
Emissionen von Holzfeuerungen nach elektrostatischen Staubabscheidern

Auftraggeber:

Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien
3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

www.bafu.admin.ch

Auftragnehmer:

Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW
Institut für Biomasse und Ressourcen-Effizienz IBRE
Klosterzelgstrasse 2
5210 Windisch

www.fhnw.ch

Autoren:

Dr. Josef Wüest, FHNW/IBRE, josef.wueest@fhnw.ch
Nemo Lohberger, FHNW/IBRE, nemo.lohberger@fhnw.ch
Moritz Lüscher, FHNW/IBRE, moritz.luescher@fhnw.ch

BAFU-Projektbegleitung:

Beat Müller
Rainer Kegel

Diese Studie wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Zusammenfassung

Aufgrund einer Förderungsaktion der Gemeinde seit dem Jahr 2009 sind in Saas-Fee 74 elektrostatische Partikelabscheider (ESP) vom Typ OekoTube an Holzfeuerungen installiert. Die Gemeinde und das BAFU sind daran interessiert, den tatsächlich messbaren Nutzen dieser Abscheider in Bezug auf die Emissionsreduktion nach einigen Betriebsjahren zu ermitteln. Die Messung des Abscheidegrades von ESP am Kaminende ist nach heutigen Methoden sehr aufwendig. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieses Projekts ein neues, verdünnungsunabhängiges Messverfahren namens DIEM (Dilution Independent Emission Measurement) entwickelt und in seinen Grundzügen getestet. Es wurden 22 Anlagen untersucht und die Wirksamkeit von 20 ESP im Feld bestimmt.

Das DIEM-Messverfahren arbeitet für die Partikel-Emissionen mit dem Immissions-Messgerät DiSC¹. Die Abgase müssen aus diesem Grund um den Faktor 100 und mehr verdünnt werden. Um diese Verdünnung zu bestimmen wird der CO₂-Wert herangezogen. Dieser korreliert mit der Leistung und dem Luftüberschuss. Damit kann die Normierung auf trockenes Abgasvolumen bei 13 % O₂ vorgenommen werden. Die Emissionsmessungen erfassen CO, CO₂, Wasserdampf und Partikel (Anzahl und Durchmesser). Damit lassen sich die von der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) geforderten Grössen Kohlenmonoxid (CO) und Staub messen und mit den Grenzwerten vergleichen. Durch ein- und ausschalten des ESP kann relativ einfach der Abscheidegrad bestimmt werden.

Die CO₂-Normierung basiert auf der Annahme, dass sich die Emissionen und CO₂ gleichermaßen verdünnen. Damit sind die normierten CO-Emissionen (CO/CO₂) im verdünnten wie im unverdünnten Zustand gleich. Die Messunsicherheit für CO ist verdünnungsabhängig und beträgt bis zu einer Verdünnung von einem Faktor 500 weniger als 10 %, vorausgesetzt, die Null-Messungen (Hintergrund von CO und CO₂) werden exakt und periodisch bei jedem Auflegen durchgeführt.

Zur Validierung der Messmethode wurden Vergleichsmessungen an einem Pelletkessel und an verschiedenen Wohnraumfeuerungen im Labor und am Kaminende durchgeführt. Dabei diente ein SMPS² dazu, für die verschiedenen Feuerungen die richtigen Parameter für das DiSC zu ermitteln. Mit einer zusätzlichen Korrektur, welche die physikalischen Effekte grosser fraktaler Partikel im DiSC berücksichtigt, korrelierten die DiSC-Staubwerte relativ gut mit der gravimetrischen Staubmessung bei identischer Abgassonde (Absaugung hyperkinetisch und senkrecht zur Strömung). Damit konnte eine Messunsicherheit (MU) von $\pm 20\%$ gegenüber diesem Referenzverfahren nachgewiesen werden.

Für Messungen nach dem eingeschalteten ESP gab es kaum eine Korrelation zur gravimetrischen Messmethode, ausser es wurde unter Abschirmung des vom ESP verursachten elektrischen Feldes gemessen. Gravimetrische Messungen eignen sich nicht nach ESPs und führen teilweise zu negativen Abscheideraten. Mit dem neuen Messverfahren DIEM können reproduzierbare Abscheideraten ermittelt werden und es eignet sich daher für die Bestimmung von Abscheideraten bei den in Saas-Fee installierten ESP.

Die Messungen in Saas-Fee wurden durch den Kaminfeger und die Feuerungsbetreiber unterstützt. So konnten mehr als 20 Anlagen ausgemessen werden. Von der Art der Feuerungen handelt es sich um offene und geschlossene Cheminées, Kaminöfen, Kachel- und Giltsteinöfen, handbeschickte Stückholzvergaser, eine Pelletheizung und automatische Hackschnitzelfeuerung sowie eine Räucherei. Es stellte sich heraus, dass vor dem Projektstart ca. $\frac{1}{4}$ der Abscheider

¹ Diffusion Size Classifier

² Scanning Mobility Particle Sizer (Messgerät zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung)

nicht elektrisch angeschlossen waren. Dies obwohl die Aufträge an die lokalen Handwerker vergeben worden waren. Viele Störungen sind offenbar nicht erkannt oder nicht gemeldet worden. Die gemessenen Anlagen zeigten Abscheidegrade zwischen 50 und 90 %. Dabei zeigt sich, dass die Abscheideleistung bei grösseren Staubfrachten zwar absolut (in mg/m^3) grösser, die relative aber geringer ist.

Bei zwei fast täglich genutzten Anlagen wurden die ESP-Daten über eine ganze Heizperiode permanent aufgezeichnet. Es zeigte sich, dass mit der Zeit auf Grund der Verschmutzung die Abscheideleistung zurückging und die Anzahl der Störungen (Durchschläge) zunahm. Auf Grund der guten Abscheideleistung des ESP und des hohen Teer-Anteils der Abgase ereigneten sich Kaminbrände, die in erster Linie auf einen unsachgemässen Betrieb der Feuerungen zurückzuführen waren. Eine zusätzliche Reinigung der Kaminanlage und eine Anpassung des Betriebs wären in diesen Fällen notwendig gewesen. Jedoch wurde aufgrund der fehlenden ESP-Überwachung diese Notwendigkeit nicht erkannt. In einem Fall hatte der Kaminbrand Störungen zur Folge und der Abscheider hatte nicht mehr funktioniert, in einem anderen Fall führte der Abbrand der Ablagerungen zu einer Reinigung des ESP, wodurch die Abscheideleistung wieder auf das Maximum anstieg.

Das Projekt hat gezeigt, dass nur gut gewartete Abscheider ihren Dienst versehen. Fördergelder für Staubminderungseinrichtungen sollten nur nach einer Abnahmekontrolle auf korrekte Installation ausbezahlt werden. Zudem ist eine bloss Installation eines Staubabscheiders als einziges Kriterium für den erlaubten Betrieb von Cheminées nicht sinnvoll. Es muss auch die richtige Funktion gewährleistet sein, durch eine adäquate Überwachung.

1	EINLEITUNG	1
2	PROJEKTABLAUF	2
2.1	PHASE 1	3
2.2	PHASE 2	4
2.2.1	<i>Entwicklung eines mobilen Messkoffers und Rauchgas-Sammlers zur Probenahme über Dach.....</i>	<i>4</i>
2.2.2	<i>Tests zum Rauchgas-Sammler.....</i>	<i>4</i>
2.2.3	<i>Tests von DIEM auf dem FHNW-Dach</i>	<i>5</i>
2.2.4	<i>Vergleichsmessung Misox</i>	<i>7</i>
2.3	PHASE 3	8
3	MATERIAL.....	9
3.1	MESSKOFFER.....	9
3.2	ABGAS-SAMMLER.....	9
3.3	REFERENZ-MESSGERÄTE FÜR VERGLEICHSMESSUNGEN	10
4	MESSUNGEN SAAS-FEE	11
4.1	FEUERUNGEN.....	11
4.2	KAMINE UND MESSSTELLEN.....	13
4.3	ZUSTAND DER ESP.....	14
4.4	TYPISCHER PRÜFABLAUF	15
4.4.1	<i>Prüfablauf.....</i>	<i>15</i>
4.4.2	<i>Messung</i>	<i>16</i>
4.4.3	<i>Auswertung und Bestimmung Abscheidegrad</i>	<i>20</i>
4.5	RESULTATE ÜBERSICHT	22
4.6	EINORDNUNG DER MESSWERTE	25
4.7	FAZIT	26
5	VERGLEICHSMESSUNGEN MIT REFERENZMESSVERFAHREN IN SAAS-FEE	27
5.1	SPEICHEROFEN 3 (MESSUNG 18)	27
5.1.1	<i>Staub-Emissionen</i>	<i>27</i>
5.1.2	<i>CO-Emissionen.....</i>	<i>28</i>
5.2	SCHNITZELKESSEL (MESSUNG 24).....	29
5.2.1	<i>Staub-Emissionen</i>	<i>29</i>
5.2.2	<i>CO-Emissionen.....</i>	<i>30</i>
5.2.3	<i>Fazit Vergleichsmessungen</i>	<i>30</i>
6	LANGZEIT-AUFZEICHNUNGEN	31
6.1	UNTERSUCHTE FEUERSTÄTTEN	31
6.1.1	<i>Stückholzkessel.....</i>	<i>31</i>
6.1.2	<i>Giltsteinofen (Speicherfeuerung 3).....</i>	<i>32</i>
6.2	KAMINBRAND	33

<i>Ursachen</i>	33
<i>Auswirkungen</i>	33
<i>Massnahmen</i>	33
6.3 FAZIT	33
7 UMFRAGEN	34
7.1 UMFRAGE MIT HOLZHEIZUNGSBESITZERN IN SAAS-FEE (39 TEILNEHMER)	34
7.2 UMFRAGE MIT NACHBARN VON ESP-BESITZERN (18 TEILNEHMER)	37
7.3 FAZIT	37
8 ERKENNTNISSE UND EMPFEHLUNGEN	38

1 Einleitung

Die Gemeinde Saas-Fee hat dank der Initiative des ehemaligen Tourismus-Direktors eine hohe Dichte an elektrostatischen Partikelabscheidern (ESP). Seit dem Jahr 2009 wurden für die Installation von ESP bei Holzfeuerungen Fördergelder ausbezahlt. Die Gemeinde hat diese Aktion zusammen mit dem ESP-Hersteller OekoSolve AG gestartet. Die Gemeinde ist zudem autofrei bzw. hat ein Parkhaus eingangs Dorfs, und sie schreibt Partikelfilter vor für Transport- und Baumaschinen sowie für Pistenfahrzeuge, was erwartungsgemäss zu einer allgemein niedrigen Feinstaubbelastung im Dorf führt.

Damit ist Saas-Fee ein einzigartiges Feldlabor für eine Erfolgskontrolle der zahlreichen dort installierten ESP (Modell OekoTube). Das BAFU und die Gemeinde Saas-Fee sind daran interessiert zu erfahren, in welchem Zustand diese Anlagen sind und welchen messbaren Nutzen der Einsatz dieser Abscheider für die Minderung der Emissionen bringt.

Während bei Messungen mit partikelzählenden Messgeräten den ESP hohe Abscheideraten attestiert werden, liefern gravimetrische Vergleichsmessungen, teilweise wegen Ablenkung der Partikelbahnen – aufgrund der Beeinflussung des elektrischen Feldes durch die Sonde – oder Nachfolgeeffekten wie Ausflockung, ernüchternde Ergebnisse. Die Messung von Partikelemissionen nach ESP mit den gängigen (gravimetrischen), ist sehr aufwendig und mit einigen Nachteilen (Artefakten) verbunden. Deshalb sollte eine neue Messmethode entwickelt werden, mit welcher auf einfache Weise vergleichende Emissionsmessungen an Kaminen mit ESP durchgeführt werden können. Eine breit angelegte Feldmesskampagne und eine Umfrage sollten dann zeigen, wie hoch der Nutzen der ESP im Feld auch nach einigen Betriebsjahren noch ist und welche Wartung dafür notwendig ist.

Das Projekt wird im Auftrag des BAFU von der FHNW durchgeführt.

2 Projektablauf

Arbeitspakete gemäss Projektauftrag:

1	Entwicklung und Validierung des Messverfahrens für CO und Staub bei verschiedenen Verdünnungen im Labor
1.1	Entwicklung eines verdünnungsunabhängigen Messverfahrens für CO und Feinstaub (PM _{2.5})
1.2	Validierung des Messprinzips durch Tests an Feuerungen mit unterschiedlichem Verdünnungsfaktor im Labor
1.3	Evaluation geeigneter Messinstrumente (CO, CO ₂ , Staub) und Beschaffung derselben (falls nicht bereits vorhanden).
1.4	Nachweis der Tauglichkeit des DiSC für die Feinstaubmessung und Ermittlung der Unsicherheit, mittels Vergleich mit gravimetrischer Staubmessung (mit und ohne Impaktor und Ermittlung des Einflusses der Absaugungsrichtung und Geschwindigkeit (isokinetisch in Strömungsrichtung und 90° zur Strömung).
1.5	Untersuchungen zur Notwendigkeit der Ladungsneutralisation der Partikel nach dem ESP für die die Messgeräte und Untersuchungen zur maximalen Leitungslänge
Meilenstein 1	
<i>Go/No-Go Entscheidung: Die Messmethode liefert reproduzierbare Ergebnisse mit einer Messunsicherheit von ± 10% für CO und ± 20% für Feinstaub PM_{2.5} (gemäss EN 16510).</i>	
2	Entwicklung und Test eines Rauchgas-Sammlers
2.1	Entwicklung eines mobilen Rauchgassammlers für gefahrlose Rauchgasentnahme am Kaminende. (Anforderungen, Morphologischer Kasten, Lösungsvarianten)
2.2	Konstruktion und Bau der Lösungen
2.3	Test des Rauchgas-Sammlers an der Prüf stelle im Absaugarm und am Kaminende auf dem Dach der FHNW.
2.4	Optimierungen
Meilenstein 2	
<i>Go/No-Go Entscheidung: Die Messmethode liefert reproduzierbare Ergebnisse mit einer Messunsicherheit von ± 20% für CO und ± 30% für Feinstaub PM_{2.5} (gemäss EN 16510).</i>	
3	Emissionsmessungen in Saas-Fee
3.1	Befragung der Anlagenbesitzer, Auswahl der Anlagen für die Messungen
3.1.1	Information der Bevölkerung und Aufruf zur Beteiligung am Projekt.
3.1.2	Erfassen sämtlicher Heizungs- und Feuerungs-Anlagen (Verwaltung Saas-Fee, Kaminfeger, OekoSolve) sowohl der mit ESP nachgerüsteten, wie auch der nicht nachgerüsteten Anlagen.
3.1.3	Ausarbeiten eines Protokollblattes / Umfragebogen zur Registrierung des Betriebes der Feuerstätte und zur Erfassung der verfeuerten Holzmenge. (Zugang zu Messpunkt vor ESP) und eines Fragekataloges zum ESP (Zuverlässigkeit, Stromverbrauch, Unterhalt, Geräusch, Flocken, Beobachtungen, etc.)
3.1.4	Auswertung der Protokollblätter und Auswahl der zu messenden Kamine
3.2	Emissionsmessungen in Saas-Fee
3.2.1	Messung der Feinstaub-Emissionen an mehreren Anlagen in Saas Fee mit und ohne ESP.
3.2.2	Ermitteln der Abscheidegrade durch das Aus- und Einschalten der betroffenen ESP (Wenn möglich vor und nach dem ESP).
3.3	Auswertung und Schlussbericht: Bestimmung der Emissionsfaktoren der Feuerungen mit ESP bzw. der Minderungsleistung durch ESP und Dokumentation der Ergebnisse.
Projektabschluss:	
<i>Messungen an 20 mit ESP ausgerüsteten Anlagen. Ein Bericht liegt vor, der Wirksamkeit der Partikelfilter im Feld allgemein und in Bezug auf Feuerung und Betriebszustände spezifisch beurteilt.</i>	

Tabelle: Arbeitspakete gemäss Projektauftrag

2.1 Phase 1

Entwicklung und Validierung des Messverfahrens für CO und Staub bei verschiedenen Verdünnungen im Labor.

Die Phase 1 wurde im Zwischenbericht zum Meilenstein 1 [1] detailliert beschrieben und ist hier kurz zusammengefasst.

Für die Messung der Abscheidegrade bei Holzfeuerungen, welche mit einem Elektrostatischen Partikelabscheider (ESP) am Kaminende ausgerüstet sind, wurde das neue Messverfahren DIEM (Dilution Independent Emission Measurement) entwickelt und in seinen Grundzügen getestet.

Die neue verdünnungsunabhängige Emissions-Messmethode (DIEM) besteht darin, dass mit einem regelbaren Verdünnner die Abgase in der Nähe des Kaminaustritts angesaugt werden und mit einem Partikelmessgerät (DiSCmini) und einem empfindlichen CO-Emissionsmessgerät (Optima 7) erfasst werden. Zur Normierung der Emissionen auf die Referenzbedingung von 13% O₂ wird eine genaue CO₂- und H₂O- Messung (Licor 840A) durchgeführt und die Emissionen werden fortlaufend normiert.

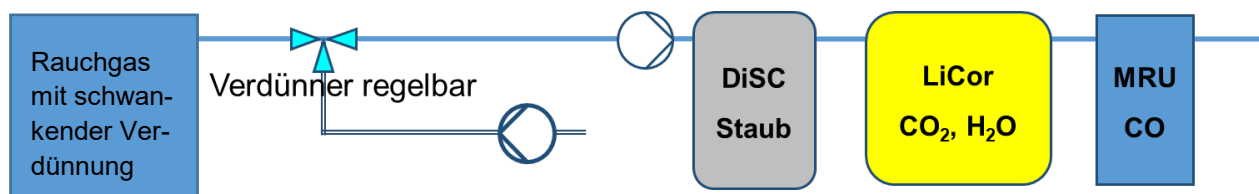


Abbildung 1: Aufbauskitze der Messgeräte

Das DIEM-Verfahren arbeitet mit Immissionsmessgeräten und die Abgase müssen aus diesem Grund um den Faktor 100 und mehr verdünnt werden. Um diese Verdünnung zu bestimmen wird der CO₂-Wert herangezogen. Dieser korreliert mit dem Luftüberschuss. Damit kann die Normierung auf trockenes Abgasvolumen bei 13% O₂ vorgenommen werden. Die Emissionsmessungen erfassen CO (MRU Optima 7), CO₂, Wasserdampf (Licor 840A) und Partikel (DiSCmini). Damit lassen sich die Grössen CO und Staub messen und mit den Grenzwerten der LRV vergleichen. Da sich CO und CO₂ gleichermassen verdünnen, sind die normierten Emissionen von CO (CO/CO₂) im verdünnten gemessenen Zustand gleich wie die unverdünnten. Eine Messunsicherheit (MU) von 10% kann erreicht werden, wenn die Null-Messungen (Hintergrund von CO und CO₂) exakt und wiederholt (bei jedem Auflegen) durchgeführt werden.

Um die Staubmessmethode zu validieren wurden zuerst die heute üblichen gravimetrischen Staubmessverfahren (isokinetisch, hyperkinetisch, verschiedene Absaug-Geschwindigkeiten und Richtungen 180°, 90° und verschiedene Düsendurchmesser) miteinander und mit dem DIEM verglichen. Die Vergleiche fanden sowohl an einem Pelletkessel als auch an verschiedenen Wohnraumfeuerungen statt. Die verschiedenen gravimetrischen Staubmessverfahren (isokinetisch (EN-13284-1), hyperkinetisch (EN-16510-1, Anhang F)) unterscheiden sich bis zu einem Faktor 2.

Durch eine geeignete Korrektur [3], welche die physikalischen Effekte grosser fraktaler Partikel berücksichtigt, korrelieren die DIEM-Staubwerte gut mit der gravimetrischen Staubmessung unter 90° und mit den hyperkinetischen Messungen (z.B. Wöhler SM96). Damit konnte bei der Partikelmessung die gemäss Projektbeschreibung angestrebte Messunsicherheit von max. ± 20 % nachgewiesen werden.

Für Messungen nach dem eingeschalteten ESP gab es keine Korrelation zur gravimetrischen Messmethode, da sich diese nicht eignet und teilweise negative Abscheideraten aufweist. Das liegt daran, dass die gravimetrische Sonde als Gegenelektrode wirkt und die Partikel regelrecht von der Sonde angezogen werden. Nur mit grossem Aufwand (zusätzliche Strecke/Umlenkung nach Abscheider zwecks Feldfreiheit) eignet sich die gravimetrische Messmethode für Messungen nach ESP (siehe auch Kapitel 8.3 im Zwischenbericht Meilenstein 1 [1]). Mit dem neuen

DIEM-Messverfahren können reproduzierbare Abscheideraten ermittelt werden. Es konnte gezeigt werden, dass sich das neue Messverfahren für die Bestimmung von Abscheideraten an im Feld montierten ESP eignet.

2.2 Phase 2

2.2.1 Entwicklung eines mobilen Messkoffers und Rauchgas-Sammlers zur Probenahme über Dach

Für die mobile Messung wurden die Komponenten (Neutralisator, DiSCmini für Partikel, Licor für CO₂ und H₂O und Optima 7 für CO, Verdünner) in einen robusten und wasserdichten Koffer eingebaut und mit einem Realtime-Messcomputer (myRIO) verbunden. Damit können die einzelnen Messgeräte ausgelesen und für die Nullpunktnahme angesteuert werden. Die Daten werden in der Software zeitlich synchronisiert, was unverzichtbar ist für die kontinuierliche Normierung der Emissionswerte. Die Kommunikation zwischen myRIO und dem entsprechenden Laptop erfolgt kabellos. Ausserdem kann über das myRIO die Verdünnung automatisch geregelt, bzw. vom Benutzer gesteuert werden. Die Programmierung dieser flexiblen und zuverlässigen Datenerfassung war mit grossem Aufwand verbunden. Im Rahmen von Tests am Kaminende eines Feuerungsprüfstands auf dem Dach der FHNW und bei ersten Messungen in Saas-Fee wurde die Software weiter verbessert und zusätzlich eine Kommunikation mit den OekoTube-ESP integriert. Damit können einerseits die Betriebsparameter des Abscheiders erfasst und protokolliert werden und andererseits kann damit der bei der zu messenden Anlage installierten OekoTube ferngesteuert ein- und ausgeschaltet werden (vgl. 3.1).

Der Rauchgas-Sammler wurde ringförmig gebaut und kann am Ende des Kamins befestigt und ausgerichtet werden (vgl. 3.2). Er besteht hauptsächlich aus leitendem PTFE-Schlauch (4 mm Innendurchmesser), in welchen das Rauchgas durch einzelne Bohrungen (2 mm) gezogen wird. Leitendes PTFE lädt sich weniger elektrostatisch auf als nichtleitendes und es sind deshalb weniger Diffusionsverluste zu erwarten. Durch die Ringform wird sichergestellt, dass auch bei wechselnder Windrichtung genügend Rauchgas eingefangen wird. Der Rauchgassammler ist sehr flexibel auf die unterschiedlichen Kamine und Konzentrationen anpassbar und hat sich bewährt.

2.2.2 Tests zum Rauchgas-Sammler

Es wurden Versuche zu allfälligen negativen Einflüssen durch das Material und die Länge des Schlauches untersucht. Um sicherzugehen, dass nicht der Schlauch selbst Partikel oder CO emittiert, wurde er im Ofen erhitzt (bis 300 °C) und reiner Stickstoff durch den Schlauch gezogen und mit dem DIEM-Messgerät gemessen. Ausserdem wurden mit einem SMPS Diffusionsverluste im Schlauch bei verschiedenen Partikeldurchmessern untersucht und die Verluste von ungeladenen und geladenen Partikel miteinander verglichen. Die Verluste steigen erwartungsgemäss mit sinkendem Durchmesser (Abbildung 2). Kleine Partikel haben aber weniger Einfluss auf die Masse, da der Durchmesser in dritter Potenz in die Masse eingeht. Deshalb wurde zudem der massenbezogene Verlust bei einem polydispersen Aerosol mit der Grössenverteilung, wie sie in den Rauchgasen von Holzfeuerungen vorliegt, ermittelt. Dieser betrug ca. 5 % bei einer Leitungslänge von 2 m. Ausserdem konnte bzgl. Partikelverluste kein signifikanter Unterschied zwischen geladenen und ungeladenen Partikeln festgestellt werden. Es ist also unproblematisch, dass sich der Neutralisator am Ende der Messleitung im Messkoffer befindet und es ist keine Verfälschung der Abscheidegradbestimmung durch den Schlauch zu erwarten.

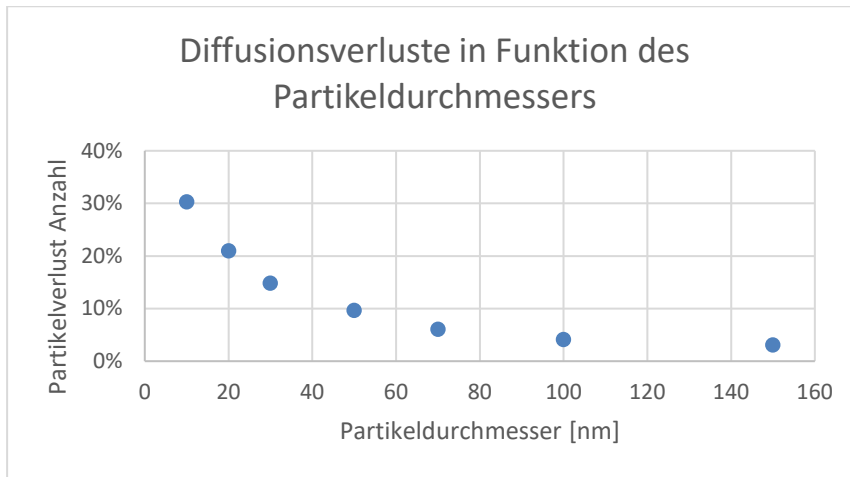


Abbildung 2: Diffusionsverluste von DIEM-Messleitung gemessen mit SMPS bei 2 m Leitungslänge

2.2.3 Tests von DIEM auf dem FHNW-Dach

Der Vergleich der Messungen auf dem Dach der Fachhochschule mit Referenzverfahren wurde analog zu den späteren Vergleichsmessungen in Saas-Fee durchgeführt (vgl. Kapitel 5.1). Die zusätzliche Messstrecke hat 2 Umlenkungen, damit die Messstelle besser erreichbar ist und damit die gravimetrische Sonde nicht mehr in «Sichtweite» der Elektrode ist³.

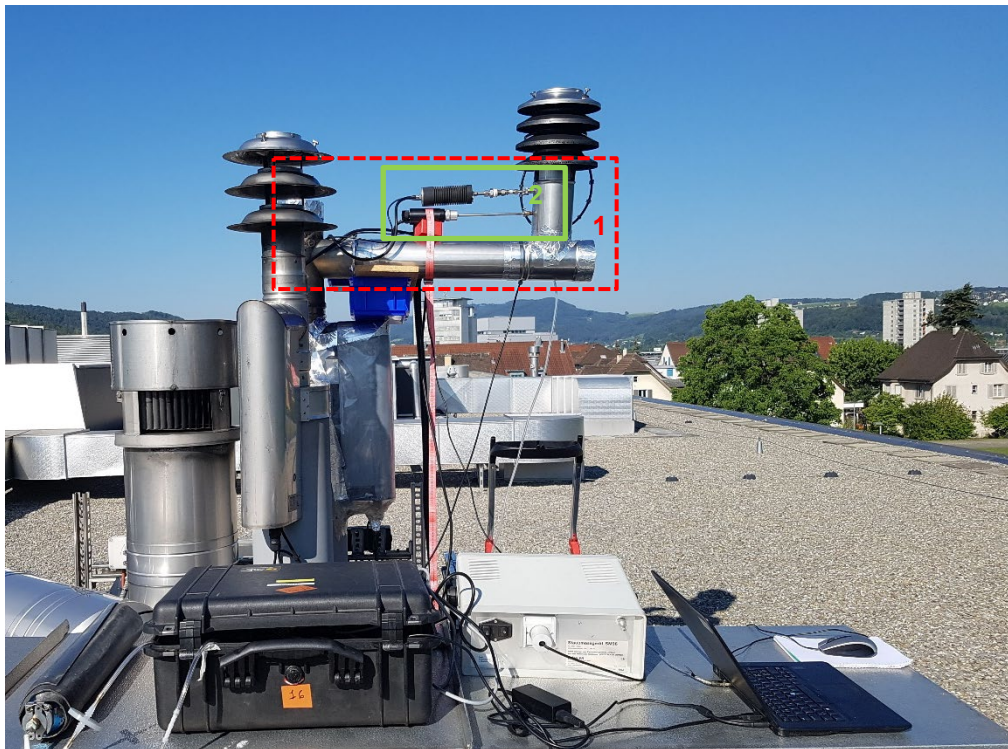


Abbildung 3: Foto Test und Vergleichsmessung von DIEM auf FH-Dach mit zusätzlicher Messstrecke (1) und Sonden (2) für Wöhler SM96 (Staubmessung) und MRU-MAG5 (CO und O₂); DIEM Ring-Sonde am Kaminhut befestigt

³ Die metallische Messsonde des SM96 kann die Feldlinien der Hochspannungselektrode auf sich ziehen. Vor allem grosse Partikel, die von DIEM nicht erfasst werden, können so bei der gravimetrischen Messung zu einer Überschätzung der Staubmasse führen.

Abbildung 4 zeigt den Verlauf von CO₂ und CO (CO₂-normiert) über 2 Abbrände. Es konnte gezeigt werden, dass die CO-Messung von DIEM (CO/CO₂ VEM) auch im Feld mit der Referenzmessung übereinstimmt.

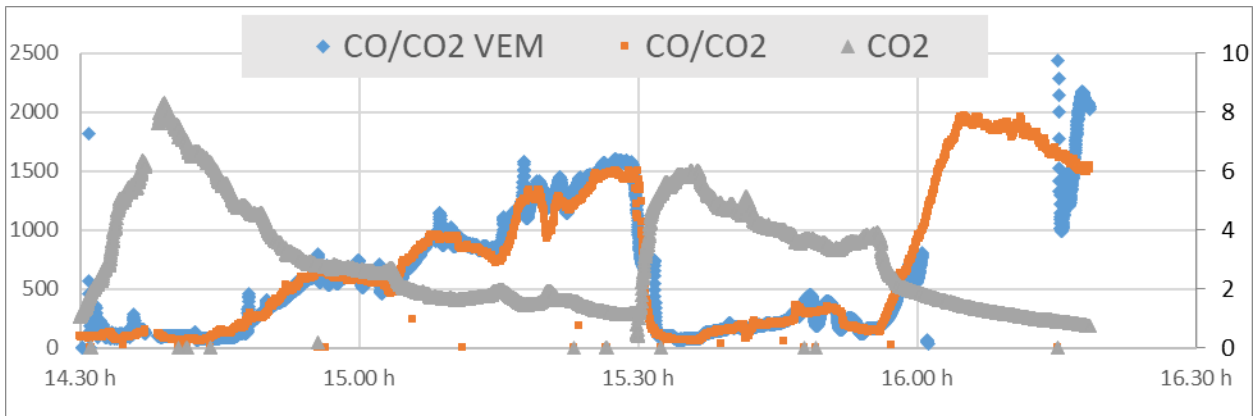


Abbildung 4: CO-Vergleich DIEM (VEM) mit Referenzmethode

Bezüglich Partikel konnten zwei Wöhler-Messungen⁴ (Absaugdauer je 45 min) mit den DIEM-Messwerten verglichen werden. Die Abweichung ist im Rahmen der Erwartungen und zum Teil auf die hohe Verdünnung bei der gravimetrischen Messung (es entsteht ein Fehler bei der Normierung) und Diffusionsverluste im der DIEM-Messleitung zurückzuführen.

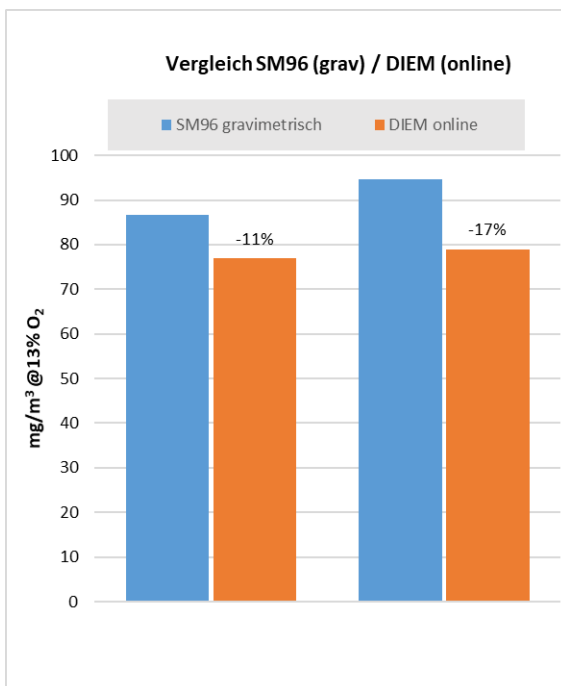


Abbildung 5: Vergleichsmessungen mit Gravimetrie

Mit Hilfe der Test-Messungen konnte der Messkoffer weiter optimiert werden. Es konnte gezeigt werden, dass auch mit dem Rauchgassammler auf dem Dach repräsentative Emissionsmessungen und Abscheidegradbestimmungen durchgeführt werden können. Damit war Phase 2 erfolgreich abgeschlossen.

⁴ Dabei wird das Abgas durch eine (vorab getrocknete und gewogene) beheizte Filterhülse gezogen und dann das Abgasvolumen gemessen. Die Filter werden nachträglich im Labor getrocknet und ausgewogen.

2.2.4 Vergleichsmessung Misox

Im Rahmen einer Untersuchung der Fachhochschule Luzern und VERENUM an verschiedenen Abscheidern im Kanton Graubünden ergab sich die Gelegenheit, zusätzliche Parallelmessungen an einem Kamin mit 2 Feuerungen im Misox durchzuführen. Neben unserem Messkoffer wurde ein Testo-380-Messgerät verwendet. Der Vergleich der CO-Messungen zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Messgeräten.

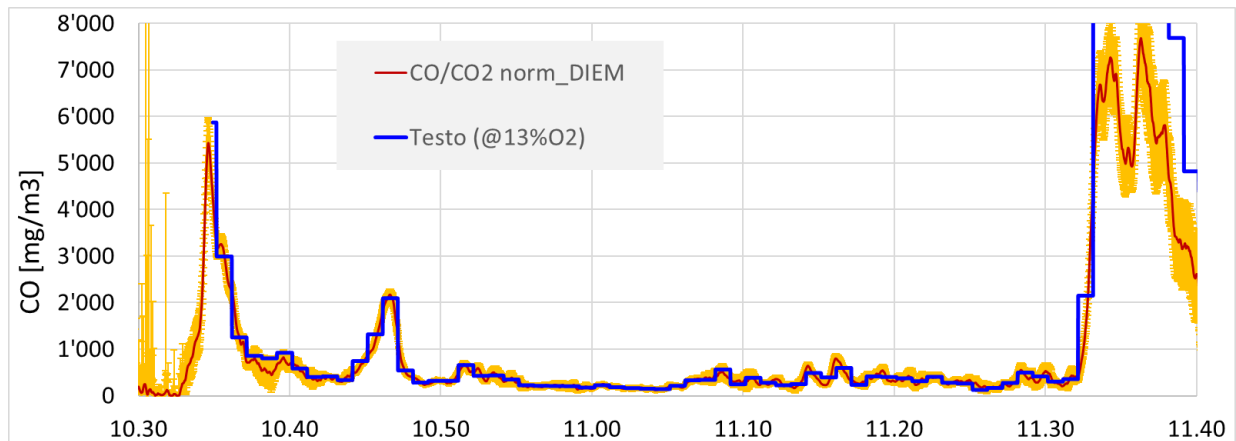


Abbildung 6: Vergleichsmessung CO Testo 380 und DIEM an einem Pellet-Ofen

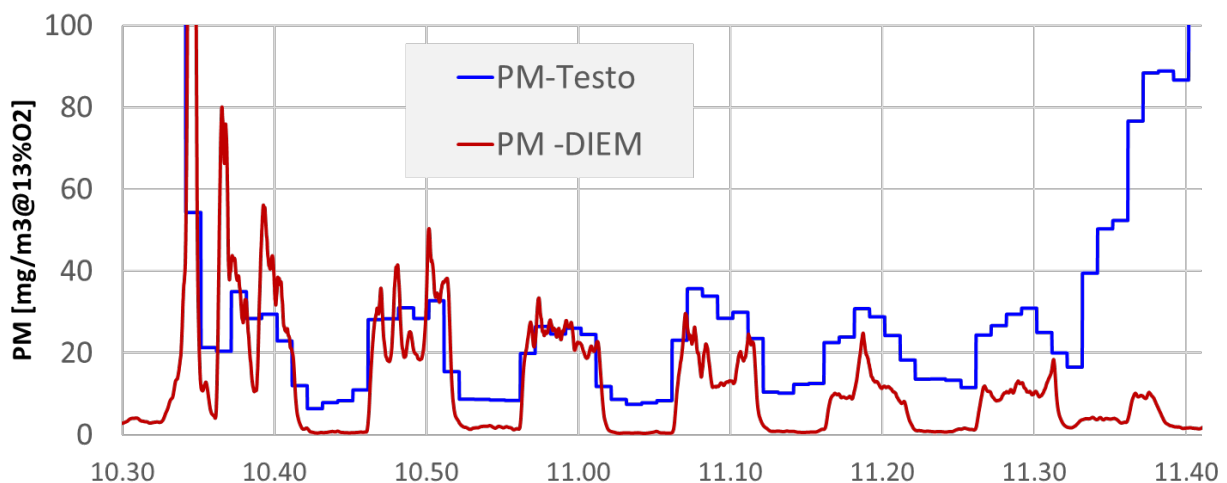


Abbildung 7: Vergleichsmessung PM (Feinstaub) Testo 380 und DIEM an einem Pelletofen

Der Vergleich der Staubmessung zeigt die Schwächen der Testo-Messung in verdünnten Abgasen. Da der Sauerstoffgehalt in der nachgeschalteten Messtrecke zwischen 16 und 18 % betrug, ergab sich ein grosser Umrechnungsfaktor nach 13 % O₂ und eine grosse Messunsicherheit beim Testo 380. Zudem ist der kleinste Messwert beim Testo ca. 3 mg/m³, was auf 13 % O₂ umgerechnet ca. 10 mg/m³ ergibt. Damit zeigt sich, dass klassische, auf O₂ basierte Messungen der Emissionen in verdünnten Abgasen untauglich sind.

Damit wurde gezeigt, dass sich das Messprinzip, bzw. der Messkoffer auch bei niedrigen Staubkonzentrationen eignet und wesentliche Vorteile hat gegenüber anderen gängigen Messmethoden

2.3 Phase 3

Durchführung und Auswertung der Emissionsmessungen in Saas-Fee in der Heizperiode 2018-2019.

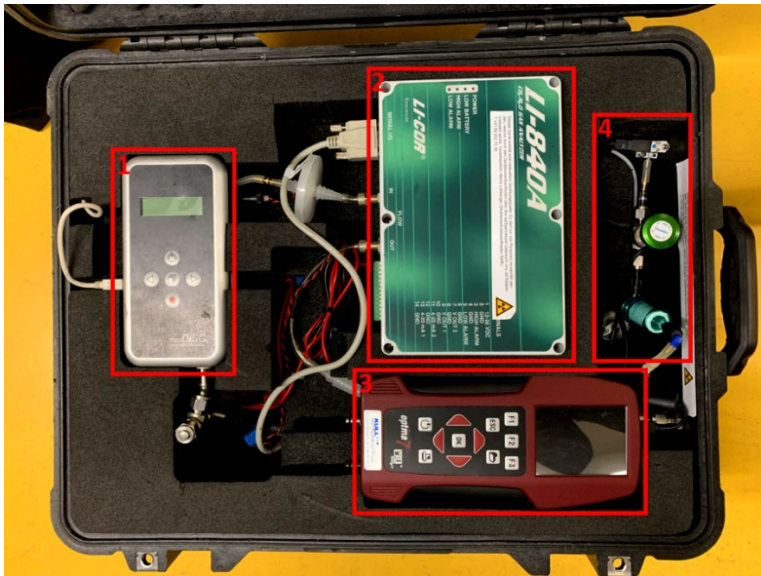
Für Phase 3 wurden schon während Phase 1 Arbeiten zur Information der Bevölkerung und eine Befragung der Anlagenbesitzer gestartet. Von der Gemeinde, dem Kaminfeger und der Oeko-Solve AG standen Listen zur Verfügung, die die vorhandenen Holzfeuerungen mit und ohne Abscheider ausweisen. Leider war die Rückmeldung auf das auf der Webseite der Gemeinde publizierte, Infoblatt zum Projekt nicht sehr gross, sodass in einem zweiten Schritt die Besitzer von Abscheidern direkt kontaktiert wurden. Erfreulicherweise haben sich sehr viele direkt Angesprochene zur Mitarbeit im Projekt bereit erklärt, sodass im Herbst 2018 und im Frühling 2019 an insgesamt 22 Anlagen Messungen durchgeführt werden konnten. Es wurde eine Vielzahl verschiedener und interessanter Anlagen berücksichtigt (offene Cheminées, Schwedenöfen, automatische Stückholzfeuerung, Speicheröfen (Kachel-/Specksteinöfen), Cheminée mit geregelter Luftzufuhr). Es zeigte sich, dass entgegen der ursprünglichen Planung pro Tag nur eine Anlage ausgemessen werden konnte. Gründe dafür sind vielfältig und gehen von der zeitlichen Verfügbarkeit der Anlage, witterungsbedingten Einschränkungen, Schwierigkeiten der Kontrolle der Abbrände bis zu anfänglichen Problemen mit dem Messkoffer oder mit der Datenverbindung zum OekoTube (ESP). Der Messkoffer wurde weiter optimiert und lieferte am Ende zuverlässige und stabile Messdaten. Zusätzlich zu den Messungen mittels DIEM-Methode wurden an zwei Anlagen zusätzliche Emissionsmessungen (Vario Lux) und gravimetrische Staubmessungen (SM 96), welche mit den Messwerten der DIEM-Methode verglichen werden, durchgeführt. Um zu zeigen, wie gut eine Messung reproduziert werden kann, wurden an zwei Anlagen, welche im Herbst 2018 schon untersucht wurden, Wiederholmessungen durchgeführt. Während der Heizsaison 2018/2019 wurden ausserdem an zwei Anlagen Langzeitmessungen durchgeführt. Die ESP-Daten der entsprechenden Anlagen wurden über mehrere Monate aufgezeichnet. Die Resultate sind sehr aufschlussreich und geben wichtige Einblicke in das Betriebsverhalten der ESPs.

3 Material

Im folgenden Kapitel wird das wichtigste Material, welches zur Durchführung dieses Projekts benötigt wurde, kurz vorgestellt.

3.1 Messkoffer

Mit dem Messkoffer wurden die gasförmigen und Partikel-Emissionen gemessen und kontinuierlich aufgezeichnet und normiert. Der Messkoffer besteht aus vier Hauptkomponenten, welche in der unteren Abbildung 8 rot eingerahmt sind. Die einzelnen Geräte und das Messprinzip sind im Meilensteinbericht 1 [1] ausführlich beschrieben.

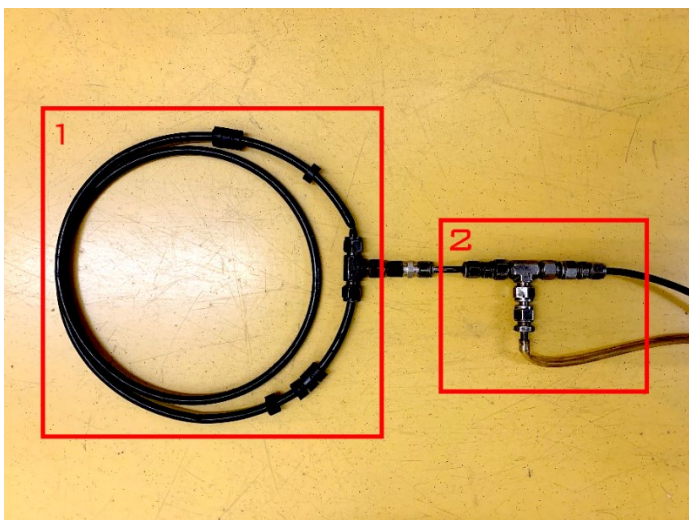


1. miniDiSC (Partikel)
2. Licor (CO₂, H₂O → Verdünnungsmessung)
3. Optima 7 (CO)
4. Verdünnungseinheit (zusätzliche partikelfreie Verdünnungsluft wird hier Richtung Sonde gepumpt, um im optimalen Messbereich der Messgeräte zu bleiben.
5. Nicht sichtbar im unteren Teil des Koffers: Neutralisator, Elektronik und Batterien.

Abbildung 8: Messkoffer DIEM

3.2 Abgas-Sammler

Der Abgas-Sammler (Abbildung 9) kann dem Kamin angepasst montiert werden, sodass er auch bei Wind immer zumindest teilweise im Rauchgasstrom ist.



1. Messsonde aus PTFE-Schläuchen (leitend) mit Bohrungen zur Aufnahme des Rauchgases
2. Mischelement (Axialverdünner) zur Beimischung, bzw. Verdünnung des Rauchgases mit Frischluft.

Abbildung 9: Abgas-Sammler

3.3 Referenz-Messgeräte für Vergleichsmessungen

Die folgenden zwei Messgeräte wurden für die Vergleichsmessungen an Speicheröfen 3 und am Stückholzkessel verwendet (Abbildung 10 und Abbildung 11).



Abbildung 10: MRU VarioLuxx

Mit dem MRU VarioLuxx können verschiedene gasförmige Emissionen gemessen werden. Für dieses Projekt wurde die O₂- und die CO-Konzentration benötigt.



Abbildung 11: Staubmessgerät SM 96

Mit dem Staubmessgerät Wöhler SM 96 kann die Staubmenge gravimetrisch ermittelt werden. Ein definierter Rauchgasvolumenstrom strömt durch einen Filter. Anhand des Gewichts des Filters vor und nach der Probenahme kann die Staubmenge ermittelt werden.

4 Messungen Saas-Fee

An 22 Feuerungen, die mit einem ESP ausgestattet sind, wurden mit dem neuen DIEM-Messverfahren im September/Oktober 2018 und im Mai 2019 25 Messungen durchgeführt. Es wurden jeweils die Staub- und CO-Emissionen gemessen und der Abscheidegrad des EPSs ermittelt. An zwei der Anlagen wurde vor (Herbst 2018) und nach der Heizsaison (Frühling 2019) je eine Messung durchgeführt, um allfällige Abnutzungseffekte zu identifizieren und zu prüfen, wie gut eine Messung reproduziert werden kann. Ausserdem wurden an zwei Anlagen Vergleichsmessungen durchgeführt, bei welchen die Messmethode DIEM mit gängigen Referenzverfahren verglichen wurden.

4.1 Feuerungen

Abbildung 12 zeigt das breite Spektrum an Feuerungen, die untersucht wurden. Es bildet ziemlich gut die Zusammensetzung der Holzfeuerungen in Saas-Fee ab. Je nach Feuerung konnte die Primär- und/oder die Sekundärluftzufuhr geregelt werden. Teilweise konnte auch keine von beiden geregelt werden (offene Cheminées). Die untersuchten Feuerungen werden unterschiedlich oft benutzt, was auch am Kamin und am ESP visuell erkennbar ist.

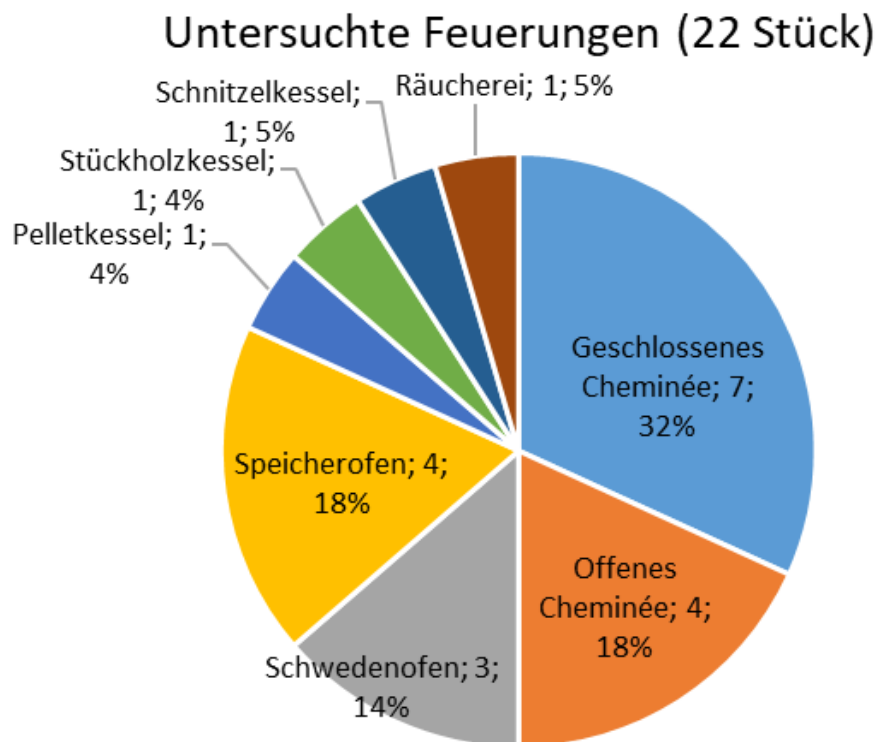


Abbildung 12: Untersuchte Feuerungen in Saas-Fee

Tabelle 4 zeigt die untersuchten Anlagen inklusive der jährlich verbrauchten Holzmengen, wie sie von den Betreibern angegeben wurden.

Mes- sung	Art der Feuerung	Spezielles	Holzver- brauch [kg/a]
1	geschl. Cheminée 1	Primär- und Sekundärluft regelbar	kA
2	geschl. Cheminée 2	Ferienwohnung, Feuerung selten benutzt. Luftzufuhr nur mit zwei verstellbaren Scheiben (Primärluft) möglich.	300
3	geschl. Cheminée 3	Cheminée wurde mit zu viel Leistung (3-fache Last) betrieben.	50
4	geschl. Cheminée 4	Primär- und Sekundärluft regelbar	10
5	geschl. Cheminée 5	Primär- und Sekundärluft nicht regelbar. Umbau mit Staubquelle im Aufstellraum, aber Zuluft über Rohr von aussen.	1'000
6	geschl. Cheminée 6	Ventilator für Luftzirkulation ausgeschaltet, nur Primärluft regelbar	kA
7	geschl. Cheminée +	Automatische Regelung der Luftzufuhr	533
8	Offenes Cheminée 1	Primär- und Sekundärluft nicht regelbar; grosser Feuerungsraum	500
9	Offenes Cheminée 2	Primär- und Sekundärluft nicht regelbar; grosser, offener Feuerungsraum	1'000
10	Offenes Cheminée 3	Primär- und Sekundärluft nicht regelbar.	250
11	Offenes Cheminée 4	Primär- und Sekundärluft nicht regelbar; grosser offener Feuerungsraum, Ventilator auf Dach regelbar	3'000
12	Schwedenofen 1	Nur Primärluft regelbar, gute Feuerung	25
13	Schwedenofen 2	Primär- und Sekundärluft regelbar. Teer im Kamin; sehr kurzer Kamin.	190
14	Schwedenofen 3	Nur Primärluft regelbar	70
15	Speicherofen 1	Ölheizung nutzt denselben Kamin	100
16	Speicherofen 2	Primär- und Sekundärluft regelbar	kA
17	Speicherofen 3a	Primär- und Sekundärluft regelbar (Speicherofen 3 Herbst 18)	4'800
18	Speicherofen 3b	Primär- und Sekundärluft regelbar, produziert viel Teer, (Speicherofen 3 Frühling 19) Vergleichsmessung der Emissionen mit Referenzmethoden	4'800
19	Speicherofen 4	Nur Primärklappe vorhanden, welche nicht benutzt wird	kA
20	Pelletkessel	automatische Feuerung	6'000
21	Stückholzkessel 1a NL	Kunde feuert ein; konstanter Betrieb (automatische Luftzufuhr). (Herbst 18)	3'800
22	Stückholzkessel 1b NL	Kunde feuert ein; konstanter Betrieb (automatische Luftzufuhr) (Frühling 19)	3'800
23	Stückholzkessel 1b TL	produziert bei Teillastabschaltung viel Teer und Emissionen	3'800
24	Schnitzelfeuerung	Vergleichsmessung der Emissionen mit Referenzmethoden	40'000
25	Räucher-Cheminée	Rauch ist hier erwünscht (nur 2x im Jahr verwendet)	0.5

Tabelle 1 Überblick aller untersuchten Feuerungsstätten (kA = keine Angaben)

4.2 Kamine und Messstellen

Die Kamine waren sehr unterschiedlich. Sie unterschieden sich im Durchmesser, in der Geometrie (rund/eckig) und im Material (Metall/Stein). Einige Kamine waren offen und bei einigen war ein Kamin-Hut auf der Kaminöffnung montiert. Unabhängig von den genannten Unterschieden konnte der Abgas-Sammler bei allen Anlagen ohne Probleme montiert werden. Die Messstelle befand sich bei allen Messungen mit Ausnahme von einer Anlage direkt oberhalb der Kaminöffnung. Der Abgas-Sammler (*Abbildung 9*) wurde jeweils mit Klebeband oder Draht am entsprechenden Kamin befestigt. Die Resultate zeigen, dass diese Art der Rauchgassammlung sich für alle Kamine eignete und auch bei Wind eine reproduzierbare Bestimmung der Abscheidegrade ermöglichte.

Einige Kamine und deren Öffnungen mit montiertem Abgas-Sammler:



Abbildung 13: Metall, rund, mit Kaminhut



Abbildung 14: Stein, rund, ohne Kaminhut



Abbildung 15: Stein, eckig, ohne Kaminhut



Abbildung 16: Metall, rund, halb offen (drehbarer Kaminhut)

4.3 Zustand der ESP

Der angetroffene Zustand der ESPs war sehr unterschiedlich. An den meisten Anlagen musste im Herbst 2018 oder Frühling 2019 ein Service durch die Firma OekoSolve durchgeführt werden. Beim Service wurden hauptsächlich die Elektronik (HV-Modul und Steuerung) und die Elektrode ausgetauscht. Mit der alten Steuerung wäre es gemäss Angaben von OekoSolve nicht möglich gewesen, die Betriebsdaten des ESP auszulesen. Ausserdem wurde die Regelung und das Hochspannungs-Modul seit dem Einbau der ESP im Jahr 2010/2011 weiterentwickelt. Die neue Steuerung entspricht somit dem aktuellen Stand der Technik bei OekoSolve. Auch die Elektrode wurde seit damals weiterentwickelt und die Stabilität wurde verbessert. Bei einigen Anlagen musste die Elektrode ausgetauscht werden, da sie sich verformt hatte. Gemäss Angaben von OekoSolve entspricht dies aber einem normalen Vorgehen bei der Wartung. Durch den Service vor den Messungen funktionierten die Anlagen einwandfrei. Einzig die maximale Spannung und das Einschaltkriterium musste bei einzelnen Anlagen angepasst werden. Bei zwei Anlagen wurde seit 2011 kein Service gemacht. Auch wurden Anlagen angetroffen, die gar nicht ans Stromnetz angeschlossen waren.

Mes- sung	Angetroffener Zustand vor dem Service durch OekoSolve	ESP Typ	Service	Elekt- rode	Elekt- ronik
1	ESP in Betrieb	OT2	Sep 19	neu	neu
2	ESP ausser Betrieb, Störung: Elektrode schief, Magnet defekt	OT2	Mai 19	neu	neu
3	ESP in Betrieb, wenig gebraucht	OT1.5	Okt 18	alt	neu
4	ESP in Betrieb, kein Service durchgeführt seit Einbau 2011	OT2	Kein Service	alt	alt
5	ESP in Betrieb	OT2	Mai 19	neu	neu
6	ESP ausser Betrieb, Vogelnest in Abscheider, HV-Modul und Elektrode defekt	OT2	Sep 18	neu	neu
7	ESP ausser Betrieb, Stromanschluss fehlt, keine Kommunikation möglich	OT2	Sep 18	alt	neu
8	Keine Hochspannung, ESP ausser Betrieb	OT2	Mai 19	neu	neu
9	ESP ausser Betrieb, HV-Modul und Elektrode defekt, Glanzrussbildung an der Mündung	OT2	Sep 18	neu	neu
10	ESP in Betrieb	OT2	Okt 18	neu	neu
11	ESP in Betrieb. Ggf. Einschalttemperatur zu hoch (wurde bei der Messung festgestellt)	OT1	Funktionstest Sep 18	alt	alt
12	Elektrode defekt	OT2	Sep 18	neu	neu
13	ESP ausser Betrieb, Stromanschluss fehlt, Elektrode defekt	OT2	Okt 18	neu	neu
14	ESP ausser Betrieb, Kabel abgerissen	OT2	Mai 19	neu	neu
15	ESP ausser Betrieb, Elektrode defekt	OT2	Sep 18	neu	alt
16	kein Service durchgeführt seit Einbau 2011	OT2	Kein Service	alt	alt
17	ESP auf Störung	OT2	Sep 18	alt	neu
18	ESP in Betrieb				
19	Kein Service, ESP in Betrieb	OT1.5	Kein Service	alt	alt
20	ESP ausser Betrieb, OT-Stecker defekt	OT2	Mai 19	neu	neu
21	Elektrode defekt	OT2	Sep 2018	neu	neu
22	Elektrode musste nach Kaminbrand ersetzt werden		Mai 2019		
23					
24	ESP in Betrieb	Oeko- rona	Mai 19	neu	neu
25	ESP in Betrieb, Einschaltfunktion müsste geändert werden (Nutzung: Räuchern → Temperatur zu niedrig)	OT2	Kein Service	alt	alt

Tabelle 2 Überblick aller untersuchten ESP

4.4 Typischer Prüfablauf

Da die Emissionen mit nur einer Messsonde am Ende des Kamins nach dem ESP erfasst werden, musste die Effizienz des ESP mittels Ein- und Ausschalten (ON-OFF- Betrieb) ermittelt werden.

4.4.1 Prüfablauf

Die Feuerung wurde gemäss Betriebsanleitung, falls vorhanden oder gemäss Erfahrung der Betreiber und der Prüfer betrieben. Ziel war eine gute Abbrandqualität (kein Luftmangel, wenig Rauch, homogenes Glutbett am Ende etc.) und keine Störungen, damit die Abbrände gut reproduziert werden konnten.

Bei einem typischen Prüfablauf wurden in der Regel zuerst ein Kaltstart-Abbrand und danach mindestens drei weitere Abbrände durchgeführt.

Mittels dem Kaltstart-Abbrand wurde die Feuerung auf Temperatur gebracht, mit dem Ziel, dass für die nachfolgenden Abbrände dieselben Bedingungen herrschten. Ausserdem wurde so das automatische Einschaltverhalten des ESP geprüft. Der ESP schaltet abhängig von der Temperatur im Kamin ein. Für das sogenannte Anfeuermodul wurde ca. die 1.5-fache Menge Holz verwendet, die für das Nachlegen verwendet wurde, damit eine genügende Grundglut für das erste Nachlegen vorhanden war. Es wurde von oben her angezündet, was zu geringeren Emissionen beim Anfeuern führt.



Abbildung 17: geschlossenes Cheminée mit Anfeuermodul (1.5-faches Gewicht des Nachlegemoduls)



Abbildung 18: Anfeuermodul von oben her gezündet

Dann folgten je ein ganzer Abbrand mit ESP ON und ESP OFF (Vergleichsabbrände), wobei versucht wurde, diese möglichst gleich zu gestalten. Es wurde dieselbe Menge Holz verwendet

und darauf geachtet, dass die Nachlegemodule möglichst ähnlich waren (Grösse und Form der Scheite, Anteil an Rinde oder Ästen, Feuchte).



Abbildung 19: Nachlegemodule für die Vergleichsabbrände

Ausserdem wurde die Grundglut beim Nachlegen vor dem jeweiligen Abbrand und das Feuer regelmässig (alle 5 min) oder bei speziellen Ereignissen (Verschiebung von Holzstücken, einseitiges Flammenbild, Rauchentwicklung) fotografisch festgehalten, um die Vergleichbarkeit der Abbrände beurteilen zu können. Alle Einstellungen, Manipulationen und Ereignisse wurden dokumentiert.

Es wurde am Ende in der Regel mindestens ein weiterer Abbrand durchgeführt, bei welchem der ESP in 5-min-Intervallen ein- und ausgeschaltet wurde. Dabei wurde meist eine leicht grössere Menge an Holz verwendet, um den Abbrand zu verlängern.

4.4.2 Messung

Die Sonde des DIEM-Messkoffers wurde an der Kaminmündung montiert (Emissionsmessung) und der ESP mittels Datenkabel mit dem Messkoffer verbunden (ESP-Datenaufzeichnung und -Steuerung). Mit einem Laptop konnten die Daten des Messkoffers per Wireless-Kommunikation überwacht und der ESP ein- und ausgeschaltet werden. Es folgt ein Beispiel für eine Messung an einem Giltsteinofen (Speicherofen). Bei diesem wurde die 2.5-fache Holzmenge für den Kaltstart verwendet, da bei einem solchen Ofen viel mehr Speichermasse erhitzt werden muss.

	Kaltstart	Abbrand 1	Abbrand 2	Abbrand 3	Abbrand 4	Abbrand 5
ESP-Modus	Intervall	ESP OFF	ESP ON	ESP ON	ESP OFF	Intervall
Abbrandstart	11:00	12:31	13:35	14:39	15:43	16:47
Abbranddauer [h]	01:31	01:04	01:04	01:04	01:04	01:00
Holzverbrauch (Lerche)	5	1.8	1.8	1.8	1.8	4
Mittlere Leistung ⁵ [kW]	13.2	6.8	6.7	6.8	6.7	16.0

Tabelle 3: Beispiel eines Prüfablaufs

⁵ Annahme: 4 kWh pro kg Holz

Abbildung 20 zeigt die gesamte Messung mit den wichtigsten Messdaten. Zwischen den Abbränden wurden jeweils für ca. 5 min die Sensoren mit Umgebungsluft gespült und eine Offsetmessung resp. Nullpunktbestimmung ($\text{CO}_2_{\text{Umgebung}}$, Nullung CO-Messung, Nullung Partikelmessung) durchgeführt (erkennbar durch: $\text{CO}_2_{\text{netto}}$ wird null, was durch die Normierung zu hohen Peaks von CO führt.)

Die ESP-Daten, die ausgelesen werden können, umfassen neben der Spannung und der Leistung viele weitere Grössen (z. B. Temperatur, Strom, Störungen etc.) und lieferten Hinweise zum Einschaltverhalten, Regelverhalten und zu Störungen, Durchschlägen etc. Der reale Spannungs- und Leistungsverlauf wird in diesem Bericht nicht dargestellt, da daraus Rückschlüsse auf die Regelung gezogen werden könnten, was für den Hersteller OekoSolve ein Betriebsgeheimnis darstellt. Anhand der Grösse «ESP-Status» können aber die ON- und OFF-Intervalle gezeigt werden. Ausserdem sind an den punktuellen, kleinen Ausbrüchen (z. B. um 12:00) die Durchschläge erkennbar.

Auch von den Feinstaub-Daten sind nur die für die vorliegende Fragestellung wichtigsten Grössen abgebildet (Feinstaubmasse und LDSA⁶ normiert), für die Auswertung konnten weitere Daten herangezogen werden (mittlerer Durchmesser, Durchfluss, Temperatur, Rohsignale für die Regelung der Verdünnung). Der Effekt des ESP ist gut in den Intervall-Abbränden (Kaltstart und Abbrand 5) sichtbar.

$\text{CO}_2_{\text{netto}}$ ist wichtig, um die Verdünnung zu beurteilen ($\text{CO}_2_{\text{netto}} = \text{CO}_2 + \text{CO} - \text{CO}_2_{\text{Umgebung}}$). Mit sinkendem $\text{CO}_2_{\text{netto}}$ nimmt die Verdünnung und somit auch die Messunsicherheit zu, da $\text{CO}_2_{\text{netto}}$ für die Normierung der Emissionswerte (Staubmasse, LDSA, CO) verwendet wird. Mittels des CO-Verlaufs kann der Abbrand selbst beurteilt werden (Abbrandqualität, Abbrandverlauf) und die Vergleichbarkeit der Abbrände untereinander beurteilt werden. In Abbildung 21 sind 2 Vergleichsabbrände vergrössert abgebildet. Der CO-Verlauf zeigt den typischen Verlauf: CO nimmt schnell ab zu Beginn des Abbrandes und bleibt auf einem tiefen Niveau während der Hauptbrandphase (Flamme). In der Ausbrandphase (Glutphase) steigt der CO-Wert wieder an. Die Verläufe sind ziemlich ähnlich. Der zweite Abbrand hatte etwas tiefere CO-Werte während der Hauptbrandphase (gute Flamme) und ging dann schneller in den Ausbrand gegenüber dem ersten Abbrand, der im Ausbrand noch etwas mehr Flamme gehabt zu haben scheint und CO deshalb langsamer anstieg. Im Mittel sind die Abbrände aber sehr gut vergleichbar und auch die restlichen Daten und das Glutbett am Ende des Abbrands deuten auf eine vergleichbare Abbrandqualität hin.

Die Berechnungsmethode der normierten Emissionen aus den Rohsignalen ist im Meilensteinbericht 1 [1] ausführlich beschrieben.

⁶ Die «Lung Deposit Surface Area» ist die Oberflächenkonzentration [mm^2/cm^3] der Partikel, gewichtet mit der Ablagerungswahrscheinlichkeit in der Lunge (proportional zu d^{-1}). Die LDSA ist bezüglich gesundheitlicher Relevanz eine wichtige Grösse, die mit dem DiSCmini einfach gemessen werden kann.

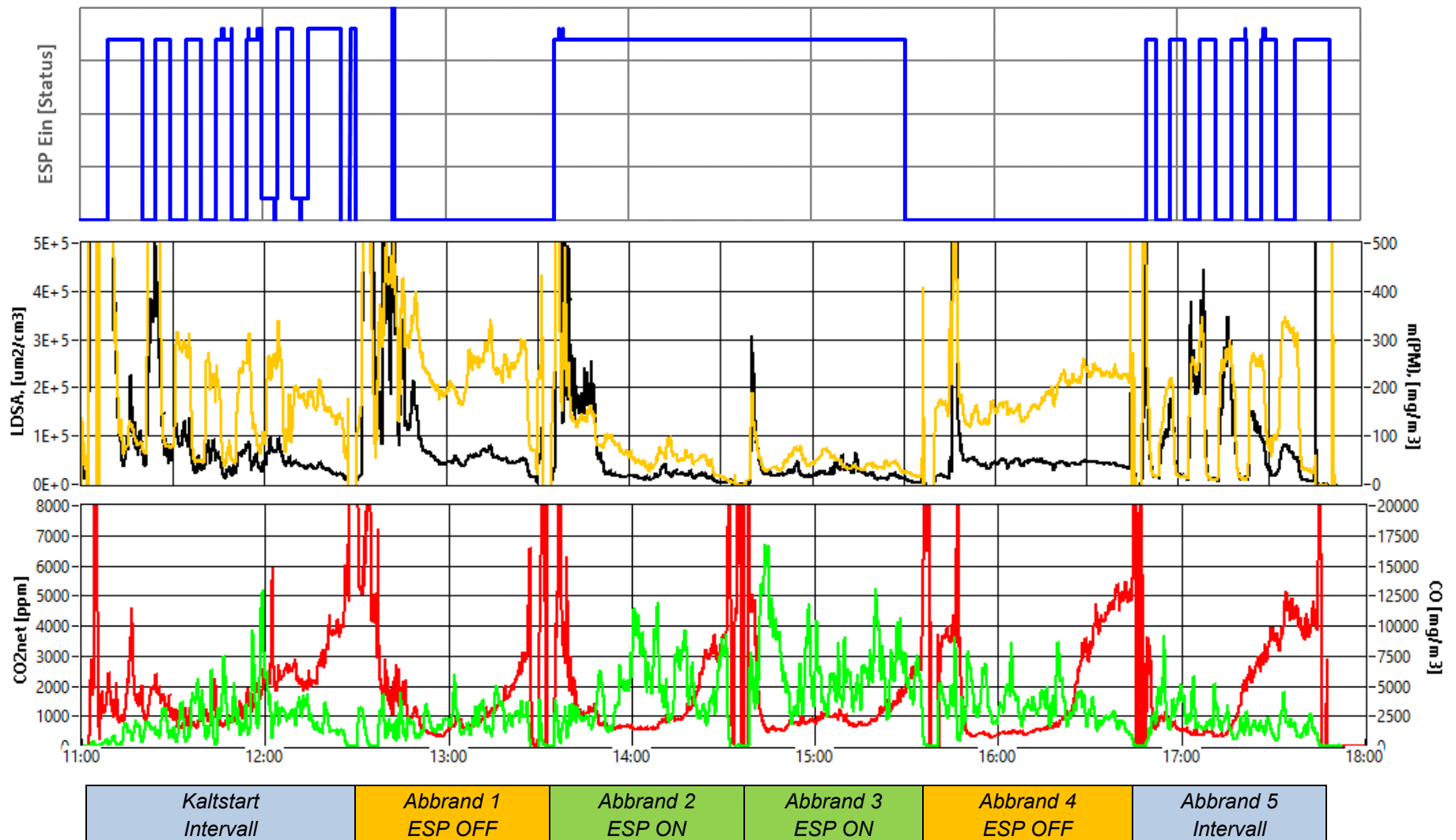


Abbildung 20: Gesamte Messung: Oben: ESP-Spannung (Ein, blau); Mitte: normierte Feinstaubkonzentration m (schwarz), normierte LDSA (gelb); Unten: CO₂netto (grün), normierte CO-Konzentration (rot). Alle normierten Werte sind auf Normkubikmeter bei 13 % O₂ normiert.

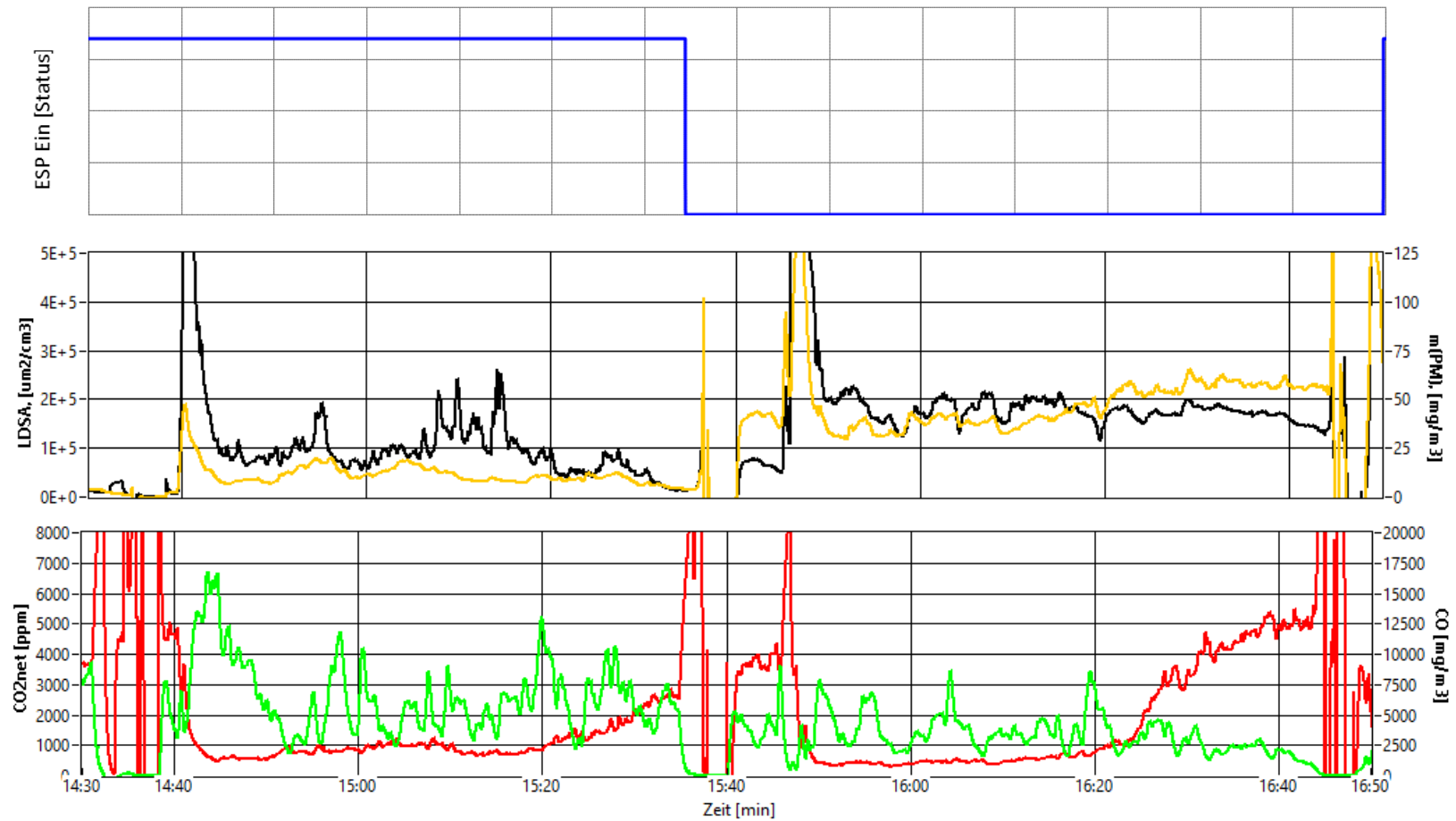


Abbildung 21: Abbrand 3 und 4 aus Abbildung 20: ESP-Spannung (Ein, blau); Mitte: normierte Feinstaubkonzentration m (schwarz), normierte LDSA (gelb); Unten: CO_2 netto (grün), normierte CO-Konzentration (rot). Alle normierten Werte sind auf Normkubikmeter bei 13 % O_2 normiert.

4.4.3 Auswertung und Bestimmung Abscheidegrad

Die Emissionen bei den Phasen ESP ON und ESP OFF wurden gemittelt (Abbildung 22). Es wurden nur Phasen berücksichtigt, in welchen die Daten verlässlich waren und die Verdünnung nicht zu hoch war. Dabei resultieren Mittelwerte für die ganzen Abbrände (Abbrand 1-4) und Mittelwerte für die Intervallmessungen (Kaltstart und Abbrand 5). Diese Emissionen wurden beurteilt und die Datenqualität beschrieben.

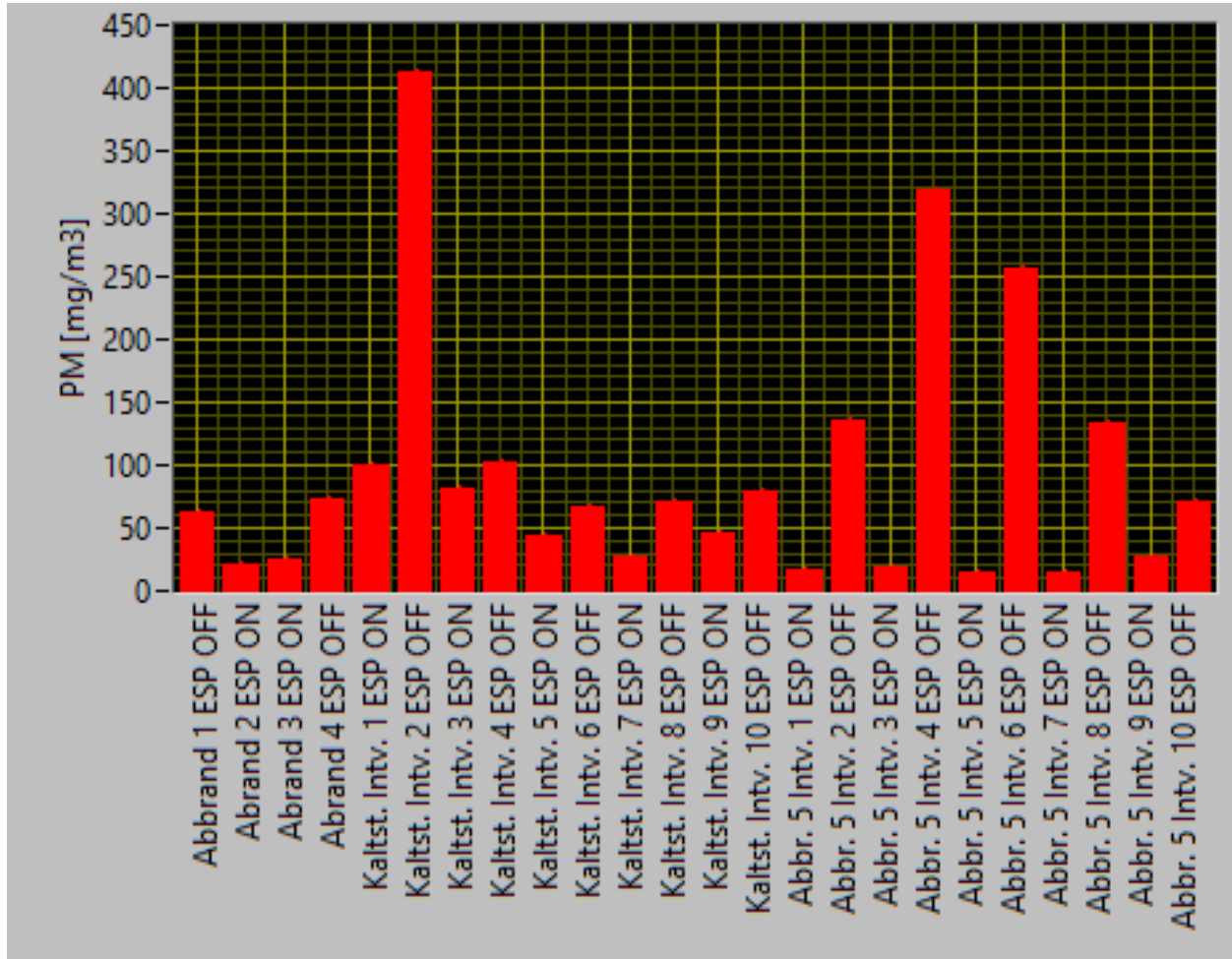


Abbildung 22: Mittelwerte der Abbrände und der Intervallmessungen

Um den Abscheidegrad zu bestimmen, musste eine Gewichtung dieser Mittelwerte durchgeführt werden. Abbildung 23 zeigt schematisch, wie die Auswertung und die Gewichtung durchgeführt wurde. Die Frage war, welche Mittelwerte die Anlage besser repräsentieren, diejenigen aus den ganzen Abbränden oder diejenigen aus den Abbränden mit den Intervallen. Ausserdem stellte sich die Frage, wie verlässlich die Daten im Allgemeinen waren. Die Gewichtung wurde anhand der Datenmenge und -qualität für die jeweiligen Phasen bestimmt. Für die Beurteilung der Vergleichbarkeit wurden hauptsächlich die Beobachtungen beim Feuern, der CO-Verlauf und die Messunsicherheit aufgrund hoher Verdünnung berücksichtigt. Aber auch weitere Rohsignale und Messgrößen wurden herangezogen, um die Datenqualität und die Repräsentativität und in der Folge auch die Verlässlichkeit des Ergebnisses (Abscheidegrad) zu beurteilen.

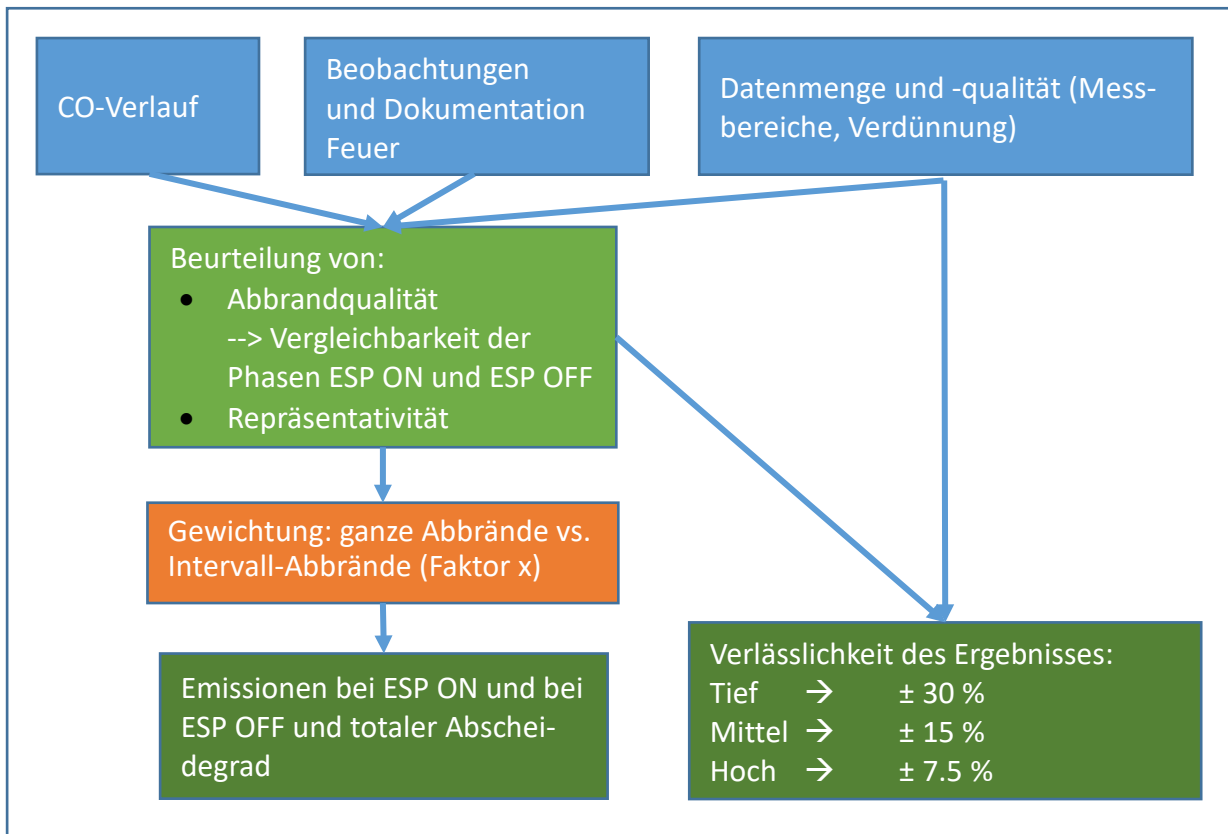


Abbildung 23: Wirkungsdiagramm für die Auswertung der Messungen

Aus der Beurteilung der Abbrandqualität und der Vergleichbarkeit der Phasen bei ESP ON und bei ESP OFF ergibt sich ein Gewichtungsfaktor für die Intervalle ($0 < x < 1$), mit welchem die Mittelwerte aus den Messungen gewichtet wurden. Diese Faktoren sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Daraus wurden die totalen mittleren Emissionen für ESP ON respektive für ESP OFF ermittelt und der Abscheidegrad wurde mittels folgender Gleichung bestimmt.

$$\text{Abscheidegrad} = 1 - \frac{\overline{PM}_{\text{TotalON}}}{\overline{PM}_{\text{TotalOFF}}} = 1 - \frac{\overline{Int}_{\text{ON}} \cdot x + \overline{Abbr}_{\text{ON}} \cdot (1 - x)}{\overline{Int}_{\text{OFF}} \cdot x + \overline{Abbr}_{\text{OFF}} \cdot (1 - x)}$$

$\overline{Int}_{\text{ON}}$	Mittelwert aus allen Intervallen bei ESP ON
$\overline{Abbr}_{\text{ON}}$	Mittelwert aus allen ganzen Abbränden bei ESP ON
$\overline{Int}_{\text{OFF}}$	Mittelwert aus allen Intervallen bei ESP OFF
$\overline{Abbr}_{\text{OFF}}$	Mittelwert aus allen ganzen Abbränden bei ESP OFF
x	Gewichtungsfaktor für die Intervalle ($0 < x < 1$)

(Analog zu $\overline{PM}_{\text{TotalON}}$ und $\overline{PM}_{\text{TotalOFF}}$ werden auch die Mittelwerte für CO, ESP-Spannung und -Leistung bestimmt. Auch diese Werte sind in Tabelle 4 aufgelistet)

4.5 Resultate Übersicht

In der Übersichtsgrafik in *Abbildung 24* sind die Emissionen und die Abscheidegrade der geprüften Anlagen abgebildet. Die offenen Cheminées waren tendenziell die emissionsreichsten (CO und Staub), da sie aufgrund vieler kalter Stellen und unregelmäßiger Zuluft schwierig sauber zu betreiben sind. Die geschlossenen Cheminées waren in dieser Hinsicht besser und die Schwebenöfen noch etwas besser (kleiner Feuerraum). Die Speicheröfen sollten sich erwartungsgemäss im Bereich der Schwebenöfen bewegen. Die Ausreisser sind auf schwierige Bedingungen durch Wind, der von oben ins Kamin und ins Feuer drückte bei Speicheröfen 4, und einen zu grossen Feuerraum bei Speicheröfen 2 zurückzuführen. Die Abscheidegrade sind tendenziell tiefer bei hoher Staubkonzentration. Die Kessel wiesen erwartungsgemäss geringe Emissionen auf, ausser dem Stückholzkessel, wenn er in Teillastbetrieb ging (intermittierender Betrieb). Bei Messung 11 (Typ OekoTube 1) und 25 (Räucherei) hat der ESP gar nicht eingeschaltet. Dies liesse sich im ersten Fall allenfalls durch einen Service beheben. Bei der Räucherei bestand das Problem, dass die Abgastemperatur nicht ausreichte, damit der Abscheider sich automatisch einschaltete und sich manuelles Ein- und Ausschalten sehr schwierig gestaltete. Ausserdem war die Verdünnung zu hoch, womit die Messwerte eine sehr grosse Messunsicherheit aufweisen. Der OekoTube 1 entspricht nicht dem aktuellen Stand der Technik und die Betriebsbedingungen beim Räuchern entsprechen nicht einer Standardnutzung, weshalb diese Anlagen für den mittleren Abscheidegrad nicht berücksichtigt wurden. **Es resultierte ein mittlerer Abscheidegrad über alle Anlagen von 70 % ± 10 %.**

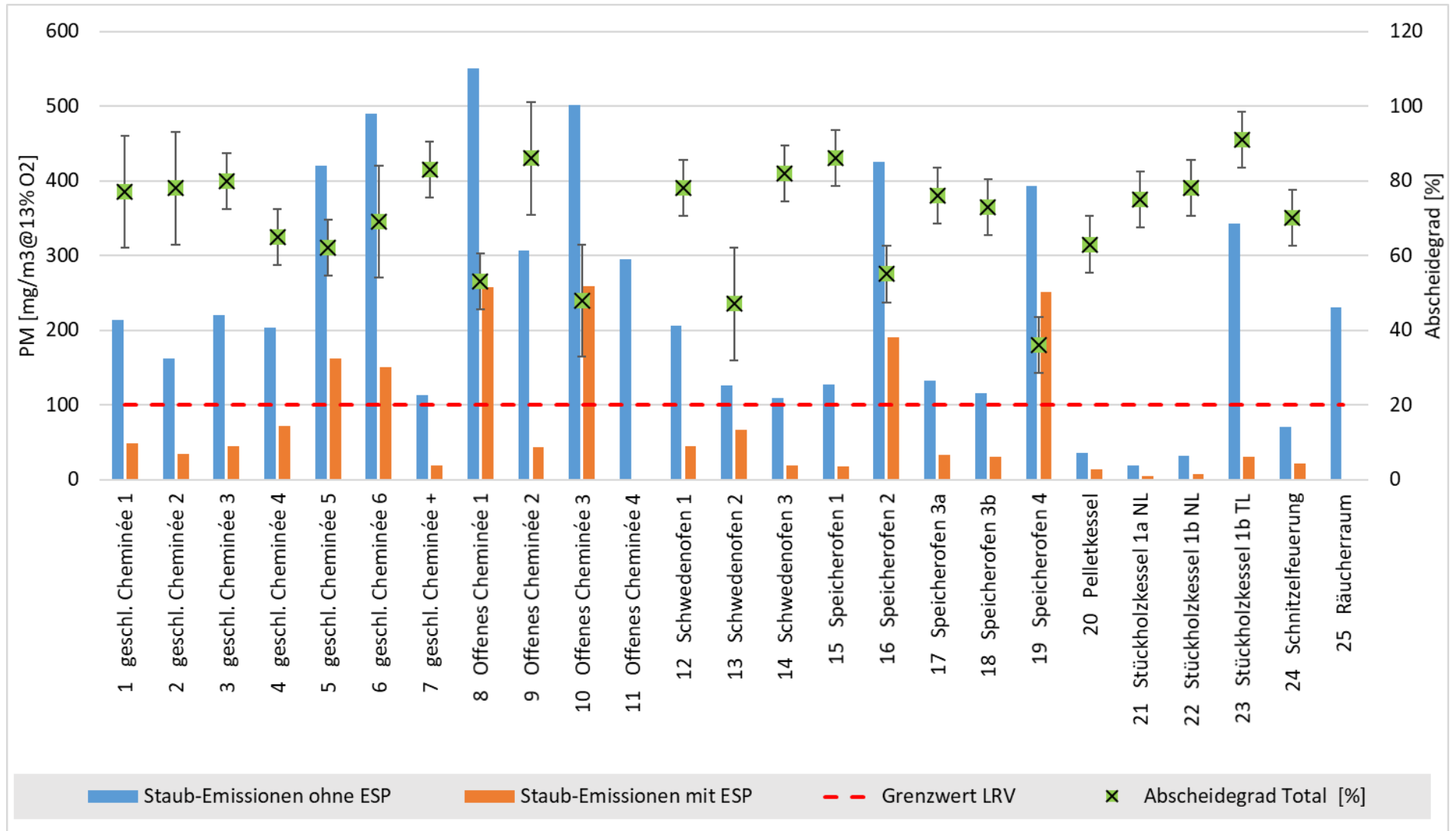


Abbildung 24: Übersicht Messergebnisse aller Anlagen

	Staub-Emissionen ohne ESP [mg/m ³ @13%O ₂]	Staub-Emissionen mit ESP [mg/m ³ @13%O ₂]	Abscheidegrad aus Abbränden [%]	Abscheidegrad aus Intervallen [%]	Gewichtung: Anteil Intervalle x [%]	Abscheidegrad Total [%]	Mittlere Spannung ESP [kV]	Mittlere Leistung des ESP [W]	CO-Emissionen bei ESP ON [mg/m ³ @13%O ₂]	CO-Emissionen bei ESP OFF [mg/m ³ @13%O ₂]	Verlässlichkeit des Ergebnisses [%]
1	214	49	77	--	0	77	30	5.7	--	5230	mittel
2	162	34	41	82	70	78	27	14.9	4717	5329	mittel
3	220	44	87	79	90	80	26.6	8.7	12000	10000	hoch
4	203	72	54	70	70	65	-	-	7300	6510	hoch
5	420	162	64	57	50	62	22	7.7	7330	7760	hoch
6	490	151	-	69	100	69	-	-	7580	8300	mittel
7	113	19	85	82.5	80	83	29.6	14.4	6490	7180	hoch
8	551	258	59	38	20	53	30	4.6	6380	7440	hoch
9	307	43	89	54	50	86	30	7.8	7800	8100	mittel
10	502	259	--	48	100	48	30	5.7	4460	6470	mittel
11	295	-	-	-	-	-	-	-	-	3540	-
12	206	45	88	56	30	78	29	15.3	5100	6370	hoch
13	126	66	24	51	80	47	23	-	8400	8200	mittel
14	109	19	88	63	30	82	28.4	15.8	4550	5380	hoch
15	127	18	83	88	50	86	30	8.1	6410	6120	hoch
16	426	191	-11	62	80	55	30	4	6770	8270	hoch
17	133	33	72	79	50	76	28.1	15.7	7050	8370	hoch
18	116	30	66	76	50	73	25	15.3	3290	3900	hoch
19	393	251	-	36	100	36	19	4.3	5290	6180	hoch
20	35	13	-	63	100	63	30	8	60	60	hoch
21	18.4	5	-	75	100	75	25	16	30	30	hoch
22	32	7	-	78	100	78	21	2.8	5.74	5.83	hoch
23	343	30	-	91	100	91	23	1.8	15000	15000	hoch
24	70	21	67	74	50	70	24	7.5	75	112	hoch
25	230	-	-	-	-	-	-	-	-	7900	-

Tabelle 4: Überblick über die wichtigsten Messresultate an allen geprüften Anlagen.

Bei den Anlagen von Messung 4, 16, und 19 wurde seit dem Einbau 2010/2011 kein Service durchgeführt. Der Abscheidegrad ist bei diesen Anlagen tendenziell etwas tiefer. Bei 19 war die max. Spannung zu tief eingestellt, was sich bei der sehr hohen Staubkonzentration besonders stark auswirkte.

Die Wiederholmessungen zeigten beim Speicherofen 3 (Messung 17 und 18), dass keine signifikante Verminderung des ESP-Abscheidegrades nach einer Heizsaison in Betrieb vorliegt. Die Resultate (Emissionen und Abscheidegrad) konnten gut reproduziert werden.

Anhand der relativ kleinen Differenzen der CO-Werte zwischen ESP-ON resp. ESP-OFF lässt sich ablesen, dass die für den Abscheidegrad verglichenen Phasen bezüglich der Abbrandqualität vergleichbar waren.

Die Abscheidegrade, die aus den ganzen Abbränden ermittelt wurden, unterscheiden sich teilweise sehr stark von den Abscheidegraden, die aus den Intervallmessungen ermittelt wurden. Welche nun mehr gewichtet werden, wurde anhand des ausführlichen Versuchsprotokolls und einer intensiven Datenanalyse ermittelt (vgl. 4.4.3.).

Zu jeder Anlage wurde ein detaillierter Bericht verfasst. Die wichtigsten Resultate werden jeweils am Ende dieser Berichte zusammengefasst und ein Fazit gezogen. Die Detail-Berichte liegen dem Bundesamt für Umwelt vor und sind aus Gründen des Datenschutzes nicht Teil dieser Veröffentlichung. Die einzelnen Berichte wurden den jeweiligen Betreibern und Betreiberinnen der untersuchten Feuerungen zur Verfügung gestellt.

4.6 Einordnung der Messwerte

Die Emissionen waren gegenüber Prüfstands-Messungen nach EN 16510 (Häusliche Feuerstätten für feste Brennstoffe - Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfverfahren) wesentlich höher. Dies ist aus den folgenden Gründen zu erwarten:

- a) Es wurde (beim Staub) jeweils über die ganze Abbranddauer gemessen und nicht nur über die "guten 30 min", wie es bei den Prüfstandmessungen der Fall ist.
- b) Es wurde bis zum Erreichen der Grundglut gemessen und nicht nur bis zum Abbruchkriterium von 4% CO₂. Gerade im Ausbrand entsteht viel CO.
- c) Es wurde am Ende des Kamins gemessen und nicht 1 m nach der Feuerstätte (erhöhte Werte durch kondensierte VOC (Teere)).
- d) Die Messwerte wurden kontinuierlich auf mg/m³ @ 13 % O₂ normiert. Die Mittelung erfolgt nach dieser Normierung und nicht vor der Normierung. Das ergibt die realen Emissionen (Frachten), die zwei- bis dreimal höher sind als bei Auswertung nach Norm. Normierung auf 13 % O₂ und Mittelung der Emissionen sind nicht vertauschbare Operationen.
- e) Die Feuerung wurde nicht unbedingt optimal betrieben: Dazu fehlte die Erfahrung mit der jeweiligen Feuerung. Betriebsanleitungen waren meist nicht mehr vorhanden. Auch Einflüsse durch Wind am Kamin wirken sich auf das Feuer aus. Schliesslich wurde mit «realem» Holz gefeuert (meistens Buche (Scheitholz von Coop), aber auch Lärchen- oder Föhrenholz mit Rinde, Wassergehalt ev. erhöht), was ebenfalls Auswirkungen auf die Emissionen hatte. Auf dem Prüfstand hingegen wird standardisiertes Holz verwendet und es besteht ein definierter Kaminzug.

Bei Messungen nach den *Messempfehlungen Feuerungen* des BAFU⁷ würde bei Einzelraumfeuerungen 15 Minuten nach Kaltstart für eine Dauer von 15 Minuten gemessen. Bei diesem Prozedere würden ebenfalls tiefere Staub- und CO-Emissionen resultieren, als wenn wie im Projekt über die ganze Abbranddauer gemessen und gemittelt wird.

⁷ Emissionsmessung bei Feuerungen für Öl, Gas und Holz, BAFU, 2018

4.7 Fazit

«Wenn die ESP in Betrieb sind, dann führen sie zu einer deutlichen Reduktion (70 % ± 10 %) des emittierten Feinstaubes. Der ordnungsgemässe Betrieb des ESP muss aber gewährleistet sein. »

Es wurden insgesamt 25 Messungen durchgeführt an 22 Anlagen in Saas-Fee, wobei das ganze Spektrum von gängigen häuslichen Feuerungen abgedeckt wurde. Es wurden zudem an zwei Anlagen Wiederholmessungen anfangs und Ende der Heizperiode durchgeführt und die Resultate (Emissionen und Abscheidegrade) konnten reproduziert werden, was für das Messprinzip und die Stabilität der ESP spricht.

Bei einer Messung wurden jeweils ganze Abbrände mit ESP ON und ESP OFF verglichen und Abbrände, bei denen in 5 min-Intervallen der ESP ein- und ausgeschaltet wurde. Es hat sich gezeigt, dass es sehr anspruchsvoll ist, Abbrände zu reproduzieren, wodurch die Vergleichbarkeit der Abbrände mit ESP OFF resp. mit ESP ON nicht immer gegeben ist. Das zeigte sich insbesondere bei ohnehin emissionsreichen Feuerungen, die schwierig zu kontrollieren sind, wie zum Beispiel offene Cheminées. Auch bei den Intervall-Abbränden können sehr inkonstante und dynamische Abbrandverläufe zu einer Verfälschung des Resultats führen. Jedoch könnte dieser Einfluss durch eine grössere Datenmenge statistisch gemindert werden. Deshalb wird für zukünftige Messungen empfohlen, eher Abbrände mit ON/OFF-Intervallen durchzuführen anstelle von ganzen Abbränden mit ESP ON resp. ESP OFF.

Die gemessenen Emissionen (CO und Staub) sind grösstenteils plausibel und typisch für den jeweiligen Feuerungstyp. Bei einzelnen Messungen konnte nicht optimal gefeuert werden (schlechter Brennstoff, Winddruck im Feuer). In diesen Fällen wurde dann eher die ESP-Effizienz bei schlechtem Feuerungsbetrieb abgebildet, was vermutlich ebenso repräsentativ für diese Anlagen ist. Es zeigte sich ein tendenziell schlechterer relativer Abscheidegrad bei sehr hohen Staubemissionen, wobei bei diesen hohen Staubfrachten die absolute Menge (mg/m^3 resp. mg/kg Holz) an gefiltertem Feinstaub sehr hoch und damit der Nutzen der ESP besonders gross war. Es ist jedoch damit zu rechnen, dass in solchen Fällen der ESP schneller verschmutzt, was mit einer sinkenden Effizienz oder einem erhöhten Reinigungsbedarf einhergeht.

Viele der Anlagen unterschritten dank des ESP den Emissionsgrenzwert der LRV von $100 \text{ mg}/\text{m}^3$ für Staub. Hier muss allerdings beachtet werden, dass die Messungen nicht nach den Messempfehlungen des BAFU durchgeführt wurden, auf welche sich diese Grenzwerte beziehen (vgl. Kapitel 4.6). Gemäss den Messempfehlungen darf zudem 40% vom Messwert als Messunsicherheit abgezogen werden und es wird nicht kontinuierlich normiert, sondern die Normierung wird nach der Mittelwertbildung vorgenommen. Dies führt zu deutlich niedrigeren Emissionen, als die in diesem Projekt vorliegenden Resultate.

Allerdings musste bei fast allen ESP vor der Messung ein Service durchgeführt werden. Viele der Anlagen hätten sonst nicht ordnungsgemäss funktioniert. Eine Funktionskontrolle durch eine für den Kunden sichtbare Anzeige und eine regelmässige Kontrolle durch den Kaminfeger ist zwingend erforderlich, um den guten Betrieb der ESP zu garantieren.

5 Vergleichsmessungen mit Referenzmessverfahren in Saas-Fee

Um die DIEM-Messmethode auch in Saas-Fee auf 2000 m. ü. M. validieren zu können, wurden Vergleichsmessungen mit Referenzmessverfahren an zwei Anlagen durchgeführt.

5.1 Speicherofen 3 (Messung 18)

An Speicherofen 3 (Messung 18) wurden während sechs Abbränden Vergleichsmessungen zwischen DIEM und einer gravimetrischen Standardmethode (Wöhler SM96)⁸ kombiniert mit MRU-VarioLuxx durchgeführt. Mit dem MRU wurde der O₂-Gehalt kontinuierlich aufgezeichnet, um die Verdünnung während den Staubmessungen zu bestimmen. Ausserdem wurde auch CO damit aufgezeichnet, um die Werte mit DIEM vergleichen zu können. Dazu musste der Kaminhut entfernt und eine zusätzliche Messstrecke angebaut werden. Die Messstrecke hat zwei Umlenkungen, damit die Messstellen besser erreichbar sind und damit die gravimetrische Sonde nicht mehr in «Sichtweite» (Einflussbereich) der Elektrode ist⁹. Die gravimetrische Staubmessung wurde jeweils 3 min nach Abbrandstart gestartet.

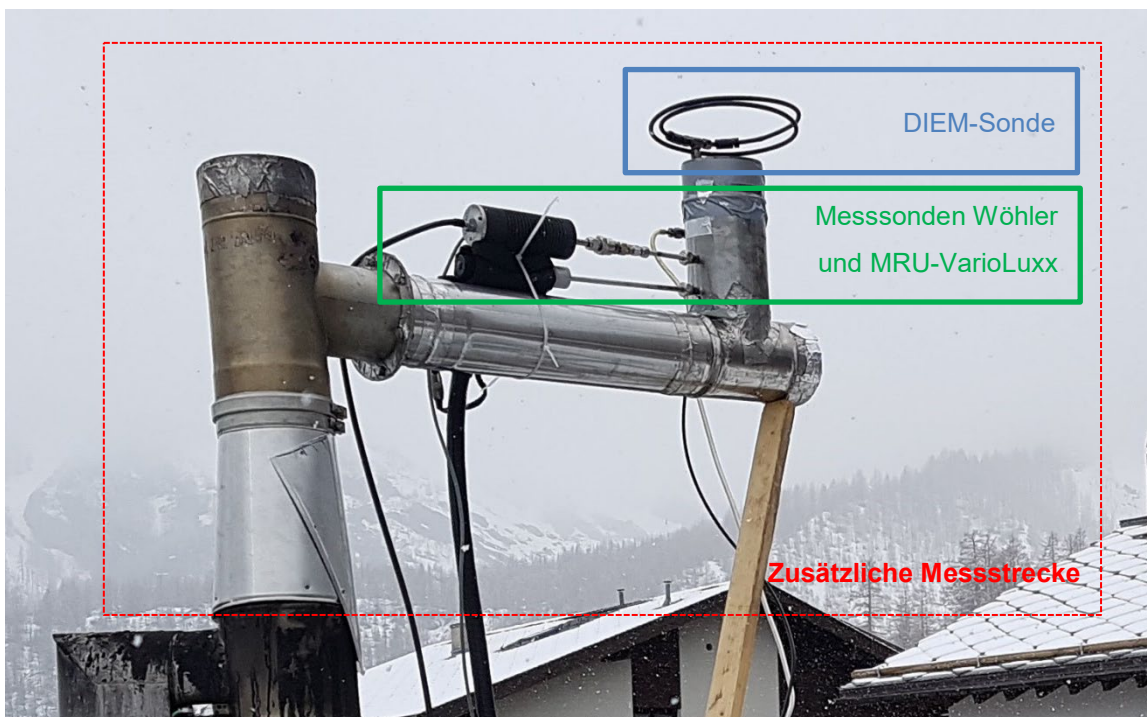


Abbildung 25: Messstrecke Vergleichsmessungen

5.1.1 Staub-Emissionen

Abbildung 26 zeigt, dass eine relativ gute Korrelation mit der Gravimetrie besteht. DIEM misst tendenziell etwas weniger Staub als die Gravimetrie. Vergleicht man nur die Werte bei ESP OFF, ist die Korrelation deutlich besser. Das hat sich auch schon in zahlreichen Laborversuchen im Rahmen der Entwicklung der DIEM-Methode gezeigt und liegt daran, dass vom ESP geladene Staubpartikel von der gravimetrischen Sonde angezogen werden. Die gravimetrische Methode eignet sich deshalb nicht für Messungen nach einem eingeschalteten ESP⁵.

⁸ Dabei wird das Abgas durch eine (vorab getrocknete und gewogene) beheizte Filterhülse gezogen und dann das Abgasvolumen gemessen. Die Filter werden nachträglich im Labor getrocknet und ausgewogen.

⁹ Die metallische Messsonde des SM96 kann die Feldlinien der Hochspannungselektrode auf sich ziehen. Vor allem grosse Partikel, die von DIEM nicht erfasst werden, können so bei der gravimetrischen Messung zu einer Überschätzung der Staubmasse führen.

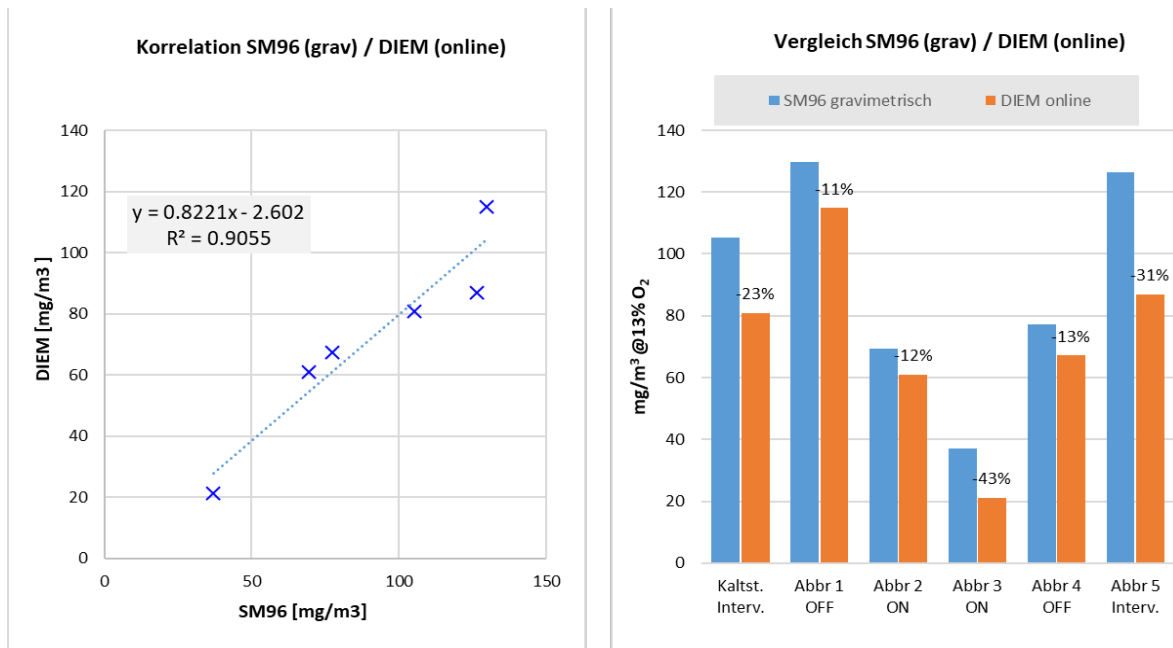


Abbildung 26 Vergleichsmessungen mit Gravimetrie

Aus 103 mg/m³ für ESP OFF (Mittelwert von Abbrand 1 und Abbrand 4) und 37 mg/m³ für ESP ON (Abbrand 3) ergab sich ein Abscheidegrad von 64 % bei der gravimetrischen Staubmessung. Abbrand 2 konnte für die Abscheidegradbestimmung mittels SM96 und MRU nicht verwendet werden, da während der ersten partikelreichen 10 min der ESP nicht richtig schaltete¹⁰. Der mittels DIEM ermittelte Abscheidegrad war mit 73 % höher, basierte aber auch auf einer grösseren Datenmenge (6 Abbrände gegenüber 3 Abbränden) und war frei von den negativen Effekten, die die gravimetrische Messung beeinflussten. Ausserdem werden periodisch auftretende (zufällige) Ausflockungen von bereits abgeschiedenen Partikeln mit DIEM nicht erfasst, da die Partikel-Konglomerate zu gross sind. Die DIEM-Resultate waren reproduzierbar (74 % in Herbst 2018 gemessen).

5.1.2 CO-Emissionen

Abbildung 27 zeigt den Vergleich der normierten CO-Emissionen zwischen DIEM und MRU-VarioLuxx. Bei den roten Peaks jeweils zwischen den Abbränden führte DIEM jeweils eine Nullpunkt-messung durch. Der Verlauf ist ansonsten nahezu deckungsgleich, was sich bereits in den Laborversuchen gezeigt hatte und nun auch im Feld unter den Bedingungen in Saas-Fee reproduziert werden konnte.

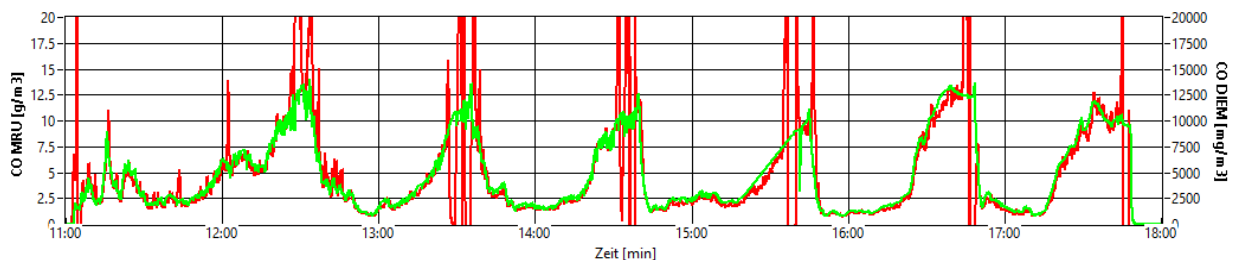


Abbildung 27: CO-Vergleich zwischen DIEM (rot) und MRU VarioLuxx (grün)

¹⁰ Durch die zusätzliche Messstrecke am Kaminende musste das Abgas einen höheren Widerstand überwinden, was dazu führte, dass ein Teil der Abgase über den ESP geführt wurde und dessen Elektronik überhitzte. Die Störung wurde somit durch die Messung selbst hervorgerufen (Artefakt). Das Problem konnte durch Entfernung der ESP-Abdeckung gelöst werden.

5.2 Schnitzelkessel (Messung 24)

Die Schnitzelfeuerung ist mit dem ESP-Model OekoRona ausgerüstet. Der OekoRona wird bei Holzfeuerungen mit hoher Leistung eingesetzt. Es wurden während 4 Messperioden Vergleichsmessungen zwischen DIEM und einer gravimetrischen Standardmethode (Wöhler SM96)¹¹ kombiniert mit MRU-VarioLuxx durchgeführt. Mit dem MRU wurde der O₂-Gehalt kontinuierlich aufgezeichnet, um die Verdünnung während den Staubmessungen zu bestimmen. Ausserdem wurde auch CO aufgezeichnet, um die Werte mit DIEM vergleichen zu können. Die Sonden für die Messgeräte konnten an einen Empa-Stutzen angeschlossen werden, der sich in ca. 2 m Entfernung vom ESP befand (Abbildung 28).

Die Messung wurde in zwei Abschnitten am Morgen und am Nachmittag durchgeführt, weil nach 2 Stunden das Wasser im Speicher bereits genug warm war und der Kessel automatisch abgeschaltet hat. Am späteren Nachmittag konnte der Kessel nochmals für 1.5 Stunden betrieben werden. Am Morgen wurden 3 Messperioden durchgeführt. Es wurden zwei Messungen mit ESP ON und eine mit ESP OFF durchgeführt. Am Nachmittag wurden mehrere Intervall-Messungen mit jeweils fünf Minuten ESP ON und fünf Minuten ESP OFF durchgeführt.

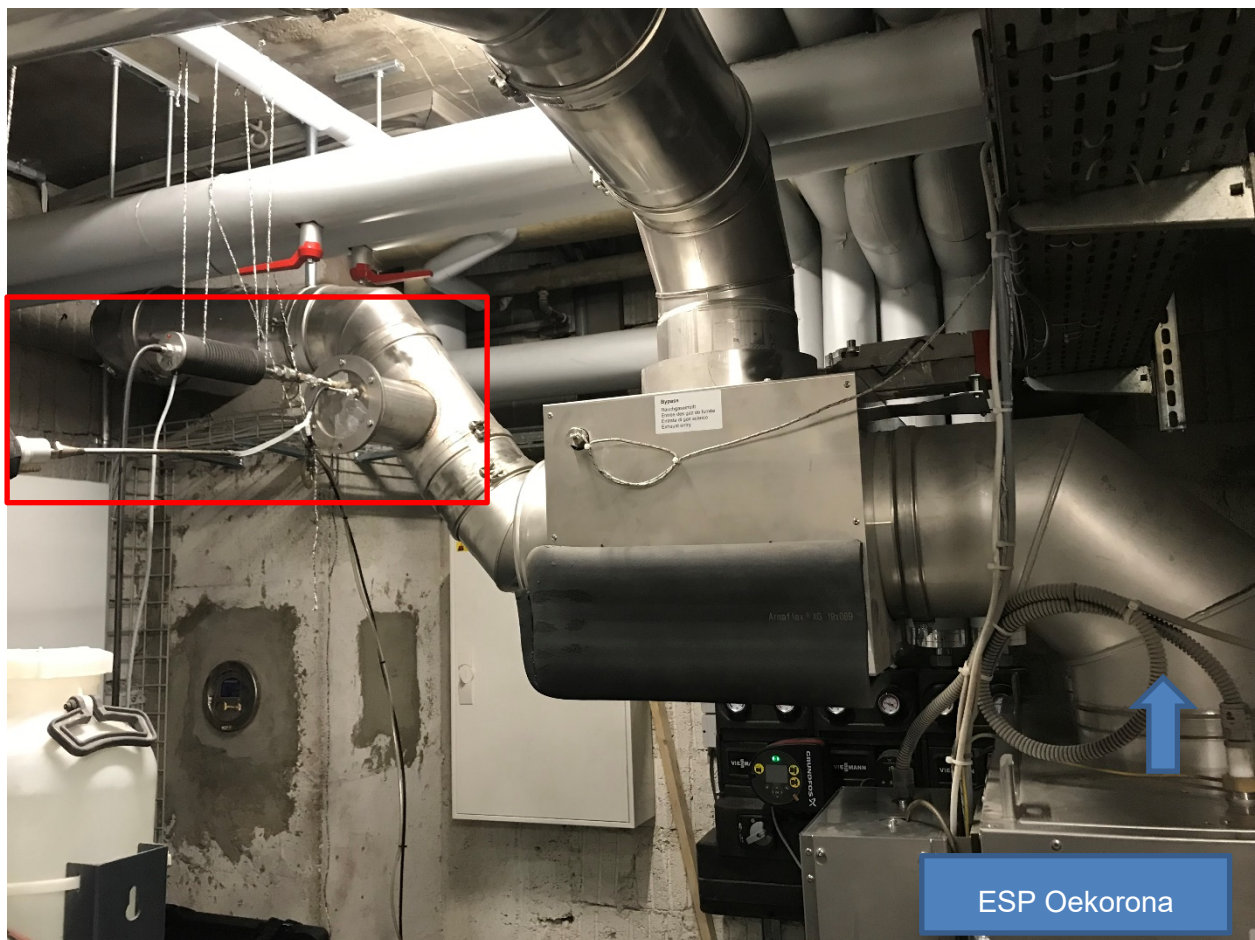


Abbildung 28: Vergleichsmessung Schnitzelkessel: Messstelle (rot) mit 2 Sonden in Empa-Stutzen; Sonde 1: Wöhler SM96, Sonde 2: Y-Stück mit Anschluss für MRU-VarioLuxx und DIEM-Messkoffer.

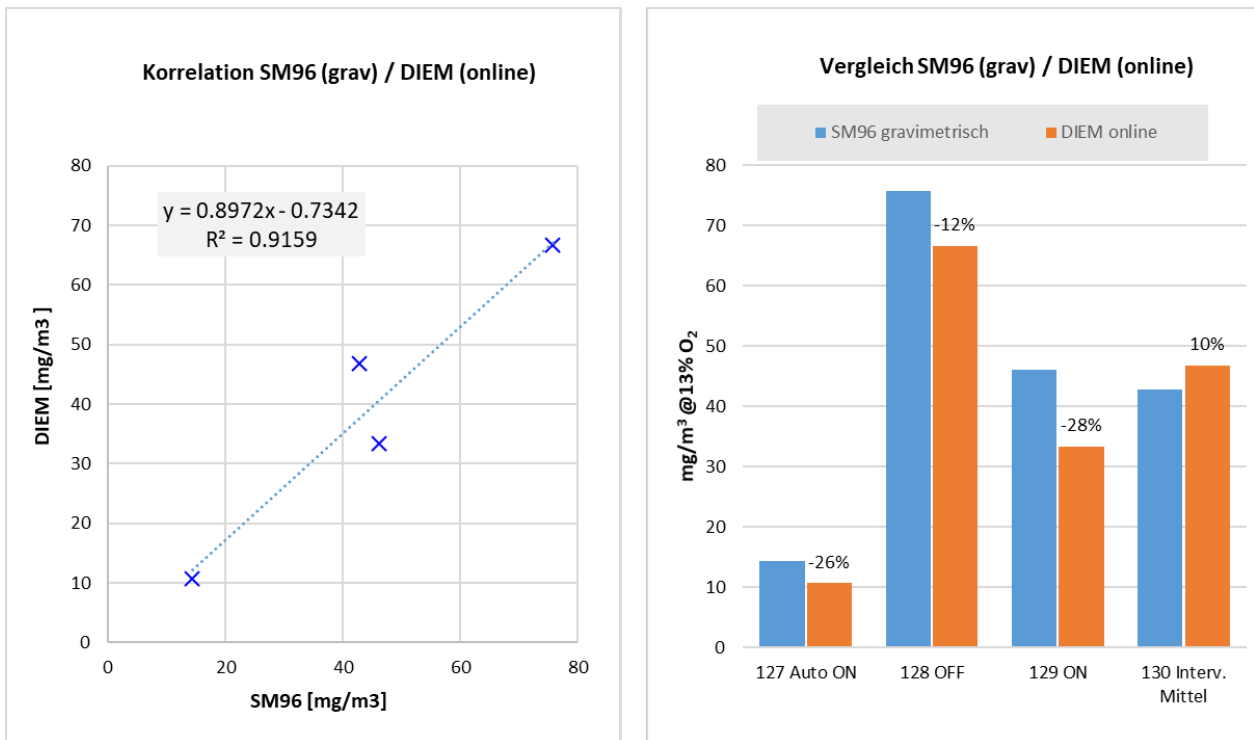
5.2.1 Staub-Emissionen

In Abbildung 29 sind die Vergleichsmessungen der Staub-Emissionen abgebildet. Es zeigt sich ein ähnliches Bild, wie bei den Vergleichsmessungen in Kapitel 5.1.1: DIEM bleibt leicht unter den Werten der Referenzmethode und wenn der ESP eingeschaltet war, ist die Differenz grösser.

¹¹ Dabei wird das Abgas durch eine (vorab getrocknete und gewogene) beheizte Filterhülse gezogen und dann das Abgasvolumen gemessen. Die Filter werden nachträglich im Labor getrocknet und ausgewogen.

Die letzte Messung (130 Intervall) bildet diesbezüglich eine Ausnahme. Diese ist aber ohnehin mit Vorbehalt zu betrachten, da während einer Stunde anstelle einer halben Stunde über Filter Nr. 130 abgesaugt wurde. Ausserdem ging der Kessel während der letzten 10 min in den Ausbrand-Modus und der O₂-Gehalt stieg sehr stark an (praktisch auf Umgebungs-O₂), weshalb die Normierung der gravimetrischen Messung mit grosser Unsicherheit behaftet ist. Der DIEM-Wert für 130 Intervall ist plausibler, da er zwischen den Werten für 128 ESP OFF und 129 ESP ON liegt.

Abbildung 29: Vergleichsmessungen mit Gravimetrie



5.2.2 CO-Emissionen

Auch beim Schnitzelkessel bestand wie beim Speicherofen (Kapitel 5.1.2) bezüglich CO eine gute Übereinstimmung der DIEM-Methode (rot) mit der Referenzmethode (grün). Die Messung begann um 15:36 und ab 16:25 begann der Ausbrandmodus. Ab 16:32 ist die Referenzmethode aufgrund zu hoher Verdünnung nicht mehr glaubwürdig.

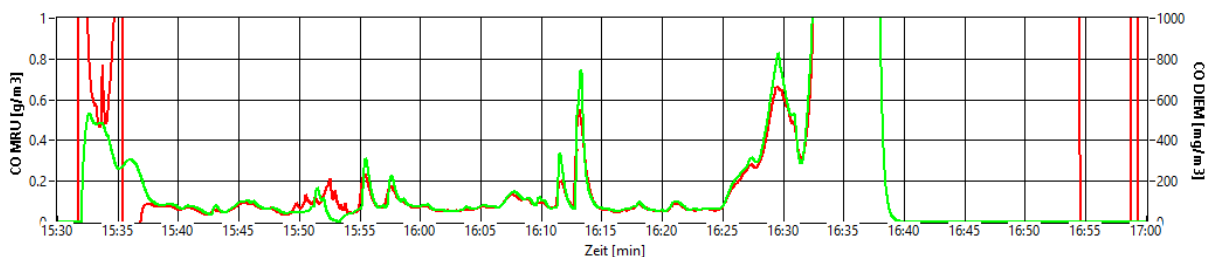


Abbildung 30: CO-Vergleich zwischen DIEM (rot) und MRU VarioLuxx (grün)

5.2.3 Fazit Vergleichsmessungen

In den Vergleichsmessungen konnte gezeigt werden, dass der DIEM-Messkoffer nicht stark von herkömmlichen Messgeräten abweicht und nicht nur im Labor, sondern auch im Feld unter den Bedingungen in Saas-Fee reproduzierbare und repräsentative Resultate liefert. Die Methode eignet sich besser für die Messung nach einem eingeschaltetem ESP als die gravimetrische Methode, da die Sonde die geladenen Partikel nicht anzieht.

6 Langzeit-Aufzeichnungen

Ziel der Langzeit-Aufzeichnungen war es, das Ein- und Ausschaltverhalten, die Betriebszeiten, allfällige Störungen und die Abscheider-Spannung bzw. Leistung im Verlauf einer Heizperiode aufzuzeichnen und zu analysieren.¹²

6.1 Untersuchte Feuerstätten

6.1.1 Stückholzkessel

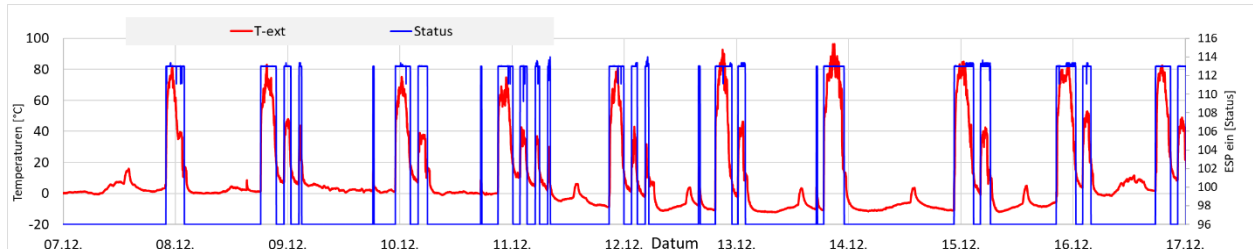


Abbildung 31: Typischer Verlauf der Abgastemperatur (T_{ext}) und Hochspannung (ESP ein [Status]) über 10 Tage am Stückholzkessel.

Auf Grund der Aufzeichnungen (siehe *Abbildung 31* und *Abbildung 32*) wurde festgestellt, dass der Stückholzkessel nachts oft nicht durchlief, sondern intermittierte. Das passiert, wenn der Kessel bei nicht entladenen Wärmespeicher gezündet und anschliessend durch die Regelung abgestellt wurde, weil der Speicher voll war. Dies hatte gravierende Auswirkungen auf die Emissionen, wie Messungen im Frühling 2019 zeigten. Durch die hohen Emissionen von Staub und Teer beim Intermittieren kam es bei dieser Anlage zu umfangreichen Ablagerungen im Kamin und in der Folge zu einem Kaminbrand im Bereich des ESP. Die Resultate zeigen die Wichtigkeit eines dem Wärmebedarfs angepassten Betriebs einer solchen Feuerung in Kombination mit einem richtig dimensionierten Volumen, das die erzeugte Wärme aufnehmen kann.

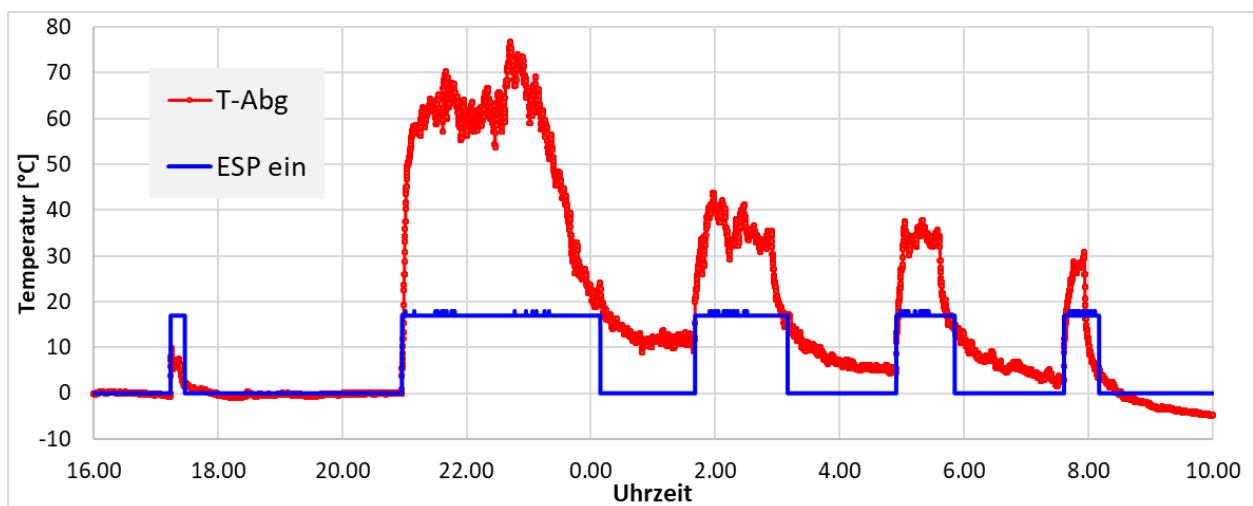


Abbildung 32: Typischer Verlauf der Abgastemperatur (T_{Abg}) und der Hochspannung (ESP ein, siehe auch Fussnote 12) während einer Nacht mit intermittierendem Betrieb.

¹² Der reale Spannungs- und Leistungsverlauf wurde in diesem Bericht nicht dargestellt. An den punktuellen, kleinen Ausbrüchen des dargestellten Spannungs-Status (blau) sind die Durchschläge erkennbar.

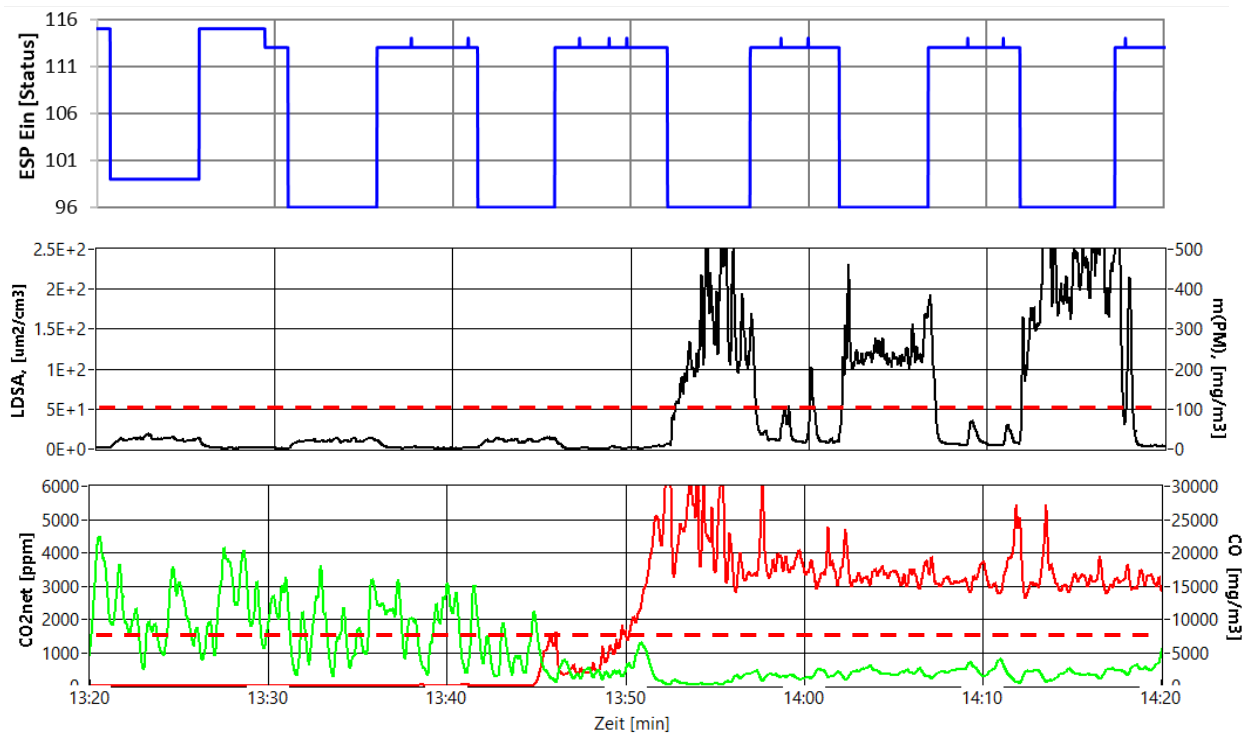


Abbildung 33: Verlauf der Emissionen am Stückholzkessel: durch das Intermittieren des Kessels (ab ca. 13:45) steigen die CO-Emissionen (rot) gegenüber dem Normalbetrieb um den Faktor 100 und die Staub-Emissionen um den Faktor 10 an. Grenzwert LRV (rote gestrichelte Linie). (siehe auch Fussnote 12)

6.1.2 Giltsteinofen (Speicherfeuerung 3)

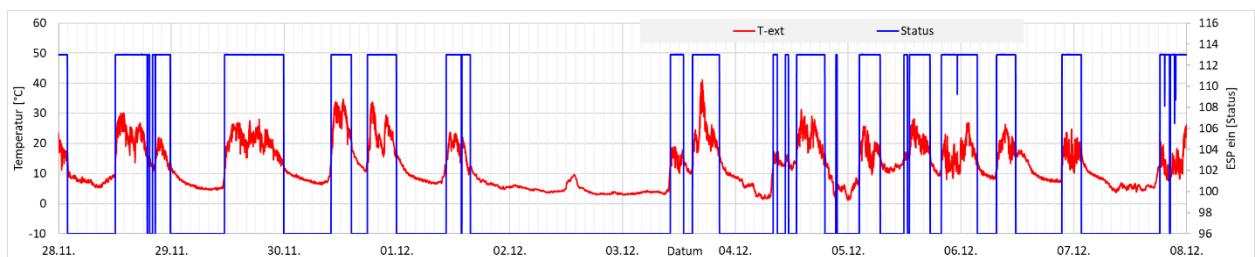


Abbildung 34: Typischer Verlauf der Abgastemperatur (T-ext) und Hochspannung (ESP ein [Status], siehe auch Fussnote 12) über 10 Tage am Giltsteinofen.

Auch der Giltsteinofen wurde fast täglich eingefeuert (siehe Abbildung 34). Der Abscheider funktionierte über die gesamte Zeit einwandfrei. Die Aufzeichnungen machten einen kleinen Kaminbrand am 21. Februar sichtbar: Die Maximaltemperatur stieg auf 300 °C. Die Auswirkung auf den ESP war in diesem Fall positiv, da anschliessend der Abscheider wieder mit voller Leistung arbeitet.

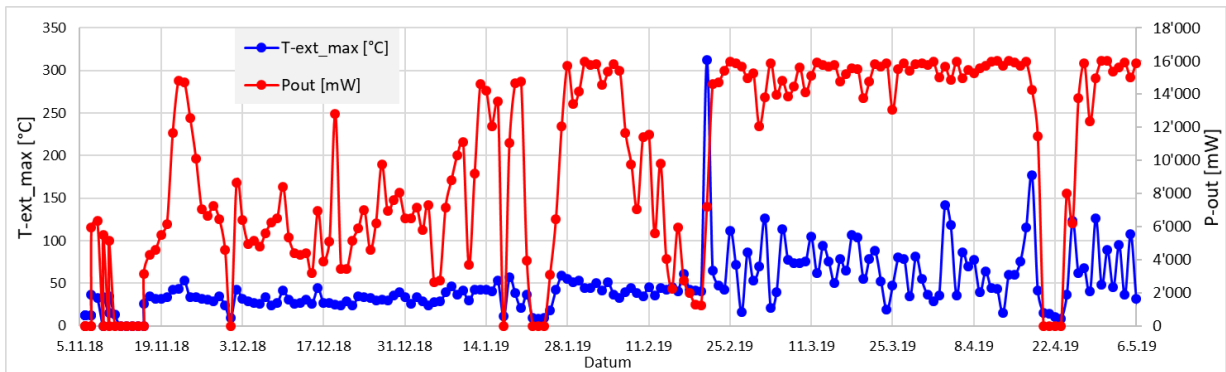


Abbildung 35 Verlauf der maximalen Abgastemperatur ($T\text{-ext}$) und der Abscheider-Leistung über die gesamten 6 Monate. Gut erkennbar sind der kleine Kaminbrand und die gute Leistung des Abscheiders danach.

6.2 Kaminbrand

Ursachen

Ursachen für die Kaminbrände war eindeutig die grosse Menge abgeschiedenem Staubes und der hohe Anteil an Teer. Beim Stückholzkessel war dies auf den intermittierenden Betrieb zurückzuführen, der hohe Emissionen zur Folge hatte. Der Giltsteinofen wurde während der Langzeitmessungen auf Grund eines Missverständnisses vom Betreiber mit zu wenig Verbrennungsluft betrieben, weshalb es bei diesem auch zu hohen Staub- und Teerablagerungen im Kamin kam.

Auswirkungen

Die Auswirkungen auf die Anlage war in den beobachteten Fällen unterschiedlich. Während der Brand an der einen Anlage zu einem Defekt des Temperaturfühlers des ESP führte und damit zu einer Störung, wurde beim Brand der anderen Anlage der Kamin und der Abscheider gereinigt. Dies äusserte sich darin, dass die Abscheideleistung wieder anstieg und sich auf dem Maximalwert einpendelte. Zu vermerken ist, dass bei einem Kaminbrand sehr hohe Emissionen entstehen und dass daher nicht nur aus Sicherheitsgründen, sondern auch aus Umweltgründen solche zu vermeiden sind.

Massnahmen

Um die hohe Emission von teerhaltigen Stäuben und damit Kaminbrände in Zukunft zu verhindern wurde beim Stückholzkessel empfohlen, den Ofen erst anzufeuern, wenn der Speicher grösstenteils entladen ist. Beim Giltsteinofen ist darauf zu achten, dass genügend Verbrennungsluft zugeführt wird. Dadurch ist die Leistung des Ofens zwar etwas grösser, aber er brennt sauberer. Generell ist ein schlechter Betrieb der Feuerungen zu vermeiden und sollte durch den Kaminfeger erkannt werden. Das Reinigungsintervall muss allenfalls erhöht werden, falls sich die Ablagerungen primär nicht genügend vermindern lassen. In den Betriebsdaten des ESP könnte ein drohender Kaminbrand erkannt werden (Häufung der Durchschläge und Fehler) und der ESP vorsorglich ausgeschaltet werden, bis der Kaminfeger kommt.

6.3 Fazit

Die Langzeitaufzeichnungen bestätigten einen stabilen Betrieb der zwei untersuchten ESP über die gesamte Dauer (Anfangs November bis Ende Mai). Die einzige auftretende Störung wurde durch einen Kaminbrand verursacht, infolge sehr schlechten Betriebs der Feuerung (Stückholzkessel in Teillast).

Die beobachteten Kaminbrände hatten 1x eine negative Auswirkung (Störung) und 1x positive Auswirkung (Abscheiderleistung steigt wieder).

An beiden Anlagen zeigten die ESP ein gutes Ein- und Ausschaltverhalten (Temperatur- und Gradienten-Kriterium). An einzelnen, anderen im Projekt gemessenen Anlagen wäre das Einschaltverhalten vermutlich noch zu optimieren (z. B. tiefere Einschalt-Schwellen für die Temperatur, bzw. den Temperaturgradienten).

Das Verhalten der Hochspannungsregelung war generell sehr gut. Nach mehreren Unterbrüchen (drohende Durchschläge) regelte die Elektronik die Spannung so, dass wieder eine Abscheidewirkung zu erwarten war.

7 Umfragen

Im Rahmen dieses Projekts wurden zwei Umfragen zum Thema Holzfeuerungen und ESP durchgeführt. Bei der ersten Umfrage wurden 100 Personen in Saas-Fee, die gemäss Inventarliste des Kaminfegers eine Holzheizung besitzen, gebeten an einer Online-Umfrage teilzunehmen (39 Teilnehmer). Darunter sind auch viele, die im Zuge der ESP-Aktion der Gemeinde im Jahre 2010/2011 einen elektrostatischen Partikelabscheider (ESP) installiert haben. In einer weiteren Umfrage wurden 100 unmittelbare Nachbarn von ESP-Besitzern brieflich befragt, ob sie positive oder negative Auswirkung durch die ESP erfahren haben (18 Teilnehmer). Ziel der Umfragen war es, Informationen zum Betrieb und zu Störungen der ESPs und der Motivation zum Einbau/Nicht-Einbau eines ESPs zu erhalten. Auch sollte abgeklärt werden, ob die ESP einen bemerkbaren Effekt in der Nachbarschaft hatten. Die wichtigsten Erkenntnisse werden in den folgenden Abschnitten gezeigt.

7.1 Umfrage mit Holzheizungsbesitzern in Saas-Fee (39 Teilnehmer)

Von 23 % der Befragten wird eine Holzfeuerung als Hauptwärmequelle genutzt. Im Schnitt wird pro Jahr 2256 kg Holz für die Feuerung benötigt. Von allen Teilnehmern (mit und ohne Holzfeuerung als Hauptwärmequelle) besitzen 76 % eine oder mehrere zusätzliche Holzfeuerungen (Raumheizer / Einzelraumfeuerung). Der Holzverbrauch von Holzfeuerungen, welche nicht als Hauptwärmequelle genutzt werden, liegt im Schnitt bei 384 kg/a. Die 39 Teilnehmer haben zusammen 54 Holzfeuerungen, d. h. einige der Befragten sind im Besitz von mehreren Holzfeuerungen.

Um zu beurteilen, ob die Umfrage repräsentativ war, wurden die Holzfeuerungen der Umfrageteilnehmer mit der Inventarliste des Kaminfegers verglichen (Abbildung 36).

Umfrageteilnehmer (54 Feuerungen)

Inventarliste Kaminfeger (348)

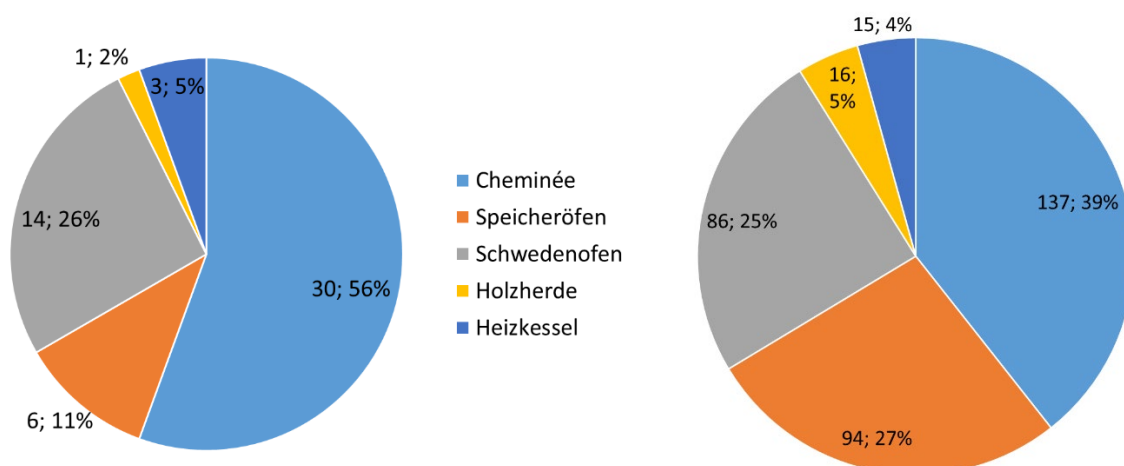


Abbildung 36: Vergleich der Feuerungskategorien gemäss Umfrageteilnehmer mit Inventarliste des Kaminfegers

Der Vergleich zeigt, dass die Anteile an Cheminées und Schwedenöfen gut übereinstimmen. Besitzer von Speicheröfen sind in der Umfrage untervertreten. Die Umfrage bildet aber einen guten Querschnitt ab. Durch das Gespräch mit den Besitzern hat sich herausgestellt, dass viele Cheminées nur selten oder gar nie benutzt werden. Das hat damit zu tun, dass viele Cheminées in Ferienwohnungen verbaut sind, welche nicht das ganze Jahr bewohnt werden.

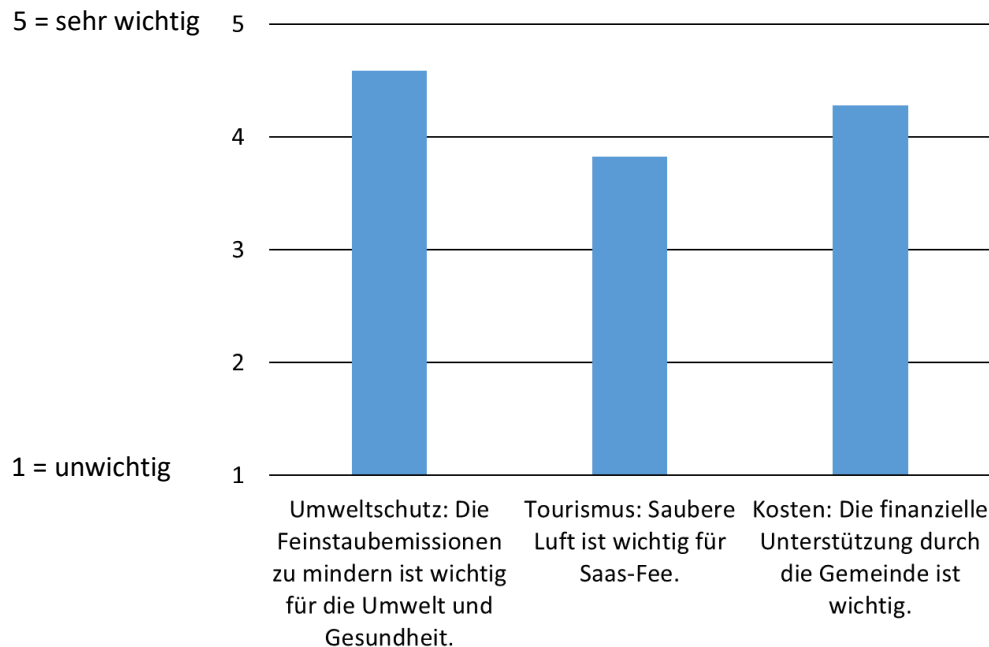


Abbildung 37: Motivation Beschaffung ESP

Die Holzheizungsbesitzer wurden gefragt, was die Motivation für den Einbau des ESP war oder wäre, falls sie einen einbauen würden. Sie konnten jeweils 0-5 Punkte verteilen für die drei Hauptmotivationen *Umweltschutz*, *Tourismus* und *Unterstützung durch die Gemeinde* oder selbst eine eigene Motivation angeben. Am meisten wurde angegeben, den ESP der Umwelt zuliebe zu installieren. Ebenfalls war die finanzielle Unterstützung durch die Gemeinde eine grosse Motivation für den Kauf eines elektrostatischen Partikelabscheiders (ESP). Der Tourismus ist eine etwas geringere Motivation für die Beschaffung eines ESPs.

Die Holzheizungsbesitzer ohne ESP wurden befragt, weshalb sie keinen ESP gekauft haben. Die Hauptgründe waren die fehlende Zeit, sich mit der Thematik auseinanderzusetzen, und dass bei den entsprechenden Anlagen nur sehr selten angefeuert wird.

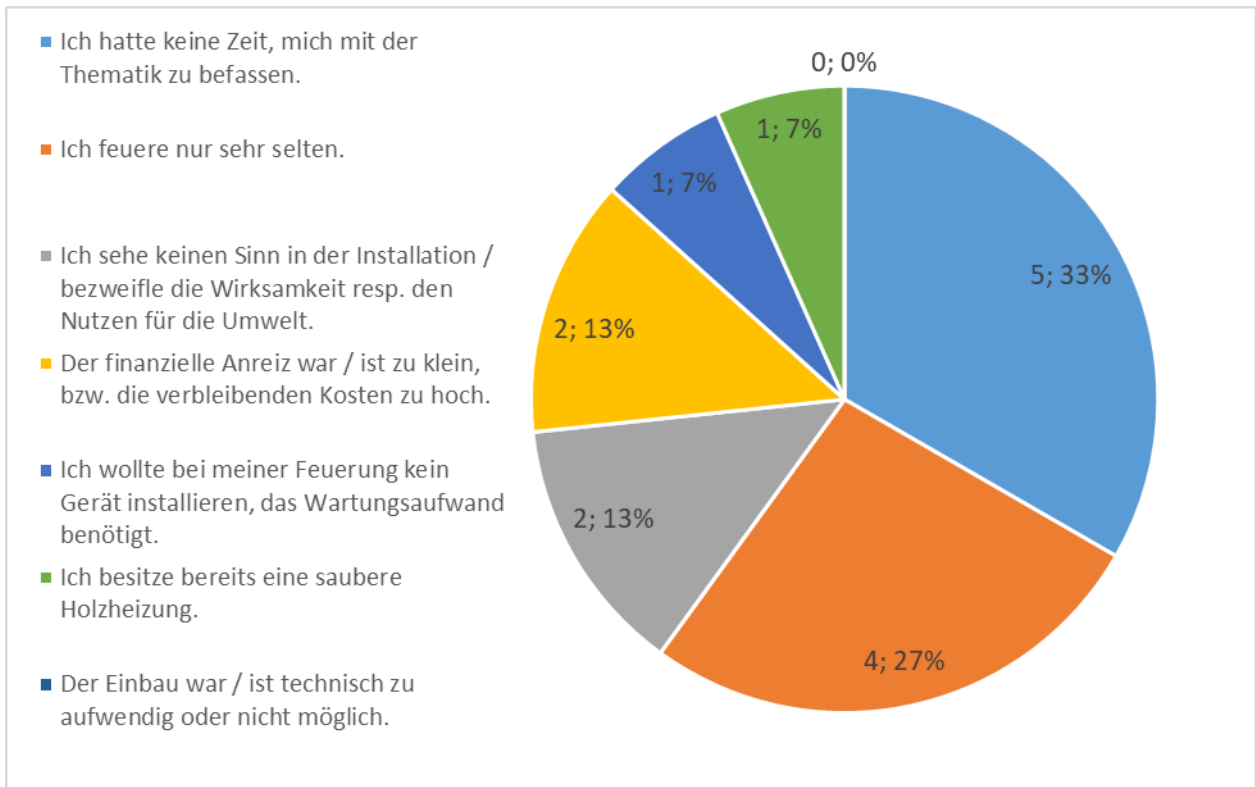


Abbildung 38: Motivation Nicht-Beschaffung ESP

3/4 der Leute gaben an, dass der ESP in Betrieb sei. Davon sind aber ein Grossteil Anlagen, die im Zuge dieses Forschungsprojekts durch OekoSolve gewartet wurden. 25 % der Befragten gab an, dass ihr ESP nicht in Betrieb ist oder sie nicht wissen, ob er in Betrieb ist. Das bestätigten die individuellen Gespräche mit den Besitzern.

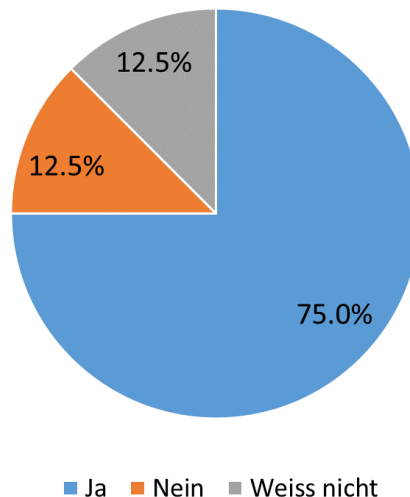


Abbildung 39: ESP in Betrieb

79 % der Befragten gab an, dass ihnen keine Störungen beim ESP bekannt sind. Die restlichen 21 % haben Störungen angegeben, unter anderem folgenden Störungen:

- Sicherung brannte durch
- LED leuchtete rot
- Elektrode hat Kaminwand berührt
- Kamin wurde nicht richtig gereinigt

Anlagen mit Störungen konnten nach einem Service wieder in Betrieb genommen werden. Einige der Störungen wurden erst mit dem Service im Rahmen dieses Projektes behoben.

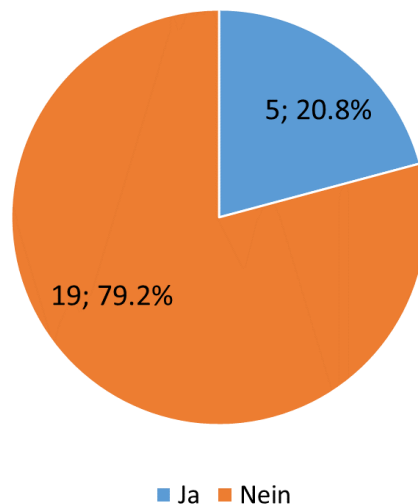


Abbildung 40: Störungen bekannt

7.2 Umfrage mit Nachbarn von ESP-Besitzern (18 Teilnehmer)

Die Umfrage hat ergeben, dass 69 % der Befragten sich nur selten oder nie von einer benachbarten Holzfeuerung gestört fühlen. Die restlichen 31 % fühlen sich oft gestört. Störfaktoren sind vor allem die Geruchsemissionen und der starke Rauch. Die Störfaktoren haben in den letzten Jahren weder zu- noch abgenommen. Die Situation blieb unverändert. Interessant ist, dass 56 % der Teilnehmer wussten, dass ESPs in ihrer Nachbarschaft installiert wurden. Das zeigt, dass die ESP-Aktion der Gemeinde in Saas-Fee ziemlich bekannt ist. Die meisten Befragten haben allerdings keine Veränderung durch die ESP bemerkt. Zwei Teilnehmer haben jedoch angegeben, dass sich die Situation stark verbessert hat. Rauchemissionen werden durch die ESPs reduziert, was sich auch visuell bemerkbar macht und von Nachbarn als Verbesserung wahrgenommen werden kann.

7.3 Fazit

Das Fazit wird aufgrund der beiden Umfragen in Saas-Fee und individueller Gespräche mit vielen ESP-Besitzern, Gemeindevertretern, dem Kaminfeger, dem ESP-Hersteller (Oekosolve) und dem Elektriker gezogen.

Seit dem Einbau der ESPs in Saas-Fee im Jahre 2010/2011 im Zuge der ESP-Aktion der Gemeinde ist das Projekt «erste feinstaubfreie Gemeinde» ins Stocken geraten. Mit dem Ausscheiden des Initianten und damaligen Tourismudirektors Beat Anthamatten fehlte in der Folge die treibende Kraft und die notwendige Koordination zwischen Gemeinde, Hersteller (Oekosolve), Elektriker und Kaminfeger, um das Projekt erfolgreich weiterzuführen. Viele der Anlagen wurden zwar installiert, aber vom Elektriker nicht ans Stromnetz angeschlossen. Da keine Abnahmekontrolle durchgeführt wurde, bevor die Förderbeiträge der Gemeinde ausbezahlt wurden, wurde dies nicht festgestellt. Die meisten ESP-Besitzer hatten bis zum Start dieses Forschungsprojektes keine Kenntnis, ob ihre Anlage noch funktioniert und viele fühlten sich auf sich alleine gestellt. Der Kaminfeger hatte zu Beginn der ESP-Aktion zwar eine Schulung durch OekoSolve erhalten, um kleinere Reparaturen durchführen zu können und den Betrieb der ESP zu gewährleisten. Auch ein Servicehandbuch ist vorhanden. Jedoch ist die nötige Zusammenarbeit zwischen dem Kaminfeger und OekoSolve nicht konsequent weitergeführt worden. Ausserdem wurden Fragen zu den Wartungskosten nicht abschliessend geklärt. Hier wäre die Gemeinde als Vermittlerin und für das Monitoring wichtig. Erst durch den Start dieses Forschungsprojektes ist wieder Bewegung in die Angelegenheit gekommen und viele der Anlagen wurden durch OekoSolve gewartet und der Kaminfeger erneut geschult.

Der Umweltschutz ist die wichtigste Motivation zum Einbau des ESP. Fast genauso wichtig ist aber die (finanzielle) Unterstützung der Gemeinde. Insbesondere, dass so viele andere Holzheizungsbesitzer auch an der Aktion teilnahmen, wurde als Motivation hervorgehoben. Dass saubere Luft und deren Vermarktung sich positiv auf den Tourismus auswirkt, denken zwar viele der Befragten, aber der Tourismus wird als kleinste Motivation für den Einbau der ESP eingeschätzt.

Bei den Umfragen bei den Nachbarn konnte keine spürbare Veränderung der Luftqualität oder allfällige Beeinträchtigungen durch die Installation der ESP festgestellt werden. Einzelne gaben aber an, dass sich die Situation verbessert habe (weniger Rauch beim Nachbarn). Ob dies auf den ESP zurückzuführen ist, ist unklar.

8 Erkenntnisse und Empfehlungen

Die Messungen haben gezeigt, dass die 20 untersuchten Partikelabscheider (ESP) einen mittleren Abscheidegrad von 70 % +/- 10 % besitzen. Dieses Resultat ist sehr gut. Die ESP arbeiten auch gut bei schlechten Feuerungen (z. B. offene Cheminées) oder unsachgemäßem Betrieb, wenn viel Feinstaub emittiert wird. Der Abscheidegrad ist bei diesen Anlagen etwas unter dem Durchschnitt, jedoch ist die absolute abgeschiedene Staubmenge sehr hoch. Neben der guten Performance sind die ESP im Allgemeinen sehr robust und können einfach montiert und gewartet werden.

Der erreichte Abscheidegrad könnte durch Optimierungen noch verbessert werden. Die Parameter der Steuerung waren oft noch nicht richtig eingestellt und es wird kein regelmässiger Service durchgeführt. Einige Anlagen schalten nach der Zündung zu spät ein. Um ein frühes Einschalten zu ermöglichen, sollte das Einschaltkriterium angepasst werden. Bei einzelnen Anlagen war zudem die maximale Spannung zu tief eingestellt. So kann der maximal mögliche Abscheidegrad nicht erreicht werden. Zusätzlich ist eine regelmässige Kontrolle durch den Kaminfeger mit Wartung zwingend notwendig. Ohne Service im Herbst 2018 und Frühling 2019 wären viele Anlage nicht einsatzfähig gewesen. An einzelnen Anlagen wurde seit 2011 kein Service durchgeführt.

Leider ist der Benutzer eines ESPs nicht darüber informiert, ob der ESP in Betrieb ist oder ob Störungen vorliegen. Einzig eine für den Benutzer schlecht sichtbare LED-Anzeige am ESP gibt über den aktuellen Zustand des ESPs Auskunft. Diese ist aber in der Regel nicht einsehbar, wenn man sich nicht auf dem Dach befindet. Zukünftig sollte der Benutzer zu jedem Zeitpunkt über den Zustand seines ESPs informiert sein. Mit Hilfe einer einfachen Anzeige im Wohnzimmer könnte das realisiert werden. Dies wird unter anderem auch in der Richtlinie VDI 3670 [2] gefordert, welche den Stand der Technik für Staubabscheideeinrichtungen definiert. Der Kaminfeger müsste die Kontrolle und kleinere Servicearbeiten in sein Dienstleistungsangebot aufnehmen und im Rahmen der regelmässigen Kaminreinigung vornehmen.

Abschliessend kann gesagt werden, dass ein ESP als Nachrüstlösung für Holzfeuerungen sehr sinnvoll ist, wenn der Betrieb langfristig gewährleistet wird.

Literatur

[1]	J. Wüest, N. Lohberger, Emissionen von Holzfeuerungen nach elektrostatischen Staubabscheidern Zwischenbericht Meilenstein 1, FHNW Windisch, 2018
[2]	VDI 3670: Nachgeschaltete Staubminderungseinrichtungen für Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe, VDI Richtlinie, Beuth Verlag, April 2016
[3]	M. Matti Maricq, Monitoring Motor Vehicle PM Emissions: An Evaluation of Three Portable Low-Cost Aerosol Instrument, Aerosol Science and Technology, 47:564–573, 2013