

Emissionsmessung eines Pelletheizstrahlers

im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

00.5082.PZ / C50096E2C

Auftraggeber

Bezeichnung: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien
CH - 3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).
www.bafu.admin.ch

BAFU Projektleiter Rainer Kegel

Auftragnehmer

Bezeichnung: Prüfstelle für Holzfeuerungen
Adresse: Klosterzelgstrasse 2, CH-5210 Windisch
Verantwortlicher: Tom Strebel
Telefon: +41 56 202 79 16
E-Mail: holzfeuerungen.technik@fhnw.ch
Interne Referenz MP-20214

Autoren	Tom Strebel	Prüfstelle für Holzfeuerungen
	Franco Cavalloni	Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz
	Alejandro Keller	Institut für Sensorik und Elektronik

Diese Studie wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1	VERWENDETE ABKÜRZUNGEN	3
2	VERWENDETE FORMELZEICHEN UND EINHEITEN	4
3	AUFTRAGSUMFANG.....	5
3.1	Messgrundlagen	5
3.2	Messort.....	5
3.3	An den Messungen beteiligte Personen	5
4	ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE	6
5	MESSGERÄTE	8
5.1	Gasförmige Emissionen	8
5.2	Staub- und Partikelmessung	8
5.3	Temperaturmessung	9
5.4	Gewichtsmessung	10
5.5	Umgebungsbedingung	10
6	TESTAUFBAU	11
6.1	Pelletheizstrahler.....	11
6.2	Prüfaufbau	12
7	BRENNSTOFFE.....	14
8	TESTDURCHFÜHRUNG	14
8.1	Testprozedur	14
8.2	Verlauf der Abbrände	15
8.3	Gravimetrische Staubmessung	17
8.4	SMPS und TC Messung.....	18
9	ERGEBNISSE	19
9.1	Vergleich stationärer Betrieb der 3 Abbrände	19
9.2	Leistung und Wirkungsgrad	21
9.3	Vergleich des Ausbrandes	23
9.4	Umgebungsbelastung	23
9.5	Fazit zu den Messungen	26
10	ANHANG: BEOBACHTUNGEN WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG DER ABBRÄNDE	27

1 Verwendete Abkürzungen

#/cm ³	Teile pro Kubikzentimeter
BAFU	Bundesamt für Umwelt
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
CPC	Condensation Particle Counter
DMA	Differential Mobility Analyzer
EC	Elementar Kohlenstoff (d. h. Russ)
EW	Endwert
FHNW	Fachhochschule Nordwestschweiz
FID	Flammenionisationsdetektor
g	Gramm
GMD	mittlerer Partikeldurchmesser, Anzahl gewogen (Geometric Mean Diameter)
hh:mm	Zeitdauer in Stunden und Minuten
hPa	Hektopascal
K	Kelvin
kg	Kilogramm
LDSA	Lung-Deposited Surface Area
LRV	Luftreinhalte Verordnung
m-%	Massenprozent
mg	Milligramm
min	Minute
MJ	Megajoule
MSC	Micro Smog Chamber
MW	Messwert
nm	Nanometer
NWL	Nennwärmeleistung
O ₂	Sauerstoff
OC	Organic Carbon; kondensierter organischer Kohlenstoff (nur Kohlenstoff-Atome)
OM	Organic Matter; kondensierter organischer Kohlenstoff (gesamte Moleküle)
OGC	Organic Gaseous Carbon
Pa	Pascal
ppm	Parts per million
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer
SOA	Sekundäre Organische Aerosole (gesamte Moleküle)
SOC	Sekundärer Organischer Kohlenstoff (Kohlenstoff-Atome)
t	Zeit
TC	Partikelgebundener Kohlenstoff
v. EW	von Endwert
v. MW	von Messwert

2 Verwendete Formelzeichen und Einheiten

Zeichen	Begriff	Einheit
B	Brennstoff Abnahme pro Stunde	kg/h
b	Brennbare Bestandteile im Rost- und Schürdurchfall, bezogen auf die Masse des Rückstandes	% Massenanteil
C	Kohlenstoffgehalt des Prüfbrennstoffs (wie verfeuert)	% Massenanteil
CO	Kohlenstoffmonoxidgehalt	% Volumenanteil
CO ₂	Kohlenstoffdioxidgehalt	% Volumenanteil
$c_{p,Abgas}$	Von Temperatur und Zusammensetzung der Gase abhängige spezifische Wärme der trockenen Abgase unter Normalbedingungen	kJ/(K m ³)
C_{Rost}	Kohlenstoffgehalt des Rost- und Schürdurchfalls, der sich auf die Masse verfeuerten Prüfbrennstoffs (Näherung: $C_{Rost} = R.b/100$) bezieht	% Massenanteil
c_{p,H_2O}	Von der Temperatur abhängige spezifische Wärme des Wassers unter Normalbedingungen	kJ/(K m ³)
H	Wasserstoffgehalt des Prüfbrennstoffs (wie verfeuert)	% Massenanteil
W	Wassergehalt des Prüfbrennstoffs (wie verfeuert)	% Massenanteil
H_u	Unterer Heizwert des Prüfbrennstoffs (wie verfeuert)	kJ/kg
η	Wirkungsgrad	%
R	Rost- und Schürdurchfall, bezogen auf die Masse des verfeuerten Prüfbrennstoffs	% Massenanteil
Q_a	Wärmeverluste in den Abgasen, bezogen auf die Masseneinheit des Prüfbrennstoffs	kJ/kg
Q_b	Chemische Wärmeverluste in den Abgasen, bezogen auf die Masseneinheit des Prüfbrennstoffs	kJ/kg
Q_r	Wärmeverluste infolge brennbarer Bestandteile im Rost- und Schürdurchfall, bezogen auf die Masseneinheit des Prüfbrennstoffs	kJ/kg
q_a	Verlustanteil infolge freier Wärme in den Abgasen Q_a , bezogen auf den Heizwert des Prüfbrennstoffs (wie verfeuert)	%
q_b	Verlustanteil infolge latenter Wärme in den Abgasen Q_b , bezogen auf den Heizwert des Prüfbrennstoffs (wie verfeuert)	%
q_r	Wärmeverlustanteil infolge brennbarer Bestandteile im Rost- und Schürdurchfall Q_r , bezogen auf die Masseneinheit des Prüfbrennstoffs (wie verfeuert)	%

Tabelle 1: Beschreibung der verwendeten Formelzeichen

3 Auftragsumfang

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) wurden im Februar 2021 Messungen zur Feststellung der gasförmigen Emissionen sowie der Partikelemissionen an einem Pelletheizstrahler durchgeführt. Der zu untersuchende Pelletheizstrahler wurde durch das BAFU festgelegt.

3.1 Messgrundlagen

Für Pelletheizstrahler gibt es keine eigene Prüfnorm. Aus diesem Grund wird das Prüfverfahren an folgende Normen angelehnt:

EN 16510-1:2018	Häusliche Feuerstätten für feste Brennstoffe - Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfverfahren
EN 14785:2006	Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets - Anforderungen und Prüfverfahren

3.2 Messort

Die Messungen wurden im Aussenbereich an der Fachhochschule Nordwestschweiz vor dem Laborgebäude 2 in Windisch durchgeführt.

3.3 An den Messungen beteiligte Personen.

Tom Strebel (Prüfstelle für Holzfeuerungen)
Franco Cavalloni (Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz)
Hans Peter Knöpfel (Prüfstelle für Holzfeuerungen)
Samuel Solin (Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz)
Alejandro Keller (Institut für Sensorik und Elektronik)

4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden insgesamt 3 Abbrände mit einem Wärmestrahler für den Aussenbereich betrieben mit Holzpellets durchgeführt. Untersucht wurde ein Pelletheizstrahler der Firma Lasco Heutechnik GmbH mit der Modellbezeichnung LATherm SKYFIRE [v1]. Der Pelletheizstrahler SKYFIRE verfügt über eine geregelte Brennstoffzufuhr mit Dosierschnecke und ein temperaturgeregeltes Verbrennungsluftgebläse.

Messmethoden

Die Durchführung des Prüfablaufs orientiert sich an der EN 14785 und EN 16510-1. Die Messstrecke entspricht nicht den Anforderungen der EN 16510-1 oder EN 14785 und wurde möglichst kurz ausgeführt, da der Pelletheizstrahler normalerweise ohne Kamin betrieben wird und die Messungen möglichst geringen Einfluss auf das Betriebsverhalten des Pelletheizstrahler haben sollten. Für die vorliegenden Prüfungen wurden zusätzlich zu den gasförmigen Emissionen, der gravimetrischen Messung der Partikel-Emissionen, dem Brennstoffverbrauch und der Abgastemperatur eine umfassende Analyse der Anzahl sowie der Beschaffenheit der Staubpartikel durchgeführt.

Resultate

Pelletheizstrahler für den Aussenbereich fallen nicht unter den Geltungsbereich von Anhang 1.19 Energieeffizienzverordnung (EnEV) für Festbrennstoff-Einzelraumheizgeräte (Anforderungen gemäss Verordnung (EU) 2015/1185) oder einen anderen Anhang der EnEV für das Inverkehrbringen. Pelletheizstrahler für den Aussenbereich fallen auch nicht unter den Geltungsbereich von Anhang 3 Luftreinhalte Verordnung (LRV). Für die Anwendung der allgemeinen Grenzwerte aus Anhang 1 LRV sind die Emissionsmassenströme zu gering. Somit bestehen keine Anforderungen an die Emissionen für den Betrieb eines Pelletheizstrahlers, es sei denn, eine Behörde legt auf der Grundlage des Artikels 4 der LRV vorsorgliche Emissionsbegrenzungen für Kohlenmonoxid fest. Zudem dürfen sie nach Art. 1 LRV grundsätzlich keine übermässigen Immissionen verursachen.

Um die Emissionsbelastung durch den Pelletheizstrahler SKYFIRE einordnen zu können, werden die Emissionen und der Wirkungsgrad dennoch mit den Anforderungen von Anhang 1.19 EnEV und Anhang 3 LRV verglichen.

Messwerte der stationären Phase	Einheit	Mittelwert über 3 Abbrände	EnEv Anhang 1.19 Werte für Pelletraumheizer nach EN 14785, gültig ab 1.1.2022	LRV Anhang 3 für Einzelraumfeuerungen und Heizkessel handbeschickt.
CO-Emissionen, 13% O ₂ trocken	mg/m ³ N	72	300	2'500
NO _x -Emissionen, 13% O ₂ trocken	mg/m ³ N	114	200	-
OGC (Organic Gaseous Carbon)-Emissionen, 13% O ₂ trocken	mg/m ³ N	4.8	60	-
Staub gravimetrisch, 13% O ₂ trocken	mg/m ³ N	16.1	20	100
TC-Emissionen ¹ , 13% O ₂ trocken	mg/m ³ N	2	-	-
Gesamtwärmeleistung	kW	8.9	-	-
Abgastemperatur	°C	248	-	-
Wirkungsgrad	%	84		
Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad	%	74	79	-

Tabelle 2: Messwerte verglichen mit den Anforderungen der EnEV und der LRV.

¹ Die TC-Emissionen wurden nur für den ersten Abbrand ohne MSC und somit auch SOA Potential gemessen. Dieser Wert beinhaltet ausschliesslich kondensierte Kohlenstoff-Atome.

Der Pelletheizstrahler SKYFIRE würde die Anforderungen an die Emissionen, jedoch nicht jene an den Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad¹ für Pelletfeuerungen nach EnEV Anhang 1.19 erfüllen. Zu beachten ist, dass die Messstelle für die Abgastemperaturmessung näher an der Feuerung angeordnet war als in der EN 16510-1 gefordert, und somit höhere Temperaturen gemessen wurden. Im normalen Gebrauch wird das Gerät ohne Kamin verwendet. Alle Abgase, die aus dem Pelletheizstrahler austreten, tragen nicht zur Erwärmung der umstehenden Personen bei. Somit widerspiegelt die Messung der Abgastemperatur direkt am Austritt des Geräts eher dem tatsächlichen Wirkungsgrad. Die kondensierten Kohlenstoff-Emissionen (TC) im Abgas sind mit $2 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$ ein geringer Anteil der gesamten Staub-Emissionen von $16.1 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$. TC ist die Summe von OC (kondensierter organischer Kohlenstoff (nur Kohlenstoff-Atome)) und EC (elementar Kohlenstoff (d. h. Russ)). Dabei wird ausschliesslich das Gewicht von kondensierten Kohlenstoff-Atomen gemessen. OM (kondensierter organischer Kohlenstoff (gesamte Moleküle)) beinhaltet auch andere Atome (H, O, N) und somit ist $\text{OM} > \text{OC}$ (typischerweise ist $\text{OM}/\text{OC} < 2$). Während dem 2. und 3. Abbrand wurden auch SOA (Sekundäre Organische Aerosole (gesamte Moleküle)) mittels der MSC (Micro Smog Chamber) produziert. Für diese Abbrände ist $\text{TC} = \text{EC} + \text{OC} + \text{SOC}$ (Sekundärer Organischer Kohlenstoff (Kohlenstoff-Atome)). Somit machen kohlenstoffhaltige Moleküle trotz der zusätzlichen SOA nur einen kleinen Anteil der Staubemissionen aus. Man kann deshalb davon ausgehen, dass der Hauptanteil der Staubemissionen nicht kohlenstoffhaltig ist, sondern aus anorganischen Salzen besteht. Die Art und Weise, wie die Abgase abgeführt werden, unterscheiden den Pelletheizstrahler von einer Pelletfeuerung nach EN 14785. Die Emissionen des Pelletheizstrahlers werden auf einer Höhe von 2.22 m über Boden ausgestossen, unmittelbar im Bereich von Personen. Aus diesem Grund wurde die Partikel-Belastung der Umgebungsluft während des Betriebs gemessen.

Messwerte der Umgebungsbelastung	Einheit	Mittelwert über 3 Abbrände
LDSA Umgebungsluft ohne Pelletheizstrahler	$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3_{\text{N}}$	12.5
360° um den Pelletheizstrahler und 3-5m Abstand		
PM0.3-Immissionen	$\mu\text{g}^2/\text{m}^3_{\text{N}}$	3.1
LDSA-Immissionen	$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3_{\text{N}}$	18.3
Fixe Position, 1m Abstand		
PM0.3-Immissionen	$\mu\text{g}^2/\text{m}^3_{\text{N}}$	4.4
LDSA-Immissionen	$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3_{\text{N}}$	25.8

Tabelle 3: Umgebungsbelastung ausgegeben in PM0.3 und LDSA.

Ein Mass zur Beurteilung der Luftbelastung ist die sogenannte LDSA (Lung-Deposited Surface Area), was für die Partikeloberfläche pro Kubikmeter Abgas gewichtet mit der Ablagerungswahrscheinlichkeit in der Lunge steht. Der Mittelwert beträgt $18.3 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ in 3-5 m Umkreis um den Pelletheizstrahler und $25.8 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ im Abstand von 1 m, was einer Erhöhung gegenüber der Umgebungsbelastung ohne Pelletheizstrahler von $12.5 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ entspricht. Neben einer viel befahrenen Strasse ist mit einer Luftbelastung LDSA von $50 - 80 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ zu rechnen. Im Vergleich dazu ist die LDSA von $25.8 \mu\text{m}^2/\text{cm}$ gemessen im Abstand von 1 m zum Pelletheizstrahler geringer. Die Messungen während des Abbrands 3 haben gezeigt, dass es zu hohen kurzzeitigen Partikelbelastungen kommen kann, wenn die Abgase nicht frei nach oben entweichen können.

Fazit

Der Pelletheizstrahler SKYFIRE weist Emissionswerte aus, welche die Anforderungen der Ökodesignverordnung (EU) 2015/1185 an Festbrennstoff-Einzelraumheizgeräten erfüllen würden. Diese Aussage kann nicht generell auf alle Pelletheizstrahler bezogen werden. Der geprüfte Typ verfügte über eine geregelte Luft- und Brennstoffzufuhr, über eine Brennkammer mit Flammführungsrohr sowie eine Abgasumlenkung nach der Brennkammer. Für einfachere Modelle ohne Regelung, bei denen sich der gesamte Brennstoff im Brennraum befindet, werden höhere Emissionen erwartet.

¹ Der Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad bezeichnet den Quotienten aus dem von einem Festbrennstoff-Einzelraumheizgerät gedeckten Raumheizwärmebedarf und dem zur Deckung dieses Bedarfs erforderlichen jährlichen Energieverbrauch in %.

5 Messgeräte

5.1 Gasförmige Emissionen

Die verwendeten Emissionsmessgeräte entsprechen den Anforderungen der EN 16510-1:2018.

Messgrösse	Messgerät Typ	Messunsicherheit	Mess-unsicherheit nach Norm
Gasanalysatoren		95 % Confidence Level	
CO	Gasanalysator MRU VARIOluxx	$\pm 5 \% \text{ v. MW}$	$\pm 10 \% \text{ v. MW}$ oder 10 ppm
CO ₂	Gasanalysator MRU VARIOluxx	$\pm 2 \% \text{ v. MW}$	$\pm 5 \% \text{ v. MW}$ oder 0.4 Vol-%
O ₂	Gasanalysator MRU VARIOluxx	$\pm 0.2 \% \text{ v. MW}$	$\pm 5 \% \text{ v. MW}$ oder 0.4 Vol-%
OGC	Gasanalysator (FID) J.U.M.	$\pm 5 \% \text{ v. MW}$	$\pm 10 \% \text{ v. MW}$ oder 5 ppm

Tabelle 4: Gasanalysatoren Daten (MW = Messwert)

5.2 Staub- und Partikelmessung

Gravimetrische Staubmessung:

- Staubabsaugeinrichtung: GOTHE
 - Gasuhr Nr. 19039389
- Inventarnummer: 81-620
- Staubentnahmesonde: 10 mm Düse
- Inventarnummer: 91-547
- Durchflussmessung: Schwebekörper 3 – 25 l/min
- Inventarnummer: 81-620-5
- Absaugvolumenstrom: 10 l/min

Verwendete Staubfilter:

- Glasfaser-Planfilter: Paul Gothe, Ø 45 mm

Kontinuierliche Partikelmessung (Anzahl und Durchmesser):

Messmethode 1: DiEM

- Online-Partikeloberflächenmessung (liefert LDSA, Anzahl und mittlerer geometrischer Durchmesser): DiSCmini (Miniature Diffusion Size Classifier)
- Normierung auf die Referenzverdünnung: CO₂-, H₂O- (Licor 840A) und CO-Messung (MRU Optima 7)
- Messunsicherheit $\pm 30 \%$ v. MW.

Messmethode 2: Naneos Partector

- Online-Partikeloberflächenmessung (liefert LDSA, Anzahl und mittlerer geometrischer Durchmesser: Naneos Partector (miniature Diffusion Size Classifier, Nachfolgemodell von DiSCmini)
- Messunsicherheit $\pm 30 \%$ v. MW. für Anzahl, Durchmesser und LDSA
- Messunsicherheit $\pm 50 \%$ v. MW für PM_{0.3}

Messmethode 3: SMPS

- Online Partikelanzahl und Grössenverteilung (i.e. Mobilitätsdurchmesser in dem Submikrometer-Bereich). Messgeräte: DMA 3081 und CPC 3776, TSI Inc.
- Normierung auf die Referenzverdünnung: Rotationsverdünner (Eigenbau) und insitu CO₂-Messung (Licor LI-850 CO₂/H₂O Analyzer).
- Messunsicherheit: $\pm 10 \%$ v. MW.

Messmethode 4: FATCAT und Sekundäre Aerosole

- Semi-Online-Messung des partikelgebundenen Kohlenstoffs (TC; Eigenbau):
<https://www.fhnw.ch/en/about-fhnw/schools/school-of-engineering/institutes/research-projects/carbonaceous-fraction-in-ambient-aerosol>
- Sekundäre Aerosole Bildung mittels Mikro Smog Chamber (Eigenbau)
- Beschreibung der Methode: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.08.014>
- Normierung auf die Referenzverdünnung: Rotationsverdünner (Eigenbau) und insitu CO₂-Messung (Licor LI-850 CO₂/H₂O Analyzer).
- Messunsicherheit: $\pm 0.2 \mu\text{g}$ von gesammeltem Kohlenstoff.

5.3 Temperaturmessung

Folgende Temperatursensoren wurden verwendet:

Abgastemperatur: Mantelthermoelement, Typ K (Ø 1.5 mm)

Sämtliche Temperatur-Messsensoren wurden vorgängig im Ölbad mittels eines kalibrierten Referenztemperatursensors kalibriert, gemäss dem Qualitätssicherungssystem der Prüfstelle.

Verwendetes Gerät:

- Ölbad: Haake F3
- Inventarnummer: 99-531
- Referenztemperatur: Kelvimat Typ 4323
- Inventarnummer: 82-583
- Messunsicherheit: $\pm 0.01 \text{ K}$

5.4 Gewichtsmessung

Gewichtsmessung des gesamten Aufbaus zur Bestimmung der Abbrandrate

- Typenbezeichnung: Mettler KCC150
- Inventarnummer: 80-387
- Messunsicherheit: 0.15 %

Gewichtsmessung Staubfilter

- Typenbezeichnung: Mettler AT 261 Delta Range
- Inventarnummer: 81-650
- Messunsicherheit: 0.017% (0 – 60 g)

5.5 Umgebungsbedingung

- Typenbezeichnung: Wetterstation Davis Vantage Pro Kabel
- Inventarnummer: 81-684
- Temperatur
Messunsicherheit: $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$
- Druck
Messunsicherheit: $\pm 1 \text{ hPa}$

6 Testaufbau

6.1 Pelletheizstrahler

Das zu untersuchende Objekt ist ein Pelletheizstrahler der Firma Lasco Heutechnik GmbH, Lascostrasse 1, 4891 Pöndorf, Österreich. Die nachfolgende Beschreibung wurde aus Unterlagen des Herstellers entnommen:

Der Lasco-Pelletheizstrahler ist ein mit Holzpellets befeuerter Infrarotstrahler mit einer Brennstoffwärmeleistung von 14 kW, welcher ohne Umweg über Wasser eine Strahlungswärme produziert. Er besteht grundsätzlich aus einem Vorratsbehälter, einer Brennstoffförderschnecke, einem Brennertopf, einem Glasrohr mit Flammführungsrohr, einer Regenhaube mit integriertem Aschebehälter und Abgassystem sowie diverser Antriebe zur Pelletförderung und zur Verbrennungsluftförderung.

Modellbezeichnung	LATherm SKYFIRE [v1]
Hersteller	Lasco Heutechnik GmbH
Brennstoffwärmeleistung	14 kW
Nennwärmeleistung	10 kW
Baujahr	2021
Masse (L:B:H)	750 x 750 x 2220 mm
Gewicht	75 kg
Fassungsvermögen Vorratsbehälter	30 kg
Brennstoffverbrauch	3 kg/h

Tabelle 5: Spezifikation Pelletheizstrahler (gemäss Angaben des Herstellers)

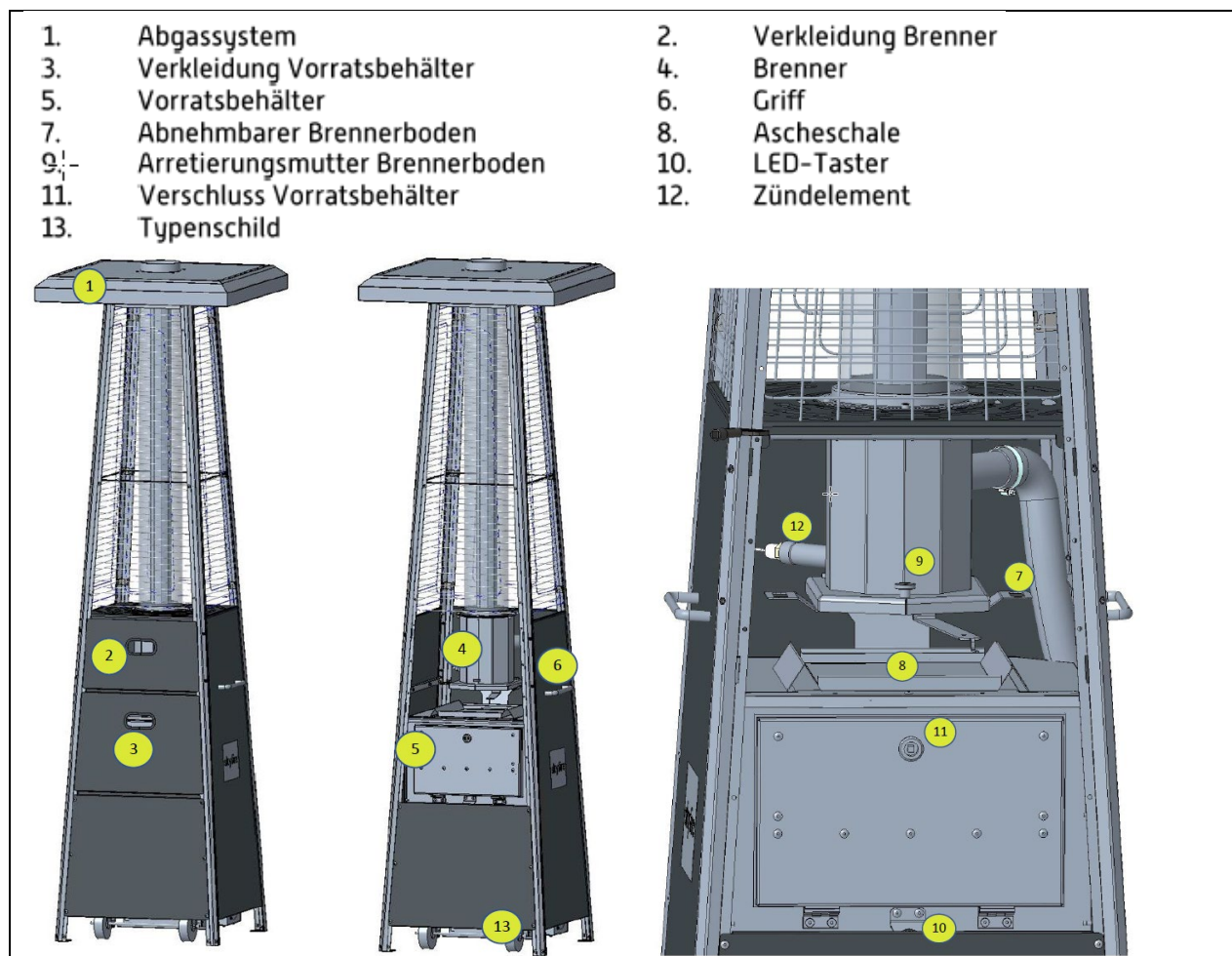


Abbildung 1: Beschreibung Pelletheizstrahler Skyfire (gemäss Angaben des Herstellers)

6.2 Prüfaufbau

Abbildung 2 und Abbildung 3 mit der Legende in Tabelle 6 zeigen den Prüfaufbau an der FHNW. Als einzige Anpassung für den Messaufbau wurde am Pelletheizstrahler eine Messstrecke (Durchmesser 130 mm, Länge 700 mm) angebracht. Während des Abbrands 3 wurde als Witterungsschutz eine Blache angebracht, siehe Abbildung 4.

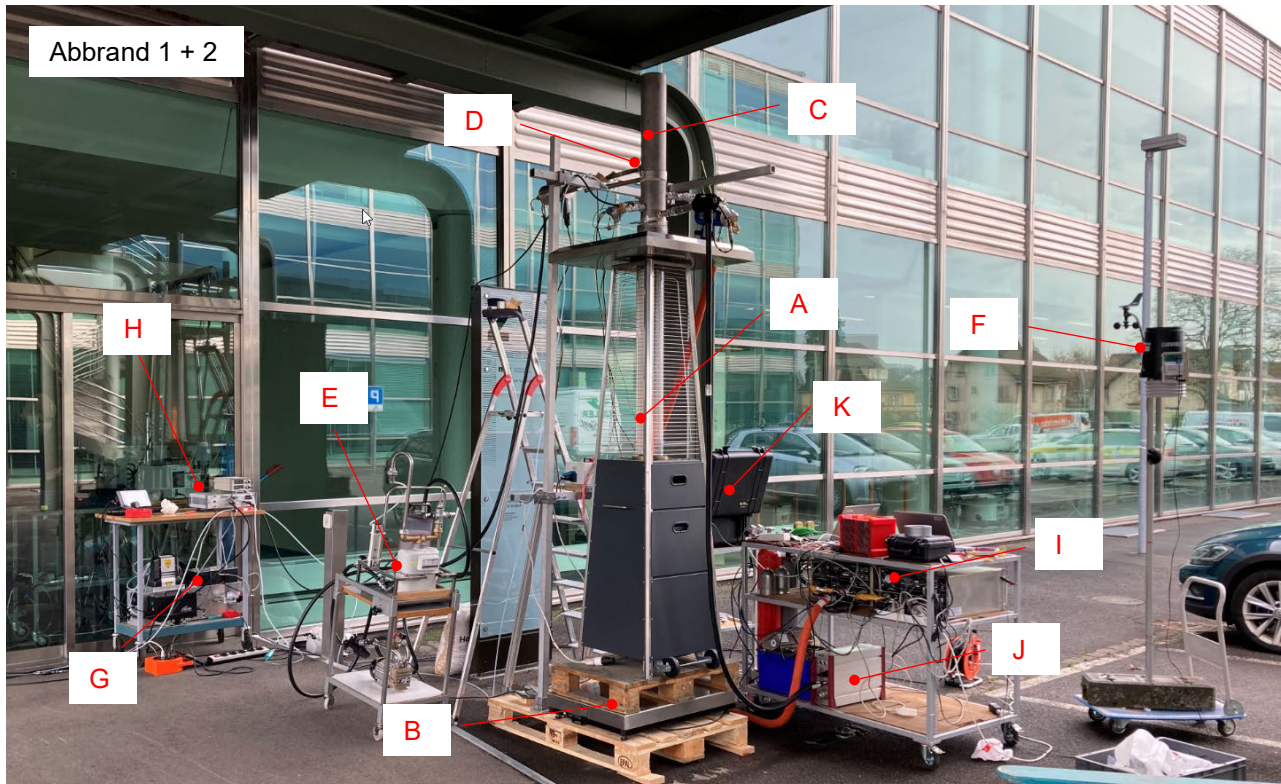


Abbildung 2: Teststandaufbau Abbrand 1 und 2

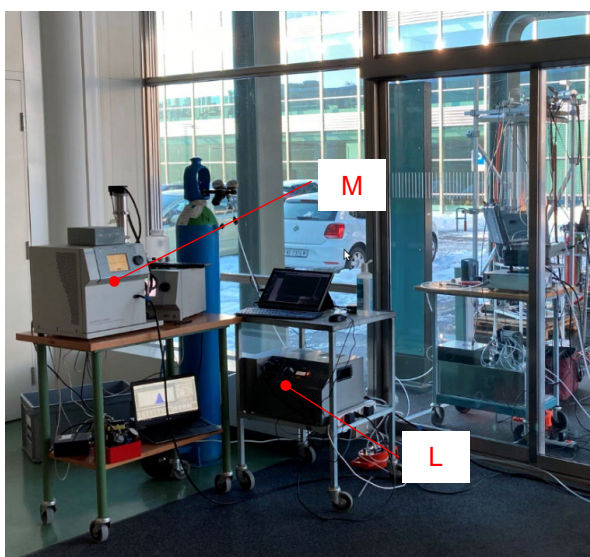


Abbildung 3: SMPS und TC Messsysteme



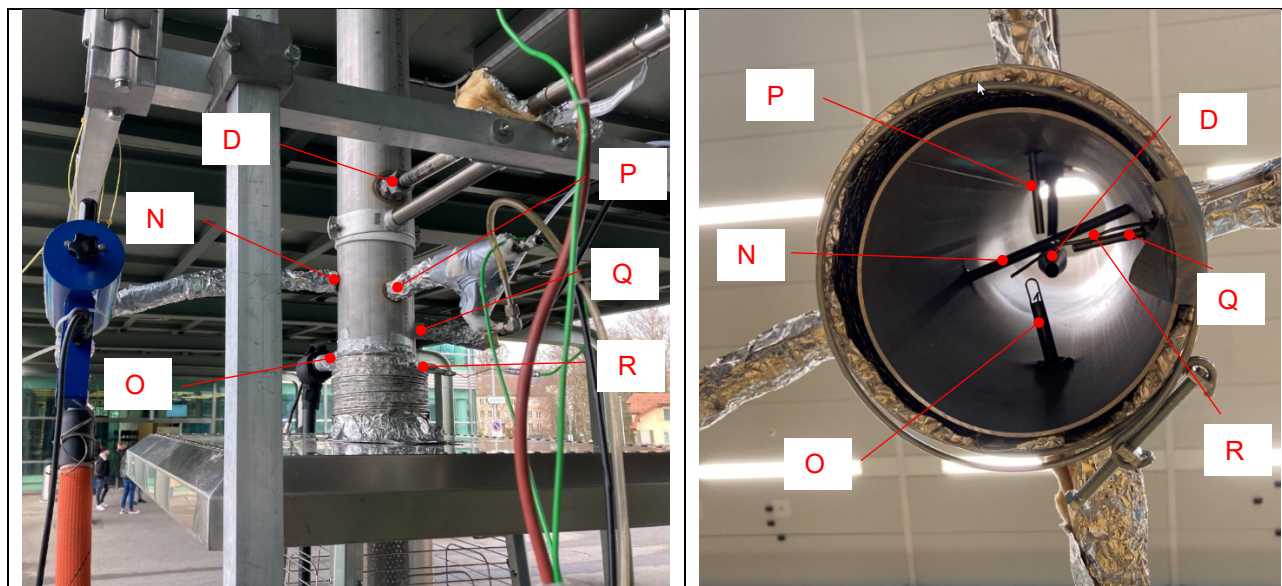
Abbildung 4: Abbrand 3 mit Blache, ansonsten identisch wie Abbrand 1 und 2

Rubrik	Beschreibung
A	Pelletheizstrahler
B	Waage (Mettler KCC150)
C	Kamin mit Messstrecke (Ø 130 mm)
D	Entnahmestelle gravimetrische Staubmessung (Gothe)
E	Absaugvorrichtung für gravimetrische Staubmessung (Gothe)
F	Wetterstation (Davis Vantage Pro)
G	Micro Smog Chamber
H	Rotationsverdünner
I	J.U.M. FID
J	MRU VARIOluxx
K	DIEM
L	TC Messsystem (FATCAT)
M	SMPS

Tabelle 6: Teststand Elemente

Der Pelletheizstrahler wurde auf einer Waage (B) platziert.

Die Abführung des Rauchgases erfolgte senkrecht über eine Messstrecke (C). Die Messstrecke entspricht nicht den Anforderungen der EN 16510-1 und wurde möglichst kurz ausgeführt, da der Pelletheizstrahler normalerweise ohne Kamin betrieben wird und die Messungen möglichst geringen Einfluss auf das Betriebsverhalten des Pelletheizstrahler haben sollten. Die Prüfung erfolgte ohne feste Vorgabe eines Kaminzugs. Sämtliche Entnahmestellen zur Messung der gasförmigen Emissionen (CO, CO₂, O₂, NO_x, OGC) sowie Partikelemissionen (PM) und der Messung der Abgastemperatur befinden sich in dieser Messstrecke angeordnet gemäss Abbildung 5.



Rubrik	Beschreibung	Höhe über Pelletheizstrahler [cm]
D	Beheizte Entnahmesonde gravimetrische Staubmessung mit 10 l/min Entnahmestrom (Gothe)	37
N	Entnahmestelle Gasanalysator (J.U.M. FID) für OGC	22
O	Entnahmestelle Gasanalysator (MRU VARIOluxx) für CO, CO ₂ , O ₂ , NO _x	11
P	Entnahmestelle, Partikelanzahl und Partikeldurchmesser (DIEM)	19
Q	Gasanalysator für TC und SOA	14
R	Abgas-Temperaturmessung (Thermoelement)	4

Abbildung 5 Aufbau Messstrecke für Pelletheizstrahler

Der Probevolumenstrom für die Total Carbon- und SMPS Messungen wurde zuerst vorkonditioniert in einer MSC (Micro Smog Chamber) (G) und danach mit einem Rotationsverdünner verdünnt. Für die Verdünnung wurde CO₂-freie, künstliche Luft verwendet, um den Einfluss von CO₂ in der Umgebungsluft zu vermeiden. Die Messsysteme für Total Carbon (I) und Anzahl und Durchmesser (SMPS) (J) wurden im Gebäudeinnen der FHNW platziert (Abbildung 3).

Die Umgebungsbedingungen wurden während der Messungen mit der Wetterstation Davis Vantage Pro (F) kontinuierlich aufgezeichnet.

7 Brennstoffe

Als Brennstoff wurden handelsübliche Holzpellets vom Lieferanten Energie 360° verwendet, welche die Mindestanforderungen für die Klasse A1 der SN EN 17225-2 einhalten. Für die Brennstoffanalyse wurde der Wassergehalt durch Ofentrocknung¹⁾ und der Brennwert mit einem Bombenkalorimeter²⁾ bestimmt. Es wurden für beide Verfahren mehrere Proben untersucht, um die Streuung der Ergebnisse zu erkennen. Für die Berechnungen wurden die Mittelwerte verwendet.

Brennstoff Analyse	Einheit	1. Probe	2. Probe	3. Probe	Mittelwert
Wassergehalt	%	9.24	8.74	-	8.99
Brennwert feucht	MJ/kg	18.20	18.12	18.19	18.17

Tabelle 7: Brennstoff-Analyse

¹⁾ gemäss EN ISO 18134-1: 2015, durch die Prüfstelle für Holzfeuerungen

²⁾ durch Chemielabor, Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz

8 Testdurchführung

8.1 Testprozedur

Es wurden insgesamt 3 Abbrände durchgeführt. Bei allen Messungen wurde dieselbe Testprozedur angewendet:

Kaltstart, Anfeuern

Der Pelletheizstrahler wurde vor jeder Messung mit 15 kg Holzpellets gefüllt. Danach wurde durch Betätigen der einzigen Taste die Feuerung gestartet (siehe Abbildung 6). Die Brennkammer wird mittels des Gebläses gespült, durch eine Steigschnecke werden die Pellets vom Tank hoch in die Brennkammer gefördert und mit einem Glühzünder gezündet. Der gesamte Vorgang von Zeitpunkt des Startens, bis erste Flammen sichtbar werden, dauert ca. 10 min.



Abbildung 6: Anfeuern

Betrieb

Die Leistung des Pelletheizstrahlers ist durch die Steuerung fest vorgegeben und wird über die Abgastemperatur geregelt. Es wurden keine Eingriffe in die Steuerung vorgenommen.

Ausbrand

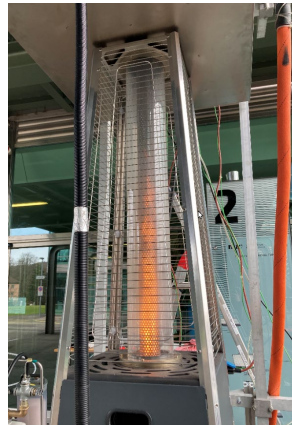
Der Pelletheizstrahler wurde nach Abschluss der Messungen bei Nennwärmeleistung durch Drücken der Starttaste wieder gestoppt. In der Stoppsequenz wurden zuerst die Pelletförderung unterbrochen und anschliessend die im Brennraum verbleibenden Pellets abgebrannt.

8.2 Verlauf der Abbrände

Für die Auswertung wurde der Abbrand in drei Abschnitte aufgeteilt. Die Startphase beginnt mit dem ersten Anstieg der CO-Emissionen und endet mit dem Erreichen der stationären Abgastemperatur. Der stationäre Betrieb beginnt mit Erreichen der stationären Abgastemperatur und endet mit dem Drücken des Ausschaltknopfs. Die Auswerteperiode für den Ausbrand startet mit dem Drücken des Ausschaltknopfs und endet, sobald die CO-Emissionen auf 10 ppm abgesunken sind.



Erste CO-Emissionen



Stationärer Betrieb



Ausbrand

Abbildung 7: Phasen der Abbrände

	Einheit	1. Abbrand	2. Abbrand	3. Abbrand
Beginn erste CO-Emissionen	Uhrzeit	11:29	10:46	10:07
Dauer Startphase	hh:mm	00:28	00:38	00:53
Beginn stationärer Betrieb	Uhrzeit	11:57	11:24	11:00
Dauer stationärer Betrieb bis Start Ausschaltsequenz	hh:mm	04:27	04:50	05:27
Start Ausschaltsequenz	Uhrzeit	16:24	16:14	16:27
Dauer Ausbrand	hh:mm	00:10	00:22	00:18

Tabelle 8: Ablauf Testabbrände

Abbildung 8 bis Abbildung 10 zeigt den Verlauf der drei Prüfabbrände, wobei die Startphase gelb hinterlegt ist, der stationäre Betrieb blau und der Ausbrand rot.

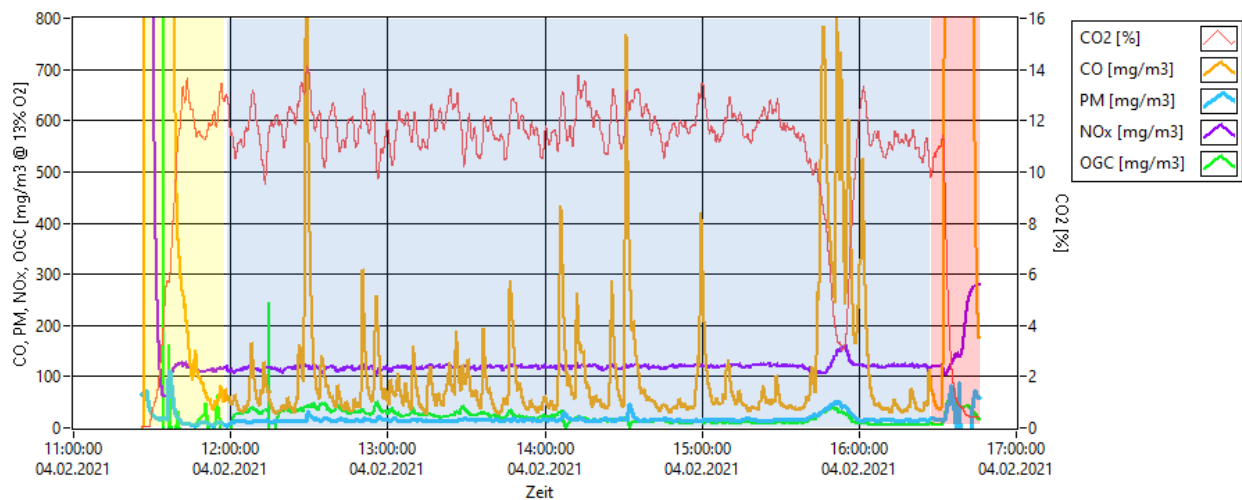


Abbildung 8: Emissionsverlauf und Aufteilung der Phasen (Abbrand 1)

Bei Abbrand 1 in Abbildung 8 ist eine Störung im Emissionsverlauf kurz vor 16:00 Uhr ersichtlich. Auffallend ist die Abnahme der CO_2 -Emission im stationären Betrieb. Dies ist auf einen Pelletstau zurückzuführen, der durch manuelles Nachschieben der Pellets im Pellettank behoben wurde.

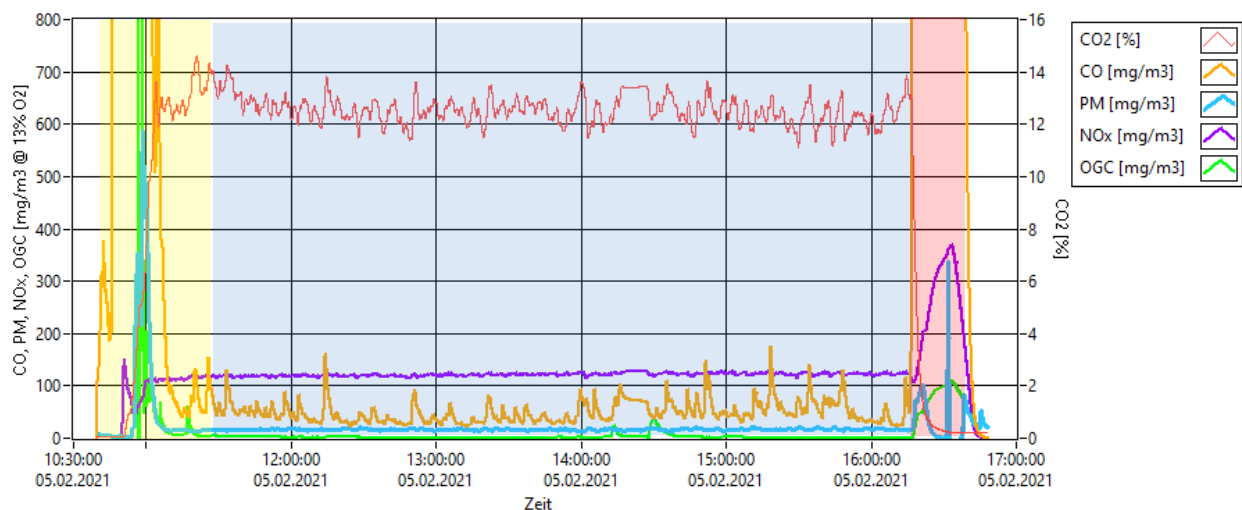


Abbildung 9: Emissionsverlauf und Aufteilung der Phasen (Abbrand 2)

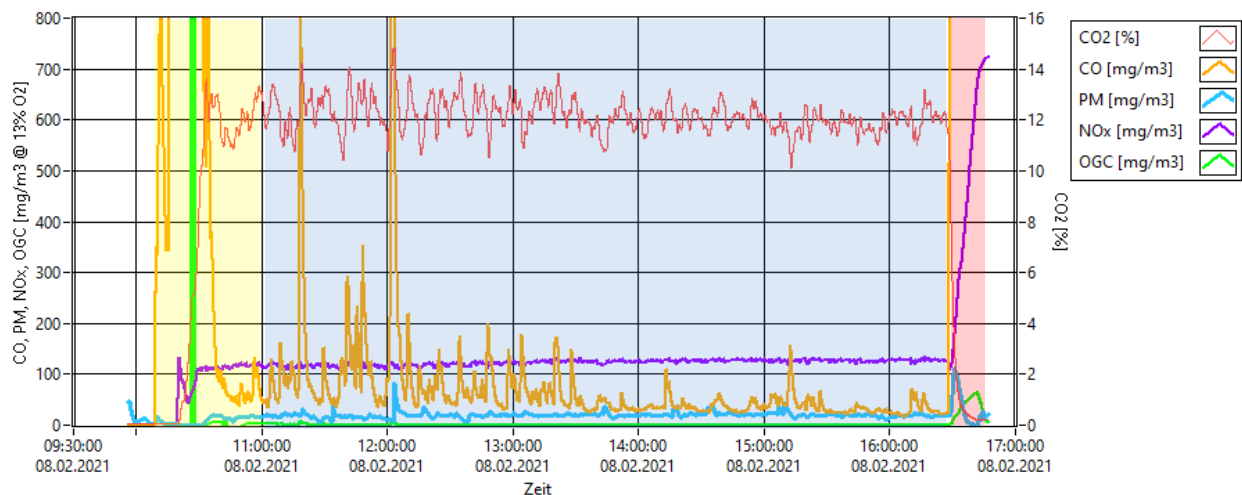


Abbildung 10: Emissionsverlauf und Aufteilung der Phasen (Abbrand 3)

Durch die Normierung auf 13% O₂ im Abgas und dem schnellen Anstieg des Restsauerstoffgehalts beim Löschen der Flamme werden die Emissionen in der ersten transienten Phase des Ausbrandes überschätzt (NO_x Spitzen).

8.3 Gravimetrische Staubmessung

Die gravimetrische Staubmessung erfolgte diskontinuierlich über das Absaugen eines Abgasvolumens durch einen Filter mit jeweiligem Filterwechsel und Bestimmung des Differenzgewichts des unbeladenen und beladenen Filters gemäss Vorgaben der EN 16510-1. Bedingt durch die nicht normkonforme Messstrecke wurde die Staubmessung nicht an der normkonformen Position durchgeführt (Siehe Kapitel 6.2). Für die Messung wurde mit einem konstanten Volumenstrom von 10 l/min abgesaugt. Bei jedem Abbrand wurden 4 Staubmessungen durchgeführt. Die erste Staubmessung mit einer Absaugzeit von 30 Minuten wurde drei Minuten nach Erscheinen der ersten Flammen gestartet (beim ersten Abbrand 10 Minuten nach Erscheinen der ersten Flamme). Die restlichen Staubmessungen mit jeweils 60 Minuten Absaugzeit verteilen sich auf die stabile Betriebsphase bei Nennwärmeleistung. Die blauen Flächen in Abbildung 11 bis Abbildung 13 zeigen die Zeitfenster (Entnahmedauer) der einzelnen gravimetrischen Staubmessungen.

Neben der diskontinuierlichen Messung über die Filter wurden die Staubemissionen kontinuierlich mit dem DIEM Messgerät gemessen.

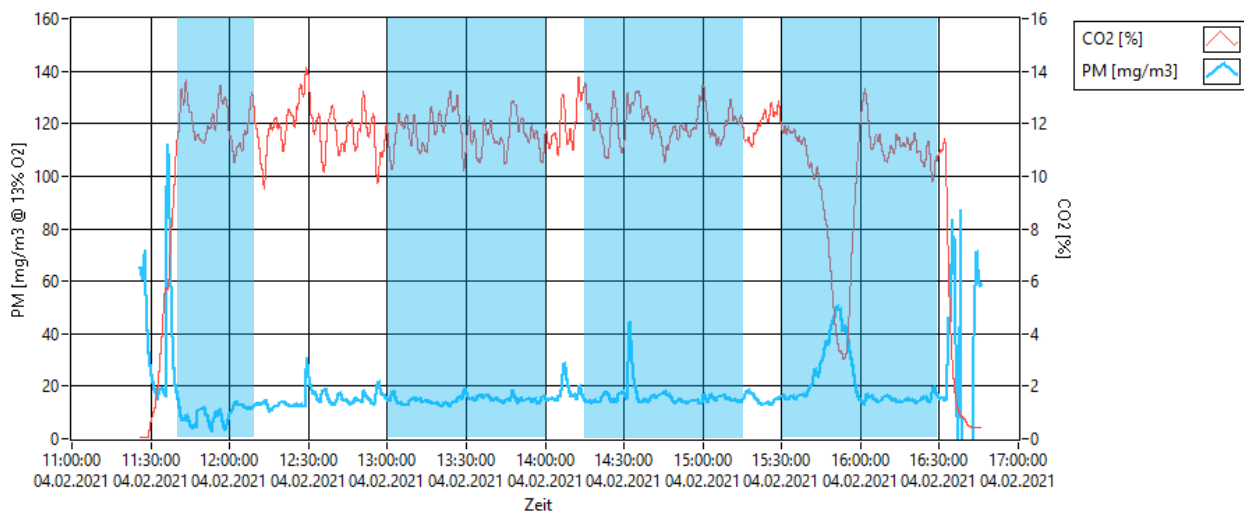


Abbildung 11: Verlauf Abbrand 1 (blaue Flächen = Gravimetrische Staubmessungen)

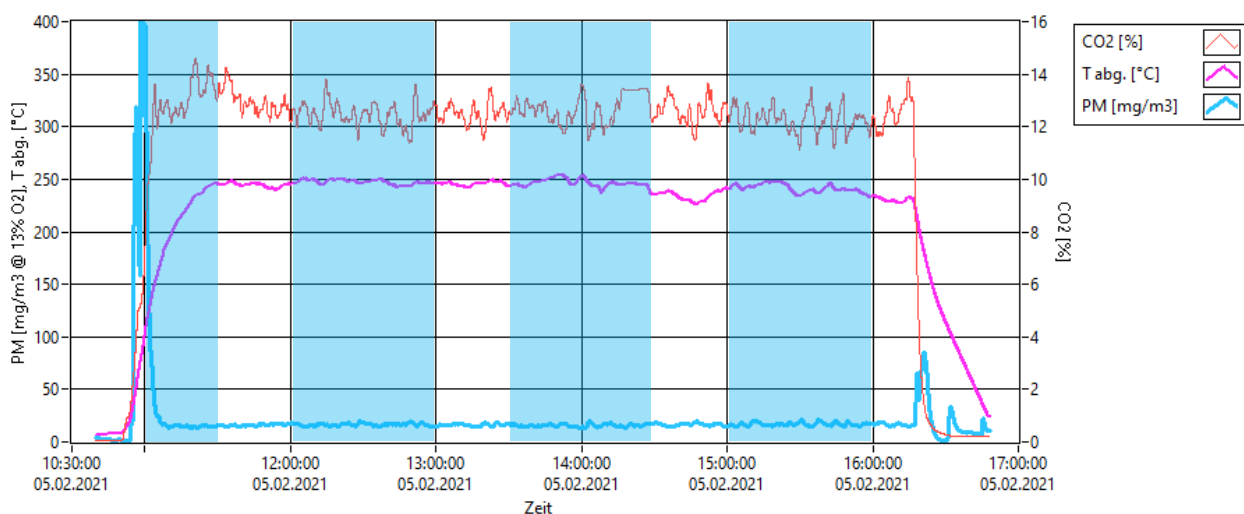


Abbildung 12: Verlauf Abbrand 2 (blaue Flächen = Gravimetrische Staubmessungen)

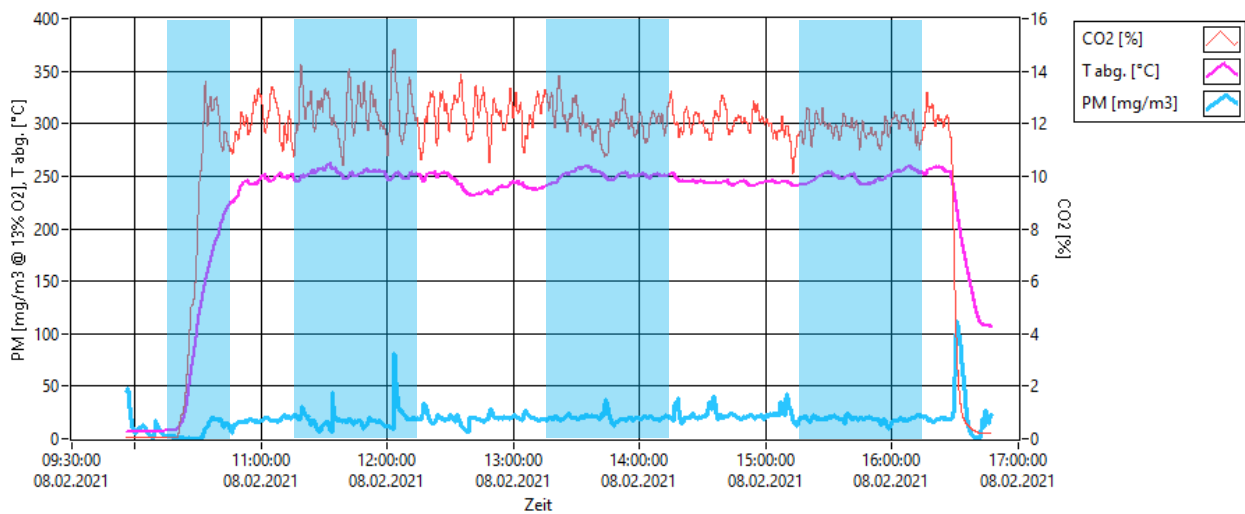


Abbildung 13: Verlauf Abbrand 3 (blaue Flächen = Gravimetrische Staubmessungen)

8.4 SMPS und TC Messung

Die SMPS- und die TC-Messung wurden auf 13% O₂ normiert mit dem CO₂-Gehalt im Abgas, gemessen mit einem Messgerät Licor. Mit dem SMPS wurden alle 3 Minuten vom Start bis zum Ausschalten Messungen durchgeführt. Die TC-Messung wurde gleichzeitig mit der gravimetrischen Messung durchgeführt. Die Zeitfenster für die TC-Messungen sind in Abbildung 14 bis Abbildung 16 blau hinterlegt. Unmittelbar nach Abschluss des Absaugvorgangs wird bei der TC-Messung die Bestimmung des Kohlenstoffgehalts durchgeführt. Der Prozess beinhaltet die Verbrennung des kohlenstoffhaltigen Materials bei 800 °C. Das Gerät braucht eine Pause von 25 Minuten, bevor das nächste Messintervall gestartet werden kann. Die TC-Emissionen wurden nur für den ersten Abbrand ohne MSC und somit auch ohne SOA Potential gemessen, für die Abbrände 2 und 3 aber inkl. SOA-Potential. Das Ziel war ein Vergleich zwischen dem frisch emittierten Feinstaub und dem Feinstaub, der das Potenzial zur Bildung von SOA hat. Das SMPS befand sich auch hinter dem MSC und somit beinhalten diese Emissionen auch das SOA-Potential für die Abbrände 2 und 3.

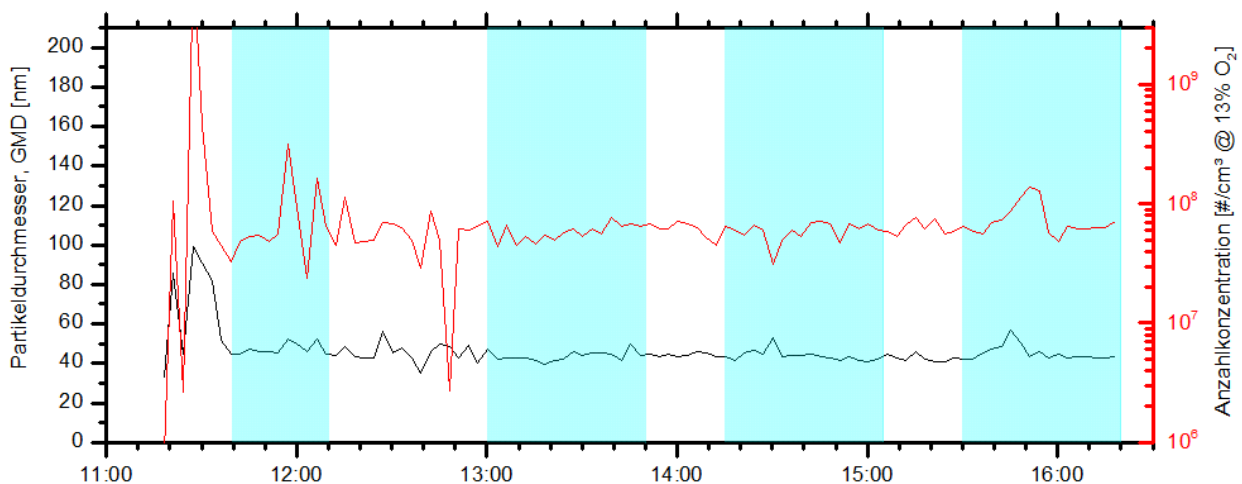


Abbildung 14: Verlauf Abbrand 1 (blaue Fläche = TC Messung; ohne SOA-Potential).

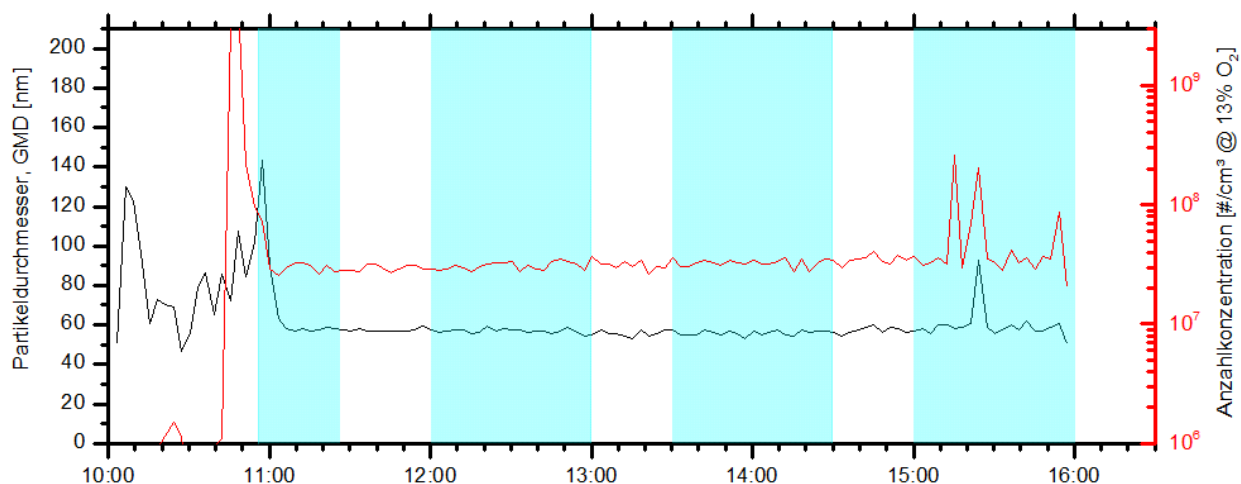


Abbildung 15: Verlauf Abbrand 2 (blaue Fläche = TC Messung, inklusive SOA-Potential).

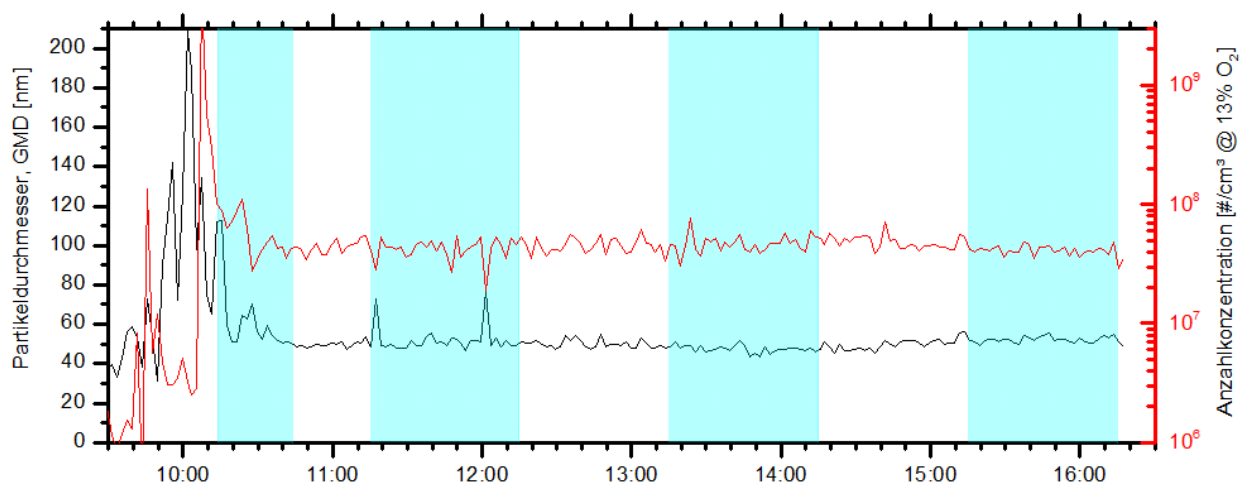


Abbildung 16: Verlauf Abbrand 3 (blaue Fläche = TC Messung, inklusive SOA-Potential).

9 Ergebnisse

9.1 Vergleich stationärer Betrieb der 3 Abbrände

Die Mittelungszeit für den stationären Betrieb beginnt mit Erreichen der stationären Abgastemperatur und endet mit dem Betätigen des Ausschaltknopfs (in Abbildung 8 bis Abbildung 10 in blau markiert). Als Ergebnis wurden die resultierenden Mittelwerte aus allen 3 Abbränden gebildet.

In der Tabelle 9 sind die Resultate der kontinuierlichen Messungen wie oben beschrieben sowie normiert auf 13 % O₂ und auf Heizwert (MJ) dargestellt.

Stationärer Betrieb	Einheit	1. Abbrand	2. Abbrand	3. Abbrand	Mittelwert
Umgebungstemperatur	°C	9.9	11.1	3.8	8.3
Abgastemperatur	°C	252.0	242.9	247.9	247.6
O ₂ trocken	Vol%	8.6	7.5	7.8	7.9
CO ₂ trocken	Vol%	11.4	12.6	12.2	12.1
CO-Emissionen, 13% O ₂ trocken	mg/m ³	97	49	69	72
NO _x -Emissionen, 13% O ₂ trocken	mg/m ³	112	115	116	114
OGC-Emissionen, 13% O ₂ trocken	mg/m ³	13	1.2	0.1	4.8
CO-Emissionen auf Heizwert normiert	mg/MJ	64	32	46	48
NO _x -Emissionen auf Heizwert normiert	mg/MJ	74	76	76	75
OGC-Emissionen auf Heizwert normiert	mg/MJ	10	0.9	0.1	6.2

Tabelle 9: Gasförmige Emissionen der Phase «Einschalten bis Ausschalten»

Für die gravimetrische Staubbmessung wurden, wie in Kapitel 8.3 beschrieben, pro Abbrand 4 Messungen durchgeführt: die erste Staubbmessung während des Anfeuerns und die restlichen drei während des stabilen Betriebs. In Tabelle 12 sind die Werte aller Staubbmessungen sowie der resultierende Mittelwert aus den 3 Abbränden dargestellt.

Gravimetrische Staubbmessung (Gothe)	Einheit	1. Abbrand	2. Abbrand	3. Abbrand	Mittelwert
Staubbeladung Filter Messung 1	mg	5.2	1.9	8.9	5.3
Staubbeladung Filter Messung 2	mg	12.2	4.7	24.6	13.8
Staubbeladung Filter Messung 3	mg	13.4	11.9	5.7	10.3
Staubbeladung Filter Messung 4	mg	11.9	27.4	7.3	15.5
1. Staubbmessung (Start)	mg/m ³	12.11	4.66	27.07	14.61
2. Staubbmessung	mg/m ³	14.91	5.62	31.74	17.42
3. Staubbmessung	mg/m ³	16.05	14.27	7.28	12.53
4. Staubbmessung	mg/m ³	15.96	33.74	9.56	19.75

Tabelle 10: Gravimetrische Staubbmessung detailliert.

Die gravimetrische Staubbmessung weist Schwankungen über den Verlauf der Abbrände auf. Dies weist auf unterschiedliche Bedingungen für die Staubbildung während der Abbrände hin. Die Schwankungen wurden auch mit dem SMPS gemessen, jedoch in geringerem Umfang.

Der partikelgebundene Kohlenstoff ist bei dieser Untersuchung allgemein viel niedriger als der gesamte Staub. Man kann deshalb davon ausgehen, dass der Hauptanteil der Staubbemissionen nicht kohlenstoffhaltig ist. Der Vergleich zwischen dem ersten Abbrand ohne MSC und der anderen Abbrände deutet daraufhin, dass das SOA-Potential nur während der Startphase eine bedeutende Rolle spielt.

TC Messung, FATCAT + MSC	Einheit	1. Abbrand*	2. Abbrand	3. Abbrand	Mittelwert
1. TC-Messung (Start)	mg/m ³	1.29	5.66	4.49	3.81
2. TC-Messung	mg/m ³	1.21	0.68	1.47	1.12
3. TC-Messung	mg/m ³	1.23	0.59	0.63	0.82
4. TC-Messung	mg/m ³	1.18	0.71	0.51	0.80

Tabelle 10: partikelgebundener Kohlenstoff, TC, detailliert. *beim 1. Abbrand wurden die MSC nicht in Betrieb genommen.

Durch den Vergleich des ersten Abbrandes mit dem zweiten und dritten ist ersichtlich, dass vor allem beim Start SOA produziert werden, da diese Werte um mehr als Faktor 3 höher sind.

In der Tabelle 11 sind die Resultate der kontinuierlichen Staumessung mit dem DIEM für den stationären Betrieb dargestellt. Die letzte Spalte zeigt die resultierenden Mittelwerte aus allen 3 Abbränden.

Staubmessung Mittelwert pro Messung	Einheit	1. Abbrand	2. Abbrand	3. Abbrand	Mittelwert
Staub gravimetrisch, 13% O ₂ trocken	mg/m ³	14.8	14.6	18.9	16.1
Partikel Anzahl, 13% O ₂ trocken	#/cm ³	4.54E+07	4.11E+07	4.28E+07	4.31E+07
Mittlerer Partikel Durchmesser	nm	45.4	45.4	45.5	45.5

Tabelle 11: Staubmessung DIEM Resultate

Auch mit dem SMPS wurde die mittlere Partikelanzahl und der mittlere Durchmesser kontinuierlich von Start bis zum Ausschalten gemessen. Die Daten unterscheiden sich von jenen des DIEM; die Messmethoden basieren auf unterschiedlichen Prinzipien. In der DIEM-Messung werden die Parameter der Partikel von der Oberflächen-Messung abgeleitet, während die SMPS-Messung auf der Zählung der Partikel basiert.

SMPS Messungen Mittelwert pro Abbrand	Einheit	1. Abbrand	2. Abbrand	3. Abbrand	Mittelwert
Partikel Anzahl, 13% O ₂ trocken	#/cm ³	6.68E7	3.74E7	4.51E7	4.98E+07
Mittlerer Partikel Durchmesser, GMD	nm	45	57	50	51

Tabelle 12: Partikelanzahl und mittlerer Durchmesser mittels SMPS-Messung

9.2 Leistung und Wirkungsgrad

Die Leistung des Pelletheizstrahlers wurde während der Phase des stationären Betriebs bestimmt. Für die Bestimmung des Wirkungsgrads wurde eine Temperaturmessung in der aufgesetzten Messstrecke verwendet (Siehe Kapitel 6.2). Die Position dieser Abgasmessung entspricht nicht der Normposition gemäss EN 16510-1. Die Temperaturmessung erfolgt näher am Prüfobjekt. Die Temperaturen an der verwendeten Messposition sind höher als die Temperaturen an einer Normmessstelle. Der Wirkungsgrad ermittelt mit einer Messstrecke nach EN 16510-1 würde höher ausfallen als der ausgewiesene Wirkungsgrad. Da ein Pelletheizstrahler ohne Kamin betrieben wird, ist die gewählte Position repräsentativ für den Praxisbetrieb.

Während der Nennlast weist die Gewichtsabnahme des Brennstoffs bei den 3 Abbränden einen linearen Verlauf auf. Die Ausreisser sind durch Eingriffe während des Staubfilterwechsels verursacht. Beim 2. Abbrand ist nach 14:00 Uhr die Datenerfassung der Waage ausgefallen. Der lineare Verlauf vor dem Ausfall ist klar ersichtlich und darf mit hoher Wahrscheinlichkeit als linearer Trend während der Ausfallzeit angenommen werden. In Abbildung 17 ist der Brandverlauf der 3 Abbrände dargestellt.

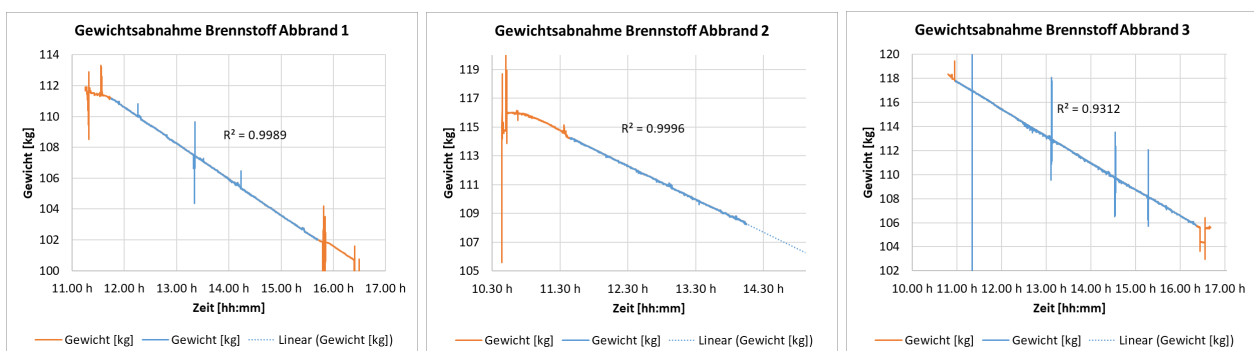


Abbildung 17: Gewichtsabnahme Brennstoff während Abbrand 1 bis 3

Nach EN 14785 – A6.2.2 wird die Gesamtwärmeleistung wie folgt berechnet:

$$P = \frac{\eta * B * H_u}{100 * 3600} \quad (1)$$

Die Nutzwärme konnte bei dieser Untersuchung im Aussenbereich nicht erfasst werden, darum wurde versucht, alle Verluste zu quantifizieren und von der berechneten Leistung abzuziehen. Dies führt dazu, dass der Wirkungsgrad eher überschätzt wird, falls nicht alle Verluste berücksichtigt werden.

Nach EN 14785 – A.6.2 wird der indirekte Wirkungsgrad wie folgt berechnet:

$$\eta_{G7,nom} = 100 - (q_a + q_b + q_r) \quad (2)$$

Wärmeverluste im Abgas

Für Q_a wurde die Abgastemperatur während der stationären Phase berücksichtigt.

$$Q_a = (T_{Abgas} - T_{Umg.}) * \left(\left(\frac{c_{p,Abgas} * (C - C_{Rost})}{0.536 * (CO + CO_2)} \right) + \left(\frac{c_{p,H_2O} * 1.92(9H + W)}{100} \right) \right) \quad (3)$$

$$q_a = 100 * \frac{Q_a}{H_u} \quad (4)$$

Chemische Verluste im Abgas

$$C_r = \frac{(0.2 * H_u)}{33'500} \quad (5)$$

$$Q_b = \frac{12'644 * CO * (C - C_r)}{0.536 * (CO + CO_2) * 100} \quad (6)$$

$$q_b = 100 * \frac{Q_b}{H_u} \quad (7)$$

Wärmeverluste durch Verbrennliches im Rost- und Schürdurchfall

$$Q_r = 355 * b * \frac{R}{100} \quad (8)$$

$$q_r = 100 * \frac{Q_r}{H_u} \quad (9)$$

Leistung stationäre Phase	Einheit	1. Abbrand	2. Abbrand	3. Abbrand	Mittelwert
Brennstoffmassenstrom	kg/h	2.25	2.36	2.23	2.28
Leistung Brennstoff	kW	10.5	11.0	10.4	10.6
Mittlere Abgas Temperatur	°C	252.0	242.9	247.9	247.6
Verluste im Abgas	%	16.4	14.4	15.1	15.3
Chemische Verluste im Abgas	%	0.07	0.03	0.05	0.05
Verluste durch Rostdurchfall	%	0.5	0.5	0.5	0.5
Wirkungsgrad (indirekt bestimmt)	%	83.0	85.0	84.3	84.1
Gesamtwärmeleistung	kW	8.7	9.4	8.8	8.9

Tabelle 13: Leistungswerte und Wirkungsgrade

In Tabelle 14 sind die Formeln und die Werte für die Berechnung des Raumheizungs-Jahresnutzungsgrads dargestellt. Der Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad bezeichnet den Quotienten aus dem von einem Festbrennstoff-Einzelraumheizgerät gedeckten Raumheizwärmebedarf und dem zur Deckung dieses Bedarfs erforderlichen jährlichen Energieverbrauch in %.

Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad	Einheit	Bestimmung	Wert
F(2)	%	Einstufige Wärmeleistung, keine Raumtemperaturkontrolle	0
F(3)	%	Keine Raumtemperaturkontrolle	0
F(4)	%	$F(4) = CC * \frac{0.2 * el_{max} + 0.8 * el_{min} + 1.3 * el_{sb}}{P_{nom}} * 100$	0.12
F(5)	%	$F(5) = 0.5 * \frac{P_{pilot}}{P_{nom}} * 100$	0
Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad	%	$\eta_s = \eta_{th,nom} - 10\% + F(2) + F(3) - F(4) - F(5)$	74.0

Tabelle 14: Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad

9.3 Vergleich des Ausbrandes

Der Ausbrand dauerte vom Ausschalten des Pelletheizstrahlers bis der CO-Gehalt im Abgas auf 10 ppm abgesunken ist. Die Emissionen werden nicht auf 13% O₂ normiert wegen des sehr hohen Sauerstoffwerts von 19.6 Vol%, dies hätte sonst zu extremen Anpassungen des Messwerts geführt.

Ausbrand	Einheit	1. Abbrand	2. Abbrand	3. Abbrand	Mittelwert
Ausbranddauer	hh:mm	00:10	00:22	00:18	00:17
O ₂ -Gehalt im Abgas	Vol%	19.3	19.6	19.8	19.60
CO-Emissionen im Abgas	mg/m ³	2'365	1'595	1'758	1'906
CO-Emissionen Maximalwert	mg/m ³	5'437	9'927	10'798	8'721
NO _x -Emissionen im Abgas	mg/m ³	27	26	31	28
OGC-Emissionen im Abgas	mg/m ³	8	4	2	5

Tabelle 15: Emissionen im Ausbrand

Bedingt durch die Konstruktionsweise des geprüften Pelletheizstrahlers befindet sich wenig Brennstoff in der Brennkammer und entsprechend kurz ist die Ausbrandzeit. Die CO-Emissionen zeigten jeweils eine kurze Spitze und nahmen schnell ab. Nach drei Abbränden ohne Entleeren des Aschebehälters befanden sich 38.5 g Asche im Behälter, was bei vollständiger Verbrennung der Pellets der zu erwartenden Menge an Asche entspricht.



Abbildung 18: Ascherückstände (38.5 g nach 3 Abbränden, 0.1% vom Brennstoff)

9.4 Umgebungsbelastung

Während der Abbrände wurde mit dem Naneos Partector die Umgebungsbelastung durch Partikel gemessen. Die Belastung für den Menschen durch Feinstaub wird mittels LDSA (Lung Deposited Surface Area) (LDSA) beurteilt. Der LDSA berücksichtigt, dass kleinere Partikel bezüglich gesundheitlicher Auswirkungen relevanter sind als grössere, da die kleineren Partikel tiefer in die Lunge eindringen können. Bei einer gravimetrischen Staubbemessung haben diese sehr kleine Partikel fast keinen

Einfluss auf das Gewicht. Der Hersteller des Messgerätes, Naneos, gibt 3 Stufen für die Luftqualität an, die Stufen wurden vom Hersteller aufgrund von Referenzmessungen bei unterschiedlich belasteter Luft festgelegt:

Luftqualität	Gut	Mittel	Schlecht
Bereich [$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3_{\text{N}}$]	< 50	50 – 250	> 250

Tabelle 16: Luftqualität Angabe Naneos

Die Messung der unmittelbaren Umgebungsbelastung wurde 360° um den Pelletheizstrahler im Abstand von 3-5 Meter (Höhe 1.3 m) durchgeführt. Nach dieser Messung wurde während des restlichen Abbrands stationär an einer festen Position in 1 m Entfernung des Pelletheizstrahlers weitergemessen. Während des ersten Abbrands wurde eine Messung direkt im Abgasstrom in 5 m Höhe über dem Pelletheizstrahler durchgeführt.

Die Windrichtung und die Windstärke wurden gemessen. Aufgrund der geringen Windstärke verglichen mit der Geschwindigkeit des Abgases konnte kein wesentlicher Zusammenhang von Windrichtung und Umgebungsbelastung durch Partikel festgestellt werden.

Während des dritten Abbrands musste zum Wetterschutz eine Blache gespannt werden, die den freien Abzug der Abgase behindert hatte.

In Abbildung 19 bis Abbildung 21 ist der Verlauf der Messung für jeden Abbrand dargestellt.

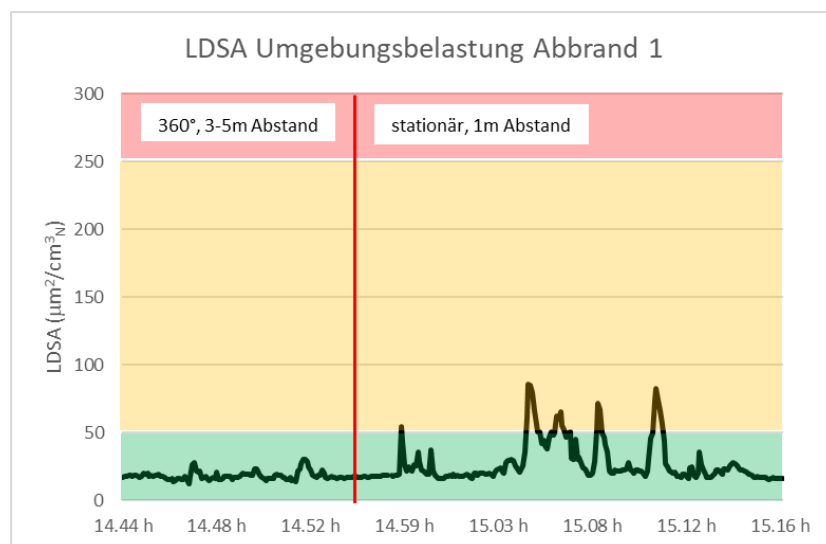


Abbildung 19: LDSA Abbrand 1 (Windstärke 1.4m/s, Richtung SW)

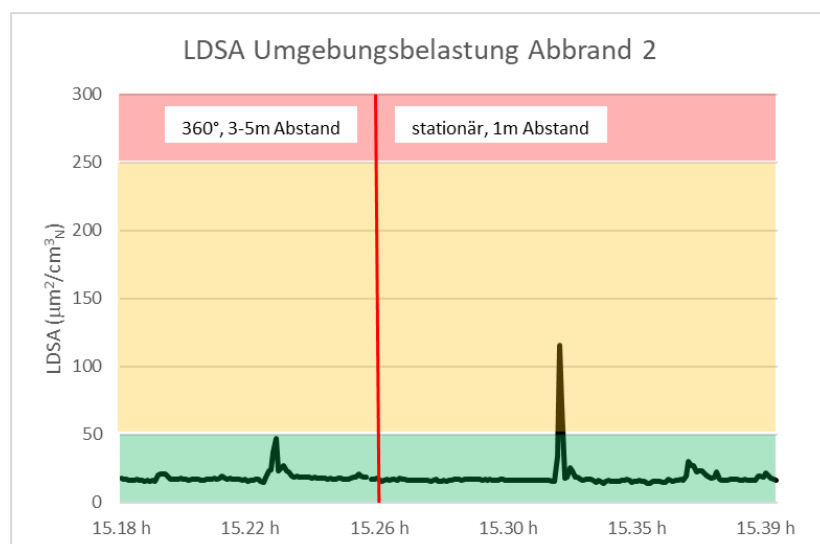


Abbildung 20: LDSA Abbrand 2 (Windstärke 2.6m/s, Richtung WSW)

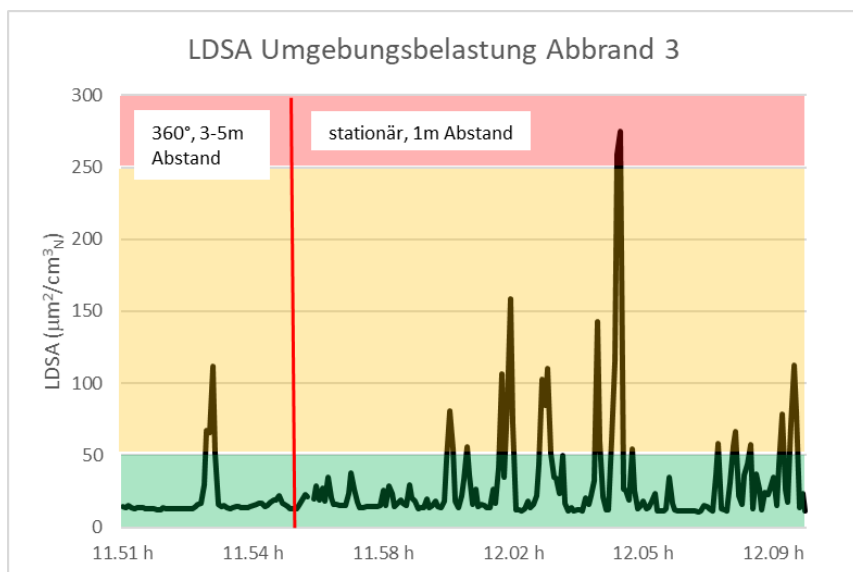


Abbildung 21: LDSA Abbrand 3 (Windstärke 0.6m/s, Richtung ENE, ab 12:05 WSW)

Die Resultate in der Tabelle 17, LDSA und PM0.3, werden aus der Anzahl und Durchmesser der Partikel berechnet.

Umgebungsbelastung	Einheit	1. Abbrand	2. Abbrand	3. Abbrand	Mittelwert
LDSA ohne Pelletheizstrahler	$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{N}$	12.4	14.0	11.0	12.5
LDSA Messung 5 Meter direkt über Pelletheizstrahler (Abgasstrom)	$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{N}$	835	-	-	835
PM0.3 Messung 5 Meter direkt über Pelletheizstrahler (Abgasstrom)	$\mu\text{g}^2/\text{m}^3\text{N}$	122	-	-	122
360° 3-5 m Abstand (Phase 1)					
Partikelanzahl	$\#/\text{cm}^3$	8749	5771	7122	7214
Mittlerer Partikeldurchmesser	nm	37.3	58.9	49.4	48.5
LDSA kurzzeitiges Maximum	$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{N}$	30.0	47.1	112.2	63.1
LDSA Mittelwert	$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{N}$	18.0	18.5	18.5	18.3
PM0.3 Mittelwert	$\mu\text{g}^2/\text{m}^3\text{N}$	1.8	4.4	3.0	3.1
Stationär 1 m Abstand (Phase 2)					
Partikel Anzahl	$\#/\text{cm}^3$	13705	5461	12189	10452
Mittlerer Partikel Durchmesser	nm	36	61.4	51.2	49.5
LDSA kurzzeitiges Maximum	$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{N}$	85.2	115.5	274.7	158.5
LDSA Mittelwert	$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{N}$	28.1	18.1	31.3	25.8
PM0.3 Mittelwert	$\mu\text{g}^2/\text{m}^3\text{N}$	2.9	4.6	5.6	4.4

Tabelle 17: Umgebungsbelastung durch Partikel

Gemäss den Kriterien in Tabelle 16 ist die Qualität der Umgebungsluft im Umfeld des Pelletheizstrahlers während keiner der gemessenen Phasen als schlecht zu beurteilen, mit einer Ausnahme während des dritten Abbrandes. Die Qualität schwankt zwischen gut und mittel mit einem Mittelwert von $18.3 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{N}$ 360° um den Pelletheizstrahler mit 3-5 m Abstand und $12 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{N}$ stationär mit 1 m Abstand, was einer guten Luftqualität entspricht. Als Vergleich dazu dient die minimale Umgebungsbelastung von $12.5 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{N}$, welche der Umgebungsbelastung ohne Pelletheizstrahler entspricht. Ein zusätzlicher Vergleich bietet eine Studie über die Umgebungsbelastung durch den Verkehr in der

Stadt Zürich.¹ Dabei wurde an viel befahrenen Kreuzungen durchschnittlich $50 - 80 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3_{\text{N}}$ gemessen. Dies deutet darauf hin, dass die Umgebungsbelastung des Pelletheizstrahlers SKYFIRE zu keiner nennenswerten Verschlechterung der Luftqualität führt. Beim Abbrand 3 ist die Umgebungsbelastung LDSA über $250 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3_{\text{N}}$, was auf die eingeschränkte Luftzirkulation durch die Wetterschutzblende zurückzuführen ist. Dies zeigt, dass eine freie Abgasabführung wichtig ist, um die Umgebungsbelastung tief zu halten.

9.5 Fazit zu den Messungen

Der Pelletheizstrahler SKYFIRE weist Emissionswerte aus, welche die Anforderungen der Ökodesignverordnung (EU) 2015/1185 an Festbrennstoff-Einzelraumheizgeräten erfüllen würden. Der gemessene Staub enthält sehr geringe Anteile von gesundheitsschädlichem TC (Summe von OC und EC (d. h. Russ)). Es ist nicht davon auszugehen, dass eine Gefährdung der Gesundheit durch den Betrieb des Pelletheizstrahlers SKYFIRE im Freien besteht.

Diese Aussage kann nicht generell auf alle Pelletheizstrahler bezogen werden. Der geprüfte Typ verfügte über eine geregelte Luft- und Brennstoffzufuhr, über eine Brennkammer mit Flammführungsrohr sowie eine Abgasumlenkung nach der Brennkammer. Für einfachere Modelle ohne Regelung, bei denen sich der gesamte Brennstoff im Brennraum befindet, werden höhere Emissionen erwartet.

¹ M.Fierz, Automatisiertes Feinstaubmessnetzwerk für Nanopartikel, FHNW, 2016
Emissionsmessung eines Pelletheizstrahlers
Erstellungsdatum: 30.07.2021

10 Anhang: Beobachtungen während der Durchführung der Abbrände

Kaltstart, Anfeuern

Nach Einschalten des Pelletheizstrahlers gibt es einen kurzen Zeitraum mit sichtbarer Rauchentwicklung. Sobald sich sichtbare Flammen entwickelt haben, sind die Abgase optisch nur noch aufgrund der Wärmetönung wahrnehmbar.



Sichtbarer Rauch nach dem Einschalten



Kein sichtbarer Rauch, nachdem Flammen vorhanden

Abbildung 22: Sichtbarer Rauch beim Kaltstart

Vom Einschalten bis zum Erreichen des Betriebs bei Nennleistung (12 % CO₂) dauerte es bei den ersten beiden Abbränden knapp 20 Minuten, wobei die Flamme schon nach 10 Minuten sichtbar war. Beim Start des dritten Abbrands bei tieferen Aussentemperaturen (2 °C) löschte die Flamme wieder nach kurzer Zeit. Das System führte automatisch einen weiteren Zündversuch durch, der erfolgreich war. Die Nennwärmeleistung wurde bei diesem Abbrand erst nach 35 Minuten erreicht.



Erste Flamme



12 % CO₂ erreicht

Abbrand 1	+ 10 min	+ 18 min
Abbrand 2	+ 11 min	+ 19 min
Abbrand 3	+ 9 min (danach wieder ausgegangen)	+ 35 min

Tabelle 18: Zeitdauer vom Kaltstart bis zum Erreichen der Nennwärmeleistung.

Betrieb

Während des 1. Abbrandes gab es eine Unterbrechung der Pelletzufuhr durch ausbleibendes Nachrutschen der Pellets im Brennstoffvorratsbehälter. Durch einen manuellen Eingriff in den Brennstoffvorratsbehälter konnte die Brennstoffförderung wieder in Gang gebracht werden und die Anlage regelte sich selbstständig zurück auf Nominalbetrieb. Abbildung 20 zeigt dies am CO₂- und Abgastemperaturverlauf während der Unterbrechung der Brennstoffzufuhr.

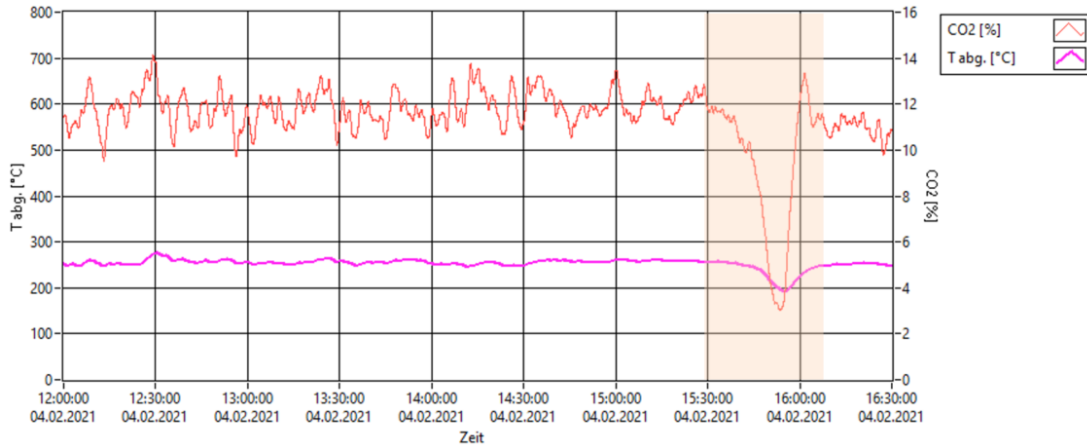


Abbildung 23: Abnahme CO₂ aufgrund einer Unterbrechung der Pelletzufuhr (Abbrand 1)

Ausbrand

Nach dem Ausschalten des Pelletheizstrahlers per Knopfdruck nehmen die Flammen innert weniger Minuten ab. Der Einfluss der Steuerung ist sehr direkt.

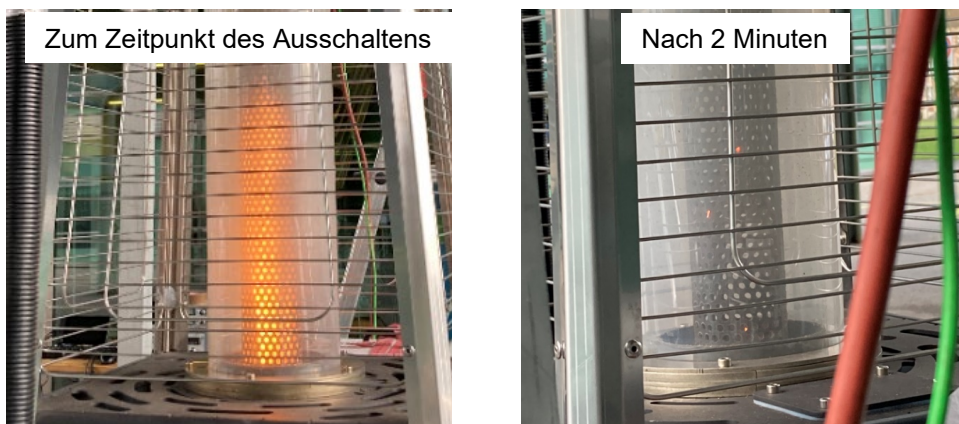


Abbildung 24: Abnahme der Flamme nach Ausschalten