

Emissionen von Ölheizkesseln im Start-Stopp Betrieb

im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Auftraggeber

Bezeichnung: Bundesamt für Umwelt, 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

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-22226

BAFU Projektleiter: Rainer Kegel
BAFU Vertragsnummer: 00.5082.PZ / 17A51823D

Autoren: Nemo Lohberger
Joris Strassburg
Tom Strebel

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

Zusammenfassung

Luftschadstoff-Emissionen von verschiedenen Quellen werden vom BAFU in der EMIS-Datenbank gesammelt. Für Ölheizkessel sind in dieser Datenbank bislang nur die Emissionsfrachten im Nennlastbetrieb enthalten. Da Ölheizkessel in der Regel häufig im Teillastbetrieb betrieben werden und dabei oft ein- und ausgeschaltet werden, wurde mit dieser Studie untersucht, ob die dabei auftretenden Emissionsfrachten für gewisse Schadstoffe erhöht sind.

Es wurden zwei gängige Ölheizkessel, ein Heizkessel mit kondensierendem Betrieb und einer mit nicht-kondensierendem Betrieb, geprüft. Diese wurden jeweils im kontinuierlichen Betrieb bei Nennwärmeleistung und im Start-Stopp-Betrieb (Teillast) betrieben.

Bei den normierten Emissionskonzentrationen (in mg/MJ) zeigt sich beim Start-Stopp-Betrieb ein Anstieg der CO- (Faktor 1.9 resp. 2.8), OGC- (Faktor 44 resp. 52) und der PAK-Emissionen (Faktor 1.8 resp. 11) gegenüber dem kontinuierlichen Betrieb. Die OGC-Emissionen liegen mit 4.4 resp. 6.7 mg/MJ knapp unter dem Wert im «Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen» [6] (7 mg/MJ).

Bei den absoluten Emissionsfrachten steigen die OGC-Emissionsfrachten bei beiden Kesseln signifikant (Faktor 13 resp. 16) und die PAK-Emissionsfrachten nur beim nicht-kondensierenden Kessel an (Faktor 3.3). Die CO-Emissionsfrachten steigen nicht an.

Der Anstieg der Emissionen im taktenden Betrieb ist messbar. Auf der Grundlage der vorliegenden Messungen, mit jeweils optimal eingestellten Brennern, sind die Emissionen jedoch nicht in einem Mass erhöht, welches eine Anpassung der Emissionsfaktoren im «Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen» [6] begründen könnte.

	Kontinuierlicher Betrieb bei Nennwärmeleistung				60 Zyklen im Start-Stopp-Betrieb (~30% der Nennleistung)				Emissionen normiert Verhältnisse Start-Stopp/ Nennlast	Emissionsfracht-Verhältnisse Start-Stopp/ Nennlast
Messgrösse	Emissionen normiert		Emissionsfrachten		Emissionen normiert		Emissionsfrachten			
Kondensierender Kessel OERTLI OSCR 18										
CO	0.54	mg/MJ	33	mg/h	1.0	mg/MJ	18	mg/h	1.9	0.6
NO _x als NO ₂	26.0	mg/MJ	1573	mg/h	23.6	mg/MJ	425	mg/h	0.9	0.3
OGC	0.15	mg/MJ	9.2	mg/h	6.7	mg/MJ	121	mg/h	44	13
Staub gravimetrisch	0.76	mg/MJ	46	mg/h	0.35	mg/MJ	6.4	mg/h	0.5	0.1
PAK*	0.54	µg/MJ	33	µg/h	0.99	µg/MJ	18	µg/h	1.8	0.5
Partikel-Anzahl	2.7.E+12	#/MJ	4.51E+10	#/s	2.8.E+12	#/MJ	1.4E+10	#/s	1.1	0.3
Part.-d (w)**	18	nm			15	nm			0.9	0.9
Russzahl	1	Mind. zwei Messungen			1	Mind. zwei Messungen			1.0	1.0
PAK* im Kondensat	1.9	µg/l	1.4	µg/h	0.55	µg/l	0.06	µg/h	0.3	0.04
PAK* Total	-	-	34	µg/h	-	-	18	µg/h	-	0.5
Oertli OPN 161 LEV/21 zusammen mit dem nicht kondensierenden Kessel LAX 30										
CO	0.36	mg/MJ	29	mg/h	1.0	mg/MJ	25	mg/h	2.8	0.9
NO _x als NO ₂	29	mg/MJ	2307	mg/h	26	mg/MJ	645	mg/h	0.9	0.3
OGC	0.08	mg/MJ	6.0	mg/h	4.4	mg/MJ	98	mg/h	52	16
Staub gravimetrisch	0.64	mg/MJ	51.8	mg/h	0.24	mg/MJ	5.9	mg/h	0.4	0.1
PAK*	0.54	µg/MJ	44	µg/h	5.9	µg/MJ	146	µg/h	11	3.3
Partikel-Anzahl	2.1.E+12	#/MJ	5.4E+10	#/s	2.5.E+12	#/MJ	1.9E+10	#/s	1.2	0.4
Part.-d(w)**	14	nm			14	nm			1	1
Russzahl	1	Mind. zwei Messungen			1	Mind. zwei Messungen			1	1

* Summe 16 EPA-PAK inkl. Beweisgrenze

Die Berechnungsmethoden sind in Kap. 5.4 beschrieben.

** Mittlerer geometrischer Partikeldurchmesser, gewichtet mit Anzahl

Tabelle 1: Emissionsfrachten von Ölheizkesseln bei Nenn- und Teillast (Start-Stopp-Betrieb)

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	5
2	AUFTRAGSUMFANG	5
2.1	Messgrundlagen.....	5
2.2	Messort	6
2.3	Vor Ort beteiligte Personen.....	6
2.4	Weitere beteiligte Stellen.....	6
3	MESSGERÄTE.....	6
3.1	Gasförmige Emissionen.....	6
3.2	Staub- und Partikelmessung	7
3.2.1	Gravimetrische Staubmessung	7
3.2.2	Kontinuierliche Staubmessung von Partikelanzahl und -durchmesser	7
3.3	PAK-Messung	8
3.4	Temperaturmessung.....	8
3.5	Druckmessung.....	8
3.6	Gewichtsmessung.....	8
3.7	Abgasgeschwindigkeits-Messung	9
3.8	Messung Volumenstrom des Kesselwassers	9
3.9	Russmessung.....	9
4	VERSUCHSAUFBAUTEN	10
4.1	Prüfstand kondensierender Kessel Oertli OSCR 18.....	10
4.1.1	OERTLI OSCR 18	12
4.2	Prüfstand Oertli OPN 161 LEV/21 zusammen mit dem nicht kondensierenden Kessel LAX 30.....	13
4.2.1	Oertli OPN-161 LEV/21 zusammen mit dem Heizkessel LAX 30.....	14
5	VERSUCHSABLÄUFE.....	16
5.1	Feuerungskontrolleurmessung (Messung nach BAFU-Messempfehlung).....	16
5.2	Nennlastbetrieb	16
5.3	Start-Stopp-Betrieb.....	17
5.4	Berechnungen.....	18
5.4.1	Emissionsfrachten der gasförmigen Emissionen.....	18
5.4.2	Emissionsfrachten der PAK- und Staubemissionen.....	18
5.4.3	Emissionen normiert mit der Brennstoffleistung	19
6	ERGEBNISSE	20
6.1	Kondensierender Kessel Oertli OSCR 18.....	20
6.1.1	Feuerungskontrolleurmessung (Messung nach BAFU-Messempfehlung).....	20
6.1.2	Messung bei kontinuierlichem Nennlastbetrieb.....	20
6.1.3	Messung beim Start-Stopp-Betrieb.....	22
6.1.4	Auswertung und Mittelwerte	23
6.2	Oertli OPN 161 LEV/21 zusammen mit dem nicht kondensierenden Kessel LAX 30.....	25
6.2.1	Feuerungskontrolleurmessung (Messung nach BAFU-Messempfehlung).....	25
6.2.2	Messung bei kontinuierlichem Nennlastbetrieb.....	25
6.2.3	Messung beim Start-Stopp-Betrieb.....	26
6.2.4	Auswertung und Mittelwerte	27
7	VERGLEICH DER EMISSIONEN MIT DEM FAKTENBLATT EMISSIONSFAKTOREN FEUERUNGEN	28
8	DISKUSSION DER RESULTATE	29
9	ANHANG.....	31
9.1	PAK-Analyse-Ergebnisse	31

Verwendete Abkürzungen

#/cm ³	Anzahl pro Kubikzentimeter
BAFU	Bundesamt für Umwelt
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
EDX	energie-dispersive Röntgenspektroskopie
FHNW	Fachhochschule Nordwestschweiz
g	Gramm
GC-HRMS	Gas-Chromatographie und hochauflösende Massenspektrometrie
hh:mm	Zeitdauer in Stunden und Minuten
h	Stunden
K	Kelvin
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
LDSA	Lung Deposited Surface Area
LRV	Luftreinhalte-Verordnung
m-%	Massenprozent
mg	Milligramm
min	Minute
nm	Nanometer
NO _x	Stickoxide
NO ₂	Stickstoffdioxid
O ₂	Sauerstoff
OGC	Organic Gaseous Carbon (Kohlenwasserstoffe)
Pa	Pascal
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (englisch PAH)
ppm	Parts per million
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer
s	Sekunden
T	Temperatur
µg	Mikrogramm
VOC	Volatile Organic Compound
v. EW	vom Endwert
v. MW	vom Messwert

1 Einleitung

Die Emissionen der verschiedenen Quellen von Luftschadstoffen und Treibhausgasen werden vom BAFU oder in dessen Auftrag erhoben und in einer Datenbank (Emissionsinformationssystem der Schweiz EMIS) gesammelt. Für Ölheizkessel sind in dieser Datenbank bislang nur die Emissionsfrachten im Nennlastbetrieb enthalten. Da Ölheizkessel in der Regel häufig im Teillastbetrieb betrieben werden und dabei oft ein- und ausgeschaltet werden, wurde mit dieser Studie untersucht, ob die dabei auftretenden Emissionsfrachten für gewisse Schadstoffe erhöht sind.

2 Auftragsumfang

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) sind im Juli und August 2022 die beim Start-Stopp-Betrieb entstehenden Emissionen von zwei gängigen Ölbrennern ermittelt worden.

- Der Kessel OERTLI OSCR 18 ist ein automatischer Heizkessel, bestehend aus einer Einheit mit Kesselkörper und Gebläsebrenner nach EN 15035, der kondensierend betrieben wird. Der Heizkessel kann die Leistung zwischen 30% und 100% der Nennwärmeleistung modulieren.
- Der Brenner Oertli OPN-161 LEV/21 ist ein Ölgebläsebrenner nach EN 267, der für diese Untersuchung zusammen mit einem nicht kondensierenden Heizkessel (Liebi LAX 30) betrieben wurde. Dieser Brenner kann die Leistung nicht modulieren.

Für die Messungen wurden zwei Prüfaufbauten im Labor der FHNW installiert. Die Inbetriebnahme wurde für beide Brenner mit Unterstützung eines Fachmanns der Firma Meier Tobler durchgeführt. Der Brennstoff war handelsübliches Heizöl extraleicht in Öko-Qualität. Um zu prüfen, ob die Kessel für den Versuch fachgerecht eingestellt waren, wurde durch einen Feuerungskontrolleur eine Messung nach BAFU-Messempfehlung durchgeführt (Emissionsmessung bei Feuerungen für Öl, Gas und Holz, 2018).

Um den Einfluss des Start-Stopp-Betriebs der Kessel auf die Emissionen zu ermitteln, wurde für beide Heizungen eine Referenzmessung bei Nennwärmelast über 6 Stunden durchgeführt. Im Start-Stopp-Betrieb wurden die Kessel mittels einer automatischen Zyklussteuerung so getaktet, dass die mittlere Leistung ca. 30 % der Nennwärmeleistung betrug.

2.1 Messgrundlagen

Die Messungen wurden soweit anwendbar gemäss folgenden Normen und Richtlinien durchgeführt:

1	Feuerungskontrolleurmessung	Messempfehlung «Emissionsmessung bei Feuerungen für Öl, Gas und Holz» (UV-1319-D), BAFU, 2018
2	Prüfaufbau und Emissionen	EN-304:2018 Heizkessel - Teil 4: Heizkessel mit Gebläsebrenner - Spezielle Anforderungen an Heizkessel mit Ölgebläsebrennern mit einer Leistung bis 70 kW und einem maximalen Betriebsdruck von 3 bar - Begriffe, besondere Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung
3	Staubmessung gravimetrisch	Die gravimetrischen Staubmessungen wurden durchgeführt gemäss EN 13284-1:2017 mit den Ergänzungen der EN 303 5:2021, Anhang A.
4	PAK-Messung	VDI 3874 Messen von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH) GC/MS-Verfahren
5	Russmessung	SN EN 267 Gebläsebrenner für flüssige Brennstoffe, Anhang A
6	Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen	Faktenblatt «Emissionsfaktoren Feuerungen», Bundesamt für Umwelt BAFU, 2015

2.2 Messort

Die Messungen wurden am Prüfstand der Prüfstelle für Holzfeuerungen STS 0396 an der Fachhochschule Nordwestschweiz in Windisch durchgeführt.

2.3 Vor Ort beteiligte Personen

Tom Strebel (Prüfstelle für Holzfeuerungen)
Nemo Lohberger (Prüfstelle für Holzfeuerungen)
Joris Strassburg (FHNW)
Andreas Tschumi (Meier Tobler AG, Bereitstellung und Inbetriebnahme der Kessel)
A. Leutwyler (A. Leutwyler AG, Feuerungskontrolleur, Messung nach BAFU-Messempfehlung)

2.4 Weitere beteiligte Stellen

Eurofins (PAK-Analyse der gesammelten Proben)

3 Messgeräte

3.1 Gasförmige Emissionen

Die Emissionen wurden gemessen gemäss Vorgaben der EN 303-5:2021: 2018, A.2.3.

Messgrösse	Messgerät Typ	Messunsicherheit der Prüfstelle für Holz- feuerungen STS 0396	Messunsicherheit nach EN 304:2018	Erfüllt?
Gasanalysatoren		95 % Confidence Level		
CO	Ultramat 23 (Siemens) Nicht-dispersive Infrarotspektrometrie	$\leq 1 \% \text{ v. MW}$	oder $\pm 5 \text{ ppm}^*)$	Ja
CO ₂	Ultramat 23 (Siemens) Nicht-dispersive Infrarotspektrometrie	$\leq 1 \% \text{ v. MW}$	$\pm 0.1 \text{ Vol-\%}$	Ja
O ₂	Ultramat 23 (Siemens) Paramagnetisch	$\leq 1 \% \text{ v. MW}$	$\pm 0.1 \text{ Vol-\%}$	Ja
NO _x	nCLD 82 (Eco Physics) Chemilumineszenz	$\leq 1 \% \text{ v. MW}$	oder $\pm 5 \text{ ppm}$	Ja
OGC	iFID (Testa) Flammenionisationsdetektor	$\leq 1 \% \text{ v. MW}$	oder $\pm 5 \text{ ppm}$	Ja

Tabelle 2: Gasanalysator Messunsicherheiten Daten (v. MW = vom Messwert)

3.2 Staub- und Partikelmessung

3.2.1 Gravimetrische Staubmessung

Die gravimetrischen Staubmessungen wurden durchgeführt gemäss EN 13284-1:2017 mit den Ergänzungen der EN 303-5:2021, Anhang A.

Verwendete Staubmesseinrichtungen: Out-Stack-Filtergerät, beheizt, Fabrikat Gothe, mit Glasfaser-Planfilter Ø 45 mm

		Einheit	Messung	Anforderung EN 13284-1:2017	Erfüllt?
Konfiguration der Staubmessung nach EN 303-5:2021 und EN 13284-1:2017					
Vorbehandlung der Filter	Trocknungstemperatur im Ofen	°C	110	$\geq 110 \pm 5^*$	Ja
	Trocknungsdauer im Ofen	h	2	≥ 1	Ja
	Abkühldauer im Exsikkator	h	≥ 6	≥ 4	Ja
Nachbehandlung der Filter	Trocknungstemperatur im Ofen	°C	110	$\geq 110 \pm 5^*$	Ja
	Trocknungsdauer im Ofen	h	2	≥ 1	Ja
	Abkühldauer im Exsikkator	h	≥ 4	≥ 4	Ja
Spüllösung	Eindampftemperatur im Ofen	°C	160	Eindampfen 110 Trocknen 110	Ja
	Trocknungsdauer im Ofen	h	2	≥ 1	Ja
	Abkühldauer im Exsikkator	h	≥ 20	≥ 4	Ja
Wägungen			Mittelwert aus 3 Ablesungen	Innerhalb 3 min, Ablesungen nach 1, 2 und 3 min	Ja
Filtertemperatur bei Probenahme		°C	110 $\pm 3/-1$	Auf Abgastemperatur oder $110 \pm 5^*$	Ja
*Anforderung aus EN 303-5:2021					

3.2.2 Kontinuierliche Staubmessung von Partikelanzahl und -durchmesser:

Verwendetes Messgerät: **Partector 2** von Naneos GmbH (Nachfolgemodell von DiSCmini, miniature Diffusion Size Classifier):

Liefert online Anzahl, mittleren geometrischen Durchmesser und LDSA (Lung Deposited Surface Area¹) mittels elektrostatischer Beladung der Partikel und Messung der Beladung mittels Elektrometer.

Messunsicherheit für die Partikelmessung: $\pm 30\%$ v. MW. Das Gerät wurde vorab mit einem SMPS kalibriert.

Verdünnung: **MD19-2E**, Rotating Disk Diluter for Particulate Emissions
Rotationsverdünner (Hersteller: Matter Aerosole) mit einstellbarem Verdünnungsfaktor

¹ Die LDSA ist eine Messgröße, die entwickelt wurde, um die negativen gesundheitlichen Auswirkungen von Partikeln zu bewerten, die sich in der Alveolarregion der menschlichen Atemwege ablagern.

3.3 PAK-Messung

Die Messung der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) wurde gemäss der Richtlinie VDI 3874 durchgeführt. Die Probenahme wurde durch die FHNW und die Analyse des Probengutes mittels GC-HRMS durch die Eurofins AG durchgeführt.

3.4 Temperaturmessung

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

Verwendetes Gerät:

- Ölbad: Haake F3
- Referenztemperatur: Kelvimat Typ 4323
- Messunsicherheit: ± 0.1 K

Folgende Temperatursensoren wurden verwendet:

Abgastemperatur:

Typ K ($\varnothing$ 3 mm)

Vorlauf- Rücklauf und Umgebungstemperatur:

Klasse A ($\varnothing$ 4 mm)

Mantelthermoelement,

PT100, Vierleiter,

3.5 Druckmessung

Umgebungsdruck

- Typenbezeichnung: Comet T7511
- Messunsicherheit: 294 Pa bei 980 mbar,
0.3 % v. MW

Kaminzug (Unterdruck im Kamin)

- Typenbezeichnung: LPX 1012
- Messunsicherheit: 0.74 Pa

3.6 Gewichtsmessung

Gewichtsmessung Brennstoff

- Typenbezeichnung: Mettler Toledo KSC600
- Messunsicherheit: 0.004 %

Gewichtsmessung Staubfilter

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

3.7 Abgasgeschwindigkeits-Messung

Flügelradanemometer, bis 500 °C einsetzbar:

- Typen-Bezeichnung:
 - Sensor: ZS25/27GE-mn20/500-2/p6
 - Messdatenumformer: flowterm NT
- Marke: Höntzsch
- Messbereich: 0.4...20 m/s
- Messunsicherheit:
 - Kennlinien-Linearisierung: bis zu < 0,9 % v. M. + 0,25 % v. E.
 - Frequenz-Kennlinie (Austauschbarkeit ist gewährleistet): < 1,5 % v. M. + 0,5 % v. E. (bis 40 m/s)

3.8 Messung Volumenstrom des Kesselwassers

Volumenstrom des Kesselwassers des kondensierenden Kessels

- Typenbezeichnung: promass 83 F, Coriolis-Massedurchfluss-Messsystem
- Messunsicherheit: ± 0.1 %

Volumenstrom des Kesselwassers des nicht kondensierenden Kessels

- Typenbezeichnung: promag p, magnetinduktives Durchflussmessgerät
- Messunsicherheit: ± 0.2 %

3.9 Russmessung

- Typenbezeichnung: Testo 308 Russzahl-Messgerät
- Messbereich: 0-6 RZ (Russzahl)
- Auflösung: 0.1 RZ
- Genauigkeit: ± 0.2 RZ

4 Versuchsaufbauten

4.1 Prüfstand kondensierender Kessel Oertli OSCR 18

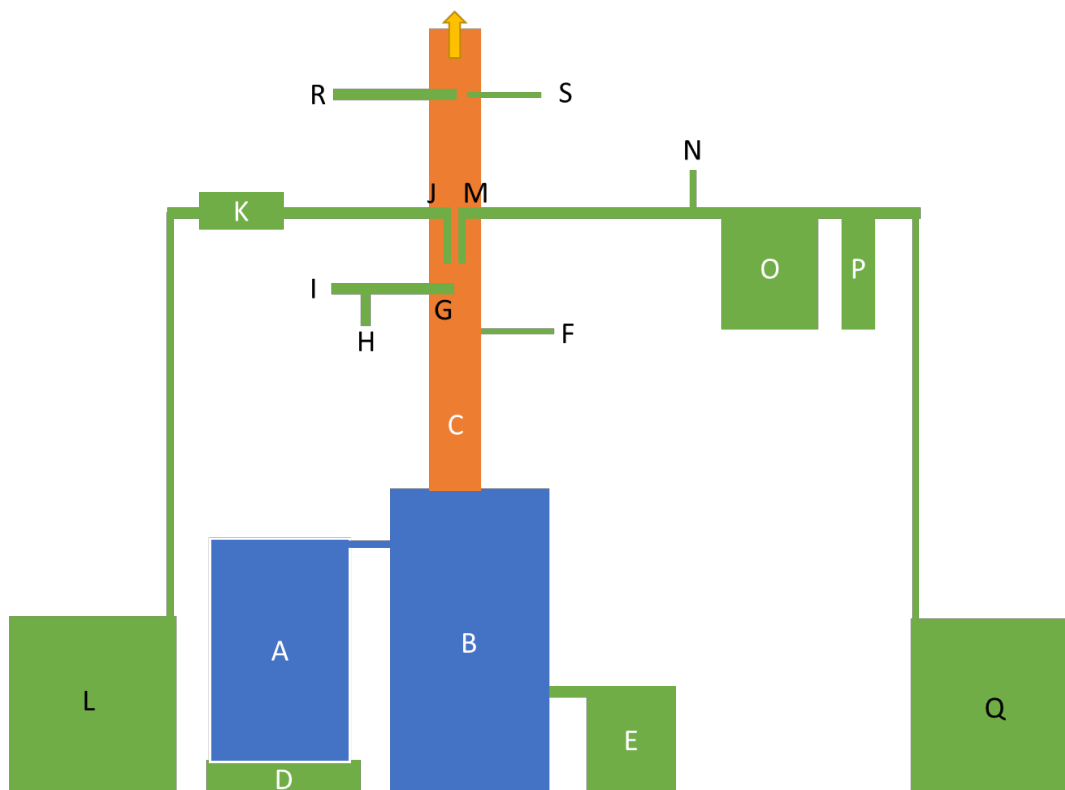


Abbildung 1: Schema des Prüfstandes

	Beschreibung (Komponenten von Prüfling (blau) und Messgeräten (grün) in Strömungsrichtung aufgelistet)
A	Brennstofftank (Ölfass mit Heizöl extraleicht Öko gemäss SN 181160-2)
B	Ölheizkessel OSCR 18 mit integriertem Brennwertwärmetauscher
C	Kamin mit Messtrecke
D	Waage für die Messung des Brennstoffverbrauchs
E	Auffangbehälter für Kondensat
F	Messung des Unterdrucks im Abgas
G	Entnahmestelle gasförmige Emissionen und Partikelanzahl und Partikeldurchmesser
H	Messgerät für Partikelanzahl und Partikeldurchmesser, Partektor nach Neutralisator und Rotationsverdünner
I	Gasanalysator für CO, CO ₂ , O ₂ , NO _x und OGC
J	Probenahme gravimetrische Staubmessung (Gothé)
K	Beheizter Planfilterhalter für gravimetrische Staubmessung
L	Absaugvorrichtung mit Volumenmessung (trockenes Abgas) für gravimetrische Staubmessung
M	Probenahme für PAK-Messung
N	Temperaturmessung für die Überwachung der Sondenkühlung
O	Kühlfalle für Kondensierung der PAK-Probenahme nach gekühlter Sonde
P	XAD-Filtereinheit für die Adsorption von gasförmigen PAK
Q	Absaugvorrichtung mit Volumenmessung (trockenes Abgas) für PAK-Messung
R	Flügelrad-Anemometer (nicht auf Foto ersichtlich)
S	Temperaturmessung im Abgas für Umrechnung auf Normvolumenstrom, Massenstrom und Anteil an abgesaugter Abgasmenge (Probenahmemenge)

Tabelle 3: Legende der einzelnen Komponenten des Prüfstands

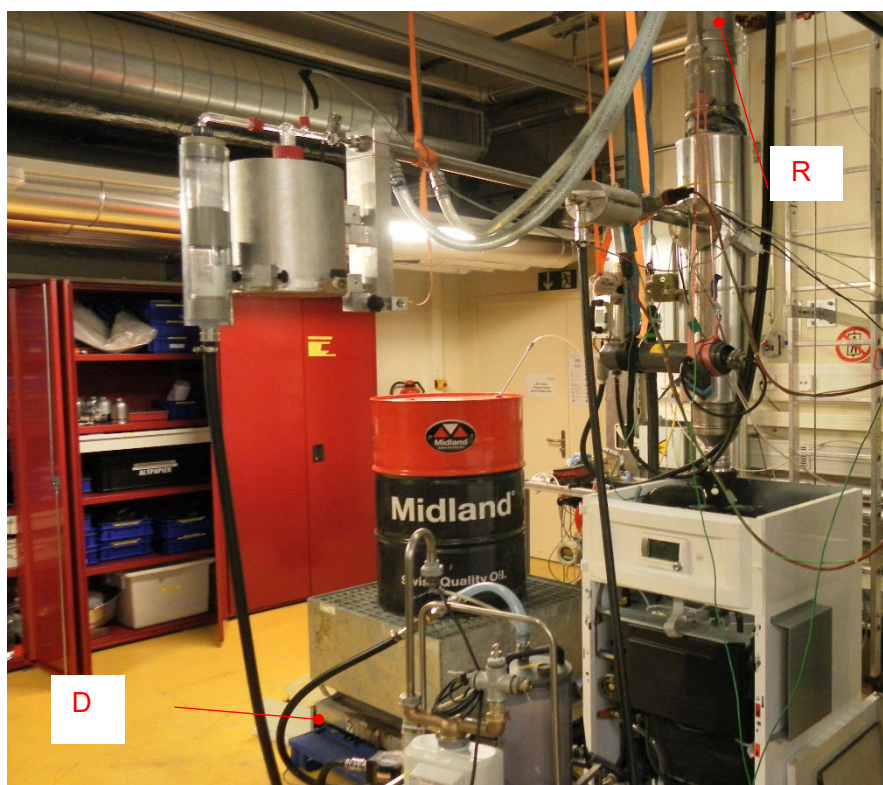
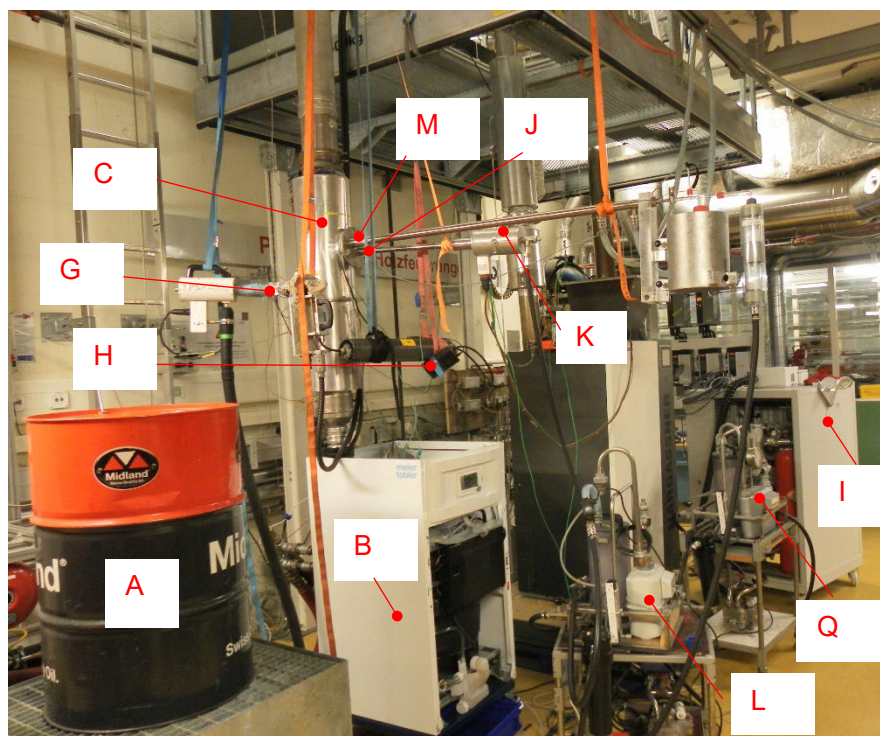


Abbildung 2: Fotos zum Prüfstand des kondensierenden Heizkessels (Oertli OSCR 18)

4.1.1 OERTLI OSCR 18

Der verwendete OERTLI OSCR 18 wurde durch die Firma Meier Tobler AG zur Verfügung gestellt. Der Heizkessel wird dort für die interne Schulung der Monteure verwendet. Der Heizkessel wurde nie im Dauerbetrieb über eine gesamte Heizperiode verwendet. Die Inbetriebnahme vor Ort erfolgte durch einen Fachmann von der Meier Tobler AG



Heizkessel		Einheit	OSCR 18	
			Minimalleistung	Volle Leistung
Leistungsaufnahme (LHV)		kW	10,4	17,6
Nennleistung (Pn) bei 50/30 °C		kW	10,6	18,0
Nennwärmeleistung (Pn) bei 80/60 °C		kW	10,0	17,1
Hi Wirkungsgrad	100 % Nennwärmeleistung (Pn) bei 80/60 °C	%	96,3	97,2
	Abgastemperatur	°C	< 60	< 70
	100 % Nennwärmeleistung (Pn) bei 50/30 °C	%	101,5	102,1
	Abgastemperatur	°C	<40	<45
	Abgastemperatur	°C	<40	<45
	Abgastemperatur	°C	<40	<45

Abbildung 3: Technische Daten des Heizkessels mit Brennwertwärmetauscher (Oertli OSCR 18)

4.2 Prüfstand Oertli OPN 161 LEV/21 zusammen mit dem nicht kondensierenden Kessel LAX 30

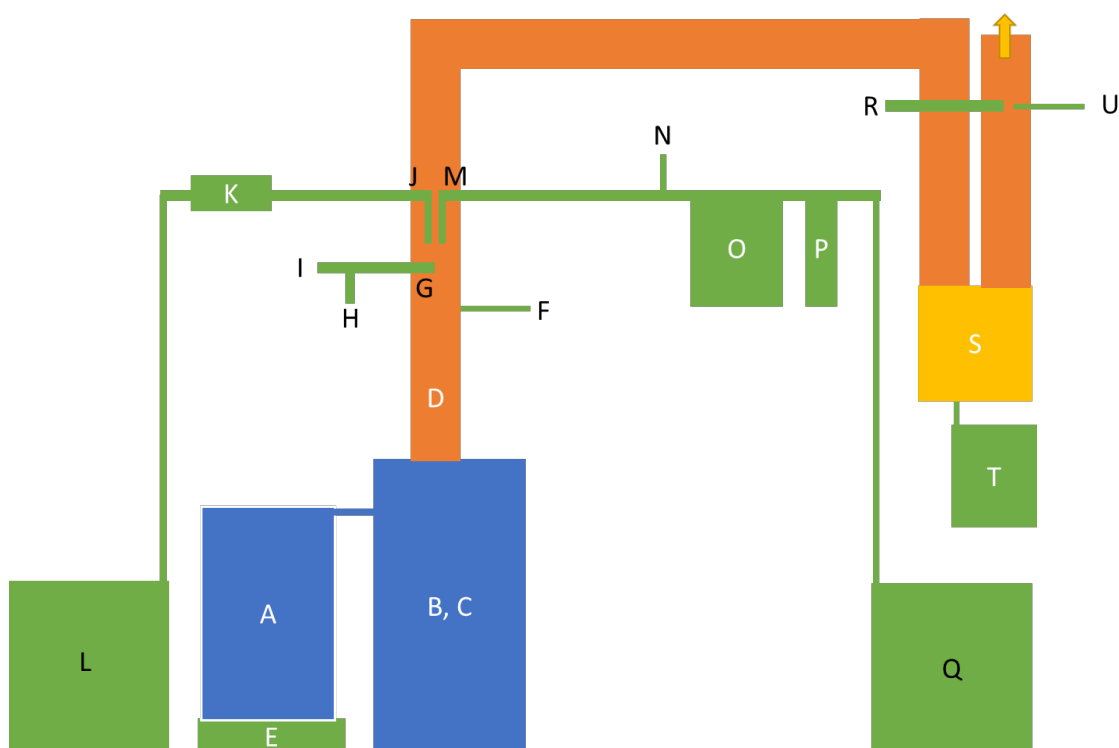


Abbildung 4: Schema des Prüfstandes

	Beschreibung
A	Brennstofftank (Ölfass mit Heizöl extraleicht Öko gemäss SN 181160-2)
B	Ölheizkessel LAX 30 (Bis 60 kW Leistung)
C	Ölbrenner Oertli OPN-161 LEV/21
D	Kamin mit Messtrecke
E	Waage für die Messung des Brennstoffverbrauchs
F	Messung des Unterdrucks im Abgas
G	Entnahmestelle gasförmige Emissionen und Partikelanzahl und Partikeldurchmesser
H	Messgerät für Partikelanzahl und Partikeldurchmesser, Partektor nach Neutralisator und Rotationsverdünner
I	Gasanalysator für CO, CO ₂ , O ₂ , NO _x und OGC
J	Probenahme gravimetrische Staubmessung (Gothe)
K	Beheizter Planfilterhalter für gravimetrische Staubmessung
L	Absaugvorrichtung mit Volumenmessung (trockenes Abgas) für gravimetrische Staubmessung
M	Probenahme für PAK-Messung
N	Temperaturmessung für die Überwachung der Sondenkühlung
O	Kühlfalle für Kondensierung der PAK-Probenahme nach gekühlter Sonde
P	XAD-Filtereinheit für die Adsorption von gasförmigen PAK
Q	Absaugvorrichtung mit Volumenmessung (trockenes Abgas) für PAK-Messung
R	Flügelrad-Anemometer (nicht auf Foto ersichtlich)
S	Brennwertwärmetauscher
T	Auffangbehälter für Kondensat
U	Temperaturmessung im Abgas für Umrechnung auf Normvolumenstrom, Massenstrom und Anteil an abgesaugter Abgasmenge (Probenahmemenge)

Tabelle 4: Legende der einzelnen Komponenten des Prüfstands

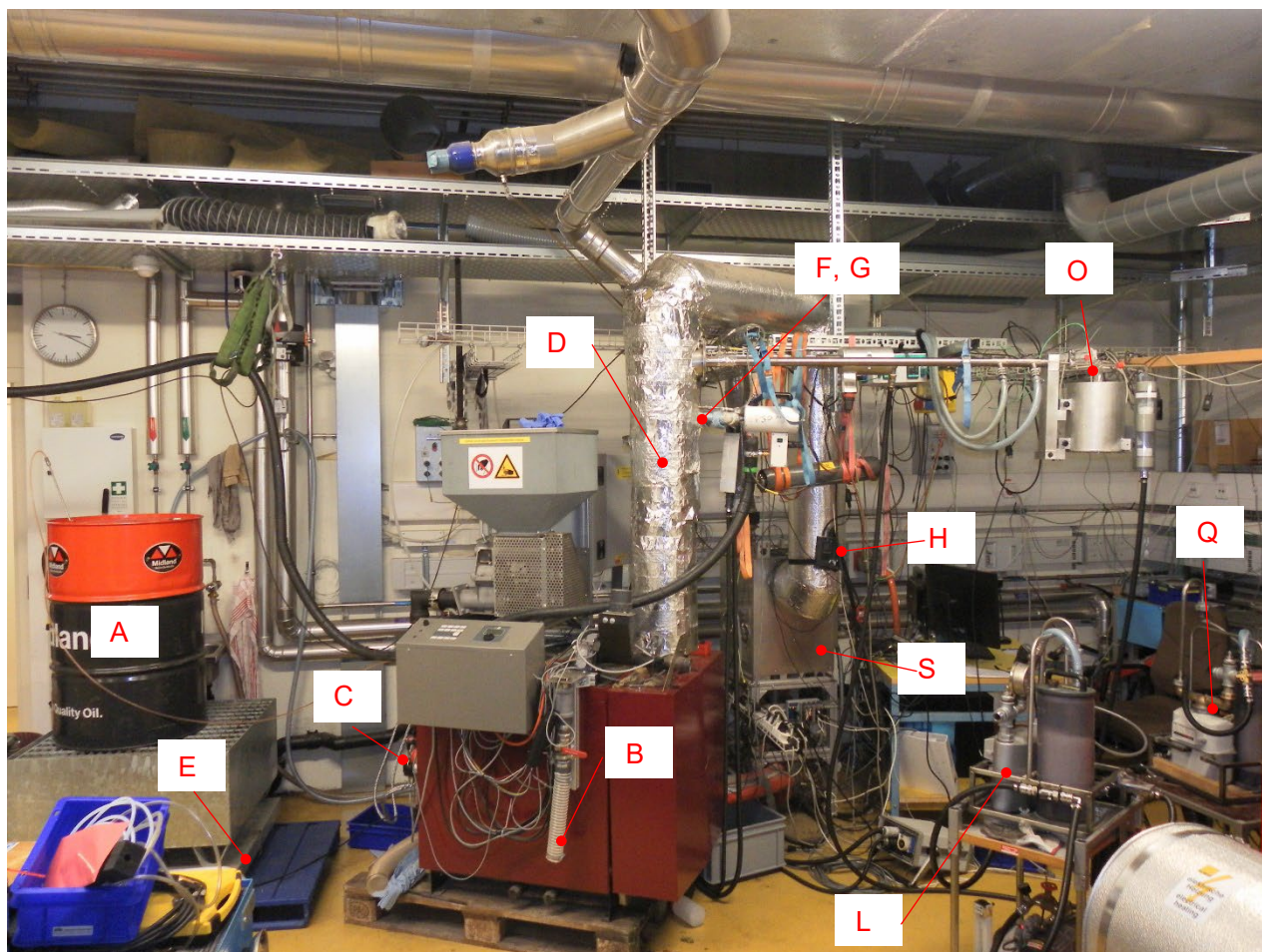


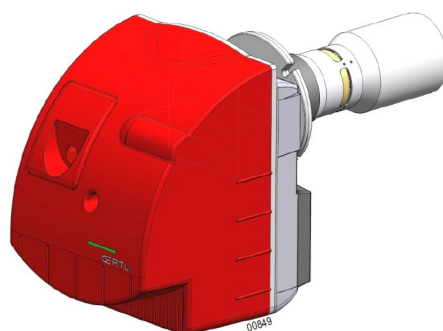
Abbildung 5: Foto des nicht kondensierenden Heizkessels (Heizkessel: LAX 30, Brenner: OPN-161 LEV/21)

4.2.1 Oertli OPN-161 LEV/21 zusammen mit dem Heizkessel LAX 30

Der verwendete OERTLI OPN-161 LEV/21 wurde durch die Firma Meier Tobler AG zur Verfügung gestellt. Der Brenner wird dort für die interne Schulung der Monteure verwendet.

Der Brenner wurde nie im Dauerbetrieb über eine gesamte Heizperiode verwendet. Die Inbetriebnahme vor Ort erfolgte durch einen Fachmann der Meier Tobler AG

Der Heizkessel Liebi LAX 30 ist im Besitz der Fachhochschule Nordwestschweiz und wird dort für die Untersuchung von unterschiedlichen Verbrennungssystemen verwendet.



Brenner		OEN 161 LEV OPN 161 LEV OCN 161 LEV OPN 161 LEV-F OCN 161 LEV-F OPN 161 LEV-CH
Zulassungs-Nr. VKF	17142	
Betrieb	1-stufig	
Leistungsbereiche (kW) ⁽¹⁾	16 → 21	
Öldurchfluss (kg/h) ⁽²⁾	1.4 → 1.8	
Aufgenommene Leistung (W)	210	
Nennleistung des Motors (W)	90	
Schallpegel bei 1 m (dBA)	62	
Nettogewicht (kg)	12	
Bruttogewicht (kg)	14	
Flammkopf Markierung + Flammrohr	–	

Abbildung 6: Technische Daten des Ölbrenners OPN-161 LEV/21

Technische Daten			Typ	LAX 30
Allgemein	Feuerungsleistungsbereich		kW	36-60
	Wärmeleistung Nennlast		kW	60
	Kleinste Wärmeleistung		kW	36
	Betriebsdruck max.		bar	3,0
	Prüfdruck		bar	4,6
	Kesseltemperatur max.		°C	92
	Rücklauftemperatur min.		°C	60
	Wasserinhalt		l	144
	Gewicht (fertig verschalt)		kg	261
	Heizgasseitiger Widerstand		mbar	0.20 – 0.50
Abmessungen	Elektrische Apparate gesamt	Leistungsaufnahme max.	W	40
		Breite	mm	710
		Tiefe	mm	1275
	Einbringmasse	Höhe	mm	1740
		Breite	mm	630
		Tiefe	mm	1010
		Höhe	mm	1720
Verbrennung	Abgastemperatur 5-Punkt-Mittelwert		°C	160
	NOx-Gehalt		mg/m3	110
Kamin	Rauchrohr-Durchmesser		mm	150

Abbildung 7: Technische Daten des nicht kondensieren Heizkessels (LAX 30)

5 Versuchsabläufe

Die Kessel wurden vor den Versuchen zusammen mit der Firma Meyer Tobler in Betrieb genommen. Nachfolgend werden die Abläufe für die Versuche beschrieben.

5.1 Feuerungskontrolleurmessung (Messung nach BAFU-Messempfehlung)

- Der Kessel wurde so lange betrieben, bis die Vorlauftemperatur den eingestellten Sollwert erreicht hatte.
- Der Kessel wurde ausgeschaltet für eine Minute
- Der Kessel wurde wieder eingeschaltet und es wurde vom Feuerungskontrolleur eine Messung gemäss der Messempfehlung des BAFU durchgeführt.

5.2 Nennlastbetrieb

- Der Kessel wurde so lange betrieben, bis die Vorlauftemperatur den eingestellten Sollwert erreicht hatte und alle gemessenen Werte stationär waren.
- Anschliessend wurde der Kessel für mindestens weitere 30 Minuten betrieben, bevor die Messungen gestartet wurden.
- Damit genügend grosse Probenahme-Mengen zur Wägung des Staubs respektive für die Analyse der PAK gesammelt werden konnten, wurde die minimale Messperiode auf 6 Stunden festgelegt.
- Die Abgasanalyse und Messung der Emissionen (CO, NO_x, OGC) war über die gesamte Betriebszeit des Kessels eingeschaltet.
- Die diskontinuierliche Russmessung nach SN EN 267 (Anhang A) wurde während der Messphase mindestens zwei Mal durchgeführt und dauert ca. 1 min.

5.3 Start-Stopp-Betrieb

- Der Oertli OSCR 18 und der OPN-161 LEV/21 wurden so lange betrieben, bis die Vorlauftemperatur den eingestellten Sollwert erreicht hatte und alle gemessenen Werte stationär waren.
- Anschliessend wurden die Kessel für weitere 30 Minuten im Start-Stopp-Modus betrieben, bevor der Auswertezeitraum begann.
- Vorgehen Start-Stopp-Versuche mit dem Oertli OSCR 18:
 - o Der kondensierende Kessel Oertli OSCR 18 ist in seiner Leistung zwischen 10.4 und 18 kW modulierbar. Im Start-Stopp-Betrieb wurde er mit minimaler Leistung gefahren (ca. 10 kW = 58% der Nennwärmeleistung). Am CO₂-Verlauf in Abbildung 8 ist erkennbar, zu welchem Zeitpunkt der Kessel tatsächlich Öl verbrannt hat. Der Brenner wurde für 4.5 Minuten betrieben, dann ausgeschaltet (AUS-Befehl über 10V-Schnittstelle) und nach 6 Minuten wieder eingeschaltet. Dies entspricht einer mittleren Leistung von 30% der Nennwärmeleistung. Für die Auswertung wichtig war die Tatsache, dass der Oertli OSCR 18 standardmässig nach dem Löschen der Flamme die Gebläsedrehzahl für zwei Minuten auf das Maximum erhöht, bevor das Gebläse ausgeschaltet wird.
- Vorgehen Start-Stopp-Versuche mit dem Oertli OPN-161 LEV/21:
 - o Die Leistung des Oertli OPN-161 LEV/21 wurde mittels Öldruck-Einstellschraube auf 21 kW eingestellt. Der Brenner kann die Leistung nicht modulieren. Im Start-Stopp-Betrieb wurde der Brenner ca. 5 min betrieben, gefolgt von einer Stillstandszeit von 11 Minuten (Abbildung 9). Dies entspricht einer mittleren Leistung von 30% der Nennwärmeleistung.
- Die Pumpen für die PAK- und die gravimetrische Staubmessung wurden in beiden Fällen eingeschaltet, sobald die CO₂-Konzentration im Abgas über 0.2 Vol% gestiegen ist und wieder ausgeschaltet, sobald dieser Schwellenwert unterschritten wurde. Dies ist in Abbildung 8 und Abbildung 9 am Verlauf von «valve open» erkennbar. Das Ausschalten war nötig, damit die Probe während der Zeit, in welcher der Kessel ausgeschaltet war, nicht unnötig verdünnt wird.
- Die Gasanalyse des Abgases, die kontinuierliche Staubmessung und die Abgasgeschwindigkeit wurde über die gesamte Betriebsdauer des Kessels gemessen.
- Die Messung lief so lange, bis mindestens 60 Start-Stopp-Zyklen durchgeführt wurden.
- Die diskontinuierliche Russmessung wurde während der Messphase mindestens zwei Mal durchgeführt.

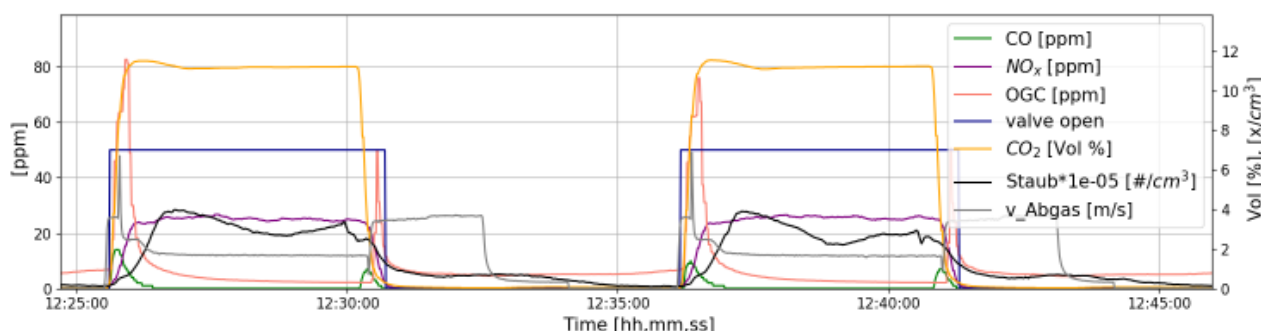


Abbildung 8: Zwei Start-Stopp-Zyklen des kondensierenden Kessels Oertli OSCR 18

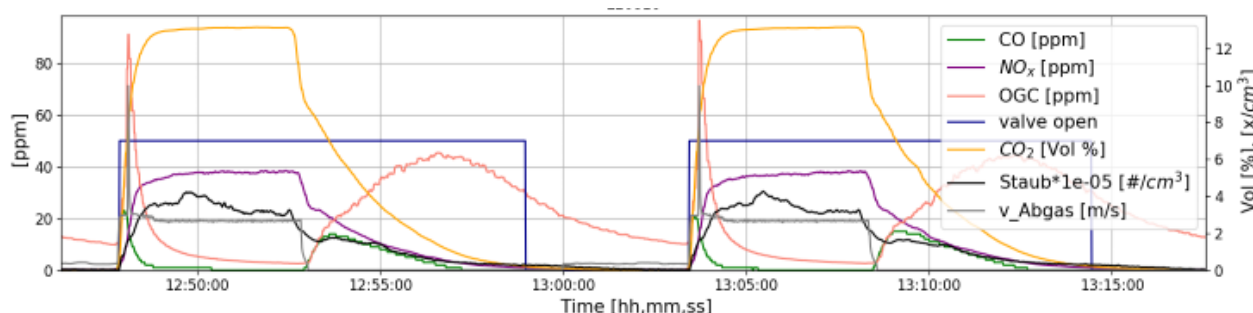


Abbildung 9: Zwei Start-Stopp-Zyklen des OPN-161 LEV/21 zusammen mit dem nicht kondensierenden Kessel LAX 30

5.4 Berechnungen

Die Konzentrationen der Emissionen im Abgas der Kessel wurden in absolute Emissionsfrachten respektive in Massenströme (z. B. mg/h) umgerechnet. Dazu wurden die Konzentrationen mit dem Abgasvolumenstrom verrechnet. Um eine Vergleichbarkeit mit dem «Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen» [6] herzustellen, wurden die Emissionsfrachten ausserdem in mg/MJ umgerechnet.

5.4.1 Emissionsfrachten der gasförmigen Emissionen

Die gasförmigen Emissionen x [ppm] (CO, OGC und NO_x in ppm) werden mit der Normdichte ρ_{xNorm} (bei 1013 mbar und 273.15 K) und mit dem Abgasvolumenstrom multipliziert (Formel (2)). Der Abgasvolumenstrom (feucht) wird mittels der Abgasgeschwindigkeit v_{Abgas} und der Querschnittsfläche des Abgasrohres A_{Abgas} berechnet. Die CO- und NO_x-Emissionen werden im trockenen Abgas gemessen. Deshalb muss das Abgasvolumen für die Berechnung der CO- und NO_x-Emissionsfrachten mittels des Faktors F_{wf} auf das trockene Abgas umgerechnet werden ($F_{wf}=1$ für OGC, da dieses feucht gemessen wird). Die Messung des Abgasvolumenstroms erfolgte in beiden Testaufbauten, nachdem das Abgas teilweise auskondensiert wurde und das Abgas somit eine relative Feuchte von 100 % hat. Beim Oertli OSCR 1 geschah dies innerhalb des Heizkessels. Beim Oertli OPN-161 LEV/21 zusammen mit dem nicht kondensierenden Kessel LAX 30 wurden die Abgase in einem externen Brennwertwärmetauscher auskondensiert. Die verbleibende Restfeuchte im Abgas und damit auch der Faktor F_{wf} ergeben sich daher aus dem temperaturabhängigen Partialdruck des Wassers und dem Druck und der Temperatur des Abgases.

Die Massenströme werden kontinuierlich für jeden Datenpunkt berechnet und anschliessend über die gesamte Messperiode gemittelt.

$$\dot{V}_{AbgasN_i} \left[\frac{m^3_N}{s} \right] = v_{Abgas_i} \left[\frac{m}{s} \right] \cdot A_{Abgas} [m^2] \cdot \frac{T_{Norm} [K]}{T_{Abgas} [K]} \cdot \frac{P_{Atm} [Pa]}{P_{Norm} [Pa]} \quad (1)$$

$$x_{mass_i} \left[\frac{mg}{h} \right] = x_i [ppm] \cdot \rho_{xNorm} \left[\frac{kg}{m^3_N} \right] \cdot \dot{V}_{AbgasN_i} \left[\frac{m^3_N}{s} \right] \cdot F_{wf_i} \cdot 3.6 \cdot 10^3 \left[\frac{s}{h} \right] \quad (2)$$

$$x_{mass} \left[\frac{mg}{h} \right] = \frac{\sum_{i=1}^n x_{mass_i} \left[\frac{mg}{h} \right]}{n} \quad (3)$$

5.4.2 Emissionsfrachten der PAK- und Staubemissionen

Die Erfassung von Staub und PAK erfolgt durch Absaugen von Abgas. Staub wird mittels eines beheizten Filters direkt nach der Entnahmestelle gesammelt, PAK werden zusammen mit dem Wasser im Abgas auskondensiert. In beiden Fällen wird das abgesaugte Volumen gemessen, nachdem das Abgas getrocknet wurde. Die Werte liegen nach der Probenahme und der Analyse zuerst als Konzentration in mg pro trockenem Abgasvolumen vor. Um die gemittelten Massenströme von Staub und PAK im Abgas zu berechnen, muss die Konzentration auf Normbedingungen umgerechnet werden und mit dem mittleren Normabgasvolumenstrom multipliziert werden. Dazu wird die Abgasgeschwindigkeit $\bar{v}_{Abgas}$ nur in der Zeit während Probenahme gemittelt.

$$x_N \left[\frac{mg}{m^3_N} \right] = x \left[\frac{mg}{m^3} \right] \cdot \frac{T_{Norm} [K]}{T_{Absaugung} [K]} \cdot \frac{P_{Atm} [Pa]}{P_{Norm} [Pa]} \quad (4)$$

$$\bar{V}_{AbgasN} \left[\frac{m^3_N}{s} \right] = v_{Abgas} \left[\frac{m}{s} \right] \cdot A_{Abgas} [m^2] \cdot \frac{T_{Norm} [K]}{T_{Abgas} [K]} \cdot \frac{P_{Atm} [Pa]}{P_{Norm} [Pa]} \quad (5)$$

$$x_{mass} \left[\frac{mg}{h} \right] = x_N \left[\frac{mg}{m^3_N} \right] \cdot \bar{V}_{AbgasN} \left[\frac{m^3_N}{s} \right] \cdot F_{wf} \cdot 3.6 \cdot 10^3 \left[\frac{s}{h} \right] \quad (6)$$

Der mit (6) ermittelte Emissions-Massenstrom bezieht sich nur auf die Zeit, während der die Absaugung in Betrieb war. Für den Start-Stopp-Betrieb wird angenommen, dass keine PAK- oder Staubemissionen emittiert werden, während der Zeit, in der die Absaugung nicht läuft und auch der Heizkessel nicht in Betrieb ist. Um den Emissions-Massenstrom über den gesamten Versuchszeitraum bestimmen zu können, wird der gemessene Emissions-Massenstrom mit der Betriebszeit korrigiert.

$$x_{mass\,Start/Stopp} \left[\frac{mg}{h} \right] = x_{mass} \left[\frac{mg}{h} \right] \cdot \frac{Zeit_{Absaugung\,an}}{Zeit_{Gesamt}} \quad (7)$$

5.4.3 Emissionen normiert mit der Brennstoffleistung

Die Emissionen normiert mit der Brennstoffleistung $x_{MJ} \left[\frac{mg}{MJ} \right]$ werden aus der mittleren Fracht $x_{mass} \left[\frac{mg}{h} \right]$, dem gemessenen mittleren Ölverbrauch $\dot{m} \left[\frac{kg}{h} \right]$ und dem Heizwert $Hu \left[\frac{MJ}{kg} \right]$ berechnet.¹

$$x_{MJ} \left[\frac{mg}{MJ} \right] = \frac{x_{mass} \left[\frac{mg}{h} \right]}{\dot{m} \left[\frac{kg}{h} \right] \cdot Hu \left[\frac{MJ}{kg} \right]} \quad (8)$$

$$Hu = 42.9 \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$

¹ Bei der vereinfachten Berechnungsmethode gemäss «Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen» [6] werden die gemittelten Emissionskonzentrationen auf 3% O₂ normiert und mittels der Beziehung $V_{Abgas@3\%O_2} = 12.4 \left[\frac{Nm^3}{kg_{Heizöl}} \right]$, dem Heizwert $Hu = 42.9 \left[\frac{MJ}{kg} \right]$ und der Normdichte auf die leistungsnormierten Emissionen in mg/MJ umgerechnet. Für den Dauerbetrieb stellt diese Methode kein Problem dar und liefert sinnvolle Ergebnisse. Der Start-Stopp Betrieb zeichnet sich jedoch durch grosse Schwankungen des Abgasvolumenstroms, des Restsauerstoffgehalts und der Emissionen aus, was bei dieser Berechnungsmethode zu grossen Fehlern führen kann. Insbesondere beim Löschen der Flamme mit hohen O₂-Werten bei gleichzeitig sehr geringem Abgasvolumenstrom (Gebläse ist aus) eignet sich die hier verwendete Methode gemäss Kap. 5.4 viel besser.

6 Ergebnisse

6.1 Kondensierender Kessel Oertli OSCR 18

6.1.1 Feuerungskontrolleurmessung (Messung nach BAFU-Messempfehlung)

Um zu prüfen, ob der Kessel für den Versuch einwandfrei funktionierte, wurde von einem Feuerungskontrolleur eine Messung nach BAFU-Messempfehlung durchgeführt. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Messung nach Messempfehlung abgebildet. Die vorgegebenen Grenzwerte der LRV wurden eingehalten.

Messgrösse	Messwert	Anforderung LRV-Anhang 3 Ziffer 411	Erfüllt?
O ₂ [Vol %]	3.3	-	-
CO ₂ [Vol %]	13.0	-	-
CO [mg/m ³ @ 3Vol%O ₂]	2	80	Ja
NO _x [mg/m ³ @ 3Vol%O ₂]	89	120	Ja

Tabelle 5: Resultate der Messung nach Messempfehlung des kondensierenden Kessels. Feuerungskontrolleur: A. Leutwyler AG. Datum 11.08.22 15:35

6.1.2 Messung bei kontinuierlichem Nennlastbetrieb

Sobald sich der stationäre Betrieb (konstante Temperaturen und Abgaswerte) eingestellt hatte, wurden die PAK-Messung und die gravimetrische Staubmessung gestartet. Der Messzeitraum ist erkennbar an der «valve open»-Kurve in der Abbildung 10. Die Mittelwertbildung für alle Emissionen erfolgte zwischen 12:00 und 18:00 Uhr. Wie in Abbildung 10 und

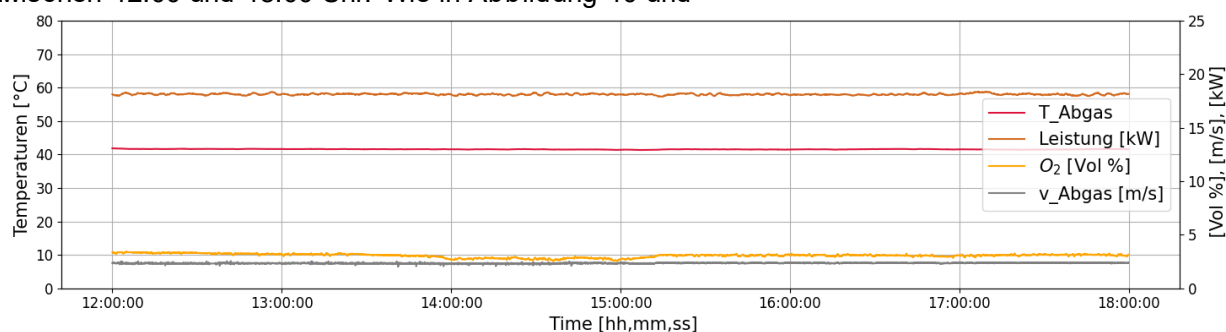


Abbildung 11 ersichtlich ist, waren alle Messgrössen, welche für die Beurteilung der Stationarität wichtig sind, konstant.

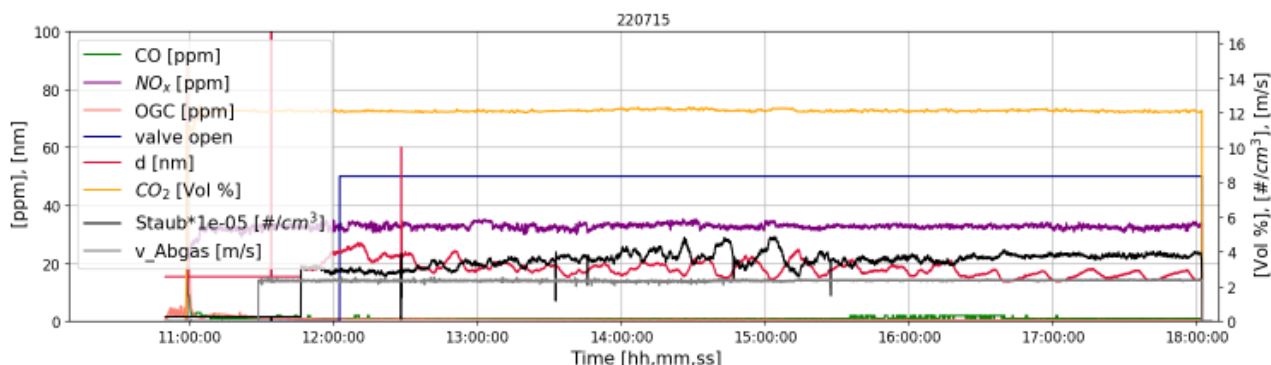


Abbildung 10: Verlauf der Emissionen, Oertli OSCR 18, Nennwärmeleistung, gesamte Messperiode

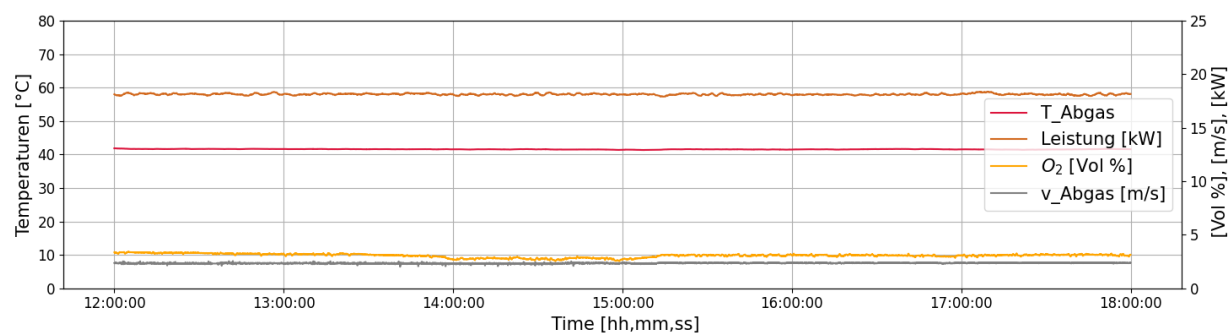


Abbildung 11: Temperatur und Betriebsdaten, Oertli OSCR 18, Nennwärmeleistung, gesamte Messperiode

6.1.3 Messung beim Start-Stopp-Betrieb

Der Kessel wurde so lange bei Nennleistung betrieben, bis die Rücklauftemperatur den Sollwert erreicht hatte und die Temperaturen konstant waren (09:11 Uhr, siehe Abbildung 12). Danach wurde in den Start-Stopp-Betrieb gewechselt. Auswertezeitraum (10:00 - 21:00 Uhr) mit mindestens 60 Zyklen. Abbildung 12 zeigt die Daten der Gasanalyse und der kontinuierlichen Staubmessung über die gesamte Messperiode. Abbildung 13 zeigt die Emissionsverläufe über zwei Zyklen. Die CO- und OGC-Konzentrationen haben jeweils einen Peak bei der Zündung (CO₂ steigt an) und beim Löschen der Flamme (CO₂ fällt ab). Grosse Kohlenwasserstoffe brauchen mehr Zeit auf ihrem Weg durch die Messleitung, was den OGC-Verlauf nach den Peaks (geht nur langsam zurück) erklären könnte. Die NO_x- und die Staubemissionen nehmen proportional zum CO₂-Verlauf ab. Der mittlere geometrische Durchmesser (d) der Partikel ist, typisch für Ölfeuerungen, klein (im Vergleich zu Holzfeuerungen zum Beispiel).

Der Verlauf von «valve open» zeigt, wann die Absaugung der gravimetrischen Staubmessung und der PAK-Messung eingeschaltet war (Kriterium: CO₂-Konzentration > 0.2% (vgl. Kap. 5.3)). Das Signal der kontinuierlichen Staubmessung (Staub*1e-05) ist verzögert, wegen des grossen Leitungsvolumens und der geringen Absaugmenge/Absauggeschwindigkeit. Dies ist auch am langsamen Anstieg erkennbar zu Beginn. D.h. im Abgas selbst ist bei CO₂ < 0.2% höchstwahrscheinlich kein Staub aus der Verbrennung mehr im Abgas. Umso mehr als das Gebläse voll aufdreht nach Löschen der Flamme. Deshalb wurde die Absaugung der gravimetrischen Staubmessung bei CO₂ < 0.2% gestoppt, um die Verdünnung durch Luft und somit den Messfehler gering zu halten.

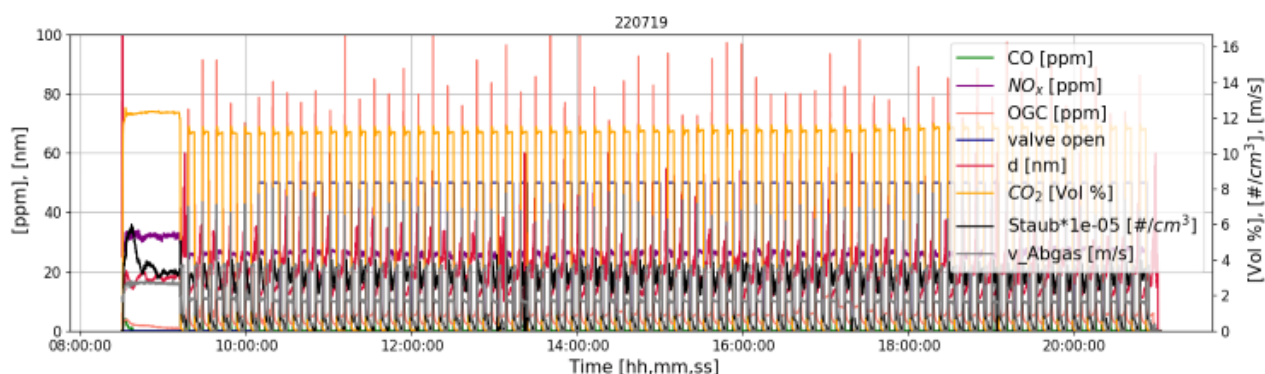


Abbildung 12: Verlauf der Emissionen, Oertli OSCR 18, Start-Stopp-Betrieb, gesamte Messperiode

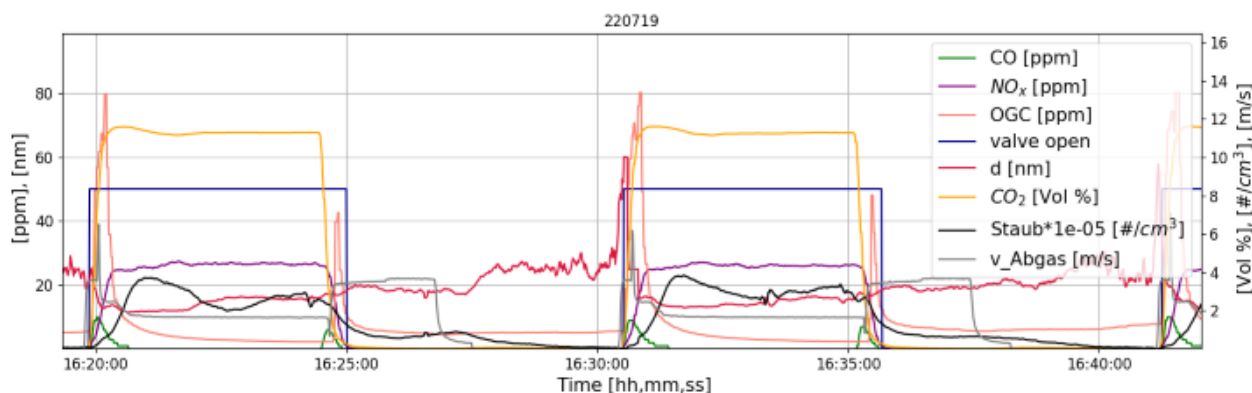


Abbildung 13: Verlauf der Emissionen, Oertli OSCR 18, Start-Stopp-Betrieb, Zyklus

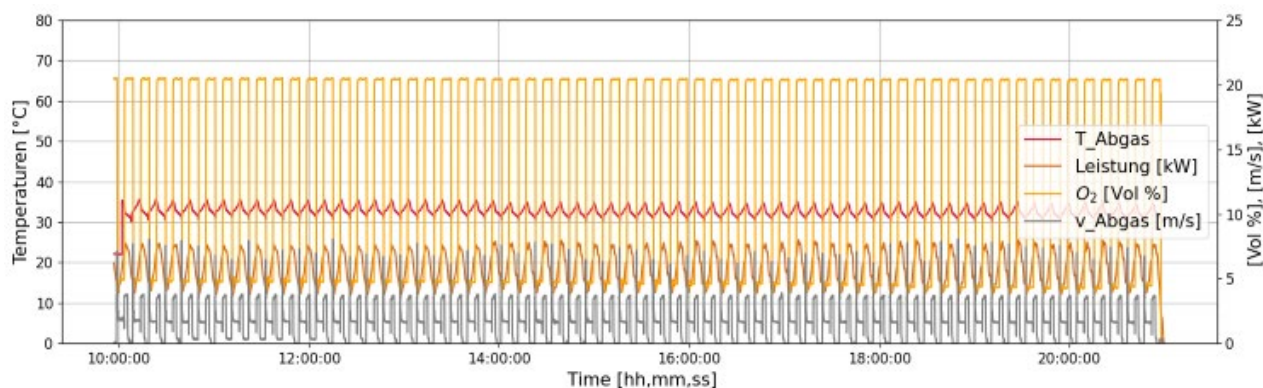


Abbildung 14: Verlauf Temperatur- und Betriebsdaten, Oertli OSCR 18, Start-Stopp-Betrieb, gesamte Messperiode

6.1.4 Auswertung und Mittelwerte

	Nennwärmeleistung Oertli OSCR 18				60 Zyklen im Start-Stopp-Betrieb Oertli OSCR 18				Verhältnis Start-Stopp/ Nennlast	
Startzeit	15.07.2022 12:00				19.07.2022 10:00					
Endzeit	15.07.2022 18:00				19.07.2022 21:00					
Leistung	18	kW	gemittelt über ge- samte Messperi- ode		5.8	kW	gemittelt über ge- samte Messperi- ode		0.3	
Brennstoff- leistung	61	MJ/h			18	MJ/h			0.3	
O ₂	3.0	%			6	%	gemittelt während Absaugung		2.1	
CO ₂	12	%			10	%	PAK/Staub (CO ₂ > 0.2%)		0.8	
Abgas Volu- menstrom	28	m ³ /h			21	m ³ /h			0.7	
T_Abgas	42	°C			32	°C			0.8	
T_Vorlauf	51	°C			39	°C	gemittelt über ge- samte Messperi- ode		0.8	
T_Rücklauf	30	°C			30	°C			1	
ΔT_Vor-Rück	21	°C			9	°C			0.45	
	Emissionen normiert		Emissionsfrachten		Emissionen normiert		Emissionsfrachten		Emissionen normiert Verhält- nisse Start- Stopp/ Nennlast	Emissions- fracht Verhält- nisse Start- Stopp/ Nennlast
CO	0.54	mg/MJ	33	mg/h	1.0	mg/MJ	18	mg/h	1.9	0.6
NO _x als NO ₂	26.0	mg/MJ	1573	mg/h	23.6	mg/MJ	425	mg/h	0.9	0.3
OGC	0.15	mg/MJ	9.2	mg/h	6.7	mg/MJ	121	mg/h	44	13
Staub gravi- metrisch	0.76	mg/MJ	46	mg/h	0.35	mg/MJ	6.4	mg/h	0.5	0.1
PAK*)	0.54	µg/MJ	33	µg/h	0.99	µg/MJ	18	µg/h	1.8	0.5
Partikel-An- zahl	2.7.E+12	#/MJ	4.51E+10	#/s	2.8.E+12	#/MJ	1.4E+10	#/s	1.1	0.3
Part.-d	18	nm			19	nm			1.1	1.1
Part.-d(w)**)	18	nm			15	nm			0.9	0.9
Russzahl	1	Mind. zwei Messungen			1	Mind. zwei Messungen			1.0	1.0
PAK*) im Kondensat	1.9	µg/l	1.4	µg/h	0.55	µg/l	0.06	µg/h	0.3	0.04
PAK*) Total	-	-	34	µg/h	-	-	18	µg/h	-	0.5
*) Summe 16 EPA-PAK inkl. Beweisgrenze										
**) Mittlerer geometrischer Partikeldurchmesser gewichtet mit Anzahl										

Tabelle 6: Mittelwerte kondensierender Kessel Oertli OSCR 18

Bei den (mit der Brennstoffleistung) normierten Emissionen zeigt der kondensierende Kessel Oertli OSCR 18 beim Start-Stopp-Betrieb signifikant erhöhte Werte bei den OGC (Faktor 44) gegenüber dem Betrieb bei Nennwärmeleistung. PAK und CO sind zwar leicht erhöht, aber auf einem niedrigen Niveau.

Bei den absoluten Emissionsfrachten, die mit dem tatsächlichen Abgasvolumenstrom gewichtet sind, zeigt sich, dass der Start-Stopp-Betrieb einzig zu einer Erhöhung der OGC-Emissionen führt. Diese Erhöhung ist aber signifikant (Faktor 13) und dies wohlgemerkt bei nur 30% der Nennleistung. Der mittlere geometrische Partikeldurchmesser ist (typisch für Öl-Feuerungen) klein und wird nicht nennenswert vom Start-Stopp-Betrieb beeinflusst.

Die PAK-Emissionsfrachten im Kondensat sind sehr gering, verglichen mit der Fracht im Abgas (4% resp. 0.3 % der gesamten PAK-Emissionsfrachten). Im Start-Stopp-Betrieb ist der Anteil an leicht flüchtigen PAK-Verbindungen (z.B. Naphtalin) viel höher als bei Nennlastbetrieb, was die Unterschiedliche Verteilung auf Kondensat und Abgas erklären könnte.

6.2 Oertli OPN 161 LEV/21 zusammen mit dem nicht kondensierender Kessel LAX 30

6.2.1 Feuerungskontrolleurmessung (Messung nach BAFU-Messempfehlung)

Um zu prüfen, ob der Kessel für den Versuch einwandfrei funktionierte, wurde von einem Feuerungskontrolleur eine Messung nach BAFU-Messempfehlung durchgeführt. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Messung nach Messempfehlung abgebildet. Die vorgegebenen Grenzwerte der LRV wurden eingehalten.

Messgrösse	Messwert	Anforderung LRV Anhang 3 Ziffer 411	Erfüllt?
O ₂ [Vol %]	3.9	-	-
CO ₂ [Vol %]	12.6	-	-
CO [mg/m ³ @ 3% O ₂]	3	80	Ja
NO _x [mg/m ³ @ 3% O ₂]	94	120	Ja

Tabelle 7: Resultate der Messung nach Messempfehlung des nicht-kondensierenden Kessels. Feuerungskontrolleur: A. Leutwyler AG. Datum 11.08.22 14:28

6.2.2 Messung bei kontinuierlichem Nennlastbetrieb

Sobald sich der stationäre Betrieb (konstante Temperaturen und Abgaswerte) eingestellt hatte, wurden die PAK-Messung und die gravimetrische Staubmessung gestartet. Der Messzeitraum für die gravimetrische Staubmessung und PAK-Messung ist erkennbar an der «valve open»-Kurve in Abbildung 15. Die Messgeräte zur Gasanalyse wurden erst kurz nach 13 Uhr an den Prüfstand angeschlossen. Der Auswertezeitraum für die kontinuierlich gemessenen Emissionen ist 13:23 -18:00 Uhr. Beim Partikelmessgerät ist kurz nach 18 Uhr die Pumpe ausgefallen.

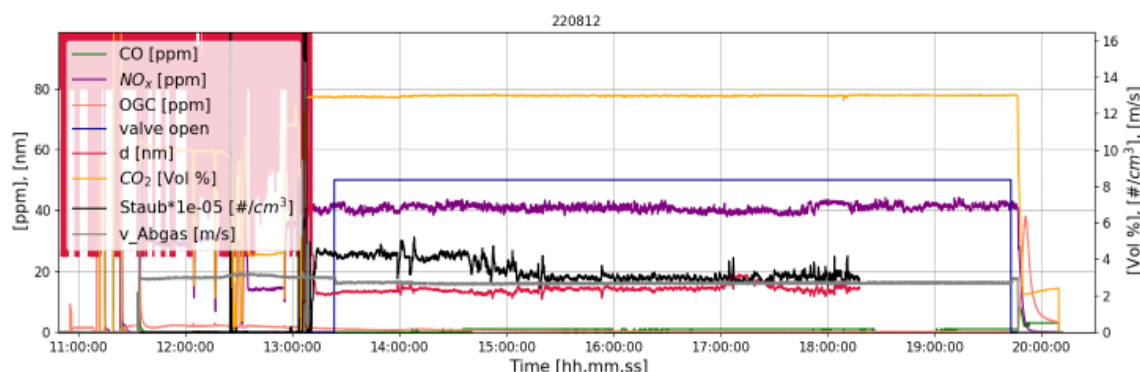


Abbildung 15: Emissionsdaten, Oertli OPN 161 LEV/21, Nennleistung

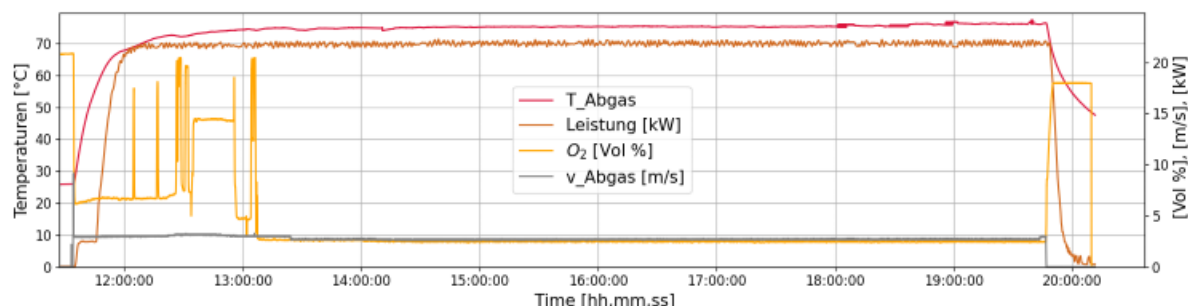


Abbildung 16: Temperatur und Betriebsdaten, Oertli OPN 161 LEV/21, Nennleistung

6.2.3 Messung beim Start-Stopp-Betrieb

Der Kessel wurde so lange bei Nennleistung betrieben, bis die Rücklauftemperatur den Sollwert erreicht hatte und die Temperaturen konstant waren (09:10 Uhr). Danach wurde in den Start-Stopp-Betrieb gewechselt. Nach mindestens 30 Minuten im Start-Stopp-Betrieb beginnt der Auswertzeitraum (09:14 – 17:10 an Tag 1 und 08:55 – 17:25 an Tag 2). Während diesen Zeiträumen wurden mindestens 60 Zyklen durchgeführt.

Abbildung 17 zeigt die Daten der Gasanalyse und der kontinuierlichen Staubmessung über die gesamte Messperiode. Abbildung 18 zeigt die Emissionsverläufe über zwei Zyklen.

Die CO- und OGC-Konzentrationen haben jeweils einen Peak bei der Zündung (CO₂ steigt an) und beim Löschen der Flamme (CO₂ fällt ab). Grosse Kohlenwasserstoffe brauchen mehr Zeit auf ihrem Weg durch die Messleitung, was den OGC-Verlauf mit dem verzögerten OGC-Peak nach dem Löschen der Flamme erklären könnte.

Die NO_x- und die Staubemissionen nehmen proportional zum CO₂-Verlauf ab. Der mittlere geometrische Durchmesser (d) der Partikel ist, typisch für Ölfeuerungen, klein (im Vergleich zu Holzfeuerungen zum Beispiel). Der Verlauf von «valve open» zeigt, wann die Absaugung der gravimetrischen Staubmessung und der PAK-Messung eingeschaltet war. Das Kriterium dafür ist die CO₂-Konzentration (vgl. Kap.0). Da bei diesem Brenner das Gebläse nach Löschen der Flamme nicht hochgefahren wird, wird das Abgas nach dem Löschen der Flamme nur langsam verdünnt.

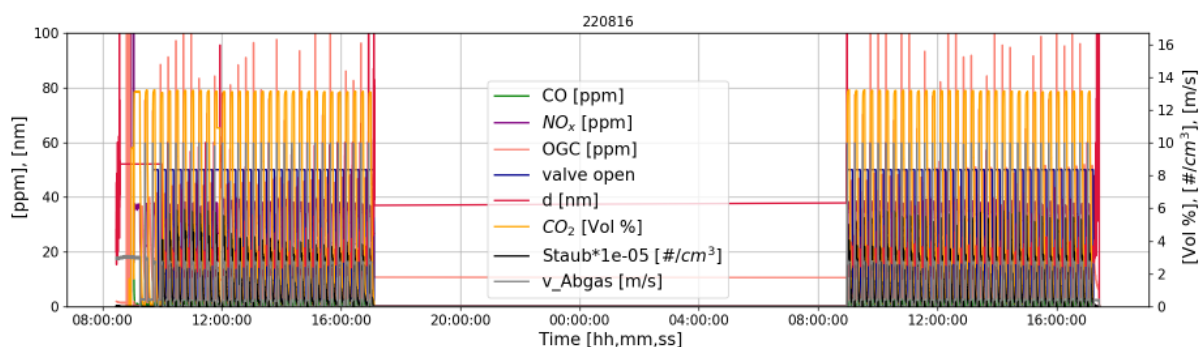


Abbildung 17: Verlauf der Emissionen, Oertli OPN 161 LEV/21, Start-Stopp-Betrieb, gesamte Messperiode

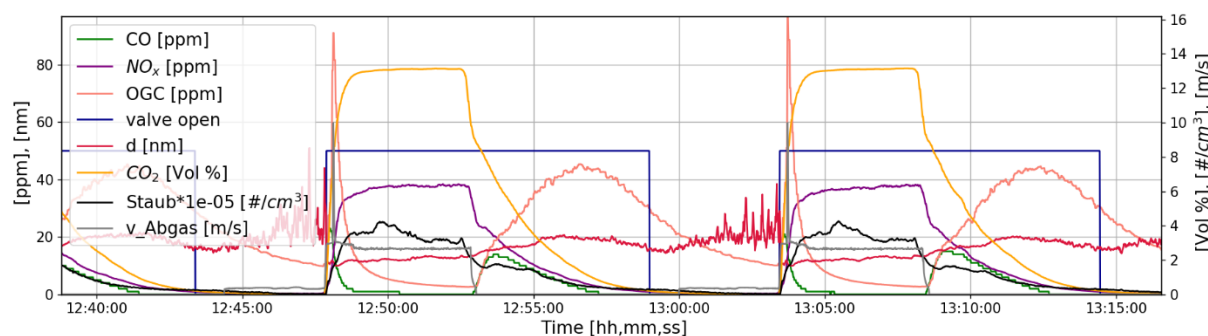


Abbildung 18: Verlauf der Emissionen, Oertli OPN 161 LEV/21, Start-Stopp-Betrieb, Zyklus

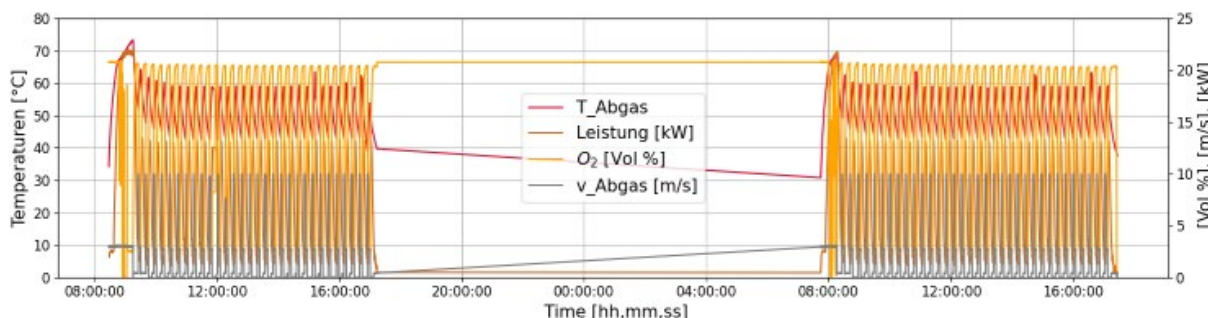


Abbildung 19: Verlauf Temperatur- und Betriebsdaten, nicht kondensierender Kessel, Start-Stopp-Betrieb, gesamte Messperiode

6.2.4 Auswertung und Mittelwerte

	Nennwärmeleistung Oertli OPN 161 LEV/21 und LAX 30				60 Zyklen im Start-Stopp-Betrieb Oertli OPN 161 LEV/21 und LAX 30				Verhältnis Start-Stopp/ Nennlast	
Startzeit	12.08.2022 13:23				16.08.2022 09:14					
Endzeit	12.08.2022 18:00 (19:43 für PAK und Staub)				17.08.2022 17:25					
Leistung	22	kW	gemittelt über ge- samte Messperi- ode		6.6	kW	gemittelt über ge- samte Messperi- ode		0.3	
Brennstoff- leistung	81	MJ/h			25	MJ/h			0.3	
O ₂	2.5	%			7.2	%	gemittelt während Absaugung		2.9	
CO ₂	13	%			10	%	PAK/Staub (CO ₂ > 0.2%)		0.78	
Abgas Volu- menstrom	28	m³/h			10	m³/h			0.68	
T_Abgas	75	°C			51	°C	gemittelt über ge- samte Messperi- ode		0.36	
T_Vorlauf	67	°C			55	°C			0.83	
T_Rücklauf	50	°C			50	°C			1.0	
ΔT_Vor-Rück	17	°C			5	°C			0.30	
	Emissionen normiert		Emissionsfrachten		Emissionen normiert		Emissionsfrachten		Emissionen normiert Verhält- nisse Start- Stopp/ Nennlast	Emissions- fracht Verhält- nisse Start- Stopp/ Nennlast
CO	0.36	mg/MJ	29	mg/h	1.0	mg/MJ	25	mg/h	2.8	0.9
NO _x als NO ₂	29	mg/MJ	2307	mg/h	26	mg/MJ	645	mg/h	0.9	0.3
OGC	0.08	mg/MJ	6.0	mg/h	4.4	mg/MJ	98	mg/h	52.0	16
Staub gravi- metrisch	0.64	mg/MJ	51.8	mg/h	0.24	mg/MJ	5.9	mg/h	0.4	0.1
PAK*	0.54	µg/MJ	44	µg/h	5.9	µg/MJ	146	µg/h	11	3.3
Partikel-An- zahl	2.1.E+12	#/MJ	5.4E+10	#/s	2.5.E+12	#/MJ	1.9E+10	#/s	1.2	0.4
Partikel-d	14	nm			19	nm			1.3	1.3
Part.-d(w)**	14	nm			14	nm			1	1
Russzahl	1	Mind. zwei Messungen			1	Mind. zwei Messungen			1	1
	* Summe 16 EPA-PAK inkl. Beweisgrenze									
	** Mittlerer geometrischer Partikeldurchmesser gewichtet mit Anzahl									

Tabelle 8: Mittelwerte Oertli OPN 161 LEV/21 zusammen mit dem nicht kondensierenden Kessel LAX 30

Bei den (mit der Brennstoffleistung) normierten Emissionen zeigt der nicht kondensierende Kessel LAX 30 zusammen mit dem Brenner Oertli OPN 161 LEV/21 im Start-Stopp Betrieb gegenüber dem kontinuierlichen Betrieb leicht erhöhte CO- (Faktor 2.8) und deutlich erhöhte OGC- (Faktor 52) und PAK-Emissionen (Faktor 11).

Bei den absoluten Emissionsfrachten, die mit dem tatsächlichen Abgasvolumenstrom gewichtet sind, zeigt sich, dass der Start-Stopp-Betrieb zu einer Erhöhung der OGC- (Faktor 16) und der PAK-Emissionen führt (Faktor 3.3). Diese Erhöhung der Frachten zeigt sich wohlgermerkt bei nur 30% der Nennleistung.

Der mittlere geometrische Partikeldurchmesser ist (typisch für Öl-Feuerungen) klein und wird nicht nennenswert vom Start-Stopp-Betrieb beeinflusst.

7 Vergleich der Emissionen mit dem Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen

	Faktenblatt [6]	Gemessene Emissionen			
Emissionen		Oertli OSCR 18		Oertli OPN 161 LEV/21 und LAX 30	
		Nennwärme- leistung	Start-Stopp	Nennwärme- leistung	Start-Stopp
		mg/MJ	mg/MJ	mg/MJ	mg/MJ
Mittlere Emissionsfaktoren					
NOx	37	26	24	29	26
CH4+NMVOC	7	0.2	6.7	0.08	4.4
CO	13	0.5	1.0	0.4	1.0
Staub	0.2	0.76	0.35	0.64	0.24
Emissionsfaktoren von modernen Feuerungen					
NOx	27	26	24	29	26
CO	3	0.5	1.0	0.4	1.0

Tabelle 9: Vergleich der Emissionen mit dem «Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen» [6]

Während der Messungen wurden die gesamten OGC gemessen, daher wurden CH₄ und NMVOC aus dem Faktenblatt [6] zusammengezählt und mit den gemessenen OGC verglichen. Die OGC-Emissionen beim Start-Stopp Betrieb sind für beide Kessel erhöht gegenüber dem Betrieb bei Nennwärmeleistung, aber immer noch unter dem Wert aus dem Faktenblatt [6]. Es ist allerdings zu bemerken, dass die geprüften Kessel auf dem aktuellen Stand der Technik und optimal eingestellt waren und bei den gasförmigen Emissionen von OGC und CO bei Nennlast deutlich besser sind als die Emissionsfaktoren aus dem Faktenblatt [6] (gelb und grün markierte Felder).

Für beide Brenner wurden beim kontinuierlichen Betrieb bei Nennwärmeleistung und beim Start-Stopp-Betrieb gegenüber dem Faktenblatt [6] deutlich erhöhte Staubemissionen gemessen (orange markierte Felder). Die Planfilter mit den Staubproben zeigten eine orange Färbung, was sehr ungewöhnlich ist. Deshalb wurde die Zusammensetzung des Staubs auf den Filtern mittels EDX (energie-dispersive Röntgenspektroskopie) analysiert. Die Analyse zeigte, dass der Hauptanteil des Staubes aus Eisen bestand mit dem Verhältnis von Sauerstoff zu Eisen von $m(\text{Fe}) : m(\text{O}) = 0.7 : 0.3$. Dies deutet auf die Verbindung Fe₂O₃ hin. Solche Verbindungen können nicht aus dem Brennstoff bzw. dessen Verbrennung stammen, sondern sind höchstwahrscheinlich Rückstände aus dem Heizkessel oder der Kaminanlage. Es konnte allerdings nicht abschliessend geklärt werden, woher die Metallspuren auf dem Filter stammten. Der Kohlenstoff und der Schwefel können der Verbrennung von Heizöl zugeordnet werden, machen jedoch nur 5.7 % der Masse auf dem Filter aus.

		Filter	Kohlenstoff	Sauerstoff	Natrium	Silizium	Schwefel	Eisen
			Massen%	Massen%	Massen%	Massen%	Massen%	Massen%
Oertli OPN 161 LEV/21 und LAX 30	Nennlast	MG47	2.1	24.1	1.3	2.4	0.4	69.5
	Start-Stopp	MG50	3.7	26.6	0.6	0.3	1.0	67.9
Oertli OSCR 18	Nennlast	MG30	4.7	28.5	0.7	0.3	1.7	64.2
	Start-Stopp	MG31	8.7	23.0	0.5	0.7	0.4	66.6
		Mittelwert	4.8	25.5	0.8	0.9	0.9	67.0

Tabelle 10: Resultate EDX-Analyse der gravimetrischen Staubproben

8 Diskussion der Resultate

	Kontinuierlicher Betrieb bei Nenn- wärmeleistung				60 Zyklen im Start-Stopp-Betrieb (~30% der Nennleistung)				Emissionen nor- miert Verhält- nisse Start- Stopp/ Nenn- last	Emissions- fracht-Ver- hältnisse Start-Stopp/ Nennlast
Mess- grösse	Emissionen normiert		Emissions- frachten		Emissionen normiert		Emissions- frachten			
Kondensierender Kessel OERTLI OSCR 18										
CO	0.54	mg/MJ	33	mg/h	1.0	mg/MJ	18	mg/h	1.9	0.6
NO _x als NO ₂	26.0	mg/MJ	1573	mg/h	23.6	mg/MJ	425	mg/h	0.9	0.3
OGC	0.15	mg/MJ	9.2	mg/h	6.7	mg/MJ	121	mg/h	44	13
Staub gra- vimetrisch	0.76	mg/MJ	46	mg/h	0.35	mg/MJ	6.4	mg/h	0.5	0.1
PAK*	0.54	µg/MJ	33	µg/h	0.99	µg/MJ	18	µg/h	1.8	0.5
Partikel- Anzahl	2.7.E+12	#/MJ	4.51E+10	#/s	2.8.E+12	#/MJ	1.4E+10	#/s	1.1	0.3
Part.-d (w)**	18	nm			15	nm			0.9	0.9
Russzahl	1	Mind. zwei Messungen			1	Mind. zwei Messungen			1.0	1.0
PAK* im Kondensat	1.9	µg/l	1.4	µg/h	0.55	µg/l	0.06	µg/h	0.3	0.04
PAK* Total	-	-	34	µg/h	-	-	18	µg/h	-	0.5
Oertli OPN 161 LEV/21 zusammen mit dem nicht kondensierenden Kessel LAX 30										
CO	0.36	mg/MJ	29	mg/h	1.0	mg/MJ	25	mg/h	2.8	0.9
NO _x als NO ₂	29	mg/MJ	2307	mg/h	26	mg/MJ	645	mg/h	0.9	0.3
OGC	0.08	mg/MJ	6.0	mg/h	4.4	mg/MJ	98	mg/h	52	16
Staub gra- vimetrisch	0.64	mg/MJ	51.8	mg/h	0.24	mg/MJ	5.9	mg/h	0.4	0.1
PAK*	0.54	µg/MJ	44	µg/h	5.9	µg/MJ	146	µg/h	11	3.3
Partikel- Anzahl	2.1.E+12	#/MJ	5.4E+10	#/s	2.5.E+12	#/MJ	1.9E+10	#/s	1.2	0.4
Part.- d(w)**	14	nm			14	nm			1	1
Russzahl	1	Mind. zwei Messungen			1	Mind. zwei Messungen			1	1

* Summe 16 EPA-PAK inkl. Beweisgrenze
Die Berechnungsmethoden sind in Kap. 5.4 beschrieben.
** Mittlerer geometrischer Partikeldurchmesser, gewichtet mit Anzahl

Tabelle 11: Emissionsfrachten von Ölheizkesseln bei Nenn- und Teillast (Start-Stopp-Betrieb)

Bei den normierten Emissionskonzentrationen in mg/MJ zeigt sich bei Teillast ein leichter Anstieg der CO- (Faktor 1.9 resp. 2.8), ein starker Anstieg der OGC- (Faktor 44 resp. 52) und ein Anstieg der PAK- Emissionen um Faktor 1.8 resp. 11 gegenüber dem Betrieb bei Nennwärmeleistung. Bei den absoluten Emissionsfrachten steigen hingegen nur die OGC- Emissionen und beim OPN 161 LEV/21 ausserdem die PAK-Emissionen an, jedoch nicht die CO-Emissionen.

Hervorzuheben ist, dass die starke Zunahme der OGC-Emissionen im getakteten Start-Stopp-Betrieb bei beiden Kesseln etwa in derselben Grössenordnung vorliegt (Faktor 44 resp. 52). Die absolute Fracht nimmt, aufgrund des geringeren Abgasvolumenstroms mit Faktor 13 resp. 16 zu.

Die beiden Heizkessel Oertli OPN 161 LEV/21 zusammen mit LAX 30 und Oertli OSCR 18 wurden vor den Messungen jeweils durch die Firma Meier Tobler AG auf einen vom Hersteller vorgesehenen optimalen Betriebspunkt eingestellt. Dies erlaubte den Betrieb beider Heizkessel mit tieferen Emissionen verglichen mit den Emissionswerten aus dem «Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen» [6].

Der Anstieg der OGC-Emissionen ist signifikant bezogen auf Emissionskonzentrationen und Emissionsfrachten. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die OGC-Emissionen bei kontinuierlichem Betrieb bei Nennwärmeleistung sehr tief sind, verglichen mit dem Faktenblatt [6].

Der Anstieg der Emissionen im Start-Stopp-Betrieb ist messbar. Auf der Grundlage der vorliegenden Messungen mit jeweils optimal eingestellten Brennern sind jedoch weder die absoluten Emissionsfrachten noch die leistungsnormierten Emissionen in einem Mass erhöht, welches eine Anpassung der Emissionsfaktoren im «Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen» [6] begründen könnte.

9 Anhang

9.1 PAK-Analyse-Ergebnisse

Analyseergebnisse von Eurofins GfA Lab Service GmbH

GFU42 Polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAK): Emission, Staubbiederschlag, Luft (°) (#)

Interne Methode, GLS OC 300:2022-08-30, GC-HRMS

	Oertli OSCR 18				Oertli OPN 161 LEV/21 und LAX 30		
	Nennwärmeleistung		60 Zyklen im Start-Stopp-Betrieb		Nennwärmeleistung	60 Zyklen im Start-Stopp-Betrieb	
	Abgas	Kondensat	Abgas	Kondensat	Abgas	Abgas	
Naphthalin	1.58	0.0568	6.51	0.0588	3.39	182	µg/Probe
Acenaphthylen	0.364	<0.0200	0.221	<0.0200	0.424	2.47	µg/Probe
Acenaphthen	0.174	<0.0500	0.521	<0.0500	0.114	2.22	µg/Probe
Fluoren	0.611	0.151	0.976	0.0908	0.426	5.73	µg/Probe
Phenanthren	1.93	0.403	1.86	0.202	3.03	11.9	µg/Probe
Anthracen	0.142	<0.0200	0.0425	<0.0200	0.266	0.493	µg/Probe
Fluoranthren	0.604	<0.0200	0.261	<0.0200	0.827	2.63	µg/Probe
Pyren	0.869	0.0835	0.416	0.0591	0.65	2.2	µg/Probe
Benz(a)anthracen	0.0506	<0.0200	<0.0200	<0.0200	<0.0200	0.0345	µg/Probe
Chrysen	0.0555	<0.0200	0.0225	<0.0200	0.0206	0.0646	µg/Probe
Benzo(b/j)fluoranthren	0.0263	<0.0200	<0.0200	<0.0200	<0.0200	0.0234	µg/Probe
Benzo(k)fluoranthren	<0.0200	<0.0200	<0.0200	<0.0200	<0.0200	<0.0200	µg/Probe
Benzo(a)pyren	<0.0200	<0.0200	<0.0200	<0.0200	<0.0200	<0.0200	µg/Probe
Dibenz(a,h)anthracen	<0.0200	<0.0200	<0.0200	<0.0200	<0.0200	<0.0200	µg/Probe
Indeno(1,2,3-cd)pyren	<0.0200	<0.0200	<0.0200	<0.0200	<0.0200	<0.0200	µg/Probe
Benzo(ghi)perylene	<0.0200	<0.0200	<0.0200	<0.0200	<0.0200	<0.0200	µg/Probe
Summe 16 EPA-PAK inkl. BG	6.41	0.694	10.8	0.411	9.15	210	µg/Probe
Summe 16 EPA-PAK exkl. BG	6.51	0.964	11	0.681	9.29	210	µg/Probe