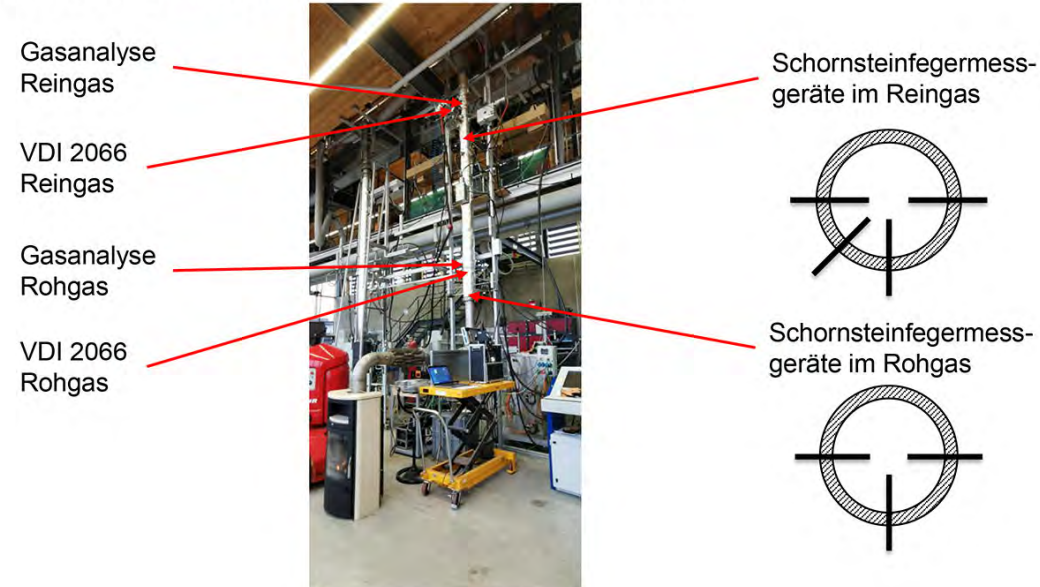
- Prüfstandaufbau
- Eingesetzte Schornsteinfegermessgeräte
- Ergebnisse der Vergleichsmessungen
- Zusammenfassung

P 26 B Op 001

Folie 2
Opitz



Prüfstandsaufbau nach DIN/TS 33999-1:2025



P 26 B Op 001

Folie 3



Auswertung der Messdaten

- Verschiedene Abgasstaubzustände im Rohgas durch unterschiedliche Einstellungen des Primärluftschiebers
- Alle CO- bzw. Staubemissionen sind auf 13% O₂ bezogen
- Auf 0°C bezogen bei STC
- Abweichend von VDI 2066 wurde die Nachbehandlungstemperatur der Filtermedien auf 110 °C (VDI 4206 Blatt 1) angepasst
- Werte der SFMG ohne Abzug des Fehlers (20% bei CO und 40% beim Staub) verwendet

P 26 B Op 001

Folie 5
Opitz, Schön

Vorgehensweise für die Vergleichsmessungen

- Kaminofen mit 2 Auflagen eingheizt und dann Abscheider eingeschaltet
- Zwischenabbrand notwendig, um alle Staubprobenahmen neu zu bestücken und die Schornsteinfegermessgeräte (SFMG) zu reinigen
- Zeitliche Abfolge einer Vergleichsmessung:
 - Einige SFMG ca. 3 Minuten vor Brennstoffauflage gestartet
 - Brennstoff nachgelegt
 - Start der Referenzmessung nach VDI 2066 bei 110°C
- Verschiedene Abgasstaubzustände im Rohgas durch unterschiedliche Einstellungen des Primärluftschiebers realisiert

P 26 B Op 001

Folie 4
Opitz, Schön

Eingesetzte Schornsteinfegermessgeräte

	Afriso STM 225 Set/ MULTISYER® STe	MRU FSM/ SPECTRA plus	testo 380	Wöhler SM 500
Düsenorientierung	Entgegengesetzt der Strömungsrichtung	90° Winkel zur Abgasrichtung	90° Winkel zur Abgasrichtung	Entgegengesetzt der Strömungsrichtung
Beheizung	Probenahmeleitung auf 60°C	Filtertemperatur in der Sonde 70°C	Probenahmeleitung auf 120°C / Rotationsverdünner auf 80°C	Sonden- und Abscheidetemperatur ca. 75°C
Messprinzip	optisch	gravimetrisch	optisch	gravimetrisch

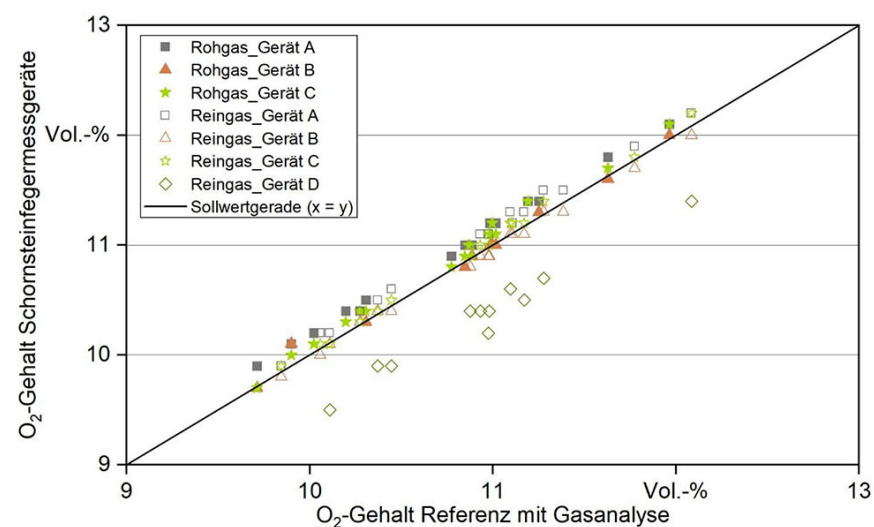


P 26 B Op 001

Folie 6



Sauerstoffkonzentration im Roh- und Reingas



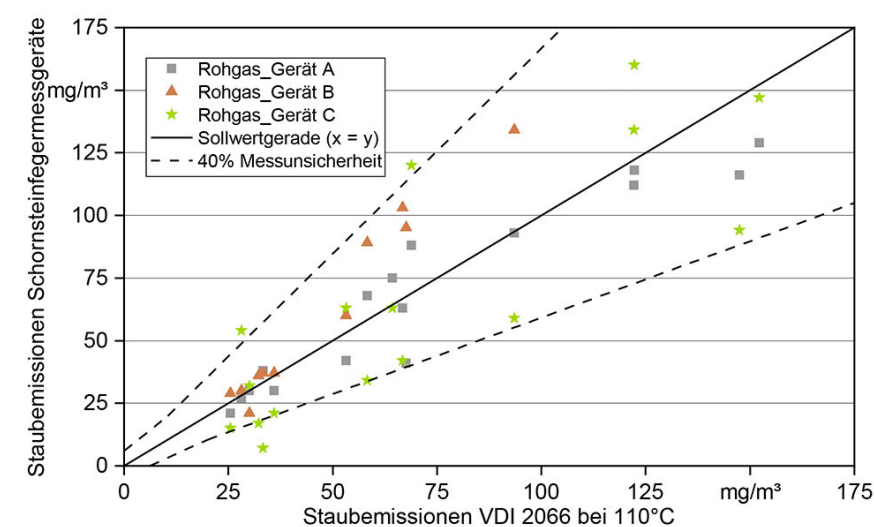
Zuverlässige Bestimmung der Sauerstoffkonzentration bei den Geräten A, B und C im Roh- und Reingas.

Gerät D unterschätzt die Sauerstoffkonzentration.

P 26 B Op 001

Folie 7
Opitz, Schön

Gesamtstaubemissionen im Rohgas (mit drei SFMG)



Gerät A liefert gute Übereinstimmung mit Referenz im Rohgas.

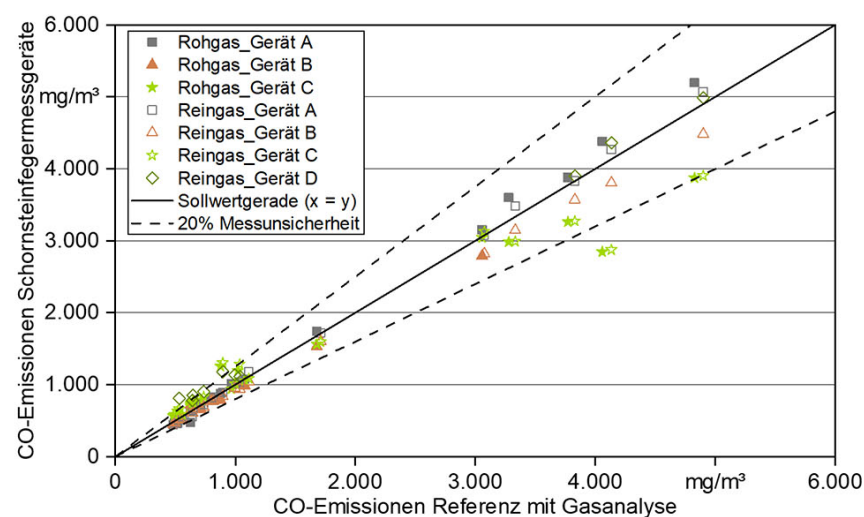
Gerät B mit Abweichungen bei höheren Staubgehalten, tendenziell höhere Staubemissionen. Bei hohen Staubfrachten keine Messung möglich.

Ergebnisse bei Gerät C streuen am stärksten (nach oben wie nach unten).

P 26 B Op 001

Folie 9
Opitz, Schön

CO-Emissionen im Roh- und Reingas



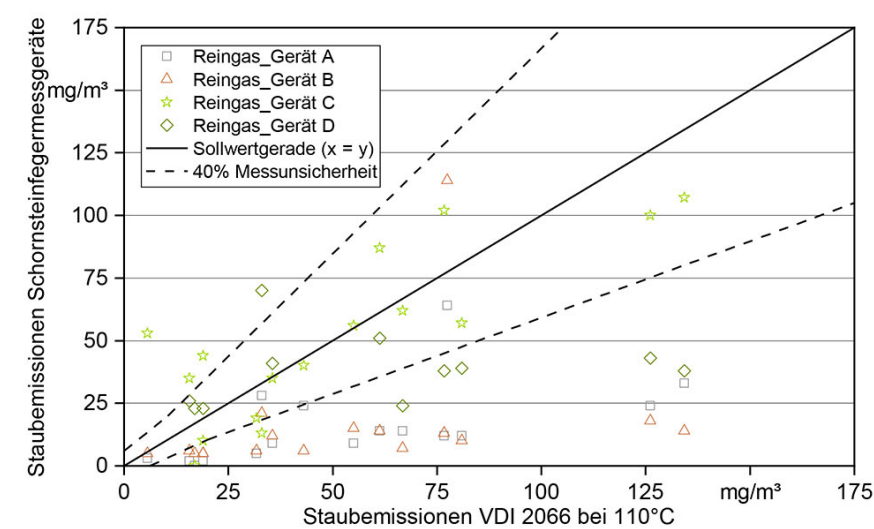
Zuverlässige Bestimmung der CO-Emissionen im gesamten Messbereich der Geräte A und B.

Einzelne Werte von den Geräten C und D liegen außerhalb der Messunsicherheit.

P 26 B Op 001

Folie 8
Opitz, Schön

Gesamtstaubemissionen im Reingas (mit vier SFMG)



Geräte A und B zeigen ermitteln deutlich geringere Staubemissionen.

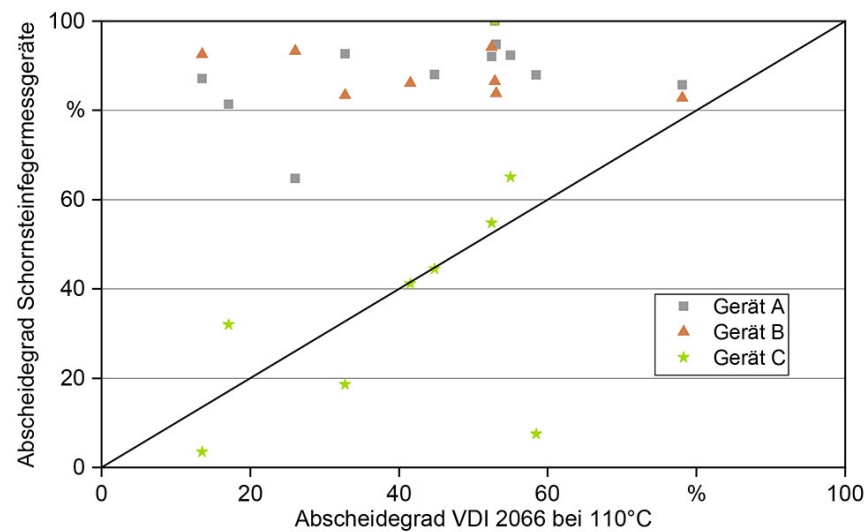
Gerät C streut nach oben und nach unten, wie im Rohgas.

Gerät D stimmt bei geringen Staubkonzentrationen gut überein. Bei höheren Konzentrationen größere Abweichungen. Vermehrt ausgefallen.

P 26 B Op 001

Folie 10
Opitz, Schön

Abscheidegrade im Vergleich zum Referenzverfahren



Geräte A und B stellen deutlich höhere Abscheidegrade fest als das Referenzverfahren, vor allem aufgrund der geringeren Staubwerte im Reingas.

Gerät C liefert am ehesten vergleichbare Abscheidegrade.

P 26 B Op 001

Folie 11
Opitz, Schön

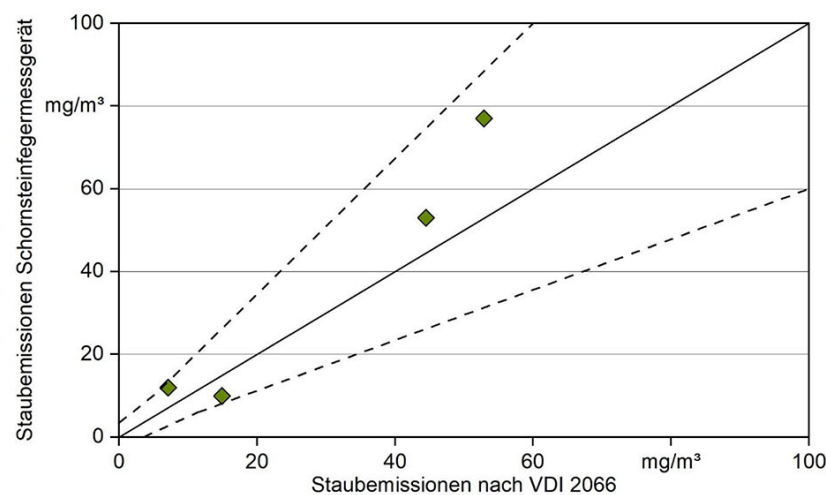
Zusammenfassung

- CO-Emissionen im Roh- und Reingas stimmen gut mit Referenzverfahren überein
- Staubemissionen im Rohgas können zuverlässig mit Schornsteinfegermessgeräten ermittelt werden
- Staubemissionen im Reingas zeigen teilweise deutliche Diskrepanz zwischen SFMG und VDI 2066 auf → Auswirkung auf Abscheidegrad!
- Am Naturzugschornstein des TFZ zeigte ein SFMG im Reingas eine gute Übereinstimmung mit dem Referenzverfahren VDI 2066 → Einfluss der Messstrecke nach DIN/TS 33999-1:2025 unbekannt

P 26 B Op 001

Folie 13
Schön, Opitz

Vergleichsmessungen am Naturzugschornstein mit Gerät B



Gemessene Abscheidegrade des SFMGs stimmen gut mit dem Referenzverfahren nach VDI 2066 überein.

Die Werte der einzelnen Messungen am Naturzugschornstein zeigen lediglich geringe Abweichungen innerhalb der Messunsicherheit.

P 26 B Op 001

Folie 12
Opitz, Schön

Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum
für Nachhaltige Rohstoffe



Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

Nico Opitz
Abteilung Biogene Festbrennstoffe
Technologie- und Förderzentrum
Im Kompetenzzentrum für Nachhaltige Rohstoffe (TFZ)
Schulgasse 18
94315 Straubing
Tel.: +49 9421 300-137
Fax: +49 9421 300-211
Nico.Opitz@tfz.bayern.de
www.tfz.bayern.de



Gefördert durch:
Bundesministerium
für Landwirtschaft, Ernährung
und Heimat
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

P 26 B Op 001

Veranstaltende

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Unser Auftrag

Das DBFZ wurde 2008 durch das ehemalige Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) mit dem Ziel gegründet, eine zentrale Forschungseinrichtung für alle relevanten Forschungsfelder der Bioenergie einzurichten und die Ergebnisse der sehr vielschichtigen deutschen Forschungslandschaft in diesem Sektor zu vernetzen. Der wissenschaftliche Auftrag des DBFZ ist es, die effiziente Integration von Biomasse als eine wertvolle Ressource für eine nachhaltige Energiebereitstellung wissenschaftlich im Rahmen angewandter Forschung umfassend zu unterstützen. Dieser Auftrag umfasst technische, ökologische, ökonomische, soziale sowie energiewirtschaftliche Aspekte entlang der gesamten Prozesskette (von der Produktion, über die Bereitstellung, bis zur Nutzung). Die Entwicklung neuer Prozesse, Verfahren und Konzepte wird durch das DBFZ in enger Zusammenarbeit mit industriellen Partnern begleitet und unterstützt. Gleichzeitig erfolgt eine enge Vernetzung mit der öffentlichen deutschen Forschung im Agrar-, Forst- und Umweltbereich, wie auch mit den europäischen und internationalen Institutionen. Gestützt auf diesen breiten Forschungshintergrund erarbeitet das DBFZ darüber hinaus wissenschaftlich fundierte Entscheidungshilfen für die Politik erarbeiten.



Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)

Unser Auftrag

Das Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) ist eine Einrichtung des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Unsere Aufgabe ist es, vor allem für den ländlichen Raum, die Bereitstellung und Nutzung von Energieträgern und Rohstoffen aus Erntegütern und Reststoffen aus der Land- und Forstwirtschaft voran zu bringen. Angewandte wissenschaftliche Forschung, ethische Bewertung, staatliche Förderung, sowie Technologie- und Wissenstransfer bilden dabei die Basis unserer Arbeit. Wir forschen für Länder- und Bundesministerien, für die EU sowie für verschiedenste Organisationen, Verbände und Unternehmen. Dabei kooperieren wir mit zahlreichen Hochschulinstitutionen, Forschungsanstalten und Unternehmen im In- und Ausland. Unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sind in Gremien auf nationaler und internationaler Ebene an Entscheidungsprozessen beteiligt. Durch einen zielgerichteten Wissenstransfer mit Beratungsunterlagen, Internet-informationen, Seminaren, Ausstellungen und Messeauftritten profitieren land- und forstwirtschaftliche Praxis, ländlicher Raum, Handwerk, Industrie und Politik gleichermaßen von unserer Forschungsarbeit. In Straubing, der Region der Nachwachsenden Rohstoffe, arbeiten wir mit zahlreichen Partnern zusammen.



Herausgegeben von:

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig
Telefon: +49 (0)341 2434-112
E-Mail: info@dbfz.de
www.dbfz.de

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Landwirtschaft, Ernährung
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

In Kooperation mit:



Umweltschutz geht uns alle an - nicht jedes Dokument muss ausgedruckt werden!