

TEXTE

57/2021

Abschlussbericht

PAK-Messungen an Kaminöfen

von:

Dipl. Ing. Andreas Kahle

ANECO Institut für Umweltschutz GmbH & Co., Freiberg

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 57/2021

Projektnummer 115704

FB000505

Abschlussbericht

PAK-Messungen an Kaminöfen

von

Dipl. Ing. Andreas Kahle

ANECO Institut für Umweltschutz GmbH & Co., Freiberg

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

[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

ANECO Institut für Umweltschutz GmbH & Co.
Halsbrücker Str. 34
09599 Freiberg / Sachsen

Die Durchführung der Versuche erfolgte bei:

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig

Abschlussdatum:

Oktober 2020

Redaktion:

Fachgebiet V 1.6 Emissionssituation
Kristina Juhrich

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, April 2021

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

Kurzbeschreibung: PAK-Messungen an Kaminöfen

Um Emissionsfaktoren für das Deutsche Inventar an Kaminöfen berechnen zu können, sollen Messungen der PAK-Konzentrationen im Abgas von 5 handelsüblichen Kaminöfen bei Einsatz von Buchenholz und Lausitzer Braunkohlebriketts erfolgen. Der Betrieb der Öfen erfolgt dabei unter geregelten Bedingungen beim Deutschen Biomasseforschungszentrum in Leipzig.

Abstract: Title

In order to be able to calculate emission factors for the German inventory of chimney stoves, measurements of the PAH concentrations in the exhaust gas of 5 commercially available chimney stoves with the use of beech wood and Lusatian lignite briquettes should be carried out. The ovens are operated under regulated conditions at the Deutschen Biomasseforschungszentrum in Leipzig.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abkürzungsverzeichnis..... | 7 |
| 1 Formulierung der Aufgabe | 8 |
| 1.1 Ausgangslage..... | 8 |
| 1.2 Aufgabenstellung | 8 |
| 1.3 Messobjekte..... | 8 |
| 2 Mess- und Analyseverfahren..... | 10 |
| 2.1 Grundlagen..... | 10 |
| 2.2 Beschreibung der Probenahmestelle..... | 10 |
| 2.3 Durchführung der Probenahme | 10 |
| 2.4 Durchführung der Analyse | 11 |
| 3 Messergebnisse | 12 |
| 3.1 Ofeninventar | 12 |
| 3.2 Versuchsablauf..... | 12 |
| 3.3 Betriebsbedingungen und Bewertung | 13 |
| 3.4 Messergebnisse:..... | 13 |
| 3.4.1 Kampagne 1 - 2019 | 14 |
| 3.4.2 Kampagne 2 - 2020 | 18 |
| 3.5 Messunsicherheit..... | 21 |
| 3.6 Plausibilitätsprüfung | 22 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---------|--|
| BImSchG | Bundesimmissionsschutzgesetz |
| BImSchV | Bundesimmissionsschutzverordnung |
| CLRTAP | Convention on Long-range Transboundary Air Pollution |
| DBFZ | DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH |
| PAK | Polyzyklischen aromatische Kohlenwasserstoffe |
| TA-Luft | Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz. (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) |
| UBA | Umweltbundesamt |
| UN | United Nations |
| UNECE | UN Economic Commission for Europe |
| US EPA | United States Environmental Protection Agency |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure |

1 Formulierung der Aufgabe

1.1 Ausgangslage

Deutschland ist gemäß Übereinkommen über weiträumige, grenzüberschreitende Luftverunreinigung (Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (CLRTAP), „Genfer Luftreinhaltekonvention“), der UN Economic Commission for Europe (UNECE) einschließlich seiner Protokolle sowie im Rahmen der NEC Richtlinie verpflichtet, jährlich über seine nationalen Emissionen an Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) zu berichten. Diese Berichtspflichten wurden in der 46. BImSchV in nationales Recht umgesetzt. Bezüglich der PAKs sind die Kleinf Feuerungsanlagen, insbesondere die Holzfeuerungen die wichtigste Emittenten Gruppe. Allerdings sind die bisher verwendeten Emissionsfaktoren nach der Novellierung der 1. BImSchV für den Anlagenpark nicht mehr repräsentativ. Außerdem liegen sie nicht in der benötigten Aggregationsebene vor.

1.2 Aufgabenstellung

Im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) sollen durch die ANECO Institut für Umweltschutz GmbH & Co., eine nach §29b BImSchG bekanntgegebene Messstelle, die Emissionen an PAKs im Abgas von Kaminöfen bei der Verbrennung von Scheitholz und Braunkohlebriketts ermittelt werden. Die entsprechenden Öfen befinden sich im Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ) in Leipzig und werden von den dort zuständigen Mitarbeitern betrieben.

Hintergrund des Vorhabens ist die Ermittlung von Emissionsfaktoren für das Deutsche Inventar an Kaminöfen.

Es sollen die bei der Verbrennung von Buchenholz und Lausitzer Braunkohlebriketts emittierten PAK im Abgas von 5 Kaminöfen bestimmt werden. Dabei sind die Betriebszustände „Anbrand“ und „Hauptbrand“ zu berücksichtigen. Es sind standardisierte Messverfahren anzuwenden. Die Ermittlung der Ergebnisse erfolgt als Einzelwert für die unter Punkt 1.3 genannten PAKs.

1.3 Messobjekte

An Kaminöfen sollen insgesamt 27 Messungen vorgenommen werden, bei denen folgende PAKs bestimmt wurden (US EPA 16):

Benzo(a)pyren

Benzo(b)fluoranthren

Benzo(k)fluoranthren

Indeno(1,2,3-cd)pyren

Acenaphthen

Acenaphthylen

Anthracen

Benzo[a]anthracen

Benzo[g,h,i]perylen

Chrysen

Dibenzo[a,h]anthracen

Fluoranthren

Fluoren

Naphthalin

Phenanthren

Pyren

2 Mess- und Analyseverfahren

2.1 Grundlagen

Die Grundlage für das Verfahren bildet die Norm VDI 3874 (12-2006)

2.2 Beschreibung der Probenahmestelle

Zur Durchführung der Versuche ist im Technikum des DBFZ ein Versuchsstand eingerichtet. Dieser beinhaltet alle notwendige Infrastruktur zum Betrieb eines Kaminofens inkl. Abgassystem. Dieses ist dabei so konstruiert, dass es auf verschiedene Ofentypen angepasst werden kann. Ziel ist dabei einen vergleichbaren und reproduzierbaren Betrieb der Anlagen zu gewährleisten.

Für die Probenahme wurde im Abgassystem mit Durchmesser 150 mm eine Messöffnung in der Dimension 2,5 Zoll eingerichtet. Die Erreichbarkeit war mittels eines Messpodestes gegeben. An der Probenahmestelle war eine Einlaufstrecke von 1,3 m, und eine Auslaufstrecke von 1,1 m gegeben. Sie entspricht damit den Empfehlungen der DIN EN 15259 (01-2008)

„Luftbeschaffenheit - Messung von Emissionen aus stationären Quellen - Anforderungen an Messstrecken und Messplätze und an die Messaufgabe, den Messplan und den Messbericht.

2.3 Durchführung der Probenahme

Die Probenahme und Analyse erfolgten gemäß VDI 3874 (12-2006), „Absorption mittels XAD-Kartuschen und Analyse nach Elution mittels GC/MS“. Dabei wird ein Teilstrom des Abgases mittels einer wassergekühlten Sonde isokinetisch aus dem Abgasstrom entnommen. Im Weiteren besteht die Probenahmeapparatur aus einem Kondensatgefäß und einer Adsorberstufe mit zwei XAD gefüllten Kartuschen. In den Kartuschen befindet sich jeweils noch ein Partikelfilter.

Die Kühlung der Sonde auf Temperaturen kleiner 30°C bewirkt dabei eine Kondensation der flüchtigen Abgasbestandteile. Diese sammeln sich im Kondensationsgefäß. Als Probenahmedauer wurden 30 Minuten gewählt. Dies erfolgte in Anlehnung an die Vorgaben der TA-Luft sowie der zu Grunde liegenden Norm. Auf Basis der DIN EN 15259 (01-2008) erfolgte die Probenahme jeweils als Kernstromprobenahme an einem Punkt mittig im Kanal.

Für die Probenahme kam ein modulares Teilstromentnahmesystem bestehend aus Trockenturm mit Trockenperlen zur Restfeuchteabscheidung, Massenstromsensor und Entnahmepumpe mit Bypassregelung zum Einsatz. Die Teilgastemperatur wurde während der Probenahme mittels Thermoelement überwacht.

Nach erfolgter Probenahme wurde die Apparatur jeweils entsprechend den Vorschriften der Norm gespült. Jede Probe bestand dabei aus Kondensat, zwei XAD-Kartuschen und der Spüllösung. Diese wurden im Labor der ANECO Institut für Umweltschutz GmbH & Co. in Mönchengladbach aufgearbeitet und analysiert.

Als Qualitätssichernde Maßnahme erfolgt vor und nach jeder Probenahme eine Dichtigkeitsprüfung der gesamten Probenahmeapparatur. Zudem werden die Eingesetzten Massenstromsensoren zur Registrierung des Probenahmevervolumens regelmäßig gegen ein Prüfnormale getestet.

2.4 Durchführung der Analyse

Grundsätzlich lässt sich die Analyse der Proben in zwei Teilschritte aufteilen. Zum einen werden die beprobten XAD-Kartuschen nach Zugabe von einem internen Standard mit Toluol eluiert. Das Eluat wird über Natriumsulfat getrocknet und auf 50 ml aufgefüllt. Anschließend wird die Probe ohne weitere Vorreinigung der Analyse zugeführt.

Das Kondensat und die Spüllösung werden in einen Scheidetrichter überführt und mit NaCl-Lösung versetzt. Nach Zugabe des internen Standards und des Extraktionsmittels Toluol wird mehrfach extrahiert. Nach Trocknung der Extrakte (Natriumsulfat) wird auf 50 ml aufgefüllt bzw. eingengt und anschließend ebenfalls analysiert.

Als Analysegerät kommt ein Gaschromatograph mit split/splitless-Einlasssystem und massenselektivem Detektor zum Einsatz.

Das Ergebnis entspricht der Summe der Gehalte in den Kartuschen und dem Kondensat/Spüllösung.

Als qualitätssichernde Maßnahmen kommen im Analyseteil der Ermittlung zertifizierten Referenzmaterialien zum Einsatz. Weiter erfolgt der Einsatz von Internen und Externen Standards zur Bestimmung der Wiederfindung.

3 Messergebnisse

3.1 Ofeninventar

Für die Messkampagnen wurden folgende Kaminöfen verwendet:

Tabelle 1: Für das Messprogramm ausgewählte Kaminöfen

| Bezeichnung Kaminofen | Einstellung der Luftzuführung | Schaumkeramikfilter | Leistung | Verwendeter Brennstoff | Messkampagne |
|-----------------------|--|---------------------|----------|------------------------|--------------|
| K01 | manuell | Nein | 6 KW | Holz / Kohle | 2019 / 2020 |
| K02 | automatisiert gesteuerte Luftklappe (mechanisch) | Nein | 7 KW | Holz / Kohle | 2020 |
| K03 | manuell | Nein | 5 KW | Holz | 2019 |
| K04 | manuell | Nein | 5 KW | Holz | 2019 |
| K05 | elektronisch geregelte Luftklappe mit Sensor | Ja | 8 KW | Holz / Kohle | 2019 / 2020 |

3.2 Versuchsablauf

Die Ermittlungen erfolgten in zwei Messkampagnen. In Kampagne eins von 03/2019 bis 06/2019 wurden die Öfen ausschließlich mit Buchenholz betrieben. In Kampagne zwei vom 02/2020 bis 03/2020 erfolgte ein Betrieb mit Buchenholz und Lausitzer Braunkohlenbriketts.

Um geeignete repräsentative und reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen, wurde bei jeder Messung die gleiche Menge Brennstoff beim Anzünden und Nachlegen verwendet. Der Versuchsbetrieb und die Bereitstellung des Brennstoffes erfolgten durch die Mitarbeiter des DBFZ. Der Versuchsablauf richtete sich dabei, entsprechend den Abstimmungen, nach dem Prüfablauf des Projektes „Evaluierung der 1. BImSchV“. Folgende Punkte wurden dabei berücksichtigt:

Tabelle 2: Versuchsablauf

| Parameter | Anforderung |
|----------------------------|---|
| einzustellende Last | Es sind 6 Brennstoffauflagen bei Nennlast, beginnend mit dem Zündvorgang, und 2 Brennstoffauflagen bei Teillast durchzuführen. |
| Schornsteinzug | Die beiden ersten Abbrände werden bei Naturzug durchgeführt. Die weiteren Nennlastabbrände bei 12 Pa und die Teillastabbrände bei 6 Pa. |
| Einstellungen am Kaminofen | Es sind die in der Bedienungsanleitung festgelegten Einstellungen durchzuführen. Als Einschränkung gilt, dass die Einstellungen nur unmittelbar beim Nachlegen angepasst werden dürfen. |
| Nachlegekriterium | Das Nachlegekriterium ist erreicht bei 25% der maximalen CO ₂ -Konzentration im Abbrand, wenn die CO ₂ -Konzentration zwischen 4,5% |

| Parameter | Anforderung |
|-----------|--|
| | und 3,5% liegt, und die Flamme erloschen ist oder, wenn die CO ₂ -Konzentration unter 3,5% liegt. |

Abstimmungsgemäß erfolgten die PAK-Messungen dabei jeweils beim Anbrand und beim zweiten und vierten Nachlegen von Brennstoff. Für die jeweils erste Messung der Kampagne wurde eine weitere Messung beim sechsten Nachlegen vereinbart.

3.3 Betriebsbedingungen und Bewertung

Der Versuchsbetrieb erfolgte unter üblichen Betriebsbedingungen für die Kaminöfen. Die Angaben der Hersteller zum Ofenbetrieb wurden nach Angaben des Versuchspersonals berücksichtigt. Es wird daher eingeschätzt, dass die nachfolgenden Messergebnisse repräsentativ für die gewählten Kaminöfen und deren Betrieb außerhalb eines Versuchsstandes sind.

3.4 Messergebnisse:

Folgende Tabellen enthalten Angaben zu den ermittelten Konzentrationen der Einzelstoffe. Die Angabe erfolgt als Konzentration, bezogen auf den Normzustand (1.013 hPa, 273K) des trocknen Abgases. Messergebnisse unterhalb der Bestimmungsgrenze werden mit „<“ gekennzeichnet. Die Summenbildung erfolgt unter Berücksichtigung der Bestimmungsgrenze der Einzelelemente in voller Höhe.

Die Angaben zum Sauerstoffgehalt, Kohlenmonoxid und Methan wurden vom DBFZ ermittelt und zur besseren Übersichtlichkeit hier mit dargestellt.

3.4.1 Kampagne 1 - 2019

Tabelle 3: Messergebnisse Kaminöfen K03 – 06.03.2019

| | Einheit | 1 Anbrand Holz | 2 Nachlegen Holz | 3 Nachlegen Holz | 4 Nachlegen Holz |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Messzeit | | 09:51 – 10:21 | 11:49 – 12:19 | 12:33 – 13:03 | 13:56 – 14:24 |
| Sauerstoffgehalt | [Vol.%] | 11,6 | 12,9 | 11,1 | 13,0 |
| Kohlenmonoxid | [mg/Nm ³] | 1013 | 2247 | 1708 | 2089 |
| Methan | [mg/Nm ³] | 15 | 79 | 66 | 42 |
| Naphtalin | [mg/Nm ³] | 0,58 | 0,88 | 0,45 | 0,13 |
| Acennaphthylen | [mg/Nm ³] | 0,04 | 0,20 | 0,09 | 0,02 |
| Acenaphten | [mg/Nm ³] | 0,002 | 0,021 | 0,016 | 0,004 |
| Fluoren | [mg/Nm ³] | 0,01 | 0,06 | 0,02 | 0,01 |
| Phenanthren | [mg/Nm ³] | 0,12 | 0,14 | 0,08 | 0,03 |
| Anthracen | [mg/Nm ³] | 0,008 | 0,027 | 0,016 | 0,004 |
| Fluoranthen | [mg/Nm ³] | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,01 |
| Pyren | [mg/Nm ³] | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,01 |
| Benzo[a]anthracen | [mg/Nm ³] | 0,006 | 0,011 | 0,007 | < 0,001 |
| Chrysen | [mg/Nm ³] | 0,006 | 0,007 | 0,005 | <0,001 |
| Benzo[b]fluoranthen | [mg/Nm ³] | 0,006 | 0,006 | 0,004 | < 0,001 |
| Benzo[k]fluoranthen | [mg/Nm ³] | 0,002 | 0,002 | 0,002 | < 0,001 |
| Benzo[a]pyren | [mg/Nm ³] | 0,003 | 0,007 | 0,005 | < 0,001 |
| Indeno[1,2,3-cd]pyren | [mg/Nm ³] | 0,005 | 0,004 | 0,004 | < 0,001 |
| Dibenzo[a,h]anthracen | [mg/Nm ³] | < 0,001 | < 0,001 | < 0,002 | < 0,001 |
| Benzo[g,h,i]perylen | [mg/Nm ³] | 0,005 | 0,004 | 0,002 | < 0,001 |
| Summe | [mg/Nm ³] | 0,9 | 1,5 | 0,8 | < 0,2 |

Tabelle 4: Messergebnisse Kaminöfen K04 – 13.03.2019

| | Einheit | 1 Anbrand Holz | 2 Nachlegen Holz | 3 Nachlegen Holz |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| Messzeit | | 09:32 – 09:58 | 10:32 – 11:02 | 11:13 – 11:43 |
| Sauerstoffgehalt | [Vol.%] | 15,1 | 13,4 | 13,1 |
| Kohlenmonoxid | [mg/Nm ³] | 650 | 1456 | 1501 |
| Methan | [mg/Nm ³] | 21 | 43 | 68 |
| Naphtalin | [mg/Nm ³] | 0,77 | 0,98 | 0,95 |
| Acennaphthylen | [mg/Nm ³] | 0,19 | 0,08 | 0,07 |
| Acenaphten | [mg/Nm ³] | 0,007 | 0,006 | 0,005 |
| Fluoren | [mg/Nm ³] | 0,03 | 0,02 | 0,01 |
| Phenanthren | [mg/Nm ³] | 0,12 | 0,15 | 0,15 |
| Anthracen | [mg/Nm ³] | 0,019 | 0,014 | 0,016 |
| Fluoranthen | [mg/Nm ³] | 0,05 | 0,04 | 0,04 |
| Pyren | [mg/Nm ³] | 0,06 | 0,03 | 0,03 |
| Benzo[a]anthracen | [mg/Nm ³] | 0,009 | 0,007 | 0,005 |
| Chrysen | [mg/Nm ³] | 0,015 | 0,008 | 0,005 |
| Benzo[b]fluoranthen | [mg/Nm ³] | 0,008 | 0,006 | 0,004 |
| Benzo[k]fluoranthen | [mg/Nm ³] | < 0,003 | 0,002 | < 0,002 |
| Benzo[a]pyren | [mg/Nm ³] | 0,011 | 0,004 | 0,003 |
| Indeno[1,2,3-cd]pyren | [mg/Nm ³] | 0,011 | 0,004 | 0,002 |
| Dibenzo[a,h]anthracen | [mg/Nm ³] | < 0,003 | < 0,002 | < 0,002 |
| Benzo[g,h,i]perylen | [mg/Nm ³] | 0,010 | 0,003 | 0,002 |
| Summe | [mg/Nm ³] | 1,3 | 1,4 | 1,3 |

Tabelle 5: Messergebnisse Kaminöfen K05 – 02.04.2019

| | Einheit | 1 Anbrand Holz | 2 Nachlegen Holz | 3 Nachlegen Holz |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| Messzeit | | 10: 04 – 10:34 | 11:18 – 11:48 | 13:15 – 13:45 |
| Sauerstoffgehalt | [Vol.%] | 15,2 | 13,2 | 18,8 |
| Kohlenmonoxid | [mg/Nm ³] | 1938 | 1135 | 2601 |
| Methan | [mg/Nm ³] | 42 | 43 | 17 |
| Naphtalin | [mg/Nm ³] | 1,30 | 2,54 | 1,74 |
| Acennaphthylen | [mg/Nm ³] | 0,33 | 0,68 | 0,43 |
| Acenaphten | [mg/Nm ³] | 0,005 | 0,010 | 0,011 |
| Fluoren | [mg/Nm ³] | 0,04 | 0,11 | 0,07 |
| Phenanthren | [mg/Nm ³] | 0,28 | 0,68 | 0,34 |
| Anthracen | [mg/Nm ³] | 0,04 | 0,08 | 0,05 |
| Fluoranthen | [mg/Nm ³] | 0,13 | 0,24 | 0,08 |
| Pyren | [mg/Nm ³] | 0,14 | 0,25 | 0,07 |
| Benzo[a]anthracen | [mg/Nm ³] | 0,02 | 0,04 | 0,01 |
| Chrysen | [mg/Nm ³] | 0,02 | 0,03 | 0,01 |
| Benzo[b]fluoranthen | [mg/Nm ³] | 0,02 | 0,03 | 0,01 |
| Benzo[k]fluoranthen | [mg/Nm ³] | 0,006 | 0,011 | 0,004 |
| Benzo[a]pyren | [mg/Nm ³] | 0,02 | 0,03 | 0,01 |
| Indeno[1,2,3-cd]pyren | [mg/Nm ³] | 0,02 | 0,03 | 0,01 |
| Dibenzo[a,h]anthracen | [mg/Nm ³] | < 0,002 | 0,002 | < 0,002 |
| Benzo[g,h,i]perylen | [mg/Nm ³] | 0,02 | 0,03 | 0,01 |
| Summe | [mg/Nm ³] | 2,4 | 4,8 | 2,8 |

Tabelle 6: Messergebnisse Kaminöfen K01 – 13.06.2019

| | Einheit | 1 Anbrand Holz | 2 Nachlegen Holz | 3 Nachlegen Holz |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| Messzeit | | 09:58 – 10:28 | 11:02 – 11:32 | 12:24 – 12:54 |
| Sauerstoffgehalt | [Vol.%] | 13,9 | 12,7 | 13,0 |
| Kohlenmonoxid | [mg/Nm ³] | 1688 | 1440 | 1710 |
| Methan | [mg/Nm ³] | 61 | 30 | 31 |
| Naphtalin | [mg/Nm ³] | 0,42 | 0,83 | 0,64 |
| Acennaphthylen | [mg/Nm ³] | 0,04 | 0,16 | 0,11 |
| Acenaphten | [mg/Nm ³] | 0,002 | 0,015 | 0,007 |
| Fluoren | [mg/Nm ³] | 0,01 | 0,04 | 0,03 |
| Phenanthren | [mg/Nm ³] | 0,06 | 0,19 | 0,15 |
| Anthracen | [mg/Nm ³] | 0,01 | 0,03 | 0,02 |
| Fluoranthren | [mg/Nm ³] | 0,02 | 0,07 | 0,06 |
| Pyren | [mg/Nm ³] | 0,02 | 0,06 | 0,05 |
| Benzo[a]anthracen | [mg/Nm ³] | 0,005 | 0,011 | 0,009 |
| Chrysen | [mg/Nm ³] | 0,004 | 0,009 | 0,008 |
| Benzo[b]fluoranthren | [mg/Nm ³] | < 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Benzo[k]fluoranthren | [mg/Nm ³] | 0,002 | 0,005 | 0,004 |
| Benzo[a]pyren | [mg/Nm ³] | 0,004 | 0,008 | 0,006 |
| Indeno[1,2,3-cd]pyren | [mg/Nm ³] | 0,003 | 0,007 | 0,005 |
| Dibenzo[a,h]anthracen | [mg/Nm ³] | < 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| Benzo[g,h,i]perylene | [mg/Nm ³] | 0,003 | 0,005 | 0,004 |
| Summe | [mg/Nm ³] | 0,6 | 1,5 | 1,1 |

3.4.2 Kampagne 2 - 2020

Tabelle 7: Messergebnisse Kaminofen K05– 27.02.2020

| | Einheit | 1 Anbrand Holz | 2 Nachlegen Kohle | 3 Nachlegen Kohle | 4 Nachlegen Kohle |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Messzeit | | 10:11 – 10:41 | 11:33 – 12:03 | 12:42 – 13:12 | 13:41 – 14:11 |
| Sauerstoffgehalt | [Vol.%] | 13,5 | 13,3 | 14,1 | 13,5 |
| Kohlenmonoxid | [mg/Nm ³] | 1177 | 1810 | 3134 | 2481 |
| Methan | [mg/Nm ³] | 29 | 67 | 101 | 76 |
| Naphtalin | [mg/Nm ³] | 2,75 | 1,33 | 0,04 | 1,05 |
| Acennaphthylen | [mg/Nm ³] | 0,65 | 0,08 | 0,07 | 0,08 |
| Acenaphten | [mg/Nm ³] | 0,073 | 0,023 | 0,021 | 0,025 |
| Fluoren | [mg/Nm ³] | 0,14 | 0,07 | 0,07 | 0,07 |
| Phenanthren | [mg/Nm ³] | 0,64 | 0,25 | 0,23 | 0,18 |
| Anthracen | [mg/Nm ³] | 0,10 | 0,04 | 0,04 | 0,03 |
| Fluoranthen | [mg/Nm ³] | 0,33 | 0,07 | 0,05 | 0,06 |
| Pyren | [mg/Nm ³] | 0,35 | 0,06 | 0,05 | 0,05 |
| Benzo[a]anthracen | [mg/Nm ³] | 0,052 | 0,012 | 0,011 | 0,004 |
| Chrysen | [mg/Nm ³] | 0,049 | 0,018 | 0,016 | 0,016 |
| Benzo[b]fluoranthen | [mg/Nm ³] | 0,05 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Benzo[k]fluoranthen | [mg/Nm ³] | 0,026 | 0,002 | < 0,002 | < 0,002 |
| Benzo[a]pyren | [mg/Nm ³] | 0,056 | 0,004 | 0,004 | 0,003 |
| Indeno[1,2,3-cd]pyren | [mg/Nm ³] | 0,055 | 0,005 | 0,004 | 0,026 |
| Dibenzo[a,h]anthracen | [mg/Nm ³] | 0,004 | < 0,002 | < 0,002 | < 0,002 |
| Benzo[g,h,i]perylen | [mg/Nm ³] | 0,059 | 0,004 | 0,003 | 0,002 |
| Summe | [mg/Nm ³] | 5,4 | 2,0 | 0,6 | 1,6 |

Tabelle 8: Messergebnisse Kaminofen K01 – 10.03.2020

| | Einheit | 1 Auflegen Kohle | 2 Nachlegen Kohle | 3 Nachlegen Kohle |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Messzeit | | 09:44 – 10:04 | 11:39 – 12:09 | 12:42 – 13:12 |
| Sauerstoffgehalt | [Vol.%] | 15,3 | 12,6 | 13,1 |
| Kohlenmonoxid | [mg/Nm ³] | 4331 | 916 | 1323 |
| Methan | [mg/Nm ³] | 244 | 23 | 33 |
| Naphtalin | [mg/Nm ³] | 10,42 | 0,38 | 2,54 |
| Acennaphthylen | [mg/Nm ³] | 2,14 | 0,11 | 0,57 |
| Acenaphten | [mg/Nm ³] | 0,191 | 0,024 | 0,045 |
| Fluoren | [mg/Nm ³] | 0,68 | 0,08 | 0,17 |
| Phenanthren | [mg/Nm ³] | 1,98 | 0,36 | 0,59 |
| Anthracen | [mg/Nm ³] | 0,365 | 0,063 | 0,115 |
| Fluoranthen | [mg/Nm ³] | 0,54 | 0,11 | 0,19 |
| Pyren | [mg/Nm ³] | 0,48 | 0,09 | 0,17 |
| Benzo[a]anthracen | [mg/Nm ³] | 0,185 | 0,036 | 0,071 |
| Chrysen | [mg/Nm ³] | 0,218 | 0,051 | 0,078 |
| Benzo[b]fluoranthen | [mg/Nm ³] | 0,10 | 0,02 | 0,03 |
| Benzo[k]fluoranthen | [mg/Nm ³] | 0,052 | 0,009 | 0,015 |
| Benzo[a]pyren | [mg/Nm ³] | 0,124 | 0,017 | 0,034 |
| Indeno[1,2,3-cd]pyren | [mg/Nm ³] | 0,062 | 0,012 | 0,020 |
| Dibenzo[a,h]anthracen | [mg/Nm ³] | 0,018 | 0,003 | 0,006 |
| Benzo[g,h,i]perylen | [mg/Nm ³] | 0,051 | 0,010 | 0,016 |
| Summe | [mg/Nm ³] | 17,6 | 1,4 | 4,7 |

Tabelle 9: Messergebnisse Kaminofen K02 – 17.03.2020

| | Einheit | 1 Auflegen Kohle | 2 Nachlegen Kohle | 3 Nachlegen Kohle | 4 Nachlegen Kohle |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Messzeit | | 09:53 – 10:23 | 10:57 – 11:27 | 12:04 – 12:34 | 13:23 – 13:53 |
| Sauerstoffgehalt | [Vol.%] | 13,8 | 12,7 | 11,7 | 12,0 |
| Kohlenmonoxid | [mg/Nm ³] | 2921 | 777 | 705 | 1114 |
| Methan | [mg/Nm ³] | 127 | 13 | 4 | 11 |
| Naphtalin | [mg/Nm ³] | 1,44 | 0,40 | 0,22 | 0,86 |
| Acennaphthylen | [mg/Nm ³] | 0,28 | 0,07 | 0,05 | 0,07 |
| Acenaphten | [mg/Nm ³] | 0,030 | 0,009 | 0,003 | 0,006 |
| Fluoren | [mg/Nm ³] | 0,10 | 0,03 | 0,02 | 0,04 |
| Phenanthren | [mg/Nm ³] | 0,32 | 0,11 | 0,08 | 0,13 |
| Anthracen | [mg/Nm ³] | 0,06 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |
| Fluoranthen | [mg/Nm ³] | 0,09 | 0,04 | 0,04 | 0,03 |
| Pyren | [mg/Nm ³] | 0,08 | 0,04 | 0,03 | 0,03 |
| Benzo[a]anthracen | [mg/Nm ³] | 0,029 | 0,010 | 0,007 | 0,007 |
| Chrysen | [mg/Nm ³] | 0,040 | 0,016 | 0,009 | 0,011 |
| Benzo[b]fluoranthen | [mg/Nm ³] | 0,02 | 0,01 | 0,01 | < 0,01 |
| Benzo[k]fluoranthen | [mg/Nm ³] | 0,012 | 0,003 | 0,003 | < 0,002 |
| Benzo[a]pyren | [mg/Nm ³] | 0,020 | 0,005 | 0,004 | 0,003 |
| Indeno[1,2,3-cd]pyren | [mg/Nm ³] | 0,013 | 0,003 | 0,004 | 0,002 |
| Dibenzo[a,h]anthracen | [mg/Nm ³] | 0,009 | < 0,002 | < 0,002 | < 0,002 |
| Benzo[g,h,i]perylene | [mg/Nm ³] | 0,012 | 0,003 | 0,003 | < 0,002 |
| Summe | [mg/Nm ³] | 2,6 | 0,8 | 0,5 | 1,2 |

Tabelle 10: Messergebnisse Kaminofen K02 – 18.03.2020

| | Einheit | 1 Anbrand Holz | 2 Nachlegen Holz | 3 Nachlegen Holz |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| Messzeit | | 08:48 – 09:12 [1] | 10:15 – 10:45 | 11:27 – 11:57 |
| Sauerstoffgehalt | [Vol.%] | 16,5 | 12,5 | 11,9 |
| Kohlenmonoxid | [mg/Nm ³] | 1769 | 894 | 1034 |
| Methan | [mg/Nm ³] | 72 | 48 | 10 |
| Naphtalin | [mg/Nm ³] | 0,41 | 0,35 | 0,11 |
| Acennaphthylen | [mg/Nm ³] | 0,06 | 0,10 | 0,01 |
| Acenaphten | [mg/Nm ³] | 0,017 | 0,013 | 0,002 |
| Fluoren | [mg/Nm ³] | 0,02 | 0,04 | < 0,01 |
| Phenanthren | [mg/Nm ³] | 0,08 | 0,12 | 0,02 |
| Anthracen | [mg/Nm ³] | 0,02 | 0,03 | < 0,01 |
| Fluoranthen | [mg/Nm ³] | 0,03 | 0,04 | 0,01 |
| Pyren | [mg/Nm ³] | 0,02 | 0,04 | 0,01 |
| Benzo[a]anthracen | [mg/Nm ³] | 0,005 | 0,010 | < 0,002 |
| Chrysen | [mg/Nm ³] | 0,006 | 0,010 | 0,002 |
| Benzo[b]fluoranthen | [mg/Nm ³] | < 0,01 | 0,01 | < 0,01 |
| Benzo[k]fluoranthen | [mg/Nm ³] | < 0,002 | 0,003 | < 0,002 |
| Benzo[a]pyren | [mg/Nm ³] | 0,003 | 0,006 | < 0,002 |
| Indeno[1,2,3-cd]pyren | [mg/Nm ³] | 0,002 | 0,003 | < 0,002 |
| Dibenzo[a,h]anthracen | [mg/Nm ³] | < 0,002 | < 0,002 | < 0,002 |
| Benzo[g,h,i]perylen | [mg/Nm ³] | < 0,002 | 0,003 | < 0,002 |
| Summe | [mg/Nm ³] | 0,7 | 0,8 | 0,2 |

[1] verkürzte Probenahmezeit aufgrund unvollständigen Abbrennens

3.5 Messunsicherheit

Die Messunsicherheit wurde nach VDI 4219 (08-2009) ermittelt. Die angegebenen Unsicherheiten sind erweiterte Messunsicherheiten mit einer statistischen Sicherheit von 95 %.

Die Messunsicherheit ist abhängig vom Messwert und befindet sich im Bereich 45% - entspricht 0,1 mg/Nm³ für einen Messwert 0,2 mg/Nm³ (kleinster Summenwert) und 12% - entspricht 2,1 mg/Nm³ für einen Messwert 17,6 mg/Nm³ (größter Summenwert).

3.6 Plausibilitätsprüfung

Eine Plausibilitätsprüfung der Messergebnisse in Hinblick auf den Betriebszustand während der Messzeiträume erfolgte durch Auswertung der vom DBFZ zur Verfügung gestellten Daten. Weiter erfolgte ein Abgleich mit bekannten Erhebungen vergleichbarer Messwerte.

Insgesamt sind die Messergebnisse in sich schlüssig und lassen keine Ausreißer erkennen. Innerhalb der Messreihen stellt sich ein klar nachvollziehbarer Konzentrationsverlauf ein.

Die ermittelten Konzentrationen sind unter den vorangegangenen Aussagen für die Anlage als plausibel anzusehen.