

TEXTE

51/2024

Abschlussbericht

Partikelanzahlmessungen im Abgas von Kaminöfen

**Validierung des Messverfahrens für das Umweltzeichen
Blauer Engel durch Ringversuche**

von:

Jens Cordes, Katharina Wolf, Benno Stoffels, Egill Antonsson, Georg Hagelstein, Mona Scheibe,
Kristin Sprenger, Dominik Wildanger

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Kassel

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 51/2024

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3720 37 303 3
FB001271

Abschlussbericht

Partikelanzahlmessungen im Abgas von Kaminöfen

Validierung des Messverfahrens für das Umweltzeichen
Blauer Engel durch Ringversuche

von

Jens Cordes, Katharina Wolf, Benno Stoffels, Egill
Antonsson, Georg Hagelstein, Mona Scheibe, Kristin
Sprenger, Dominik Wildanger

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und
Geologie, Kassel

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Ludwig-Mond-Straße 33
34121 Kassel

Abschlussdatum:

August 2023

Redaktion:

Fachgebiet Ökodesign, Umweltkennzeichnung, umweltfreundliche Beschaffung //
Übergreifende Angelegenheiten, Chemische Industrie, Feuerungsanlagen
Angela Kohls, Johanna Wurbs // Christian Liesegang

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, März 2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Partikelanzahlmessungen im Abgas von Kaminöfen – Validierung durch Ringversuche

Dieser Text beschreibt die Ergebnisse der Validierung des in den Vergaberichtlinien des Blauen Engels für Kaminöfen vorgesehenen Messverfahrens für die Bestimmung der Partikelanzahl des Kaminabgases. Ziel der Validierung war es, durch einen Ringversuch die Verfahrenskenngrößen des Messverfahrens zu bestimmen und nötige Anpassungen der Verfahrensvorschrift zu identifizieren. Auch dienten die Untersuchungen dazu, die Eignung des Grenzwertes für die PN-Emissionen zu untersuchen.

Im Ergebnis konnte festgestellt werden, dass das Messverfahren grundsätzlich zuverlässige und vergleichbare Messwerte liefert.

Die Untersuchungen dazu fanden an einem eigens für das Projekt errichteten Prüfstand beim Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie in Kassel statt.

Abstract: Blue Angel eco-label for wood-burning stoves – validation by interlaboratory tests

This text describes the results of the validation of the measurement procedure for the determination of the particle number of stove flue gas provided for in the Blue Angel award criteria for stoves. The aim of the validation was to determine the performance parameters of the measurement procedure by means of an interlaboratory test (proficiency test) and to identify necessary adaptations of the process specification. The investigations also served to examine the suitability of the limit value for PN emissions.

As a result, it could be determined that the measurement procedure basically provides reliable and comparable measured values.

The investigations were carried out on a test stand set up specifically for the project at the Hessian Agency for Nature Conservation, Environment and Geology (HLNUG) in Kassel.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
Zusammenfassung.....	13
Summary	16
1 Hintergrund und Zielsetzung.....	19
1.1 Hintergrund.....	19
1.2 Zielsetzung	20
1.3 Beteiligte Organisationen	21
1.4 Zeitlicher Verlauf.....	21
2 Kaminofenprüfstand.....	22
2.1 Versuchsaufbau.....	22
2.1.1 Kaminofen.....	22
2.1.2 Installation und Messgeräte	22
2.1.3 Brennholz	25
2.1.4 Zugregelung	26
2.2 Versuchsdurchführung.....	27
2.2.1 Anzünden	27
2.2.2 Nachlegen von Brennholz	28
3 Voruntersuchungen.....	30
3.1 Homogenitätstest	30
3.1.1 Konzept des Homogenitätstests	30
3.1.2 Ergebnis des Homogenitätstests	31
3.2 Partikelfilter	33
3.2.1 Einfluss des Elektrofilters auf die Partikelanzahlkonzentration	33
3.2.2 Einfluss des Elektrofilters auf die Partikelmassenkonzentration.....	36
3.2.3 Gasförmige Kohlenwasserstoffe	39
4 Ringversuch	41
4.1 Planung	41
4.2 Vorbereitung.....	42
4.3 Terminfestlegung	46
4.4 Durchführung des Ringversuchs	46
4.5 Messgeräte der Teilnehmenden	50

4.6	Kalibrierung.....	50
4.7	Abbrände im Ringversuch	58
4.8	Druckluftversorgung	60
4.9	Ergebnisse der Messungen im Ringversuch.....	60
4.10	Messfehler durch Bewegung der Probenahmeleitungen	80
4.11	Bewertung der Teilnehmenden im Ringversuch.....	82
5	Schlussfolgerungen.....	83
5.1	Verfahrenskenngrößen	83
5.2	Beobachtete Fehlerquellen.....	83
5.3	Änderungsvorschläge für die Vergaberichtlinie.....	84
6	Quellenverzeichnis	86

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zeitplan des Projekts	21
Abbildung 2:	Schema des Prüfstands.....	23
Abbildung 3:	Querschnitt des Kanals auf Höhe der „Messöffnungen oben“ ..	24
Abbildung 4:	Schematische Übersicht der verwendeten Messgeräte	25
Abbildung 5:	Schichtung von Buchenholz und Anzündern zum Anzünden des Kaminofens	27
Abbildung 6:	Effekt des Elektrofilters auf den Verlauf der Partikelanzahlkonzentration	34
Abbildung 7:	Effekt des Elektrofilters auf die mittlere Partikelanzahlkonzentration	35
Abbildung 8:	Partikelanzahlkonzentrationen während der Staubmassenbestimmung	37
Abbildung 9:	Gesamtgehalt an gasförmigen Kohlenwasserstoffen im Abgas	40
Abbildung 10:	Messergebnisse zum Cut-Off der Messgeräte	51
Abbildung 11:	Änderung der Messergebnisse zum Cut-Off der Messgeräte ..	52
Abbildung 12:	Messergebnisse zur Zähleffizienz für monodisperse Partikel ..	53
Abbildung 13:	Änderung der Messergebnisse zur Zähleffizienz für monodisperse Partikel.....	54
Abbildung 14:	Messergebnisse zur Zähleffizienz für polydisperse Partikel.....	55
Abbildung 15:	Änderung der Messergebnisse zur Zähleffizienz für polydisperse Partikel	56
Abbildung 16:	Vergleich der Abweichungen im Ringversuch und in der Kalibrierung	57
Abbildung 17:	Kompressor für die Sicherstellung der Druckluftversorgung im Ringversuch	60
Abbildung 18:	Verlauf der Abgaszusammensetzung im Ringversuch (1)	61
Abbildung 19:	Verlauf von Temperatur und Zug im Ringversuch (1)	62
Abbildung 20:	Messwerte der Teilnehmenden im Ringversuch (1)	63
Abbildung 21:	Verlauf der Abgaszusammensetzung im Ringversuch (2)	64
Abbildung 22:	Verlauf von Temperatur und Zug im Ringversuch (2)	65
Abbildung 23:	Messwerte der Teilnehmenden im Ringversuch (2)	66
Abbildung 24:	Verlauf der Abgaszusammensetzung im Ringversuch (3)	67
Abbildung 25:	Verlauf von Temperatur und Zug im Ringversuch (3)	68
Abbildung 26:	Messwerte der Teilnehmenden im Ringversuch (3)	69
Abbildung 27:	Verlauf der Abgaszusammensetzung im Ringversuch (4)	70
Abbildung 28:	Verlauf von Temperatur und Zug im Ringversuch (4)	71
Abbildung 29:	Messwerte der Teilnehmenden im Ringversuch (4)	72
Abbildung 30:	Konsenswerte für die Partikelanzahlkonzentration (1).....	73
Abbildung 31:	Konsenswerte für die Partikelanzahlkonzentration (2).....	74
Abbildung 32:	Konsenswerte für die Partikelanzahlkonzentration (3).....	75
Abbildung 33:	Konsenswerte für die Partikelanzahlkonzentration (4).....	76

Abbildung 34:	Verlauf der Partikelemissionen über verschiedene Messtage	79
Abbildung 35:	Verlauf der über den Messtag gemittelten Partikelanzahlkonzentration	80
Abbildung 36:	Messfehler durch Erschütterung und Bewegung der Probenahmeleitung	81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Messergebnisse des Homogenitätstests	32
Tabelle 2:	Auswertung des Homogenitätstests	32
Tabelle 3:	Partikelanzahlkonzentrationen mit und ohne eingeschaltetem Elektroabscheider	36
Tabelle 4:	Partikelmassenkonzentrationen mit und ohne eingeschaltetem Elektroabscheider	38
Tabelle 5:	Partikelanzahlkonzentrationen während der Partikelmassenprobenahmen	39
Tabelle 6:	Zeitplan des Ringversuchs	49
Tabelle 7:	Parameter für die Bestimmungseffizienz laut Vergaberichtlinie	57
Tabelle 8:	Abbrände im Ringversuch	59
Tabelle 9:	Messwerte der Teilnehmenden für die Partikelanzahlkonzentration	77
Tabelle 10:	Konsenswerte für die Partikelanzahlkonzentration	78

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ACTRIS	Aerosols, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure
AS	Amtliche Sammlung des Bundesrechts
BGBI.	Bundesgesetzblatt
BGZ	Balgengaszähler
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
°C	Grad Celsius
CEN	Comité Européen de Normalisation (Europäisches Komitee für Normung)
cm	Zentimeter (10^{-2} Meter)
cm⁻³	pro Kubikzentimeter (10^{-6} Kubikmeter), hier meist bezogen auf PN
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO₂	Kohlenstoffdioxid
Co. KG	Compagnie Kommanditgesellschaft
CPC	Condensation Particle Counter (Kondensationspartikelzähler)
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH
DBI	Deutsches Brennstoffinstitut
DE	Deutschland
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DMA	Differential Mobility Analyzer
dp	Differenzdruck
EG	Erdgeschoss
EJPD	Eidgenössisches Justiz- und Polizeidepartement
EN	Europäische Norm
ESP	Electrostatic Precipitator (elektrostatischer Staubabscheider)
FID	Flammenionisationsdetektor
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
g	Gramm (10^{-3} Kilogramm)
gGmbH	gemeinnützige GmbH
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
h	Stunde
HC	High Concentration
HEPA	High-Efficiency Particulate Air
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
H₂O	Wasser(dampf)
hPa	Hektopascal (10^2 Pascal)
Hz	Hertz (1/Sekunde)

Abkürzung	Bedeutung
ID	Identifikation
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	Internationale Organisation für Normung
K	Kelvin
KFZ	Kraftfahrzeug
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt (10^3 Watt)
LAI	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz
m	Meter
m.d.	monodispers
mg	Milligramm (10^{-6} Kilogramm)
mgC	Milligramm (10^{-6} Kilogramm) Kohlenstoff
min	Minute(n)
nm	Nanometer (10^{-9} Meter)
NO _x	Stickstoffoxide
NPET	Nanopartikel-Emissionstester
O ₂	Sauerstoff
OG	Obergeschoss
OGC	Organisch gebundener Kohlenstoff
Pa	Pascal
p.d.	polydispers
PM	Particle Mass (Partikelmasse bzw. Partikelmassenkonzentration)
PN	Particle Number (Partikelanzahl bzw. Partikelanzahlkonzentration)
ppm	parts per million (10^{-6} , hier: Mikroliter pro Liter)
PSS	Portable Sampling System
Rp1“	Rohrgewinde (parallel) 1 Zoll
RV	Ringversuch
S.	Seite
SPC	Solid Particle Counter
SR	Systematische Sammlung des Bundesrechts
T	Temperatur
TFZ	Technologie- und Förderzentrum
TROPOS	Leibniz-Institut für Troposphärenforschung e. V.
TS	Technical Specification
TV	Teilvorhaben
UBA	Umweltbundesamt
UG	Untergeschoss

Abkürzung	Bedeutung
UMK	Konferenz der Umweltminister des Bundes und der Länder (Umweltministerkonferenz)
U.S. EPA	United States Environmental Protection Agency
UZ	Umweltzeichen
VAMV	Verordnung des EJPD über Abgasmessmittel für Verbrennungsmotoren
Vol.	Volume (Ausgabe)
Vol.-%	Volumenprozent
VPR	Volatile Particle Remover
WCCAP	World Calibration Center for Aerosol Physics
WMO	World Meteorological Organisation
z.B.	zum Beispiel
µm	Mikrometer (10^{-6} Meter)

Zusammenfassung

Zur Erlangung des Umweltzeichens „Blauer Engel“ müssen Kaminöfen in einer Typprüfung unter anderem bestimmte Emissionsanforderungen erfüllen. Dazu gehört inzwischen auch eine Anforderung an die maximale Staubpartikelanzahl. Zur Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration wurde eigens für den Blauen Engel ein spezifisches Messverfahren entwickelt. Dieses Messverfahren sollte durch einen Ringversuch validiert werden. Entscheidend für die Eignung des Verfahrens und dessen Beschreibung ist, dass die Emissionen eines Kaminofens unabhängig vom ausführenden Messinstitut gleich beurteilt werden, also vergleichbare Messergebnisse erreicht werden.

Im Zuge der Validierung sollten primär die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Wie stark variieren die Ergebnisse zwischen einzelnen Teilnehmern (Prüfinstituten) bei gleichzeitiger Messung bzw. unter Vergleichbedingungen?
- Wie stark variieren die Ergebnisse bei wiederholten Prüfungen eines Ofens durch ein einzelnes Prüfinstitut (unter Wiederholbedingungen)?

Für diese Validierung hat das HLNUG (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie) einen Ringversuch vorbereitet und organisiert. Das Dezernat I3 (Luftreinhaltung: Emissionen) des HLNUG ist nach DIN EN ISO/IEC 17043 akkreditierter Anbieter von Eignungsprüfungen für Emissionsmessungen und verfügt über umfassende Erfahrungen in der Planung, Durchführung und wissenschaftlichen Auswertung von Ringversuchen. Das HLNUG bietet vor allem Ringversuche zu Emissionsmessungen an einem Schornsteinsimulator an, welche der Qualitätssicherung von Messstellen nach § 29b Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) dienen. Diese Ringversuche finden im Auftrag der Bekanntgabebehörden der Bundesländer statt und sind durch LAI und UMK im Sinne von § 16 (4) Nr. 7. a der Bekanntgabeverordnung (41. BImSchV) anerkannt. Daneben organisiert das HLNUG regelmäßig Ringversuche zur Charakterisierung von anorganischen Referenzmaterialien (Bestimmung von Schwermetallkonzentrationen in Stäuben).

Der für den Ringversuch verwendete Kaminofen war ein handelsübliches Modell mit einer Nennwärmeleistung von 6 kW. Der Ofen war mit einer Steuerungssoftware und einem elektrostatischen Staubabscheider ausgestattet. Der Kaminofen ist mit dem Blauen Engel ausgezeichnet (DE-UZ 212). Die Bedienung des Kaminofens erfolgte ausschließlich unter Verwendung der Steuerungssoftware, die aufgrund des Temperaturverlaufs in der Brennkammer vollautomatisch die Zuluft regelt und die Bedienenden zum Nachlegen von Brennholz auffordert (Feuerungsmonitor).

Der Kaminofen wurde im Keller eines Gebäudes des HLNUG in Kassel eingebaut, mit einem bis zum Kaminauslass senkrechten Abgasrohr. Im Erdgeschoss wurde ein Messraum eingerichtet, in dem über Messöffnungen Probenahmesonden für verschiedene Messgeräte in den Abgaskanal eingeführt werden konnten. In verschiedenen Voruntersuchungen sowie im Ringversuch wurden kontinuierlich die Konzentrationen von O₂, CO₂, CO, NO_x und H₂O gemessen. Außerdem wurden der Zug im Kamin, die Temperaturen in der Brennkammer und im Messquerschnitt, sowie die Partikelanzahlkonzentration im Abgas kontinuierlich erfasst. Zusätzlich wurden im Rahmen von Voruntersuchungen auch die Konzentrationen von gasförmigem Kohlenstoff (OGC) sowie der Partikelmasse untersucht. Die Durchführung dieser Messungen richtete sich dabei nach den Vorgaben der Vergabekriterien für den Blauen Engel für Kaminöfen (DE-UZ 212). Nach Errichtung des Prüfstandes wurde dessen Eignung für die Durchführung der Validierungsringversuche gemäß DIN ISO 13528 durch eine Homogenitätsprüfung nachgewiesen. Damit

wurde sichergestellt, dass die Ergebnisse der Teilnehmer des Ringversuches nicht von den zugewiesenen Messpositionen beeinflusst werden.

Für die Ringversuche wurde als Brennmaterial rindenloses Buchenholz mit einem Wassergehalt von ca. 12-14% verwendet. Die verwendete Holzmenge pro Abbrand lag bei ca. 1,4 kg für den Nennlastbetrieb und ca. 0,5 kg für den Teillastbetrieb. Auf der Grundlage von Ergebnissen aus Voruntersuchungen wurden für den Ringversuch am Kaminofenprüfstand ein Rauchsauger und Klappen im oberen Bereich der Abgasführung installiert, um während der Anzündphase reproduzierbare Bedingungen herstellen zu können und den Kaminofen innerhalb der ersten zwei Abbrände in den Regelbetrieb zu überführen.

Die Versuchsdurchführung erfolgte mit insgesamt sieben Abbränden pro Ringversuchstag. Dabei fanden die ersten fünf Abbrände unter Nennlastbedingungen und die letzten zwei Abbrände unter Teillastbedingungen statt. Der erste Abbrand erfolgte dabei unter Zugabe von Anzündern (paraffingetränkte Holzwolle) sowie 25% zusätzlichem Brennholz in kleineren Scheiten. Angezündet wurde nach Auswertung diverser Vorversuche von unten. Das Nachlegen von Brennholz erfolgte nach Aufforderung durch die Ofensteuerungssoftware.

Bei der Planung des Ringversuchs wurden die Limitierungen der Messvorschrift und der örtlichen Gegebenheiten am Kaminofenprüfstand berücksichtigt. Der Ringversuch wurde daher für die zeitgleiche Durchführung von Messungen der Partikelanzahlkonzentration durch verschiedene Prüflaboratorien im gleichen Messquerschnitt geplant. Die gleichzeitige Messung weiterer Abgaskomponenten durch die Teilnehmenden konnte aus Platzgründen nicht realisiert werden.

Zur Vorbereitung des Ringversuchs wurden zunächst potentiell interessierte Prüflaboratorien identifiziert und im Dezember 2021 kontaktiert. Mit interessierten Laboratorien und weiteren Projektbeteiligten fand dann im Januar 2022 ein Auftaktgespräch statt. In dieser Veranstaltung wurden der Hintergrund und die Ziele des Projekts vorgestellt und Informationen zum aktuellen Stand und zur weiteren Planung präsentiert. Die anschließende Diskussionsrunde drehte sich vor allem um praktische Aspekte der durchzuführenden Messungen. Im Juni 2022 fand dann ein Workshop zum Ringversuch statt, in dem die teilnehmenden Prüfinstitute über die weiteren Vorbereitungen zum Ringversuch informiert wurden. Bei dieser Gelegenheit wurden auch weitere Details der praktischen Durchführung der Messungen diskutiert. Nach der finalen Terminfestlegung wurden schließlich im September 2022 alle teilnehmenden Prüflaboratorien zu einem konkreten Ringversuchstermin im Dezember 2022 nach Kassel eingeladen. Zusammen mit dieser Einladung erhielten die Teilnehmenden zusätzlich auch die finalisierten Informationen zur Durchführung der Messungen, zur Abgabe der Messergebnisse, sowie zur Auswertung des Ringversuchs.

Sowohl vor, als auch nach dem Ringversuch nahm die Mehrzahl der eingesetzten Messgeräte an einer Kalibrierung des TROPOS in Leipzig statt. Im Rahmen dieser Kalibrierungen wurden verschiedene Messungen an einem Prüfstand mit monodispersen und polydispersen Silberpartikeln bei definierten Konzentrationen durchgeführt. Diese Messungen sollten der Überprüfung der Messunsicherheit sowie der Cut-off-Parameter dienen. Keines der untersuchten Messgeräte erfüllte in beiden durchgeführten Kalibrierungen alle in der Vergaberichtlinie DE-UZ 212 genannten Kriterien. Es konnte allerdings auch kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Messergebnissen in den Kalibrierungen mit Silberpartikeln und den Messergebnissen im Ringversuch an realen Verbrennungsabgasen festgestellt werden. Insofern ist die Aussagekraft der Kalibriermessungen unklar. Es wird empfohlen, hier perspektivisch die regelmäßige Teilnahme an Ringversuchen an realen Anlagen zu prüfen, um Belastbarkeit und Vergleichbarkeit der Typzulassungen sicherzustellen.

Die Messergebnisse für die Partikelanzahlkonzentration im Ringversuch lagen im erwarteten Bereich, die Mehrzahl der Teilnehmenden ermittelte relativ ähnliche Konzentrationen. Lediglich einzelne Messgeräte zeigten teilweise enorm hohe Konzentrationen an zu Zeiten, zu denen die übrigen Messwerte keine vergleichbaren Konzentrationsanstiege verzeichneten.

Möglicherweise handelt es sich hier um Messfehler durch das Ablösen größerer Partikelansammlungen in den probengasführenden Leitungen. Diese Vermutung konnte experimentell plausibilisiert werden. Einzelne Teilnehmende hatten darüber hinaus mit zusätzlichen technischen Problemen zu kämpfen, so dass insgesamt von 32 durchgeführten Messreihen (volle Prüfzyklen aus sieben Abbränden), verteilt auf vier Messtage und zwei Ringversuche, letztlich 19 Messreihen für die weitere Auswertung verwendbar waren. Dabei wurden mittlere Partikelanzahlkonzentrationen von ca. 400.000 cm^{-3} bis 700.000 cm^{-3} nach dem elektrostatischen Staubabscheider gemessen (bezogen auf den Normzustand, trocken, ohne Umrechnung auf eine Bezugssauerstoffkonzentration). Umgerechnet auf eine Bezugssauerstoffkonzentration von 13 Vol.-% lag die im Mittel im Ringversuch gemessene Partikelanzahlkonzentration bei ca. 724.000 cm^{-3} .

Aus den Messdaten im Ringversuch konnten die folgenden Verfahrenskenngrößen berechnet werden:

- ▶ Relative Vergleichstandardabweichung: 25%
- ▶ Relative Wiederholstandardabweichung: 16%
- ▶ Relative Standardabweichung zwischen den Labors: 20%

Es zeigte sich, dass die mit Abstand höchsten Partikelanzahlkonzentrationen während der Anzündphase in den ersten zwei Abbränden auftraten. Die zwei Teillastphasen am Ende des Prüfzyklus wirkten sich hingegen kaum auf das Gesamtergebnis aus.

Auf der Grundlage der Erkenntnisse aus den hier beschriebenen Ringversuchen sowie den verschiedenen Voruntersuchungen konnten Empfehlungen für einzelne Ergänzungen bzw. Korrekturen der Vergaberichtlinie für den Blauen Engel für Kaminöfen abgeleitet werden.

Weiterhin wurde untersucht, wie groß der emissionsmindernde Effekt des elektrostatischen Partikelfilters ist. Bei Messungen mit eingeschaltetem Partikelabscheider wurden Partikelanzahlkonzentrationen in der Größenordnung von ca. 0,4 bis 0,7 Millionen Partikel pro cm^3 gemessen, ohne Elektrofilter wurden mittlere Konzentrationen von ca. 15 bis 25 Millionen Partikel pro cm^3 gemessen (jeweils ohne Umrechnung auf eine Bezugssauerstoffkonzentration). Für die Partikelanzahlkonzentration wurde insgesamt eine Emissionsminderung um 97% beobachtet, für die Partikelmasse eine Minderung um 84%. Auf die Konzentration gasförmiger Kohlenstoffverbindungen im Abgas hatte der Partikelfilter erwartungsgemäß keinen Einfluss.

Summary

To obtain the "Blue Angel" eco-label, wood-burning stoves must, among other things, meet certain emission requirements in a type test. This now also includes a requirement for the maximum number of dust particles. To determine the particle number concentration, a specific measurement procedure was developed especially for the Blue Angel. This measurement procedure was to be validated by an interlaboratory test. It is decisive for the suitability of the method and its description that the emissions of a stove are assessed in the same way regardless of the measuring institute carrying out the test, i.e. that comparable measurement results are achieved.

In the course of validation, the following questions should primarily be answered:

- ▶ How much do the results vary between individual participants (testing institutes) in simultaneous measurement or under comparative conditions?
- ▶ How much do the results vary when a stove is repeatedly tested by a single testing institute (under repeatability conditions)?

For this validation, the HLNUG (Hessian Agency for Nature Conservation, Environment and Geology) has prepared and organised an interlaboratory test (proficiency test). The HLNUG's Department I3 (Air Pollution Control: Emissions) is an accredited provider of proficiency testing for emission measurements according to (DIN) EN ISO/IEC 17043 and has extensive experience in planning, conducting and scientifically evaluating proficiency tests. HLNUG mainly offers proficiency tests for emission measurements on a stack simulator, which serve the quality assurance of measuring bodies according to §29b of the Federal Immission Control Act (BImSchG). These proficiency tests take place on behalf of the notification authorities of the German federal states and are recognised by LAI and UMK in the sense of § 16 (4) No. 7. a of the Notification Ordinance (41st BImSchV). In addition, the HLNUG regularly organises interlaboratory tests for the characterisation of inorganic reference materials (determination of heavy metal concentrations in dusts).

The stove used for the interlaboratory test was a commercial model with a nominal heat output of 6 kW. The stove was equipped with control software and an electrostatic dust collector. The stove has been awarded the Blue Angel label (DE-UZ 212). The stove was operated exclusively using the control software, which regulates the supply air fully automatically on the basis of the temperature curve in the combustion chamber and prompts the operator to add firewood (combustion monitor).

The stove was installed in the basement of a building of the HLNUG in Kassel, with a flue gas duct that was vertical up to the chimney outlet. A measuring room was set up on the ground floor, where sampling probes for various measuring instruments could be inserted into the flue gas duct via sampling ports. In various preliminary tests and in the interlaboratory test, the concentrations of O₂, CO₂, H₂O, CO, NO_x were continuously measured, and the draught in the stack, the temperatures in the combustion chamber and in the measurement cross-section, and the particle number concentration in the flue gas were also continuously recorded. In addition, the concentrations of gaseous carbon (OGC) and the particle mass were also investigated as part of preliminary tests. These measurements were carried out according to the specifications of the award criteria for the Blue Angel for wood-burning stoves (DE-UZ 212). After the test stand had been set up, its suitability for carrying out the validation interlaboratory tests according to (DIN) ISO 13528 was verified by a homogeneity test. This ensured that the results of the participants in the proficiency test were not influenced by the assigned measuring positions.

For the proficiency tests, barkless beech wood with a water content of approx. 12-14% was used as fuel. The amount of wood used per combustion was approx. 1.4 kg for nominal load operation and approx. 0.5 kg for partial load operation. Based on results from preliminary tests, a chimney fan and flaps were installed in the upper area of the flue gas duct for the proficiency test at the stove test stand in order to be able to create reproducible conditions during the ignition phase and to transfer the stove to regular operation within the first two firings.

The interlaboratory test was carried out with a total of seven firings per proficiency test day. The first five firings took place under nominal load conditions and the last two firings under partial load conditions. The first firing was carried out with the addition of kindling (paraffin-soaked wood wool) and 25% additional firewood in smaller logs. After evaluating various preliminary tests, the fire was lit from below. Additional firewood was added when requested by the stove control software.

When planning the proficiency test, the limitations of the measurement regulations and the local conditions at the stove test stand were taken into account. The proficiency test was therefore planned for the simultaneous performance of measurements of the particle number concentration by different testing laboratories in the same measurement cross-section. The simultaneous measurement of other flue gas components by the participants could not be realised for reasons of space.

In preparation for the interlaboratory test, potentially interested testing laboratories were first identified and contacted in December 2021. A kick-off meeting was then held with interested laboratories and other project participants in January 2022. At this event, the background and goals of the project were presented and information on the current status and further planning was presented. The subsequent round of discussions focused mainly on practical aspects of the measurements to be carried out. A workshop on the proficiency testing scheme was then held in June 2022, at which the participating testing institutes were informed about the further preparations for the proficiency testing scheme. On this occasion, further details of the practical implementation of the measurements were also discussed. After the final date had been set, in September 2022 all participating testing laboratories were finally invited to Kassel for a specific proficiency test date in December 2022. Together with this invitation, the participants also received the finalised information on the performance of the measurements, the submission of the measurement results and the evaluation of the proficiency test.

Both before and after the interlaboratory comparison, the majority of the measuring instruments used took part in a calibration at TROPOS in Leipzig. Within the scope of these calibrations, various measurements were carried out on a test stand with monodisperse and polydisperse silver particles at defined concentrations. These measurements were intended to verify the measurement uncertainty as well as the cut-off parameters. In both calibrations carried out, none of the measuring instruments examined fulfilled all the criteria specified in the award guideline DE-UZ 212. However, no clear correlation could be established between the measurement results in the calibrations with silver particles and the measurement results in the interlaboratory test on real combustion flue gases. In this respect, the significance of the calibration measurements is unclear. It is recommended that regular participation in interlaboratory tests on real plants be examined in the future.

The measurement results for the particle number concentration in the interlaboratory test were within the expected range; the majority of participants determined relatively similar concentrations. Only individual measuring devices showed enormously high concentrations at times when the other measuring devices did not show comparable increases in concentration. This may be due to measurement errors caused by the detachment of larger particle

accumulations in the sample gas lines. This assumption could be plausibilised experimentally. Some participants also had to deal with additional technical problems, so that a total of 19 of 32 measurement series (full test cycles from seven combustion phases), distributed over four measurement days and two proficiency tests, were ultimately usable for further evaluation.

Mean particle number concentrations of approx. $400,000 \text{ cm}^{-3}$ to $700,000 \text{ cm}^{-3}$ were measured after the electrostatic dust collector (relating to normal conditions, dry, without conversion to a reference oxygen concentration). Converted to a reference oxygen concentration of 13 vol.-%, the average particle number concentration measured in the proficiency test was approx. $724,000 \text{ cm}^{-3}$.

The following process parameters could be calculated from the measurement data in the proficiency test:

- ▶ Relative reproducibility standard deviation: 25%
- ▶ Relative repeatability standard deviation: 16%.
- ▶ Relative standard deviation between the laboratories: 20%.

It was found that by far the largest proportion of the particle count is emitted during the ignition phase in the first two firings. The two partial load phases at the end of the test cycle, on the other hand, had hardly any effect on the overall result.

On the basis of the findings from the interlaboratory tests described here as well as the various preliminary tests, recommendations for individual additions or corrections to the Blue Angel award criteria for stoves could be derived.

Furthermore, the extent of the emission-reducing effect of the electrostatic particle filter was investigated. In measurements with the particle separator switched on, particle number concentrations in the order of approx. 0.4 to 0.7 million particles per cm^3 were measured; without the electrostatic filter, average concentrations of approx. 15 to 25 million particles per cm^3 were measured (in each case without conversion to a reference oxygen concentration). An overall emission reduction of 97% was observed for the particle number concentration, and a reduction of 84% for the particle mass. As expected, the particulate filter had no influence on the concentration of gaseous carbon compounds in the exhaust gas.

1 Hintergrund und Zielsetzung

1.1 Hintergrund

Das Ziel von Umweltstandards für mit Holz betriebene Kaminöfen wie dem Blauen Engel (DE-UZ 212) ist die Reduzierung der Staub- und sonstigen Abgasemissionen. Dies kann beispielsweise durch Abscheidetechniken oder automatisierte Luftregelungen erreicht werden. Letztere verringern ungünstige Einflüsse der Ofenbetreibenden und bewirken eine bessere Verbrennung des Holzes. Solche Maßnahmen zur Emissionsminderung können dazu beitragen, dass weniger Schadstoffemissionen aus Öfen in Privathaushalten freigesetzt werden.

Das Umweltzeichen Blauer Engel zeichnet besonders umweltfreundliche Produkte und Dienstleistungen aus, die zudem hohe Ansprüche z.B. an Qualität und Gebrauchstauglichkeit erfüllen. Für die 2019 eingeführte Produktgruppe Kaminöfen verlangen die Vergabekriterien deutlich reduzierte Schadstoffemissionen im Vergleich zu den gesetzlichen Grenzwerten. Ziel ist es durch den Einsatz von Kaminöfen, die die Anforderungen des Blauen Engels erfüllen, die Emissionen durch Kaminöfen insbesondere im Bereich lungengängiger Feinstäube zu reduzieren.

Die Entwicklung der Vergabeanforderungen für das Umweltzeichen Blauer Engel für Kaminöfen (DE-UZ 212) wurde von Ökopool – Institut für Ökologie und Politik GmbH in Hamburg und vom DBFZ - Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH in Leipzig wissenschaftlich begleitet und ist im Hintergrundbericht von Ökopool dokumentiert. Die Veröffentlichung erfolgte als UBA Text 152/2020 „Umweltzeichen Blauer Engel: Entwicklung von Vergabekriterien für Kaminöfen für Holz“ (UBA 2020).

Die Kaminöfen durchlaufen für die Zertifizierung mit dem Blauen Engel ein erweitertes Typprüfverfahren, mit dem das reale Emissionsverhalten beim Verbrennen des Holzes besser abgebildet wird als in der Standard-Typenprüfung (DIN EN 13240 bzw. DIN EN 16510-1). Zusätzlich wurden strenge Grenzwerte für Schadstoffemissionen einschließlich Staub festgelegt. Die Öfen müssen unter den erweiterten Prüfbedingungen einen ambitionierten Grenzwert für die emittierte Staubmassenkonzentration von 15 mg/m^3 einhalten. Der gesetzliche Grenzwert beträgt 40 mg/m^3 unter Normprüfstand-Bedingungen.

Neben der Staubmasse wird wegen der hohen (Ultra-)Feinstaubentwicklung bei der Holzverbrennung auch die Anzahl der Staubpartikel betrachtet und es erfolgte für die Vergabe des Blauen Engel für Kaminöfen erstmalig die Einführung eines Partikelanzahl-Grenzwertes für Holzfeuerungen.

Hierfür wurde eine Prüfmethode entwickelt, welche aus den Erfahrungen bei Verbrennungsmotoren im KFZ-Bereich speziell für die Holzverbrennung angepasst wurde. Auf dieser Grundlage wurde ein Grenzwert für die Partikelanzahl von $5.000.000 \text{ cm}^{-3}$ vorgeschlagen, der ab 2022 für die Zertifizierung mit dem Blauen Engel eingehalten werden soll. Die Messvorschrift dazu wurde in Anlehnung an die Schweizer Verordnung SR 941.242 (EJPD 2006) erstellt und für die Anwendung im Bereich der Holzverbrennung angepasst und erprobt.

Die Zuverlässigkeit dieses Messverfahrens zur Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration sollte in Ringversuchen an stationären Holzfeuerungsanlagen überprüft werden. Die Prüfmethode sollte dabei soweit abgesichert werden, dass reproduzierbare Messergebnisse für die Partikelanzahlkonzentration aus der Holzverbrennung in Kaminöfen nach den Vorgaben des Blauen Engel für Kaminöfen ermittelt werden können. Entscheidend für die Eignung des Verfahrens und dessen Beschreibung ist, dass die Emissionen eines Kaminofens unabhängig

vom ausführenden Messinstitut gleich beurteilt werden, also vergleichbare Messergebnisse erreicht werden.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieses Projekts war es, die Prüfmethode zur Bestimmung der Staubpartikelanzahlkonzentration (Anhang C der Vergabekriterien DE-UZ 212) an Kaminöfen für Holz mithilfe von Ringversuchen zu validieren.

Im Zuge der Validierung sollten primär die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Wie stark variieren die Ergebnisse zwischen einzelnen Teilnehmenden (Prüfinstituten) bei gleichzeitiger Messung bzw. unter Vergleichbedingungen?
- Wie stark variieren die Ergebnisse bei wiederholten Prüfungen eines Ofens durch ein einzelnes Prüfinstitut (unter Wiederholbedingungen)?

Zudem sollten Informationen über die in Anhang B angegebenen Parameter (CO, OGC, Staubmasse, NO_x) gesammelt werden.

Der Prüfablauf im Ringversuch sollte den Vorgaben der Blauen Engel Methode DE-UZ 212 Anhang B folgen und Prüfzustände wie Anzündphase, Nennlast und Teillast weitestgehend abbilden. Um zu untersuchen, wie stark wiederholte Messungen am gleichen Kaminofen unter Verwendung des beschriebenen Verfahrens streuen, sollten wiederholte Messungen an einem Kaminofen durchgeführt werden und dabei die verschiedenen Prüfzustände unter Ausschöpfung der erlaubten Toleranzen des Prüfzyklus wiederholt werden, um damit zu untersuchen, welche Ergebnisvariationen daraus resultieren.

Die in den Vergaberichtlinien vorgegebenen Kenngrößen zur maximalen erweiterten Unsicherheit der Messeinrichtung sollten durch den geplanten Ringversuch zur Validierung der Methode überprüft und bei Bedarf in einer Revision der Vergabegrundlage angepasst werden.

Diskutiert, aber verworfen wurde das Konzept eines Ringversuchs, bei dem ein Kaminofen an verschiedene Prüfinstitute verschickt und dort an deren eigenem Prüfstand gemessen wird. Dadurch wäre das Gesamtverfahren der Prüfung, einschließlich Installation und Betrieb des Kaminofens durch das jeweilige Prüfinstitut, dem Ringversuch unterworfen worden. Unter diesen Umständen wäre es allerdings nicht möglich gewesen, Aussagen über die Zuverlässigkeit der jeweils gemessenen Partikelanzahlkonzentrationen zu erhalten. Selbst grobe Messfehler einzelner Prüfinstitute wären mangels Vergleichswerten nicht als solche identifizierbar gewesen. Im Ergebnis hätte die Streuung der Messwerte sicherlich die aktuelle Arbeit der Prüfinstitute insgesamt sehr gut wiedergegeben. Allerdings waren für dieses Projekt die Verfahrenskenngrößen des Messverfahrens bei korrekter Anwendung von Interesse, nicht die Streuung unter Einbeziehung von Fehlern bei der Anwendung. Vorstellbar wäre ein Ringversuch dieser Art, wenn der zugewiesene Wert und das Kriterium zur Leistungsbewertung mit hoher Sicherheit und unbeeinflusst von möglichen Messfehlern einzelner Teilnehmer festgelegt werden können. Dies war zu Beginn dieses Projekts allerdings nicht möglich, vor allem da ohne Kenntnis der Verfahrenskenngrößen (wesentliches Ziel dieses Projekts war es, diese Werte zu ermitteln) eine Festlegung des Kriteriums zur Leistungsbewertung nicht erfolgen konnte.

Ebenfalls diskutiert aber verworfen wurde die Verwendung eines Pelletofens für den Ringversuch. Bei der Verbrennung von Holzpellets wäre mit gleichmäßigeren Verbrennungsbedingungen und Emissionen zu rechnen gewesen. Allerdings ist zu erwarten, dass die überwiegende Mehrheit der Kaminöfen, die in Zukunft mit dem Blauen Engel ausgezeichnet

werden, mit Scheitholz betrieben werden. Diese Art von Brennmaterial hat daher die größere Relevanz für das Messverfahren.

1.3 Beteiligte Organisationen

Das Projekt wurde finanziell gefördert durch das Umweltbundesamt (UBA).

Die Leitung der Versuchsreihen zur Validierung des Prüfverfahrens in Form von Ringversuchen übernahm das HLNUG (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie), Dezernat I3 (Luftreinhaltung: Emissionen), welches nach DIN EN ISO/IEC 17043 akkreditierter Anbieter von Eignungsprüfungen für Emissionsmessungen ist. Die Akkreditierung ist gemäß Akkreditierungsurkunde beschränkt auf die Durchführung von Ringversuchen an einer Emissionssimulationsanlage, dennoch ließen sich die damit vorhandenen Kenntnisse auf die Durchführung von Ringversuchen an einem Kaminofen übertragen. Es wird aber darauf hingewiesen, dass der hier beschriebene Ringversuch nicht Teil des Akkreditierungsumfangs des HLNUG ist.

Das HLNUG wurde bei der Planung und Durchführung des Projekts unterstützt durch das Deutsche Biomasseforschungszentrum (DBFZ).

Eine Überprüfung der Partikelanzahlmessgeräte (Vorgaben der Messvorschrift in Anhang C an die größenabhängige Zählleffizienz) erfolgte durch das Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS) in Form von Kalibrierungen der Geräte vor und nach Durchführung der Ringversuche.

1.4 Zeitlicher Verlauf

Das hier beschriebene Projekt startete am 01.01.2022 und lief bis zum 30.06.2023. Der zeitliche Verlauf ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 1: Zeitplan des Projekts

TV-Nr.	Teilvorhaben (TV)	2021	2022	2023
1	Aufbau Prüfstand			
1.1	Planung Prüfstand			
1.2	Beschaffung Kaminofen			
1.3	Beschaffung Abgasführung			
1.4	Einbau Kaminofen und Abgasführung			
1.5	Fertigstellung Prüfstand			
2	Planung Ringversuch			
2.1	Planung Durchführung und Auswertung			
2.2	Entwurf Teilnehmerinformation und -unterlagen			
2.3	Vorbereitung Teilnehmerworkshop			
2.4	Teilnehmerworkshop			
2.5	Finalisierung Detailplanung Ringversuch			
3	Validierungsmessungen Prüfstand			
3.1	Ermittlung der Kenngrößen Prüfstand			
3.2	Prüfstand einsatzbereit			
4	Durchführung Ringversuch			
4.1	Durchführung Wiederholungsmessungen			
4.2	Kalibrierung Geräte Teilnehmer vor RV			
4.3	Durchführung Ringversuch mit externen			
4.4	Ergebnisabgabe durch Teilnehmer			
4.5	Kalibrierung Geräte Teilnehmer nach RV			
4.6	Auswertung der Ringversuchsergebnisse			
4.7	Abschluss Ringversuch			
5	Berichterstellung und Abstimmung mit UBA			

Quelle: Eigene Darstellung, HLNUG

2 Kaminofenprüfstand

2.1 Versuchsaufbau

2.1.1 Kaminofen

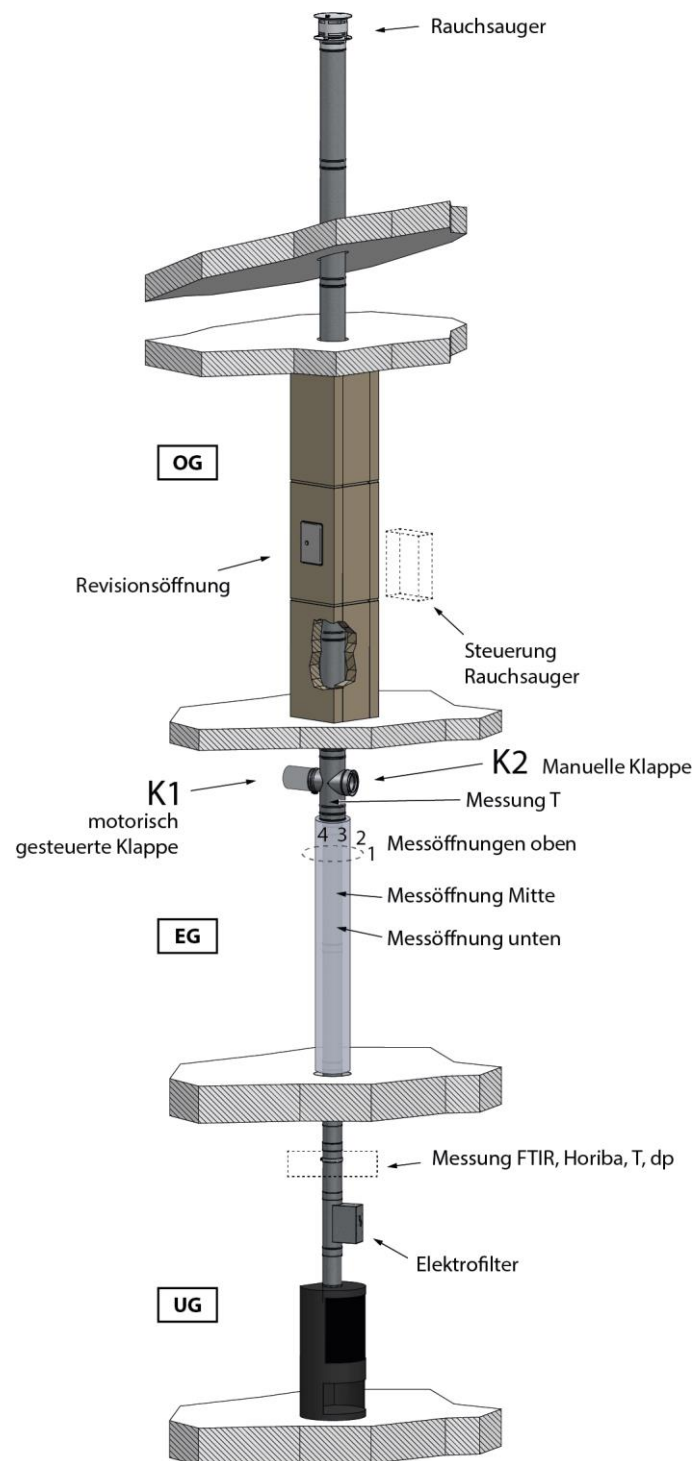
Der verwendete Kaminofen war ein Ofen des Typs „Aprica 2 RLU“ mit einer Nennwärmeleistung von 6 kW (Drooff Kaminöfen GmbH & Co. KG; Brilon, Deutschland) in Verbindung mit der Abbrandsteuerung „fire+“ desselben Herstellers und einem elektrostatischen Staubabscheider (ESP; „OTi-1“, OekoSolve AG; Plons-Mels SG, Schweiz). Es bestand keine Kooperation mit dem Hersteller, dieser war auch sonst in keiner Weise an der Auswahl der Geräte beteiligt. Die Beschaffung der Geräte wurde durch Mittel aus dem Forschungsvorhaben finanziert, die für diesen Zweck vorgesehen waren. Die für den Ringversuch verwendete Kombination von Einzelraumfeuerung, ESP und Abbrandsteuerung wurde ausgewählt aufgrund ihrer kompakten Größe und des bereits erhaltenen Umweltzeichens Blauer Engel, durch das Partikelanzahlkonzentrationen nahe den Vergabekriterien des Blauen Engel erwartet werden konnten. Die dazugehörige Abbrandsteuerung fire+ hilft durch ihre Indikatoren zur Brennstoffaufgabe und die Regelung der primären Verbrennungsluft, einen realistischen Praxiseinsatz nach den Forderungen des Blauen Engel abzubilden, bei dem ungünstige Einflüsse der Ofenbetreibenden minimiert sind. Die Einstellung des Kaminofens erfolgte nach Herstellerangaben ohne manuelle Eingriffe nach der Anzündphase, abgesehen von der Umstellung von Nennlast auf Teillast bei Beginn der Teillastphase.

Der ESP schaltet sich bei diesem Modell automatisch ein, wenn ein bestimmter Temperaturanstieg im Kamin registriert wird (OekoSolve AG 2021) und wurde mit Werkseinstellungen betrieben.

2.1.2 Installation und Messgeräte

Der Versuchsaufbau erstreckt sich, wie in der folgenden Abbildung 2 zu sehen ist, über drei Stockwerke, mit dem Kaminofen am unteren Ende und dem Rauchsauger am oberen Ende und Öffnungen für die Messgeräte dazwischen. Die vier Messöffnungen für die Ringversuchsteilnehmenden befinden sich im mittleren Stockwerk auf einem gemeinsamen Messquerschnitt mit einem Winkel von 45° zwischen den Öffnungen. Ca. 0,5 m und 1,0 m darunter befinden sich weitere Messöffnungen („Mitte“ und „unten“).

Abbildung 2: Schema des Prüfstands



Die Lage der Messpunkte im Querschnitt des Kanals in Höhe der „Messöffnungen oben“ ist in Abbildung 3 dargestellt.

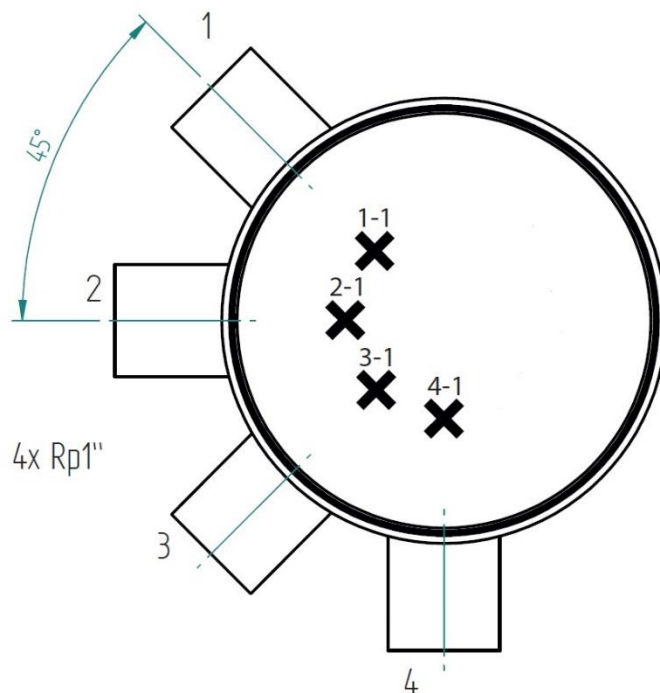
Quelle: Eigene Darstellung, HLNUG

In der Abbildung 3 ist ein Querschnitt des Kanals auf Höhe der „Messöffnungen oben“ gezeigt. Die im Ringversuch verwendeten Messpunkte für die Probenahme sind in dieser Abbildung mit Kreuzen gekennzeichnet.

Das bei der Verbrennung des Holzes im Kaminofen entstehende Rauchgas strömt in den Kamin und dort zunächst durch den Elektrofilter (ESP), der die Partikel elektrisch auflädt. Diese lagern

sich anschließend an den Wänden des Schornsteins an und aggregieren dort zu größeren Flocken.

Abbildung 3: Querschnitt des Kanals auf Höhe der „Messöffnungen oben“



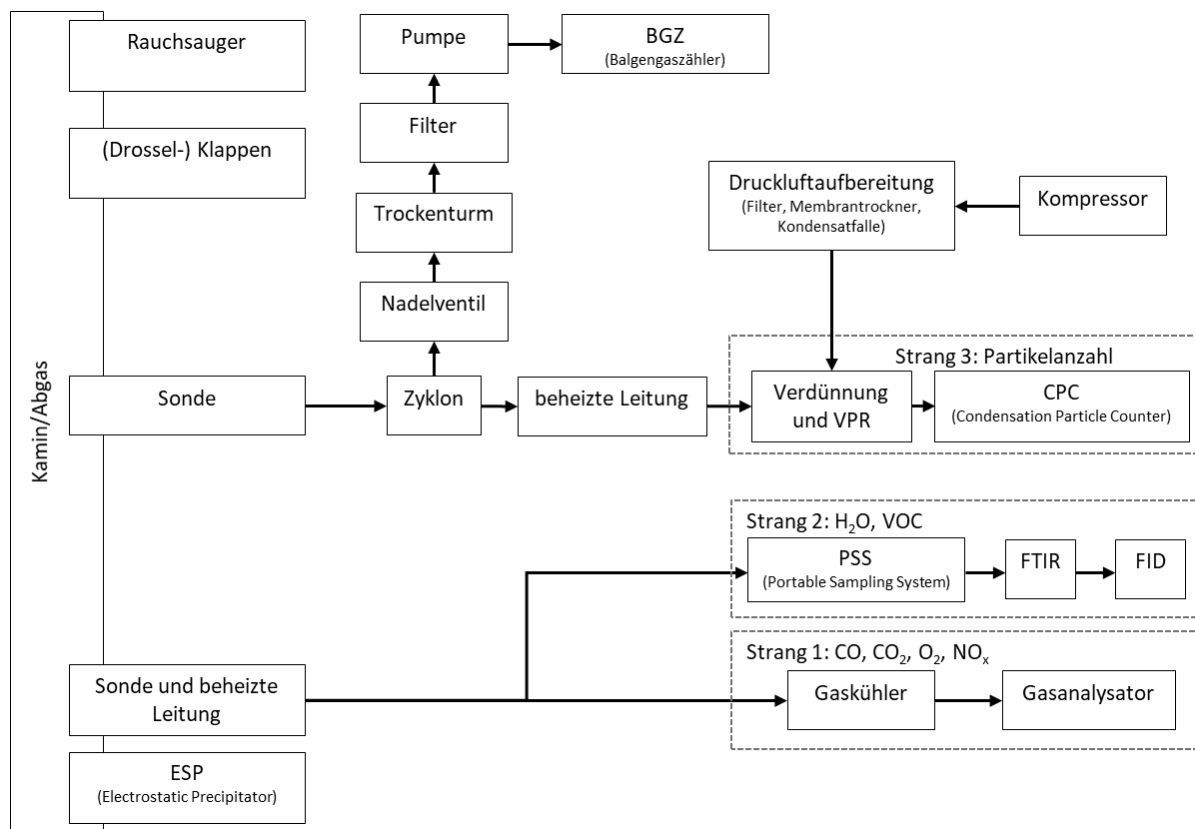
Die vier verwendeten Messpunkte für die Ringversuche sind mit Kreuzen (1-1 bis 4-1) gekennzeichnet.
Quelle: Eigene Darstellung, HLNUG

Im anschließenden Abschnitt des Kamins befindet sich eine beheizte Sonde mit Partikelfilter, die über eine beheizte Leitung einen Probengasstrom zu verschiedenen Gasanalysatoren leitet. Diese sind zum einen ein Gasanalysator (Horiba PG-350E) mit vorgeschaltetem Gaskühler (M&C ECP20-2) zur Messung von NO_x , CO, CO_2 und O_2 , ein FTIR (Gaset DX4000) mit PSS (Gaset Portable Sampling Unit) zur Messung des Wassergehaltes und ein Gesamt-Kohlenwasserstoff-Analysator (Bernath Atomic FID 3006).

Nach diesem Kaminabschnitt folgen (im nächsten Stockwerk des Gebäudes) die Messöffnungen zur Messung der Partikelanzahlkonzentration. Schließlich folgen größere Öffnungen mit Klappen zur Zugregelung und weiter oben ein Rauchsauger, bevor das Rauchgas über den Schornstein über das Dach abgeleitet wird.

Das für die Voruntersuchungen zum Ringversuch verwendete System zur Messung von Partikelanzahlkonzentrationen besteht aus einem Zyklon zur Abscheidung großer Partikel mitsamt Bypass und Trockenturm, Pumpe und Gaszähler um den benötigten Durchfluss des Zyklons sicherzustellen, und beheizter Leitung die zur Verdünnung und dem Messgerät führt. Die Verdünnung und Entfernung volatiler Verbindungen erfolgt mit dem eDiluter von Dekati, an dessen Auslass der Partikelzähler (Palas UF-CPC) angeschlossen ist. Die für die Verdünnung benötigte Druckluft wurde vor ihrem Einsatz mithilfe von Filtern und Trocknern aufbereitet (siehe Abbildung 4).

Abbildung 4: Schematische Übersicht der verwendeten Messgeräte



Quelle: Eigene Darstellung, HLNUG

Zur Datenaufzeichnung von CPC, BGZ und FID wurde Trendows genutzt (Kirsten Controlsystems GmbH; Tamm, Deutschland). Für das FTIR wurde die Herstellersoftware Calcmat 12.18 verwendet, während die Steuerung des Kaminofens über fire+ erfolgte und die des Rauchsaugers (sowie die Datenaufzeichnung für den Kaminofen, den Rauchsauger und die Gasanalysatoren) über Ignition (Inductive Automation; Folsom CA, USA).

Der Sauerstoffgehalt wurde für die Umrechnung der Partikelanzahl auf den Bezugssauerstoffgehalt von 13 Vol.-% benötigt. Der Wassergehalt wurde für die Einstellung eines geeigneten Volumenstroms im Zyklon genutzt, um den 50% Cut-off-Punkt von 0,7-1,5 µm einzuhalten. Er wurde jedoch nicht für eine Feuchtekorrektur des Messwertes genutzt, da der Partikelzähler lediglich verdünntes Abgas erhält, welches aufgrund des hohen Verdünnungsfaktors und der Trocknung der Verdünnungsluft als nahezu trocken angenommen werden kann.

2.1.3 Brennholz

Der Kaminofen kann laut Bedienungsanleitung für Scheitholz und Holzbriketts mit Wassergehalten unter 19% genutzt werden, mit dem Zusatz „ohne Rinde“ bei Buchenholz. Diese Vorgaben entsprechen den Angaben in den Vergaberichtlinien des Blauen Engel weitgehend, allerdings wird dort bei Scheitholz von naturbelassenem Holz mit anhaftender Rinde ausgegangen. Aufgrund der langen Brenndauer von Holzbriketts ist bei der Verwendung derselben die Durchführung eines kompletten Prüfzyklus an einem Tag schwierig. Für die Untersuchungen am Kaminofen und den späteren Ringversuch wurde Buchenholz ohne Rinde eingesetzt, mit einem Wassergehalt von ca. 12-13% ($16 \pm 4\%$ nach DIN EN 13240:2005 bzw. $15 \pm 3\%$ nach DIN EN 16510-1:2018).

Die Holzmenge für die einzelnen Abbrände folgte den Vergabekriterien des Blauen Engel und den technischen Daten des Kaminofens. Die somit geforderten 1,4 kg für Nennlast und 0,5 kg Holz für Teillast wurden mit jeweils 2 Scheiten erreicht. Die Holzscheite für den Nennlastbetrieb hatten eine Länge von ca. 19 cm (beschränkt durch die Maße des Feuerraums), die Scheite für den Teillastbetrieb hatten eine Länge von ca. 10 cm (siehe Drooff 2022).

Beim ersten Abbrand, zum Anzünden des Kaminofens, wurden zusätzlich Anzündholz (kleineres Buchenholz) und handelsübliche Kaminanzünder (paraffingetränkte Holzwolke) eingesetzt, wobei das Anzündholz mit ca. 350 g Anhang B der Vergaberichtlinien des Blauen Engel folgend „25% der Brennstoffmasse“ entspricht. Die 1,4 kg Holz des ersten Abbrandes waren in Anlehnung an den Quick User Guide in Anlage E des Prüfberichts (DBI 2020) und abweichend zu (Drooff 2022) auf 4 Scheite verteilt, statt 2 (bei derselben Länge) um durch die vergrößerte Oberfläche einen schnelleren Abbrand zu begünstigen. Ein Beispiel für die Schichtung von Holz und Anzündern beim Anzünden des Kamins ist in Abbildung 5 zu sehen.

2.1.4 Zugregelung

Die Vergabekriterien des Blauen Engel (RAL 2020) schreiben vor, dass die Anzündphase bei realem oder simuliertem Naturzug erfolgen soll und während der Nennlastphase ein Schornsteinzug von 12 ± 2 Pa einzustellen ist, sowie in der Teillastphase ein Zug von 6 ± 1 Pa bzw. nach Herstellerangaben des Ofens. Die erste Teillastmessung enthält dabei den Übergang von 12 Pa auf den Teillast-Zug. Dies ist darin begründet, dass bei diesen Vorgaben für Nennlast und Teillast die Messungen für die Vergabe des Blauen Engel gleichzeitig zu den Messungen der Typprüfung des Kaminofens erfolgen können.

Bei Messungen im Frühling 2022 mit Außentemperaturen von 5-15 °C wurde bei Naturzug jedoch ein stark erschwertes Anzünden mit größerer Rauchentwicklung beobachtet. Es ist in diesem Fall davon auszugehen, dass sich kein ausreichender Schornsteinzug/Unterdruck einstellte, der als „notwendige Voraussetzung für den ordnungsgemäßen Betrieb“ der Verbrennung eine ausreichende Sauerstoffmenge zuführt wie in (UBA 2020, S. 30 f.) beschrieben. Ein geringer Schornsteinzug kann, neben dem Erschweren des Anzündens, den ersten Abbrand zudem unnötig verlängern oder sogar zu einem Austritt von Verbrennungsgasen aus dem Feuerraum in den Aufstellraum führen (TFZ 2019).

Während (UBA 2020) der Anzündphase unter Naturzug einen großen Einfluss auf die Emissionen zuschreibt (aufgrund von unvollständiger Verbrennung durch geringe Reaktionsgeschwindigkeiten bei niedriger Feuerraumtemperatur sowie durch geringe Verweilzeit der Gase im Brennraum) und auch eine Beeinflussung der Folgeabbrände durch das beim Nachlegen vorhandene Glutbett, beschreibt (TFZ 2019) geringe Unterschiede zwischen Naturzug und geregelter Zug hinsichtlich Gesamtstaubemissionen und Abbranddauer (geringe Unterschiede speziell beim Anzünden von unten). Die Anzündphase wurde daher nicht bei Naturzug durchgeführt, um den ersten Abbrand leichter reproduzieren zu können und adverse Effekte wie den Austritt von Verbrennungsgasen unabhängig von Außenbedingungen zu verhindern.

Zur Regelung des Zugs wurde ein Rauchsauger (Kutzner +Weber Diajekt RSD 150) in Verbindung mit Klappen oberhalb der Messöffnungen genutzt, um den Kaminzug in mehreren Schritten unabhängig vom Differenzdruck zu regeln. Mit Hilfe dieser Vorrichtung wurde der Zug im Kamin während der Anzündphase auf 12 ± 2 Pa geregelt. Mit zunehmendem Verbrennungsgeschehen wurde die Saugleistung des Rauchsaugers im Laufe des ersten Abbrandes schrittweise gedrosselt und der Rauchsauger schließlich ganz deaktiviert, um den Kamin unter Naturzugbedingungen weiter zu betreiben. Trotz vollständig geöffneter Klappen in

einer Höhe von 4 m über dem Kamin überschritt der Zug am Messquerschnitt oft den Wert von 14 Pa. Um die Messung der Partikelanzahlkonzentration nicht negativ zu beeinflussen, wurde trotz dieser Überschreitung des vorgesehenen Zugbereichs von einer Zugdrosselung z.B. durch den Einbau von Klappen im Abgasrohrquerschnitt, abgesehen. Im Teillastbetrieb des Kaminofens konnten die in den Vergabekriterien des Blauen Engel geforderten 6 ± 1 Pa mit diesen vorgenommenen Einbauten in der Regel ebenfalls nicht erreicht werden, wobei bereits die Vergaberichtlinien des Blauen Engel den Zug der ersten Teillastmessung als „Übergang“ von 12 Pa auf den Teillast-Zug charakterisieren. Auch hier entwickelte der Kamin unter Naturzugbedingungen einen höheren Zug am Messquerschnitt für die Messung der Partikelanzahlkonzentration.

2.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung während des Ringversuchs erfolgte entsprechend dem Prüfzyklus des Blauen Engel mit Anzündphase (2 Holzaufgaben), Nennlastphase (3 Holzaufgaben bei Nennlast) und Teillastphase (2 Holzaufgaben bei Teillast). Der Regelbetrieb des Kaminofens wurde dabei spätestens innerhalb des zweiten Abbrands in der Anzündphase erreicht.

Wichtige Faktoren, die im Vorfeld des Ringversuchs festgelegt wurden, waren die Konfiguration des Holzes beim Anzünden und das Nachlegekriterium.

2.2.1 Anzünden

Die Abbrände der Anzündphase bestehen aus der ersten Holzaufgabe mit zusätzlichen Anzündhölzern und der zweiten Holzaufgabe mit Nennlast-Menge. Sie folgten hinsichtlich der Holzmasse den technischen Informationen des Kaminofens (Drooff 2022) und den Vergaberichtlinien des Blauen Engel (RAL 2020). Die Menge und Größe der Scheite des ersten Abbrandes folgte dem Quick User Guide in Anlage E (DBI 2020), in dem statt 2 großen Scheiten 4-5 mittelgroße Scheite für die Nennlast-Menge verwendet werden.

Zum Anzünden wurden zwei mittelgroße Holzscheite auf dem Boden des Feuerraums platziert, mit zwei Anzündern (mit Paraffin getränkte Holzwolke) dazwischen, und darauf die weiteren zwei Scheite und zuletzt die kleineren Anzündhölzer.

Abbildung 5: Schichtung von Buchenholz und Anzündern zum Anzünden des Kaminofens



Quelle: Eigene Darstellung, HLNUG

Das Anzünden von unten wurde gegenüber dem in der Anleitung beschriebenen Anzünden von oben bevorzugt, da es zu einem schnelleren Regelbetrieb des Kaminofens führte. Wenn Anzünder sowohl oben als auch unten platziert und angezündet wurden, sind die oberen Anzünder zum Teil erloschen (wahrscheinlich durch Sauerstoffmangel, da der untere Verbrennungsprozess den zugeführten Sauerstoff größtenteils verbrauchte), was zu einer erheblichen Rauchentwicklung führte.

Die Konfiguration des Anzündens (von oben oder von unten) wurde bereits in vielen Veröffentlichungen erörtert, so etwa auch von (Morin et.al. 2022), die in ihrem Artikel das Anzünden von unten bevorzugen, da es zu kürzeren Anzündphasen führt, mit höheren Emissionsraten (g/h) aber ähnlichen Emissionsfaktoren (g/kg Brennstoff) wie das Anzünden von oben, und keine Einflüsse auf die Temperaturen der nachfolgenden Abbrände beobachtet wurden. Dies verhalte sich zudem konsistent mit den Empfehlungen der U.S. EPA und dem typischen Nutzerverhalten.

Demgegenüber hält (TFZ 2019) ein schnelles Erreichen der benötigten Temperaturen in der Brennkammer für unerlässlich, um den Zustand geringer Temperaturen und erhöhter Bildung unvollständiger Verbrennungsprodukte so schnell wie möglich zu beenden. Es wird dabei allerdings keine allgemeingültige Empfehlung zum Anzünden von oben oder von unten ausgesprochen, da dies laut (TFZ 2019) von der Bauweise des Kaminofens abhängig ist und auch die Wahl von Anzünder und Holz sowie deren Anordnung im Brennraum Einfluss auf die Emissionen haben. Insbesondere bei Kaminofenmodellen mit einer Luftzufuhr von unten, z.B. durch einen Gitterrost unter der Brennkammer, scheint die Anzündmethode von unten vorteilhaft zu sein. Der in diesem Projekt verwendete Kaminofen hatte einen solchen Gitterrost im Boden der Brennkammer.

Laut einer österreichischen Marktstudie zum Nutzerverhalten von Festbrennstoff-Einzelraum-öfen (Umweltbundesamt [Österreich] 2013) führten 80% der Befragten ihren Anzündvorgang „von unten“ durch und lediglich 10% zündeten das Stückholz „von oben“ an (die Restlichen ca. 10% der Befragten machten zu diesem Punkt keine Aussagen). Eine vergleichbare Umfrage unter deutschen Kaminofennutzenden liegt leider nicht vor. Es kann daher nur spekuliert werden, ob das Nutzerverhalten in Deutschland dem in Österreich entspricht oder nicht.

2.2.2 Nachlegen von Brennholz

Alle Holzaufgaben nach dem Anzünden erfolgten nach Angaben der fire+-Steuerung des Kaminofens, welche auf einer Analyse der Abgastemperatur beruht (Drooff 2020, S. 11). Durch den Wechsel einer Signalleuchte von grün auf gelb sowie einen Signalton werden die Nutzenden hier aufgefordert, neues Brennholz aufzulegen.

In den Vergaberichtlinien des Blauen Engel werden folgende Nachlegekriterien genannt:

- ▶ sobald nur noch $10\% \pm 50$ g (zuzüglich Asche) des Brennstoffes im Feuerraum als Grundglut verbleiben, oder
- ▶ sobald der CO_2 -Gehalt des Abgases unter $4 \pm 0,5$ Vol.-% sinkt.

Diese Nachlegekriterien wurden aufgrund des damit verbundenen zusätzlichen Aufwands in der Versuchsdurchführung nicht eingesetzt. Zudem verweist (TFZ 2019, S. 81) darauf, dass das CO_2 -Nachlegekriterium sehr ofenspezifisch sei und zum Teil stark vom optimalen Zeitpunkt des Nachlegens abweichen kann. Wiederholte Durchführungen des Messzyklus und anschließende Vergleiche des Nachlege-Zeitpunktes zeigten, dass das CO_2 -Kriterium des Blauen Engel am verwendeten Ofen zu einem jeweils etwa 10 Minuten früheren Nachlegen geführt hätte als die genutzte Angabe der Abbrandsteuerung (deren Forderung nach neuem Holz erschien bei CO_2 -

Konzentrationen von ca. 3,0 bis 3,5 Vol.-%). Ein weiteres Argument gegen die zwei möglichen Nachlegekriterien in den Vergaberichtlinien ist, dass keines dieser Kriterien im realen Betrieb durch die Ofennutzenden angewandt werden kann, da der Ofen weder eine Wägung des Brennstoffes, noch eine Messung der CO₂-Konzentration durchführen kann. Im Rahmen dieses Projekts wurde daher das Nachlegen von Brennholz gemäß der Aufforderung durch die Ofensteuerungssoftware durchgeführt, so wie es im realen Betrieb auch zu erwarten ist.

3 Voruntersuchungen

3.1 Homogenitätstest

Vor den Ringversuchen wurde am Kaminofen-Prüfstand ein Homogenitätstest durchgeführt, um die Vergleichbarkeit der Messpunkte bei Partikelanzahlmessungen zu untersuchen. Der Homogenitätstest wurde nach DIN ISO 13528:2020 (1) konzipiert und ausgewertet. Diese Norm beschreibt statistische Verfahren für Eignungsprüfungen durch Ringversuche allgemein und ist nicht speziell für Emissionsringversuche ausgelegt. In Anlehnung an Cordes *et al.* (Cordes 2015) wurde der Homogenitätstest für Partikelanzahl-Emissionsringversuche an Kaminöfen angepasst.

Die Fragestellung der Homogenität von Probenahmepunkten bei einem Ringversuch, der die Probenahme miteinschließt, ist praktisch identisch mit der Fragestellung der Homogenität von Proben bei Ringversuchen, die keine Probenahme miteinschließen. In beiden Fällen soll der Erfolg der Teilnehmenden nur von der eigenen Tätigkeit abhängen, nicht aber von Handlungen des Ringversuchsanbieters, auf die die Teilnehmenden keinen Einfluss haben (in unserem Fall von dem Messpunkt). Bei üblichen (Versand-)Ringversuchen beginnt die Tätigkeit der Teilnehmenden mit dem Erhalt der Ringversuchsprobe. Der Anbieter muss hier also sicherstellen, dass alle Teilnehmenden vergleichbare Proben erhalten. Maßgeblich ist hier die Norm DIN ISO 13528 „*Statistische Verfahren für Eignungsprüfungen durch Ringversuche*“, welche in Anhang B einen Homogenitätstest definiert. Dieser Homogenitätstest soll auf die Frage der Gleichwertigkeit der Messpunkte bei Partikelanzahlmessungen im Kaminofen angewandt werden. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Ergebnisse der Ringversuchsteilnehmenden nicht maßgeblich von deren zugewiesenen Messpunkten abhängen, sondern nur von Faktoren, die sie selbst beeinflussen können.

3.1.1 Konzept des Homogenitätstests

Im Ringversuch bestimmen mehrere Teilnehmende gleichzeitig die Partikelanzahlkonzentration im Abgas des Kaminofens. Die Tätigkeit der Teilnehmenden beginnt mit der Probenahme, konsequenterweise musste das HLNUG hier sicherstellen, dass allen Teilnehmenden ein vergleichbares Medium für ihre Probenahme zur Verfügung steht. Aufgrund der hohen Analogie der Problemstellung erschien es sinnvoll, den Homogenitätstest der Norm DIN ISO 13528 mit möglichst minimalen Modifikationen als Homogenitätstest für den Nachweis der Gleichwertigkeit verschiedener Probenahmepunkte am Kamin zu verwenden.

Dieser Überlegung folgend wurde folgendes Verfahren entwickelt:

- ▶ Die Prüfung auf Homogenität der Partikelanzahlkonzentration an verschiedenen Punkten im Kanalquerschnitt wurde durch das Dezernat I3 des HLNUG durchgeführt.
- ▶ Es wurden zwei Partikelzähler eingesetzt, die parallel die Partikelanzahlkonzentration bestimmten. Ein Messgerät verblieb für alle Abbrände stationär in der Messöffnung „Mitte“ (siehe Abbildung 2). Das andere Messgerät wanderte zwischen den für die Ringversuchsteilnehmenden zur Verfügung stehenden Positionen.
- ▶ Es wurden $m = 4$ Wiederholmessungen an $g = 8$ Punkten im Kanal durchgeführt, welche alle den Ringversuchsteilnehmenden zur Verfügung stehenden Probenahmepunkte gleichmäßig berücksichtigen.
- ▶ Die Wiederholbestimmungen wurden als separate Probenahmen durchgeführt. Da der Prüfgegenstand in diesem Fall das durch den Kamin strömende Verbrennungsabgas ist und

somit nur für wenige Sekunden existiert, ist dieses Vorgehen die beste technisch umsetzbare Annäherung an wirkliche Wiederholmessungen.

- ▶ Die $g \times m$ Messungen wurden (zwangsläufig) in chronologischer Reihenfolge durchgeführt.
- ▶ Es wurden die Standardabweichung innerhalb der Messpunkte s_w , die Standardabweichung der Messpunktmittelwerte s_x und die Standardabweichung zwischen den Messpunkten s_s bestimmt, wie in DIN ISO 13528, Anhang B.3 dargestellt.

Als Bewertungskriterium für die Homogenität der Probenahmepunkte wurde Ungleichung B.1 der DIN EN 13528 herangezogen. Sie stellt einen Zusammenhang zwischen dem Präzisionskriterium in den Ringversuchen σ_{pt} und der Standardabweichung zwischen den Messpunkten s_s im Homogenitätstest her:

$$s_s \leq 0,3 \sigma_{pt}$$

Wenn diese Ungleichung erfüllt ist, können die Messpunkte im Ringversuch als hinreichend vergleichbar angesehen werden und die Ergebnisse der Ringversuchsteilnehmenden werden nicht maßgeblich von den ihnen zugewiesenen Messpunkten beeinflusst.

3.1.2 Ergebnis des Homogenitätstests

Jeder der acht Messpunkte wurde mit dem mobilen Messgerät viermal angefahren. Jeder Messpunkt wurde dabei dreimal bei Vollast (ca. 1,4 kg Holz) und einmal bei Teillast (ca. 0,5 kg Holz) beprobt. Die Partikelanzahlkonzentration wurde mit einer Frequenz von 1 Hz ermittelt und die Summe über die Dauer eines Abbrands gebildet. Abweichend von den Vergabekriterien für den „Blauen Engel“ für Kaminöfen erfolgte keine Umrechnung auf den Normzustand und die Bezugssauerstoffkonzentration. Dies hat keinen Einfluss auf die Ergebnisse des Homogenitätstests, da eine Umrechnung auf den Bezugssauerstoffgehalt eine Multiplikation mit einem jeweils identischen Faktor für die zeitgleich gemessenen „Ref“ und „Grid“ Messwerte bedeuten würde, was sich bei Berechnung des Quotienten *Grid/Ref* wieder kürzen würde. In der Tabelle 1 sind die Messergebnisse aus dem Homogenitätstest zusammengefasst.

Tabelle 1: Messergebnisse des Homogenitätstests

Mittelwerte der Partikelanzahlkonzentration über jeweils einen ganzen Abbrand an einem festen Messpunkt („Ref“) und an zeitgleich gemessenen wechselnden Punkten im Messquerschnitt („Grid“).

Messpunkt Grid	Netzmessung 1 [10 ⁵ cm ⁻³]		Netzmessung 2 [10 ⁵ cm ⁻³]		Netzmessung 3 [10 ⁵ cm ⁻³]		Netzmessung 4 [10 ⁵ cm ⁻³]	
	Grid	Ref	Grid	Ref	Grid	Ref	Grid	Ref
Oben 1-1	1,57	1,53	4,39	5,70	3,10	5,28	0,84	0,91
Oben 1-2	11,06	23,67	1,72	2,55	5,11	7,48	1,57	2,01
Oben 2-1	4,66	4,67	5,85	7,47	4,27	7,19	1,15	2,12
Oben 2-2	6,91	12,46	23,16	37,81	12,24	23,52	2,41	3,39
Oben 3-1	4,73	4,61	16,46	27,14	4,87	6,17	2,45	3,67
Oben 3-2	1,96	2,48	3,41	4,50	9,17	11,25	1,06	1,45
Oben 4-1	2,16	2,92	3,44	5,31	6,48	9,26	1,23	1,60
Oben 4-2	3,64	4,27	2,53	2,92	10,40	16,85	1,63	2,22

Die Messwerte sind jeweils im Betriebszustand ohne Umrechnung auf eine Bezugssauerstoffkonzentration angegeben. Jeder der acht Messpunkte „Grid“ wurde insgesamt viermal angefahren, während sich der Messpunkt „Ref“ für sämtliche Abbrände mittig im Messquerschnitt „Mitte“ befand. Zur Lage der Messpunkte im Messquerschnitt siehe Abbildung 3.

Die Positionen „1-1“ bis „4-1“ bezeichnen dabei die in Abbildung 3 dargestellten Positionen im Messquerschnitt. Die Positionen „1-2“ bis „4-2“ bezeichnen jeweils einen Punkt auf der gleichen Messachse, aber in 4 cm Entfernung von der hinteren Kanalwand. Die insgesamt 8 Messpunkte sind damit spiegel- bzw. rotationssymmetrisch um den Mittelpunkt des Kanals verteilt.

Für die weitere Analyse wird für jedes der 32 „Grid-Ref“-Paare der Quotient *Grid/Ref* gebildet. Die Quotienten sind in der Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Auswertung des Homogenitätstests

Quotient *Grid/Ref* für die 32 Messungen im Homogenitätstest

Messpunkt	Netzmessung 1	Netzmessung 2	Netzmessung 3	Netzmessung 4
Oben 1-1	1,027	0,771	0,587	0,922
Oben 1-2	0,467	0,674	0,684	0,782
Oben 2-1	0,998	0,783	0,594	0,544
Oben 2-2	0,555	0,613	0,521	0,712
Oben 3-1	1,024	0,606	0,790	0,667
Oben 3-2	0,792	0,758	0,815	0,727
Oben 4-1	0,739	0,648	0,700	0,768
Oben 4-2	0,852	0,869	0,617	0,736

Zur Lage der Messpunkte im Messquerschnitt siehe Abbildung 3.

Mit Gleichungen B.4-B.10 der DIN EN ISO 13528 können nun die Standardabweichung innerhalb der Messpunkte s_w , die Standardabweichung der Messpunktmittelwerte s_x und die Standardabweichung zwischen den Messpunkten s_s berechnet werden.

- ▶ Standardabweichung innerhalb der Messpunkte $s_w = 13,9\%$
- ▶ Standardabweichung der Messpunktmittelwerte $s_x = 7,3\%$
- ▶ Standardabweichung zwischen den Messpunkten $s_s = 2,3\%$

Mit dem hier ermittelten s_s kann das minimal zulässige Präzisionskriterium $\sigma_{pt,min}$ ermittelt werden, bei dem Ungleichung B.1 der DIN ISO 13528 ($s_s \leq 0,3 \sigma_{pt}$) noch erfüllt ist:

- ▶ Minimal zulässiges Präzisionskriterium $\sigma_{pt,min} \geq 7,7\%$

Die Bewertung des Ringversuchs musste daher mit einem Kriterium zur Leistungsbewertung von mindestens 7,7% des jeweiligen zugewiesenen Wertes (Sollwert) durchgeführt werden, um einen unangemessenen Einfluss der nicht perfekt homogenen Verteilung der Partikel im Messquerschnitt auf die Bewertungsergebnisse auszuschließen.

Aufgrund der relativ großen Streuung der Messergebnisse der Ringversuchsteilnehmenden lagen die Kriterien zur Leistungsbewertung σ_{pt} im Ringversuch bei deutlich höheren Werten als dem hier ermittelten $\sigma_{pt,min}$. Für einzelne Abbrände lag das Kriterium zur Leistungsbewertung bei 25% bis 129% des zugewiesenen Wertes (Sollwertes), für die gesamte Prüfreihe aus sieben Abbränden lag das Kriterium zwischen 30% und 73% des zugewiesenen Wertes (Sollwertes).

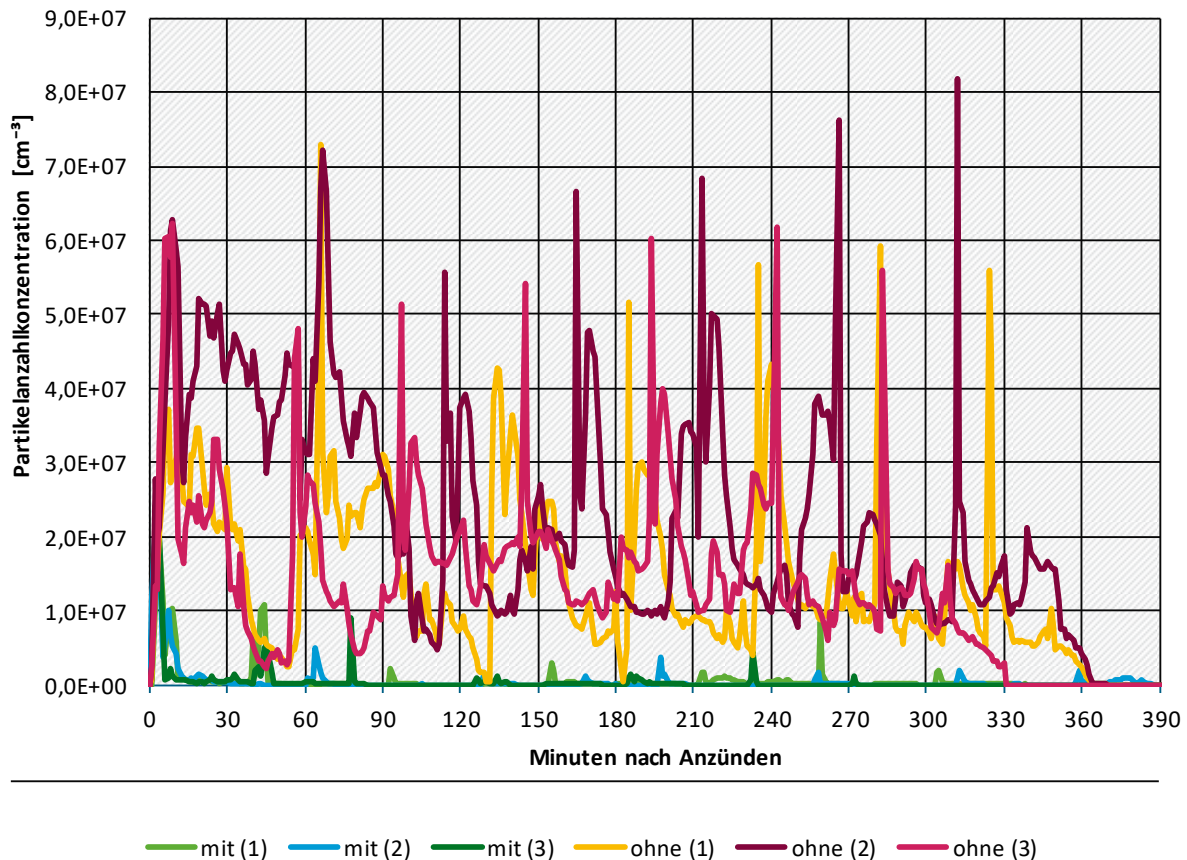
3.2 Partikelfilter

3.2.1 Einfluss des Elektrofilters auf die Partikelanzahlkonzentration

Unabhängig vom Ringversuch wurde für den verwendeten Kaminofen untersucht, wie groß der emissionsmindernde Effekt des in diesem Modell verbauten Elektrofilters für verschiedene Schadstoffarten ist. Die Messergebnisse zur Partikelanzahlkonzentration in jeweils drei verschiedenen Abbrandreihen mit und ohne eingeschalteten Elektrofilter sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 6: Effekt des Elektrofilters auf den Verlauf der Partikelanzahlkonzentration

Partikelanzahlkonzentrationen mit und ohne eingeschaltetem Elektrofilter



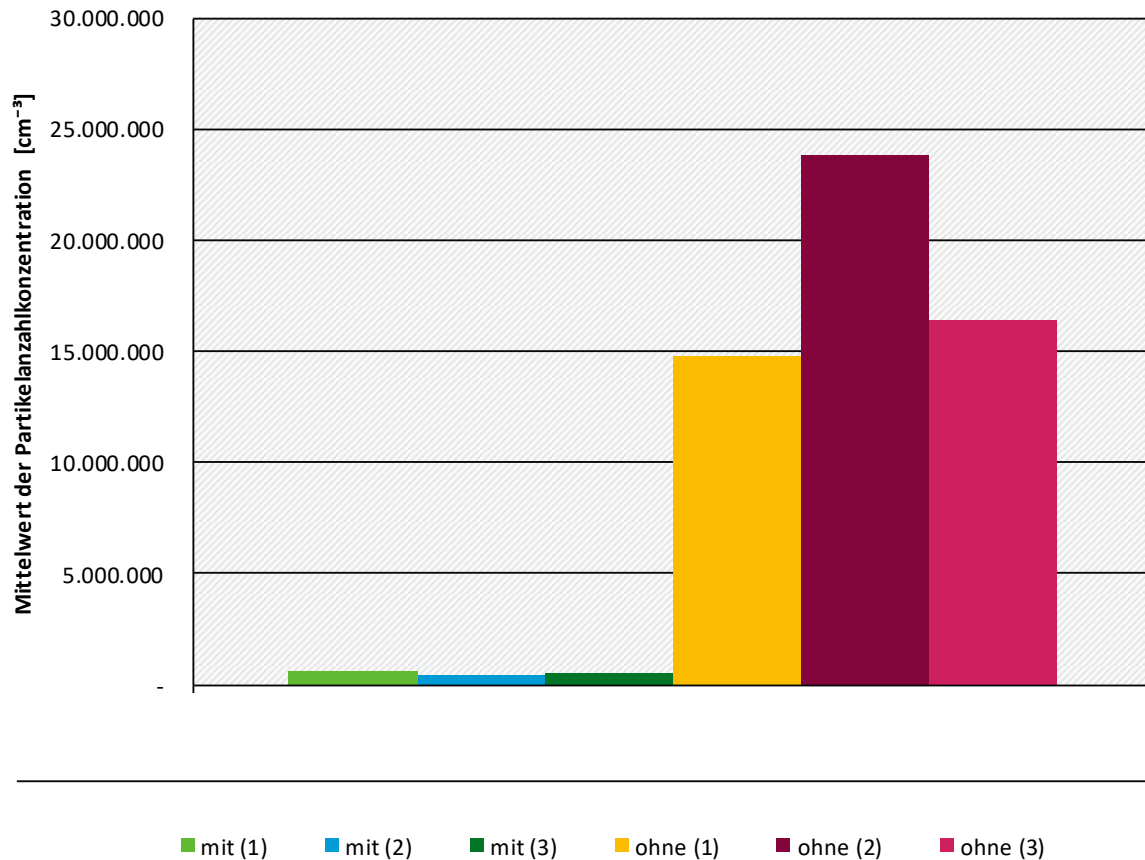
Quelle: HLNUG

Anhand der Verläufe der Messwerte ist der Effekt des Elektrofilters auf die Partikelanzahlkonzentration gut zu erkennen. Mit eingeschaltetem Elektrofilter ist nach dem Anzünden ein Anstieg der Partikelkonzentration zu beobachten, welche jedoch deutlich abnimmt sobald sich der ESP aufgrund des Temperaturanstiegs im Kamin automatisch einschaltet. Die Nachlegezeitpunkte sind jeweils von einem kurzzeitigen Anstieg der Partikelanzahlkonzentration gekennzeichnet. Bei Prüfzyklen ohne Verwendung des Elektrofilters werden deutlich höhere Partikelanzahlkonzentrationen beobachtet. Auch hier ist der jeweilige Nachlegezeitpunkt deutlich durch einen Anstieg und ein zeitweises Maximum der Partikelanzahlkonzentration gekennzeichnet, jedoch bleibt diese über die gesamte Abbrandphase und den gesamten Prüfzyklus hinweg deutlich höher.

Eine Darstellung der mittleren Partikelanzahlkonzentration über den gesamten Prüfzyklus ist in der folgenden Abbildung zu finden. In den drei Prüfzyklen ohne Elektrofilter lag die mittlere Konzentration bei ca. 15 bis 25 Millionen Partikeln pro cm^3 , mit eingeschaltetem Elektrofilter wurden im Mittel ca. 0,4 bis 0,7 Millionen Partikel pro cm^3 gemessen (jeweils ohne Umrechnung auf eine Bezugssauerstoffkonzentration).

Abbildung 7: Effekt des Elektrofilters auf die mittlere Partikelanzahlkonzentration

Partikelanzahlkonzentrationen mit und ohne eingeschaltetem Elektrofilter



Quelle: HLNUG

Um die Streuung zwischen den Abbränden und Prüfzyklen zu reduzieren und einen aussagekräftigeren Vergleich zu ermöglichen wurde der Mittelwert aus den drei Prüfzyklen mit eingeschaltetem Elektroabscheider und aus den drei Prüfzyklen ohne Elektroabscheider berechnet und in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Werte sind im Normzustand trocken und bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 13% angegeben. Außerdem wurde der Quotient der Partikelkonzentration mit und ohne Elektroabscheider berechnet, um eine Aussage über die Effizienz des Elektroabscheiders zu ermöglichen.

Tabelle 3: Partikelanzahlkonzentrationen mit und ohne eingeschaltetem Elektroabscheider

Angegeben sind Mittelwerte aus jeweils drei verschiedenen Prüfzyklen.

Zeitraum	Partikelanzahlkonzentration <u>ohne</u> Elektroabscheider [10 ⁶ cm ⁻³]	Partikelanzahlkonzentration <u>mit</u> Elektroabscheider [10 ⁶ cm ⁻³]	Minderungsfaktor (und Abscheidegrad)
Abbrand 1 (Anbrandphase)	46,1	3,43	13 (93%)
Abbrand 2 (Anbrandphase)	28,0	0,668	42 (98%)
Abbrand 3 (Volllast)	22,4	0,164	136 (99%)
Abbrand 4 (Volllast)	18,2	0,191	96 (99%)
Abbrand 5 (Volllast)	21,4	0,245	87 (99%)
Abbrand 6 (Teillast)	22,1	0,291	76 (99%)
Abbrand 7 (Teillast)	22,8	0,398	57 (98%)
Vollständiger Prüfzyklus aus 7 Abbränden	25,4	0,661	38 (97%)

Die angegebenen Werte beziehen sich auf den Mittelwert von jeweils 3 in Abbildung 6 und Abbildung 7 gezeigten Messreihen, jeweils im Normzustand (trocken) und berechnet auf eine Bezugssauerstoffkonzentration von 13 Vol.-%.

Die Daten in Tabelle 3 zeigen eindeutig, dass die Partikelanzahlkonzentration signifikant geringer ist, wenn der Elektroabscheider eingeschaltet ist. Der Minderungsfaktor (Quotient ohne Elektroabscheider/mit Elektroabscheider) variiert zwischen 13 und 136 für die verschiedenen Abbrände, was Abscheidegraden von 93% bis über 99% entspricht. Inwieweit diese Unterschiede der Minderungsfaktoren auf tatsächliche Variationen der Effizienz für eventuell unterschiedliche Partikeleigenschaften zurückzuführen sind oder auf die großen Schwankungen in der Partikelanzahlkonzentration zwischen Abbränden, kann anhand dieser Daten nicht zuverlässig geklärt werden. Für ganze Prüfzyklen hingegen reduziert der Elektroabscheider die Partikelanzahlkonzentration um einen Faktor 38. Dies entspricht einem Abscheidegrad von 97% und übertrifft damit deutlich den in DE-UZ 212 geforderten Mindestabscheidegrad von 90%.

Bei den hier durchgeführten Messungen wurde kein signifikanter Unterschied zwischen der emittierten Partikelanzahlkonzentration in der Volllast- und der Teillastphase beobachtet. Im Falle von weiteren zusätzlichen Teillastabbränden wären allerdings mit fortschreitender Abkühlung des Kamins wahrscheinlich ansteigende Schadstoffkonzentrationen zu erwarten.

3.2.2 Einfluss des Elektrofilters auf die Partikelmassenkonzentration

Zusätzlich zur Untersuchung der Effizienz des Elektroabscheiders bezüglich der Partikelanzahlkonzentration wurde der Einfluss des Elektroabscheiders auf die Partikelmasse untersucht. Die

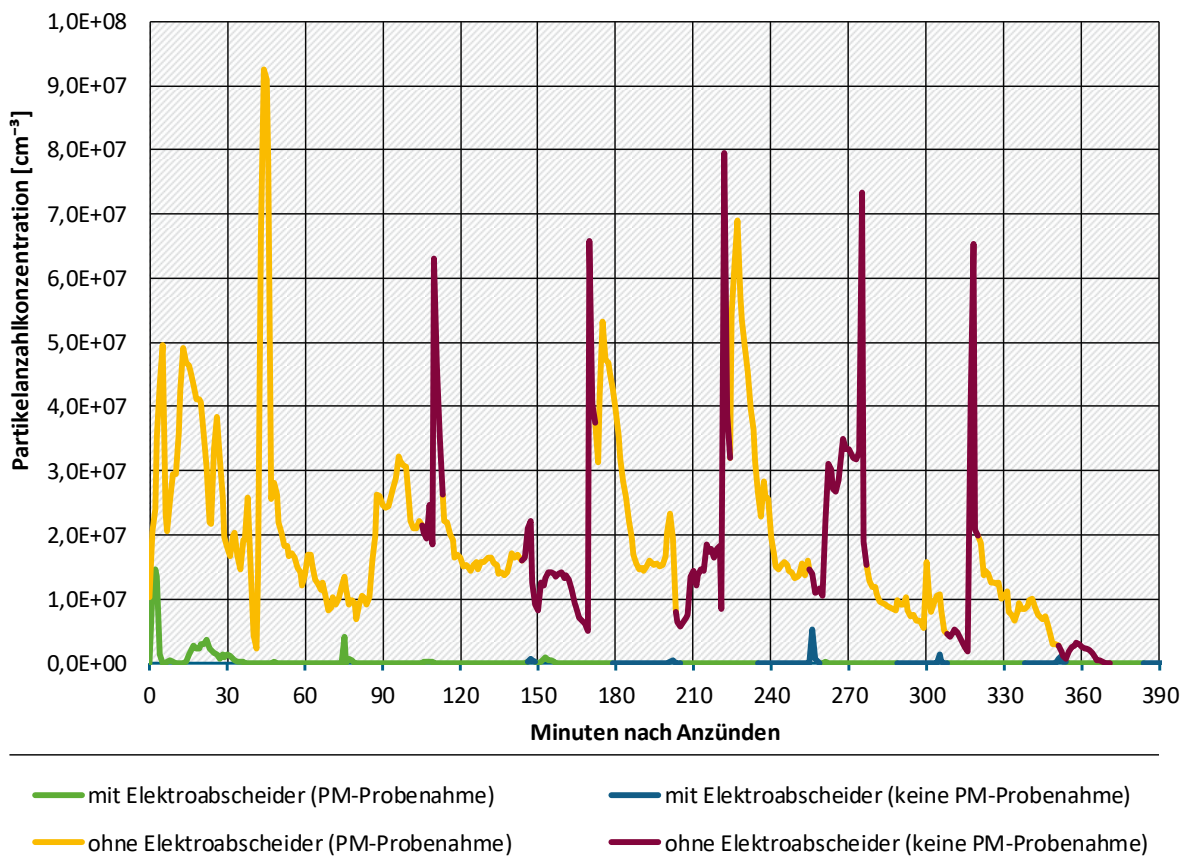
Probenahme für die gravimetrische Staubmessung erfolgte gemäß Anhang B der Vergabekriterien. Die Messungen umfassen für die sieben Abbrände sechs Probenahmen:

- eine Probenahme über die gesamte Anzündphase (erste zwei Abbrände),
- drei Probenahmen während der Nennlast-Phase und
- zwei Probenahmen während der Teillast-Phase.

Für a) wurde die Staubmessung über den kompletten Anzündbetrieb (Anzündfeuer und erste Wiederauflage) durchgeführt. Für b) und c) wurde die Probenahme 3 min nach dem Auflegen gestartet und über eine Dauer von 30 min durchgeführt. Die Messung der Staubmasse erfolgte nach DIN EN 16510-1:2018 Anhang F, dem von der Vergaberichtlinie DE-UZ 212 vorgegebenen Messverfahren.

Abbildung 8: Partikelanzahlkonzentrationen während der Staubmassenbestimmung

Partikelanzahlkonzentrationen mit und ohne eingeschaltetem Elektrofilter



Quelle: HLNUG

Abbildung 8 zeigt die Partikelanzahlkonzentrationen mit und ohne Elektroabscheider für die zwei Prüfzyklen der PM-Messungen. Für die Prüfzyklen sind jeweils die Zeiträume der PM-Probenahme farblich hervorgehoben. Diese Darstellung soll verdeutlichen, dass die Probenahme gemäß Normverfahren nicht über den gesamten Zyklus erfolgte, sondern für die Probenahmen 2 bis 6 jeweils 3 min nach dem Auflegen von Brennholz gestartet und dann über einen Zeitraum von 30 min durchgeführt wurde. Die Resultate der gravimetrischen Staubmessungen sind in Tabelle 4 gezeigt.

Tabelle 4: Partikelmassenkonzentrationen mit und ohne eingeschaltetem Elektroabscheider

Zeitraum	Partikelmassen- konzentration <u>ohne</u> Elektroabscheider [mg/m ³]	Partikelmassen- konzentration <u>mit</u> Elektroabscheider [mg/m ³]	Minderungsfaktor (und Abscheidegrad)
Abbrand 1 und 2 (Anbrandphase)	49,9	9,0	6 (82%)
Abbrand 3 (Volllast)	23,2	8,4	3 (64%)
Abbrand 4 (Volllast)	71,0	2,7	26 (96%)
Abbrand 5 (Volllast)	52,9	7,2	7 (86%)
Abbrand 6 (Teillast)	7,8	1,8	4 (77%)
Abbrand 7 (Teillast)	17,5	4,5	4 (74%)
Summe aus allen 6 Probenahmen	38,6	6,3	6 (84%)

Die angegebenen Werte beziehen sich auf die in Abbildung 8 gezeigten Messreihen, jeweils im Normzustand (trocken) und berechnet auf eine Bezugssauerstoffkonzentration von 13 Vol.-%.

Die Daten in Tabelle 4 zeigen eindeutig, dass auch die Partikelmassenkonzentration signifikant abnimmt, wenn der Elektroabscheider eingeschaltet ist. Der Minderungsfaktor (Quotient ohne Elektroabscheider/mit Elektroabscheider) für die Partikelmasse variiert zwischen 3 und 26 für die verschiedenen Abbrände. Für den ganze Prüfzyklus reduzierte der Elektroabscheider die Partikelmassenkonzentration um den Faktor 6. Dies entspricht einem Abscheidegrad von 84% und übertrifft damit deutlich den in DE-UZ 212 geforderten Mindestabscheidegrad von 75%.

Die im Betrieb ohne Elektroabscheider gemessene Staubmassenkonzentration liegt mit 38,6 mg/m³ unter dem allgemeinen Grenzwert von 40 mg/m³. Die im Betrieb mit eingeschaltetem Elektroabscheider gemessene Staubmassenkonzentration von 6,3 mg/m³ unterschreitet den in DE-UZ 212 geforderten Grenzwert von 15 mg/m³ deutlich.

Um einen Vergleich zwischen der Effizienz des Elektroabscheiders bezüglich Partikelmasse (PM) und Partikelanzahl (PN) durchführen zu können, müssen die Partikelanzahlkonzentrationen für die Zeiträume der PM-Probenahme ausgewertet werden. Die Zeiträume der PM-Probenahme sind, wie oben beschrieben, nicht mit den Zeiträumen der Abbrände identisch, so dass sie nicht das ganze Geschehen während des kompletten Prüfzyklus widerspiegeln und ein gewisser Anteil der emittierten Partikelmasse nicht berücksichtigt wird. Die Partikelanzahlkonzentrationen für die Zeiträume der PM-Probenahme sind in Tabelle 5 gezeigt.

Tabelle 5: Partikelanzahlkonzentrationen während der Partikelmassenprobenahmen

Zeitraum	Partikelanzahlkonzentration <u>ohne</u> Elektroabscheider [10 ⁶ cm ⁻³]	Partikelanzahlkonzentration <u>mit</u> Elektroabscheider [10 ⁶ cm ⁻³]	Minderungsfaktor (und Abscheidegrad)
PM-Probenahme während Abbrand 1 und 2 (Anbrandphase)	44,8	0,945	47 (98%)
PM-Probenahme während Abbrand 3 (Volllast)	20,2	0,154	131 (99%)
PM-Probenahme während Abbrand 4 (Volllast)	32,4	0,0082	3936 (99,97%)
PM-Probenahme während Abbrand 5 (Volllast)	29,6	0,0247	1201 (99,9%)
PM-Probenahme während Abbrand 6 (Teillast)	9,20	0,0093	990 (99,9%)
PM-Probenahme während Abbrand 7 (Teillast)	13,7	0,0213	643 (99,8%)
Mittelwert über alle 6 PM-Probenahmezeiträume	33,8	0,158	215 (99,5%)

Der Vergleich mit Tabelle 3 zeigt eindrucksvoll, dass die durch den Elektrofilter erreichte Emissionsminderung bei der Partikelanzahlkonzentration in den späteren Phasen der einzelnen Abbrände deutlich größer ausfällt als zu Beginn der Abbrände. Während der Minderungsfaktor zwischen den mittleren Partikelanzahlkonzentrationen ohne und mit eingeschaltetem ESP bei Betrachtung des gesamten Abbrands (einschließlich des Nachlegens von Brennholz) zwischen 13 und 136 lag, liegen die Minderungsfaktoren für die Zeiträume der PM-Probenahmen 2 bis 6, bei denen die extrem hohen Konzentrationen kurz nach dem Auflegen von Brennholz nicht berücksichtigt werden, bei Werten zwischen 131 und mehr als 3900. Dies entspricht jeweils Abscheidegraden von deutlich über 99%.

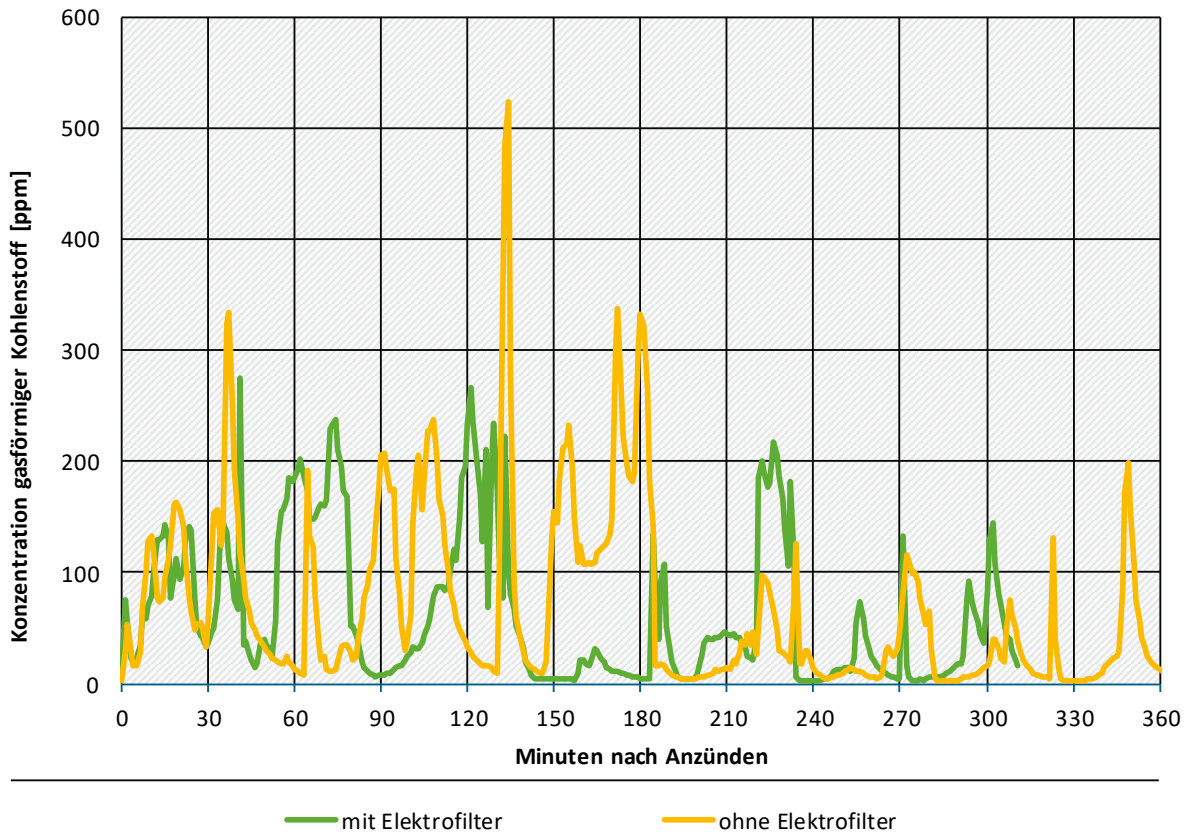
3.2.3 Gasförmige Kohlenwasserstoffe

Ergänzend zu den zuvor beschriebenen Analysen der Partikelanzahlkonzentration und der Partikelmassenkonzentration wurde auch der Gesamtgehalt an gasförmigen Kohlenwasserstoffen im feuchten Abgas untersucht. Dazu wurde ein Flammenionisationsdetektor (FID) eingesetzt und die Messwerte als Propan-Äquivalente angegeben. Die Messung wurde nach DIN EN 16510-1:2018 Anhang E und fortlaufend über einen gesamten Prüfzyklus bestehend aus Anzündphase (zwei Abbrände), Nennlastphase (drei Abbrände) und „Teillast“-Phase (zwei Abbrände) durchgeführt. Abbildung 9 zeigt den Verlauf des Gesamtgehalts an Kohlenwasserstoffen im feuchten Abgas im Vergleich für einen Prüfzyklus mit ein- beziehungsweise

ausgeschaltetem Elektrofilter. Es ist zu erkennen, dass der Elektrofilter wie erwartet den Gesamtgehalt an Kohlenwasserstoffen nicht maßgeblich beeinflusst.

Abbildung 9: Gesamtgehalt an gasförmigen Kohlenwasserstoffen im Abgas

Gesamtgehalt an Kohlenwasserstoffen im Abgas mit und ohne Elektrofilter



Die angegebenen Werte beziehen sich auf den Normzustand feucht und berücksichtigen nur gasförmige Kohlenstoffverbindungen.

Quelle: HLNUG

Für beide Prüfzyklen wurden große Schwankungen der gemessenen Konzentrationen gasförmigen Kohlenstoffs im Abgas beobachtet. Für die Messreihe mit eingeschaltetem Partikelfilter ergab sich ein Mittelwert von 63 ppm (ca. 34 mgC/m³), für die Messreihe ohne Partikelfilter wurde eine mittlere Konzentration von 68 ppm (ca. 36 mgC/m³) gemessen. Der Effekt des Partikelfilters auf die Emissionen an gasförmigen Kohlenwasserstoffen ist somit erwartungsgemäß unwesentlich. Die gemäß DE-UZ 212 maximal zulässige OGC-Konzentration beträgt 70 mgC/m³, dieser Wert wird in beiden Fällen klar eingehalten.

4 Ringversuch

4.1 Planung

Ziel des Ringversuches war es, das Messverfahren für die Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration für Kaminöfen zu validieren. Der Ringversuch wurde vom Dezernat I3 (Luftreinhaltung: Emissionen) des HLNUG vorbereitet und organisiert. Das HLNUG ist nach DIN EN ISO/IEC 17043 akkreditierter Anbieter von Eignungsprüfungen für Emissionsmessungen und verfügt über umfassende Erfahrungen in der Planung, Durchführung und wissenschaftlichen Auswertung von Ringversuchen. Das HLNUG bietet vor allem Ringversuche zu Emissionsmessungen an einem Schornsteinsimulator an, welche der Qualitätssicherung von Messstellen nach § 29b Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) dienen. Diese Ringversuche finden im Auftrag der Bekanntgabebehörden der Bundesländer statt und sind durch LAI und UMK im Sinne von § 16 (4) Nr. 7. a der Bekanntgabeverordnung (41. BImSchV) anerkannt. Daneben organisiert das HLNUG regelmäßig Ringversuche zur Charakterisierung von anorganischen Referenzmaterialien (Bestimmung von Schwermetallkonzentrationen in Stäuben).

Der Prüfablauf im Ringversuch sollte den Vorgaben der Blauer Engel Methode DE-UZ 212 Anhang B und C folgen und Prüfzustände wie Anzündphase, Nennlast und Teillast abbilden. Die im Dokument DE-UZ 212 beschriebene Methode wurde im Rahmen langjähriger Forschungsarbeiten durch das Deutsche Biomasseforschungszentrum (DBFZ) Leipzig erarbeitet (siehe Hintergrundbericht zur Erarbeitung der Vergabekriterien DE-UZ 212, UBA Text 152/2020). Aufgrund seiner umfassenden Kenntnisse im Bereich der Emissionsmessungen an Kaminöfen wurde das DBFZ bei der Planung und Durchführung des Ringversuchs beratend hinzugezogen.

Die Aufgaben des DBFZ in diesem Projekt umfassten dabei insbesondere:

- ▶ Beratung und Unterstützung bei Design und Errichtung des Prüfstandes (inkl. Auswahl eines geeigneten Ofensystems), sowie in Bezug auf die Messtechnik
- ▶ Beratung und Unterstützung vor Ort bei der Ringversuchsplanung insbesondere in Bezug auf eine möglichst reproduzierbare Durchführung des Prüfzyklus
- ▶ Identifizierung von nötigen Konkretisierungen / Anpassungen der Anforderung der Vergaberichtlinie und Abstimmung mit allen Beteiligten
- ▶ Identifizierung von möglichen Ringversuchsteilnehmenden und Kontaktaufnahme über vorhandene Kontakte und Netzwerke im In- und Ausland
- ▶ Teilnahme am Ringversuch
- ▶ Beratung bei der Interpretation der Ergebnisse

Die Emissionsmessungen im Ringversuch wurden auf die Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration ausgerichtet. Die gleichzeitige Bestimmung der gasförmigen Emissionen durch alle Teilnehmenden im Ringversuch wurde geprüft, konnte aber aus Platzgründen nicht realisiert werden. Aufgrund der Anforderungen des anzuwendenden Normverfahrens konnte eine Messung der Staubmasse nicht im Rahmen des Ringversuchs durchgeführt werden. Die dafür notwendige gleichzeitige Messung durch mindestens zwei Messinstitute würde nach den Vorgaben des Normverfahrens aufgrund der Dimensionen der zu verwendenden Sonden und der dadurch verursachten Störungen der Kaminströmung nur bei einem sehr großen Kamin Durchmesser möglich sein, dadurch wäre der Kamin allerdings nicht mehr repräsentativ für ein handelsübliches Modell und somit nicht mit der Zielsetzung des Projekts vereinbar.

Das Ringversuchsprogramm wurde auf einen Umfang von 2 Messtagen ausgelegt. Zusätzlich erhielten die Teilnehmenden am Tag vor dem Ringversuchsbeginn die Möglichkeit, ihre Messgeräte am Kamin aufzubauen, sowie die Möglichkeit, am Tag nach dem Abschluss der Messungen ihre Messgeräte abzubauen.

Ziel war, dass an dem Ringversuch mindestens drei akkreditierte Prüfstellen aus Deutschland teilnehmen. Für jede teilnehmende Prüfstelle wurde eine pauschale Aufwandsentschädigung, vorgesehen, außerdem wurden die Kosten für zwei Messgerätekalibrierungen (vor und nach dem Ringversuch) übernommen.

4.2 Vorbereitung

4.2.1 Informationen an mögliche Teilnehmende

Auf der Grundlage von wissenschaftlichen Veröffentlichungen, öffentlich zugänglichen Akkreditierungsunterlagen und Informationen der Projektpartner wurden im Zuge der Vorbereitung des Ringversuchs insgesamt 16 Prüfstellen in Deutschland sowie dem europäischen Ausland (Dänemark, Finnland, Österreich, Schweden, Schweiz) identifiziert, die grundsätzlich für eine Teilnahme in Frage kamen. Diese Prüfstellen wurden im Dezember 2021 kontaktiert und zur Teilnahme an den für Dezember 2022 geplanten Ringversuchen eingeladen.

Zusammen mit der Einladung zum Ringversuch wurde ein Fragebogen verschickt, um vorab Informationen von den Teilnehmenden für die Detailplanung des Ringversuchs zu erhalten und mögliche Termine für die Durchführung der Messungen in Kassel zu finden.

Von den kontaktierten Prüfstellen haben insgesamt 8 Interesse bekundet und schließlich auch am Ringversuch teilgenommen, einige davon mit mehreren Messgeräten und/oder an mehreren Terminen. Vertreten waren darunter Prüfstellen aus Deutschland, Dänemark und der Schweiz.

4.2.2 Auftaktgespräch

Am 28.01.2022 fand ein Auftaktgespräch in Form einer Videokonferenz statt. Teilnehmende dieses Auftaktgesprächs waren neben den am Ringversuch teilnehmenden Prüfstellen auch Personen aus anderen interessierten Organisationen mit Bezug zum Umweltzeichen Blauer Engel für Kaminöfen. Diese Veranstaltung bestand aus einem Vortrags- und einem Diskussions- teil. In den Vorträgen von HLNUG und DBFZ (insgesamt ca. 60 min) wurden folgende Punkte thematisiert:

- ▶ der Hintergrund und die Ziele des Projekts
- ▶ Informationen zu den Projektbeteiligten (UBA, HLNUG, DBFZ, TROPOS)
- ▶ Planung und aktueller Zustand des Versuchsstands
- ▶ Hintergrund der Vergabekriterien für das Umweltzeichen Blauen Engel für Kaminöfen
- ▶ zu messende Komponenten und durchzuführende Abbrände im Ringversuch
- ▶ Bisherige Erfahrungen des DBFZ zum Vergleich verschiedener Messgeräte für Partikelanzahlkonzentrationen im Parallelbetrieb an Holzöfen
- ▶ Beispiele für Messungen an Kaminen mit einem Katalysator und einem Elektrofilter
- ▶ Bedeutung von Partikelabscheidern für das Umweltzeichen Blauer Engel
- ▶ Grundlagen der Validierung von Messverfahren durch Ringversuche

- ▶ Geplante Festlegung der zugewiesenen Werte (Sollwerte) bei der Auswertung des Ringversuchs
- ▶ verworfene Alternativen zum nun verfolgten Ringversuchsprogramm
- ▶ geplante Voruntersuchungen des HLNUG am Prüfstand
- ▶ Zeitplan für das Projekt

Abschließend fand eine Diskussionsrunde (ca. 70 min) statt. Dabei wurden die folgenden Punkte diskutiert:

- ▶ im Ringversuch zu verwendende Messgerätetypen
- ▶ Reproduzierbarkeit von Messungen bei Verwendung verschiedener Gerätetypen
- ▶ mögliche Probleme mit der Verschmutzung der Sensoren im Laufe der Messungen
- ▶ Einfluss der Probenaufbereitung einschließlich Verdünnung auf die Messergebnisse
- ▶ Vor- und Nachteile verschiedener Kalibrierverfahren
- ▶ Vergleichbarkeit von Messungen im KFZ-Bereich mit Messungen an Holzgefeuerten Kaminöfen
- ▶ mögliche Verkürzungen der Messzeiträume
- ▶ Derzeit und in Zukunft möglicherweise verfügbare Konzentrationsbereiche für die Kalibrierung von Partikelanzahlmessungen
- ▶ messtechnische Rückführung von Partikelanzahlkonzentrationen
- ▶ mögliche Untersuchungen am Versuchsstand vor Beginn des Ringversuchs
- ▶ Vorgehensweise beim Ausfall einzelner Messgeräte im Ringversuch
- ▶ Messung von Staubmassenkonzentrationen
- ▶ Position der Messpunkte im Kamin

Dabei wurden folgende Feststellungen erreicht:

- ▶ Die Anforderungen im Ringversuch richten sich allein nach den Vergabekriterien DE-UZ 212, es gibt ansonsten keine Einschränkungen bezüglich der Messgerätetypen bzw. -konfigurationen
- ▶ Darüber hinaus ist lediglich eine Kalibrierung der Messgeräte vor und nach dem Ringversuch geplant
- ▶ Ziel des Ringversuchs ist der Nachweis der Vergleichbarkeit der Messungen von Partikelanzahlkonzentrationen. Dies soll gleichwertige und faire Bedingungen für Antragsteller des Blauen Engels sicherstellen.
- ▶ Der Ringversuch ist ein ergebnisoffenes Forschungsprojekt
- ▶ Falls der Ringversuch zu dem Ergebnis führen sollte, dass die Vergabekriterien nicht ausreichend sind, um vergleichbare Messergebnisse zu erzielen, werden diese ggf. angepasst.

- ▶ Nach Ansicht der Mehrheit der Teilnehmenden sind kurzzeitige Messungen von ca. 30 Sekunden nicht aussagekräftig für das Emissionsverhalten von Kaminöfen
- ▶ Kalibrierungen für Partikelanzahlkonzentrationsmessungen sind derzeit nur bis 20.000 cm^{-3} möglich, an einer Erweiterung auf ca. 500.000 cm^{-3} wird gearbeitet.
- ▶ Eine messtechnische Rückführung der an Kaminöfen üblicherweise gemessenen Partikelanzahlkonzentrationen ist derzeit nicht möglich. Die Vergleichbarkeit von Messungen wird dadurch allerdings nicht eingeschränkt.
- ▶ Für den Fall eines Geräteausfalls bei einzelnen Teilnehmenden im Ringversuch wird eine angemessene Vorgehensweise angestrebt.
- ▶ Fehlerhafte Messergebnisse, z.B. durch einen erkannten Gerätedefekt erzeugt, fließen nicht in die Berechnung der zugewiesenen Werte (Sollwerte) ein.
- ▶ Die gleichzeitige Ermittlung von Staubmassekonzentrationen im Ringversuch ist nicht vorgesehen.
- ▶ Gaskomponenten werden wahrscheinlich nur durch das HLNUG gemessen, die Ergebnisse werden den Ringversuchsteilnehmenden zur Verfügung gestellt.

4.2.3 Workshop

Am 22.06.2022 wurde zusammen mit den Teilnehmenden des Ringversuchs ein Workshop in Form einer Videokonferenz veranstaltet. Auch diese Veranstaltung war in einen Vortrags- und einen Diskussionsteil gegliedert.

Der Vortrag (ca. 30 min) hatte folgende Themen:

- ▶ Projekthintergrund und -ziel
- ▶ Beschreibung des Messverfahrens in den Vergaberichtlinien des Blauen Engels für Kaminöfen für Holz
- ▶ Beschreibung der Lage des Kaminofenprüfstands in Kassel, mitsamt Skizzen und Fotos des Aufbaus und einem Lageplan des Gebäudes, in dem der Kaminofen installiert ist
- ▶ Erläuterung des Ringversuchs mit den Anforderungen an das Messverfahren
- ▶ Übersicht der Messöffnungen
- ▶ Plan der Anzahl der Messungen (in Volllast und Teillast) im Ringversuch
- ▶ Eckpunkte der geplanten Auswertung und der zu erwartenden Ergebnisse
- ▶ Terminfindung

In der Diskussionsrunde (ca. 90 min) wurden unter anderem die folgenden Themen behandelt:

- ▶ Örtliche Gegebenheiten im Messraum/Messpunkte:
 - Messpositionen alle auf einem Querschnitt, 4 cm von der Wand des Abgasrohres mit 15 cm Durchmesser entfernt (um gegenseitige Beeinflussungen zu minimieren) und einem Winkel von 45° zwischen den Messöffnungen. Maximal 4 Prüflabors können auf diesem Messquerschnitt parallel messen.

- Das HLNUG misst die Konzentrationen von CO, CO₂, O₂, NO_x und den Wassergehalt, sodass z.B. Sauerstoffmessungen der Teilnehmenden nicht erforderlich sind und aus Platzmangel wahrscheinlich auch nicht praktikabel. Eine komplette Messung der Abgaszusammensetzung durch die Teilnehmenden ist aus Platzgründen sehr unwahrscheinlich.
- Alle Messungen erfolgen mit eingeschaltetem elektrostatischem Partikelabscheider, um Konzentrationen nahe den Grenzwerten der Vergaberichtlinie für den Blauen Engel zu erreichen.
- ▶ Organisatorische und terminliche Fragen zur Durchführung des Ringversuchs:
 - Bei der Organisation der Ringversuche wird das HLNUG darauf achten, dass an jedem Termin mindestens 2 Teilnehmende vorhanden sind, wenn möglich mehr (ein Grund dafür ist die statistische Auswertung).
 - Ein offizielles Anmeldeformular wird im Anschluss an den Workshop verschickt, mit Abfrage der geplanten Messgeräte.
- ▶ Kalibrierprozedur am TROPOS:
 - Die Kalibrierung am TROPOS erfolgt in zwei Schritten; zuerst wird die Zähleffizienz verschiedener Partikelgrößen aufgezeichnet (unter Verwendung des gesamten Setups von der Sonde bis zum Partikelzähler) und dann in einem zweiten Schritt die Ermittlung der Partikelanzahlkonzentration mit polydispersen Silberpartikeln (bei Anzahlkonzentrationen von bis zu ca. 8,5 Millionen Partikeln/cm³) überprüft.
 - Einige gängige Messgeräte können zwar noch deutlich höhere Konzentrationen messen, allerdings sind bei Messungen zur Vergabe des Blauen Engels Konzentrationen nahe dem Grenzwert von $5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$ zu erwarten. Die in der Kalibrierung geplanten Konzentrationsbereiche werden deshalb als zielführend betrachtet.
 - Da das TROPOS Silberpartikel nutzt, schlägt ein Teilnehmer vor, am letzten Tag des Ringversuches alle Geräte an eine gemeinsame Verdünnung anzuschließen und verschiedene Verdünnungsstufen zu messen und die Geräte auch hinsichtlich mehrerer Konzentrationslevels zu vergleichen.
- ▶ Wunsch nach Diskussionen zu Möglichkeiten für Spanpunktprüfungen (Justagen) der Partikelzähler vor Ort:
 - Ein Austausch zu Strategien für Vor-Ort-Prüfungen der Partikelzähler, um nicht nur den Nullpunkt mit einem HEPA-Filter zu prüfen, sondern auch hinsichtlich des Spanpunktes Möglichkeiten zu diskutieren, wird von den Anwesenden befürwortet.
- ▶ Umgang mit schlechten Zähleffizienzen bei der Kalibrierung am TROPOS
 - Bei Messgeräten mit Zähleffizienz außerhalb der festgelegten Grenzen kann der Ringversuch trotzdem durchgeführt werden, die entsprechenden Messwerte sollen jedoch aus den Berechnungen teilweise ausgeschlossen werden (z.B. bei der Ermittlung des zugewiesenen Wertes). Eine rechnerische Korrektur ist denkbar (unter Berücksichtigung eventueller Drift während des Ringversuchs) und ein Nachjustieren ist in Einzelfällen zu diskutieren. Es sollen keine manipulativen Korrekturen vorgenommen

werden, eine zusätzliche Auswertung des Ringversuchs (z.B. mit Nutzung der Kalibrierung vor Versuchsbeginn als Justierung) ist aber möglich.¹

- Ein einheitlicher Cut-Off der Partikelzähler (ausgerichtet an den Vorgaben in den Vergaberichtlinien des Blauen Engels) wäre wünschenswert.
- ▶ Wartung von Messgeräten unmittelbar vor dem Ringversuch:
 - Ein Teilnehmer hat bei einer Messung mit einem frisch gewarteten und einem Gerät mit ca. 10 Betriebsstunden nach Wartung signifikant unterschiedliche Partikelanzahlkonzentrationen bei einer parallelen Messung festgestellt. Dennoch wird der Vorschlag, alle Geräte kurz vor dem Ringversuch warten zu lassen von den Teilnehmenden abgelehnt, aufgrund des damit verbundenen Aufwands und der Kosten sowie der Überlegung, möglichst nah an die realen Messungen zur Vergabe des Blauen Engels zu kommen, bei denen nicht erwartet werden kann, dass die Geräte immer frisch aus der Wartung kommen.

4.3 Terminfestlegung

Im Nachgang des Workshops erhielten alle Teilnehmenden am 13.07.2022 einen weiteren Fragebogen zur Erfassung von technischen Informationen zu den verwendeten Messgeräten, der benötigten Druckluftversorgung sowie dem bevorzugten Datum für eine Teilnahme. Auf Grundlage der Rückmeldungen wurden die Teilnehmenden auf die zwei Ringversuche 22K1 (06.-09.12.2022) und 22K2 (13.-16.12.2022) aufgeteilt.

Am 26.09.2022 erhielten alle Teilnehmenden eine finale Einladung zum Ringversuch mit der Zuweisung zu einem konkreten Datum. Diese Einladung enthielt einen vierstelligen ID-Code, weitere Informationen zur Kalibrierung beim TROPOS, sowie ein Informationsblatt zur Durchführung des Ringversuchs. Die darin genannten Informationen sind im folgenden Abschnitt wiedergegeben.

4.4 Durchführung des Ringversuchs

4.4.1 Veranstaltungsort

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Dezernat I3 – Luftreinhaltung; Emissionen

Am Versuchsfeld 13
34128 Kassel

4.4.2 Fachliche Verantwortung

Dr. Jens Cordes (Fachlich Verantwortlicher Ringversuche)
Dr. Dominik Wildanger (Dezernatsleiter)

4.4.3 Teilnehmende

Der Ringversuch für Partikelmessungen an Kaminöfen wurde konzipiert für Prüflabore, die Messungen an Kaminöfen für die Erteilung des Umweltzeichens Blauer Engel anbieten möchten,

¹ Da wider Erwarten tatsächlich alle Geräte die Anforderungen nicht erfüllten, wurde wie in 4.4.7 beschrieben vorgegangen. Die Ergebnisse der Kalibriermessungen beim TROPOS wurden nicht als Kriterium für die Verwendbarkeit der Messwerte im Ringversuch herangezogen.

außerdem für alle weiteren Prüflabore, die im Bereich Emissionsmessungen an Kaminöfen und ähnlichen Anlagen tätig sind.

Es können maximal 4 Prüflabore gleichzeitig am Ringversuch teilnehmen. Pro Prüflabor sollten aus Platzgründen nicht mehr als 2-3 Personen gleichzeitig im Messraum anwesend sein.

4.4.4 Aufgabenstellung

Das Ringversuchsprogramm orientiert sich am Ablauf einer Prüfung gemäß den Vergabekriterien für das Umweltzeichen Blauer Engel Kaminöfen für Holz (DE-UZ 212). Ziel ist die Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration im Kaminabgas.

4.4.5 Durchführung der Messungen

4.4.5.1 Messraum und Messöffnungen

Der Messraum befindet sich im Erdgeschoss des Dienstgebäudes des HLNUG (Raum 16). Zur Durchführung des Ringversuches sind für die Teilnehmenden insgesamt 4 Messöffnungen mit 1“-Innengewinde (nach DIN EN ISO 228-1) vorhanden. Die Belegung der Messöffnungen wird vom Personal des HLNUG festgelegt. Die von den Teilnehmenden verwendeten Probenahmesonden müssen auf den Innendurchmesser des Abgasrohrs von 15 cm abgestimmt sein.

4.4.5.2 Durchführung der Messungen

- ▶ Jedes teilnehmende Prüflabor führt die Ermittlung der Partikelanzahlkonzentrationen gemäß Anhang C der Vergabekriterien für das Umweltzeichen Blauer Engel Kaminöfen für Holz (DE-UZ 212) durch.
- ▶ Abweichend davon findet die Probenahme für alle Teilnehmenden auf dem gleichen Messquerschnitt, aber auf verschiedenen Messachsen auf einem Punkt in 4 cm Entfernung von der Kanalwand statt.
- ▶ Die Ringversuchsteilnehmenden müssen die Probenahme mit eigener Messausrüstung durchführen.
- ▶ Es werden insgesamt 2 Abbrandreihen (eine pro Messtag) gemäß Anhang B der Vergabekriterien für das Umweltzeichen Blauer Engel Kaminöfen für Holz (DE-UZ 212) durchgeführt: 2 Abbrände in der Anzündphase, 3 Abbrände Nennlastphase, 2 Abbrände Teillastphase.
- ▶ Für jeden Messtag wird durch die Teilnehmenden die mittlere Partikelanzahlkonzentration über alle 7 Abbrände ermittelt. Zusätzlich wird der entsprechende Mittelwert für jeden einzelnen der 7 Abbrände angegeben.
- ▶ Start- und Endzeitpunkt der einzelnen Abbrände werden durch das HLNUG festgelegt und den Teilnehmenden mitgeteilt.
- ▶ Die Konzentrationen der gasförmigen Abgasbestandteile (O_2 , CO_2 , CO , NO_x , H_2O) werden durch das HLNUG kontinuierlich gemessen. Die Messdaten werden den Teilnehmenden im Anschluss an den Ringversuch zur Verfügung gestellt.

4.4.6 Ergebnisabgabe

Alle Messergebnisse sind bezogen auf den Normzustand, trocken (273 K und 1013 hPa) ohne Umrechnung auf die Bezugssauerstoffkonzentration anzugeben.

Die Ergebnisse des Ringversuchs werden per E-Mail an das HLNUG übermittelt. Dazu sind die Messwerte in eine Excel-Datei einzutragen, welche durch das HLNUG zur Verfügung gestellt wird.

Jedes teilnehmende Prüflabor kann nur ein Messergebnis pro Abbrand bzw. Abbrandreihe einreichen. Ein Austausch von Ergebnissen oder eine Absprache unter den Teilnehmenden vor dem Ablauf der Abgabefrist für die Messergebnisse ist nicht zulässig. Bei einem Verstoß gegen diese Regelung wird die Ergebnismitteilung mit einem entsprechenden Hinweis versehen.

Alle Teilnehmenden müssen ihre Ergebnisse bis spätestens sechs Wochen nach dem Ende des Ringversuchs an das HLNUG übermitteln. Später eingereichte Ergebnisse werden – sofern nicht das HLNUG den verspäteten Eingang zu verantworten hat – nicht berücksichtigt.

Zusätzlich zu den Messergebnissen pro Abbrand bzw. Abbrandreihe geben die Teilnehmenden die Rohdaten ihrer Messung (Partikelkonzentration als Funktion von Zeit) ab. Diese Daten werden nicht bewertet, sondern dienen einer eventuellen Untersuchung über die Ursachen von Varianzen zwischen Messergebnissen der Ringversuchsteilnehmenden.

4.4.7 Bewertung der Messergebnisse

4.4.7.1 Grundlagen der Ergebnisberechnung

Die Auswertung des Ringversuchs erfolgt in Form von z-Scores. Dabei handelt es sich um ein standardisiertes Maß der Leistung, berechnet unter Verwendung des Teilnehmenden-ergebnisses, des zugewiesenen Werts (Sollwerts) und des Kriteriums zur Leistungsbewertung (siehe unten). Bei der Berechnung von z-Scores und deren Mittelwerten werden keine Rundungen durchgeführt. In Ergebnismitteilungen und Berichten werden die Zahlenwerte allerdings gerundet dargestellt.

Die Auswertung erfolgt gemäß DIN ISO 13528:2020. Dabei wird aus den Messwerten aller Teilnehmenden für jede Messung der robuste Mittelwert x^* , der Schätzwert für dessen Unsicherheit $u(x^*)$ und die robuste Standardabweichung s^* nach Anhang C der Norm berechnet (Algorithmus A). Für die Auswertung wird der robuste Mittelwert x^* als zugewiesener Wert X_i (Sollwert) verwendet, und die robuste Standardabweichung s^* als Kriterium zur Leistungsbewertung σ_i (Präzisionsvorgabe). Für das Verhältnis zwischen dem Kriterium zur Leistungsbewertung σ_i und der Unsicherheit des zugewiesenen Wertes X_i gilt gemäß ISO 13528 folgendes Kriterium:

$$\sigma_i \geq \frac{1}{0,3} \cdot u(X_i)$$

Zur Beurteilung der Ergebnisse der Einzelmessungen wird für den i -ten Messwert x_i ein z-Score-Wert z_i ermittelt:

$$z_i = \frac{x_i - X_i}{\sigma_i}$$

Hierbei ist X_i der zugewiesene Wert der entsprechenden Messung (Sollwert) und σ_i das Kriterium zur Leistungsbewertung. Nach dem hier beschriebenen Schema werden sowohl z-Scores für die gesamten Abbrandreihen, als auch für die einzelnen Abbrände berechnet.

4.4.7.2 Interpretation der z-Score-Werte

Von korrekt durchgeführten Messungen wird angenommen, dass sie Ergebnisse erzeugen, die durch eine Normalverteilung mit dem Mittelwert X_i (dem zugewiesenen Wert) und der Standardabweichung σ_i beschrieben werden können. Unter diesen Umständen würde erwartet werden, dass nur ungefähr 0,3% der z-Scores außerhalb der Spannweite $-3,0 \leq z \leq +3,0$ liegen und nur ungefähr 5% außerhalb der Spannweite $-2,0 \leq z \leq +2,0$. Weil die Wahrscheinlichkeit dafür, dass z außerhalb von $\pm 3,0$ liegt so gering ist, ist es unwahrscheinlich, dass Eingriffssignale zufällig auftreten werden, wenn keine wirklichen Probleme bestehen, so dass es wahrscheinlich ist, dass es eine identifizierbare Ursache einer Anomalie gibt, wenn ein Eingriffssignal ausgelöst wird (DIN ISO 13528).

Für die Interpretation aller ermittelten z-Score Werte gilt daher folgendes Schema:

$ z_i \leq 2$	zufriedenstellendes Ergebnis
$2 < z_i < 3$	fragwürdiges Ergebnis (Warnmeldung)
$ z_i \geq 3$	nicht zufriedenstellendes Ergebnis (Handlungsbedarf)

Generell sollte bei jedem Ergebnis, das mit einem z-Score von mehr als zwei bewertet wurde, eine Ursachenforschung betrieben werden.

4.4.8 Ergebnismitteilung

Die Mitteilung der Ergebnisse an die Ringversuchsteilnehmenden erfolgt in Form einer Gesamtübersicht bis spätestens 6 Wochen nach Ablauf der Abgabefrist für die Ergebnisse der Teilnehmenden. In der Ergebnismitteilung wird das an den Messungen beteiligte Personal namentlich genannt. Zusätzlich werden die Ergebnisse in einem Bericht zusammengefasst, wobei die Teilnehmenden durch die Verwendung von vierstelligen Zifferkombinationen (ID-Codes) pseudonymisiert werden.

4.4.9 Zeitplan

Für die Ringversuche wurde der folgende Zeitplan festgelegt:

Tabelle 6: Zeitplan des Ringversuchs

Ringversuchstag	Uhrzeit	Programmpunkt
Dienstag (1. Tag)	ab 11:00	Anreise und Aufbau der Messgeräte
	bis 18:00	Vorbereitungen für die Messungen am folgenden Tag
Mittwoch (2. Tag)	09:00	Vorbereitung der Messungen
	09:30	Beginn Abbrandreihe Messtag 1
	18:00	Ende des ersten Messtags
Donnerstag (3. Tag)	09:00	Vorbereitung der Messungen
	09:30	Beginn Abbrandreihe Messtag 2
	18:00	Ende des zweiten Messtags
Freitag (4. Tag)	ab 08:00	Abbau der Messgeräte, Abreise der Teilnehmenden

4.5 Messgeräte der Teilnehmenden

Von den 8 teilnehmenden Prüfinstituten wurden unter anderem folgende Messgeräte im Ringversuch verwendet:

- ▶ APC 489 Advanced (AVL)
- ▶ Electrostatic Classifier 3080 mit Ultrafine Condensation Particle Counter 3756 (TSI)
- ▶ NPET 3795 (TSI)
- ▶ NPET 3795HC (TSI)
- ▶ Partector 2 (naneos particle solutions GmbH)
- ▶ SMPS+C (Grimm)
- ▶ UF-CPC (Palas)
- ▶ 5412 Standard CPC (Grimm)

Einzelne Gerätetypen wurden von mehreren Prüfinstituten verwendet.

4.6 Kalibrierung²

Vor und nach den Messungen des Ringversuchs wurden die Geräte der teilnehmenden Prüflabore kalibriert, um nicht verfahrensintrinsische Einflüsse zu minimieren und die Einhaltung der Vorgaben der Messvorschrift an die größenabhängige Zähleffizienz (DE-UZ 212 Anhang C) zu überprüfen. Dazu wurden die Messgeräte der Ringversuchsteilnehmenden gegen ein anerkanntes Referenzgerät kalibriert. Diese vorgeschaltete Überprüfung der Partikelanzahlmessgeräte wurde durch das Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS) als Unterauftragnehmer und geeignete Stelle durchgeführt. Das WCCAP (World Calibration Center for Aerosol Physics) am TROPOS ist das Kalibrierzentrum der WMO (World Meteorological Organisation) sowie das Kalibrierzentrum für die europäische Forschungsinfrastruktur ACTRIS.

Für die Messungen der festen Aerosolpartikel größer als 23 nm im Abgas eines Kaminofens werden sogenannte „Solid Particle Counter“ (SPC) verwendet. Ein SPC besteht in der Regel aus a) vorgelagerten Verdünnungsstufen (um direkt aus dem Abgas messen zu können), b) einem Thermodenuder oder VPR (um die flüchtigen Partikelbestandteile zu verdampfen), sowie c) einem Kondensations-Partikelzähler („Condensation Particle Counter“, CPC). Bei der Kalibrierung wird der gesamte SPC als „Black Box“ gegenüber einem Referenzgerät kalibriert.

Die Kalibrierung gegen ein Referenzgerät erfolgte vor der Durchführung des Ringversuchs im Zeitraum 21.-25.11.2022 und nach der Ringversuchsdurchführung im Zeitraum 09.-12.01.2023. Dabei wurden monodisperse Silberpartikel für die Überprüfung des Cut-Off und der Linearität bei Konzentrationen bis zu 90.000 cm^{-3} und polydisperse Silberpartikel bei der Überprüfung der Linearität bei Konzentrationen bis zu 800.000 cm^{-3} eingesetzt.

Die gesinterten und mit einem DMA größenselektierten Silberpartikel haben gegenüber Rußpartikeln den Vorteil, dass sie kugelförmig sind und keine variierende Menge flüchtigen Materials enthalten. Sie sind daher, z.B. nach DIN CEN/TS 16976, als Prüfaerosol für

² Der Begriff „Kalibrierung“ wird in verschiedenen Regelwerken unterschiedlich weit gefasst und definiert. Bei der hier beschriebenen „Kalibrierung“ des TROPOS handelt es sich um Vergleichsmessungen der Messgeräte an einem Prüfstand mit definierten Konzentrationen von Silberpartikeln gegen ein Referenzmessgerät (Elektrometer). Eine Korrektur der Messgeräteinstellungen bzw. Messwertanzeigen erfolgte in diesem Fall nicht.

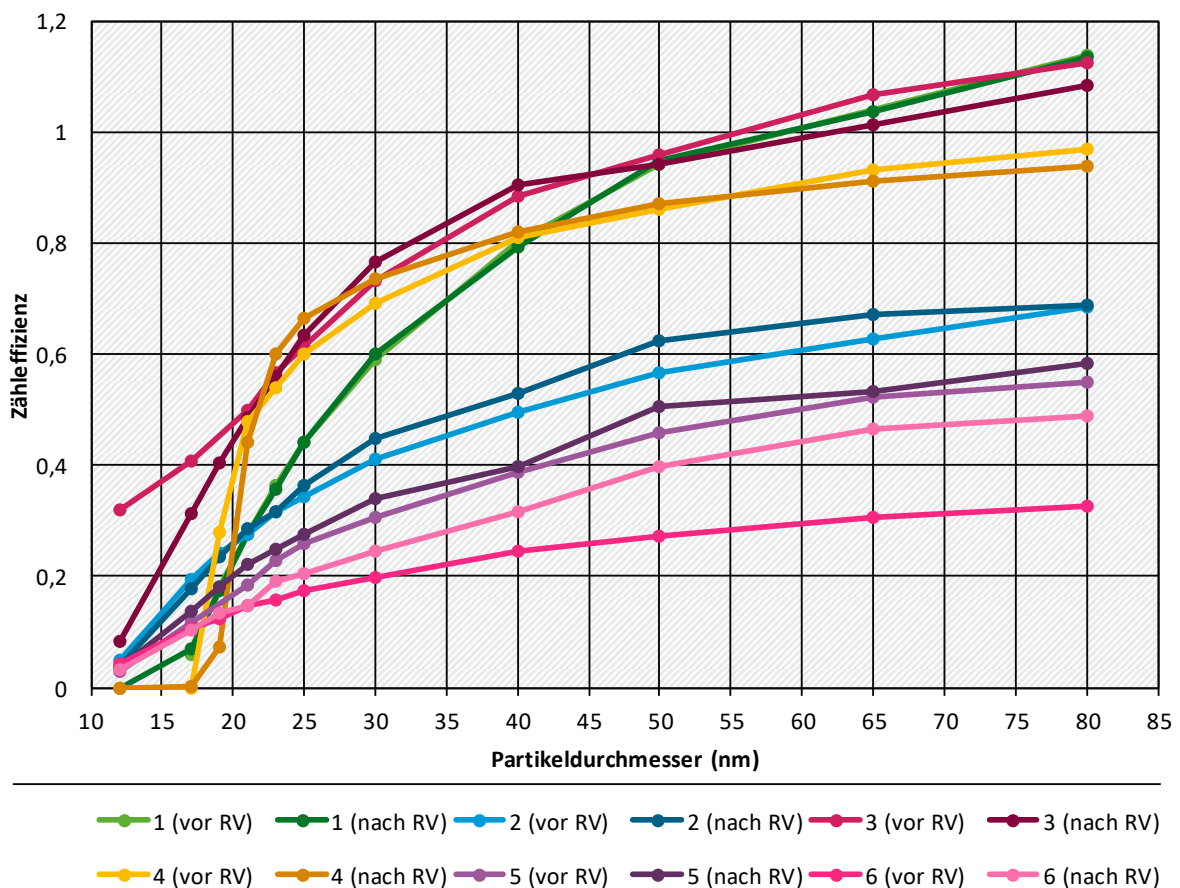
Kondensations-Partikelzähler in der atmosphärischen Anwendung vorgeschrieben. Ab einem Partikeldurchmesser von 40 nm wird dabei vom TROPOS eine Mehraufladungskorrektur eingesetzt.

Um die Anonymität der Teilnehmenden im Ringversuch zu wahren, kann in diesem Bericht leider keine direkte Verknüpfung zwischen konkreten Messgeräten und den damit im Ringversuch erzielten Ergebnissen hergestellt werden. Im Folgenden werden die Geräte deshalb pseudonymisiert als „Messgerät 1“ usw. benannt.

Von den im Ringversuch eingesetzten Messgeräten nahmen insgesamt sechs an der Kalibrierung vor und nach dem Ringversuch teil. Die Messergebnisse für die Zähleffizienz dieser sechs Geräte bei verschiedenen Partikelgrößen in den zwei Kalibrierungen sind im folgenden Diagramm dargestellt.

Abbildung 10: Messergebnisse zum Cut-Off der Messgeräte

Messergebnisse aus den Kalibrierungen vor und nach dem Ringversuch

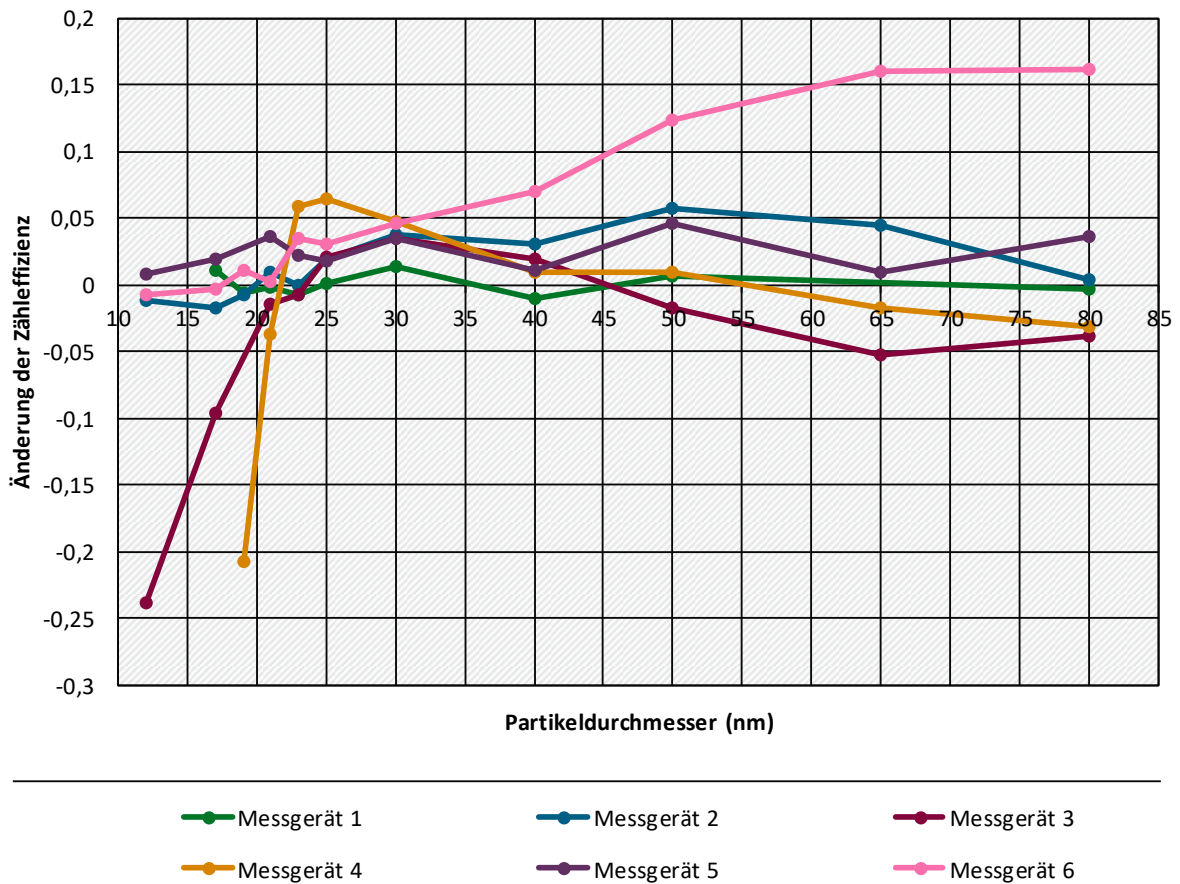


Quelle: HLNUG, Auswertung von Kalibrierberichten des TROPOS

Wie zu erkennen ist, unterscheiden sich die Zähleffizienzen der untersuchten Messgeräte zwischen den zwei Kalibrierungen teilweise deutlich. Die folgende Abbildung zeigt die Veränderungen der Messwerte für die Zähleffizienz zwischen der ersten Kalibrierung vor dem Ringversuch und der zweiten Kalibrierung nach dem Ringversuch.

Abbildung 11: Änderung der Messergebnisse zum Cut-Off der Messgeräte

Veränderung zwischen den Kalibrierungen vor und nach dem Ringversuch



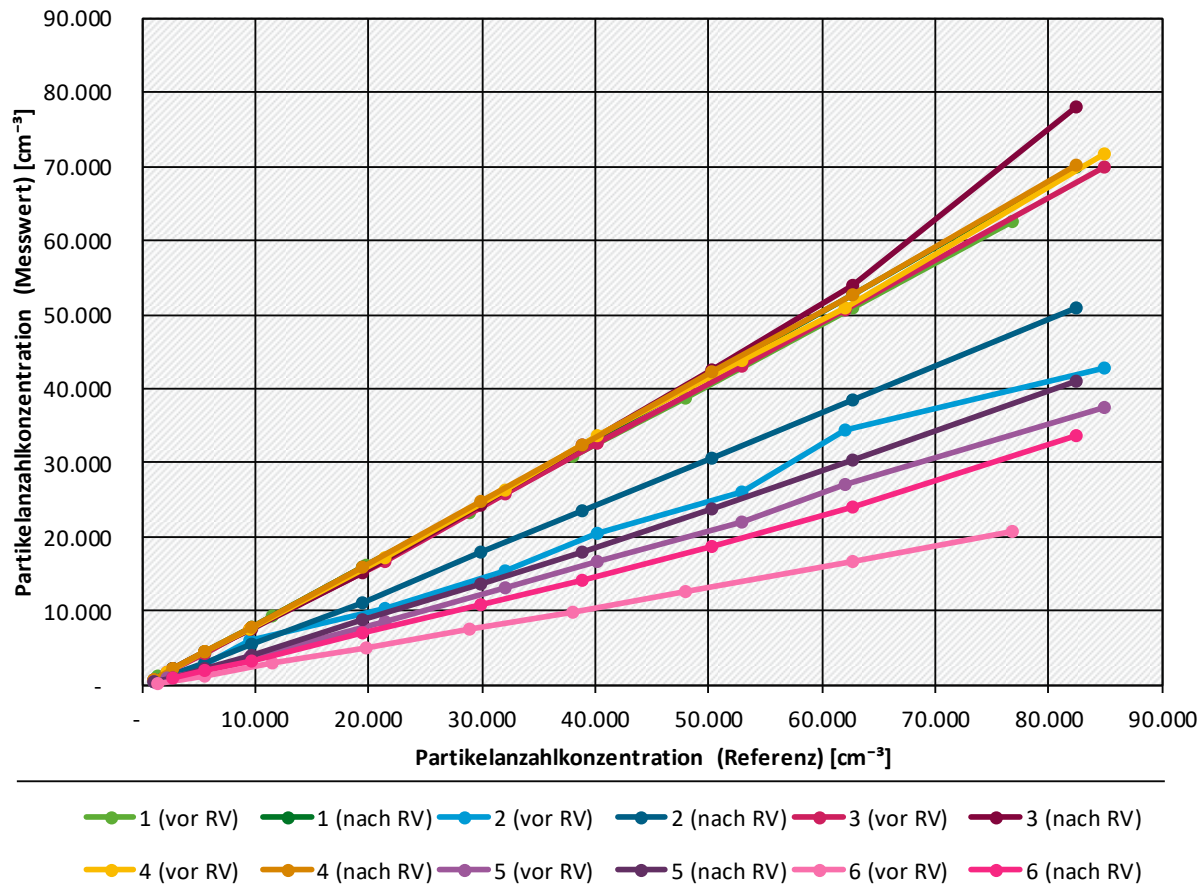
Quelle: HLNUG, Auswertung von Kalibrierberichten des TROPOS

Die Messgeräte 1, 2 und 5 zeigen über den gesamten Messbereich relativ geringe Änderungen der Zähleffizienz von bis zu 0,05. Für die Messgeräte 3 und 4 ergaben sich bei geringen Konzentrationen allerdings größere Änderungen von bis zu -0,25. Messgerät 6 wiederum zeigte bei hohen Konzentrationen Änderungen von mehr als 0,15.

Die folgende Abbildung zeigt die Messergebnisse der sechs untersuchten Messgeräte für monodisperse Silberpartikel (mittlerer Partikeldurchmesser: ca. 40 nm) bei verschiedenen Partikelanzahlkonzentrationen. Dargestellt sind wieder die Ergebnisse der Kalibrierung vor dem Ringversuch zusammen mit den Ergebnissen nach der Kalibrierung.

Abbildung 12: Messergebnisse zur Zähleffizienz für monodisperse Partikel

Messergebnisse für monodisperse Silberpartikel (ca. 40 nm) vor und nach dem Ringversuch



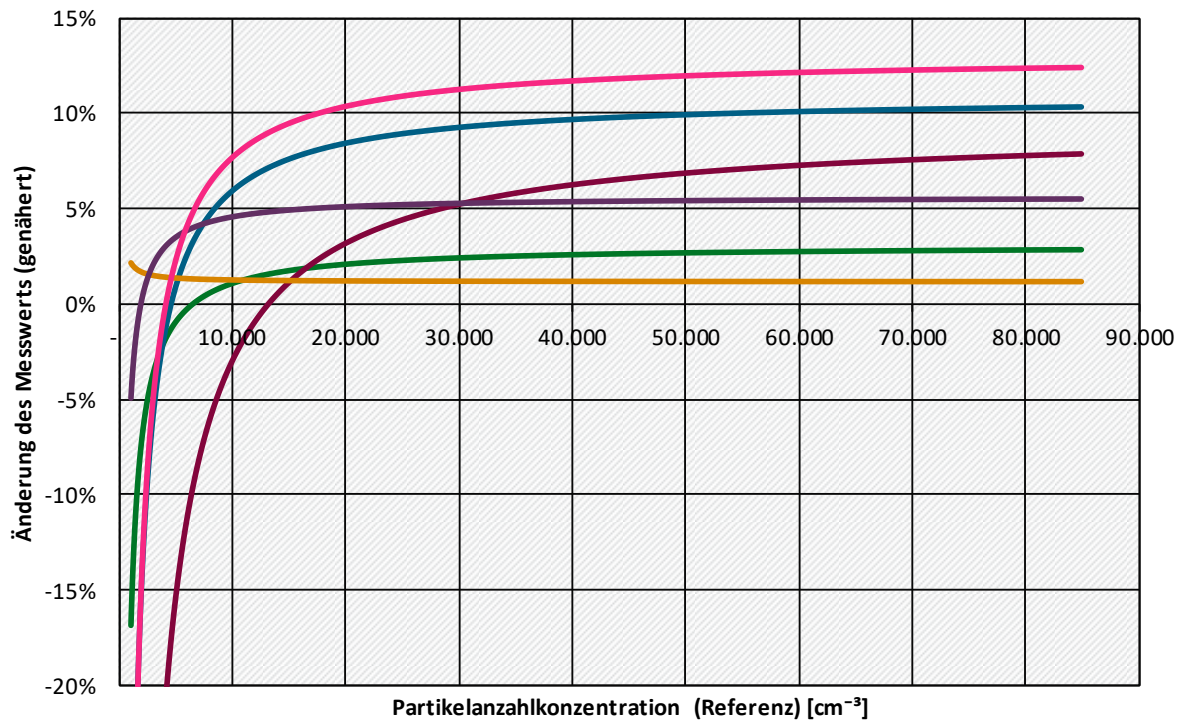
Quelle: HLNUG, Auswertung von Kalibrierberichten des TROPOS

Wie zu erkennen ist, zeigten alle untersuchten Messgeräte in beiden Kalibrierungen im Wesentlichen ein lineares Ansprechverhalten über einen Konzentrationsbereich von bis zu ca. 90.000 cm⁻³. Die Zähleffizienz unterschied sich aber auch für polydisperse Silberpartikel zwischen den verschiedenen Messgeräten, aber auch für das gleiche Messgerät zwischen den zwei Kalibrierungen teilweise deutlich.

Die folgende Abbildung zeigt die relative Änderung der gemessenen Zähleffizienz für die verschiedenen Messgeräte zwischen der Kalibrierung vor dem Ringversuch und der zweiten Kalibrierung nach dem Ringversuch. Dargestellt ist hier die Änderung des Messwerts zwischen der ersten Kalibrierung vor dem Ringversuch und der zweiten Kalibrierung nach dem Ringversuch, angegeben als Prozentwert des Referenzwerts. Für diese Darstellung wurde der Verlauf der Messwerte in den verschiedenen Kalibrierungen durch eine lineare Regression angenähert.

Abbildung 13: Änderung der Messergebnisse zur Zähleffizienz für monodisperse Partikel

Änderung des Messwerts für monodisperse Silberpartikel (ca. 40 nm) zwischen der ersten und der zweiten Kalibrierung



— Messgerät 1 — Messgerät 2 — Messgerät 3
— Messgerät 4 — Messgerät 5 — Messgerät 6

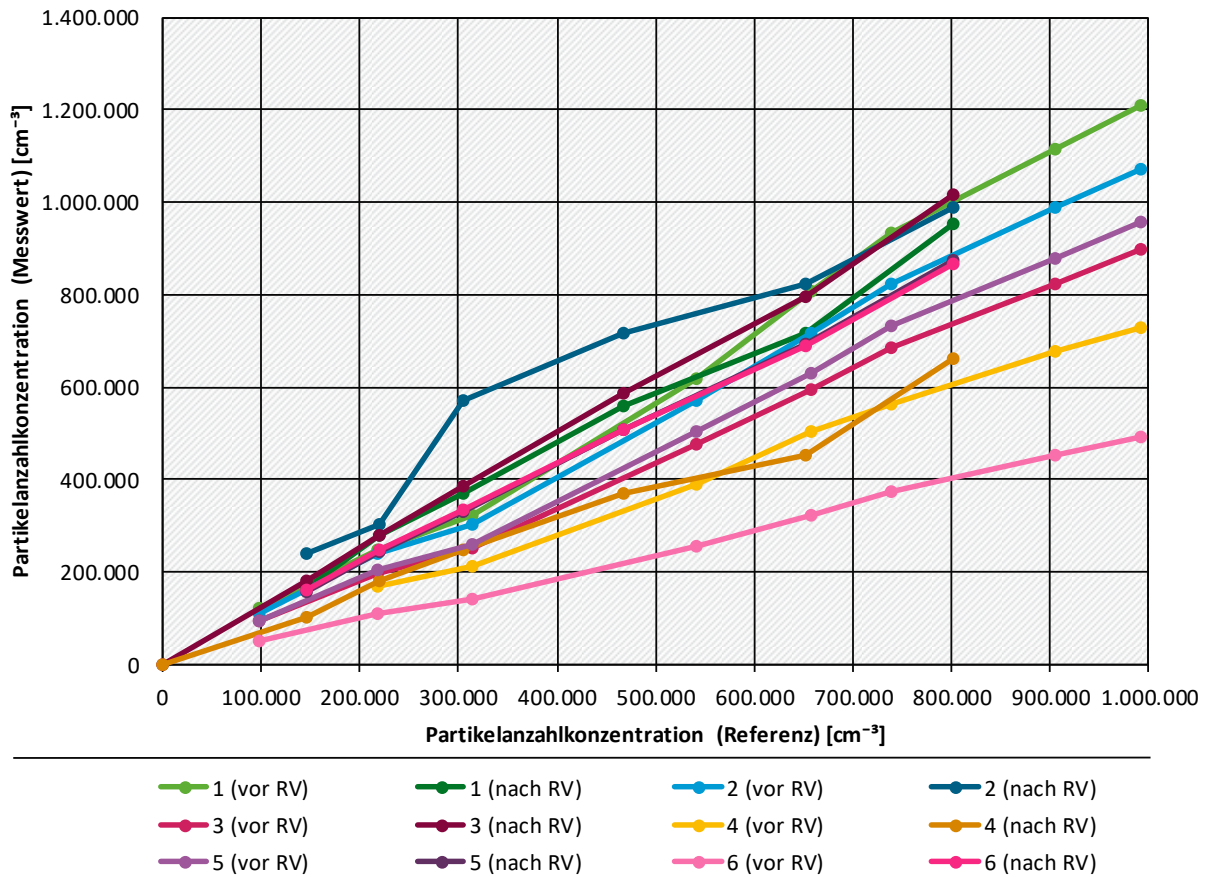
Quelle: HLNUG, Auswertung von Kalibrierberichten des TROPÖS

Wie zu erkennen ist, ergab sich für alle Messgeräte ab einer Partikelanzahlkonzentration von ca. 20.000 bis 50.000 cm⁻³ eine gleichbleibende relative Änderung der Zähleffizienz. Alle untersuchten Messgeräte haben in der zweiten Kalibrierung bei Referenzwerten im oberen Konzentrationsbereich jeweils höhere Messwerte angezeigt als in der ersten Kalibrierung. Für Konzentrationen unterhalb von 10.000 cm⁻³ ergaben sich allerdings teilweise sehr große relative Änderungen der Messwerte von der ersten zur zweiten Kalibrierung. Grundsätzlich ist so ein Befund nicht unüblich, da die meisten Messgeräte systematische Messfehler machen, die bei Messwerten nahe Null relativ gesehen sehr groß ausfallen können. Aus den beobachteten Messwerten lässt sich schlussfolgern, dass der relative Messfehler der Geräte bei Konzentrationen unterhalb von 20.000 cm⁻³ einen großen Betrag annimmt. In der Vergaberichtlinie für den Blauen Engel wurde diesem Umstand Rechnung getragen, indem die Anforderung an die erweiterte Messunsicherheit für Konzentrationen unterhalb von 100.000 cm⁻³ auf 25.000 cm⁻³ festgelegt wurde. Damit überschreitet die zulässige erweiterte Messunsicherheit bei 25.000 cm⁻³ einen relativen Wert von 100%.

Die folgende Abbildung zeigt die Messergebnisse der sechs untersuchten Messgeräte für polydisperse Silberpartikel bei verschiedenen Partikelanzahlkonzentrationen. Dargestellt sind wieder die Ergebnisse der Kalibrierung vor dem Ringversuch zusammen mit den Ergebnissen nach der Kalibrierung.

Abbildung 14: Messergebnisse zur Zähleffizienz für polydisperse Partikel

Messergebnisse für polydisperse Silberpartikel vor und nach dem Ringversuch



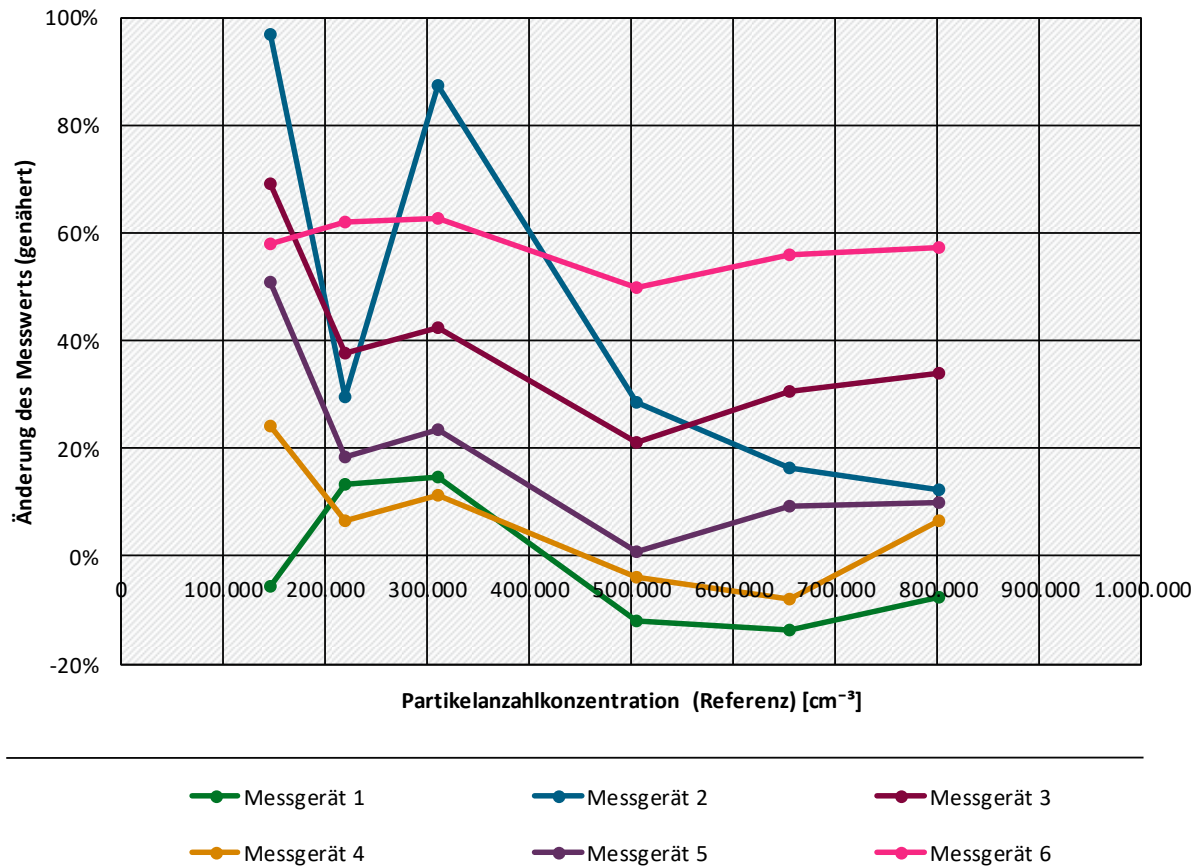
Quelle: HLNUG, Auswertung von Kalibrierberichten des TROPOS

Auch hier ist der Verlauf der Messwerte über den gesamten untersuchten Konzentrationsbereich für die meisten Messgeräte annähernd linear, einzelne Messgeräte zeigten allerdings gewisse Abweichungen vom linearen Verhalten.

Die folgende Abbildung zeigt die Änderung der gemessenen Zähleffizienz für die verschiedenen Messgeräte zwischen der Kalibrierung vor dem Ringversuch und der zweiten Kalibrierung nach dem Ringversuch. Dargestellt ist hier die Änderung des Messwerts zwischen der ersten Kalibrierung vor dem Ringversuch und der zweiten Kalibrierung nach dem Ringversuch, angegeben als Prozentwert des Referenzwerts. Für diese Darstellung wurden Messwerte in den verschiedenen Kalibrierungen bei ähnlichen Referenzkonzentrationen durch eine lineare Regression angenähert.

Abbildung 15: Änderung der Messergebnisse zur Zähleffizienz für polydisperse Partikel

Änderung der Messwerte für polydisperse Silberpartikel zwischen der ersten und der zweiten Kalibrierung



Quelle: HLNUG, Auswertung von Kalibrierberichten des TROPOS

Praktisch alle untersuchten Messgeräte zeigten hier wesentliche Veränderungen von der ersten zur zweiten Kalibrierung, die zudem uneinheitlich für verschiedene Konzentrationsbereiche ausfielen. Während Messgerät 2 Änderungen der angezeigten Messwerte von +10% bis zu +100% verzeichnete, lagen die Änderungen bei Messgerät 1 zwischen -15% und +15%.

Insgesamt musste bei den Kalibrierungen festgestellt werden, dass keines der Geräte die formalen Anforderungen der Vergaberichtlinie für den Blauen Engel in allen Punkten erfüllte. Zu diesen Anforderungen gehört ein maximal zulässiger Fehler von $\pm 25\%$ des Messwerts (bzw. $\pm 25.000 \text{ cm}^{-3}$ für Konzentrationen $< 100.000 \text{ cm}^{-3}$).

Diese Anforderung wurde für die Messungen mit monodispersen Silberpartikeln (ca. 40 nm Durchmesser) nur von Messgerät 1, 3 und 4 in beiden Kalibrierungen erfüllt. Messgerät 2 erfüllte diese Anforderung in der zweiten Kalibrierung nach dem Ringversuch, aber nicht in der ersten Kalibrierung vor dem Ringversuch. Die Messgeräte 5 und 6 wichen in beiden Kalibrierungen von den Anforderungen ab.

Bei den Messungen mit polydispersen Silberpartikeln erfüllte hingegen nur Messgerät 5 in beiden Kalibrierungen die Anforderungen der Vergaberichtlinie. Messgeräte 2 und 3 erfüllten die Anforderungen nur in der ersten Kalibrierung und nicht in der zweiten, Messgerät 6 wiederum erfüllte die Anforderungen in der ersten Kalibrierung nicht, in der zweiten hingegen schon. Die Messgeräte 1 und 4 erfüllten in keiner der zwei Kalibrierungen die Anforderungen.

Eine weitere Anforderung der Vergaberichtlinie ist die Einhaltung der in der folgenden Tabelle aufgelisteten Parameter für die Bestimmungseffizienz.

Tabelle 7: Parameter für die Bestimmungseffizienz laut Vergaberichtlinie

Partikelgröße [nm]*	Effizienz (Minimum)	Effizienz (Maximum)
23	0,2	0,6
50	0,6	1,3
80	0,7	1,3

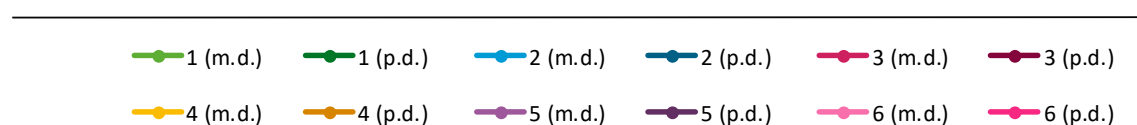
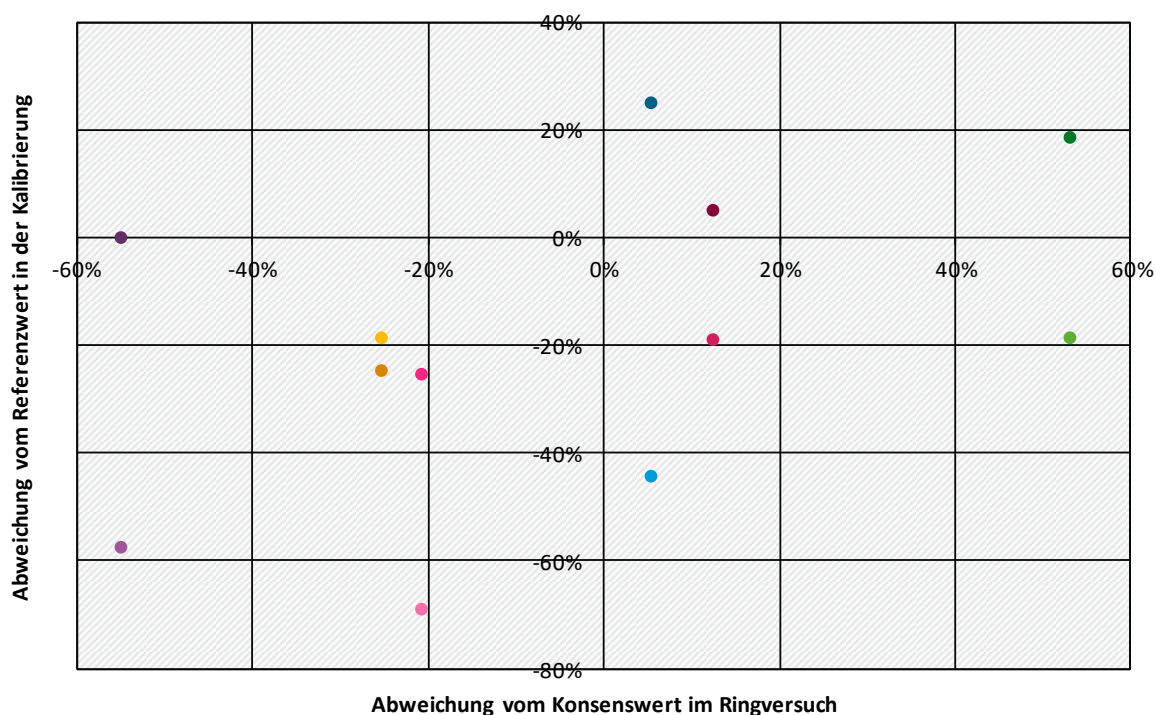
* Für die Partikelgröße gilt eine Toleranz von $\pm 5\%$.

Diese Anforderungen an den Cut-off haben nur die Messgeräte 1, 3 und 4 erfüllt. Die Messgeräte 2, 5 und 6 haben diese Kriterien in beiden Kalibrierungen verfehlt.

Ein Vergleich der mittleren Abweichungen von den Konsenswerten im Ringversuch mit den mittleren Abweichungen von den Referenzwerten in den Kalibriermessungen ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 16: Vergleich der Abweichungen im Ringversuch und in der Kalibrierung

Mittlere Abweichungen der Messgeräte in der Kalibrierung gegenüber dem Ringversuch



m.d. = monodispers, p.d. = polydispers

Quelle: HLNUG, Auswertung von Kalibrierberichten des TROPPOS und Ringversuch

Für die untersuchten Messgeräte konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Ergebnissen in den Kalibriermessungen und den Ergebnissen in den Messungen unter realen Bedingungen im Ringversuch festgestellt werden. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass durch eine Kalibrierung mit Silberpartikeln an einem Prüfstand zwar die grundsätzliche Funktionsfähigkeit eines Partikelanzahlmesssystems getestet werden kann, diese ist aber ggf. nicht ausreichend, um die Zuverlässigkeit eines Messgerätes für die in DE-UZ 212 geforderte Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration zu gewährleisten. Die Messung unter realen Bedingungen in einem Ringversuch an einem Kaminofen dürfte hier belastbarere Informationen liefern. Eine regelmäßige Durchführung solcher Ringversuche unter Vergleichbedingungen würde eine effektive Kontrolle der Messgeräte unter realen Bedingungen sowie die Ermittlung von aussagekräftigen Messunsicherheiten ermöglichen.

4.7 Abbrände im Ringversuch

Die Messungen fanden in zwei Ringversuchen (22K1 und 22K2) mit jeweils 2 Messtagen statt. Die Bedienung des Ofens wurde maßgeblich durch die vom Ofenhersteller bereitgestellte Steuerungssoftware bestimmt. Sobald diese Software das Signal gab, dass Holz nachgelegt werden soll, wurden die Teilnehmenden über den bevorstehenden Beginn einer neuen Abbrandphase informiert, um ggf. Messwerte zwischenspeichern oder andere Einstellungen an ihren Messgeräten vorzunehmen. Nachdem alle Teilnehmenden ihre Bereitschaft für den nächsten Abbrand signalisiert hatten, wurde jeweils das Brennholz für die nächste Abbrandphase nachgelegt.

Zusätzlich war im Messraum ein Monitor installiert, über den die Teilnehmenden laufend folgende Informationen erhielten:

- ▶ Videoübertragung der Brennkammer des Kaminofens
- ▶ Temperaturen im Ofen und im Messquerschnitt
- ▶ Konzentrationen von O₂, CO₂, H₂O, CO und NO_x
- ▶ Statusanzeige der Ofensteuerung
- ▶ In der Anzündphase: Fortschritt des Anzündprozesses (gemäß Ofensteuerungssoftware)
- ▶ Uhrzeit

In der folgenden Tabelle sind Informationen zu den Abbränden im Ringversuch zusammengefasst. Das verwendete Holz hatte einen relativen Feuchtegehalt von 12,4%.

Tabelle 8: Abbrände im Ringversuch

Ringversuch	Messtag	Abbrandphase	Abbrand-nummer	Uhrzeit	Holzmenge [kg]
22K1	1 (07.12.22)	Anbrand	1	09:31	1,791
			2	10:08	1,416
		Nennlast	3	11:01	1,414
			4	12:04	1,415
			5	13:01	1,416
		Teillast	6	13:47	0,496
			7	14:32	0,495
	2 (08.12.22)	Anbrand	1	09:41	1,792
			2	10:41	1,413
		Nennlast	3	11:48	1,413
			4	12:56	1,417
			5	13:57	1,414
		Teillast	6	14:51	0,494
			7	15:38	0,495
22K2	1 (14.12.22)	Anbrand	1	09:31	1,791
			2	10:25	1,415
		Nennlast	3	11:32	1,415
			4	12:32	1,416
			5	13:36	1,414
		Teillast	6	14:31	0,495
			7	15:22	0,495
	2 (15.12.22)	Anbrand	1	09:32	1,793
			2	10:18	1,413
		Nennlast	3	11:16	1,415
			4	12:16	1,415
			5	13:09	1,412
		Teillast	6	13:58	0,495
			7	14:43	0,493

4.8 Druckluftversorgung

Um den Druckluftbedarf der von den Teilnehmenden betriebenen Verdünnungssysteme zu decken, wurde für den Ringversuch ein dieselbetriebener 24 kW Kompressor (Kaeser M31) bereitgestellt. Das verwendete Gerät hatte einen maximalen Volumenstrom von $3,15 \text{ m}^3/\text{min}$ bei einem maximalen Druck von 7 bar. Zur Trocknung wurde ein Adsorptionstrockner (FST DPS 25) verwendet, der einen Drucktaupunkt von unter -25 °C gewährleistete. Zusätzlich wurde die Druckluft durch eine Serie von Filtern gereinigt (Aircraft; Vorfilter $< 1 \text{ }\mu\text{m}$ AFF0060, Feinstfilter $< 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ ASF0060, Nanofilter $< 0,01 \text{ }\mu\text{m}$ ANF0060, Aktivkohlefilter AAF0060). Die zur Verfügung stehende Druckluft war damit öl-, staub- und wasserfrei.

Abbildung 17: Kompressor für die Sicherstellung der Druckluftversorgung im Ringversuch



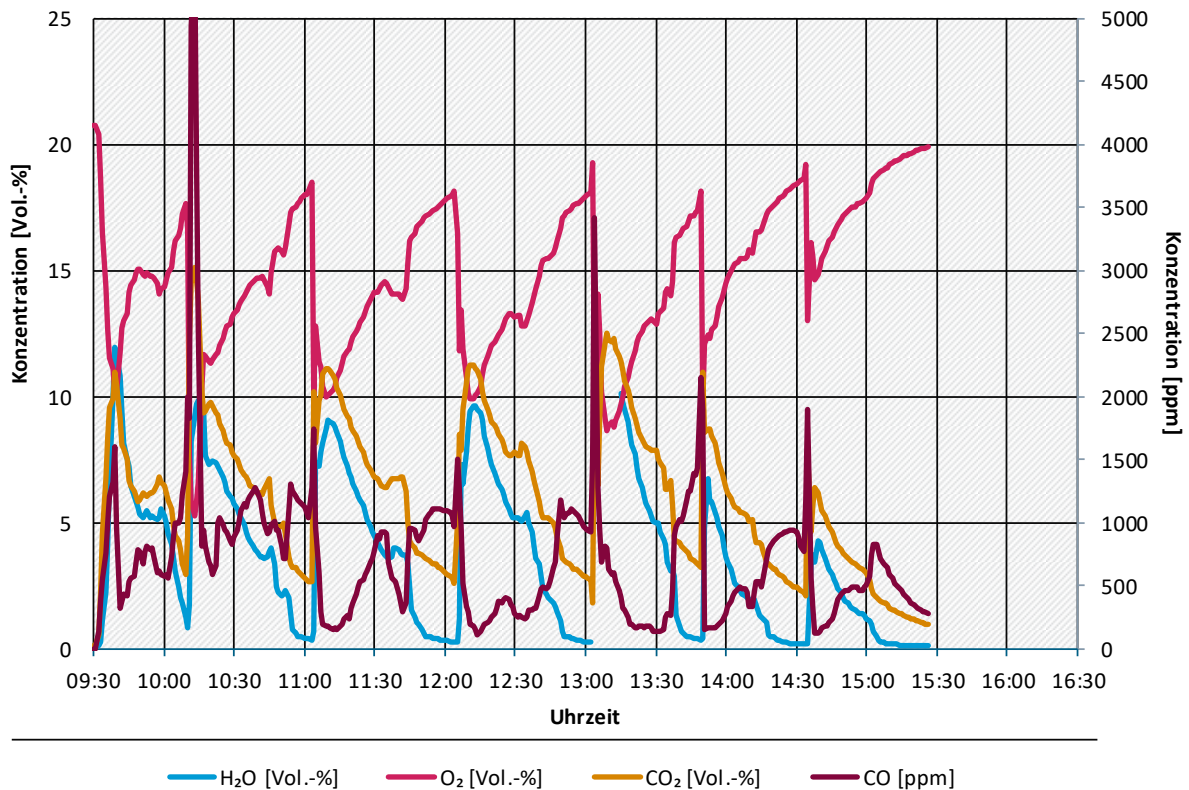
Quelle: Eigene Darstellung, HLNUG.

4.9 Ergebnisse der Messungen im Ringversuch

Die folgenden Diagramme zeigen den Verlauf der Konzentrationen verschiedener gasförmiger Komponenten im Abgas, sowie physikalischer Parameter und schließlich die von den Teilnehmenden im Ringversuch gemessenen Partikelanzahlkonzentrationen an verschiedenen Versuchstagen. Um die Anonymität der Teilnehmenden im Sinne der DIN EN ISO/IEC 17043 zu wahren, werden in diesem Bericht vierstellige ID-Codes verwendet, mit denen die Teilnehmenden pseudonymisiert wurden. Allen Teilnehmenden wurde nur der eigene ID-Code mitgeteilt, sodass Dritte nicht in der Lage sind, die hier dargestellten Messergebnisse einem konkreten Prüflabor zuzuordnen.

Abbildung 18: Verlauf der Abgaszusammensetzung im Ringversuch (1)

Erster Ringversuch (22K1), Tag 1



Im Zeitraum von 13:03 Uhr bis 13:14 Uhr liegen keine Messwerte zur H₂O-Konzentration vor.

Quelle: HLNUG

Nach dem Anzünden des Kamins sinkt die Sauerstoffkonzentration im Abgas zunächst rasch, während die CO-, CO₂- und H₂O-Konzentration steigen. Mit der automatischen Drosselung der Luftzufuhr durch die Ofensteuerung steigt die Sauerstoffkonzentration im Abgas dann zunächst wieder an, während die Konzentrationen der übrigen Abgasbestandteile wieder sinken.

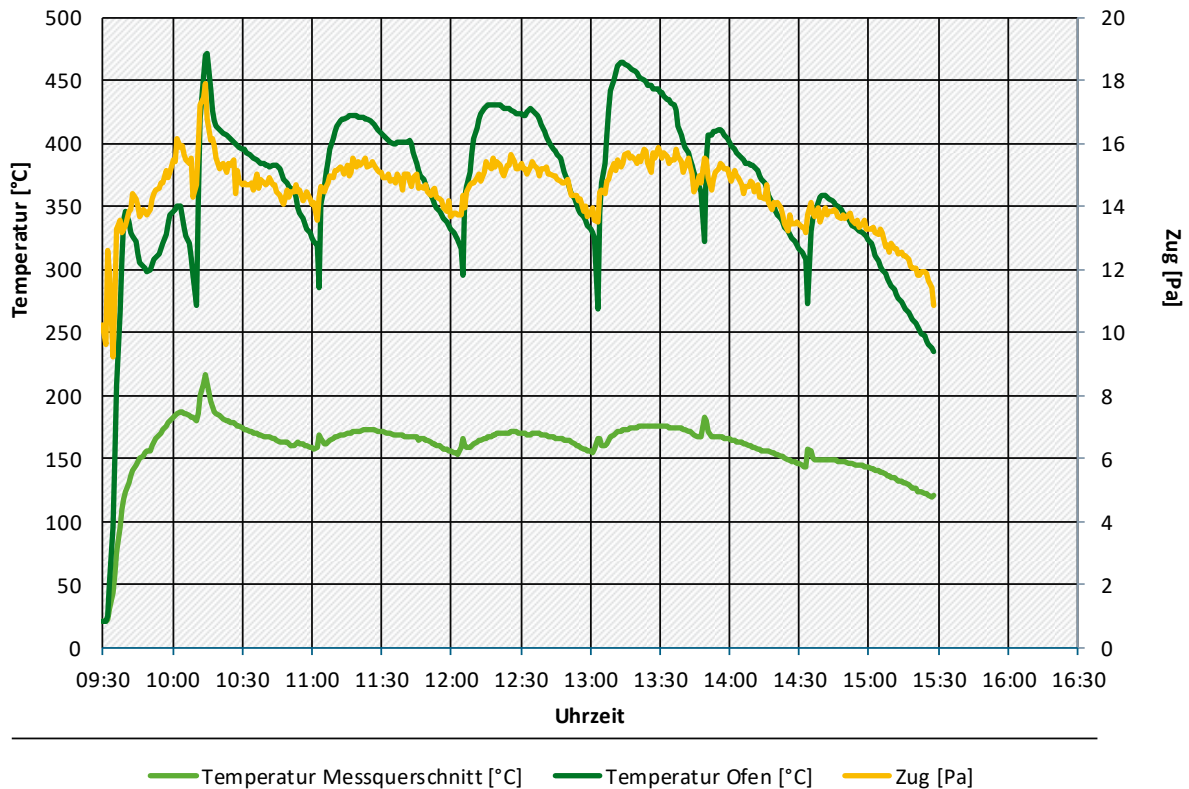
Klar zu erkennen sind in diesem Diagramm die Zeitpunkte, zu denen zwischen den verschiedenen Abbrandphasen neues Brennholz nachgelegt wurde. Kurz darauf kommt es zu einer starken Abnahme der Sauerstoffkonzentration, während die Konzentrationen von CO-, CO₂- und H₂O stark ansteigen. Im Laufe des Abbrands nimmt die Konzentration von Sauerstoff im Abgas dann in der Regel kontinuierlich zu, während die Konzentrationen von CO₂ und Wasserdampf kontinuierlich sinken. Der Verlauf der CO-Konzentration ist weniger einheitlich. Nach dem starken Anstieg kurz nach der Brennholzzugabe sinkt die Konzentration in der Regel schnell wieder und steigt gegen Ende einer Abbrandphase wieder an, teilweise ist der Verlauf aber auch anders.

Über alle sieben Abbrandphasen lag die mittlere Sauerstoffkonzentration bei 14,7 Vol.-% mit einem Minimalwert von 5,3 Vol.-% zu Beginn des zweiten Abbrands. Die CO₂-Konzentration betrug im Mittel 6,1 Vol.-%, der Maximalwert lag bei 15,1 Vol.-% und wurde ebenfalls zu Beginn des zweiten Abbrands erreicht. Die CO-Konzentration lag im Mittel bei 722 ppm, der Maximalwert bei 5504 ppm (wieder zu Beginn des zweiten Abbrands). Die NO_x-Konzentration (nicht im Diagramm dargestellt) lag im Mittel bei 39 ppm, mit einem Maximalwert von 85 ppm.

Die Wasserdampfkonzentration im Abgas betrug im Mittel 3,7 Vol.-% mit einem Maximalwert von 12,0 Vol.-% zu Beginn des ersten Abbrands, allerdings sind hier die Daten leider unvollständig, da es zu Beginn des fünften Abbrands zu einer kurzzeitigen Störung des Messgeräts kam.

Abbildung 19: Verlauf von Temperatur und Zug im Ringversuch (1)

Erster Ringversuch (22K1), Tag 1



Quelle: HLNUG

Die Temperatur im Ofen steigt naturgemäß kurz nach dem Anzünden stark an, mit der automatischen Drosselung der Luftzufuhr sinkt die Temperatur in der Brennkammer zunächst etwas, steigt dann aber erneut an, bis es gegen Ende des ersten Abbrands wieder zu einem Rückgang der Temperatur kommt. Die Temperatur im Messquerschnitt im Abgasrohr, ca. 3 m oberhalb der Brennkammer, sowie der Zug an diesem Punkt, steigen bis zum Ende der ersten Abbrandphase meist kontinuierlich an und gehen erst gegen Ende des Abbrands etwas zurück.

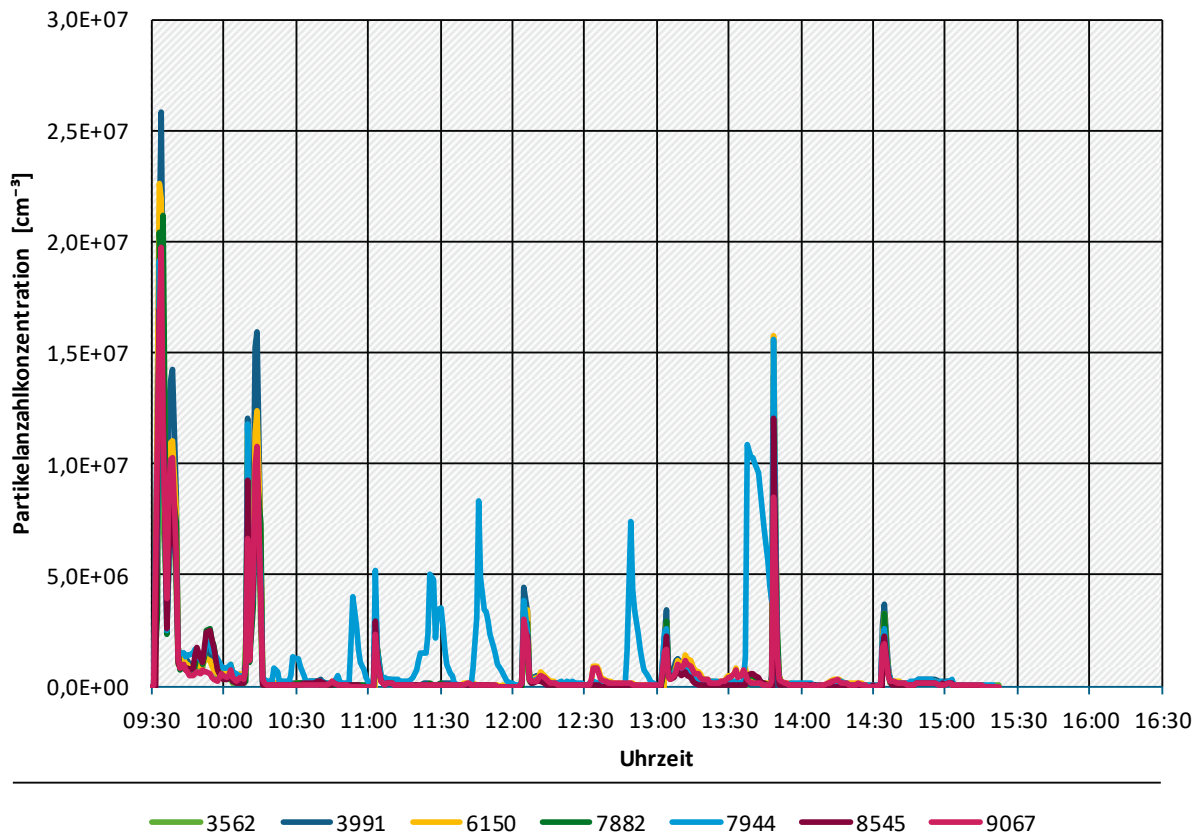
Auch hier sind die Zeitpunkte, zu denen neues Brennholz aufgelegt wird, klar zu erkennen. Die Temperatur in der Brennkammer fällt beim Öffnen der Ofentür kurz stark ab, steigt danach aber schnell wieder an. Gleichzeitig kommt es im Messquerschnitt zu einem kurzzeitigen Anstieg der Temperatur. Im Verlauf des Abbrands steigen alle drei Werte zunächst an und fallen später wieder.

Über alle sieben Abbrandphasen lag die mittlere Ofentemperatur bei 369 °C, der Maximalwert von 471 °C wurde während des 5. Abbrands erreicht. Die Temperatur im Messquerschnitt, an dem die Partikelanzahlmessungen stattfanden, betrug im Mittel 161 °C. Hier wurde der

Maximalwert von 216 °C während des Nachlegens von Holz für den zweiten Abbrand erreicht. Der Zug am Messquerschnitt lag im Mittel bei 14,5 Pa.

Abbildung 20: Messwerte der Teilnehmenden im Ringversuch (1)

Erster Ringversuch (22K1), Tag 1

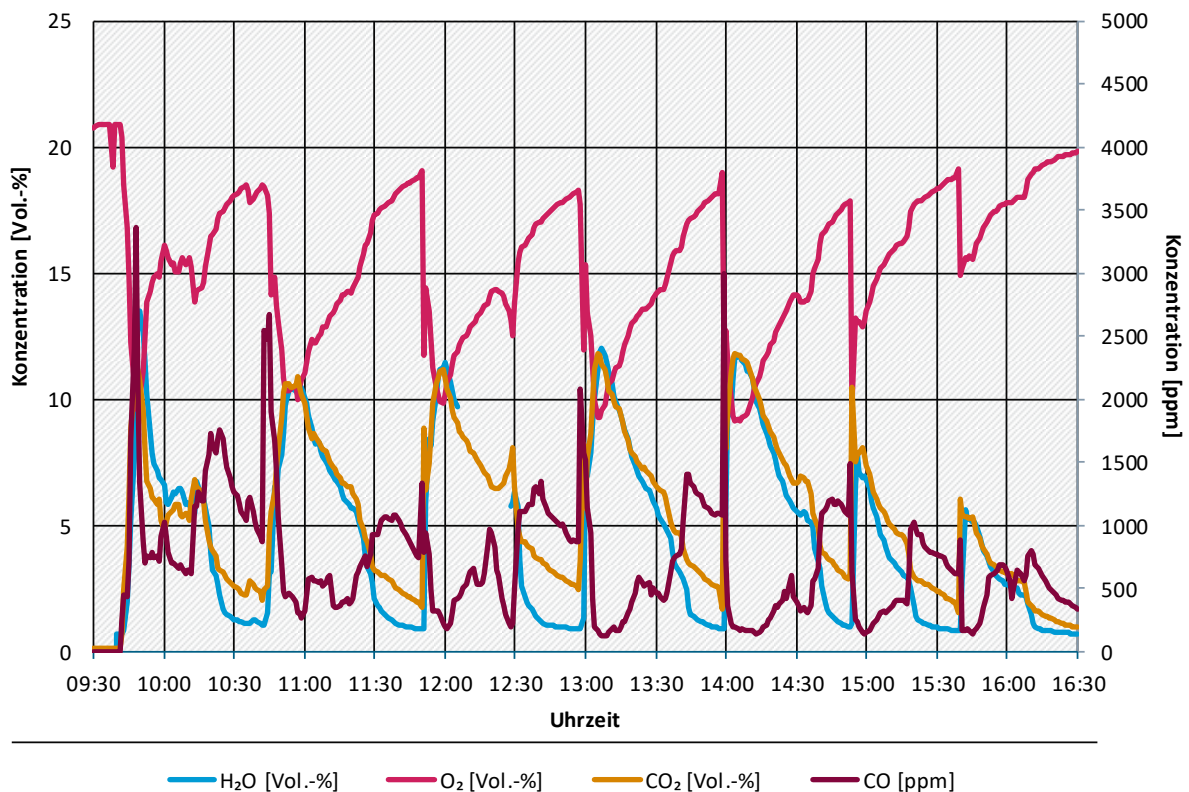


Quelle: HLNUG, erstellt aus Rohdaten der Ringversuchsteilnehmenden

Die Messwerte fast aller Geräte im Ringversuch 22K1 zeigten am ersten Messtag sehr ähnliche Konzentrationsverläufe. Einzige Ausnahme war hier das Gerät 7944, das diverse Peaks zu Zeitpunkten detektierte, zu denen die übrigen Messgeräte keine nennenswerten Konzentrationsanstiege verzeichneten. Das Gerät 7944 wurde bei der Ermittlung des zugewiesenen Wertes für den Ringversuch nicht berücksichtigt.

Abbildung 21: Verlauf der Abgaszusammensetzung im Ringversuch (2)

Erster Ringversuch (22K1), Tag 2



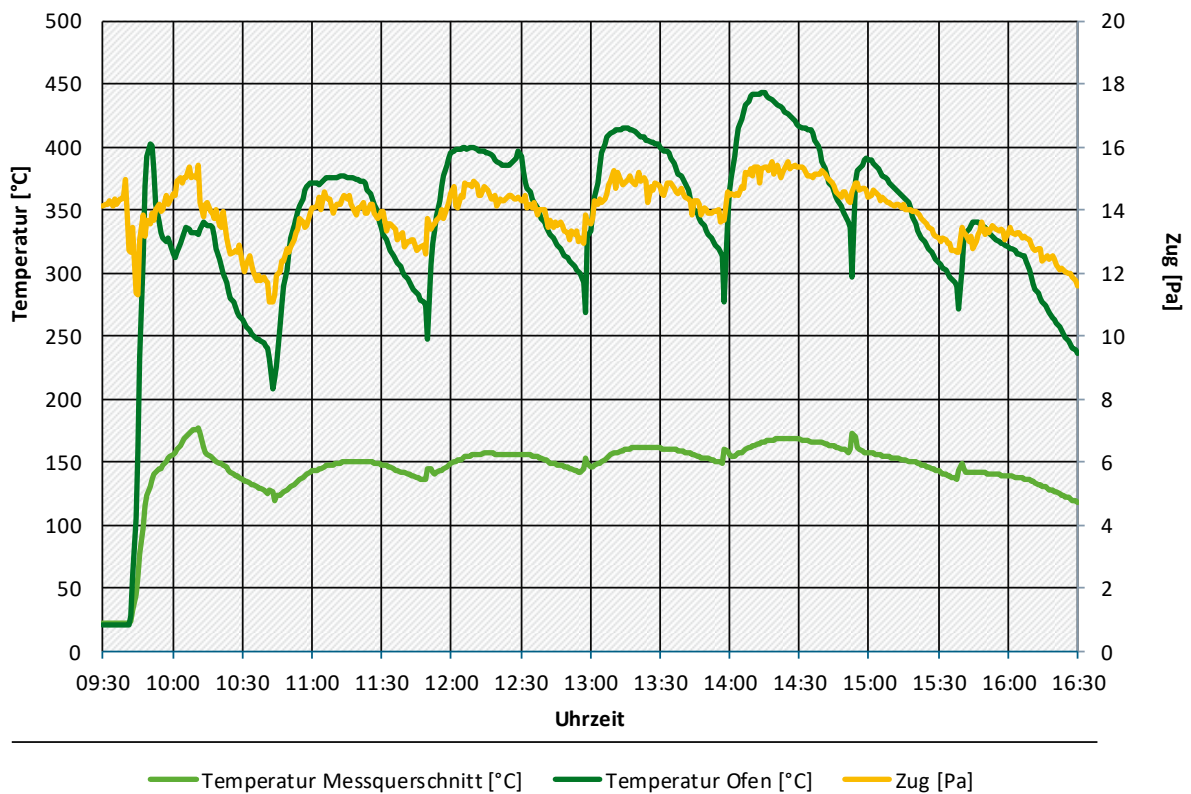
Für den Zeitraum von 12:06 Uhr bis 12:26 Uhr liegen keine Messwerte zur H₂O-Konzentration vor.

Quelle: HLNUG

Über alle sieben Abbrandphasen lag die mittlere Sauerstoffkonzentration an diesem Messtag bei 15,2 Vol.-% mit einem Minimalwert von 9,2 Vol.-% zu Beginn des vierten und des fünften Abbrands. Die CO₂-Konzentration betrug im Mittel 5,5 Vol.-%, der Maximalwert lag bei 11,8 Vol.-% und wurde ebenfalls zu Beginn des vierten und des fünften Abbrands erreicht. Die CO-Konzentration lag im Mittel bei 721 ppm, der Maximalwert bei 3360 ppm zu Beginn des ersten Abbrands. Die NO_x-Konzentration (nicht im Diagramm dargestellt) lag im Mittel bei 34 ppm, mit einem Maximalwert von 75 ppm. Die Wasserdampfkonzentration im Abgas betrug im Mittel 3,7 Vol.-% mit einem Maximalwert von 13,5 Vol.-% zu Beginn des vierten Abbrands, allerdings sind hier die Daten leider unvollständig, da es während des dritten Abbrands zu einer kurzzeitigen Störung des Messgeräts kam.

Abbildung 22: Verlauf von Temperatur und Zug im Ringversuch (2)

Erster Ringversuch (22K1), Tag 2

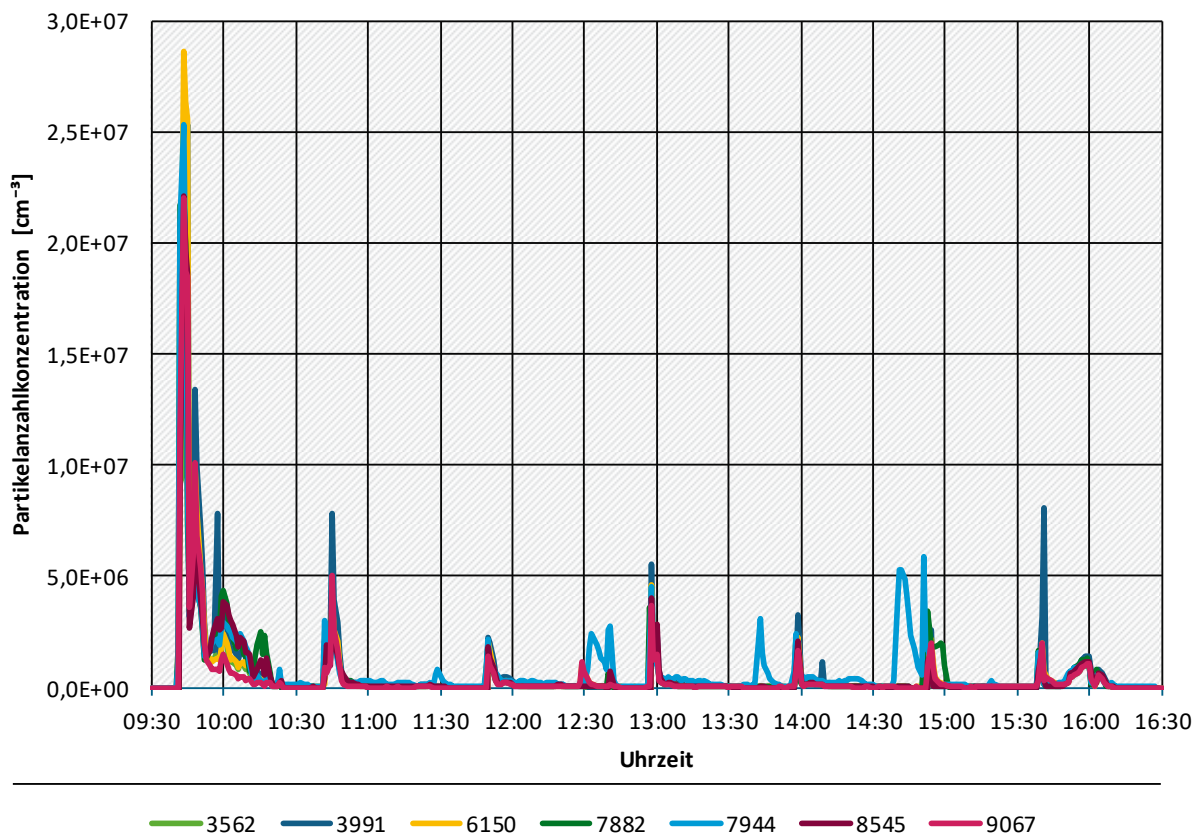


Quelle: HLNUG

Über alle sieben Abbrandphasen lag die mittlere Ofentemperatur an diesem Messtag bei 345 °C, der Maximalwert von 443 °C wurde während des 5. Abbrands erreicht. Die Temperatur im Messquerschnitt, an dem die Partikelanzahlmessungen stattfanden, lag die Temperatur im Mittel bei 148 °C. Hier wurde der Maximalwert von 177 °C während des ersten Abbrands erreicht. Der Zug am Messquerschnitt lag im Mittel bei 13,9 Pa.

Abbildung 23: Messwerte der Teilnehmenden im Ringversuch (2)

Erster Ringversuch (22K1), Tag 2

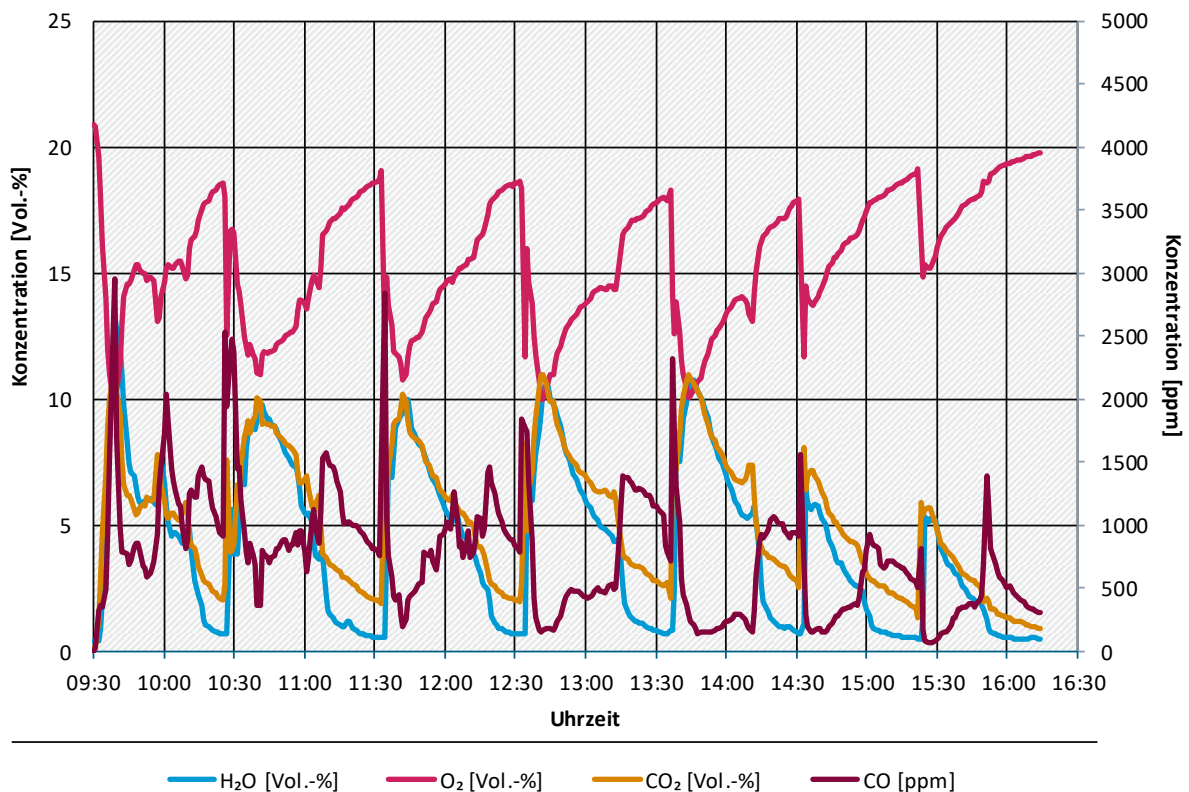


Quelle: HLNUG, erstellt aus Rohdaten der Ringversuchsteilnehmenden

Auch am zweiten Messtag im Ringversuch 22K1 zeigten die Messwerte fast aller Geräte sehr ähnliche Konzentrationsverläufe. Einzige Ausnahme war auch hier das Gerät 7944, das wieder diverse Peaks zu Zeitpunkten detektierte, zu denen die übrigen Messgeräte keine nennenswerten Konzentrationsanstiege verzeichneten. Das Gerät 7944 wurde bei der Ermittlung des zugewiesenen Wertes für den Ringversuch nicht berücksichtigt.

Abbildung 24: Verlauf der Abgaszusammensetzung im Ringversuch (3)

Zweiter Ringversuch (22K2), Tag 1

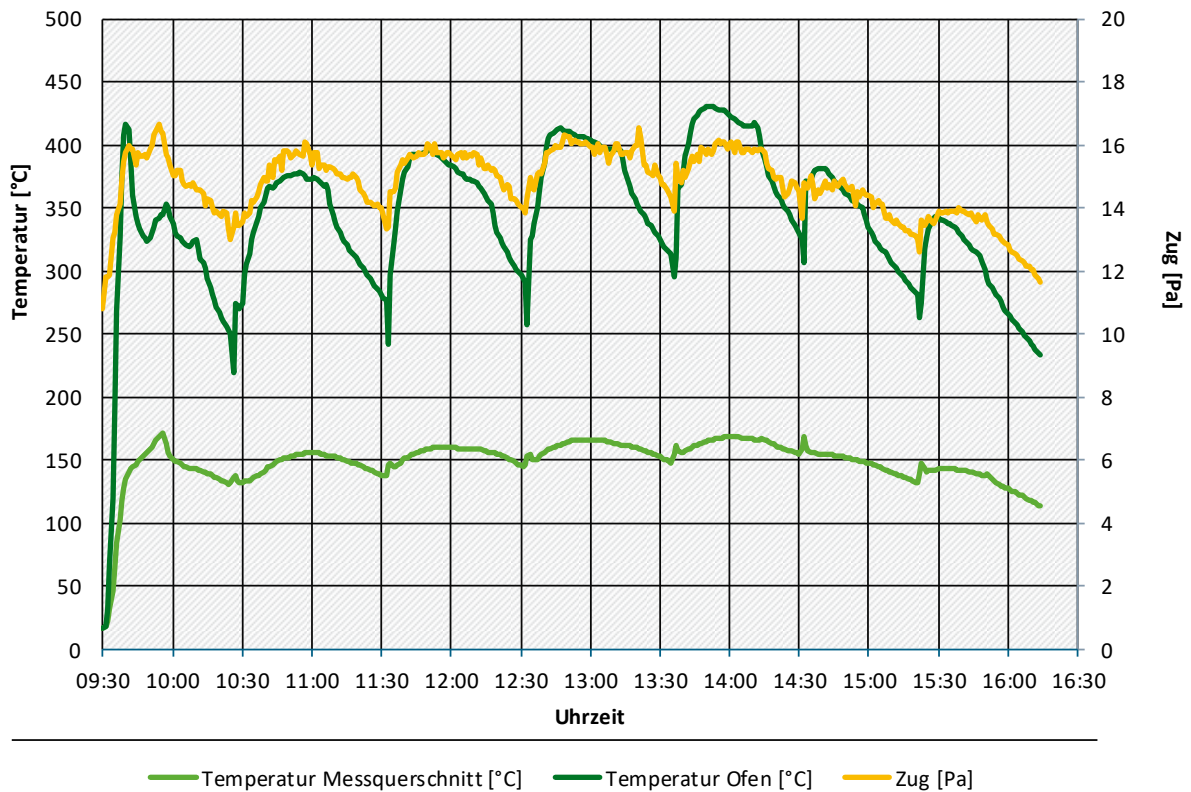


Quelle: HLNUG

Über alle sieben Abbrandphasen lag die mittlere Sauerstoffkonzentration an diesem Messtag bei 15,4 Vol.-% mit einem Minimalwert von 9,6 Vol.-% zu Beginn des ersten Abbrands. Die CO₂-Konzentration betrug im Mittel 5,3 Vol.-%, der Maximalwert lag bei 11,2 Vol.-% und wurde ebenfalls zu Beginn des ersten Abbrands erreicht. Die CO-Konzentration lag im Mittel bei 768 ppm, der Maximalwert bei 2947 ppm zu Beginn des ersten Abbrands. Die NO_x-Konzentration (nicht im Diagramm dargestellt) lag im Mittel bei 35 ppm, mit einem Maximalwert von 76 ppm. Die Wasserdampfkonzentration im Abgas betrug im Mittel 4,3 Vol.-% mit einem Maximalwert von 13,3 Vol.-% zu Beginn des ersten Abbrands.

Abbildung 25: Verlauf von Temperatur und Zug im Ringversuch (3)

Zweiter Ringversuch (22K2), Tag 1

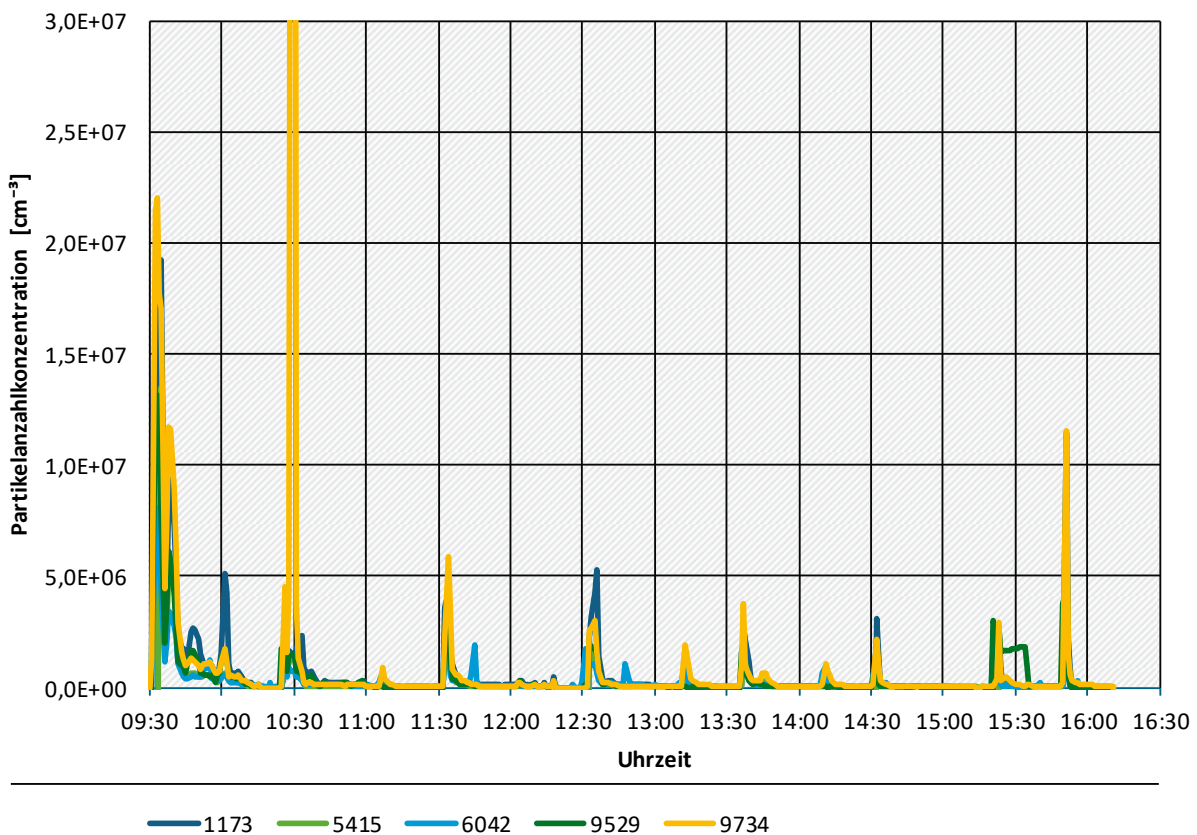


Quelle: HLNUG

Über alle sieben Abbrandphasen lag die mittlere Ofentemperatur an diesem Messtag bei 344 °C, der Maximalwert von 431 °C wurde während des 5. Abbrands erreicht. Die Temperatur im Messquerschnitt, an dem die Partikelanzahlmessungen stattfanden, lag die Temperatur im Mittel bei 149 °C. Hier wurde der Maximalwert von 171 °C während des ersten Abbrands erreicht. Der Zug am Messquerschnitt lag im Mittel bei 14,8 Pa.

Abbildung 26: Messwerte der Teilnehmenden im Ringversuch (3)

Zweiter Ringversuch (22K2), Tag 1



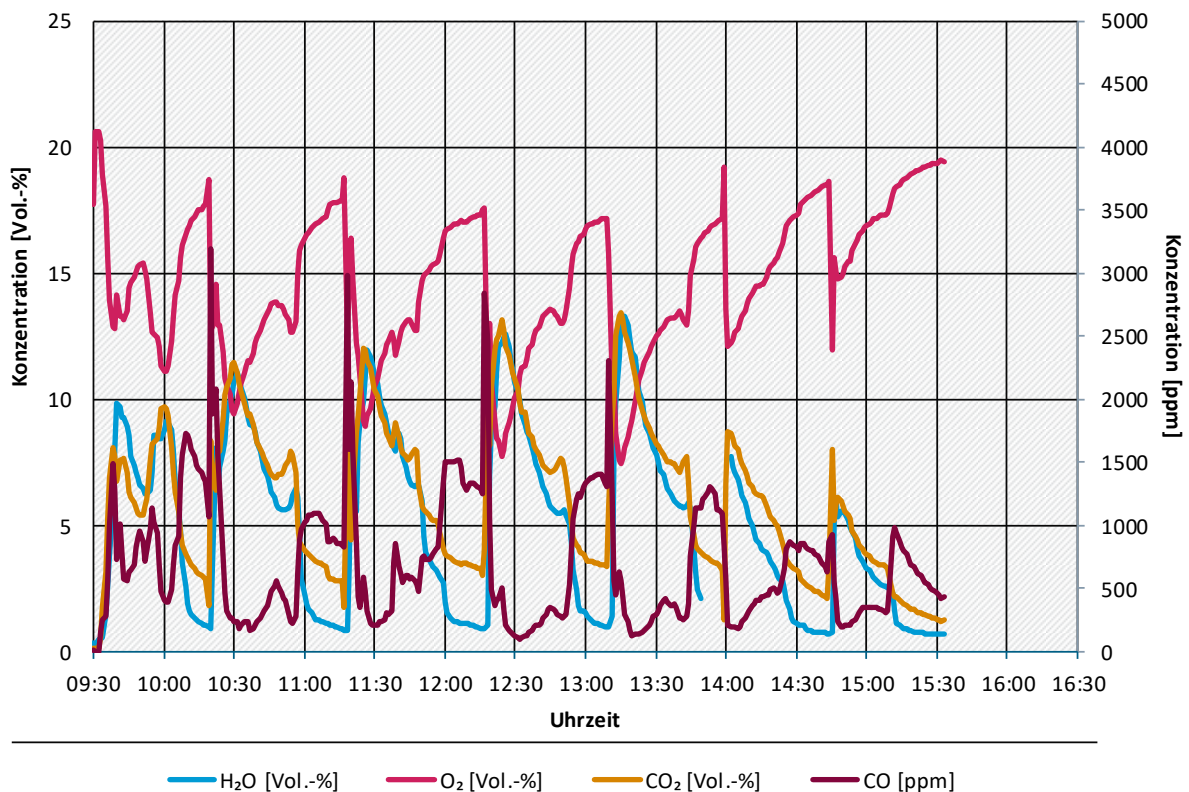
Quelle: HLNUG, erstellt aus Rohdaten der Ringversuchsteilnehmenden

Die Messwerte fast aller Geräte im Ringversuch 22K2 zeigten am ersten Messtag insgesamt sehr ähnliche Konzentrationsverläufe. Einzige Ausnahme war hier das Gerät 9734, das für den zweiten Abbrand ab 10:25 Uhr eine um den Faktor 11 höhere Partikelanzahlkonzentration aufzeichnete. Die gemessene Konzentration stieg hier auf einen Maximalwert von $8,9 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-3}$ um 10:30 Uhr (im Diagramm außerhalb des Darstellungsbereichs), während die übrigen Messgeräte einen Wert von im Mittel $1,2 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$ verzeichneten. Das Gerät 9734 wurde bei der Ermittlung des zugewiesenen Wertes für den Ringversuch nicht berücksichtigt.

Nicht aufgeführt sind hier die Messwerte für die Geräte 3926, 5534, 6638 und 9707. Aufgrund von technischen Schwierigkeiten hat keines dieser Messgeräte über die gesamte Abbrandreihe Messwerte aufzeichnen können, insbesondere fehlen hier die Messwerte für den besonders wichtigen Zeitraum nach dem Anzünden des Ofens. Für diese Messgeräte hat das HLNUG außerdem keine Rohdaten seitens der Teilnehmenden erhalten. Diese Messgeräte konnten bei der Ermittlung des zugewiesenen Wertes für den Ringversuch ebenfalls nicht berücksichtigt werden.

Abbildung 27: Verlauf der Abgaszusammensetzung im Ringversuch (4)

Zweiter Ringversuch (22K2), Tag 2



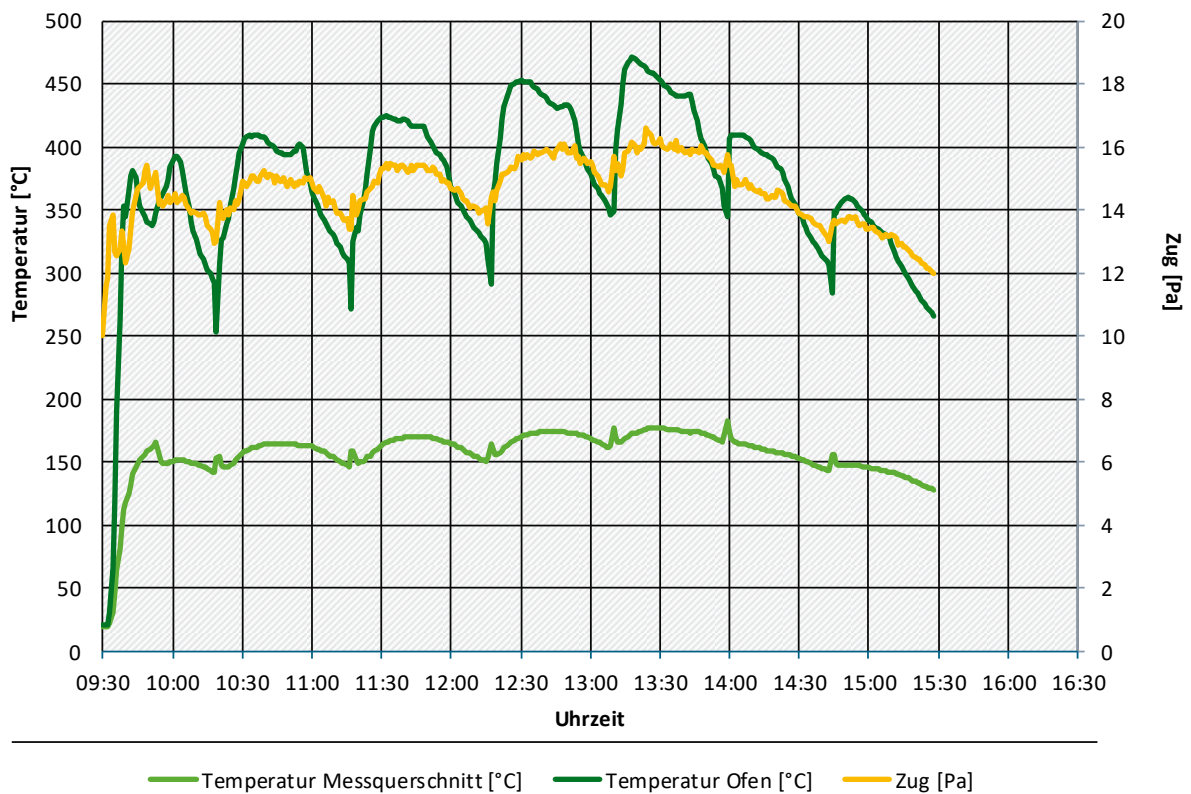
Für den Zeitraum von 13:50 Uhr bis 14:01 Uhr liegen keine Messwerte zur H₂O-Konzentration vor.

Quelle: HLNUG

Über alle sieben Abbrandphasen lag die mittlere Sauerstoffkonzentration an diesem Messtag bei 14,6 Vol.-% mit einem Minimalwert von 7,5 Vol.-% zu Beginn des fünften Abbrands. Die CO₂-Konzentration betrug im Mittel 6,1 Vol.-%, der Maximalwert lag bei 13,4 Vol.-% und wurde ebenfalls zu Beginn des fünften Abbrands erreicht. Die CO-Konzentration lag im Mittel bei 700 ppm, der Maximalwert bei 3194 ppm zu Beginn des zweiten Abbrands. Die NO_x-Konzentration (nicht im Diagramm dargestellt) lag im Mittel bei 40 ppm, mit einem Maximalwert von 72 ppm. Die Wasserdampfkonzentration im Abgas betrug im Mittel 5,1 Vol.-% mit einem Maximalwert von 13,3 Vol.-% zu Beginn des fünften Abbrands, allerdings sind hier die Daten leider unvollständig, da es gegen Ende des fünften Abbrands zu einer kurzzeitigen Störung des Messgeräts kam.

Abbildung 28: Verlauf von Temperatur und Zug im Ringversuch (4)

Zweiter Ringversuch (22K2), Tag 2

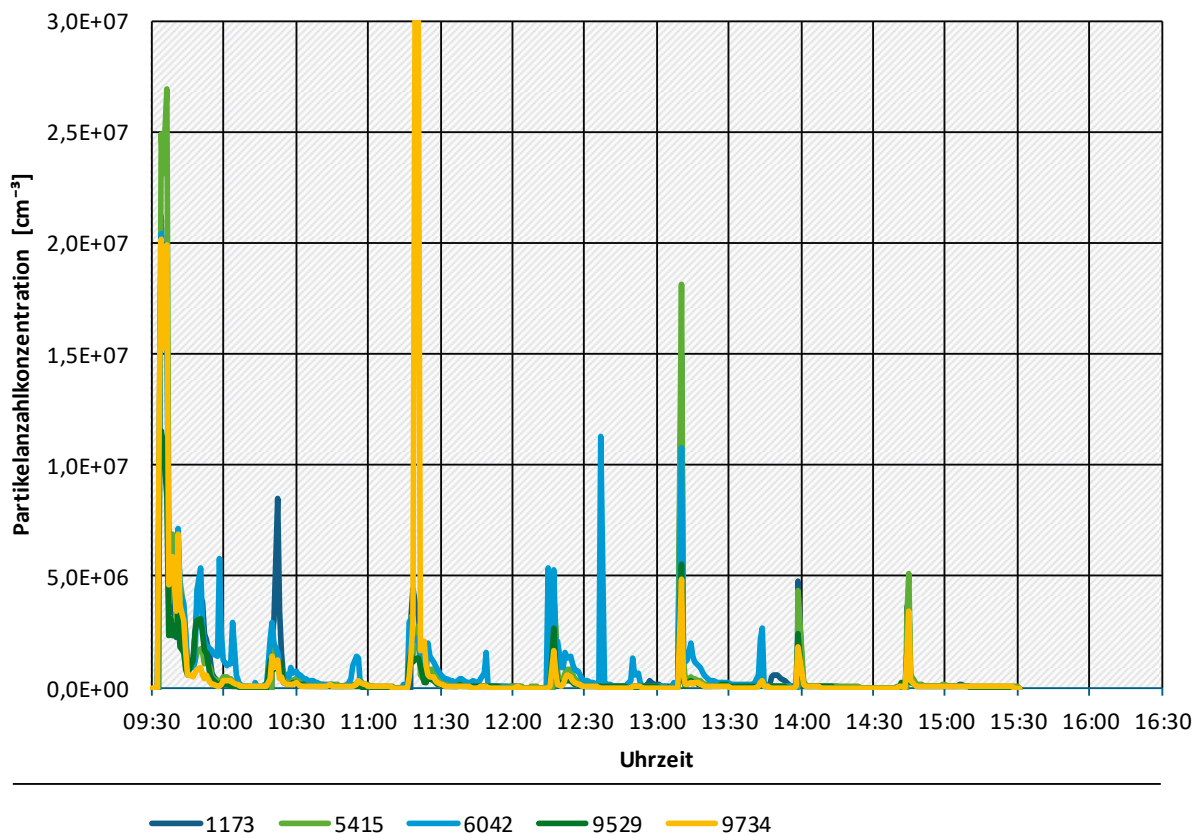


Quelle: HLNUG

Über alle sieben Abbrandphasen lag die mittlere Ofentemperatur an diesem Messtag bei 373 °C, der Maximalwert von 471 °C wurde während des fünften Abbrands erreicht. Die Temperatur im Messquerschnitt, an dem die Partikelanzahlmessungen stattfanden, lag die Temperatur im Mittel bei 157 °C. Hier wurde der Maximalwert von 182 °C beim Auflegen von Brennholz für den sechsten Abbrand erreicht. Der Zug am Messquerschnitt lag im Mittel bei 14,6 Pa.

Abbildung 29: Messwerte der Teilnehmenden im Ringversuch (4)

Zweiter Ringversuch (22K2), Tag 2



Quelle: HLNUG, erstellt aus Rohdaten der Ringversuchsteilnehmenden

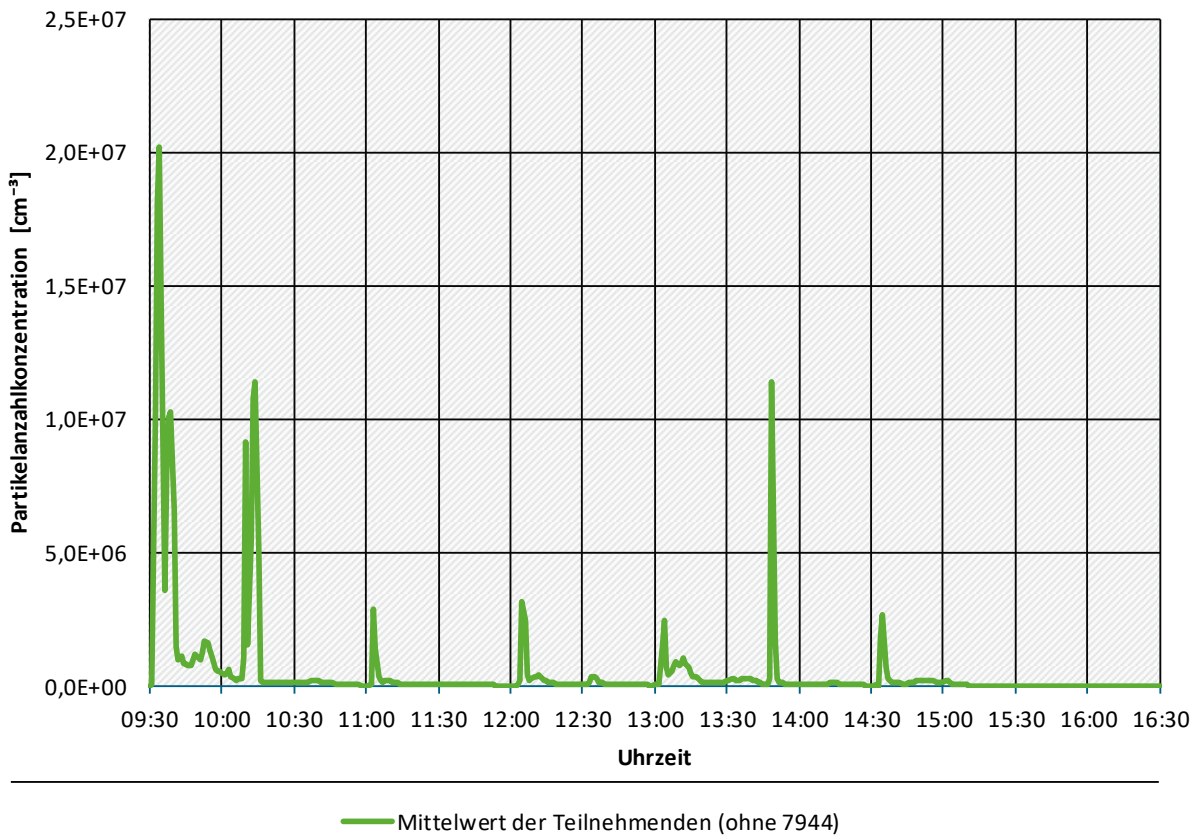
Am zweiten Messtag im Ringversuch 22K2 zeigte die Mehrheit der Messgeräte wieder insgesamt sehr ähnliche Konzentrationsverläufe. Eine Ausnahme war hier erneut das Gerät 9734, das für den dritten Abbrand ab 11:16 Uhr eine um den Faktor 4 höhere Partikelanzahlkonzentration aufzeichnete. Die gemessene Konzentration stieg hier auf einen Maximalwert von $5,2 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-3}$ um 11:20 Uhr (im Diagramm außerhalb des Darstellungsbereichs), während die übrigen Messgeräte einen Wert von im Mittel $2,3 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$ verzeichneten. Eine weitere Ausnahme war das Gerät 6042, das diverse Peaks zu Zeitpunkten detektierte, zu denen die übrigen Messgeräte keine nennenswerten Konzentrationsanstiege verzeichneten. Die Geräte 6042 und 9734 wurden bei der Ermittlung des zugewiesenen Wertes für den Ringversuch nicht berücksichtigt.

Nicht aufgeführt sind hier die Messwerte für die Geräte 3926, 5534, 6638 und 9707. Aufgrund von technischen Schwierigkeiten hat keines dieser Messgeräte über die gesamte Abbrandreihe Messwerte aufzeichnen können, insbesondere fehlen hier die Messwerte für den besonders wichtigen Zeitraum nach dem Anzünden des Ofens. Für diese Messgeräte hat das HLNUG außerdem keine Rohdaten seitens der Teilnehmenden erhalten. Diese Messgeräte konnten bei der Ermittlung des zugewiesenen Wertes für den Ringversuch ebenfalls nicht berücksichtigt werden.

Die folgenden Diagramme zeigen den Verlauf der Partikelanzahlkonzentration, jeweils berechnet als Konsenswert der Messwerte aller Teilnehmenden, die keine auffälligen Abweichungen zeigten.

Abbildung 30: Konsenswerte für die Partikelanzahlkonzentration (1)

Erster Ringversuch (22K1), Tag 1

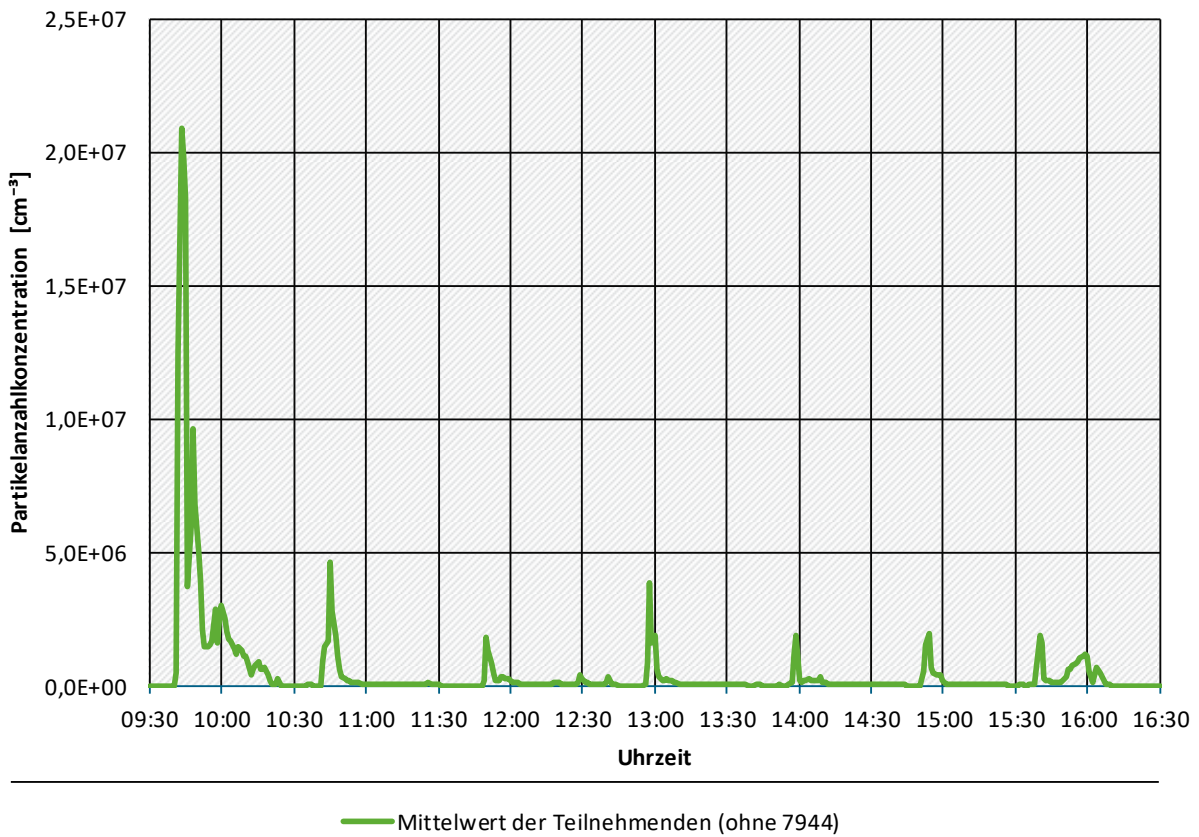


Quelle: HLNUG, erstellt aus Rohdaten der Ringversuchsteilnehmenden

Die mittlere Partikelanzahlkonzentration lag hier bei $6,68 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$ (ohne Umrechnung auf die Bezugssauerstoffkonzentration). Der gemäß Algorithmus A (DIN ISO 13528:2020, Anhang C) berechnete robuste Mittelwert der von den Teilnehmenden angegebenen Mittelwerte über alle 7 Abbrände betrug (ohne 7944) $7,03 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$.

Abbildung 31: Konsenswerte für die Partikelanzahlkonzentration (2)

Erster Ringversuch (22K1), Tag 2

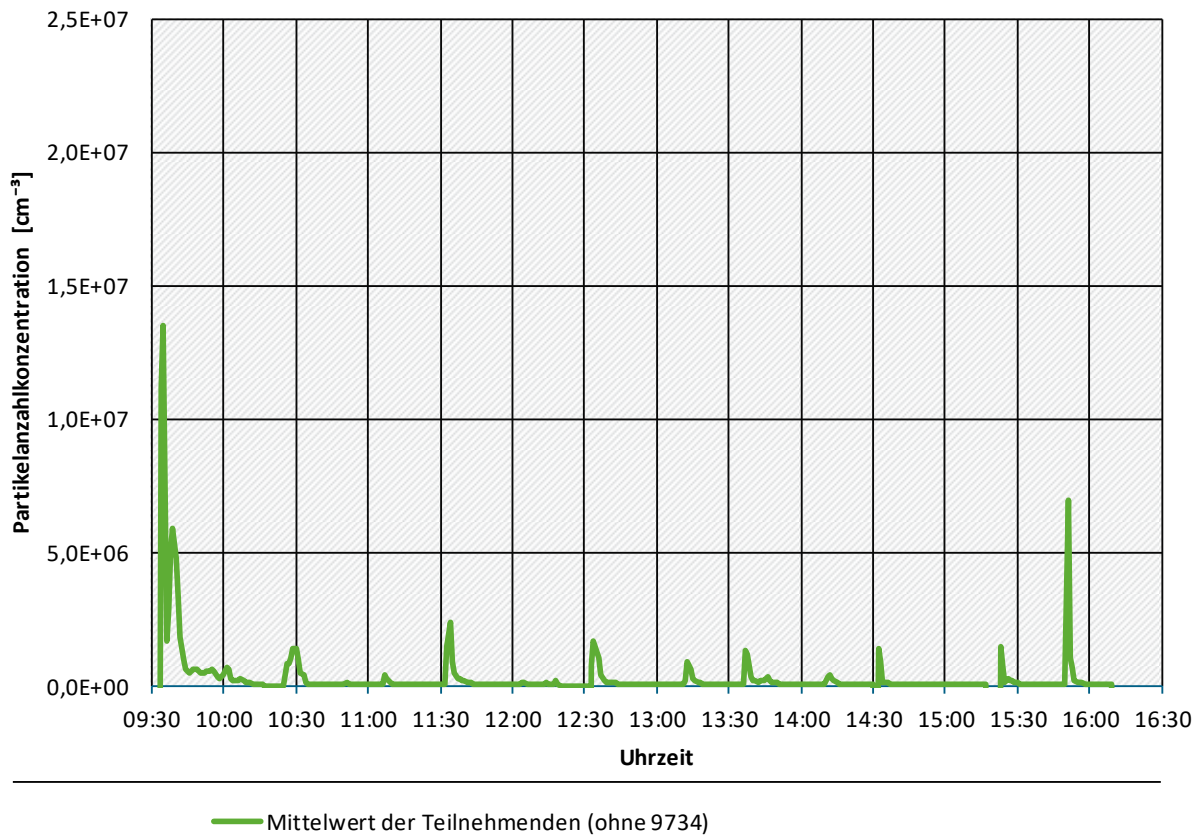


Quelle: HLNUG, erstellt aus Rohdaten der Ringversuchsteilnehmenden

Die mittlere Partikelanzahlkonzentration lag an diesem Messtag bei $5,32 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$ (ohne Umrechnung auf die Bezugssauerstoffkonzentration). Der gemäß Algorithmus A (DIN ISO 13528:2020, Anhang C) berechnete robuste Mittelwert der von den Teilnehmenden angegebenen Mittelwerte über alle 7 Abbrände betrug (ohne 7944) $5,38 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$.

Abbildung 32: Konsenswerte für die Partikelanzahlkonzentration (3)

Zweiter Ringversuch (22K2), Tag 1

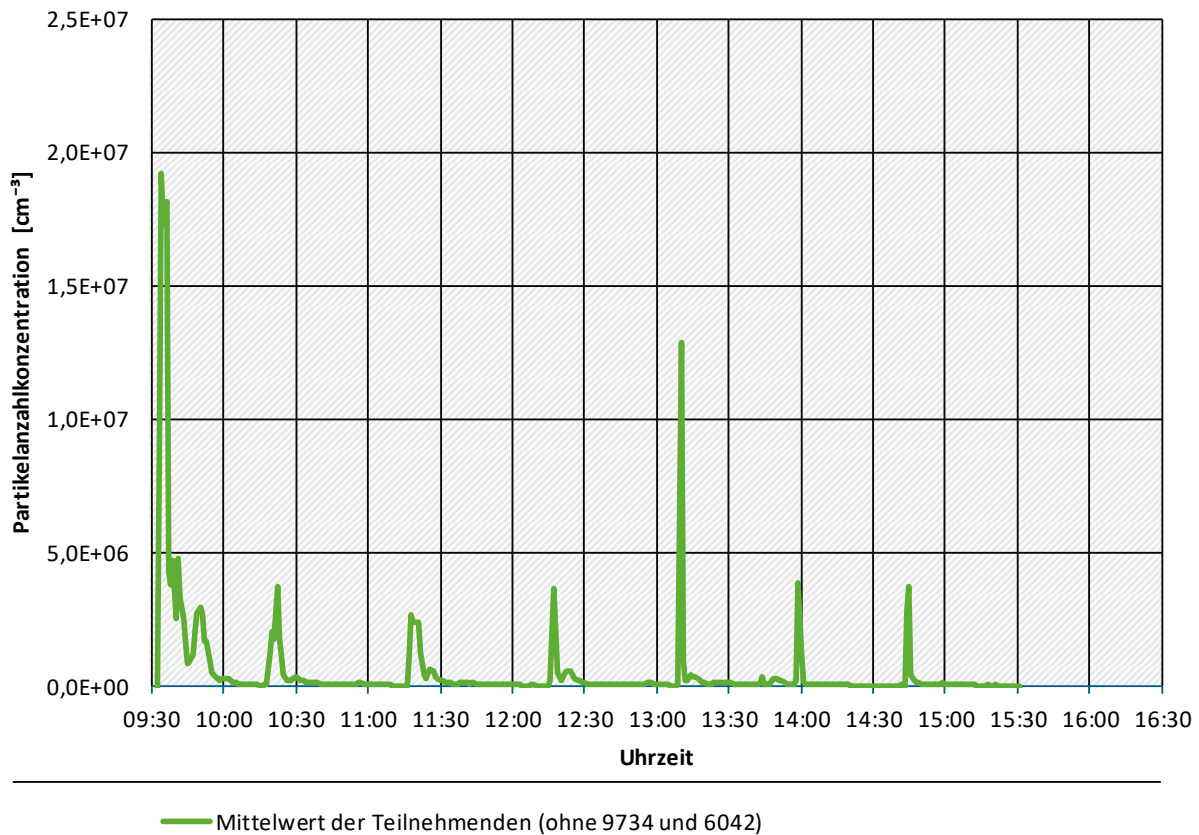


Quelle: HLNUG, erstellt aus Rohdaten der Ringversuchsteilnehmenden

Die mittlere Partikelanzahlkonzentration lag hier bei $4,20 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$ (ohne Umrechnung auf die Bezugssauerstoffkonzentration). Der gemäß Algorithmus A (DIN ISO 13528:2020, Anhang C) berechnete robuste Mittelwert der von den Teilnehmenden angegebenen Mittelwerte über alle 7 Abbrände betrug (ohne die Teilnehmenden 3926, 5534, 6638, 9707 und 9734) $4,56 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$.

Abbildung 33: Konsenswerte für die Partikelanzahlkonzentration (4)

Zweiter Ringversuch (22K2), Tag 2



Quelle: HLNUG, erstellt aus Rohdaten der Ringversuchsteilnehmenden

Die mittlere Partikelanzahlkonzentration betrug an diesem Messtag $5,29 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$ (ohne Umrechnung auf die Bezugssauerstoffkonzentration). Der gemäß Algorithmus A (DIN ISO 13528:2020, Anhang C) berechnete robuste Mittelwert der von den Teilnehmenden angegebenen Mittelwerte über alle 7 Abbrände betrug (ohne die Teilnehmenden 3926, 5534, 6042, 6638, 9707 und 9734) $4,98 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$.

Insgesamt haben die Teilnehmenden im Ringversuch die in der folgenden Tabelle gezeigten Mittelwerte für die Partikelanzahlkonzentration (bezogen auf eine Bezugssauerstoffkonzentration von 13 Vol.-%) ermittelt.

Tabelle 9: Messwerte der Teilnehmenden für die Partikelanzahlkonzentration

Mittelwerte der Teilnehmenden über die gesamte Abbrandreihe eines Messtags von 7 Abbränden, jeweils berechnet aus den übermittelten Rohdaten der Teilnehmenden und umgerechnet auf eine Bezugssauerstoffkonzentration von 13 Vol.-%.

Ringversuch	Messtag	ID-Code	Messwert [cm ⁻³]
22K1	1	3562	675.211
		3991	1.106.824
		6150	1.045.500
		7882	806.615
		7944	1.604.304 *
		8545	742.649
		9067	788.541
	2	3562	556.761
		3991	920.680
		6150	789.244
		7882	826.111
		7944	1.071.972 *
		8545	727.708
		9067	614.990
22K2	1	1173	774.210
		5415	429.778
		6042	409.400
		9529	646.488
		9734	1.459.204 *
	2	1173	756.028
		5415	797.942
		6042	1.284.229 *
		9529	428.626
		9734	808.791 *

* Werte wurden nicht für die Berechnung von Konsenswerten verwendet.

Nicht aufgeführt sind hier die Messwerte für die Geräte 3926, 5534, 6638 und 9707. Aufgrund von technischen Schwierigkeiten hat keines dieser Messgeräte über die gesamte Abbrandreihe Messwerte aufzeichnen können, insbesondere fehlen hier die Messwerte für den besonders wichtigen Zeitraum nach dem Anzünden des Ofens.

Aus den verwendbaren Daten (ohne die Messgeräte 7944 und 9734; sowie ohne das Messgerät 6042 für 22K2, Messtag 2) ergeben sich die in der folgenden Tabelle aufgeführten Konsenswerte für die Partikelanzahlkonzentration im Abgas des untersuchten Kaminofens (umgerechnet auf die Bezugssauerstoffkonzentration von 13 Vol.-%).

Tabelle 10: Konsenswerte für die Partikelanzahlkonzentration

Auswertung der Daten in Tabelle 9. Die dort mit * markierten Werte wurden hier nicht berücksichtigt.

	22K1, Tag 1	22K1, Tag 2	22K2, Tag 1	22K2, Tag2
Verwendbare Werte	6	6	4	3
Mittlere Partikelanzahlkonzentration [cm^{-3}]	860.890	739.249	564.969	660.865
Standardabweichung absolut [cm^{-3}]	173.898	135.526	175.979	202.214
Standardabweichung relativ	20,2%	18,3%	31,1%	30,6%

Diese Werte erfüllen für jeden Messtag jeweils die Anforderungen an Vergleichbedingungen gemäß DIN ISO 5725-1. Die mittlere beobachtete Vergleichstandardabweichung lag demnach bei $1,72 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$, die relative Vergleichstandardabweichung hatte einen Wert von im Mittel 25,1%. Daraus kann abgeleitet werden, dass bei fehlerfrei durchgeführten Messungen an ähnlichen Kaminöfen ca. 95% aller Messergebnisse innerhalb eines Bereichs von ca. 50% bis 150% des tatsächlichen Ergebnisses liegen sollten.

Für 7 verschiedene Teilnehmende bzw. Messgeräte im Ringversuch wurden Wiederholstandardabweichungen von $0,14 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$ (1,7% relativ) bis $2,53 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$ (33% relativ) ermittelt. Die mittlere Wiederholstandardabweichung lag bei $1,11 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$ bzw. einer relativen Wiederholstandardabweichung von 15,7 %. Daraus kann abgeleitet werden, dass für ähnliche Kaminöfen bei wiederholten Messungen durch das gleiche Prüfinstitut im Mittel ca. 95% aller Messergebnisse innerhalb eines Bereichs von ca. 69% bis 131% des von diesem Prüfinstitut gemessenen Ergebnisses liegen sollten.

Aus der ermittelten Vergleichstandardabweichung und der Wiederholstandardabweichung kann abgeschätzt werden, dass die mittlere Standardabweichung zwischen den Labors bei $1,31 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$ liegt, bzw. bei 19,5% relativ. Daraus kann abgeleitet werden, dass für ähnliche Kaminöfen die von zwei verschiedenen Prüfinstituten am gleichen Kaminofen ermittelten Messwerte in ca. 95% aller Fälle innerhalb eines Bereichs von ca. 61% bis 139% des von diesen Prüfinstituten im Mittel gemessenen Ergebnisses liegen sollten.

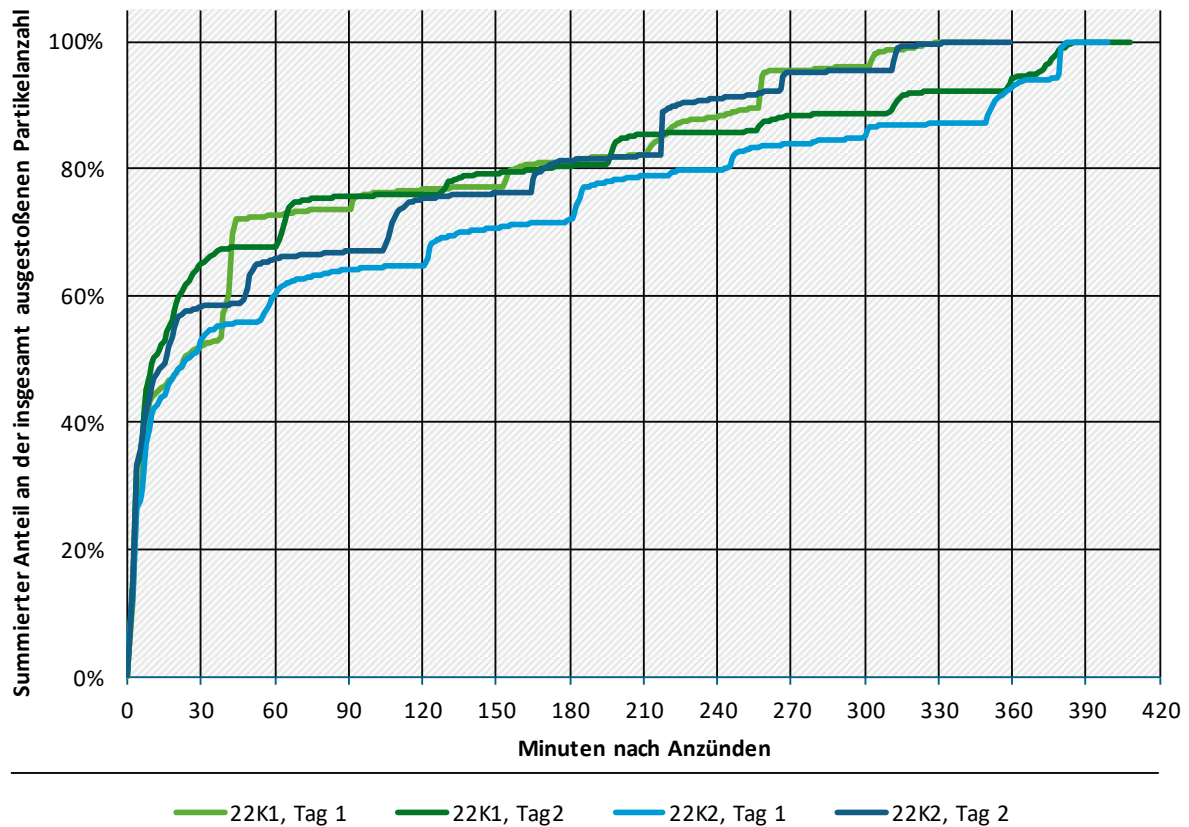
Für alle 19 verwendbaren Messwerte liegt der gemäß Algorithmus A (DIN ISO 13528:2020, Anhang C) berechnete robuste Mittelwert für die nach DE-UZ 212 gemessene Partikelanzahlkonzentration für den untersuchten Kaminofen bei $7,24 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$, was den besten verfügbaren Schätzwert für die tatsächlich durchschnittlich emittierte Partikelanzahlkonzentration darstellt. Die Unsicherheit dieses Wertes beträgt $0,58 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$ (bzw. 8,0 % relativ).

Der mit Abstand größte Anteil der emittierten Partikelanzahl wird in den ersten Minuten nach dem Anzünden des Ofens ausgestoßen. Dies wird in der folgenden Abbildung besonders deutlich, in der für die vier Ringversuchsmesstage die kumulierte Anzahl an emittierten Partikeln, angegeben als Anteil an der über die gesamte Abbrandserie insgesamt ausgestoßenen Menge, dargestellt ist. Dafür wurde vereinfachend ein über den gesamten Messtag konstanter Volumenstrom angenommen. Diese Betrachtung ist zwar nicht ganz korrekt, das Ergebnis dürfte allerdings auch bei korrekter Berücksichtigung des Volumenstroms ähnlich ausfallen. Da sich der Grenzwert auf die Partikelanzahlkonzentration (und nicht auf die Partikelanzahl selbst) bezieht, ist die hier gewählte Darstellung von aufsummierten Partikelanzahlkonzentrationen

(Konzentration mal Zeit) in Bezug auf den Grenzwert letztlich aussagekräftiger als eine Berechnung der exakten Partikelanzahlsumme (Konzentration mal Volumenstrom).

Abbildung 34: Verlauf der Partikelemissionen über verschiedene Messtage

Summierter Anteil der ausgestoßenen Partikelanzahl an der insgesamt ausgestoßenen Menge

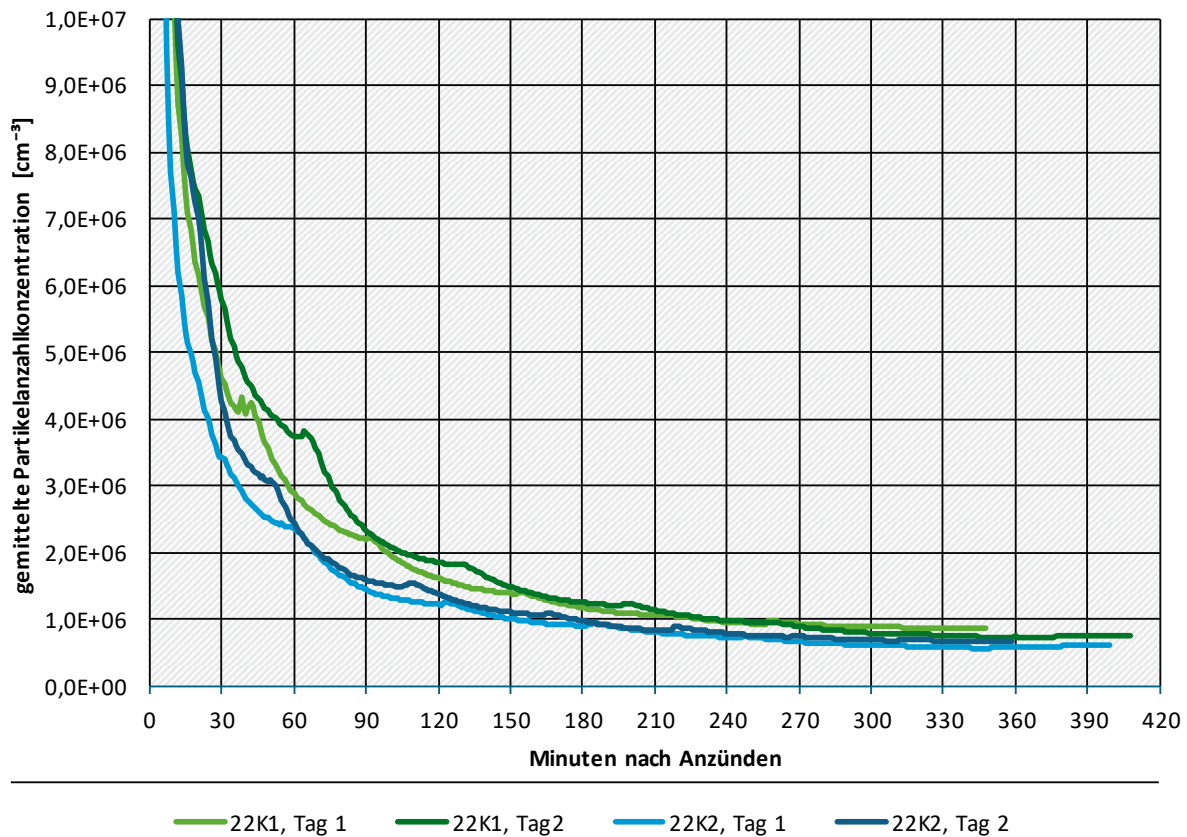


Quelle: HLNUG, erstellt aus Rohdaten der Ringversuchsteilnehmenden

Bereits zum Ende des zweiten Abbrands, und somit beim Abschluss der gemäß DE-UZ 212 definierten Anbrandphase (ca. 90-120 Minuten nach dem Anzünden), wurde ein großer Teil der insgesamt ausgestoßenen Partikel emittiert. Die übrigen emittierten Partikel verteilen sich auf die folgenden 5 Abbrände, die alle verglichen mit der Anzündphase wenig zu den Gesamtemissionen beitragen. Noch deutlicher wird diese Beobachtung in der folgenden Darstellung, die den Verlauf des Mittelwerts über die gesamte Abbrandreihe für die verschiedenen Ringversuchsmesstage darstellt.

Abbildung 35: Verlauf der über den Messtag gemittelten Partikelanzahlkonzentration

Mittelwert (bezogen auf 13 Vol.-% O₂) unter der Annahme, dass die Messung in diesem Moment gestoppt würde



Quelle: HLNUG, erstellt aus Rohdaten der Ringversuchsteilnehmenden (Partikelanzahlkonzentration) und eigenen Messwerten (O₂-Konzentration)

Da die gemessenen Partikelanzahlkonzentrationen kurz nach dem Anzünden des Kamins sehr hoch sind, liegt der Mittelwert für die ersten Minuten bei extrem hohen Werten. Da die Konzentration allerdings rasch wieder sinkt, fließen für den Rest des Abbrands vergleichsweise kleine Konzentrationen in die Mittelwertbildung ein. Die hohen Partikelanzahlkonzentrationen zu Beginn einer neuen Abbrandphase führen jeweils zu einer vorübergehenden Erhöhung des Mittelwerts, allerdings ist dieser Effekt nicht sehr stark ausgeprägt. Insgesamt wird der Mittelwert im Laufe des Abbrandprogramms gemäß DE-UZ 212 zunehmend von den emissionsarmen Zeiträumen der späteren Abbrände dominiert, die den berechneten Mittelwert immer weiter absenken. Für den untersuchten Kaminofen würde bereits der Mittelwert des ersten Abbrands den Grenzwert von $5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$ einhalten, nach Abschluss der übrigen 6 Abbrände liegt der Mittelwert deutlich unter $1 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$.

4.10 Messfehler durch Bewegung der Probenahmeleitungen

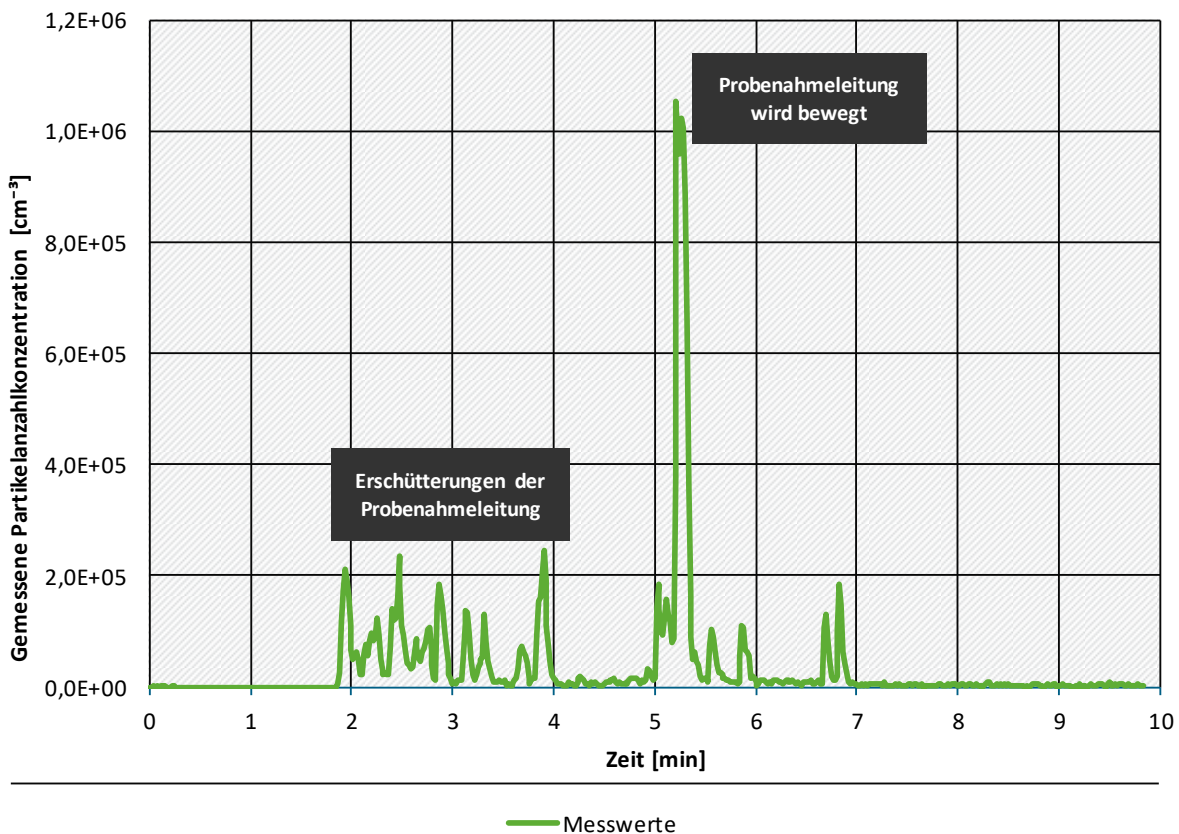
Einzelne Teilnehmende hatten im Ringversuch mit dem Problem zu kämpfen, dass ihre Messgeräte sehr hohe Partikelanzahlkonzentrationen in Zeiträumen registrierten, in denen die übrigen Teilnehmenden deutlich geringere Konzentrationen gemessen hatten. Dies betraf z.B. die Teilnehmenden mit den ID-Codes 6042, 7944 und 9734. Möglicherweise besteht hier ein Zusammenhang mit Bewegungen der Probenahmeleitungen. Durch Erschütterungen und andere

Bewegungen der Leitungen zwischen Entnahmesonde und Probegasverdünnung hatten sich hier möglicherweise Partikel gelöst, die zuvor an der Wand der Probegasleitung abgeschieden wurden. Nach der Lösung solcher Ablagerungen wurden diese Partikel dann mit dem Probegasstrom in das Partikelmessgerät transportiert und somit eine hohe Partikelanzahlkonzentration zu einem Zeitpunkt gemessen, zu dem im Abgas des Kamins keine vergleichbar hohe Konzentration zu finden war.

Um diese Theorie zu prüfen, wurde im Anschluss an einen Prüfzyklus die Sonde aus dem Kanal entnommen und Umgebungsluft beprobt. Dann wurden zunächst durch Schläge mit einem Schraubenschlüssel Erschütterungen der Probegasleitung simuliert und nach einer Pause dann die Leitung insgesamt bewegt durch Anheben und Biegen des beheizten Schlauchs. Dadurch sollten andere Bewegungen der Probegasleitung simuliert werden. Die dabei aufgezeichneten Messwerte sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 36: Messfehler durch Erschütterung und Bewegung der Probenahmeleitung

Messwerte hervorgerufen durch Erschütterungen und Bewegung der Probenahmeleitung



Quelle: HLNUG

Die Erschütterungen begannen bei Minute 2 und wurden bis Minute 4 durchgeführt, die Bewegung der Probegasleitung begann bei Minute 5. Wie klar zu erkennen ist, wurden durch diese Bewegungen teilweise sehr hohe Partikelanzahlkonzentrationen hervorgerufen. Damit ist nicht zweifelsfrei nachgewiesen, dass die im Ringversuch beobachteten Messfehler ausschließlich auf diesen Effekt zurückzuführen sind, die Theorie konnte damit aber zumindest

plausibilisiert werden. Für zukünftige Messungen sollte diese Problematik deshalb genau beobachtet werden.

4.11 Bewertung der Teilnehmenden im Ringversuch

Alle Teilnehmenden im Ringversuch erhielten am 22.02.2023 eine Auswertung der von ihnen übermittelten Messergebnisse. Bewertet wurden dabei neben dem Mittelwert über die gesamte Reihe aus 7 Abbränden auch das Ergebnis für jeden einzelnen Abbrand. Die Bewertung erfolgte anhand des oben beschriebenen Schemas, wobei die Messergebnisse einzelner Teilnehmender bei der Berechnung der zugewiesenen Werte ausgeschlossen wurden (siehe oben).

Anders als im Ringversuch wurden für die Auswertungen in diesem Bericht nicht die offiziell als Messergebnis im Rahmen der Ringversuchsteilnahme eingereichten Mittelwerte verwendet, sondern eigene Auswertungen der zusammen mit diesen Werten übermittelten Rohdaten. Grund dafür ist, dass sich für einige Teilnehmende aus den Rohdaten andere Werte ergaben, vor allem durch abweichende Mittelwertbildungen und unterschiedlichen Umgang mit fehlenden Werten.

Auffällig war, dass einige Teilnehmende bei der Berechnung ihrer Ergebnisse im Ringversuch anstelle eines Mittelwerts über die gesamte Abbrandreihe einen Mittelwert aus den Ergebnissen der 7 einzeln ausgewerteten Abbränden gebildet hatten. Durch die unterschiedliche Länge der verschiedenen Abbrände lieferte diese Vorgehensweise Mittelwerte, die nicht dem von DE-UZ 212 geforderten Wert entsprachen. Die Gewichtung der einzelnen Abbrände hätte zeitproportional sein sollen, nicht gleichverteilt. Weiterhin wurden für 4 Messgeräte (3926, 5534, 6638 und 9707) Mittelwerte für die gesamte Abbrandserie eingereicht, obwohl die betreffenden Teilnehmenden für keinen der betreffenden Messtage in der Lage waren, Messwerte für den entscheidenden ersten Abbrand anzugeben.

Entscheidend für die Bewertung der Messergebnisse im Rahmen des Ringversuchs waren die Angaben der Teilnehmenden. Für diesen Bericht wurden hingegen vor allem die Rohdaten der Teilnehmenden verwendet. Daraus ergeben sich geringfügige Unterschiede zwischen den Konsenswerten, die an die Ringversuchsteilnehmenden im Rahmen ihrer Ergebnisbewertung kommuniziert wurden, und den in diesem Bericht angegebenen Werten.

Zusätzlich zur Ergebnismitteilung erhielten die Teilnehmenden Urkunden, auf denen das Personal namentlich erwähnt wird, das am Ringversuch in Kassel teilnahm.

5 Schlussfolgerungen

5.1 Verfahrenskenngrößen

Im Rahmen des Ringversuchs konnten für das in der Vergaberichtlinie für das Umweltzeichen Blauer Engel für Kaminöfen beschriebene Verfahren zur Ermittlung der Partikelanzahlkonzentration (DE-UZ 212, Anhang C) die folgenden Verfahrenskenngrößen ermittelt werden:

- ▶ relative Vergleichstandardabweichung: 25%
- ▶ relative Wiederholstandardabweichung: 16%
- ▶ relative Standardabweichung zwischen verschiedenen Labors: 20%

Diese Werte beziehen sich auf das Gesamtverfahren zur Ermittlung der mittleren Partikelanzahlkonzentration an einem Kaminofen mit einem elektrostatischen Staubabscheider, dessen Abgas über einen Prüfzyklus aus sieben Abbränden eine mittlere Partikelanzahlkonzentration von 724.000 cm^{-3} enthält. Die Prüfvorschrift schließt dabei Anforderungen an die Bedienung des Ofens und an die Benutzung der Messgeräte ein.

Unter der Annahme, dass der Konsenswert der Teilnehmenden im Ringversuch keinen signifikanten Bias hat kann angenommen werden, dass die zu erwartende relative Standardmessunsicherheit für das Verfahren in diesem Konzentrationsbereich bei ungefähr 25% liegt.

Basierend auf den Auswertungen zu den Messergebnissen für einzelne Abbrände kann angenommen werden, dass die relative Standardabweichung von 25% mindestens im Bereich von 50.000 cm^{-3} bis $3.000.000 \text{ cm}^{-3}$ gültig ist. Es ist zu vermuten, dass die relative Messunsicherheit bei höheren Konzentrationen ebenfalls bei 25% liegt. Für Konzentrationen unterhalb von 50.000 cm^{-3} kann für das Verfahren als konservative Schätzung eine konstante absolute Standardmessunsicherheit von 12.500 cm^{-3} angenommen werden.

5.2 Beobachtete Fehlerquellen

Bei der Durchführung und Auswertung des Ringversuchs fielen folgende Fehlerquellen auf:

- ▶ Verwendung von ungereinigter Umgebungsluft zur Verdünnung des Abgases.
 - Ein Teilnehmer verwendete für die Verdünnung des Probengases Umgebungsluft anstelle der durch das HLNUG bereitgestellten getrockneten und gereinigten Druckluft. Da die Partikelanzahlkonzentration von Luft in Innenräumen typischerweise bei ca. 2.000 bis 5.000 cm^{-3} liegt, führte dies zu sehr hohen Messwerten, die nicht verwendbar waren. Die betreffenden Werte wurden weder im Ringversuch noch in diesem Bericht verwendet.
- ▶ Falsche Berechnung von Mittelwerten für den gesamten Prüfzyklus aus sieben Abbränden.
 - Einzelne Teilnehmende hatten für die Angabe der mittleren Konzentration über den gesamten Prüfzyklus einfach den arithmetischen Mittelwert aus den sieben Mittelwerten für die verschiedenen Abbrände berechnet. Da die Abbrände teilweise sehr unterschiedlich lang waren, führte dieser Rechenweg zu Werten, die nicht der geforderten Messgröße entsprachen.

- ▶ Starker Anstieg der gemessenen Partikelanzahlkonzentration in einzelnen Messgeräten ohne tatsächlichen Anstieg der Partikelanzahlkonzentration im Abgas.
 - Vermutlich wurde dieser Effekt durch Erschütterungen oder Bewegungen der Probengasleitung hervorgerufen.

5.3 Änderungsvorschläge für die Vergaberichtlinie

Aufgrund der Erfahrungen im Ringversuch und den vorangegangenen Validierungsmessungen können einige Änderungen der Vergaberichtlinie für den Blauen Engel für Kaminöfen vorgeschlagen werden:

- ▶ Die geforderte relative Standardmessunsicherheit sollte auf 25% für Messwerte $\geq 50.000 \text{ cm}^{-3}$ geändert werden. Für Messwerte $< 50.000 \text{ cm}^{-3}$ sollte eine absolute Standardmessunsicherheit von maximal 12.500 cm^{-3} gefordert werden.
- ▶ Da die Kaminöfen im täglichen Gebrauch nicht über die CO_2 -Konzentration oder die verbleibende Brennholzmasse gesteuert werden können, sollte das Nachlegekriterium über die Bedienungssoftware geregelt werden (sofern der untersuchte Ofen über so eine Software verfügt), um dem späteren Gebrauch möglichst nahe zu kommen.

Außerdem könnten einige Hinweise zur praktischen Durchführung der Messung ergänzt werden:

- ▶ Erschütterungen und Bewegungen der Probengasleitung zwischen Sonde und Verdünnungseinheit können zur Lösung von zuvor abgelagerten Staubpartikeln führen und dadurch die Messergebnisse verfälschen. Die Probengasleitung sollte deshalb während der Messung möglichst wenig bewegt werden.
- ▶ Je nach Versuchsaufbau und gewähltem Probengasvolumenstrom kann es zur Bildung von relativ großen Mengen an Kondensat kommen. Das verwendete System zur Kondensatabscheidung sollte der zu erwartenden Menge angepasst sein. Ggf. empfiehlt sich die Verwendung von Waschflaschen etc. zur Sammlung von Kondenswasser.
- ▶ Vor Beginn der Messungen sollten alle verwendeten Geräte und Leitungen sorgfältig gereinigt werden.
- ▶ Bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Messungen sollten die Anforderungen der DIN EN ISO/IEC 17025 beachtet werden.
- ▶ Die Verwendung eines Vorabscheiders (z.B. Zyklon) ist für die Durchführung der Messung offenbar nicht zwingend erforderlich, allerdings verringert die Verwendung einer solchen Vorrichtung die Verschmutzung der nachfolgenden Probengas-führenden Leitungen. Der genaue Cut-off des Vorabscheiders scheint zumindest in einem Bereich von ca. $1\text{-}3 \mu\text{m}$ aerodynamischen Durchmessers keinen signifikanten Effekt auf das Messergebnis zu haben. Die konkreten Anforderungen für den Vorabscheider könnten in eine Empfehlung geändert werden.

Weitere Erkenntnisse aus diesem Projekt sind die folgenden Punkte:

- ▶ Zuverlässigkeit der Messergebnisse und Einhaltung der zulässigen Messunsicherheit sollten durch die regelmäßige Teilnahme an Messungen an realen Prüfobjekten unter Vergleichsbedingungen (Ringversuch) nachgewiesen werden.

- Die letzten zwei Abbrände im Teillastbetrieb wirkten sich kaum auf das Gesamtergebnis der Partikelanzahlkonzentration für den Prüfzyklus aus. Für zukünftige Ringversuche könnte der Prüfzyklus möglicherweise auf die ersten 5 Abbrände gekürzt werden.

6 Quellenverzeichnis

Bekanntgabeverordnung (41. BImSchV) vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 973, 1001, 3756), die zuletzt durch Artikel 113 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist. https://www.gesetze-im-internet.de/bimsv_41/

Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274; 2021 I S. 123), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 1 des Gesetzes vom 9. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2873) geändert worden ist. <http://www.gesetze-im-internet.de/bimsg/>

Cordes, J., Stoffels, B., Wildanger, D. (2015): The question of homogeneity inside a chimney: application of ISO 13528 to stack emission proficiency tests. *Accred Qual Assur* 2015, Vol. 20(4), S. 287-295, <https://doi.org/10.1007/s00769-015-1139-y>

DE-UZ 212 – Siehe: RAL gGmbH (2020)

DBI – Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg (2020): Prüfbericht DBI F 20/05/0764 vom 15.05.2020 - Ergänzungsprüfung an einer Raumheizerreihe für feste Brennstoffe mit nachgeschaltetem Staubabscheider nach den Vergabekriterien Blauer Engel – Kaminöfen für Holz – DE-UZ 212:01.2020 unter Berücksichtigung des Prüfberichtes DBI F 20/04/0746 vom 30.04.2020. <https://www.drooff-kaminofen.de/drooff/de/downloads/file/download/id/69/> (28.03.2023)

DIN CEN/TS 16976:2016-11; DIN SPEC 33974:2016-11 - Außenluft - Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration des atmosphärischen Aerosols; Deutsche Fassung CEN/TS 16976:2016. <https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-cen-ts-16976/247880828> (28.03.2023)

DIN EN 13240:2005-10 - Raumheizer für feste Brennstoffe - Anforderungen und Prüfungen; Deutsche Fassung EN 13240:2001 + A2:2004. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-13240/75176355> (28.03.2023)

DIN EN 16510-1:2018-11 - Häusliche Feuerstätten für feste Brennstoffe - Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 16510-1:2018. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-16510-1/242797573> (28.03.2023)

DIN EN ISO 228-1:2003-05 - Rohrgewinde für nicht im Gewinde dichtende Verbindungen - Teil 1: Maße, Toleranzen und Bezeichnung (ISO 228-1:2000); Deutsche Fassung EN ISO 228-1:2003 <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-228-1/62420770> (28.03.2023)

DIN EN ISO/IEC 17025:2018-03 - Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2017); Deutsche und Englische Fassung EN ISO/IEC 17025:2017. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-iec-17025/278030106> (28.03.2023)

DIN EN ISO/IEC 17043:2010-05 - Konformitätsbewertung - Allgemeine Anforderungen an Eignungsprüfungen (ISO/IEC 17043:2010); Deutsche und Englische Fassung EN ISO/IEC 17043:2010. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-iec-17043/122962827> (28.03.2023)

DIN ISO 13528:2020-09 - Statistische Verfahren für Eignungsprüfungen durch Ringversuche (ISO 13528:2015, korrigierte Fassung 2016-10-15); Text Deutsch und Englisch. <https://www.beuth.de/de/norm/din-iso-13528/314850318> (28.03.2023)

DIN ISO 5725-1:1997-11 - Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Meßverfahren und Meßergebnissen - Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe (ISO 5725-1:1994) <https://www.beuth.de/de/norm/din-iso-5725-1/3050093> (28.03.2023)

Drooff Kaminöfen GmbH und Co KG (2020): fire+ Bedienungsanleitung (No. 02); <https://www.drooff-kaminofen.de/drooff/de/downloads/file/download/id/10/> (28.03.2023)

Drooff Kaminöfen GmbH und Co KG (2022): APRICA 2 | TREND - APRICA 2 PLUS TREND - APRICA 2 EDITION TREND – Technische Informationen (Stand 01/2022). <https://www.drooff-kaminofen.de/drooff/de/downloads/file/download/id/81/> (28.03.2023)

EJPD (2006): SR 941.242: Verordnung des EJPD über Abgasmessmittel für Verbrennungsmotoren (VAMV) vom 19. März 2006 (Stand am 1. Dezember 2018), Fassung gemäß Ziffer I der Verordnung des EJPD vom 22. August 2012, in Kraft seit 1. Januar 2013 (AS 2012 5371). <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2006/251/de> (28.03.2023)

Morin, B.; Ahmadi, M.; Rector, L.; Allen, G. (2022): Development of an integrated duty cycle test method to assess cordwood stove performance. In: Journal of the Air and Waste Management Association, 2022, Vol. 72, No. 7, S. 629-646, <https://doi.org/10.1080/10962247.2022.2057615>

OekoSolve AG (2021): Installationsanleitung OekoTube (V 4.1, 29. Oktober 2021) <https://oekosolve.com/downloads-2/> (28.03.2023)

RAL gGmbH (2020): Blauer Engel - Das Umweltzeichen – Kaminöfen für Holz - DE-UZ 212- Vergabekriterien Ausgabe Januar 2020 – Version 4. <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20212-202001-de%20Kriterien-V7.pdf> (28.03.2023)

TFZ – Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (2019): Berichte aus dem TFZ 61 – Nutzereinflüsse auf das Emissionsverhalten von Kaminöfen – Anzünden, Lufteinstellungen, Brennstoff; https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/festbrennstoffe/dateien/tfz_bericht_61_nutzereinfluesse.pdf (28.03.2023)

UBA (2020): UBA-Texte 152/2020 - Umweltzeichen Blauer Engel: Entwicklung von Vergabekriterien für Kaminöfen für Holz – Hintergrundbericht zur Erarbeitung der Vergabekriterien DE-UZ 212, Ausgabe Januar 2020 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_152-2020_umweltzeichen_blauer_engel_entwicklung_von_vergabekriterien_fuer_kaminoefen_fuer_holz.pdf (20.02.2023)

Umweltbundesamt GmbH [Österreich] (2013): Luftschadstoffausstoß von Festbrennstoff-Einzelöfen – Untersuchung des Einflusses von Festbrennstoff-Einzelöfen auf den Ausstoß von Luftschadstoffen (Report 0448); Wien; ISBN 978-3-99004-253-3; <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0448.pdf> (28.03.2023)