verenum
Ingenieurbüro für
Verfahrens-, Energie- und Umwelttechnik

Langzeitmessung bei Kaskadenanlagen mit Holzkesseln

Teil 1 – Langzeitmessung gasförmiger Schadstoffe und gravimetrische Staubmessungen an zwei Praxisanlagen zur Beurteilung der An- und Abfahrphasen sowie des Gesamtanlagenbetriebs

Schlussbericht – publizierte Version

Autoren:

Peter Zotter, Adrian Lauber, Jürgen Good, Thomas Nussbaumer

Auftraggeber:

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Holzfeuerungen Schweiz

Kantone AG, BE, FR, GR, LU, SG und ZH

Verenum AG, Zürich, 27.07.2026

Inhalt

1 Ausgangslage und Zielsetzung 4

2 Zusammenfassung der Messungen 4

2.1 Anlagenauswahl und Durchführung der Messungen 4

2.2 Ergebnisse LZM und gravimetrischer Staubmessungen 5

2.2.1 Standort A: 2-Kessel Pelletanlage (1x 140 kW, 1x 220 kW) 6

2.2.2 Standort B: 4-Kessel Holzhackschnitzel-Kaskaden-Anlage 7

2.2.3 Kurzfassung der Messergebnisse 10

2.3 Schlussfolgerungen aus den Messungen 11

2.4 Erkenntnisse aus Projekt Holzkessel Kaskadenanlagen mit Speicher (HoKaSpe) 12

3 Diskussion über mögliche Beurteilungskriterien 13

3.1 Beurteilungskriterium An- und Abfahrvorgänge bzw. Anzahl Starts pro Kessel oder pro Anlage 13

3.2 Beurteilungskriterium Brennstoffqualität 14

3.3 Beurteilungskriterium Emissionen 15

3.4 Beurteilungskriterium Betriebsoptimierung 16

3.5 Übersicht und Bewertung der verschiedenen Beurteilungskriterien 17

3.6 Stellungnahme zu den Beurteilungskriterien 19

4 Definitionen 20

4.1 Abkürzungsverzeichnis 20

4.2 Bestimmung der verschiedenen Betriebszustände 21

5 Untersuchte Anlagen 21

5.1 Standort A 21

5.2 Standort B 23

6 Durchführung der Messungen 24

6.1 Allgemein 24

6.2 Staubmessung 24

6.3 Standort B 25

6.4 Messung am Standort A 26

7 Vorgehen Auswertung 26

8 Messbericht – Anlage Standort A 28

8.1 Messaufbau 28

8.2 Auswertung CO-Emissionsmessung 29

8.2.1 QSH Auswertung - Kessel 1 (140 kW) 29

8.2.2 Kessel 1 - Ausgewählte Zeitverläufe 31

8.2.3 QSH Auswertung - Kessel 2 (220 kW) 32

8.2.4 Kessel 2 - Ausgewählte Zeitverläufe 34

8.2.5 QSH Auswertung für Tage ohne Eingriffe in die Kesselsteuerung 35

8.2.6 Vergleich der Betriebsphasen und Emissionen der Gesamtanlage 37

8.2.7 Unterschiede zwischen verschiedenen Anfahrvorgängen (Warm vs. Kalt-Start) sowie zwischen «regulären» Anfahr- und Abfahrvorgängen und grosser Entaschung 41

8.3 Auswertung gravimetrische Staubmessung 42
8.3.1 Staubemissionen der verschiedenen Betriebsphasen 42
8.3.2 Staubemissionen der gesamten Messperiode und der Gesamtanlage 43

9 Messbericht – Anlage Standort B 48
9.1 Messaufbau 48
9.2 Brennstoffspezifikationen 49
9.2.1 Übersicht Ergebnisse 49
9.2.2 Wassergehalt M 49
9.2.3 Stückigkeit 50
9.2.4 Bilder einzelner Brennstoffproben 52
9.2.5 Klassifizierung Brennstoffe 53
9.3 Auswertung CO-Emissionsmessung 54
9.3.1 Vergleich der Betriebsphasen und Emissionen der Gesamtanlage 54
9.3.2 Kessel A - QSH Auswertung 58
9.3.3 Kessel A - Kleine Entaschung 60
9.3.4 Kessel B - QSH Auswertung 62
9.3.5 Kessel B - Kleine Entaschung 64
9.3.6 Kessel C – QSH Auswertung gesamte Periode 66
9.3.7 Kessel C – QSH Auswertung nur Zeitraum 11.03 bis 22.03 68
9.3.8 Kessel C – Kleine Entaschung 70
9.3.9 Kessel E – QSH Auswertung 71
9.3.10 Kessel E – Kleine Entaschung 73
9.3.11 Vergleich mit Pelletanlage Standort C (2x 90 kW und 2x 200 kW, selber Kesselhersteller wie am Standort B) 74
9.3.12 Unterschiede zwischen verschiedenen Anfahrvorgängen (Warm vs. Kalt-Start) sowie zwischen «regulären» Anfahr- und Abfahrvorgängen und grosser Entaschung 76
9.4 Auswertung gravimetrische Staubmessung 78
9.4.1 Staubemissionen der verschiedenen Kessel und Betriebsphasen 78
9.4.2 Staubemissionen des gesamten Betriebs und der Gesamtanlage 79

10 Literatur 83

11 Anhang 84
11.1 Beschreibung der QSH Beurteilung 84
11.2 Vereinfachtes Emissionsmessgerät der HSLU 85
11.3 Abgasvolumenstrommessung 86
11.4 Gravimetrische Staubmessung 88
11.4.1 Messung 88
11.4.2 Übersicht über alle Resultate 89
11.5 Weitere Zeitverläufe der LZM - Anlage Standort A 99
11.6 Weitere Zeitverläufe der LZM - Anlage Standort B 107
11.7 Zeitverläufe O_2, CO und PM Testo von einigen Staubmessungen 115
11.7.1 Anlage Standort B 115
11.7.2 Anlage Standort A 116

1 Ausgangslage und Zielsetzung

Die Cercl'Air-Empfehlung Nr. 31p für Holzfeuerungen über 70 kW Feuerungswärmeleistung (FWL) beinhaltet eine Überprüfung der Anzahl EIN-Schaltungen pro Jahr (bis 100 kW_{FWL}: < 1'000, über 100 kW_{FWL}: < 500), die sich bei Mehrkesselanlagen auf die Summe der Einschaltungen aller Feuerungen bezieht. Das dabei erwähnte SFIH Merkblatt 11/1 stammt aus dem Jahr 2011 und wurde inzwischen zurückgezogen. Es bezog sich auf damalige industrielle Holzfeuerungen für Holzhackschnitzel mit Leistungen meist über 500 kW.

Kaskadenanlagen mit zwei oder mehreren sogenannten „Serien-Geräten" von automatischen Holzheizkesseln erleben eine markante Zunahme. Solche kostengünstigen Serien-Geräte weisen im Vergleich zu industriellen Holzfeuerungen eine leichtere Bauweise auf und sind deshalb rascher zu- und wegschaltbar. Aufgrund der kompakteren Bauweise können diese Geräte auch bei engeren Platzverhältnissen eingebaut werden, wo industrielle Feuerungen nicht mehr in Frage kommen. Sie werden aktuell im Leistungsbereich von ca. 50 kW bis 350 kW angeboten. Viele dieser Feuerungen müssen nach einer bestimmten Betriebsdauer von beispielsweise 6 bis 8 Stunden eine Entaschung des Verbrennungsrostes durchführen. Dies hat zur Folge, dass diese Feuerungen mehr Einschaltungen aufweisen als industrielle Holzfeuerungen und die Vorgaben der maximalen Anzahl Einschaltungen pro Jahr gemäss Cercl'Air-Empfehlung Nr. 31p meist nicht erfüllen können.

Aus diesem Grund sollen in diesem Projekt Langzeitmessungen (LZM) von gasförmigen Emissionen und punktuelle gravimetrische Staubmessungen der verschiedenen Betriebsphasen an Kaskadenanlagen mit Serien-Geräten durchgeführt werden, die mit Holzhackschnitzeln und Holzpellets betrieben werden. Die Messungen sollen die lufthygienische Qualität der Ein- und Ausschaltungen und der Entaschungsvorgänge der Serien-Geräte mit unterschiedlichen Brennstoffen aufzeigen. Auf der Basis der Resultate dieser Messungen soll zusammen mit einer grösseren Begleitgruppe (Holzfeuerungen Schweiz, Holzenergie Schweiz, Cercl'Air, BAFU und BFE) Vorschläge für eine neue Beurteilung oder ein alternatives Beurteilungskriterium für die Cercl'Air-Empfehlung Nr. 31p erstellt werden, welches die Besonderheiten von Kaskadenanlagen und der neuen Serien-Geräten berücksichtigt.

2 Zusammenfassung der Messungen

2.1 Anlagenauswahl und Durchführung der Messungen

Für die LZM für gasförmige Emissionen und die gravimetrischen Staubmessungen wurden eine 4-Kessel-Kaskaden-Anlagen (4 x 330 kW, Anlagenstandort = B) betrieben mit Holzhackschnitzel und eine 2-Kesselanlage (Kessel 1 = 140 kW und Kessel 2 = 220 kW, Anlagenstandort = A) betrieben mit Pellets ausgewählt. Die 2-Kessel-Anlage ist zwar keine Kaskadenanlage, aber die Problematik der EIN- und AUS-Schaltungen pro Jahr, welche die aktuelle Vorgabe der Cercl'Air-Empfehlung Nr. 31p in vielen Fällen übertrifft, ist auch für diesen Anlagetyp relevant. Ausserdem decken die installierten Leistungen der 2-Kesselanlage genau jene Leistungen ab, die im Moment bei Pelletfeuerungen schweizweit sehr häufig installiert werden (Quelle: Prüfstelle QMmini).

Neben den verschiedenen Anlagetypen und verschiedenen Brennstoffen konnten auch unterschiedliche Elektroabscheiderkonzepte untersucht werden. Am Standort B gibt es separat aufgestellte Elektroabscheider (EA, 1 pro Kessel) und am Standort A sind die EA in der jeweiligen Feuerung integriert.

Die Anlagen wurden ohne Einschränkungen bzw. Eingriffe in das Betriebsverhalten von den Kesselherstellern/-lieferanten und Betreibern zur Verfügung gestellt. Die Messungen zeigen somit das wahre Betriebsverhalten der Anlagen, so wie diese angetroffen wurden.

Die Messstellen an beiden Anlagen waren einfach zugänglich, gut positioniert und ausgeführt, wodurch die Messungen gemäss BAFU Messempfehlung [1] und ohne Erschwernisse durchgeführt werden konnten, was vor allem für die zahlreichen gravimetrischen Staubmessungen wichtig war. Zudem gab es auf der Anlage am Standort B Messtellen vor und nach dem EA, wodurch gleichzeitige gravimetrischen Staubmessungen im Rein- und Rohgas möglich waren.

Auf der Anlage am Standort B gab es 3 Brennstoffsilos, die von unterschiedlichen Lieferanten befüllt werden. Während der Messung traten deutliche Unterschiede in der Brennstoffqualität in den verschiedenen Silos auf. Dies ermöglichte eine Untersuchung des Einflusses der Brennstoffqualität auf den Anlagenbetrieb, was auf den meisten Praxisanlagen normalerweise nicht möglich wäre.

LZM werden normalerweise nur während rund 5 Tagen durchgeführt [2]. Für dieses Projekt wurden die Messdauer jedoch auf ca. 3 Wochen ausgedehnt, was hinsichtlich des Betriebs der Emissionsmessgeräte sowie der Datenerhebung und Datenauswertung herausfordernd ist. Zudem wurden auf der Anlage am Standort B Emissionsmessgeräte für alle 4 Kessel gleichzeitig benötigt. Die LZM waren somit nur möglich, da die Hochschule Luzern entsprechende Messgeräte, die speziell für länger dauernde LZM geeignet sind, zur Verfügung gestellt hat. Diese Geräte wurden in einem Projekt zusammen mit einigen Mitgliedern des Cercl Air und dem BFE entwickelt wurden.

Eine weitere Besonderheit der LZM in diesem Projekt war, dass auch der Abgasvolumenstrom kontinuierlich für jeden Kessel über sehr lange Perioden gemessen wurde. Dabei ist anzumerken, dass eine kontinuierliche Volumenstrommessung über längere Zeiträume in Kaminen von Holzfeuerungen nicht standardmässig durchgeführt wird und mit Unsicherheiten verbunden ist.

Die gravimetrischen Staubmessungen wurden gemäss BAFU Messempfehlung [1] durchgeführt. Da mit dieser Methode keine kontinuierlichen Messungen möglich sind, wurden diese Messungen diskontinuierliche für verschiedene Betriebsphasen mit mindestens 1 Wiederholungsmessung pro Phase mit EA EIN und mit EA AUS bzw. vor und nach dem EA durchgeführt. Um diese verschiedenen Betriebsphasen herbeizuführen, musste manuell in die Kesselsteuerungen eingegriffen werden. Diese Eingriffe können jedoch das Kaskaden- und Emissionsverhalten der Gesamtanlage an jenen Tagen, an denen die Staubmessungen durchgeführt wurden, beeinflussen.

Folgende Betriebszustände wurden untersucht:

- Kaltstart (Kessel-Stillstand ca. 24h)
- Warmstart (Kessel-Stillstand ca. 1h)
- Regelbetrieb
- Abfahren
- Kleine Entaschung (nur am Standort B)

Das Ab- und Anfahren wegen eines Entaschungsvorganges (in diesem Bericht als «grosse Entaschung» bezeichnet) wurde nicht separat untersucht, da sich gemäss Herstellerangaben diese in Bezug auf Einstellungen der Regelparameter (Gebläse-Drehzahl, Brennstoffzufuhr, etc.) nicht von «konventionellen» Abfahrvorgängen mit kurz darauffolgendem Warmstart unterscheiden. Eine Entaschung des gesamten Verbrennungsrostes (bezeichnet mit «Entaschung» am Standort A und mit «grosser Entaschung» am Standort B) werden in der Regel nach 4-8 h Dauerbetrieb durchgeführt. Bei den Kesseln der Anlage am Standort B gibt es periodisch (ca. alle 90min) auch eine «kleine» Entaschung, in der nur ein Teil des Verbrennungsrosts gereinigt wird. Diese «kleine» Entaschung gibt es bei den Kesseln der Anlage am Standort A nicht.

2.2 Ergebnisse LZM und gravimetrischer Staubmessungen

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse der beiden Anlagen zusammengefasst. Die detaillieren Ergebnisse sind in den Kapiteln 8 und 9 zu finden.

Die Daten der LZM wurden dabei mit der QSH-Methode beurteilt (siehe Beschreibung im Anhang 11.1). Diese Methode beurteilt für die CO-Emissionen bei jedem einzelnen Kessel die Dauer von Grenzwertüberschreitungen während des Feuerungsbetriebs sowie die Qualität der An- und Abfahrvorgänge. Für dieses Projekt wurde die QSH-Methode zudem angepasst, um Unterschiede verschiedener Anfahrvorgängen (Warm- und Kaltstarts, Start nach einer Entaschung) und Abfahrvorgänge («normaler» Abfahrvorgang, Abfahrvorgang aufgrund einer Entaschung) zu untersuchen.

Die Ergebnisse der punktuellen Staubmessungen der verschiedenen Betriebsphasen wurden mit Annahmen hochgerechnet auf die gesamte Dauer der LZM. Einzelne QSH-Kriterien für CO (z.B. Feuerungsbetrieb soll zu 80% der Zeit < EGW sein) wurden auch für die Staubemissionen angewendet.

Neben der Beurteilung der einzelnen Kessel wurden anhand der Abgasvolumenstrommessung Emissionsfrachten berechnet, wodurch auch die CO- und Staub-Emissionen der Gesamt-Anlage am Standort A und am Standort B abgeschätzt werden konnten. Dies würde einer Messung der Emissionen von allen Kesseln in einem gemeinsamen Kamin entsprechen, bei der sich die verschiedenen Betriebsphasen der einzelnen Kessel überlagern. Es ist jedoch zu beachten, dass die LRV-Grenzwerte und die QSH-Methode für die Beurteilung von Einzelkesseln gedacht sind, wo es zu keiner Überlagerung der verschiedenen Betriebsphasen kommt.

2.2.1 Standort A: 2-Kessel Pelletanlage (1x 140 kW, 1x 220 kW)

Die Messungen am Standort A wurden von 04.04.2022 bis 22.04.2022 (18 Tage) durchgeführt. Der kleinere Kessel mit einer Nennwärmeleistung (NWL) von 140 kW wird als Kessel 1 bezeichnet und der grössere Kessel mit einer NWL von 220 kW wird als Kessel 2 bezeichnet.

Zur Durchführung der Staubmessungen für verschiedene Betriebszustände musste manuell in die Kesselsteuerung eingegriffen werden, um den gewünschten Zustand auszulösen. Da die Staubmessungen von den untersuchten Betriebszuständen jeweils mit ein- und ausgeschaltetem EA durchgeführt wurden und mindestens 1 Wiederholungsmessungen pro Betriebszustand durchgeführt wurde, fanden die Staubmessungen an insgesamt 8 Tagen statt. Somit wurde an 8 von 18 Tagen der Messperiode in die Kesselsteuerungen eingegriffen und teilweise für längere Zeiträume die EA deaktiviert. Diese Eingriffe beeinflussen das Kaskaden- und Emissionsverhalten der Gesamtanlage und die Verfügbarkeit der EA an jenen Tagen, an denen die Messungen durchgeführt wurden.

Die Messungen am Standort A wurden im Monat April durchgeführt. Dieser Monat ist jedoch für einen optimalen Betrieb einer Holzfeuerungsanlage herausfordernd. Es gab viele Phasen, in denen ein einziger Kessel nicht ausreichend war (egal ob Kessel 2 oder Kessel 1), aber auch viele warme Phasen, sodass die minimale Tagesheizlast nach QM Holzheizwerke nicht für beide Kessel durchgehend erfüllt war.

Die Anlage wurde erst im Herbst 2021 in Betrieb genommen und die LZM haben gezeigt, dass es noch Potential für Betriebsoptimierungen gibt, welche die Anzahl an EIN-/Ausschaltungen bzw. Kesselzuschaltungen verringern könnten. Zum Beispiel war bei Kessel 2 ein sehr kurzes Intervall von 4 h für die Entaschung eingestellt. Ausserdem war die Rücklauftemperatur des Wärmenetzes vergleichsweise hoch (~55°C), wodurch die Kapazität des Wärmespeichers nicht optimal genutzt werde kann. Ausserdem gibt es Potential zur Optimierung der Ausbrandphase, um die Emissionen zu reduzieren.

Während der Messperiode gab es somit 40 An- und Abfahrvorgänge bei Kessel 1 (rund 2 pro Tag) u. 73 bei Kessel 2 (rund 4 pro Tag). Dies entspricht im Durchschnitt rund 6 An- und Abfahrvorgänge der Gesamtanlage pro Tag.

Beurteilung der Emissionen pro Kessel

Die Auswertung der gravimetrischen Staubmessungen zeigt für beide Kessel, dass

- die mittleren auf Bezugs-O_2 normierten Staub-Emissionen der Betriebsphasen «Regelbetrieb», «Warm-Start» und «Kalt-Start» kleiner sind als der Emissionsgrenzwert von 50 mg/m^3 (Bild 19). Nur die Staubemissionen der Abfahrphasen beider Kessel liegen über dem Emissionsgrenzwert.
- die auf die gesamte Messperiode hochgerechneten Staub-Emissionen während des Regelbetriebs zu 100% der gesamten Messperiode und die Emissionen während des Feuerungsbetriebs zu 98-99% der Zeit unter dem Grenzwert von 50 mg/m^3 liegen (Bild 23).
- die Frachtberechnungen einen für die gesamte Messperiode gemittelten normierten Staubwert von rund 27 mg/m^3 und 15 mg/m^3 für Kessel 1 und Kessel 2 ergeben. Diese Werte sind trotz der 40 An- und Abfahrphasen für Kessel 1 und rund 73 für Kessel 2 innert 18 Tagen klar unter dem Emissionsgrenzwert für von 50 mg/m^3, der für den Regelbetrieb gilt (Tabelle 5).
- die Ausbrandphasen, obwohl diese nur rund 10% (Kessel 1) bzw. rund 20% (Kessel 2) an der gesamten Messperiode betragen, einen Anteil an den Gesamt-Staub-Emissionen von 32% bei Kessel 1 und 62% bei Kessel 2 ausmachen (Bild 25, Tabelle 3 und Tabelle 4).

Die Auswertung der LZM für die CO-Emissionen zeigt für beide Kessel, dass

- die CO-Emissionen während des Regelbetriebs zu 100% der gesamten Messperiode unter dem Grenzwert von 500mg/m^3 liegen (Bild 5 und Bild 8).
- die CO-Emissionen während des Feuerungsbetriebs (beinhaltet neben dem Regelbetrieb auch die Perioden der An- und Abfahrphasen, in denen O_2 < 18% ist) während ca. 95 % der Messperiode für beide Kessel unter dem Grenzwert von 500mg/m^3 liegen (Bild 5 und Bild 8).
- die CO-Emissionen aller Anfahrphasen nach der QSH-Methode mit «hoher Qualität» beurteilt werden. Die Anfahrphasen sind kurz (max. 15 min) und die mittleren CO-Emissionen (mit sehr wenigen Ausnahmen) deutlich unter 1000 mg/m^3 (nicht normiert) (Bild 4 und Bild 7).
- die CO-Emissionen der Abfahrphasen nach der QSH-Methode (mit sehr wenigen Ausnahmen) mit «erfüllt» beurteilt werden (Bild 4 und Bild 7).
- die Ausbrandphasen, obwohl diese nur rund 10% (Kessel 1) bzw. rund 20% (Kessel 2) an der gesamten Messperiode betragen, einen Anteil an den Gesamt-CO-Emissionen von 66% bei Kessel 1 und 75% bei Kessel 2 ausmachen (Bild 16).
- es keine signifikanten Unterschiede für das Anfahren nach verschiedenen Stillstandszeiten gibt. Auch die Anfahrphasen nach einer Entaschung zeigen keine höheren CO-Emissionen als «reguläre» Anfahrphasen. Bei Kessel 2 ist jedoch deutlich erkennbar, dass die Anfahrphasen nach einer Entaschung kürzer sind. Die Abfahrphasen aufgrund einer Entaschung sind wegen des Betriebskonzepts meist kürzer als reguläre Abfahrphasen und weisen auch keine höheren CO-Emissionen auf (Bild 18).

Beurteilung der Emissionen der Gesamtanlage

Die CO-Emissionen der Gesamtanlage für O_2 Werte < 18% zeigen, dass der Emissionsgrenzwert von 500 mg/m^3 während der gesamten Messperiode mehrheitlich unterschritten wird. Nur zu rund 17% der Zeit wird der Emissionsgrenzwert überschritten (Bild 13). Dies ist einerseits auf die hohen CO-Emissionen während des Abfahrens und den hohen Anteil der Betriebsphase Abfahren in der Messperiode zurückzuführen. Ausserdem sinkt der Abgasvolumenstrom im Ausbrand im Vergleich zum Regelbetrieb nicht deutlich ab. Zudem kommt es häufig auch zu einer ungünstigen Überlagerung von verschiedenen Betriebsphasen der beiden Kessel.

Für die Staubemissionen zeigt sich ein ähnliches Bild wie für CO. Der Emissionsgrenzwert von 50 mg/m^3 wird während des Feuerungsbetriebs (O_2 < 18 %) nur zu rund 18% der gesamten Messperiode überschritten (Bild 24).

2.2.2 Standort B: 4-Kessel Holzhackschnitzel-Kaskaden-Anlage

Die Messungen am Standort B wurden vom 07.03.2022 bis 23.03.2022 (17 Tage) durchgeführt. Zur Durchführung der Staubmessungen für verschiedene Betriebszustände musste manuell in die Kesselsteuerung eingegriffen werden, um den gewünschten Zustand auszulösen. Am Standort B konnten die gravimetrischen Staubmessungen gleichzeitig vor und nach dem EA durchgeführt werden. Somit wurden an 5 von 18 Tagen der Messperiode in die Kesselsteuerungen eingegriffen. Diese Eingriffe beeinflussen das Kaskaden- und Emissionsverhalten der an jenen Tagen, an denen die Messungen durchgeführt wurden.

Während der Messperiode waren die Aussentemperaturen so, dass immer mindestens 2 Kessel, aber mehrmals über längere Zeit auch 3 Kessel gleichzeitig in Betrieb waren. Somit gab es während der Messperiode insgesamt 120 An- und Abfahrvorgänge, was rund 7 An- und Abfahrvorgänge pro Tag für die Gesamtanlage sind.

Im Zuge des Projektes Holzkessel Kaskadenanlagen mit Speicher (HoKaSpe) [3] wurden die Betriebsdaten dieser Anlage über mehr als 1 Jahr ausgewertet und es wurde anhand dieser Daten im Zuge des HoKaSpe Projekts eine Betriebsoptimierung durchgeführt. Das bedeutet, dass der Anlagenbetrieb bereits optimiert wurde und durch weitere Verbesserungen des Anlagenbetriebs keine deutliche Reduktion der An- und Abfahrvorgänge mehr erreicht würde.

Charakterisierung der Brennstoffproben (siehe Kapitel 9.2)

Die Brennstoffproben der drei Brennstoffsilos (Kessel A+B, Kessel C und Kessel E) zeigten bereits optisch deutliche Unterschiede. Der Brennstoff in Kessel A und B während der gesamten LZM sowie in Kessel C am Beginn und am Ende der Messerperiode, sind Waldhackschnitzel. Bei Kessel E und, für grosse Teile der Messperiode, auch für Kessel C scheinen es unbehandelte Industrierestholzschnitzel zu sein.

Weiter zeigt auch die Bestimmung der Stückigkeit deutliche Unterschiede zwischen den drei Brennstoffsilos. Der Brennstoff für Kessel A und B weist vor allem am Beginn und am Ende der Messeperiode einen hohen Feingutanteil auf, der teilweise >10% jedoch max. 14% ist. Gemäss Angaben im Manual des Kesselherstellers, sollen nur Brennstoffe P16S-P31S eingesetzt werden, also Brennstoffe mit einem Feingutanteil <10 %. Die Brennstoffproben von Kessel C und E haben einen tiefen Feingutanteil <3 mm (1 % bis max. 6 %), der bis auf eine Probe bei Kessel E den Anforderungen von QM Holzheizwerke für Qualitätshackschnitzel erfüllen würde.

Der Wassergehalt (W) der Brennstoffproben von Kessel A und B liegt konstant zwischen 26 % und 29 % und für Kessel E zwischen 9 % und 14 %. Bei Kessel C gibt es grössere Unterschiede. Am Beginn (10.03.2022) und am Ende (23.03.2022) war der Wassergehalt mit 33 % bis 35 % relativ hoch, während er für die Proben in der Mitte der LZM bei 21 % bis 23 % lag.

Beurteilung der Emissionen pro Kessel

Die Auswertung der gravimetrischen Staubmessungen zeigt für Kessel A und E, dass

- die mittleren auf Bezugs-O_2 normierten Staub-Emissionen der verschiedenen Betriebsphasen, ausser für «Kalt-Start» bei Kessel A und «Ausbrand» bei Kessel E, kleiner als der Emissionsgrenzwert von 50 mg/m^3 sind (Tabelle 8 und Bild 53).
- die auf die gesamte Messperiode hochgerechneten Staub-Emissionen während des Regelbetriebs zu 100% der gesamten Messperiode und die Emissionen während des Feuerungsbetriebs zu 98-99% der Zeit unter dem Grenzwert von 50 mg/m^3 liegen (Bild 55).
- die Frachtberechnungen einen für die gesamte Messperiode gemittelten normierten Staubwert von rund 24 mg/m^3 und 7 mg/m^3 für Kessel A und Kessel E ergeben (Tabelle 11). Diese Werte sind trotz der 36 An- und Abfahrphasen für Kessel A und rund 25 für Kessel E innert 17 Tagen klar unter dem Emissionsgrenzwert für von 50 mg/m^3, der für den Regelbetrieb gilt.
- die Staubemissionen bei Kessel A, trotz des Brennstoffs mit höherem Feingutanteil und höherem Wassergehalt, ähnlich tief sind wie bei Kessel E.
- der Anteil der Staubemissionen der Betriebsphase «Regelbetrieb» an den Emissionen der gesamten Messperiode bei Kessel A rund 70 % und bei Kessel E rund 60 % ausmachen. Das An- oder Abfahren sowie die kleine Entaschung haben je nach Kessel einen Anteil von 5 % bis 22 % (Tabelle 9 und Tabelle 10 sowie Bild 58).

Die Auswertung der LZM für die CO-Emissionen zeigt dass,

- die Emissionen des Regelbetriebs deutlich kleiner sind als der EGW von 500 mg/m^3 (Median-Werte über die gesamte LZM sind: Kessel A: 223 mg/m^3, Kessel B: 246 mg/m^3, Kessel C: 81 mg/m^3, Kessel E: 46 mg/m^3)
- praktisch alle Abfahrvorgänge, auch für die Kessel mit höherem Feingutanteil oder Perioden mit höherem Wassergehalt, nach der QSH-Methode mit «erfüllt» beurteilt werden.
- jedoch ein deutlicher Einfluss der unterschiedlichen Brennstoffqualitäten vorhanden ist.
- für Kessel A und B (Feingutanteil teilweise >10%) sowie für Kessel C (Wassergehalt teilweise 33 %-35 %)
    - die nach QSH tolerierten Zeiten pro 24 h während des Feuerungsbetriebs, in denen der EGW-Überschreitungen auftreten dürfen (max. 20% der Zeit), überschritten werden.
        - Für Kessel A sind die CO-Emissionen während des Feuerungsbetriebs rund 60% der Zeit < EGW, für Kessel B rund 40% und für Kessel C rund 70%.

        - Für Kessel A und B sind aufgrund der Emissionsspitzen während der kleinen Entaschung auch die CO-Emissionen des Regelbetriebs nur zu 70% (Kessel A) und nur zu 50% (Kessel B) der gesamten Messperiode < EGW.
    - zahlreiche Anfahrvorgänge mit der QSH Methode mit «nicht-erfüllt» beurteilt werden. Das heisst die Emissionen während des Anfahrens sind oft hoch und/oder die Anfahrphasen dauern lange.
    - es deutliche Emissionsspitzen wegen der «kleinen Entaschung» gibt, die in der Regel alle 90 min auftreten. Diese Emissionsspitzen sind zwar kurz (rund 15-30 min) weisen aber Werte in der Regel > 1000 mg/m^3 normiert auf 13 % O_2 auf.
- für Kessel C während den Perioden mit tieferem Wassergehalt (22 %-23 %) und die gesamte Messperiode für Kessel E (Feingutanteil 1 %-6 % und Wassergehalt <13 %)
    - die nach QSH tolerierten Zeiten pro 24 h während des Feuerungsbetriebs, in denen der EGW Überschreitungen auftreten dürfen (max. 20% der Zeit), eingehalten werden.
        - Für Kessel C und Kessel E sind die CO-Emissionen während des Feuerungsbetriebs rund 95% der Zeit < EGW und während des Regelbetriebs sogar rund 100% der Zeit < EGW.
    - bis auf 1 einzigen Anfahrvorgang alle Anfahrphasen für Kessel C und Kessel E nach der QSH-Methode mit «erfüllt» beurteilt werden.
- Anfahren/Abfahren/kleine Entaschung je nach Kessel rund 3% bis 40% der Gesamt-CO-Emissionen ausmachen.
- keine signifikanten Unterschiede auftreten für das Anfahren nach verschiedenen Stillstandszeiten. Auch die Anfahrphasen nach einer Entaschung zeigen keine höheren CO-Emissionen als «reguläre» Anfahrphasen. Die Abfahrphasen aufgrund einer Entaschung weisen zwar höhere CO-Emissionen auf, sind wegen des Betriebskonzepts meist deutlich kürzer als reguläre Abfahrphasen und werden dadurch nach QSH grösstenteils mit «hoher Qualität» beurteilt.

Beurteilung der Emissionen der Gesamtanlage

Während der gesamten LZM gab es 120 An- und Abfahrvorgänge während 17 Tagen. Dies bedeutet, dass bei der Gesamtanlage somit rund 7 An- und Abfahrvorgänge pro Tag aufgetreten sind.

Die O_2-Werte der Gesamtanlage waren über die gesamte Messperiode mit Ausnahme von ein paar wenigen Stunden (< 5 h), immer unter 18 % (Bild 31).

Die CO-Emissionen der Gesamtanlage zeigen, dass der Emissionsgrenzwert von 500 mg/m^3 während der gesamten Messperiode nur zu rund 45 % der Zeit unterschritten wird (Bild 32). Dies ist einerseits auf die hohen CO-Emissionen während des Anfahrens, Abfahrens und der kleinen Entaschung sowie auf den Betriebsabgasvolumenstroms (V_{AG}) dieser Phasen zurückzuführen (Bild 28 und Bild 29). V_{AG} dieser Phasen ist im Vergleich zum Regelbetrieb zwar tiefer, aber nicht einmal halbiert. Zudem kommt es häufig auch zu einer ungünstigen Überlagerung von verschiedenen Betriebsphasen der Kessel. Wenn die Werte der kleinen Entaschung mit dem Mittelwert der CO-Emissionen von 30min vor und 30min nach der kleinen Entaschung ersetzt werden, sind die CO-Emissionen der Gesamtanlage zu rund 58% der Zeit der gesamten Messperiode < EGW (Bild 32). Wenn die CO-Emissionen der Kessel A-C mit den Mittelwerten der jeweiligen Betriebsphasen von Kessel E ersetzt werden (also, wenn alle Kessel dieselben Emissionen hätten wie Kessel E), sind die CO-Emissionen der Gesamtanlage zu rund 82% der Zeit < EGW Bild 32.

Um die Staubemissionen der Gesamtanlage beurteilen zu können, wurden fiktive zeitliche Verläufe der Staubemissionen von Kessel B und C, an denen gravimetrischen Staubmessungen durchgeführt wurden, mit den Mittelwerten der jeweiligen Betriebsphasen von Kessel A berechnet. Die auf die gesamte Messperiode hochgerechneten Staub-Emissionen der Gesamtanlage während des Feuerungsbetriebs sind zu rund 93% der Zeit unter dem Grenzwert von 50 mg/m^3 (Bild 56). Wenn für die verschiedenen Betriebsphasen von allen Kesseln der jeweils grösste aus den Messungen bestimmte Wert eingesetzt wird (entsprich dem «Worst-Case» Szenario), sind die Staub-Emissionen der Gesamtanlage zu rund 80% der Zeit unter dem EGW (Bild 56).

2.2.3 Kurzfassung der Messergebnisse

Anlage Standort A: 2 Pelletkessel (140 kW/220 kW)

- Anlagenbetrieb
  - Während der LZM (18 Tage) gab es 40 An- und Abfahrvorgänge bei Kessel 1 (rund 2 pro Tag) und 73 bei Kessel 2 (rund 4 pro Tag) was rund 6 An- und Abfahrvorgänge der Gesamtanlage pro Tag entspricht.
- Staub-Emissionen
  - Regelbetrieb und Anfahren zu 100% < EGW (Bild 19)
  - Abfahren > EGW (Bild 19)
  - Ausbrandphasen betragen rund 10%/20% der untersuchten Betriebszeit und machen 32%/62% der Gesamt-Staub-Emissionsfracht aus (Bild 25).
  - Beide Kessel: Feuerungsbetrieb der gesamten LZM zu 98-99 % < EGW (Bild 22)
  - Feuerungsbetrieb der Gesamtanlage zu 82% < EGW (Bild 24)
- CO-Emissionen
  - Beide Kessel: Regelbetrieb 100% und Feuerungsbetrieb 95% < EGW (Bild 5, Bild 8)
  - Feuerungsbetrieb der Gesamtanlage zu 83% < EGW (Bild 13)
  - Für beide Kessel: Beurteilung Anfahren/Abfahren nach QSH: hohe Qualität/erfüllt (Bild 5 und Bild 7)
  - Kein Unterschied für Anfahren nach unterschiedlich langen Stillstandszeiten (Warm- u. Kaltstart) und dem Ab- und Anfahren wegen/nach einer grossen Entaschung (Bild 18).
  - Ausbrandphasen betragen rund 10% der untersuchten Betriebszeit und machen 66%/75% der Gesamt-CO-Emissionsfracht aus (Bild 16).

Anlage Standort B: 4 Kessel à 330 kW mit Holzhackschnitzeln

- Brennstoffeigenschaften
  - Stückigkeit P: P16S bis P31 und P31S
  - Wassergehalt M: Bei Kessel A und B (26 %-29 %) sowie bei Kessel C (21 %-35 %) höher als bei Kessel E (9 %-14%).
  - Feingutanteil F: Bei Kessel A, B teilweise > 10%, bei Kessel C, E < 6 %
- Anlagenbetrieb
  - Während der LZM (17 Tage) gab es 127 An- und Abfahrvorgänge, was rund 7.5 An- und Abfahrvorgänge pro Tag für die Gesamtanlage entsprechen.
- Staub-Emissionen
  - Kessel A/E:
    - Regelbetrieb zu 100 % und Feuerungsbetrieb zu 98 % < EGW für beide Kessel
    - Anfahren: < EGW (ausser Kalt-Start bei Kessel A, siehe Bild 53)
    - Ausbrand: < EGW (ausser Abfahren bei Kessel E, siehe Bild 53)
    - Regelbetrieb macht bei Kessel A/E rund 70%/60% der Gesamt-Staub-Emissionen aus (Bild 58).
  - Feuerungsbetrieb der Gesamtanlage (Annahme, dass Kessel B und C dieselben Emissionen haben wie Kessel A) zu 93 % < EGW (Bild 56)
  - Feuerungsbetrieb der Gesamtanlage mit Worst-Case Szenario (Annahme der höchsten Staubemissionen der verschiedenen Betriebsphasen für alle Kessel) zu 80 % < EGW (Bild 56).
- CO-Emissionen
  - Kessel A/B/C (mit höherem Wassergehalt):
    - Deutliche Emissionsspitzen aufgrund der kleinen Entaschung (alle 90 min) (Bild 35, Bild 39 und Bild 45)
    - Regelbetrieb zu 60%/40%/70% < EGW (Bild 34, Bild 38 und Bild 42)
    - Beurteilung Anfahren nach QSH: nicht-erfüllt (Bild 33, Bild 37 und Bild 41)
    - Beurteilung Abfahren nach QSH: erfüllt (Bild 33, Bild 37 und Bild 41)
  - Kessel C (mit tieferem Wassergehalt) und E:
    - Regelbetrieb zu 100% < EGW und Feuerungsbetrieb zu 95% < EGW (Bild 44)
    - Beurteilung Anfahren/Abfahren QSH: erfüllt/erfüllt (Bild 43)

- Kein Unterschied für Anfahren nach unterschiedlich langer Stillstandszeiten (Warm- und Kaltstart) und dem Ab- und Anfahren wegen/nach einer grossen Entaschung (Bild 51 und Bild 52).
- Feuerungsbetrieb der Gesamtanlage zu 45 % < EGW (Bild 32)
- Feuerungsbetrieb der Gesamtanlage ohne kleine Entaschung zu 58 % < EGW (Bild 32)
- Feuerungsbetrieb der Gesamtanlage, wenn alle Kessel dieselben Emissionen hätten wie Kessel E, zu 82 % < EGW (Bild 32).

2.3 Schlussfolgerungen aus den Messungen

Die Einzelbeurteilung der untersuchten Kessel zeigt, dass

- bei Holzhackschnitzeln mit guter Qualität (Feingutanteil < 10 % und Wassergehalt < 30 %) und bei Pellets die CO-Emissionen im Regelbetrieb deutlich < EGW sind und dass der Feuerungsbetrieb aber auch die einzelnen An- und Abfahrphasen mit der QSH-Methode als «erfüllt» beurteilt werden.
- bei einer früher durchgeführten LZM an einer 4-Kessel-Pellet-Kaskadenanlage (2x 90 kW und 2x 200 kW), mit Kesseln desselben Herstellers wie am Standort B, die CO-Emissionen der Einzelkessel nach QSH mindestens mit «erfüllt», grösstenteils sogar mit «hoher Qualität» beurteilt werden.
- keine signifikanten Unterschiede auftreten für das Anfahren nach verschiedenen Stillstandszeiten und dem Ab- und Anfahren wegen/nach einer Entaschung im Vergleich zu «regulären» An- und Abfahrvorgängen.
- die Staubemissionen bei Pellets sowie auch bei Holzhackschnitzeln mit weniger guter Qualität (Feingutanteil 10 %-15 % und Wassergehalt 30 %-35 %)
  - während des Regelbetriebs deutlich < EGW sind, aber auch für die Betriebsphasen Warm- und Kaltstart, Ausbrand und kleine Entaschung aufgrund der installierten Elektroabscheider mit nur vereinzelten Ausnahmen < EGW sind.
- die Vorgaben von QSH, die für CO gelten, dass der EGW während des Feuerungsbetriebs der gesamten Zeit maximal 20% überschritten werden darf, auch für die Staubemissionen deutlich erfüllt werden können.
  - Dies sogar, wenn die Zeit der An- und Abfahrphasen an der Gesamtzeit so erhöht wird, dass dies rund 4-6 An- und Abfahrvorgängen pro Tag entsprechen würde (Empfehlung nach QM Holzheizwerke = max. 5 pro Kessel und Tag).
- die Schlussfolgerungen, vor allem für Holzhackschnitzel, beruhen auf einer begrenzten Datenlage und das Generalisieren der Aussagen auf alle Seriengeräte ist dementsprechend mit Unsicherheiten behaftet. Vor allem bezüglich der «kleinen Entaschung» gibt es Unterschiede zwischen verschiedenen Kesseltypen und Herstellern und teilweise wird gar keine «kleine Entaschung» durchgeführt.
  - Hinweis:
    - Bei der «kleinen Entaschung» wird eine Entaschung nur für einen Teil des Verbrennungsrostes durchgeführt und die Verbrennung wird nicht unterbrochen. Die «kleine Entaschung» wurde auf der Anlage am Standort B in der Regel alle 90 min durchgeführt.
    - Bei einer «Entaschung» (Standort A) bzw. «grossen Entaschung» (Standort B)» wird eine Entaschung des gesamten Verbrennungsrostes durchgeführt. Dazu muss der Verbrennungsvorgang unterbrochen werden, was zu einer kurzen Abfahrphase gefolgt von einem Warmstart führt. In der Regel wird eine Entaschung/grosse Entaschung alle 4 h bis 8 h durchgeführt.
- es Potential zur Optimierung einzelner Betriebsphasen gibt, und die Emissionen weiter reduziert werden können.

Die Beurteilung der Emissionen der Gesamtanlagen zeigt,

- dass auf der Anlage am Standort A rund 6 und auf der Anlage am Standort B rund 7 An- und Abfahrvorgänge pro Tag aufgetreten sind. Dies ist mehr als die Maximalvorgabe von 5 der Cercl'Air-Empfehlung Nr. 31p.
- dass die CO-Emissionen bei Pellets und Holzhackschnitzeln guter Qualität sowie die Staubemissionen für Pellets, aber auch für Holzhackschnitzeln weniger guter Qualität, die Vorgaben von QSH für die Einzelkessel, dass der EGW während des Feuerungsbetriebs (alle Werte bei O_2 <18 %) maximal 20% der Zeit überschritten werden darf, erfüllen können.
- dass die Unterscheidung zwischen verschiedenen Betriebsphasen bzw. das Zuordnen der Anteile dieser Phasen an den Gesamtemissionen nicht mehr möglich ist und
    - dadurch die Bewertung der An- und Abfahrvorgänge nach QSH nicht möglich ist
    - dadurch eine Hochrechnung bzw. Abschätzung der Auswirkungen durch eine Änderung der Anzahl An- und Abfahrvorgänge schwierig bzw. nicht möglich ist.
    - diese Beurteilung bei Anlagen mit mehreren Kaminen nur mithilfe aufwändiger Berechnung möglich ist.

2.4 Erkenntnisse aus Projekt Holzkessel Kaskadenanlagen mit Speicher (HoKaSpe)

- Kaskadenanlagen mit zwei oder mehreren sogenannten „Serien-Geräten" von automatischen Holzheizkesseln weisen mehr Einschaltungen auf als industrielle Holzfeuerungen und die Vorgaben der maximalen Anzahl Einschaltungen pro Jahr gemäss Cercl'Air-Empfehlung Nr. 31p können meist nicht erfüllen werden.
- Einer der Gründe für die häufigeren Aus-/Einschaltungen ist die periodische Entaschung des Verbrennungsrostes, der bei Seriengeräten in der Regel alle 6-12h durchgeführt werden muss.
- Im Projekt «Holzkessel Kaskadenanlagen mit Speicher (HoKaSpe)» wurden Betriebsdaten von drei Heizzentralen (darunter auch die Anlage am Standort B , die hier gemessen wurde) über mehrere Monate bis zu mehr als einem Jahr analysiert. Die Untersuchung zeigt, dass
    - mit Kaskadenanlagen eine monovalente und fossilfreie Wärmeerzeugung möglich ist,
    - die Kessel dabei durchschnittlich 4 bis 12 Stunden unterbruchsfrei laufen und dass sie
    - rund 350 (Anlage Standort B) bis 1000 Anfahrphasen pro Jahr und Kessel aufweisen
        - von denen rund 50 % durch die periodische Entaschung verursacht werden.
    - auf der Anlage am Standort B durch Betriebsoptimierungen die jährliche Anzahl Starts um über 40 % vermindert werden konnte.

    ➔ Entsprechend dieser Anzahl Starts pro Kessel weisen Kaskaden mit drei oder vier Kesseln deutlich mehr als 500 Starts der Gesamtanlage pro Jahr auf.

    ➔ Durch Betriebsoptimierungen kann die Anzahl An- und Abfahrphasen deutlich reduziert werden kann.

3 Diskussion über mögliche Beurteilungskriterien

In diesem Kapitel wird versucht, auf der Basis der Resultate dieser Messungen und den Informationen und Erkenntnissen der Ausgangslage sowie des Projekts HoKaSpe Vorschläge für eine neue Beurteilung oder ein alternatives Beurteilungskriterium für die Cercl'Air-Empfehlung Nr. 31p zu erstellen, welches die Besonderheiten von Kaskadenanlagen und der neuen Serien-Geräten berücksichtig.

In einem ersten Schritt werden mögliche Beurteilungskriterien aufgelistet sowie deren Vor- Nachteile beschrieben. Dies soll als Grundlage für die Diskussion in der Begleitgruppe dienen. Im Zuge der Vernehmlassung können die Beurteilungskriterien angepasst, präzisiert und ergänzt werden.

3.1 Beurteilungskriterium An- und Abfahrvorgänge bzw. Anzahl Starts pro Kessel oder pro Anlage

- Das Projekt HoKaSpe hat gezeigt, dass die Anzahl Starts von 500 pro Anlage für Kaskadenanlagen mit mehr als 2 Kesseln nicht möglich ist.
- Wenn also eine maximale Anzahl Starts von den Vollzugsbehörden als Beurteilungskriterium festgelegt wird, müsste eine Anzahl Starts pro Kessel festgelegt werden oder die Anzahl Starts pro Anlage erhöht werden.
- Die LZM- und Staub-Messungen haben gezeigt, dass
    - die An- und Abfahrvorgänge für CO und Staub nach QSH-Methode mit «erfüllt» beurteilt werden, wenn die Brennstoffqualität gut ist (Feingutanteil < 10 %, W < 30 %).
        - Dies gilt für die einzelnen Phasen,
        - aber auch für die Emissionen der Gesamtanlage für den Feuerungsbetrieb bei 6 An- und Abfahrvorgängen pro Tag am Standort A und 7 am Standort B.
        - die QSH-Methode die An- und Abfahrphasen für Brennstoffe mit hoher Qualität mit «erfüllt» und teilweise «hohe Qualität» beurteilt.
        - die QSH Beurteilung (80% der Zeit < EGW) der Einzelkessel auch mit einer fiktiven Erhöhung der Anzahl Starts auf 4-6 pro Tag erfüllt ist.
    - die Anzahl An- und Abfahrvorgängen pro Tag nicht einfach auf das gesamte Jahr hochgerechnet werden bzw. auf andere Anlagen/Hersteller umgelegt werden kann, da
        - an beiden Anlagen nicht alle Kessel das gesamte Jahr über in Betrieb sind
        - nur 2 Anlagen von 2 Herstellern untersucht wurden.
- Eine früher durchgeführte LZM an einer 4-Kessel-Pellet-Kaskadenanlage (2x 90 kW und 2x 200 kW) mit Kesseln desselben Herstellers wie am Standort B zeigt, dass die CO-Emissionen der Einzelkessel nach QSH mindestens mit «erfüllt», grösstenteils sogar mit «hoher Qualität» beurteilt werden.
- Wenn eine Anzahl Starts pro Kessel festgelegt wird, muss beachtet werden, dass sich bei Anlagen mit mehreren Kesseln dadurch eine sehr hohe Anzahl Starts pro Anlage ergibt. Eventuell müsste ab einer gewissen Anzahl an Kesseln über eine Reduzierung der Anzahl Starts wie folgt diskutiert werden:
    1. Reduktion der maximal erlaubten Anzahl Starts pro Kessel für alle Kessel
    2. Reduktion der Anzahl Starts jener Kessel, die über einer gewissen Zahl x an Kesseln liegt.
- Bei der Festlegung eines Kriteriums oder einer fixen Zahl muss jedoch auch an die Umsetzung bzw. Kontrolle gedacht werden.
    - Komplexe Kriterien, wie z.B. Punkt 2), sind eventuell nur schwer umsetzbar
        - Wer übermittelt/erhebt die Anzahl Kesselstarts, z.B. im Zuge einer periodischen LRV Messung
        - Muss die Person die Anzahl im Voraus kennen (Ausweisung erfüllt/nicht-erfüllt am Messbericht) oder wird dies dann von den kantonalen Vollzugsstellen durchgeführt.
    - Was passiert, wenn die vorgegebene Anzahl überschritten wird?
        - 1. Stufe: Anordnung einer Betriebsoptimierung?
        - 2. Stufe: Anordnung einer LZM?

- Bei der Kontrolle der Anzahl Starts muss zudem sichergestellt werden, dass die Aus-/Einschaltungen wegen einer periodischen Entaschung in den Kesselsteuerungen als «Start» mitgezählt werden.
- Durch eine Vorschrift zur maximal erlaubten Anzahl Starts kann sichergestellt werden, dass im Bedarfsfall eine Betriebsoptimierung umgesetzt wird.
- Wenn es keine Vorgaben zu einer maximalen Anzahl Starts pro Tag gibt,
    - könnte die Gesamt-Emissionsfracht der Anlagen ansteigen. Die Messungen auf 2 Anlagen haben jedoch gezeigt, dass bei einer fiktiven Erhöhung der Anzahl Starts von 2-4 auf 4-6 pro Tag und Kessel die über die Messperiode gemittelte Gesamt-Konzentrationen < EGW bleiben.
    - werden die Anzahl Starts der Anlagen eventuell nicht immer auf ein Minimum reduziert, da viele Betreiber dann keine Betriebsoptimierung mehr durchführen.

Die Schlussfolgerungen aus den Messungen und die bevorstehende Diskussion über mögliche Beurteilungskriterien beruhen auf einer geringen Anzahl an untersuchten Anlagen. Um die Unsicherheiten beim Festlegen einer maximalen Anzahl Starts zu verringern, könnten folgende weitere Daten ausgewertet und folgende weitere Messungen durchgeführt werden:

1. Auswerten von Betriebsdaten von mind. 1 Jahr von einer grösseren Anzahl an Anlagen
    a. Als Alternative könnte auch von verschiedenen Herstellern eine Bandbreite von Anzahl Starts pro Jahr von Praxisanlagen übermittelt werden. Zum Beispiel Zahlen von mindestens je 3-5 Zwei- bzw. Mehrkessel-Anlagen mit Pellets und Holzhackschnitzel von mindestens 3 Herstellen.
2. Weitere LZM (nur CO-Messung, ohne Staubmessung) bei Seriengeräten weiterer Hersteller, um den gesamten Schweizer Markt abzudecken.
    - mindestens 1 weiteren Anlage mit Holzhackschnitzel mit einer kleineren Kesselgrösse und
    - einer weiteren Pellets-Anlage eines weiteren Herstellers.

Beide Punkte, vor allem Punkt 2, sind mit weiteren Kosten verbunden, die nicht mit dem Projektbudget gedeckt sind und nehmen auch mehr Zeit in Anspruch.

3.2 Beurteilungskriterium Brennstoffqualität

- Die Messungen haben gezeigt, dass mit einer hohe Brennstoffqualität (Feingutanteil <10 % und Wassergehalt <30 %)
    - die CO-Emissionen die Kriterien nach QSH einhalten können.
    - die Emissionen in allen Betriebsphasen im Vergleich zu Brennstoff mit geringerer Qualität (Feingutanteil >10% und Wassergehalt >30%) tiefer sind.
- Für Anlagen, die mit Pellets betrieben werden, ist dies in der Regel erfüllt, ausser es gibt eine Beeinträchtigung der Pelletqualität bei der Brennstoffförderung oder Lagerung.
- Für Holzhackschnitzel ergeben sich folgende Fragen:
    - Müssen/sollen nur getrocknete Qualitätshackschnitzel gemäss QM Holzheizwerke für Seriengeräte eingesetzt werden
    - Was sind die Angaben/Vorgaben der Feuerungshersteller? Oftmals sind die Angaben bereits ähnlich den Ergebnissen dieser Untersuchung (z.B. Vorgabe Kesselhersteller von <W35 und <10 % Feingutanteil).
    - Ist es eventuell ausreichend, die Holzhackschnitzel zu sieben oder müssen sie auch aktiv getrocknet werden?
    - Soll/kann die Brennstoffqualität in der Betriebsbewilligung festgelegt werden?
    - Die Durchsetzung/Kontrolle wird schwierig:
        - Wer soll kontrollieren, wann bzw. wie oft soll kontrolliert werden.
        - Falls Rückstellproben vorgeschrieben werden sollten: wer nimmt die Proben, wo werden sie genommen, wer analysiert sie, wer bezahlt die Analyse, wo werden die Proben gelagert?
    - Verfügbarkeit und Preis von Qualitätshackschnitzeln: Falls diese in Zukunft sehr verbreitet eingesetzt werden (müssten), wäre dies für die Betreiber sicherlich eine Herausforderung.

3.3 Beurteilungskriterium Emissionen

Die periodisch durchgeführten Kontrollmessungen oder die Abnahmemessungen zur Überprüfung, ob die LRV Grenzwerte eingehalten werden, werden nach festgelegten Standards von zahlreichen Firmen durchgeführt. Diese Messungen beurteilen jedoch nur den Regelbetrieb von 3x 15 min und von jedem einzelnen Kessel. Das bedeutet, dass mit diesen Messungen das Emissionsverhalten verschiedener Betriebsphasen bzw. das Emissionsverhalten von Kaskadenanlagen über einen längeren Zeitraum nicht beurteilt werden kann.

Langzeitmessungen (LZM) und die Auswertung nach QSH könnten das CO-Emissionsverhalten von Kaskadenanlagen beurteilen. Staubmessungen werden im Zuge einer LZM jedoch nicht durchgeführt und kontinuierliche Staubmessungen über längere Zeiträume sind generell nur sehr schwer möglich. Für die Durchführung von LZM an Kaskadenanlagen stellen sich zudem folgende Fragen:

- Sollen LZM in Zukunft standardmässig bei jeder Anlage einmal durchgeführt werden?
    - Wenn ja, wer soll die Messungen durchführen? Im Moment gibt es nur eine sehr kleine Anzahl an Firmen/Institutionen, die solche Messungen durchführen.
- Aus welchem Gründen werden LZM angeordnet? Bei Überschreitung einer gewissen Anzahl Starts? Bei zu geringem Speichervolumen? Nur bei Nachbarschaftsklagen?
- Ein LZM ist mit Kosten verbunden. Wer soll diese übernehmen? Die Betreiber? Soll dies subventioniert werden?
- Sollen die Emissionen der einzelnen Kessel beurteilt werden oder die Emissionen der Gesamtanlage?
    - Bei der Beurteilung der Emissionen der einzelnen Kessel können die An- und Abfahrphasen mit der QSH Methode beurteilt werden.
    - Bei der Beurteilung der Emissionen der Gesamtanlage gibt es einige Einschränkungen, die nachfolgende beschrieben werden.

Die Beurteilung der Emissionen der Gesamtanlage, also das «gemischte Abgas» von allen Feuerungen, ist aus folgenden Gründen schwierig:

- Die kontinuierliche Messung des Abgasvolumenstroms ist schwierig.
- Bei mehr als 2 Kesseln braucht es viele Messgeräte und die Anzahl Institutionen, die solche Messungen dann durchführen könnten, wäre sehr eingeschränkt.
- Eine kontinuierlich Staubmessung ist nicht möglich.
- Die Auswertung ist komplex und das Know-How dafür ist ebenfalls auf sehr wenige Institutionen bzw. Personen in der Schweiz beschränkt.
- Zuordnung und Beurteilung verschiedener Betriebsphasen ist nicht möglich.

Die Gesamtemissionen stellen ausserdem ein gemischtes Signal dar, und die verschiedenen Phasen der unterschiedlichen Kessel sind überlagert und können nicht mehr unterschieden werden. Dadurch kann keine Beurteilung nach QSH durchgeführt werden, also beurteilt werden, ob es zu Geruchsbelastung der Gesamtanlage kommt oder nicht. Die Geruchsbelastung kommt von den VOC Emissionen, die hauptsächlich in der Anfahrphase hoch sind und in dieser Phase auch gut mit CO korrelieren. In der Ausbrandphase hingegen sind die VOC Emissionen tief, die CO Emissionen hingegen hoch. Diese Unterscheidung ist mit der Beurteilung der Gesamtemissionen nicht mehr möglich.

Wenn die Gesamtemissionen beurteilt würden, besteht zudem, die Möglichkeit, dass dann Kessellaufzeiten synchronisiert werden, um das ungünstige Überlagern von Betriebszuständen zu verhindern, nur um das QSH Kriterium von 80% der Zeit < EGW einhalten zu können. Dies könnte dann dazu führen, dass die einzelnen Feuerungen bei Mehrkesselanlagen vermehrt gleichzeitig starten und dann nur kurz laufen.

Ausserdem muss diskutiert werden, ob für die Beurteilung der Gesamtemissionen dieselben Regeln und/oder Emissionsgrenzwerte herangezogen werden können bzw. sollen. Für die Beurteilung von automatisch mit Brennstoff beschickten Holzbacköfen zwischen 70 kW-500 kW gelten zum Beispiel höhere Grenzwerte als für konventionelle automatische Holzfeuerungen mit derselben Leistung. Auch bei grossen gewerblich genutzten Holzbacköfen kommt es oftmals zu einer Überlagerung von verschiedenen Betriebsphasen [4].

3.4 Beurteilungskriterium Betriebsoptimierung

Zur Optimierung des Betriebs bestehender Anlagen können die Regelparameter nach Analyse des spezifischen Betriebsverhaltens geeignet angepasst werden. Im Projekt HoKaSpe [3] konnte an einer Praxisanlage gezeigt werden, dass durch systematische Analyse des Betriebsverhaltens und nachfolgendem Umsetzen verschiedener Optimierungsmassnahmen die Anzahl Anfahrvorgänge um über 40 % reduziert werden konnten. Eine Begrenzung der zulässigen Anzahl Starts kann daher im Bedarfsfall eine Betriebsoptimierung initiieren, was den Anlagenbetrieb insgesamt verbessert. Das kann zu geringeren Wartungs-, Betriebs- und Brennstoffkosten sowie tieferen Emissionen führen.

Dementsprechend kann durch Betriebsoptimierungen erreicht werden, dass die Anzahl der An- und Abfahrvorgänge so gering wie möglich ist.

Nachfolgend sind Beispiele möglicher Optimierungsmassnahmen aufgelistet (siehe auch [3]):

- Veränderung des Regelungskonzepts der Zu- und Abschaltbedingungen
- Aufhebung von Beschränkungen der Leistungsmodulation
- Vermeidung von durch die periodische Entaschung entstehenden Lücken in der Wärmeproduktion
- Vermindern von Lastsprüngen, zum Beispiel als Folge gleichzeitiger Boilerladungen

Wie aber im Projekt HoKaSpe gezeigt wurde, sind je nach Regelkonzept und/oder Hersteller die Einflussmöglichkeiten dabei allerdings begrenzt oder erfordern eine Unterscheidung zwischen Sommer- und Winterbetrieb.

Eine weitere Einschränkung für Betriebsoptimierungen ist die Datenverfügbarkeit. Teilweise werden die Daten aus den Kesselsteuerungen nicht oder zumindest nicht automatisch aufgezeichnet. Ausserdem sind teilweise nicht alle notwendigen Parameter verfügbar.

Betriebsoptimierungen können ausserdem erst nach einer gewissen Betriebszeit durchgeführt werden. Das heisst ein möglicher positiver Effekt auf den Anlagenbetrieb mit einer Reduktion von An- und Abfahrvorgängen ist in der Regel frühestens nach 1 Jahr sichtbar.

Weitere Einschränkungen und Fragen bezüglich der Umsetzung bzw. Kontrolle und Anordnung von Betriebsoptimierungen sind:

- Wann sollen Betriebsoptimierungen angeordnet werden?
    - Bei Überschreitung einer gewissen Anzahl An- und Abfahrvorgänge?
    - Ab einer gewissen Anzahl Kessel?
    - Sollen Betriebsoptimierungen bei Kaskadenanlagen immer durchgeführt werden?
- Wie soll der Nachweis einer Betriebsoptimierung aussehen?
    - Es gibt kein Standardvorgehen für Betriebsoptimierungen.
    - Können überhaupt Vorgaben an das Ergebnis einer Betriebsoptimierung gemacht werden?
        - Nicht bei jeder Anlage bzw. jedem Regelkonzept gibt es Möglichkeiten zur Betriebsoptimierung bzw. ist der Effekt von Parameteränderungen gering.
    - Wären bestehende Instrumente/Vorgehensweisen, wie zum Beispiel QMmini Phase 2 oder Meilenstein 5 von QM Standard, ausreichend?
- Wer ist für die Betriebsoptimierung verantwortlich?
    - Der Kessellieferant/Hersteller, der Betreiber, der Planer?
- Soll eine Betriebsoptimierung nur den Betrieb des Holzheizkessel betreffen oder die Gesamtanlage inklusive Wärmeverteilung.
    - Zum Beispiel eine zu hohe Rücklauftemperatur, welche die Kapazität des Wärmspeichers aufgrund eines tiefen ΔT über den Speicher reduziert, kann nicht durch Änderungen von Parametern in der Kesselsteuerung optimiert werden.

3.5 Übersicht und Bewertung der verschiedenen Beurteilungskriterien

In diesem Kapitel werden die Beurteilungskriterien aus Sicht von Verenum AG bezüglich der Umsetzbarkeit und der Auswirkung der Emissionen bewertet. Um die Diskussion über die Beurteilungskriterien und die Einschätzungen bzw. Bewertungen aller Beteiligten transparent zu ermöglichen, können in den nachfolgenden Kapiteln Stellungnahmen zu den Beurteilungskriterien abgegeben werden.

++ sehr einfach umsetzbar / starke Reduktion der Emissionen, + einfach umsetzbar / Reduktion der Emissionen

Kriterium	Bewertung der Umsetzbarkeit	Auswirkung auf Emissionen	Vorteile/Begründung	Nachteile/Einschränkungen
Festlegung Anzahl Starts pro Kessel	++	+	• Durch eine Vorschrift zur maximal erlaubten Anzahl Starts pro Kessel kann sichergestellt werden, dass im Bedarfsfall eine Betriebsoptimierung umgesetzt wird. • Einfach umsetzt- und kontrollierbar.	• Genaue Anzahl Starts muss festgelegt & kontrolliert werden • Zählung aller Aus-/Einschaltungen, auch jene wegen einer periodischen Entaschung, muss gewährleistet sein. • Datengrundlage zur Festlegung der Anzahl Starts ist noch gering und daher mit Unsicherheiten verbunden
Vorschriften zur Brennstoffqualität	+	++	• Eine gute Brennstoffqualität wirkt sich positiv auf den Anlagenbetrieb aus und reduziert die Emissionen während aller Betriebsphasen. • Könnten vom Vollzug und den Kesselherstellern relativ einfach festgeschrieben werden. o Aus diesem Grund wird die Umsetzbarkeit mit «+ (einfach)» bewertet	• Preis und Verfügbarkeit von «Qualitätshackschnitzel» o Im Moment ist die Verfügbarkeit von grossen Mengen «Qualitätshackschnitzel» nicht gegeben. • Strenge Vorgaben können Serien-Geräte, die mit Holzhackschnitzel betrieben werden, aus ökonomischen Gründen verhindern. • Ist Garantie vom Betreiber, dass nur Brennstoff mit guter Qualität eingesetzt wird, ausreichend? • Wie sollen Vorgaben kontrolliert werden? o Wie, wer und wann (Zeitintervall) wird kontrolliert • Braucht es Rückstellproben? Wie viele? Wer nimmt diese und wo müssen sie genommen und gelagert werden?
Betriebsoptimierung	+	+	• Kann die Anzahl Starts reduzieren und den Anlagenbetrieb generell verbessern. • Anlagenbetrieb/Einstellungen können auf den jeweiligen Brennstoff optimiert werden • Know-How ist vorhanden o Hersteller, QM Holzheizwerke, QSH • Müsste automatisch durch Betreiber ausgelöst werden, wenn erlaubte Anzahl Starts überschritten wird. ➔ Geringere Emissionen ➔ Geringere Wartungs-, Betriebs- & Brennstoffkosten	• Ist mit personellem Aufwand und Mehrkosten verbunden • Teilweise sind nicht alle notwendigen Parameter verfügbar oder die Datenaufzeichnung nicht vorhanden. • Effekt ist erst nach längerer Zeit sichtbar (in der Regel frühestens nach 1 Jahr) • Wie soll der Nachweis für die Durchführung erbracht werden? Ist QMmini Phase 2 oder QMstandard Meilenstein 5 ausreichend?

+ einfach umsetzbar / Reduktion der Emissionen, - schwierig umsetzbar, (+) Reduktion möglich aber nicht gesichert, (-) Erhöhung der Emissionen zu erwarten, Emissionen bleiben aber < EGW

Kriterium	Bewertung der Umsetzbarkeit	Auswirkung auf Emissionen	Vorteile/Begründung	Nachteile/Einschränkungen
Festlegung Anzahl Starts pro Anlage	+	+	Es sind keine zusätzlichen Vorteile zum Kriterium «Anzahl Starts pro Kessel» vorhanden.	• Es gelten dieselben Einschränkungen, wie für das Kriterium «Anzahl Starts pro Kessel». Soll die Anzahl Starts pro Anlage auch abhängig von Anzahl Kesseln einer Kaskade sein?
Aufhebung Kriterium Anzahl Starts	+	(-)	• Messungen zeigen, dass die QSH Vorgaben (80% der Zeit < EGW) erfüllt werden für die o Emissionen der Gesamtanlage mit einer hohen Anzahl Starts (6 & 7 Starts pro Tag und Anlage). o Beurteilung der Einzelkessel, auch mit fiktiven Erhöhung Anzahl Starts auf 4-6 pro Tag und Kessel. • Gesamt-Emissionsfracht wird grösser, die über die gesamte Periode gemittelten Konzentrationen der einzelnen Kessel bleiben jedoch < EGW. o Weniger Aufwand für den Vollzug/Kontrolle	• Motivation/Notwendigkeit von Betreibern eine Betriebsoptimierung durchzuführen fällt weg. • Anzahl Starts werden nicht auf ein mögliches Minimum reduziert. • Gesamt-Emissionsfracht eines Kessels wird grösser o Bei einer Erhöhung der Anzahl Starts von 2-4 auf 4-6 um bis zu einem Faktor 2.
Beurteilung Emissionen der einzelnen Kessel	-	+	• Beurteilung der An- und Abfahrphasen ist mit LZM möglich. Damit kann abgeschätzt werden, ob es potenziell zu Geruchsbeeinträchtigungen der Nachbarschaft kommt. • Durch LZM werden oftmals auch mögliche Massnahmen zur Betriebsoptimierung erkannt.	• LRV Messungen nicht ausreichend • LZM sind aufwändig und es gibt im Moment nur wenige Institutionen, die sie durchführen können • Effekt auf Emissionen abhängig, ob nachfolgend Verbesserungen vorgenommen werden. • Schwierig umsetzbar für eine grosse Anzahl Anlagen
Beurteilung Emissionen der Gesamtanlage	-	(+)	• Es sind keine Vorteile vorhanden.	• Es gelten dieselben Einschränkungen, wie für das Kriterium «Beurteilung Emissionen der einzelnen Kessel». • Die Beurteilungsmethode von QSH zur Abschätzung von potenziellen Geruchs- und Russemissionen ist nicht anwendbar.

3.6 Stellungnahme zu den Beurteilungskriterien

Da das finale Beurteilungskriterium auch eine konkrete maximal zulässige jährliche Anzahl Starts enthält, die in Projekt Teil 2 definiert wird, und die Stellungnahmen der Projektteilnehmer zum Teil auch konkrete Vorschläge zur maximalen jährlichen Anzahl Starts enthalten, ist eine Zusammenfassung der Stellungnahmen zu den Beurteilungskriterien in Kapitel 3.5 im Schlussbericht von Teil 2 zu finden.

4 Definitionen

4.1 Abkürzungsverzeichnis

AGV	Abgasventilator
CO	Kohlenmonoxid in mg/m^3
CO_n	CO in mg/m^3 normiert auf Bezugssauerstoff-Gehalt
CO_n nicht beurteilt	CO_n für jene Phasen (z.B. An- & Abfahren), die nach LRV nicht beurteilt werden
EA	Elektroabscheider
EGW	Emissionsgrenzwert
FWL	Feuerungswärmeleistung
LRV	Schweizer Luftreinhalteverordnung
LZM	Langzeitmessungen
NWL	Nennwärmeleistung
NO_x	Stickoxide (NO und NO_2)
P_{EA}	Leistung des Elektroabscheiders in W oder kW
PM_{grav}	Gesamtstaub, gemessen gravimetrisch im heissen Abgas nach LRV
Q_F	prozentuale Feuerungswärmeleistung
Q_{soll}	Leistungsvorgabe in % in der Kesselsteuerung
QMH	QM Holzheizwerke
QSH	QS Support Holzfeuerungen
V_{AG}	Betriebsabgasvolumenstrom
$V_{AG,n}$	Abgasvolumenstrom bei Normbedingungen
W	Wassergehalt

4.2 Bestimmung der verschiedenen Betriebszustände

Zustand	Beginn	Ende
Feuerungsbetrieb	• O_2 ≤ 18 Vol.-% UND • $\dot{V}$ > $\dot{V}$min (z.B. AGV Ein)	• O_2 > 19 Vol.-% ODER • $\dot{V}$ < $\dot{V}$min (z.B. AGV Aus)
Regelbetrieb	Wärmeerzeugung ohne An- und Abfahren oder Reinigungszyklen. Ist eine Untermenge des Feuerungsbetriebs	
Betrieb Elektroabscheider	P_{EA} > P_{EA}, min (z.B. 20% von P_{EA}, nenn)	P_{EA} < P_{EA}, min
Anfahren	• Phase mit CO > EGW nach Beginn Feuerungsbetrieb (also ab O2 < 18%) ODER • ab Beginn des Feuerungsbetriebs wenn CO > EGW ohne Unterbruch seit Beginn des Abfahrens	• bis CO < EGW ODER • bis spätestens das Abfahren startet
	Das Anfahren zählt ab O_2 < 18 Vol.-% und $\dot{V}$ > $\dot{V}_{min}$ (z.B. AGV Aus) zum Feuerungsbetrieb.	
Abfahren	• Wenn CO > EGW wird während des Feuerungsbetriebs (O_2 < 19%) ODER • ab Ende des Feuerungsbetriebs, falls CO > EGW ist ohne Unterbruch seit Beginn des Anfahrens	• bis Ende Signal Kesselsteuerung Ausbrand + Zeit X ○ X = 20min am Standort A und 10min am Standort B ○ entspricht grösstenteils ca. dem Zeitpunkt an dem CO < EGW wird ODER • spätestens wenn das nächste Anfahren startet
	Das Abfahren zählt bis O_2 > 19 Vol.-% ODER $\dot{V}$ < $\dot{V}_{min}$ (z.B. AGV Aus) zum Feuerungsbetrieb. Die Abfahrphasen gehen aber in der Regel über das Ende des Feuerungsbetriebs hinaus.	
Aus/Standby	Ab Ende Ausbrand	Bis zum nächsten Anfahren
Total	Beinhaltet alle Werte der gesamten Messperiode. Also die Werte des Feuerungsbetriebs, aber auch die Werte der Betriebsphase Abfahren, die nicht zum Feuerungsbetrieb gezählt werden (wo O_2 > 19 Vol.-%) und die Werte während der Kessel im Standby ist.	

5 Untersuchte Anlagen

In diesem Projekt wurden zwei Anlagen von zwei unterschiedlichen Herstellern mit zwei unterschiedlichen Brennstoffen untersucht. Die Anlage am Standort B ist eine 4-Kessel-Kaskadenanlage, die mit Holzhackschnitzeln befeuert wird. Die Anlage am Standort A ist eine 2-Kessel-Anlage mit dem Brennstoff Pellets.

5.1 Standort A

Die Anlage am Standort A ist keine Kaskadenanlage, da dort nur zwei Pellet-Kessel installiert sind, die zudem unterschiedliche Leistungen haben (kleiner Kessel ca. 1/3 und grössere Kessel ca. 2/3 der gesamten installierten Leistung).

Die Anlage am Standort A versorgt einen kleinen Wärmeverbund von 16 Gebäuden ganzjährig mit Wärme für Raumheizung und Warmwasser. Die beiden Pelletkessel wurden in die bestehende Heizzentrale eingebaut und für die Brennstoffsilos und Wärmespeicher gab es bauliche Veränderungen im Untergeschoss (Bild 2). Es sind 2 Kesseln mit einer Gesamt-Nennwärmeleistung von 360 kW (140 kW Kessel 1 und 220 kW Kessel 2) installiert. Jeder Kessel ist mit einem integrierten Elektroabscheider (EA) ausgerüstet. Es sind zwei separate Brennstoffsilos vorhanden, aus denen Pellets für je einen Kessel pneumatisch gefördert werden.

Die Anlage beinhaltet somit folgende Komponenten:

- Holzkessel:
  - Kessel 1 140 kW
  - Kessel 2 220 kW
  - Installierte Leistung 360 kW
- Feinstaubabscheider in beiden Kesseln integriert
- Technischer Wärmespeicher 9.8 m^3 (4 Speicher à 2.45 m^3, in Serie angeordnet)
- 2 separate Brennstoffsilos mit à 40 m^3 und 42 m^3



Bild 1: Heizzentrale der Anlage am Standort A (oben) mit dem Zugang zu den Wärmespeichern und dem Brennstoffsilo (unten).

5.2 Standort B

Die Anlage in am Standort B entspricht einer Kaskaden-Anlage mit mehr als 2 Kesseln. In diesem Kapitel wird die Anlage kurz beschrieben. Eine detaillierte Beschreibung der Anlage ist in [3] zu finden.



Bild 2: Heizzentrale der Anlage am Standort B (links) mit den ans Gebäude angrenzenden Brennstoffsilos (rechts).

Die Anlage am Standort B versorgt Teile eines Dorfes ganzjährig mit Wärme für Raumheizung und Warmwasser. Die Heizzentrale wurde 2017 gebaut und in das bestehende Gebäude einer ehemaligen Käserei integriert und angrenzend ans Gebäude wurden drei separate Brennstoffsilos erstellt (Bild 1). Aktuell sind 4 Kesseln mit einer Nennwärmeleistung von 330 kW, also insgesamt 1‘320 kW, installiert. Jeder Kessel ist mit einem separat aufgestellten Elektroabscheider (EA) von zwei verschiedenen Herstellern (Typ 1, Filterhersteller 1, Typ 2, Filterhersteller 2) ausgerüstet, die mit Heizungswasser aus dem Hauptvorlauf beheizt werden. Für einen eventuellen Ausbau des Wärmeverbundes besteht Platz in der Heizzentrale für einen fünften Kessel. Es sind drei separate Brennstoffsilos vorhanden, die mit Holzhackschnitzeln von drei unterschiedlichen lokalen Brennstofflieferanten befüllt werden. Die Austragung aus den drei Silos erfolgt über Federkern-Rundaustragungen.

Die Anlage beinhaltet somit folgende Komponenten:

- Holzkessel:
  - Kessel KA 330 kW
  - Kessel KB 330 kW
  - Kessel KC 330 kW
  - Kessel KD noch nicht installiert
  - Kessel KE 330 kW
  - Installierte Leistung 1’320 kW
- Feinstaubabscheider:
  - Kessel KA – Abscheider Typ 1
  - Kessel KB – Abscheider Typ 2
  - Kessel KC – Abscheider Typ 1
  - Kessel KE – Abscheider Typ 2
- Technischer Wärmespeicher 22.4 m^3 (4 Speicher à 5.6 m^3, in Serie angeordnet)
- 3 separate Brennstoffsilos mit je 100 m^3 Volumen
  - Silo 1 speist Kessel KA und KB
  - Silo 2 speist Kessel KC
  - Silo 3 speist Kessel KE

6 Durchführung der Messungen

6.1 Allgemein

- Emissionsmessung Gasphase
  - An allen Kesseln gleichzeitig
  - Kontinuierlich über den gesamten Messzeitraum
  - Schadstoffe CO, NO_x
  - Parameter Verbrennungsqualität
    - O_2 bzw. CO_2
    - Abgastemperatur T_{AG}
  - Messgeräte
    - Siemens Ultramat
      - Messprinzip: NDIR
    - Vereinfachte Geräte entwickelt an der HSLU (siehe Anhang 11.2)
      - Messprinzip: elektrochemisch und NDIR
  - Kontinuierliche Messung über gesamten Messzeitraum
- Staubmessungen
  - Diskontinuierliche für verschiedene Betriebsphasen (mind. 1 Wiederholungsmessung pro Phase)
  - Gleichzeitig vor und nach dem Elektroabscheider (EA) bzw. mit EA ein und EA aus
  - Gravimetrisch nach BAFU Messempfehlung [1] (Gesamtstaub)
  - Punktuell mit Testo 380 vor dem Elektroabscheider (ca. $PM_{2.5}$)
- Sonstige Parameter
  - Abgasvolumenstrom mittels Prantl Rohr (siehe Anhang 11.3)
    - Kontinuierlich
    - Über grosse Teile der gesamten Messperiode
  - Signal Abgasventilator
  - Signal Elektroabscheider
  - Signale aus der Kesselsteuerung

6.2 Staubmessung

Bei beiden Anlagen wurden gravimetrische Staubmessungen nach BAFU Messempfehlung durchgeführt. Die verwendeten Messgeräte sind im Anhang 11.4 abgebildet und beschrieben. Da mit dieser Methode keine kontinuierlichen Messungen möglich sind, wurden diese Messungen diskontinuierliche für verschiedene Betriebsphasen mit mindestens 1 Wiederholungsmessung pro Phase durchgeführt. Um die verschiedenen Betriebsphasen herbeizuführen, musste manuell in die Kesselsteuerungen eingegriffen werden. Diese Eingriffe können jedoch das Kaskaden- und Emissionsverhalten der Gesamtanlage beeinflussen. Folgende Betriebszustände wurden untersucht:

- Kaltstart (Kessel-Stillstand ca. 24h)
- Warmstart (Kessel-Stillstand ca. 1h)
- Regelbetrieb
- Abfahren
- Kleine Entaschung (nur am Standort B)

Das Ab- und Anfahren wegen eines Entaschungsvorganges wurde nicht separat untersucht, da sich laut Herstellerangaben diese in Bezug auf Einstellungen der Regelparameter (Gebläse-Drehzahl, Brennstoffzufuhr, etc.) nicht von «konventionellen» Abfahrvorgängen mit kurz darauffolgendem Warmstart unterscheiden. Bei den Kesseln der Anlage am Standort B gibt es periodisch (ca. alle 90min) auch eine «kleine» Entaschung, in der nur ein Teil des Verbrennungsrosts gereinigt wird. Diese «kleine» Entaschung gibt es bei den Kesseln der Anlage am Standort A nicht.

Die Absauggeschwindigkeit und der Düsendurchmesser für die isokinetische Probenahme wurde am Tag des Messaufbaus bestimmt. Dazu wurde bei Regelbetrieb der Abgasvolumenstrom gemessen und

anhand dieser Messung die Absauggeschwindigkeit und der Düsendurchmesser bestimmt. Für die anderen Betriebsphasen wurde der Abgasvolumenstrom ausgehend von der Messung abgeschätzt. Mit demselben Düsendurchmesser, wie für den Regelbetrieb, ergab sich dann die Absauggeschwindigkeit. Für alle Betriebsphasen wurde eine jeweils konstante Absauggeschwindigkeit gewählt. Diese ergibt für Phasen mit sich über die Zeit veränderndem Abgasvolumenstrom (z.B. An- und Abfahrphasen) mögliche geringe Abweichungen von isokinetischen Bedingungen.

Nachfolgend wird das genaue Vorgehen der Staubmessungen für die verschiedenen Betriebsphasen beschrieben.

- Die Messungen wurden gestartet, wenn
    - Betriebszustand «Stationär»:
        - beliebiger Zeitpunkt wenn O_2 und CO Werte stabil sind
    - Betriebsphase «Warmstart», «Kalt-Start» und «Ausbrand»:
        - Wenn die CO-Werte und/oder die Staub Werte am Testo (welches ebenfalls für viele Messungen installiert war) zu steigen beginnen (siehe einige exemplarische Zeitverläufe im Anhang 11.7)
- Die Messungen wurden gestoppt, wenn
    - Betriebsphase «Stationär»:
        - nach ca. 15min
    - Betriebsphase «Ausbrand»:
        - Wenn Die O_2-Werte ca. 20% erreicht haben
    - Betriebsphase «Kalt-Start» und «Warmstart»:
        - Ungefähr bis die CO Werte unter den Grenzwert gesunken sind.
        - Wenn dies in weniger als 10min erreicht war, wurde die Messung trotzdem auf 10min verlängert
- Für die «Warm-Start» Messungen wurde ein Warm-Start nach ca. 1h Stillstand des Kessels manuell ausgelöst.
- Für die «Kalt-Start» Messungen wurde ein Kalt-Start nach ca. 24h Stillstand des Kessels manuell ausgelöst.

6.3 Standort B

- Vom 07.03.2022 bis 24.03.2022 (17 Tage)
- Messgeräte
    - Kessel B: Siemens Ultramat
    - Kessel A, C und E: vereinfachte Geräte HSLU
- Staubmessungen
    - An 2 der 4 Kessel
        - Kessel A mit EA von Typ 1
        - Kessel E mit EA von Typ 2
    - Gleichzeitig je 1 Filter vor und nach dem EA
    - Mindestens 1 Wiederholungsmessung pro Betriebsphase
    - Kaltstart Messung Kessel A:
        - Die Messung wurde auf 2 aufeinanderfolgende Filter verteilt
            - Filter 1: Messung, bis die EA einschaltet (also bei EA = AUS)
            - Filter 2: Messung mit EA = EIN für 10min
    - Für alle anderen Betriebsphasen bei Kessel A und E wurde je 1 Filter verwendet
    - Kaltstart Messung Kessel E
        - Bei EA (Typ 2) von Kessel E gab es keinen Bypass-Betrieb und die Hochspannung war immer EIN auch bei tiefer Abgastemperatur.
    - Insgesamt wurden 74 Planfilter generiert (32 Messungen jeweils vor- und nach dem EA)
- Am Standort B wurden an fünf Tagen, über die gesamte Messperiode verteilt, Brennstoffproben bei jedem Kessel genommen. Für alle Brennstoffproben wurde die Stückigkeit und der Wassergehalt bestimmt.

6.4 Messung am Standort A

- Vom 04.04.2022 bis 22.04.2022 (18 Tage)
- Bezeichnungen der Kessel:
    - Kessel 1 (K1) = 140 kW Kessel
    - Kessel 2 (K2) = 220 kW Kessel
- Messgeräte
    - Kessel 1: vereinfachtes Gerät HSLU
    - Kessel 2: Siemens Ultramat
- Zusätzlich wurde auch der Unterdruck am Kaminrohr von Kessel 1 gemessen
    - Kontinuierlich über längere Phasen
- Aufgrund der Kesselbauweise und des integrierten EA konnten die Signale des Abgasventilators und des EA nicht separat gemessen werden. Die Signale sind jedoch in der Kesselsteuerung vorhanden und konnten für die Auswertung verwendet werden.
- Staubmessungen
    - Für alle Betriebsphasen jeweils bei ein- und ausgeschaltetem Elektroabscheider
    - Mindestens 1 Wiederholungsmessung pro Betriebsphase
    - Da die Messungen mit ein- und ausgeschaltetem EA und jeweils mindestens 1 Wiederholungsmessungen durchgeführt wurden, hätte dies sehr viele Anreisen zur Anlage bedeutet. Darum wurde bei einigen Messungen das Kühlprogramm der Kessel-Steuerung. Mit diesem Programm wird die Brennkammer aktiv mit Umgebungsluft gekühlt. Das Kühlprogramm war dabei zw. 6 h und 20 h aktiviert. Bei der kürzesten Kühlprogramm-Dauer von 6 h war die Brennkammer und die Abgastemperatur auf ca. 55°C abgekühlt.
    - Insgesamt wurden 41 Planfilter generiert.

Zur Durchführung der Staubmessungen für verschiedene Betriebszustände musste manuell in die Kesselsteuerung eingegriffen werden, um den gewünschten Zustand auszulösen. Da die Staubmessungen von den untersuchten Betriebszuständen jeweils mit ein- und ausgeschaltetem EA durchgeführt wurden und mindestens 2 Wiederholungsmessungen pro Betriebszustand durchgeführt wurden, fanden die Staubmessungen an insgesamt 8 Tagen statt. Somit wurde an 8 von 18 Tagen der Messperiode in die Kesselsteuerungen eingegriffen. Diese Eingriffe beeinflussen das Kaskaden- und Emissionsverhalten der Gesamtanlage.

7 Vorgehen Auswertung

Langzeitmessungen (LZM)

Die Daten der LZM wurden mit der QSH Methode beurteilt (siehe Beschreibung im Anhang Kapitel 11.1). Diese Methode beurteilt für jeden Kessel separat für die CO-Emissionen die Dauer von Grenzwertüberschreitungen während des Feuerungsbetriebs, sowie die Qualität der An- und Abfahrvorgänge. Für dieses Projekt wurde die QSH Methode zudem angepasst, um Unterschiede verschiedener Anfahrvorgängen (Warm- und Kaltstarts, Start nach einer Entaschung) und Abfahrvorgänge («normaler» Abfahrvorgang, Abfahrvorgang aufgrund einer Entaschung) zu untersuchen.

Gravimetrische Staubmessungen

Die Ergebnisse der punktuellen Staubmessungen der verschiedenen Betriebsphasen (siehe Anhang 11.4.2) wurden mit Annahmen hochgerechnet auf die gesamte Messperiode. Es wurde ein fiktiver zeitlicher Verlauf der Staubemissionen (PM_{grav}) für jeden Kessel berechnet. Dazu wurden die Mittelwerte der Staubmessung der jeweiligen Betriebsphase für alle selben Betriebsphasen der kontinuierlichen Daten verwendet. Z.B. für alle Datenpunkte der kontinuierlichen Messung, die mit Ausbrand gekennzeichnet sind, wurde der Mittelwert der Staubmessungen des jeweiligen Kessels für Ausbrand eingesetzt.
Folgende weitere Annahmen wurden getroffen:

- PM_{grav} Warmstart 0-6 h wird gleichgesetzt mit PM_{grav} Warmstart nach 1 h Stillstand.
- Kaltstart wird auf Start nach einer Stillstandszeit >12 h festgelegt und der Wert für PM_{grav} Kalt-Start nach 24 h Stillstand zugewiesen.
- PM_{grav} Anfahren nach Stillstand 6-12 h entspricht dem Mittelwert aus PM_{grav} Warmstart 0-1 h und PM_{grav} Kaltstart
- PM_{grav} für Standby (Aus) wird mit 0 mg/m^3 angenommen.

Emissionen der Gesamtanlage

Die Berechnung der CO- und Staubemissionen der Gesamtanlage wurden über die Fracht wie folgt berechnet (Beispielhaft gezeigt mit CO):

1) Berechnung der Fracht pro Zeiteinheit und Kessel
    a. $CO\text{-}Fracht_{Kessel\ X}$ [mg/h] = $CO_{Kessel\ X}$ [mg/m^3] * $V_{AG,\ Kessel\ X}$ [m^3/h]
2) Berechnung des mit V_{AG} gewichteten Lambda Werts pro Zeiteinheit
    a. $Lambda\text{-}Fracht_{Kessel\ X}$ = $Lambda_{Kessel\ X}$ [-] * $V_{AG,\ Kessel\ X}$ [m^3/h]
3) Berechnung der gesamten Emissionen aller Kessel für jeden Zeitpunkt
    a. $$CO_{Gesamtanlage}\ \left[\frac{mg}{m3}\right] = \frac{\sum_X CO_Fracht_{Kessel\ X}\ [\frac{mg}{h}]}{\sum_X VAG_{Kessel\ X}\ [\frac{m3}{h}]}$$
4) Normieren der Emissionen der Gesamtanlage für jeden Zeitpunkt
    a. $$CO_{Gesamtanlage,norm}\ \left[\frac{mg}{m3}\right]\ bei\ 13\%\ O_2 = CO_{Gesamtanlage} * \frac{\sum_X Lambda_{Fracht_{Kessel\ X}}}{\sum_X VAG_{Kessel\ X}} * \frac{1}{Lambda_{ref}}$$

8 Messbericht – Anlage Standort A

8.1 Messaufbau

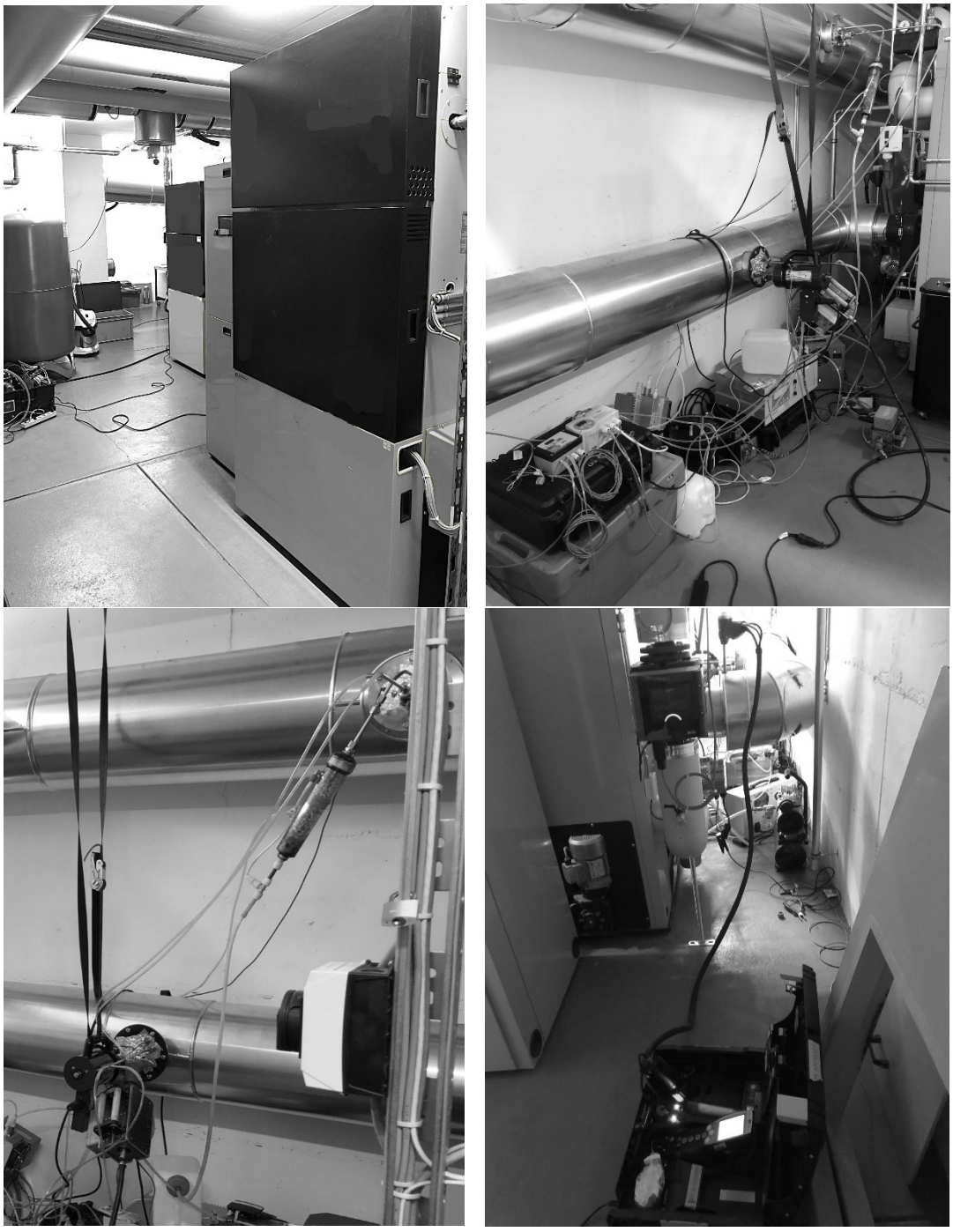


Bild 3: Fotos vom Messaufbau. Foto links oben: Ausschnitt aus dem Heizraum, auf den die beiden Kessel zu erkennen sind. Foto rechts oben: Messstellen an den 2 Kaminen der Kessel 1 und 2. Foto links unten: Detailansicht der Messstellen. Am Empa-Flansch im unteren Kaminrohr ist der blaue beheizte Filter für das Gasmessgerät Siemens Ultramat und der beheizte Filterhalter für die gravimetrische Staubmessung zu sehen. Am Empa-Flansch oben ist der Wasservorabscheider für das vereinfachte Gas-Messgerät zu erkennen. Foto rechts unten: Messstelle für das Testo 380 an einer Muffe direkt nach dem Kessel.

8.2 Auswertung CO-Emissionsmessung

8.2.1 QSH Auswertung - Kessel 1 (140 kW)

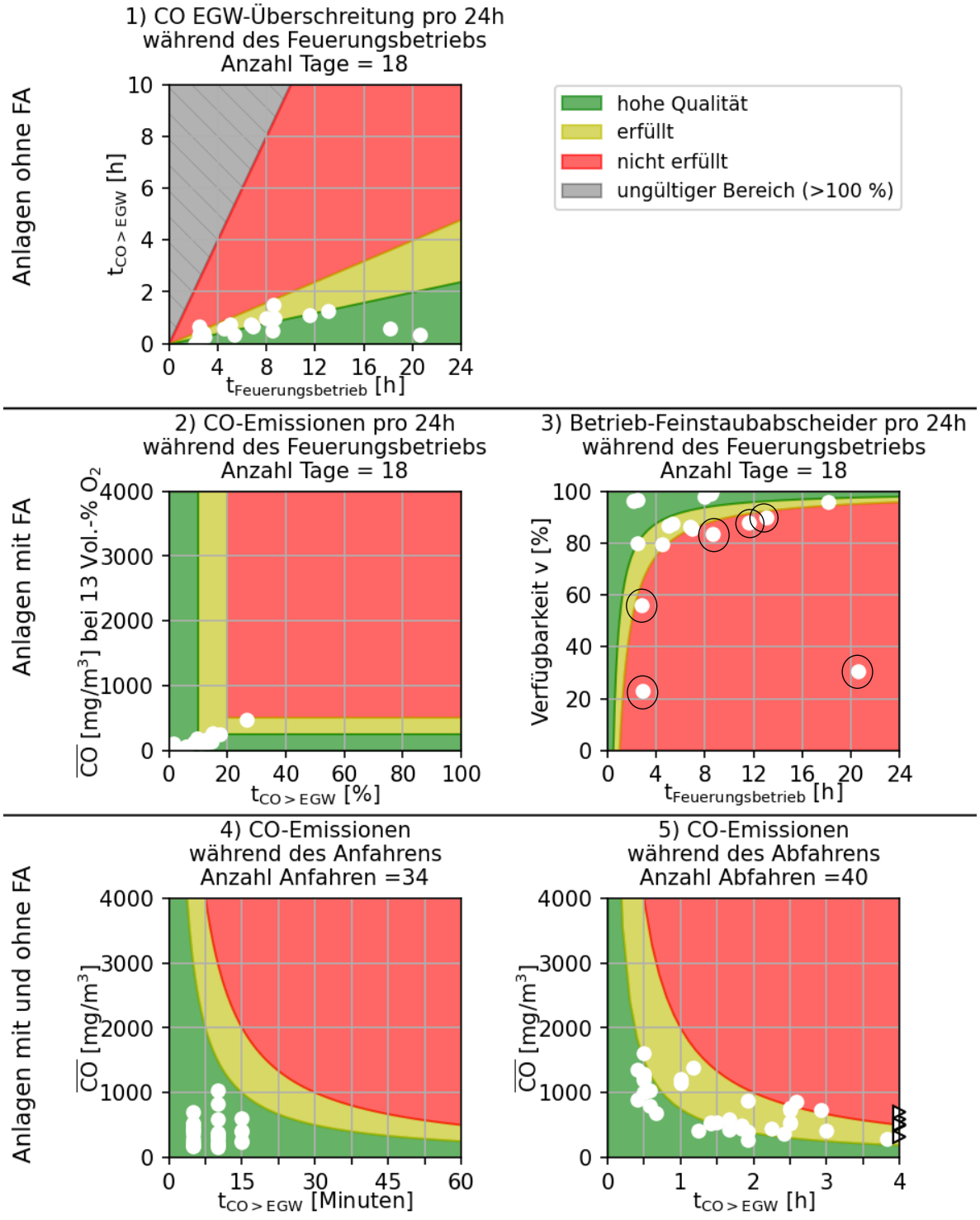


Bild 4: QSH Auswertung für Kessel 1 für die gesamte Messperiode. Grafiken ganz unten beinhalten neben den «regulären» Ab- und Anfahrphasen auch jene, die aufgrund einer Entaschung durchgeführt wurden. Die Tage mit tiefen EA-Verfügbarkeiten, die mit einem schwarzen Kreis in Grafik 3 markiert sind, sind Tage, an denen Staubmessungen auf der Anlage durchgeführt und in die Kesselsteuerung eingegriffen wurde und teilweise der EA für längere Zeit manuell deaktiviert wurde. Die QSH-Auswertung für die Tage der Messperiode, an denen keine Staubmessungen bzw. Eingriffe in die Kesselsteuerung gemacht wurde, sind im 8.2.5 zu finden.

8.2.1.1 Kriterien LRV Art 15 Ziffer 4 - Beurteilung der Emissionen der kontinuierlichen Messung des Regelbetriebs (ohne Start und Stopp)

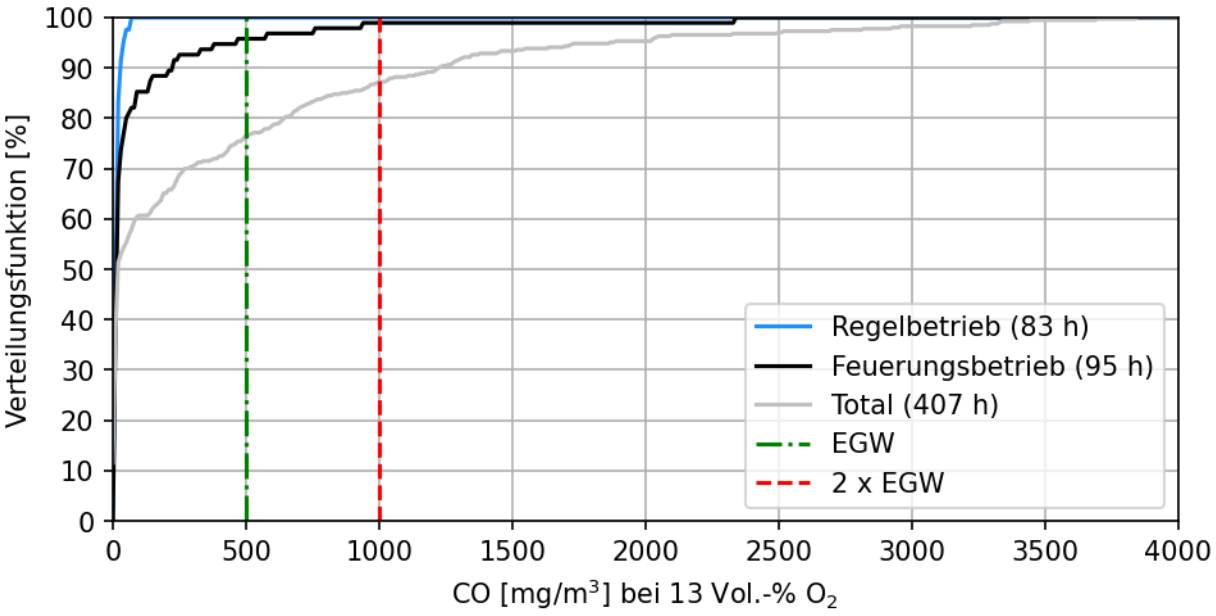


Bild 5: Summenkurve der 1h Mittelwerte von Kessel 1. EGW = Emissionsgrenzwert. Feuerungsbetrieb beinhaltet neben dem Regelbetrieb auch die Anfahrphasen und die Zeitpunkte der Abfahrphasen in denen O_2 < 18 Vol.-% war. Total beinhaltet alle Werte der gesamten Messperiode, also die Werte des Feuerungsbetriebs, aber auch die Werte der Betriebsphase Abfahren, die nicht zum Feuerungsbetrieb gezählt werden (wo O_2 > 18% ist) und die Werte während der Kessel im Standby (O_2 ~20-21%) ist.

1h Mittelwert CO Regelbetrieb < 2-facher EGW (Anforderung 100%)	100 % (84 / 84)
1h Mittelwert NOx Regelbetrieb < 2-facher EGW (Anforderung 100%)	100 % (84 / 84)
24h Mittelwert CO Regelbetrieb < EGW (Anforderung 100%)	100 % (16/ 16)
24h Mittelwert NOx Regelbetrieb < EGW (Anforderung 100%)	100 % (16 / 16)

8.2.1.2 Minimale Tagesheizlast nach QM Holzheizwerke FAQ 12.....

Tagesheizlast > Anforderung FAQ12 (Tag, Anforderung 100%) [5]

Tagesmittelwert Q_{Soll} > Q_{min} (Q_{min} = 20%)	56 % (9 / 16)

Die minimale Tagesheizlast gemäss QM Holzheizwerke FAQ 12 ist für Kessel 1 an 9 von 16 Tagen erfüllt.

Zum Zeitpunkt der Messung war der grössere Kessel 2 als Hauptkessel eingestellt. Der Kessel 1 wurde deshalb nur dann eingeschaltet, wenn der Kessel 2 den Wärmebedarf nicht decken konnte.

8.2.2 Kessel 1 - Ausgewählte Zeitverläufe

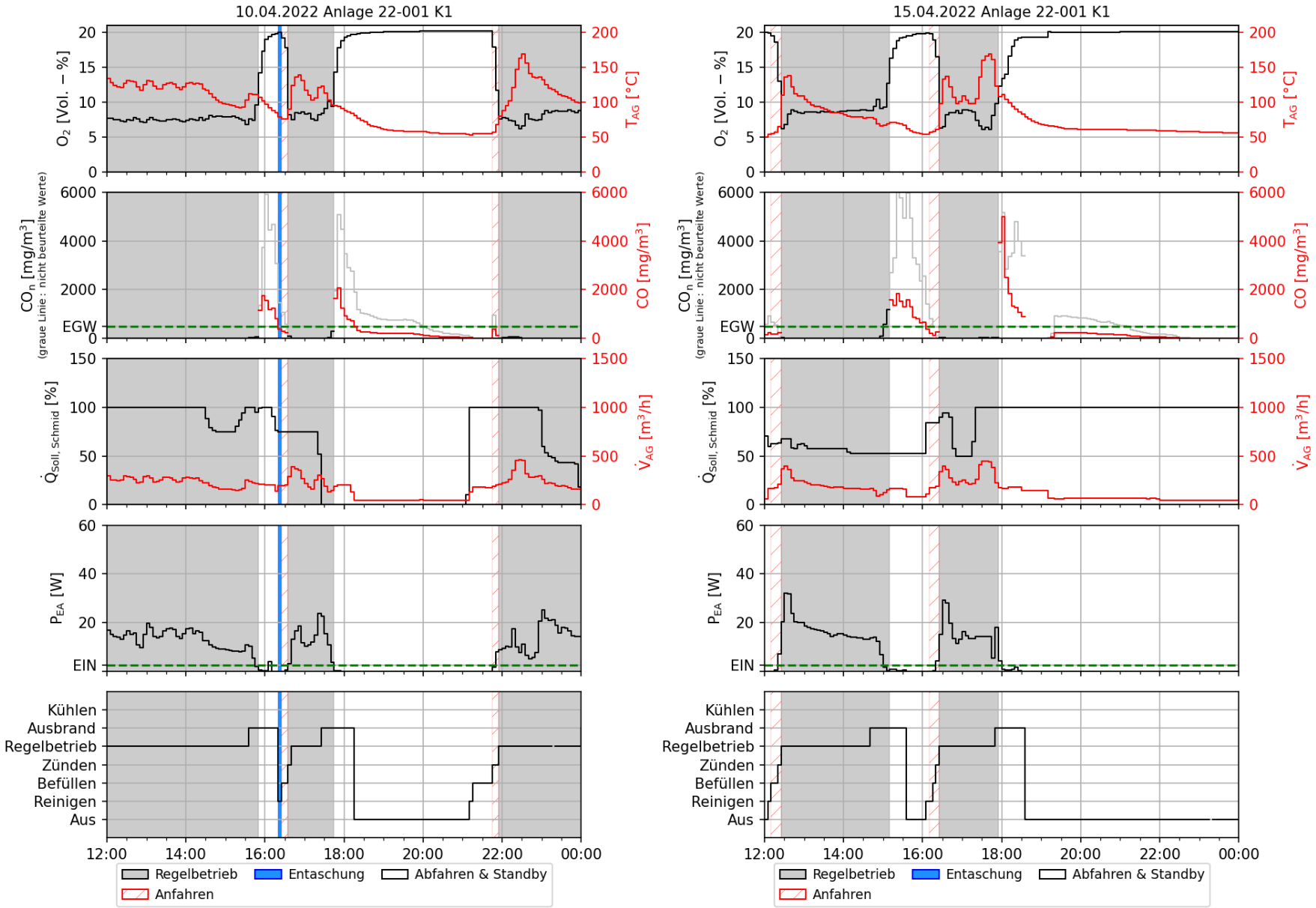


Bild 6: Zeitverläufe von 5min Mittelwerten von zwei ausgewählten Tagen. Schwarzes Signal CO_n = CO normiert auf 13% O_2, rotes Signal CO = CO nicht normiert. Graues Signal CO_n = CO normiert für jene Phasen, die nach LRV nicht beurteilt werden.

8.2.3 QSH Auswertung - Kessel 2 (220 kW)

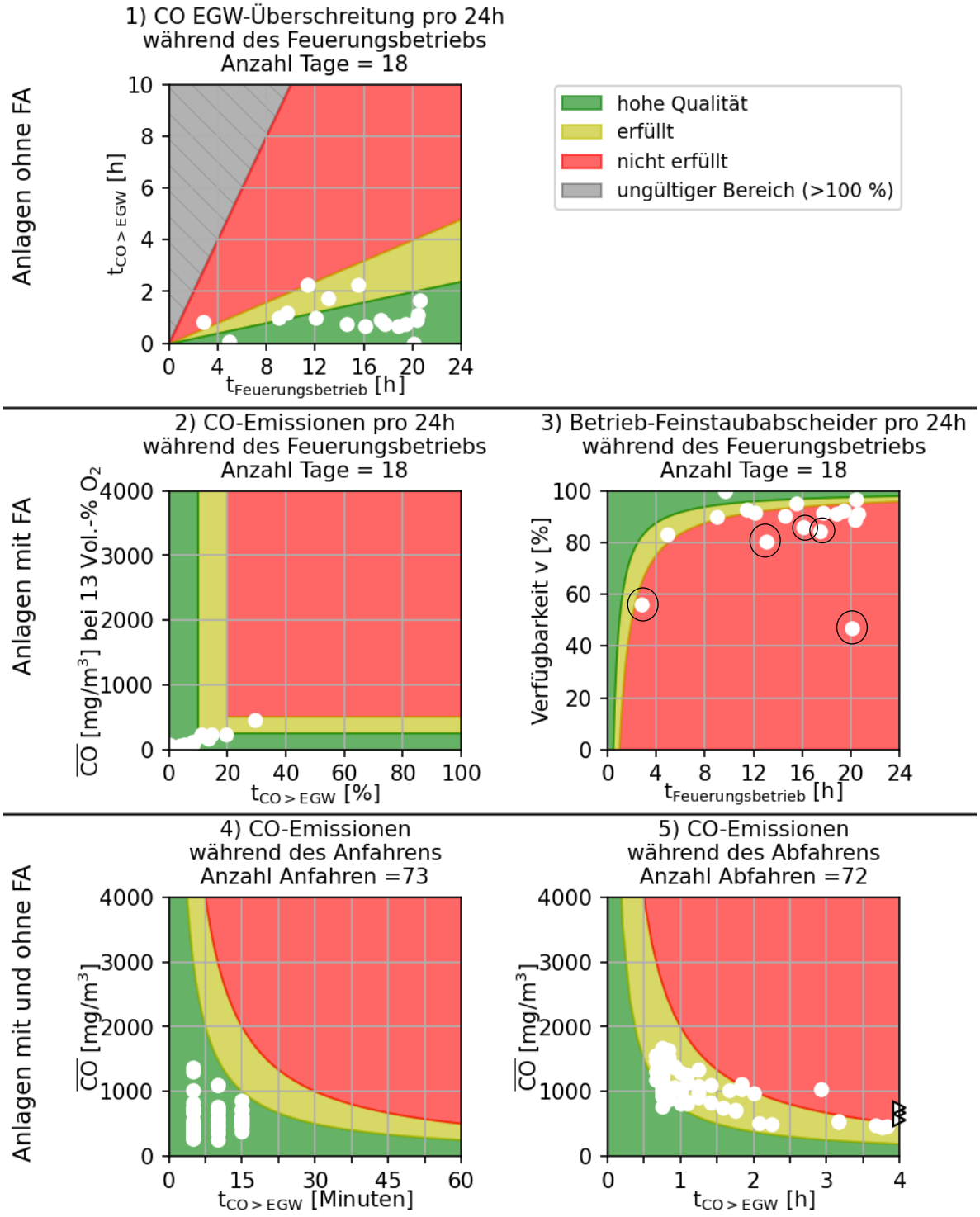


Bild 7: *QSH Auswertung für Kessel 2 für die gesamte Messperiode. Grafiken ganz unten beinhalten neben den «regulären» Ab- und Anfahrphasen auch jene, die aufgrund einer grossen Entaschung durchgeführt wurden. Punkte, die mit einem Dreieck markiert sind, befinden sich ausserhalb gezeigten Bereichs. Die meisten Tage mit den tiefsten EA-Verfügbarkeiten (markiert mit einem schwarzen Kreis in Grafik 3) sind Tage, an denen Staubmessungen auf der Anlage durchgeführt und in die Kesselsteuerung eingegriffen wurde und teilweise der EA für längere Zeit manuell deaktiviert wurde. Die QSH-Auswertung für die Tage der Messperiode, an denen keine Staubmessungen bzw. Eingriffe in die Kesselsteuerung gemacht wurde, sind im Kapitel 8.2.5 zu finden.*

8.2.3.1 Kriterien LRV Art 15 Ziffer 4 - Beurteilung der Emissionen der kontinuierlichen Messung des Regelbetriebs (ohne Start und Stopp)

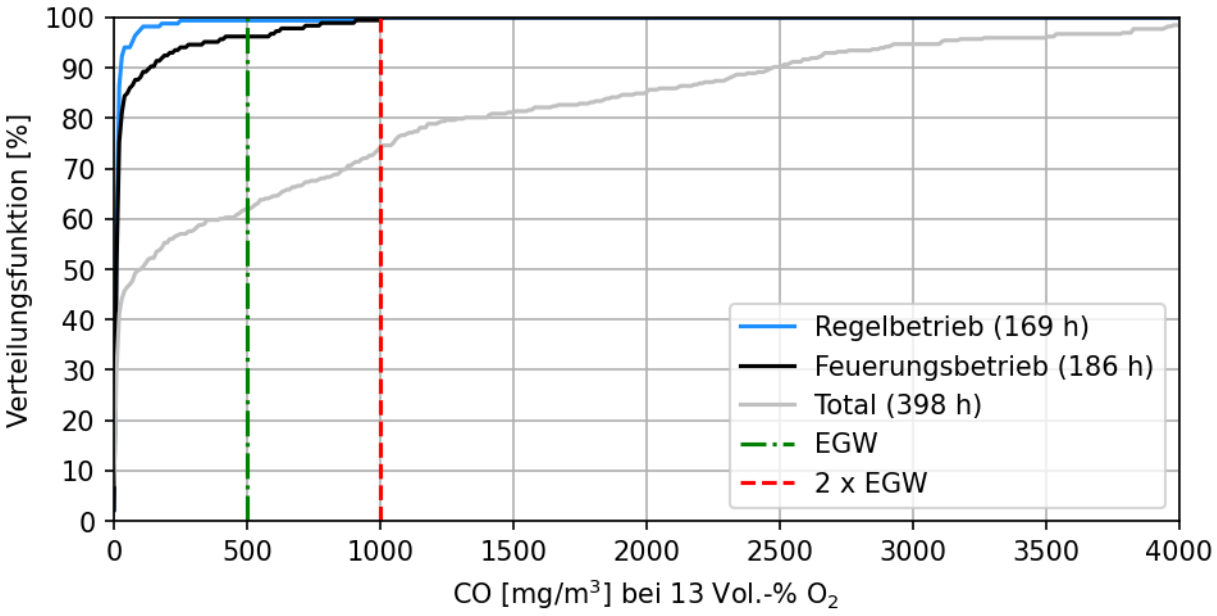


Bild 8: Summenkurve der 1h Mittelwerte von Kessel 2. EGW = Emissionsgrenzwert. Feuerungsbetrieb beinhaltet neben dem Regelbetrieb auch die Anfahrphasen und die Zeitpunkte der Abfahrphasen in denen O_2 < 18 Vol.-% war. «Total» beinhaltet alle Werte der gesamten Messperiode, also die Werte des Feuerungsbetriebs, aber auch die Werte der Betriebsphase Abfahren, die nicht zum Feuerungsbetrieb gezählt werden (wo O_2 > 18% ist) und die Werte während der Kessel im Standby (O_2 ~20-21%) ist.

1h Mittelwert CO < 2-facher EGW (Anforderung 100%)	100 % (177 / 177)
1h Mittelwert NOx < 2-facher EGW (Anforderung 100%)	100 % (177 / 177)
24h Mittelwert CO Regelbetrieb < EGW (Anforderung 100%)	100 % (16 / 16)
24h Mittelwert NOx Regelbetrieb< EGW (Anforderung 100%)	100 % (16 / 16)

8.2.3.2 Minimale Tagesheizlast QM Holzheizwerke FAQ 12

Tagesheizlast > Anforderung FAQ12 (Tag, Anforderung 100%) [5]

Tagesmittelwert Q_{Soll} > Q_{min} (Q_{min} = 20%) 88 % (14 / 16)

Die minimale Tagesheizlast gemäss QM Holzheizwerke wurde bei Kessel 2 an 14 von 16 Tagen erreicht.

Zum Zeitpunkt der Messung war der grössere Kessel 2 als Hauptkessel eingestellt. Aufgrund der warmen Witterung in der Übergangszeit war der Wärmebedarf für den Kessel 2 teilweise zu gering.

8.2.4 Kessel 2 - Ausgewählte Zeitverläufe

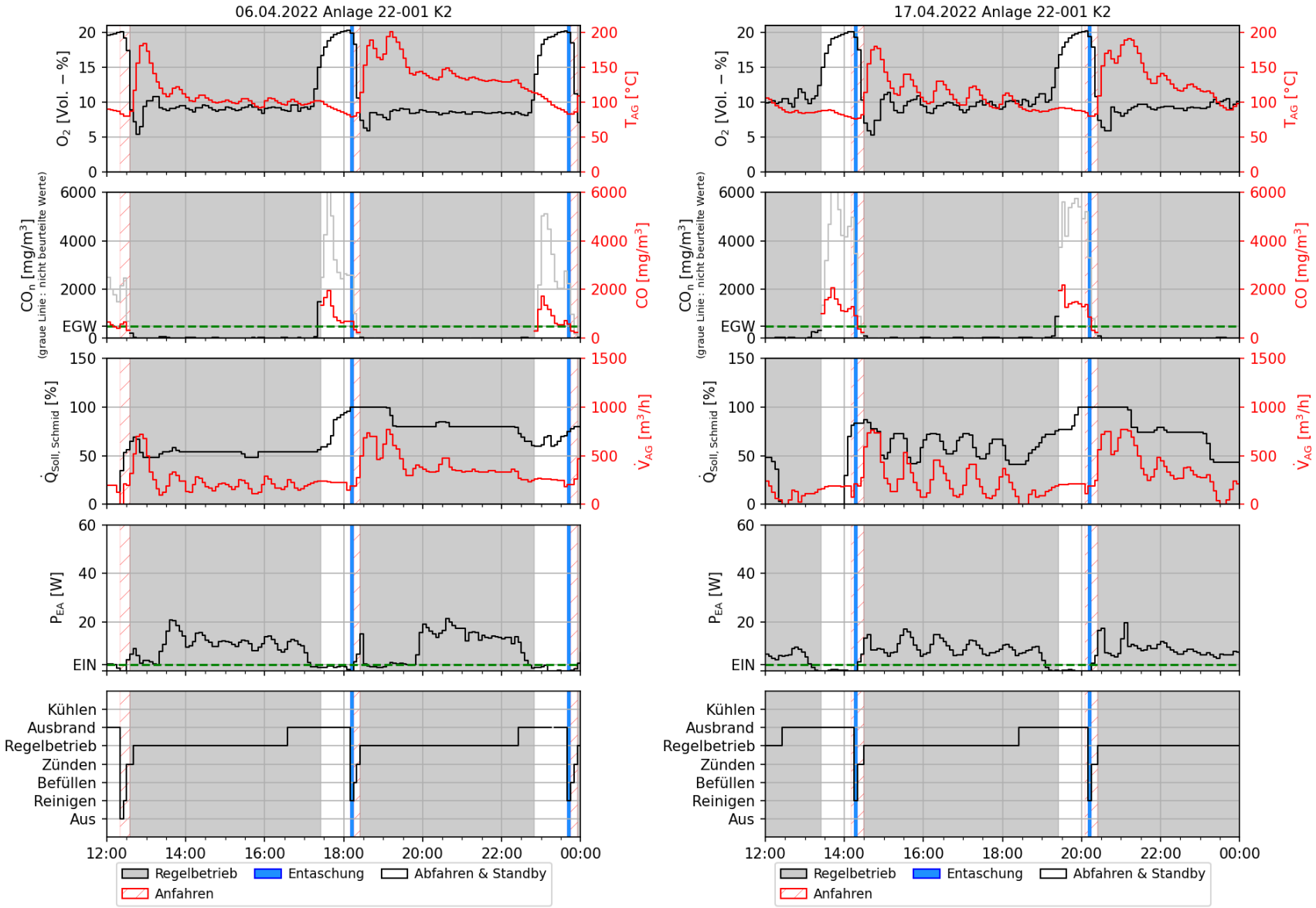


Bild 9: Zeitverläufe von 5min Mittelwerten von zwei ausgewählten Tagen von Kessel 2. Schwarzes Signal CO_n = CO normiert auf 13% O_2, rotes Signal CO = CO nicht normiert. Graues Signal CO_n = CO normiert für jene Phasen, die nach LRV nicht beurteilt werden.

8.2.5 QSH Auswertung für Tage ohne Eingriffe in die Kesselsteuerung

8.2.5.1 Kessel 1

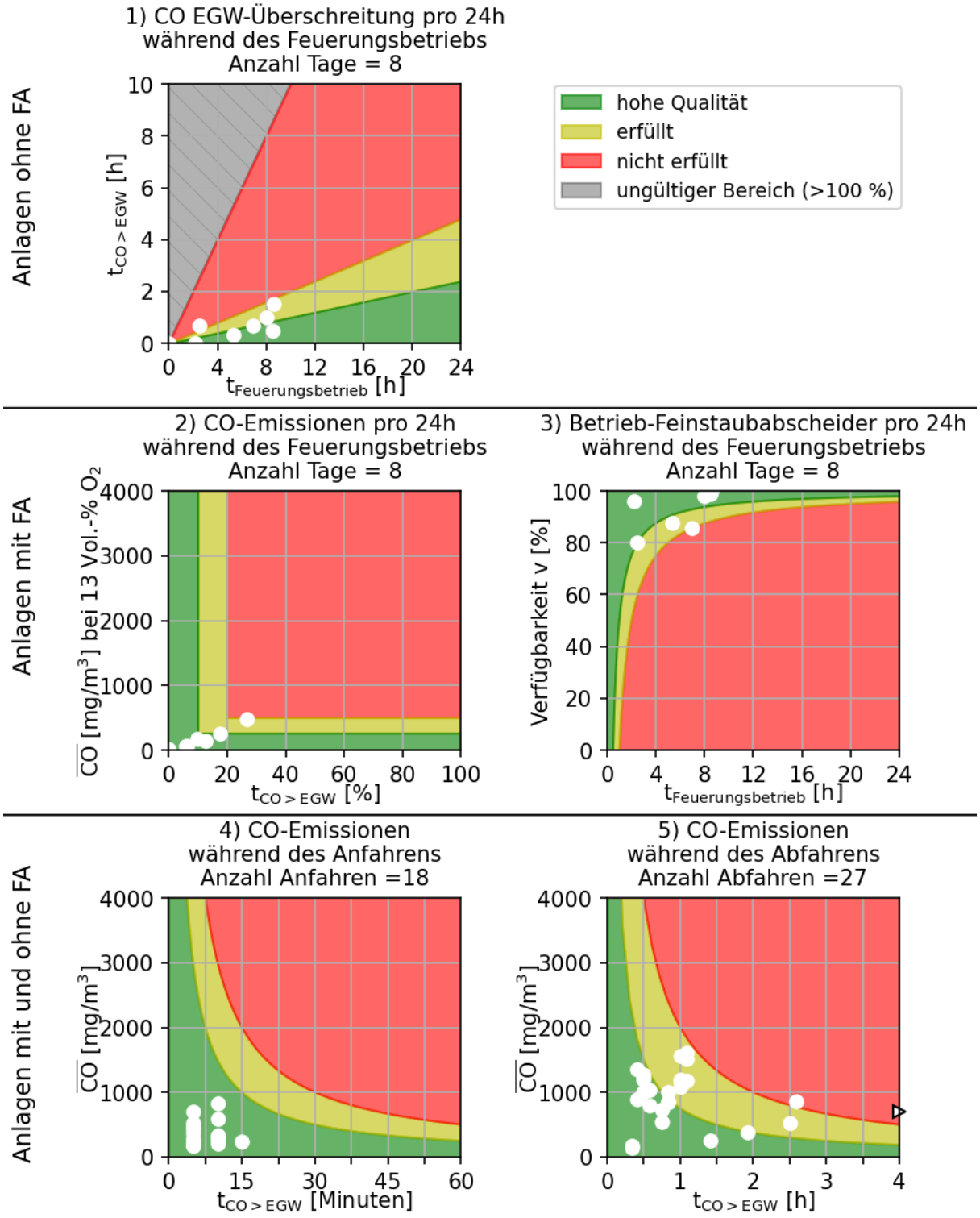


Bild 10: QSH Auswertung für Kessel 1 für jene Tage der Messperiode, an denen keine Staubmessungen bzw. Eingriffe in die Kesselsteuerung gemacht wurde. Grafiken ganz unten beinhalten neben den «regulären» Ab- und Anfahrphasen auch jene, die aufgrund einer Entaschung durchgeführt wurden.

8.2.5.2 Kessel 2

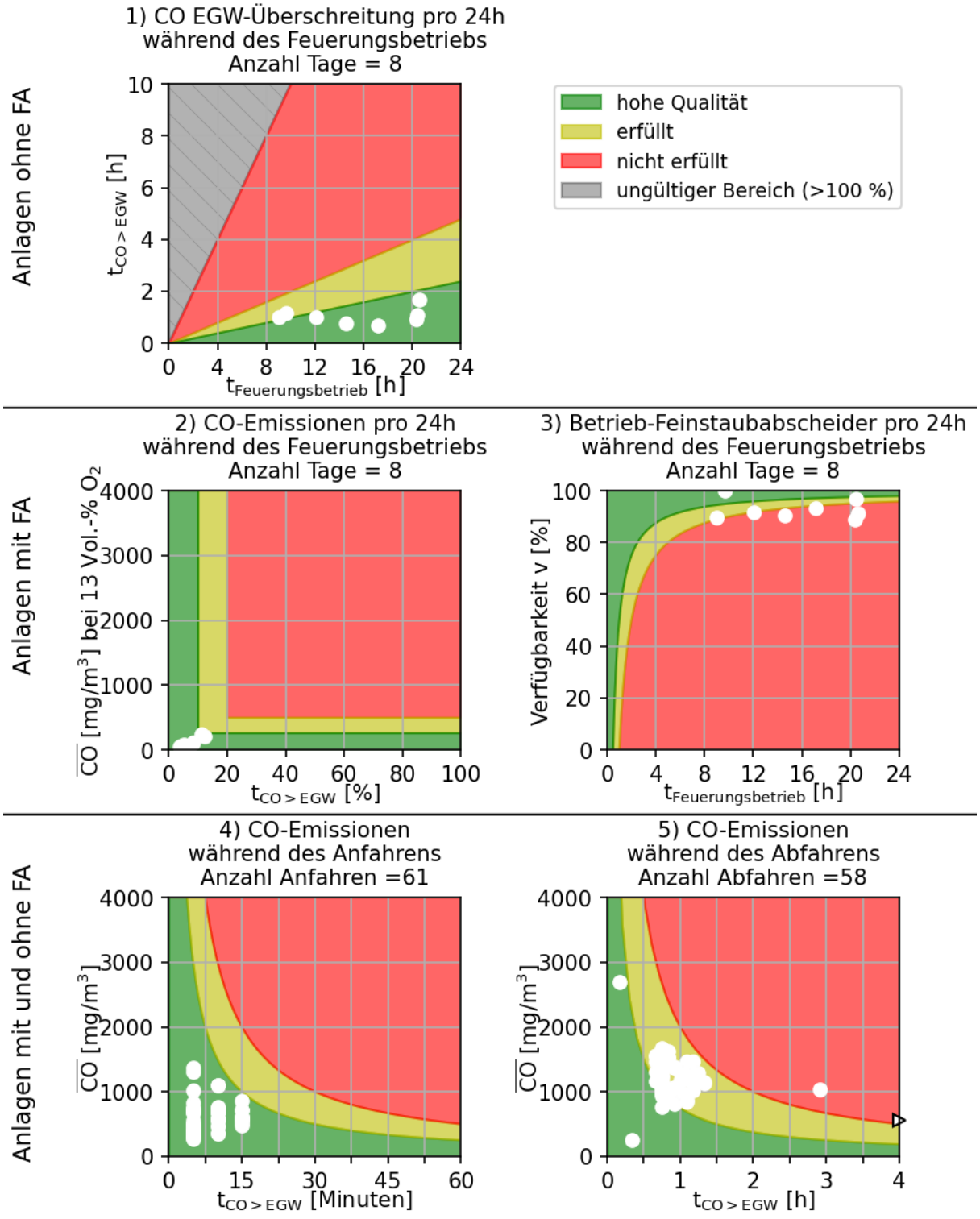


Bild 11: QSH Auswertung für Kessel 2 für jene Tage der Messperiode, an denen keine Staubmessungen bzw. Eingriffe in die Kesselsteuerung gemacht wurde. Grafiken ganz unten beinhalten neben den «regulären» Ab- und Anfahrphasen auch jene, die aufgrund einer Entaschung durchgeführt wurden.

8.2.6 Vergleich der Betriebsphasen und Emissionen der Gesamtanlage

In diesem Kapitel werden die CO Emissionen der Gesamt-Anlage betrachtet. Dies würde einer Messung in einem gemeinsamen Kamin, in dem die Abgase beider Kessel zusammengeführt werden, entsprechen. Die verschiedenen Betriebsphasen der Kessel sind dabei überlagert und können dementsprechend nicht mehr unterschieden werden. Die Berechnung der Emissionen der Gesamtanlage erfolgt über die Emissionsfrachten und einem mit dem Betriebsabgasvolumenstrom (V_{AG}) gewichteten O_2. Die Berechnungen sind in Kapitel 7 genauer beschrieben.

V_{AG} von Phasen mit manuellem Kühlen (war notwendig um Kaltstartbedingungen für die gravimetrischen Staubmessungen herbeizuführen) wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt, da V_{AG} während des Kühlens aufgrund des laufenden Gebläses deutlich höher ist, als bei üblichen Standby (AUS) Phasen.

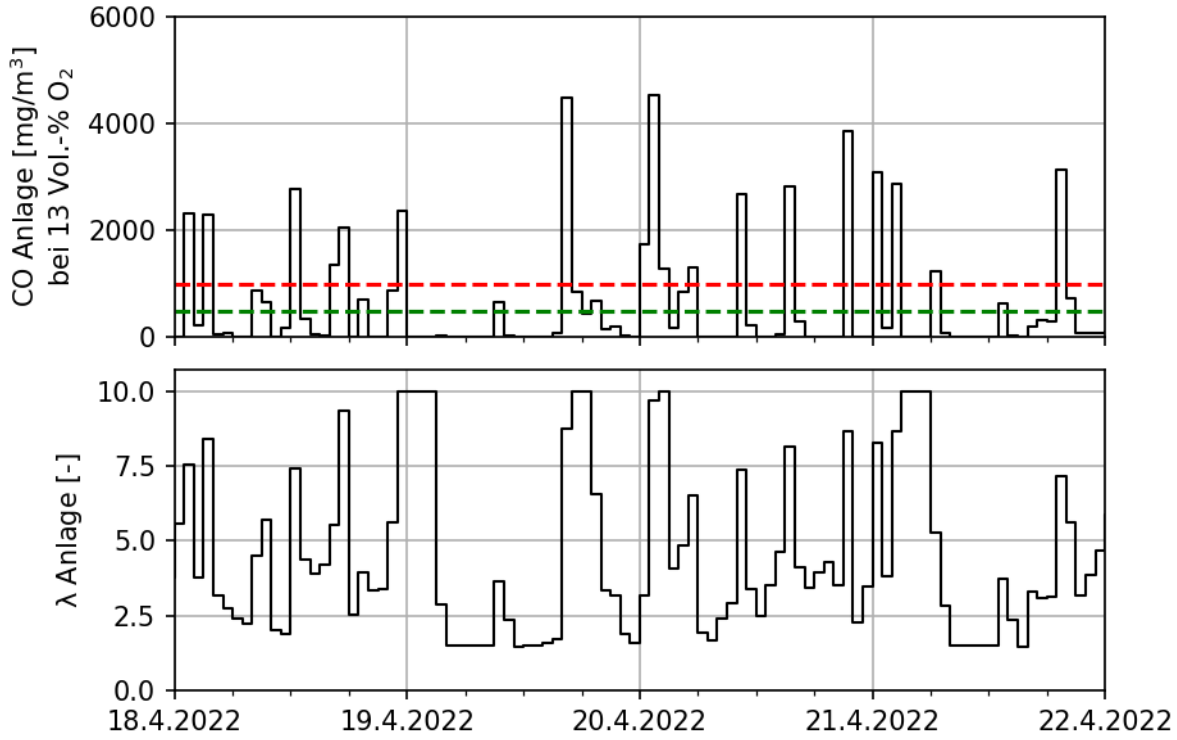


Bild 12: Ausschnitt der 1h Mittelwerte der Gesamt-Emissionen der 2-Kesselanlage. Die Gesamtemissionen wurden über die Fracht berechnet und beinhalten alle Betriebsphasen (Anfahren, Abfahren, Regelbetrieb und Standby). Die grüne Linie kennzeichnet den Emissionsgrenzwert (EGW) und die rote Linie den 2-fachen EGW. Während der Messperiode gab es 40 An- und Abfahrvorgänge bei Kessel 1 und 73 bei Kessel 2. Dies entspricht im Durchschnitt rund 6 An- und Abfahrvorgänge der Gesamtanlage pro Tag.

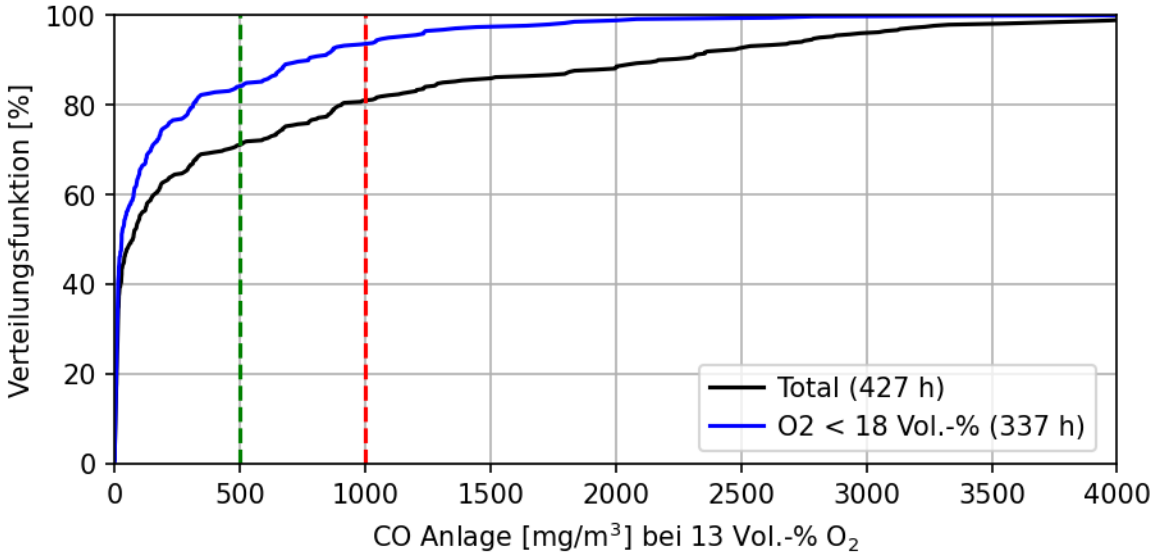


Bild 13: Summenkurve der 1h Mittelwerte der Gesamte-Emissionen der 2-Kesselanlage. Die grüne Linie kennzeichnet den Emissionsgrenzwert (EGW) und die rote Linie den 2-fachen EGW. Während der Messperiode gab es 40 An- und Abfahrvorgänge bei Kessel 1 und 73 bei Kessel 2. Dies entspricht im Durchschnitt rund 6 An- und Abfahrvorgänge der Gesamtanlage pro Tag. Die Unterschiede der Stunden von Total zu Bild 5 und Bild 8 kommt daher, dass in Bild 5 und Bild 8 die Empfehlungen der BAFU Messempfehlung angewendet wurden, dass mindestens 80% der Werte zur 1h-Mittelwertbildung vorhanden sein müssen.

Die CO-Emissionen der einzelnen Kessel sind einzeln betrachtet relativ tief und die Bewertung nach den verschiedenen QS-Kriterien ist grösstenteils erfüllt (siehe Kapitel 8.2.1 und Kapitel 8.2.3). Die CO-Emissionen der Gesamtanlage (Bild 13) zeigen, dass der Emissionsgrenzwert von 500 mg/m³ mehrheitlich unterschritten wird. Nur zu rund 17% der Zeit wird der Emissionsgrenzwert überschritten wird (Bild 13). Dies ist einerseits auf die hohen CO-Emissionen während des Abfahrens (Bild 15 und Tabelle 1) und den hohen Anteil der Betriebsphase Abfahren in der Messperiode (Bild 30) zurückzuführen. Ausserdem ist der Volumenstrom im Ausbrand im Vergleich zum Regelbetrieb nur ca. 50% tiefer und somit immer noch relevant (Bild 14). Andererseits kommt es häufig auch zu einer ungünstigen Überlagerung von verschiedenen Betriebsphasen der beiden Kessel, was beispielhaft in Bild 17 zu sehen ist. In der Regel waren beide Kessel selten gleichzeitig in Betrieb, aber im Ausbrand bleibt der Volumenstrom meist hoch, was dann auch im Mittel zu hohen CO-Konzentrationen führt. Während der Messperiode gab es 40 An- und Abfahrvorgänge bei Kessel 1 und 73 bei Kessel 2. Dies entspricht im Durchschnitt rund 6 An- und Abfahrvorgänge der Gesamtanlage pro Tag.

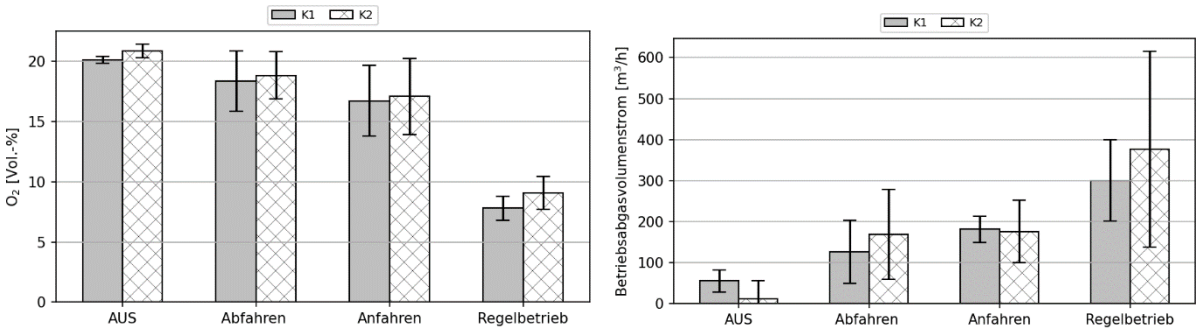


Bild 14: Vergleich der O_2 Konzentrationen (links) und des Betriebsabgasvolumenstroms (rechts) der verschiedenen Betriebsphasen. Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen. Die Werte sind auch in Tabelle 1 angeführt.

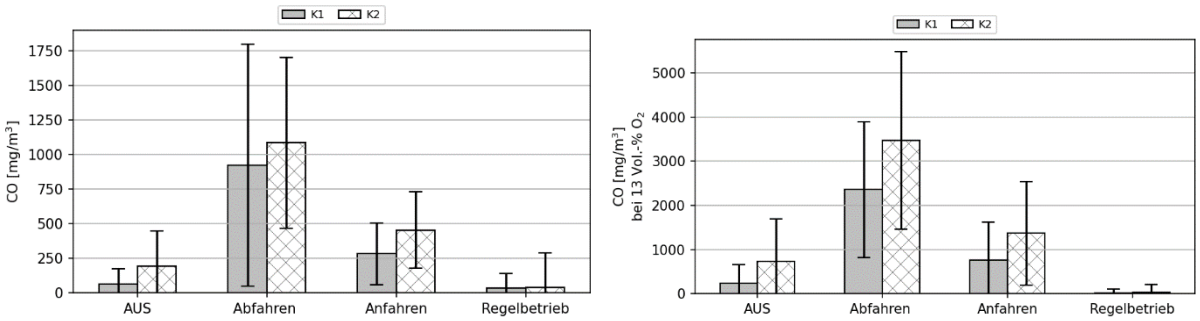


Bild 15: Vergleich der CO Emissionen der verschiedenen Betriebsphasen. Links: CO nicht normiert. Rechts: CO normiert auf 13% O_2. Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen. Die Werte sind auch in Tabelle 1 angeführt.

Tabelle 1: Übersicht über die Mittelwerte und Standardabweichungen von O_2, dem Betriebsabgasvolumenstrom und den CO Emissionen, die in Bild 14 und Bild 15 dargestellt sind.

Betriebs-phase	O_2 [%]		V_{AG} [m^3/h]		CO [mg/m_n^3]		CO normiert [mg/m_n^3 @ 13% O_2]	
	Kessel 1	Kessel 2	Kessel 1	Kessel 2	Kessel 1	Kessel 2	Kessel 1	Kessel 2
Aus	20.1 ± 0.3	20.9 ± 0.6	56 ± 27	13 ± 43	64 ± 111	193 ± 253	243 ± 423	737 ± 963
Abfahren	18.3 ± 2.5	18.8 ± 2.0	126 ± 78	169 ± 110	926 ± 876	1086 ± 619	2364 ± 1538	3474 ± 2006
Anfahren	16.7 ± 2.9	17.1 ± 3.2	182 ± 32	176 ± 77	284 ± 224	455 ± 276	764 ± 862	1368 ± 1178
Regelbetrieb	7.8 ± 1.0	9.1 ± 1.4	301 ± 99	376 ± 239	36 ± 106	40 ± 251	24 ± 85	31 ± 174

Mit die Staubfracht in [g/h], dem Betriebsabgasvolumenstrom V_{AG} [m^3/h] und der gesamten Zeit in [h] der jeweiligen Betriebsphase an der gesamten Messperiode wurde auch die Gesamt-Emissionsfracht und die Anteile der verschiedenen Phasen für beide Kessel berechnet (siehe Bild 16).

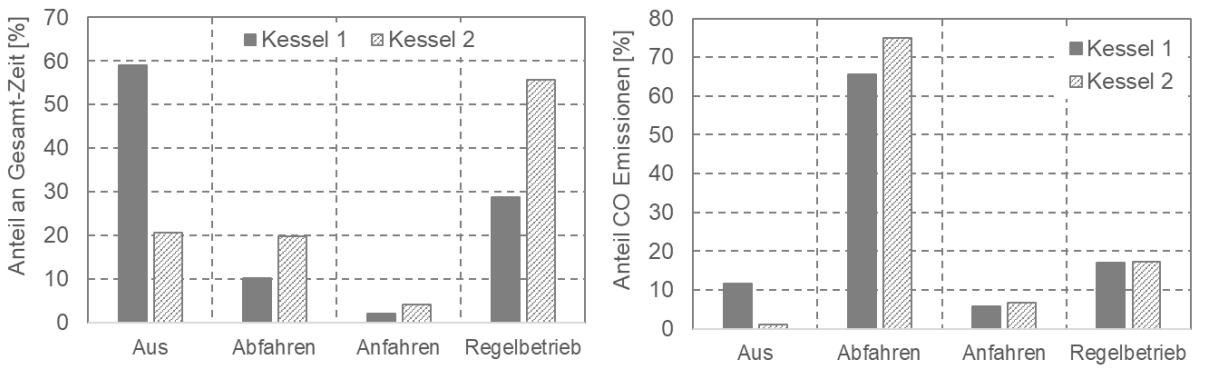


Bild 16: Links: Anteile der Dauer der verschiedenen Betriebsphasen an der gesamten Messperiode. Rechts: Anteile der CO-Emissionen der verschiedenen Betriebsphase an den Gesamt-CO-Emissionen der gesamten Messperiode. Die Anteile wurden mittels der Frachten und Anteile an der Gesamtzeit der jeweiligen Betriebsphasen berechnet. Während der Messperiode gab es 40 An- und Abfahrvorgänge bei Kessel 1 u. 73 bei Kessel 2. Dies entspricht im Durchschnitt rund 6 An- und Abfahrvorgänge der Gesamtanlage pro Tag.

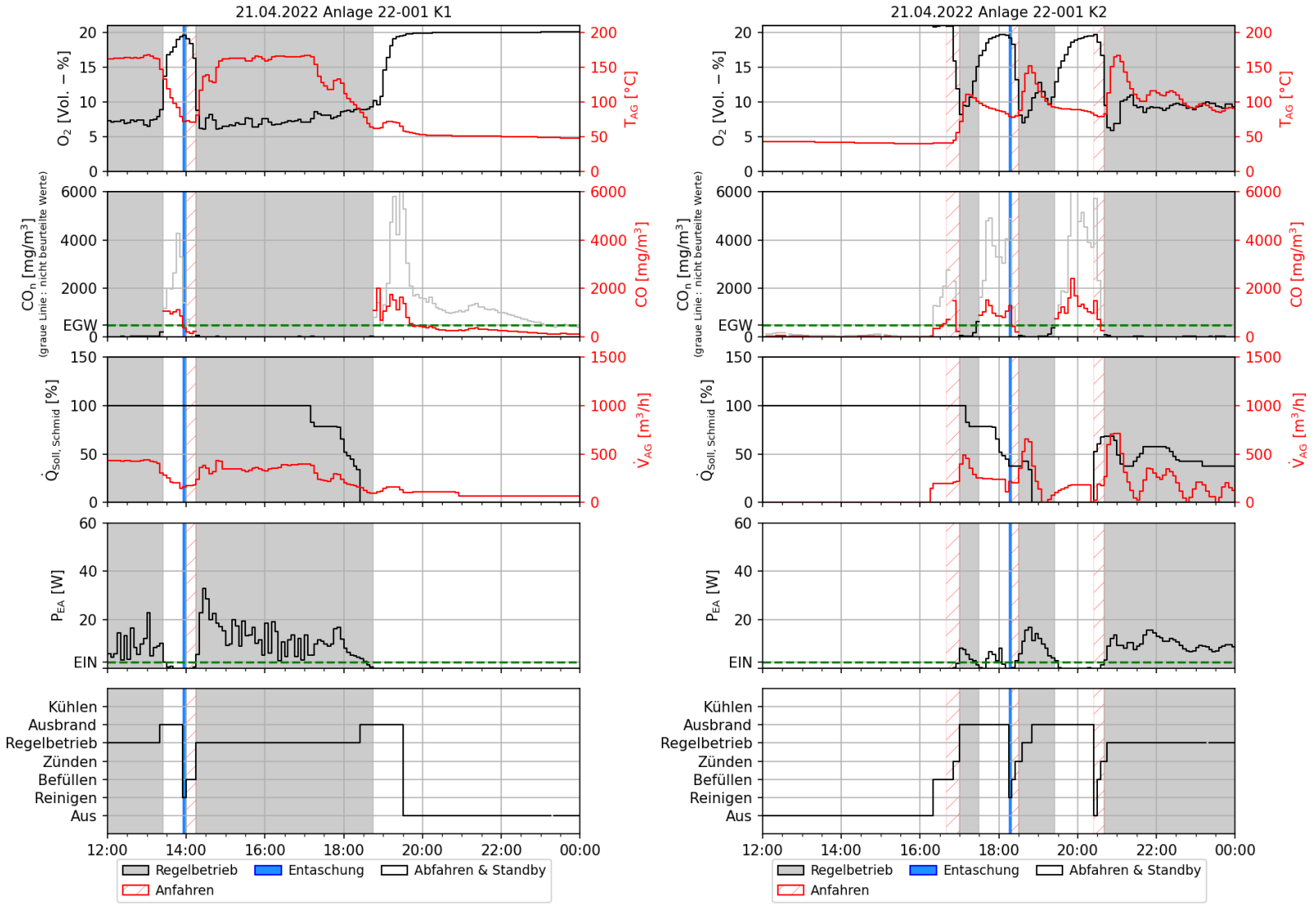


Bild 17 *Beispiel eines Zeitverlaufs für die Überlagerung der Ausbrandphase (Kessel 1, links) und einer Regelbetriebsphase (Kessel 2, rechts) am 21.04. 2022 zw. 17:00 u. 18:30 sowie 21:00-22:30.*

8.2.7 Unterschiede zwischen verschiedenen Anfahrvorgängen (Warm vs. Kalt-Start) sowie zwischen «regulären» Anfahr- und Abfahrvorgängen und grosser Entaschung

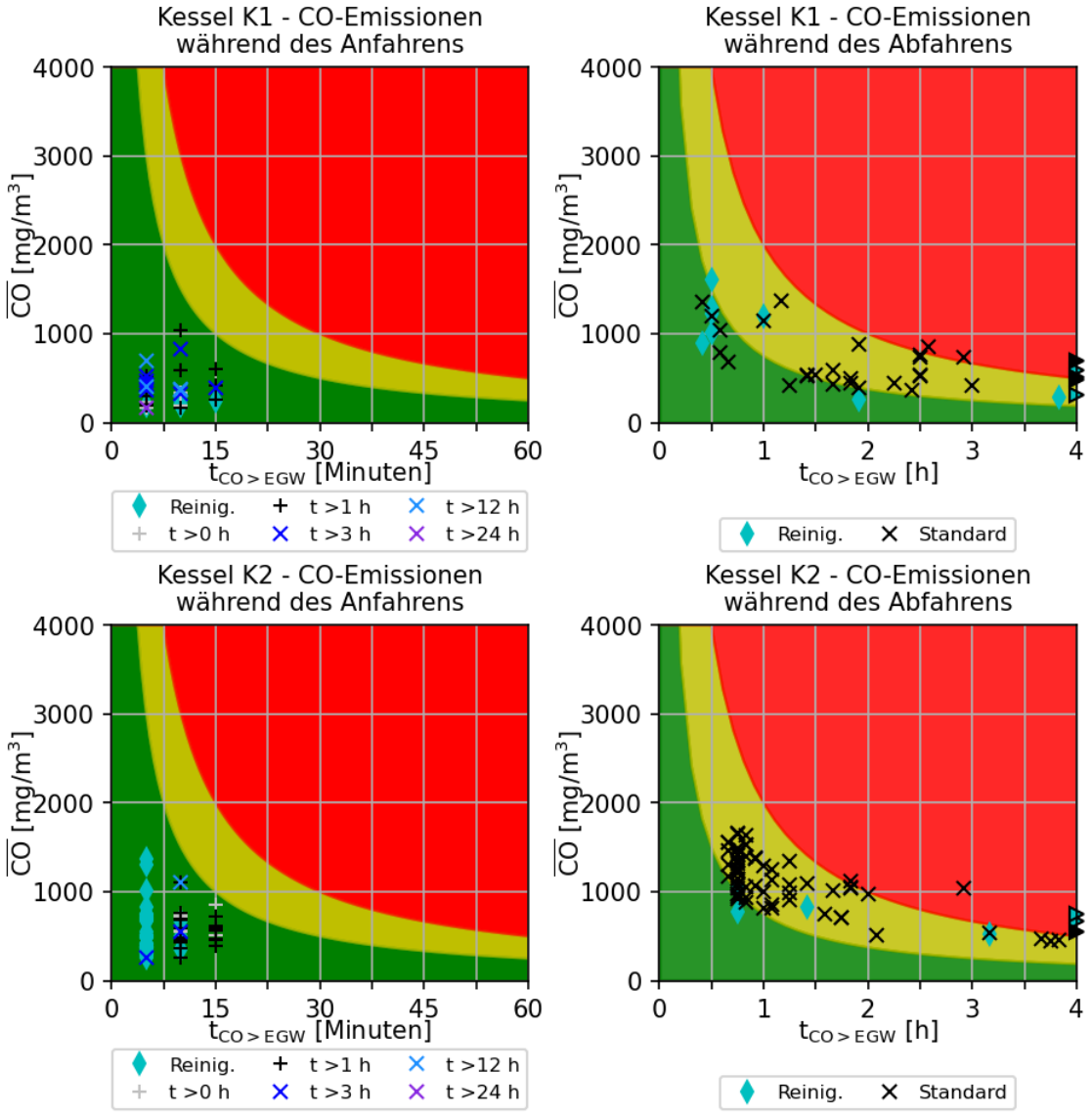


Bild 18: QSH Auswertung für die An- und Abfahrphasen mit Unterscheidung für verschiedene Zustände von Kessel 1 (oben) und Kessel 1 (unten). Reinigung = grosse Entaschung, t >0 h = Stillstandszeit 0-1 h, t >1 h = Stillstandszeit 1-3 h, t >3 h = Stillstandszeit 3-12 h, t >12h = Stilstandszeit 12-24 h, t >24 h = Stillstandsdauer > 24 h
Links: Unterschiedliche Stillstandsdauer vor «regulären» Anfahrvorgängen und Unterscheidung zwischen «regulären» Anfahrvorgängen und Anfahrvorgängen aufgrund einer grossen Entaschung.
Rechts: Unterscheidung zw. «regulären» Abfahrvorgängen und Abfahrvorgängen aufgrund einer grossen Entaschung.

Anhand Bild 18 sind keine signifikanten Unterschiede für das Anfahren nach verschiedene Stillstandszeiten zu erkennen. Auch die Anfahrphasen nach einer Entaschung zeigen keine höheren CO-Emissionen als «reguläre» Anfahrphasen. Bei Kessel 2 ist jedoch deutlich erkennbar, dass die Anfahrphasen nach einer Entaschung kürzer sind. Die Abfahrphasen aufgrund einer Entaschung sind wegen des Betriebskonzepts meist kürzer als reguläre Abfahrphasen und weisen auch keine signifikant höheren CO-Emissionen auf.

8.3 Auswertung gravimetrische Staubmessung

8.3.1 Staubemissionen der verschiedenen Betriebsphasen

Tabelle 2: Übersicht über die Mittelwerte der untersuchten Betriebsphasen der gravimetrischen Staubmessungen.

Betriebs-phase	O_2 an Messstelle [%]		PM_{grav} normiert [mg/m_n^3 @ 13% O_2]				Abscheidegrad [%]	
			EA aus		EA ein			
	Kessel 1	Kessel 2	Kessel 1	Kessel 2	Kessel 1	Kessel 2	Kessel 1	Kessel 2
Regelbetrieb	9.7 ± 0.9	10 ± 0.6	52.1 ± 21.5	14.5 ± 11.6	26.2 ± 19.9	5.9 ± 4.1	50%	59%
Warmstart	16.7 ± 1.1	15.4 ± 0.4	46.1 ± 26.2	36.7 ± 8.4	43.4 ± 3.3	32 ± 17.9	6%	13%
Kalt-Start	13.7 ± 0.5	13.6 ± 0.3	14.3 ± 14.8	8.9 ± 3.1	12.1 ± 6.4	3.9 ± 2.6	15%	56%
Ausbrand	17.1 ± 0.6	16.6 ± 0.7	171.3 ± 14.6	238.8 ± 22.7	58.7 ± 30.2	169.8 ± 33.4	66%	29%

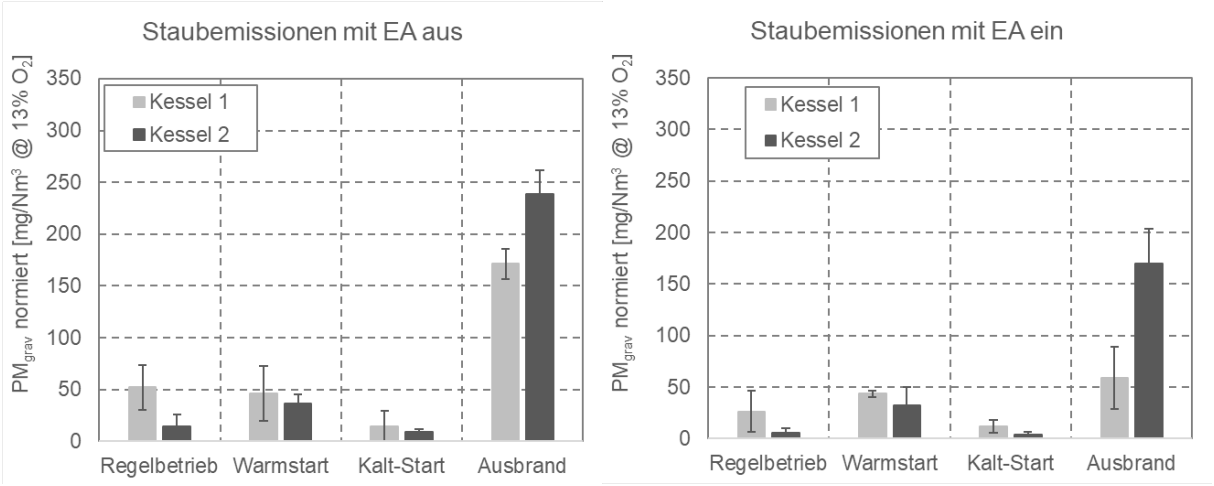


Bild 19: Mittelwerte und Standardabweichung der Staubemissionen der verschiedenen Betriebsphasen von Kessel 1 und Kessel 2. Links: Werte mit Elektroabscheider (EA) aus. Rechts: Werte mit EA ein.

- Da der Mittelwert von O_2 für alle Betriebsphasen <18 % ist, können die Staubemissionen (PM_{grav}) auf den Bezugssauerstoff normiert werden.
- Ausser der Betriebsphase «Ausbrand» bei Kessel 1 und Kessel 2 sind die Staubemissionen bei beiden Kesseln für alle Betriebsphasen kleiner als der Emissionsgrenzwert (50 mg/$m^{3,}$ für den Regelbetrieb).
- Für die tiefen Abscheidegrade können mehrere Gründe verantwortlich sein.
    - Die Messungen wurden oftmals nicht direkt nacheinander durchgeführt, sondern für die gleiche Betriebsphase manchmal an verschiedenen Tagen, sodass nicht immer die exakt gleiche Verbrennungssituation garantiert werden konnte.
    - Die Staubkonzentrationen einiger Betriebsphasen sind auch mit ausgeschaltetem EA tief, was zusammen mit der geringen Anzahl an Wiederholungsmessungen zu einer teilweise hohen Variabilität führt.
    - Teilweise sind auf den Filtern grössere Partikel sowohl vor als auch nach dem EA zu erkennen. Dies könnten Kohlestücken sein, die aus der Brennkammer mitgerissen werden. Partikel dieser Grösse werden erfahrungsgemäss nicht bzw. nur in sehr geringem Ausmass vom EA abgeschieden.

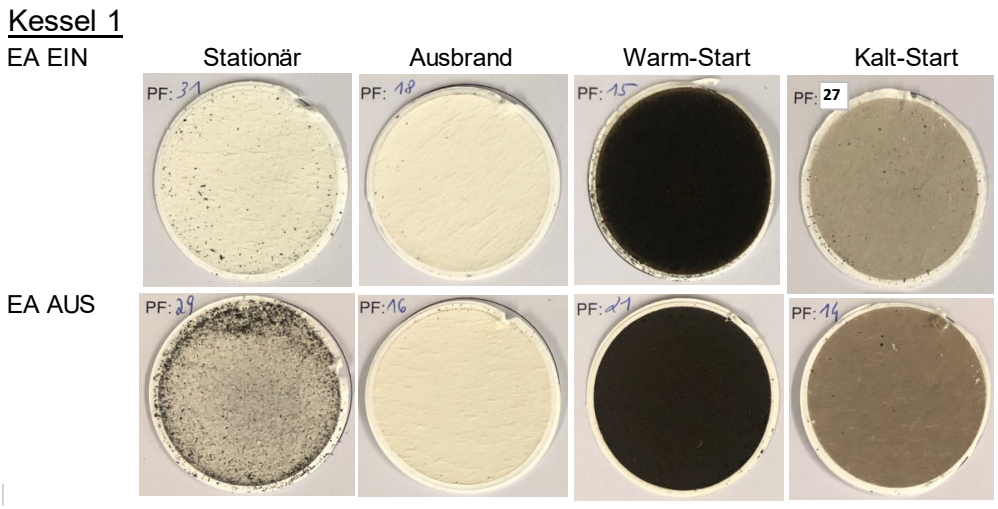


Bild 20: Fotos von ausgewählten Planfiltern der gravimetrischen Staubmessung an Kessel 1.

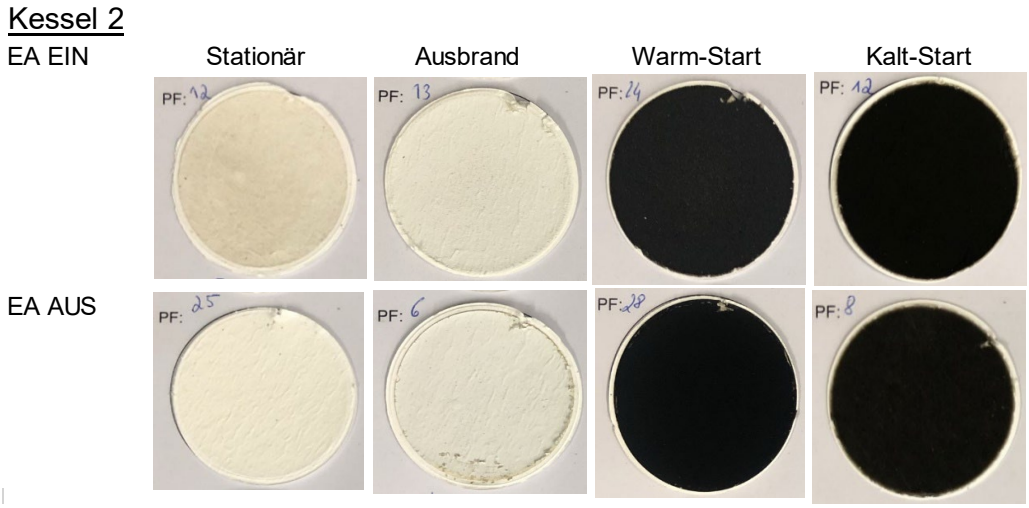


Bild 21: Fotos von ausgewählten Planfiltern der gravimetrischen Staubmessung an Kessel 2.

8.3.2 Staubemissionen der gesamten Messperiode und der Gesamtanlage

Ein fiktiver zeitlicher Verlauf der Staubemissionen der gesamten Messperiode für Kessel 1 und Kessel 2 wurde berechnet, da die Staubmessungen nur punktuell durchgeführt wurden. Dazu wurde ein neues Signal für Kessel 1 und Kessel 2 erstellt, welches eine kontinuierliche Staubmessung über die gesamte Periode simuliert. Dazu wurden die Mittelwerte der Staubmessung der jeweiligen Betriebsphase für alle selben Betriebsphasen der kontinuierlichen Daten verwendet. Z.B. für alle Datenpunkte der kontinuierlichen Messung, die mit Ausbrand gekennzeichnet sind, wurde der Mittelwert der Staubmessungen des jeweiligen Kessel für Ausbrand (siehe Tabelle 2) eingesetzt.

Folgende weitere Annahmen wurden getroffen:

- PM_{grav} Warmstart 0-6 h wird gleichgesetzt mit PM_{grav} Warmstart nach 1 h Stillstand.
- Kaltstart wird auf Start nach einer Stillstandszeit >12 h festgelegt und der Wert für PM_{grav} Kalt-Start nach 24 h Stillstand zugewiesen.
- PM_{grav} Anfahren nach Stillstand 6-12 h entspricht dem Mittelwert aus PM_{grav} Warmstart 0-1 h und PM_{grav} Kaltstart
- PM_{grav} für Standby (Aus) wird mit 0 mg/m^3 angenommen.

In Bild 22 sind die Summenkurven der 1h Mittelwert der Staubemissionen zu sehen. Wie man erkennen kann, sind die Werte auch während des Feuerungsbetriebs, der auch Teile des An- und Abfahrens enthält, fast zu 100% unter dem Emissionsgrenzwert von 50 mg/m³.

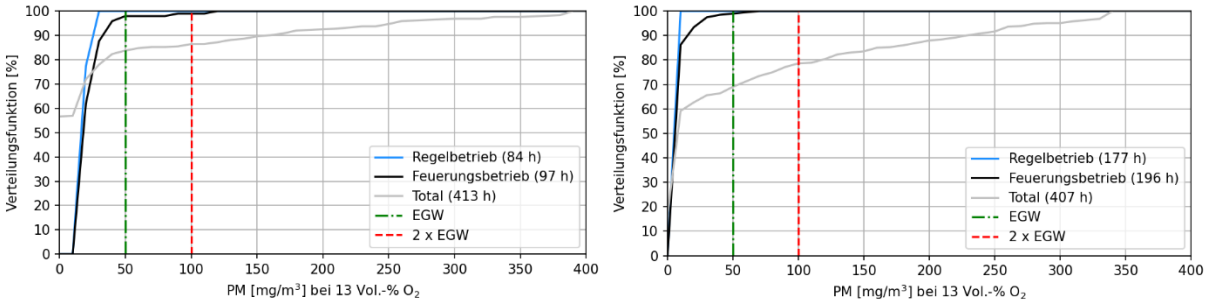


Bild 22: Summenkurve der 1h Mittelwerte von Kessel 1 (links) und Kessel 2 (rechts). EGW = Emissionsgrenzwert. Feuerungsbetrieb beinhaltet neben dem Regelbetrieb auch die Anfahrphasen und die Zeitpunkte der Abfahrphasen in denen O_2 < 18 Vol.-% war. Total beinhaltet alle Werte der gesamten Messperiode, also die Werte des Feuerungsbetriebs, aber auch die Werte der Betriebsphase Abfahren, die nicht zum Feuerungsbetrieb gezählt werden (wo O_2 > 18% ist) und die Werte während der Kessel im Standby ist.

Analog zu CO wurde auch für PM_{grav} der zeitliche Verlauf (siehe Bild 23) der Emissionen der Gesamtanlage berechnet (siehe Kapitel 7) und die Summenkurve der 1h Mittelwerte der Staubemissionen der Gesamtanlage berechnet (siehe Bild 24). Die Staubemissionen der Gesamtanlage zeigen, dass der Emissionsgrenzwert von 50 mg/m³ mehrheitlich unterschritten wird. Nur zu rund 18% der Zeit wird der Emissionsgrenzwert überschritten wird (Bild 24). Dies ist auf dieselben Gründe, wie für CO zurückzuführen (siehe Kapitel 2.3 letzter Absatz) Während der Messperiode gab es 40 An- und Abfahrvorgänge bei Kessel 1 und 73 bei Kessel 2. Dies entspricht im Durchschnitt rund 6 An- und Abfahrvorgänge der Gesamtanlage pro Tag.

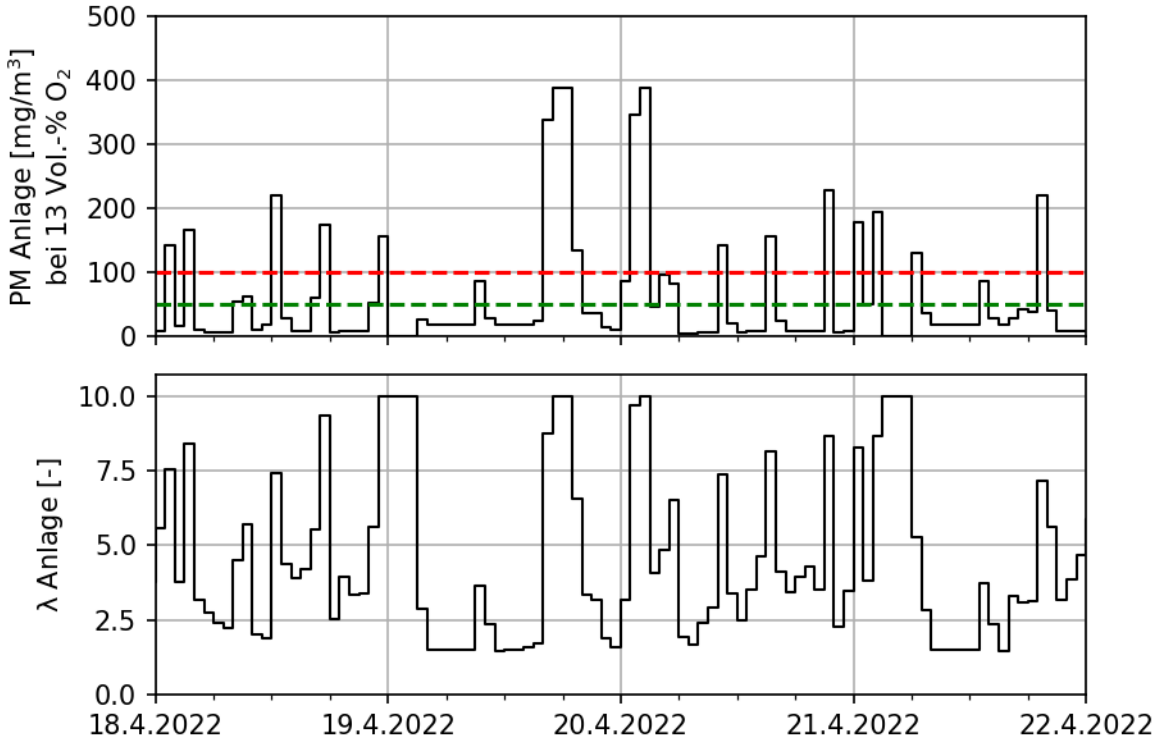


Bild 23: Ausschnitt der 1h Mittelwerte der Gesamt-Emissionen der 2-Kesselanlage. Die Gesamtemissionen wurden über die Fracht berechnet und beinhalten alle Betriebsphasen (Anfahren, Abfahren, Regelbetrieb und Stand-by). Die grüne Linie kennzeichnet den Emissionsgrenzwert (EGW) und die rote Linie den 2-fachen EGW. Während der Messperiode gab es 40 An- und Abfahrvorgänge bei Kessel 1 und 73 bei Kessel 2. Dies entspricht im Durchschnitt rund 6 An- und Abfahrvorgänge der Gesamtanlage pro Tag.

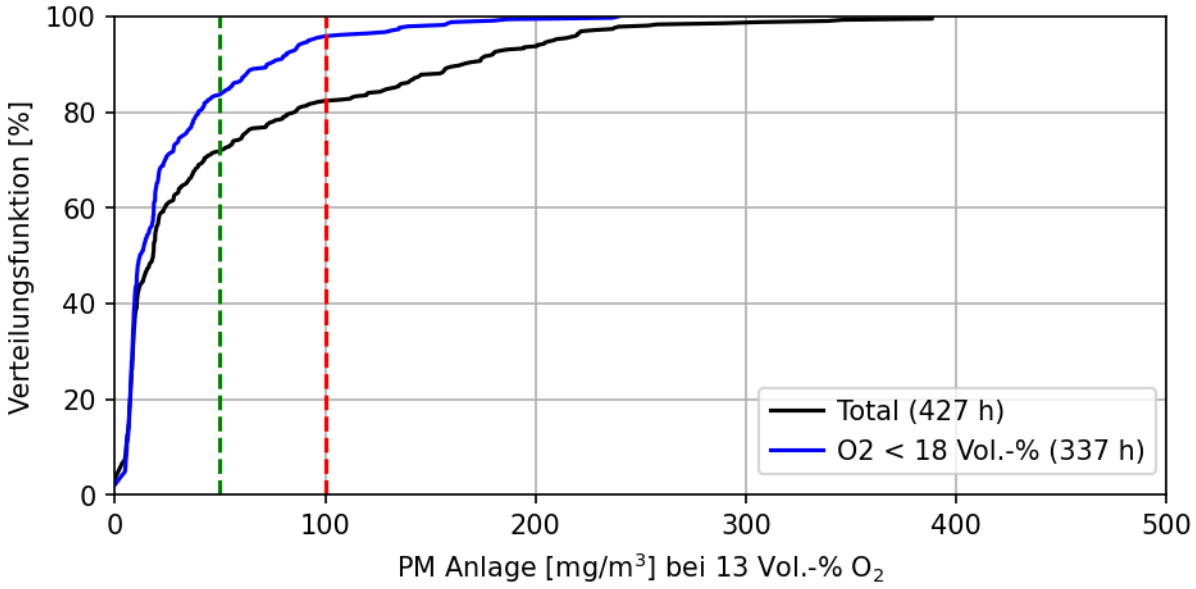


Bild 24: Summenkurve der 1h Mittelwerte der Gesamte-Emissionen der 2-Kesselanlage. Die grüne Linie kennzeichnet den Emissionsgrenzwert (EGW) und die rote Linie den 2-fachen EGW. Während der Messperiode gab es 40 An- und Abfahrvorgänge bei Kessel 1 und 73 bei Kessel 2. Dies entspricht im Durchschnitt rund 6 An- und Abfahrvorgänge der Gesamtanlage pro Tag. Die Unterschiede der Stunden von Total zu Bild 22 kommt daher, dass in Bild 22 die Empfehlungen der BAFU Messempfehlung angewendet wurden, dass mindestens 80% der Werte zur 1h-Mittelwertbildung vorhanden sein müssen.

Mit die Staubfracht in [g/h], dem Betriebsabgasvolumenstrom V_{AG} [m^3/h] und der gesamten Zeit in [h] der jeweiligen Betriebsphase innerhalb der gesamten Messperiode wurden die Gesamt-Emissionsfracht und die mittlere Staubkonzentration der gesamten Messperiode berechnet. Um diese Staubkonzentration auf Bezugs-O_2 normieren zu können, wurde ein mit V_{AG} gewichteter O_2 Wert der gesamten Messperiode berechnet. Ausserdem wurden die Anteile (Bild 25 sowie Tabelle 3 und Tabelle 4) der Staubemissionen der verschiedenen Betriebsphasen berechnet.

Tabelle 3: Eingabeparameter für Berechnung Gesamt-Staubemissionen Kessel 1 und Anteile der Staubemissionen pro Betriebsphase an den Gesamt-Staubemissionen. Die O_2-Konzentrationen entsprechen den Messwerten während den gravimetrischen Staubmessungen der jeweiligen Phase an der Messstelle.

	O_2 [%] [%]	**PM_{grav}** [mg/m^3]	**V_{AG}** [m^3/h]	**Zeit** [%]	**Zeit** [h]	**Anteil PM_{grav}** [%]
Anfahren Warmstart <6h	19.0	25	177	0.9	4.0	**1.0%**
Anfahren Kaltstart >12h	17.8	11	177	0.2	1.0	**0.1%**
Anfahren 6-12h	16.7	18	173	0.1	0.6	**0.1%**
Abfahren	18.3	102	126	10.3	44.0	**31.5%**
Regelbetrieb	7.8	32	301	29.3	125.0	**67.3%**
AUS	20.1	0	56	59.1	252.0	**0%**
Total					427	

Tabelle 4: Eingabeparameter für Berechnung Gesamt-Staubemissionen Kessel 2 und Anteile der Staubemissionen pro Betriebsphase an den Gesamt-Staubemissionen. Die O_2-Konzentrationen entsprechen den Messwerten während den gravimetrischen Staubmessungen der jeweiligen Phase an der Messstelle.

	O_2 [%]	**PM_{grav}**	**V_{AG}**	**Zeit**	**Zeit**	**Anteil PM_{grav}**
	[%]	[mg/m³]	[m³/h]	[%]	[h]	[%]
Anfahren Warmstart <6h	15.4	23	162	2.6	11.0	**2.0%**
Anfahren Kaltstart >12h*	18.4	4	205	0.0	0.2	**0.0%**
Anfahren 6-12h	16.9	13	197	0.1	0.5	**0.1%**
Abfahren	18.3	88	169	19.9	85.0	**62.0%**
Regelbetrieb	9.1	8	376	56.2	240.0	**35.9%**
AUS	20.9	0	13	21.1	90.0	**0%**
Total					427	

* Es gab nur 1 Kaltstart mit mehr als 12h Stillstand des Kessels. Die Kalt-Startmessungen für PM_{grav} wurden nach aktivem Kühlen des Kessels für mehrere Stunden durchgeführt.

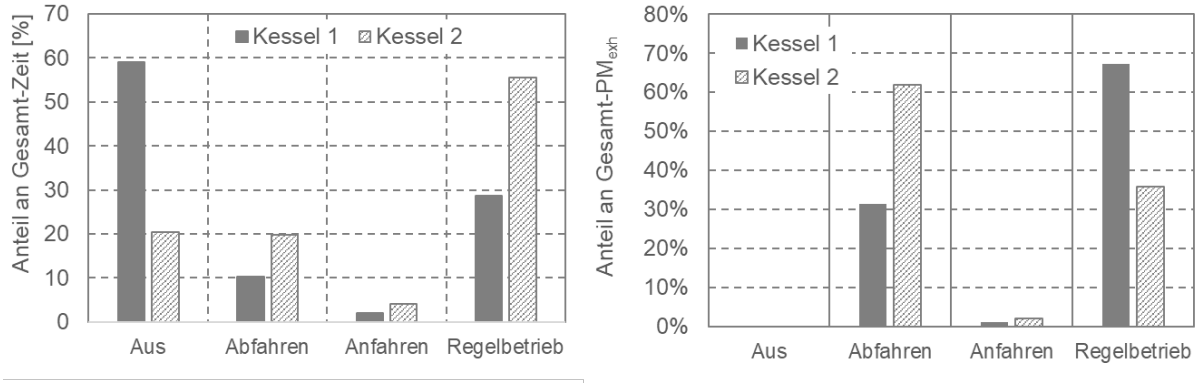


Bild 25: Links: Anteile der Dauer der verschiedenen Betriebsphasen an der gesamten Messperiode. Rechts: Anteile der gravimetrisch bestimmten Staubemissionen (PM_{grav}) Emissionen der verschiedenen Betriebsphase an den Gesamt-PM_{grav}-Emissionen der gesamten Messperiode. Die Anteile wurden mittels der Frachten und Anteile an der Gesamtzeit der jeweiligen Betriebsphasen berechnet. Während der Messperiode gab es 40 An- und Abfahrvorgänge bei Kessel 1 u. 73 bei Kessel 2. Dies entspricht im Durchschnitt rund 6 An- und Abfahrvorgänge der Gesamtanlage pro Tag.

Die Ergebnisse der Frachtberechnungen für Staubemissionen (PM_{grav}) ergeben für die gesamte Messperiode einen normierten Staubwert von rund 27 mg/m_n^3 und 15 mg/Nm^3 für Kessel 1 und Kessel 2 (siehe Tabelle 5). Diese Werte beinhalten für Kessel 1 40 und für Kessel 2 73 An- und Abfahrphasen und sind klar unter dem Emissionsgrenzwert für von 50 mg/Nm^3, der für den Regelbetrieb gilt. Jedoch ist auch zu erkennen, dass die Emissionen während des Ausbrandes bei beiden Kesseln relevant sind. Obwohl das Abfahren nur rund 10% (Kessel 1) bzw. rund 20% (Kessel 2) ausmachen (Bild 25 und Tabelle 5), hat der Ausbrand einen Anteil an den Gesamt-Staubemissionen während der Messperiode von 33% bei Kessel 1 und 65% bei Kessel 2. Dies führt dann im Mittel auch dazu, dass es pro 24h zu einer Grenzwertüberschreitung von 2.5h (~10%) bei Kessel 1 und 4.8h (20%) bei Kessel 2 kommt (Tabelle 11). Bei Kessel 1 kam es während der Messperiode im Mittel zu 2 und bei Kessel 2 zu 4 An- und Abfahrphasen pro Tag. Zusätzlich wurden noch Staubemissionen für beide Kessel simuliert mit einer Erhöhung der Anzahl Starts pro Tag auf 5. Auch mit fünf Starts pro Tag überschreiten beide Kessel die QSH Vorgabe von 20% der Zeit < EGW nur geringfügig (23% für Kessel 1 und 24% für Kessel 2, siehe Tabelle 5)

Tabelle 5: Ergebnisse der Berechnung der Gesamt-Staubemissionen der gesamten Messerperiode. Während der Messperiode gab es 40 An- und Abfahrvorgänge bei Kessel 1 (entspricht rund 2 pro Tag) u. 73 bei Kessel 2 (entspricht rund 4 pro Tag).

		O_2 gewichtet [%]	**PM_{grav} total norm** [mg/Nm3 @13%O_2]	**Zeit PM_{grav} > EGW** [%]	**Zeit PM_{grav} > EGW** [h total]	**Zeit PM_{grav} > EGW** [h /24h]
Kessel 1	**Messperiode**	**11.9**	**27.3**	**10.3**	**44.0**	**2.5**
	2.2x höherer Anteil An- & Abfahren*	14.4	48.9	22.7	96.9	5.4
Kessel 2	**Messperiode**	**10.6**	**14.7**	**19.9**	**85.0**	**4.8**
	1.2x höherer Anteil An- & Abfahren*	11.0	17.6	24.3	103.7	5.8

* Ein 2.2x höhere Anteil bei Kessel 1 und ein 1.2x höherer Anteil von K2 von An- und Abfahren würde 5 Anfahrvorgänge pro Tag ergeben, was gemäss FAQ 8 von QM Holzheizwerke und Cercl'Air die Empfehlungen bzw. Vorgaben für die maximale Anzahl sind. Das ist ein fiktives Rechenbeispiel und wurde nicht anhand von Messungen ermittelt. Für diese Berechnung wurden die Zeiten für An- und Abfahren aus Tabelle 3 und Tabelle 4 den jeweiligen Faktoren multipliziert, der Zeit- Anteil des Standby (AUS) blieben unverändert und der Anteil des Regelbetriebs wurde dementsprechend reduziert.

9 Messbericht – Anlage Standort B

9.1 Messaufbau



Bild 26: Aufbau Gasmessung auf der Anlage am Standort B.



Bild 27: Aufbau der Staubmessung am Standort B. Links: Beide Pumpeneinheiten mit Gaskühler und Massenfluss-Controller für die gravimetrische Staubmessung und beheizter Filterhalter oben im Kaminrohr. Rechts: Testo 380 an Kessel E und beheizter Filterhalter für die gravimetrische Staubmessung vor dem EA an Kessel E.

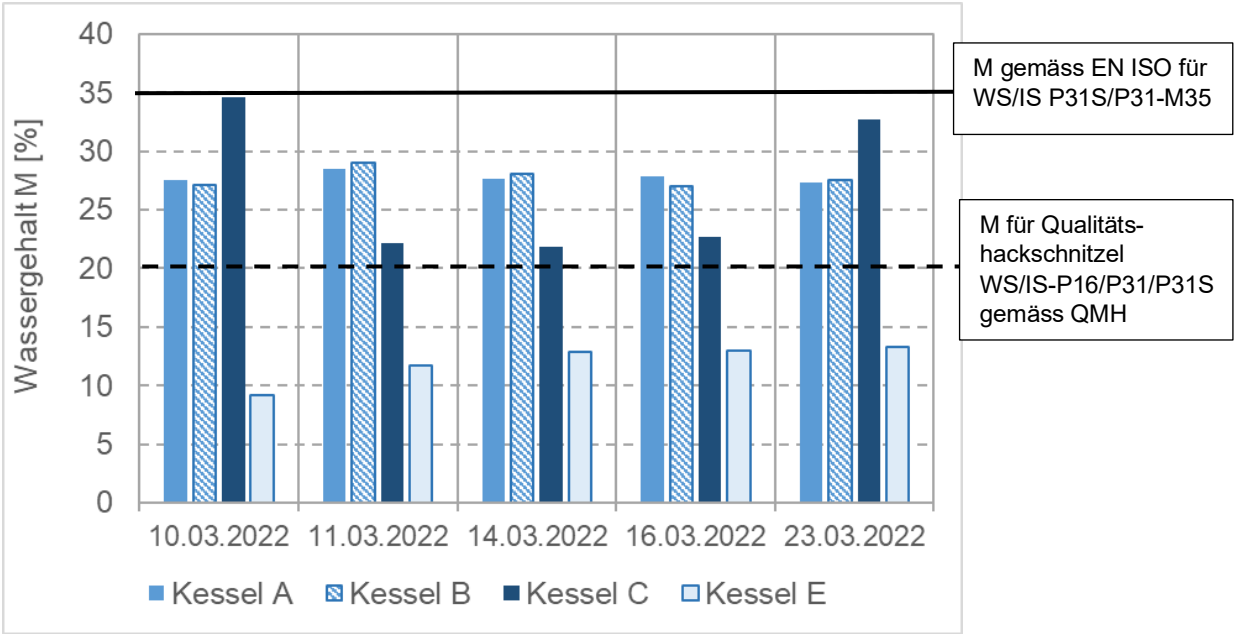
9.2 Brennstoffspezifikationen

- Kessel A und B werden aus dem gleichen Brennstoffsilo beschickt. Kessel C und E verfügen über je ein eigenes Silo.
- Proben wurden direkt aus der Förderschnecke vor dem Kessel genommen

9.2.1 Übersicht Ergebnisse

Kessel			A	B	C	E
Probenahme am	Wassergehalt M	[%]	28	27	35	9
	Stückigkeit Grob (>7mm)	[%]	72	79	88	80
10.03.2022	Stückigkeit <7 mm	[%]	14	8	9	14
	Stückigkeit Feingut (<3 mm)	[%]	14	12	4	6
Probenahme am	Wassergehalt M	[%]	28	29	22	12
	Stückigkeit Grob (>7 mm)	[%]	82	90	84	90
11.03.2022	Stückigkeit <7 mm	[%]	14	8	12	8
	Stückigkeit Feingut (<3 mm)	[%]	3	2	4	2
Probenahme am	Wassergehalt M	[%]	28	28	22	13
	Stückigkeit Grob (>7 mm)	[%]	83	85	90	88
14.03.2022	Stückigkeit <7 mm	[%]	13	10	8	9
	Stückigkeit Feingut (<3 mm)	[%]	4	4	2	3
Probenahme am	Wassergehalt M	[%]	28	27	23	13
	Stückigkeit Grob (>7 mm)	[%]	75	82	94	91
16.03.2022	Stückigkeit <7 mm	[%]	16	12	4	8
	Stückigkeit Feingut (<3 mm)	[%]	9	6	1	1
Probenahme am	Wassergehalt M	[%]	27	27	33	13
	Stückigkeit Grob (>7 mm)	[%]	72	80	97	81
23.03.2022	Stückigkeit <7 mm	[%]	17	12	3	16
	Stückigkeit Feingut (<3 mm)	[%]	11	8	1	2

9.2.2 Wassergehalt M



9.2.3 Stückigkeit

Bestimmung der Stückigkeit

Die Brennstoffproben wurden per Hand gesiebt. Dazu wurden 2 Siebe mit einem Durchmesser von 25 cm mit Maschenweiten von 7 mm und 3 mm mit kreisrunden Lochdurchmesser verwendet. Im ersten Schritt wurde die Brennstoffprobe mit dem 7 mm Sieb gesiebt. Der Anteil, der durch das Sieb hindurchgeht, wird als Anteil < 7mm bezeichnet. Der Anteil, der auf dem Sieb verbleibt, wird als Anteil >7 mm klassifiziert. Im zweiten Schritt wird der <7 mm Anteil mit dem 3 mm Sieb gesiebt. Der Anteil, der bei diesem Schritt durch das Sieb hindurchgeht, wird als Feingutanteil <3 mm bezeichnet.

Die Siebung für den Anteil <7 mm wird nicht mehr in der EN-ISO Norm aufgeführt. Aufgrund des kleinen Siebdurchmessers von nur 25cm war dieser Zwischenschritt jedoch notwendig, um eine Siebung mit dem 3 mm Sieb durchführen zu können.

Es muss hier angemerkt werden, dass diese Siebung einer qualitativen manuellen händischen Siebung entspricht. Das Vorgehen lehnt sich zwar an die EN-ISO Norm an, aber die Resultate können geringfügig von Resultaten einer komplett nach EN-ISO Norm durchgeführten Siebung abweichen. Zum Beispiel muss der hier angegebenen Feingutanteil <3 mm eher als untere Grenze angesehen werden, da die Siebung manuell durchgeführt wurde. Bei einer maschinellen Siebung werden Partikel mit einer Länge >3 mm, die jedoch einen Querschnitt <3 mm aufweisen, mit einer höheren Wahrscheinlichkeit durch das 3 mm Sieb hindurchgehen als bei einer Siebung, die händisch durchgeführt wird.

Resultate Stückigkeit

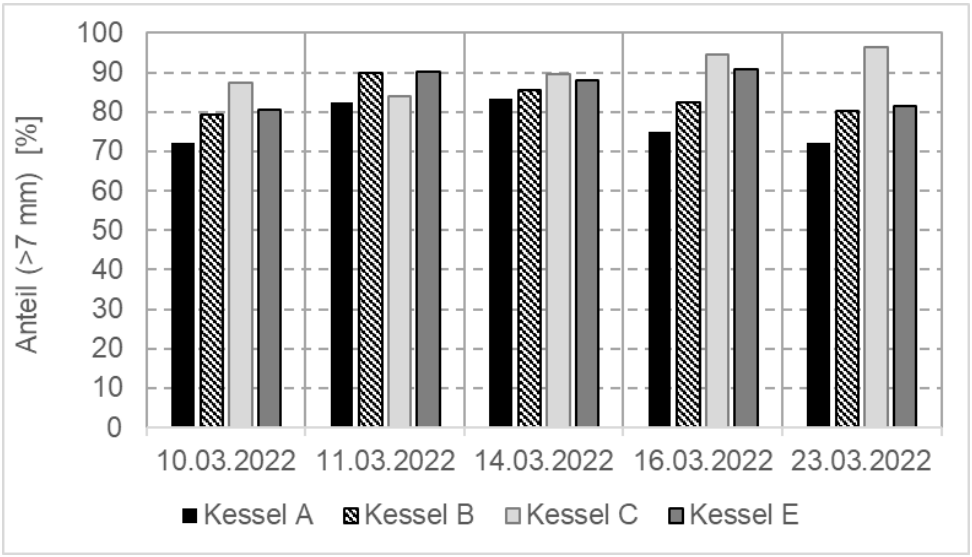
Die Bestimmung der Stückigkeit zeigt deutliche Unterschiede in der Brennstoffbeschaffenheit in den 3 Brennstoffsilos (Kessel A+B, Kessel C und Kessel E).

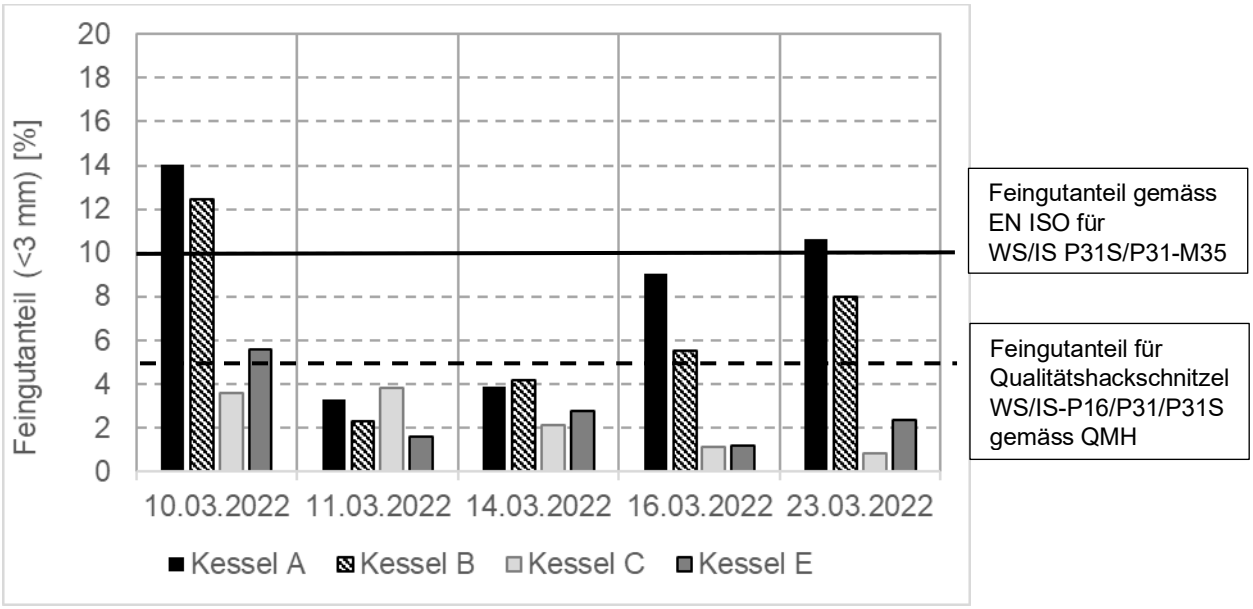
<u>Kessel A und B:</u>

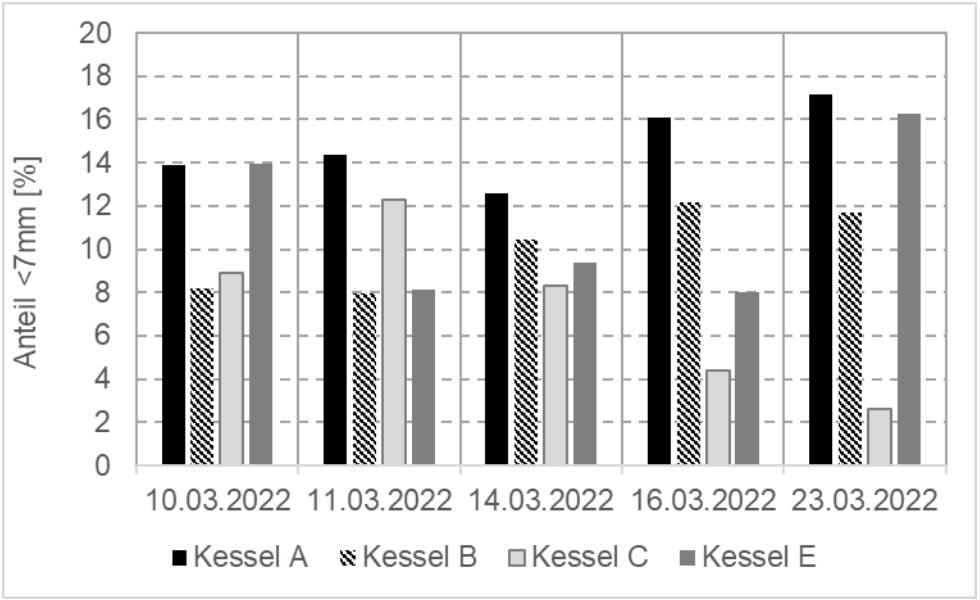
Der Brennstoff für Kessel A und B, weist vor allem am Beginn und am Ende der Messeperiode einen hohen Feingutanteil auf, der teilweise >10% ist (siehe auch Bilder in Kapitel 9.2.4). Kessel A weist zudem mit der Ausnahme einer Probe den höchsten Anteil <7 mm auf. Obwohl Kessel A und B aus demselben Silo beschickt werden, gibt es Unterschiede in der Stückigkeit. Beim Feingutanteil <3 mm hat Kessel B geringfügig tiefere Werte als Kessel A, beim Anteil <7 mm ist der Unterschied mit deutlich tieferen Werten für Kessel B jedoch erheblich. Dieser Unterschied ist wahrscheinlich auf eine Segregation beim Austrag aus dem Silo mit den zwei Förderschnecken zurückzuführen.

<u>Kessel C und E:</u>

Beide Kessel haben einen tiefen Feingutanteil <3 mm, der bis auf eine Probe bei Kessel E den Anforderungen von QM Holzheizwerke für Qualitätshackschnitzel erfüllen würde. Bei Kessel E ist der Anteil <7 mm bei einigen Proben ähnlich wie für Kessel A. Kessel C hat für alle Proben den tiefsten Anteil <7 mm.


Anteil (>7 mm) [%]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
10.03.2022
11.03.2022
14.03.2022
16.03.2022
23.03.2022
Kessel A
Kessel B
Kessel C
Kessel E


Feingutanteil (<3 mm) [%]
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
10.03.2022
11.03.2022
14.03.2022
16.03.2022
23.03.2022
Kessel A
Kessel B
Kessel C
Kessel E
Feingutanteil gemäss EN ISO für WS/IS P31S/P31-M35
Feingutanteil für Qualitätshackschnitzel WS/IS-P16/P31/P31S gemäss QMH


Anteil <7mm [%]
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
10.03.2022
11.03.2022
14.03.2022
16.03.2022
23.03.2022
Kessel A
Kessel B
Kessel C
Kessel E

9.2.4 Bilder einzelner Brennstoffproben

Datum	10.03.2022	14.03.2022	23.03.2022
Kessel A			
Kessel B			
Kessel C			
Kessel E			

9.2.5 Klassifizierung Brennstoffe

Klassifizierung von Brennstoffen und Partikelgrössen basierend auf der EN ISO 17225-1:2014 und der EN ISO 17225-4:2013

Tabelle 6: Klassifizierung von Brennstoffen und Partikelgrössen basierend auf der EN ISO 17225-1:2014 und der EN ISO 17225-4:2013

Kessel	Partikelgrösse	Feingutanteil	Wassergehalt	ISO Bezeichnung
Kessel A	P31S P31	F05 bis F15	20-35	WS-P31S-M35 / WS-P31-M35
Kessel B	P31S P31	F05 bis F15	20-35	WS-P31S-M35 / WS-P31-M35
Kessel C	P31S	F05	20-35	WS-P31S-M35 / IS-P31S-M35
Kessel E	P31S	F05	15-20*	IS-P31S-F05-M20

* WS…Waldrest(rund)holz; IS…Industrierestholz

**tieferer Wert für Holzhackschnitzel bzw. Restholz aus der Holzverarbeitung nicht aufgeführt

P31 und P31S bedeutet gemäss EN ISO 17225-4:2014, dass der Hauptteil (min. 60 %) eine Partikelgrösse von 3.15 mm bis 31.5 mm aufweisen muss, die maximale Länge ≤150 mm und der maximale Querschnitt <4 cm^2 betragen dürfen und der Anteil von Partikel >45 mm <6 % sein muss.

Ergänzend zur EN ISO 17225-1 und 17225-4:2014 definiert QM Holzheizwerke die Brennstoffklasse Qualitäts-Hackschnitzel aus Waldrest(rund)holz und Industrierestholz. P31 und P31S Brennstoffe dürfen dann einen Wassergehalt von 15-20 % und einen Feingutanteil von maximal 5 % aufweisen.

Gemäss Manual des Kesselherstellers sollte nur Hackgut der Klasse A1-B1 gemäss EN ISO 17225-4:2014 (max. M35 und P16S-P31S) eingesetzt werden.

9.3 Auswertung CO-Emissionsmessung

9.3.1 Vergleich der Betriebsphasen und Emissionen der Gesamtanlage

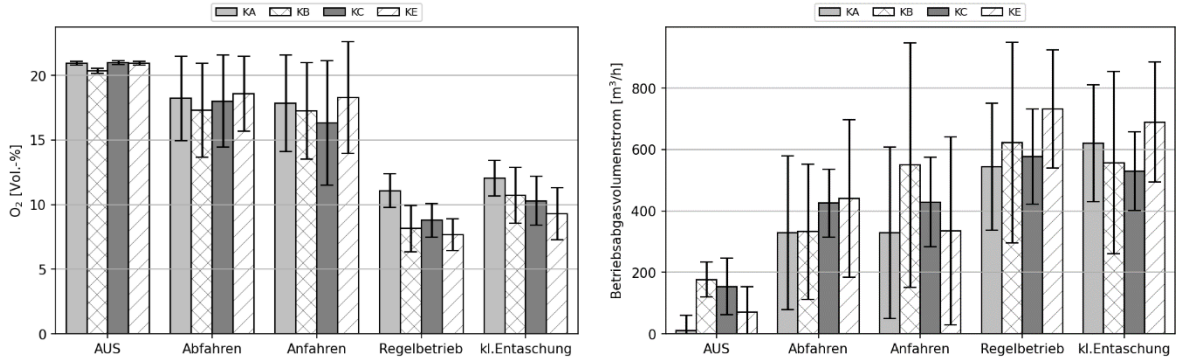


Bild 28: Vergleich der O_2 Konzentrationen (links) und Betriebsabgasvolumenstrom (V_{AG}, rechts) der verschiedenen Betriebsphasen. Es sind die Mittelwerte über alle Datenpunkte der jeweiligen Betriebsphase dargestellt.

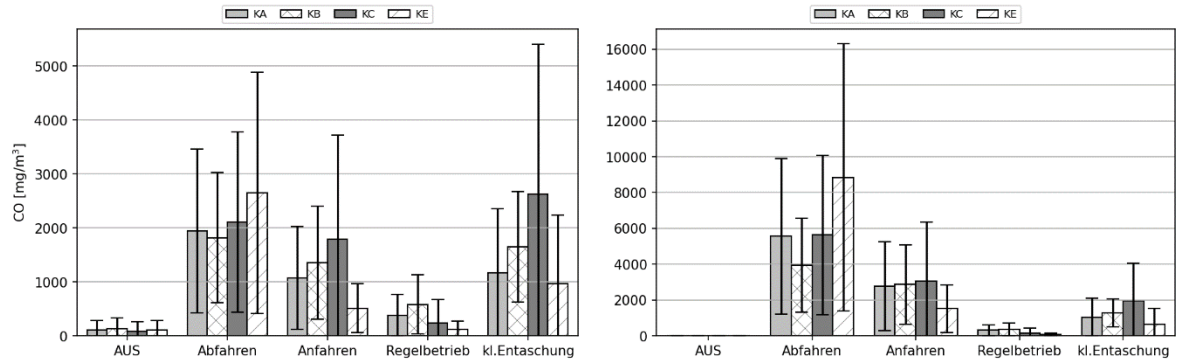


Bild 29: Vergleich der CO Emissionen der verschiedenen Betriebsphasen. Links: CO nicht normiert. Rechts: CO normiert auf 13% O_2. Es sind die Mittelwerte über alle Datenpunkte der jeweiligen Betriebsphase dargestellt. Da O_2 deutlich für AUS deutlich grösser ist als 18% sind, wurden für die CO-Werte der Betriebsphase AUS keine Normierung auf Bezugssauerstoff durchgeführt.

Tabelle 7: Übersicht über die Werte von O_2 und den CO Emissionen, die in Bild 28 und Bild 29 dargestellt sind.

	O_2 [%]				CO [mg/m$_n^3$]				CO* normiert [mg/m$_n^3$ @ 13% O_2]			
	KA	KB	KC	KE	KA	KB	KC	KE	KA	KB	KC	KE
Anfahren	17.9	17.2	16.3	18.3	1074	1359	1793	511	2771	2862	3052	1514
Abfahren	18.2	17.3	18.0	18.6	1947	1818	2109	2652	5563	3931	5624	8839
kl. Entaschung	12.0	10.7	10.3	9.3	1164	1650	2623	965	1035	1281	1961	660
Regelbetrieb	11.1	8.1	8.8	7.7	380	580	239	121	307	360	157	73
AUS/Standby	20.9	20.3	21.0	21.0	112	127	89	104	**	**	**	**

* Die Medianwerte des Regelbetriebs sind: KA = 223 mg/m^3, KB = 246 mg/m^3, KC = 81 mg/m^3, KE = 46 mg/m^3
** Da O_2 deutlich grösser ist als 18%, wurden die Werte nicht normiert.

Mit die Staubfracht in [g/h], dem Betriebsabgasvolumenstrom V_{AG} [m^3/h] und der gesamten Zeit in [h] der jeweiligen Betriebsphase innerhalb der gesamten Messperiode wurde auch die Gesamt-Emissionsfracht für alle Kessel berechnet (siehe Bild 30).

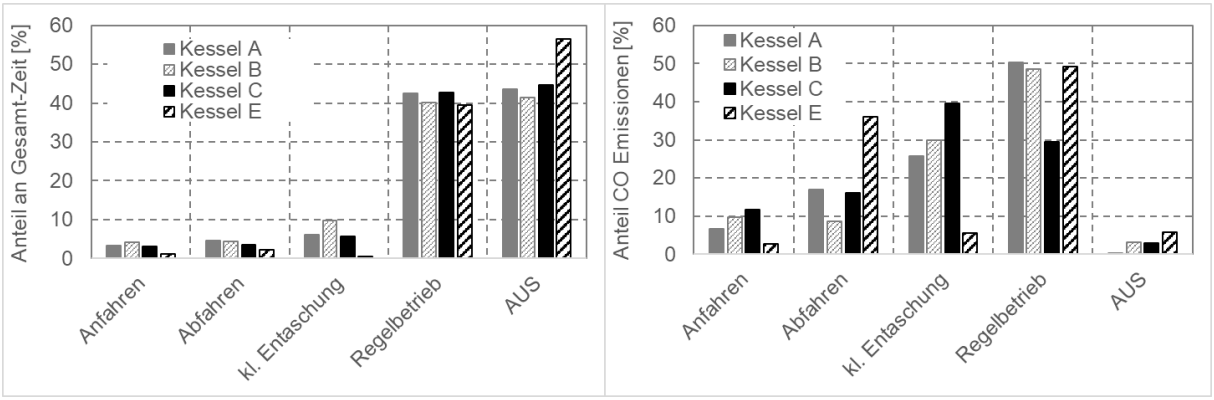


Bild 30: Links: Anteile der Dauer der verschiedenen Betriebsphasen an der gesamten Messperiode. Rechts: Anteile der Emissionen der verschiedenen Betriebsphase an den Gesamt-Emissionen der gesamten Messperiode. Die Anteile wurden mittels der Frachten und Anteile an der Gesamtzeit der jeweiligen Betriebsphasen berechnet.

Zudem wurden die CO Emissionen der Gesamt-Anlage berechnet (Bild 31 und Bild 32). Dies würde einer Messung in einem gemeinsamen Kamin, in dem die Abgase aller Kessel zusammengeführt werden, entsprechen. Die verschiedenen Betriebsphasen der Kessel sind dabei überlagert und können dementsprechend nicht mehr unterschieden werden. Die Berechnung der Emissionen der Gesamtanlage erfolgt über die Emissionsfrachten und einem mit dem Betriebsabgasvolumenstrom (V_{AG}) gewichteten O_2. Die Berechnungen sind in Kapitel 7 genauer beschrieben

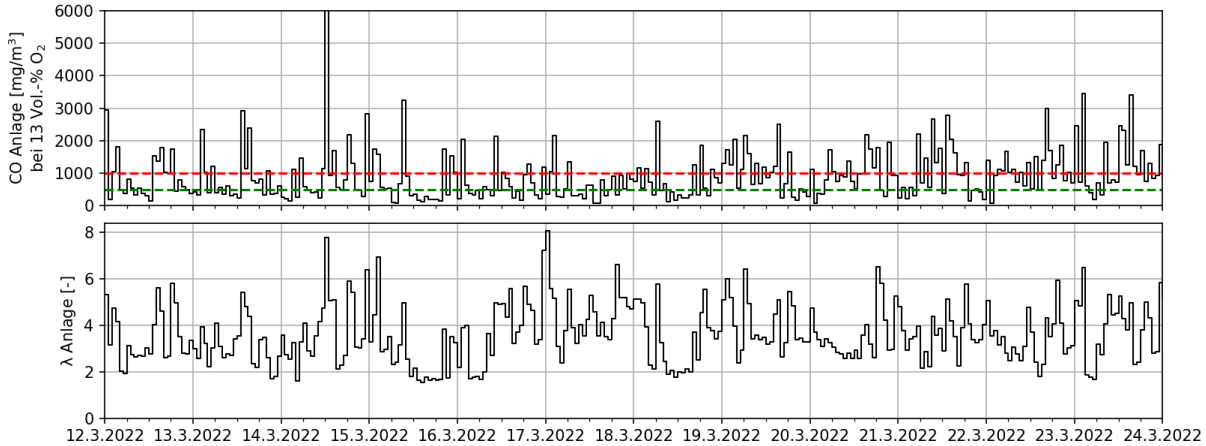


Bild 31: 1h Mittelwerte der Emissionen der gesamten 4-Kesselanlage. Die Gesamtemissionen wurden über die Fracht berechnet und beinhalten alle Betriebsphasen (Anfahren, Abfahren, Regelbetrieb, grosse und kleine Entaschung, Standby) Grüne Linie = EGW von 500 mg/m³. Rote Linie = 2x EGW.

Die CO-Emissionen der Gesamtanlage zeigen, dass der Emissionsgrenzwert von 500 mg/m³ während der gesamten Messperiode nur zu rund 45 % der Zeit unterschritten wird (Bild 34). Dies ist einerseits auf die hohen CO-Emissionen während des Anfahrens, Abfahrens und der kleinen Entaschung, des hohen Anteils dieser Phasen (12 %- 18 % bei Kessel A-C, siehe Bild 30) an der Gesamtzeit der LZM (inkl. Zeit im Standby) sowie auf den Betriebsabgasvolumenstroms (V_{AG}) dieser Phasen zurückzuführen. V_{AG} während der kleinen Entaschung ist im Vergleich zum Regelbetrieb nicht reduziert und für die Phasen An- und Abfahren ist V_{AG} im Vergleich zum Regelbetrieb zwar tiefer, aber nicht einmal halbiert.

Zudem kommt es häufig auch zu einer ungünstigen Überlagerung von verschiedenen Betriebsphasen der Kessel. Wenn die Werte der kleinen Entaschung mit dem Mittelwert der CO-Emissionen von 30min vor und 30min nach der kleinen Entaschung ersetzt werden, sind die CO-Emissionen der Gesamtanlage zu rund 58% der Zeit der gesamten Messperiode < EGW. Wenn die CO-Emissionen der Kessel A-C mit den Werten von Kessel E ersetzt werden, sind die CO-Emissionen der Gesamtanlage zu rund 82% der Zeit < EGW.

Der Unterschied zwischen den Kurven «original» und «ohne kl. Entaschung» in Bild 32 zeigt den Anteil der Zeit des Betriebszustands «kleine Entaschung» an der gesamten Messperiode. Dieser ist auch Bild 30 zu sehen und beträgt im Mittel ca. 5-10% für die Kessel A-C.

Die Kurven «original» und «ohne kl. Entaschung» beinhalten insgesamt 120 An- und Abfahrvorgänge während 16 Tagen. Dies bedeutet, dass jeder Kessel rund 2 und die Gesamtanlagen somit rund 8 An- und Abfahrvorgänge pro Tag aufweisen.

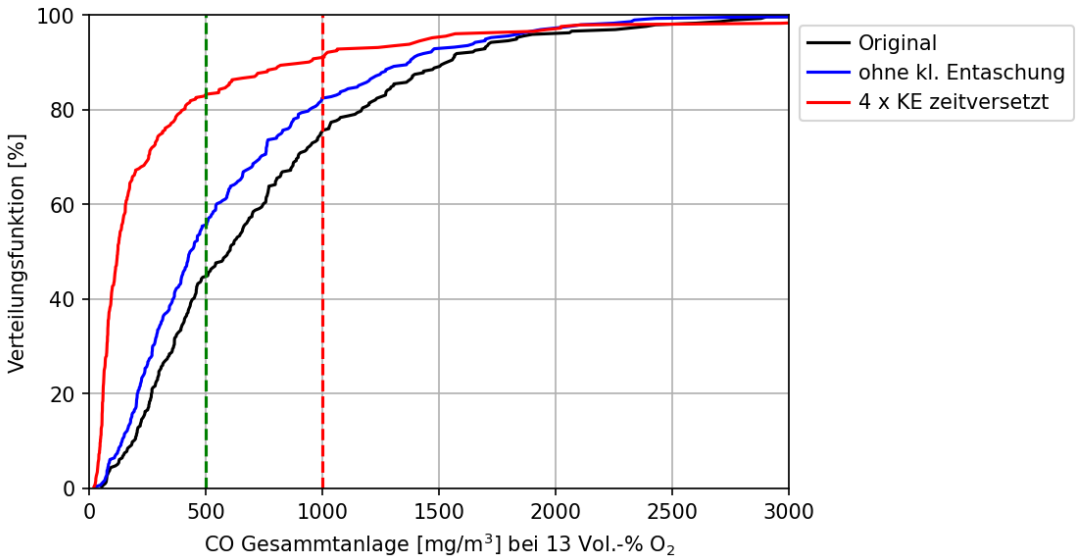


Bild 32: Vergleich der Summenkurven der 1h Mittelwerte der gesamten Emissionen der 4-Kesselanlage am Standort B für mehrere Varianten. Die Kurven entsprechen dem Feuerungsbetrieb, da Die O_2-Werte der Gesamtanlage über die gesamte Messperiode mit Ausnahme von ein paar wenigen Stunden (< 8 h), immer unter 18 % lagen.

Original: Entspricht den gemessenen Gesamt-Emissionen der 4 Kesseln des Feuerungsbetriebs (Regelbetrieb inklusive kleiner Entaschung sowie An- und Abfahrvorgängen bei O_2 <18%, siehe auch Bild 13)

ohne kl. Entaschung: Für diese Kurve wurden alle Werte bei jedem Kessel, in denen eine kleinen Entaschung durchgeführt wurde, mit dem Mittelwert der CO-Emissionen von 30min vor und 30min nach der kleinen Entaschung ersetzt.

4 x KE zeitversetzt: Für diese Kurve wurden ausschliesslich die CO-Emissionen von Kessel E herangezogen. Um eine 4-Kessel-Kaskade zu simulieren, wurden die Werte von Kessel E mit einem Zeitversatz von 4 h für Kessel A, 8 h für Kessel B und 16 h für Kessel C zusammen mit den original Messwerten übereinandergelegt.

Die Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse der Summenkurve der CO-Emissionen der Gesamtanlage am Standort B in Bild 32 enthalten die folgenden Einschränkungen:

- Die Kessel wurden vorgängig nicht auf die «nicht-optimale» Brennstoffqualität optimiert. Es ist davon auszugehen, dass durch Optimierung verschiedener Einstellungen die CO-Emissionen hätten gesenkt werden können, insbesondere jene der Startphasen und der kleinen Entaschung.
- Weitere Optimierungen bezüglich der kleinen Entaschung wären einfach umsetzbar, z.B. das Vergrössern des Intervalls. Gegebenenfalls könnte die kleine Entaschung sogar gänzlich

unterbunden werden, da diese eventuell gar nicht benötigt wird. Kleinere Kessel derselben Bauart benötigen nämlich teilweise gar keine kleine Entaschung.

- Die LRV-Grenzwerte und QSH-Methode sind für die Beurteilung von Einzelkessel gedacht, wo es zu keiner Überlagerung von verschiedenen Betriebsphasen kommt.
    - Für die Beurteilung von automatisch mit Brennstoff beschickten Holzbacköfen zwischen 70 kW-500 kW gelten zum Beispiel höhere LRV-Grenzwerte als für konventionelle automatische Holzfeuerungen mit derselben Leistung. Auch bei grossen gewerblich genutzten Holzbacköfen kommt es oftmals zu einer Überlagerung von verschiedenen Betriebsphasen [4].
    - Die Ergebnisse für Holzhackschnitzel, beruhen auf einer begrenzten Datenlage (1 Anlage) und das Generalisieren der Aussagen auf alle Seriengeräte ist dementsprechend mit Unsicherheiten behaftet. Vor allem bezüglich der «kleinen Entaschung» gibt es Unterschiede zwischen verschiedenen Kesseltypen und Herstellern. Teilweise wird gar keine «kleine Entaschung» durchgeführt, wie zum Beispiel bei
        - kleineren Kesseln vom Hersteller am Standort B je nach Brennstoff
        - Serien-Geräten des Herstellers am Standort A

9.3.2 Kessel A - QSH Auswertung

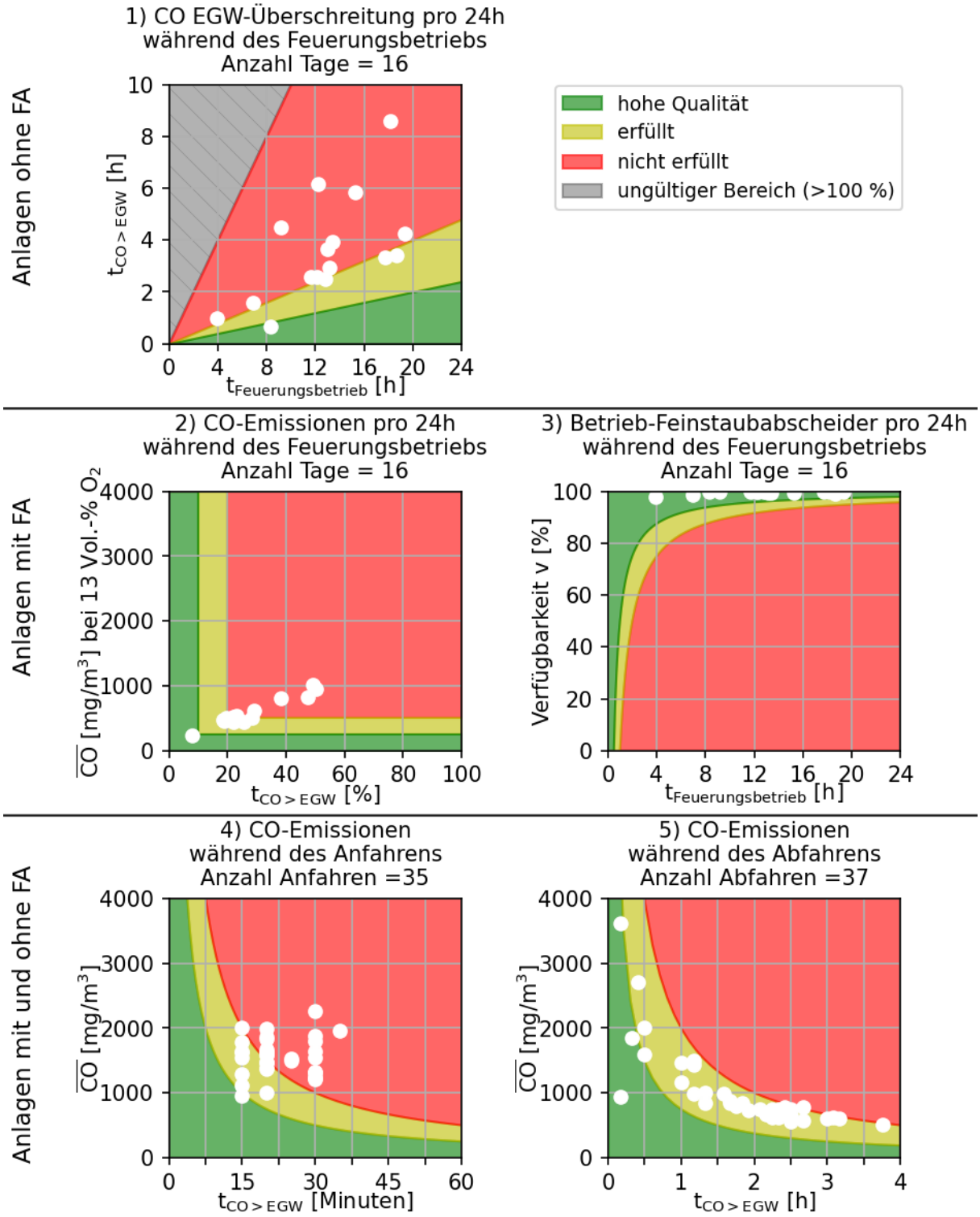


Bild 33: QSH Auswertung für Kessel A für die gesamte Messperiode. Grafiken ganz unten beinhalten neben den «regulären» Ab- und Anfahrphasen auch jene, die aufgrund einer grossen Entaschung durchgeführt wurden.

9.3.2.1 Kriterien LRV Art 15 Ziffer 4 - Beurteilung der Emissionen der kontinuierlichen Messung des Regelbetriebs (ohne Start und Stopp)

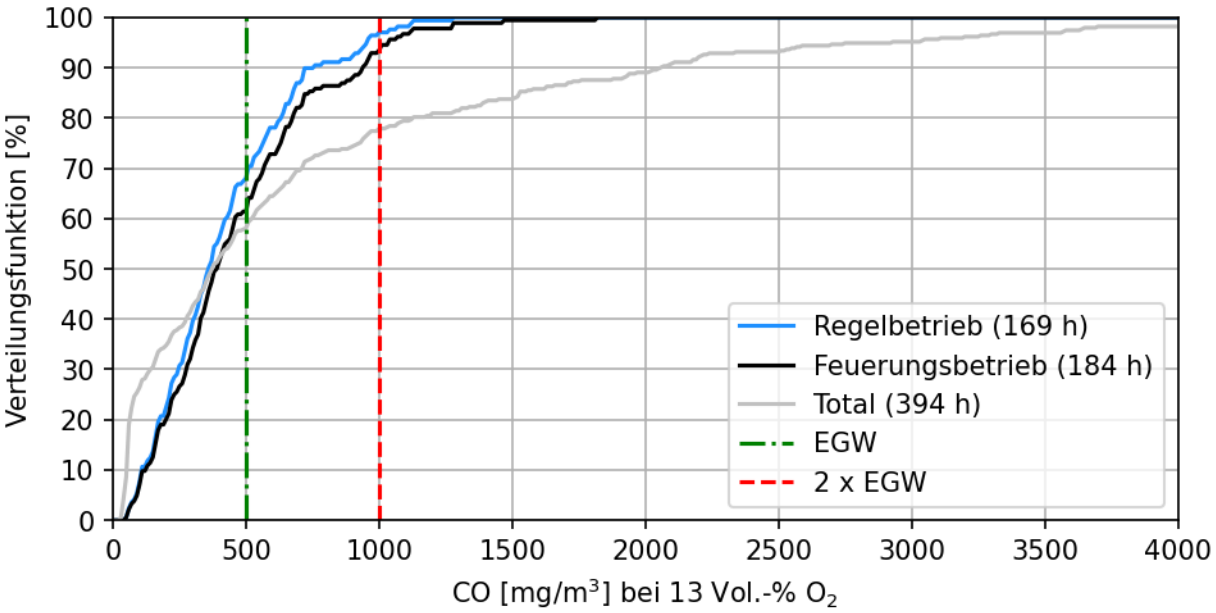


Bild 34: Summenkurve der 1h Mittelwerte von Kessel A. EGW = Emissionsgrenzwert. Feuerungsbetrieb beinhaltet neben dem Regelbetrieb auch die Anfahrphasen und die Zeitpunkte der Abfahrphasen in denen O_2 < 18 Vol.-% war. Total beinhaltet alle Werte der gesamten Messperiode, also die Werte des Feuerungsbetriebs, aber auch die Werte der Betriebsphase Abfahren, die nicht zum Feuerungsbetrieb gezählt werden (wo O_2 > 18% ist) und die Werte während der Kessel im Standby ist.

1h Mittelwert CO Regelbetrieb < 2-facher EGW (Anforderung 100%)	98 % (168 / 171)
1h Mittelwert NOx Regelbetrieb < 2-facher EGW (Anforderung 100%)	100 % (171 / 171)
24h Mittelwert CO Regelbetrieb < EGW (Anforderung 100%)	88 % (14 / 16)
24h Mittelwert NOx Regelbetrieb < EGW (Anforderung 100%)	62 % (10 / 16)

9.3.2.2 minimale Tagesheizlast QM Holzheizwerke FAQ 12

Tagesheizlast > Anforderung FAQ12 (Tag, Anforderung 100%) [5]

Tagesmittelwert Q_{Soll} > Q_{min} (Q_{min} = 20%)	100 % (16 / 16)

9.3.3 Kessel A - Kleine Entaschung

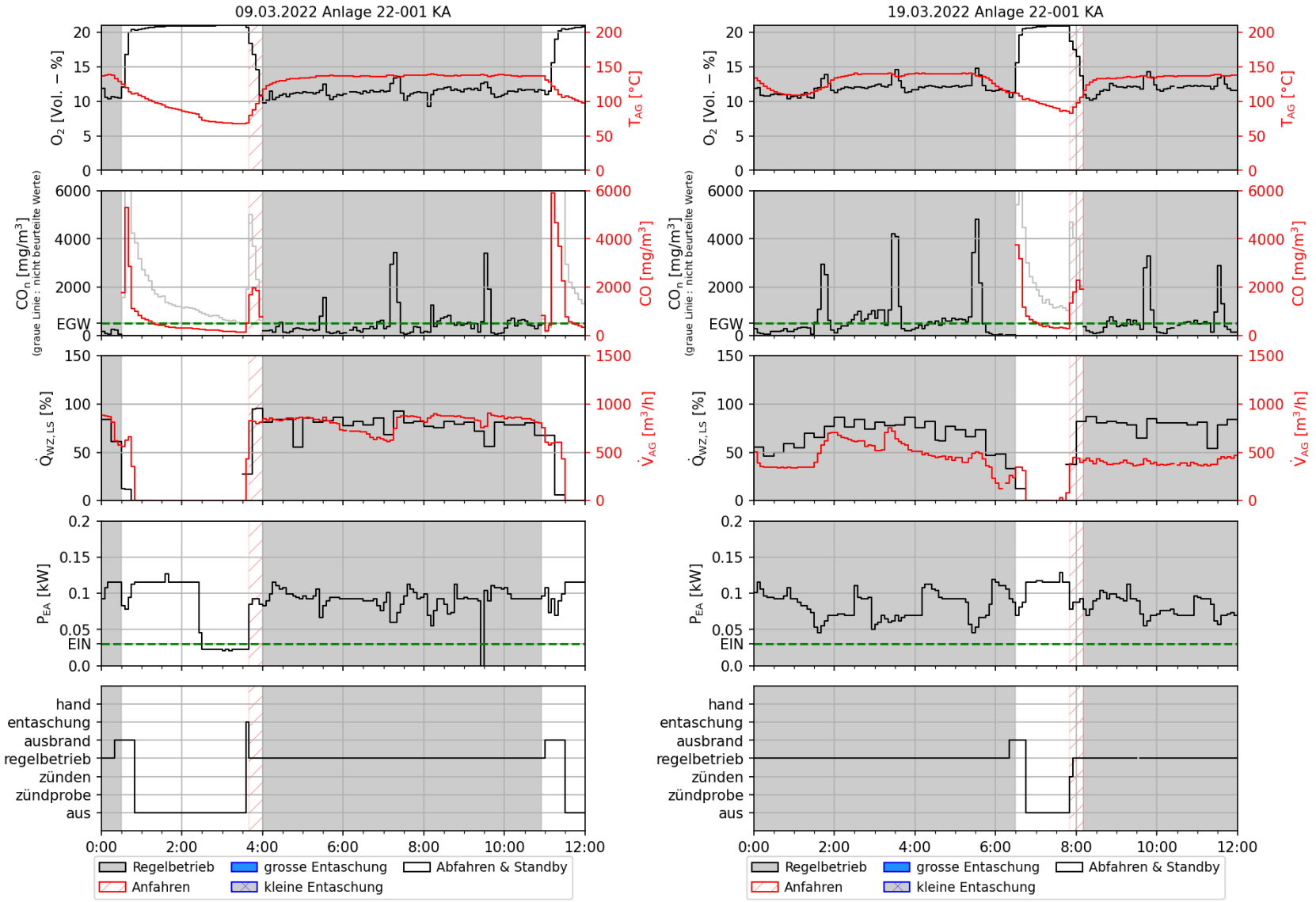


Bild 35: Zeitverläufe von 5min Mittelwerten von zwei ausgewählten Tagen. Schwarzes Signal CO_n = CO normiert auf 13% O_2, rotes Signal CO = CO nicht normiert. Graues Signal CO_n = CO normiert für jene Phasen, die nach LRV nicht beurteilt werden. Die kleine Entaschung wird in der Regel alle 90 min durchgeführt und führt bei Kessel A zu deutlich erkennbaren periodischen Emissionsspitzen, wo auch O_2 im Vergleich zum Regelbetrieb erhöht ist.

9.3.3.1 Kriterien LRV Art 15 Ziffer 4 - Beurteilung der Emissionen der kontinuierlichen Messung des Regelbetriebs (ohne Start und Stopp) ohne Phasen mit kleiner Entaschung

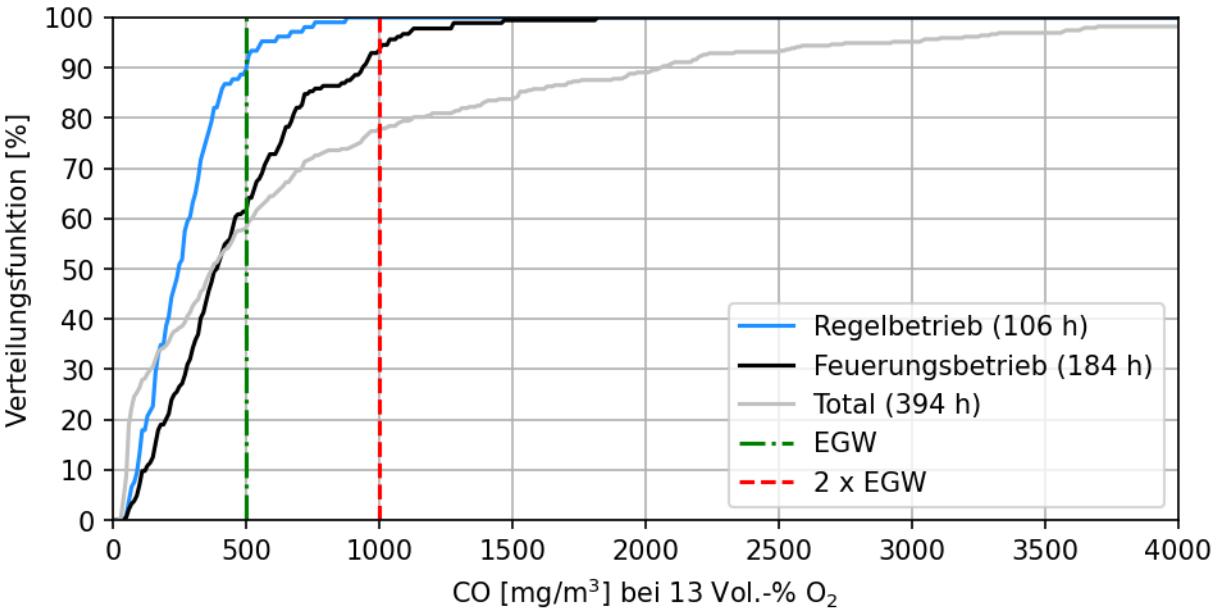


Bild 36: Summenkurve der 1h Mittelwerte von Kessel A ohne Phasen mit kleiner Entaschung. EGW = Emissionsgrenzwert. Feuerungsbetrieb beinhaltet neben dem Regelbetrieb auch die An- und Abfahrphasen.

1h Mittelwert CO Regelbetrieb < 2-facher EGW (Anforderung 100%)	100 % (108 / 108)
1h Mittelwert NOx Regelbetrieb < 2-facher EGW (Anforderung 100%)	100 % (108/ 108)
24h Mittelwert CO Regelbetrieb < EGW (Anforderung 100%)	100 % (16 / 16)
24h Mittelwert NOx Regelbetrieb < EGW (Anforderung 100%)	81 % (13 / 16)

9.3.4 Kessel B - QSH Auswertung

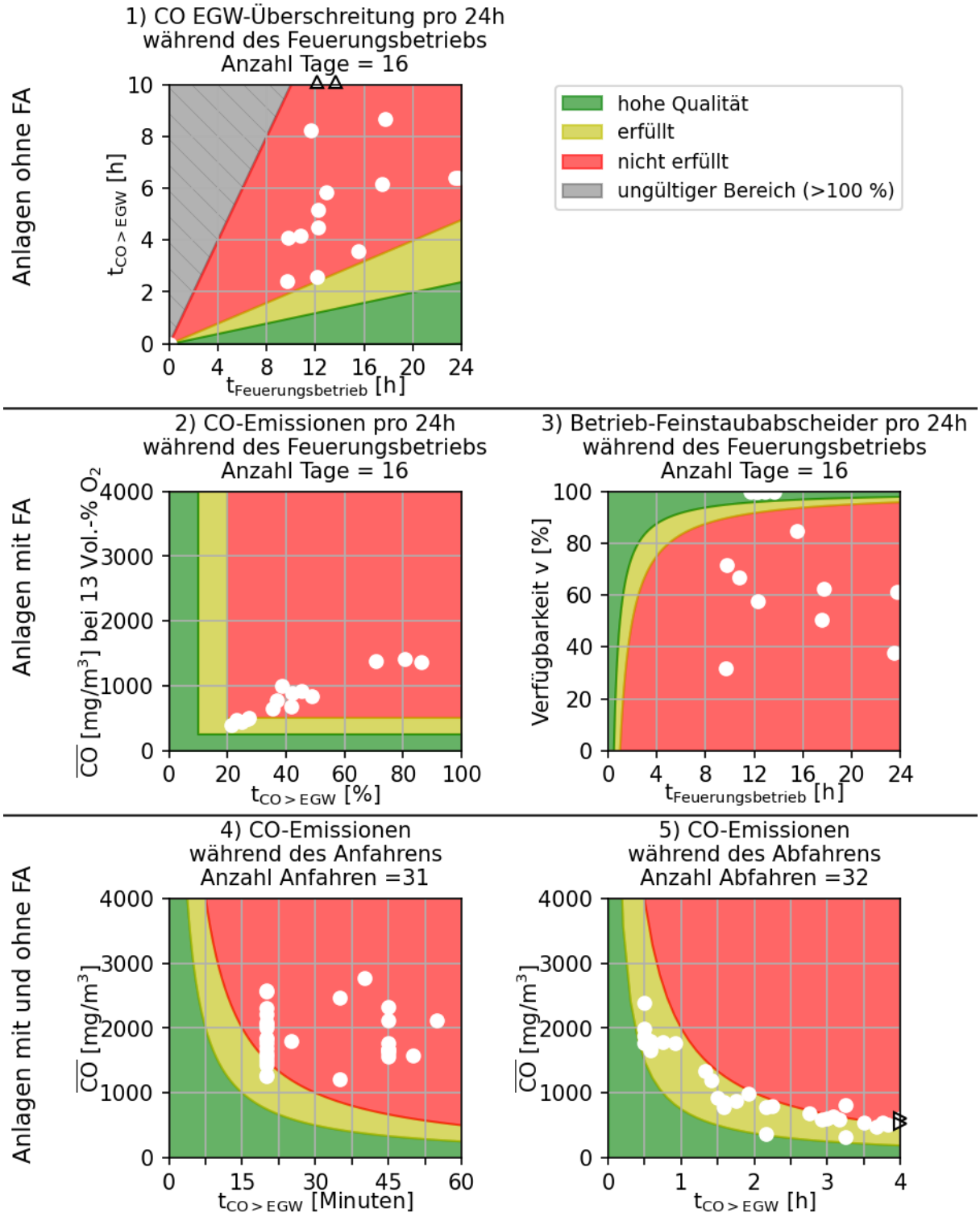


Bild 37: QSH Auswertung für Kessel B für die gesamte Messperiode. Grafiken ganz unten beinhalten neben den «regulären» Ab- und Anfahrphasen auch jene, die aufgrund einer grossen Entaschung durchgeführt wurden. Punkte, die mit einem Dreieck markiert sind, befinden sich ausserhalb gezeigten Bereichs.

9.3.4.1 Kriterien LRV Art 15 Ziffer 4 - Beurteilung der Emissionen der kontinuierlichen Messung des Regelbetriebs (ohne Start und Stopp)

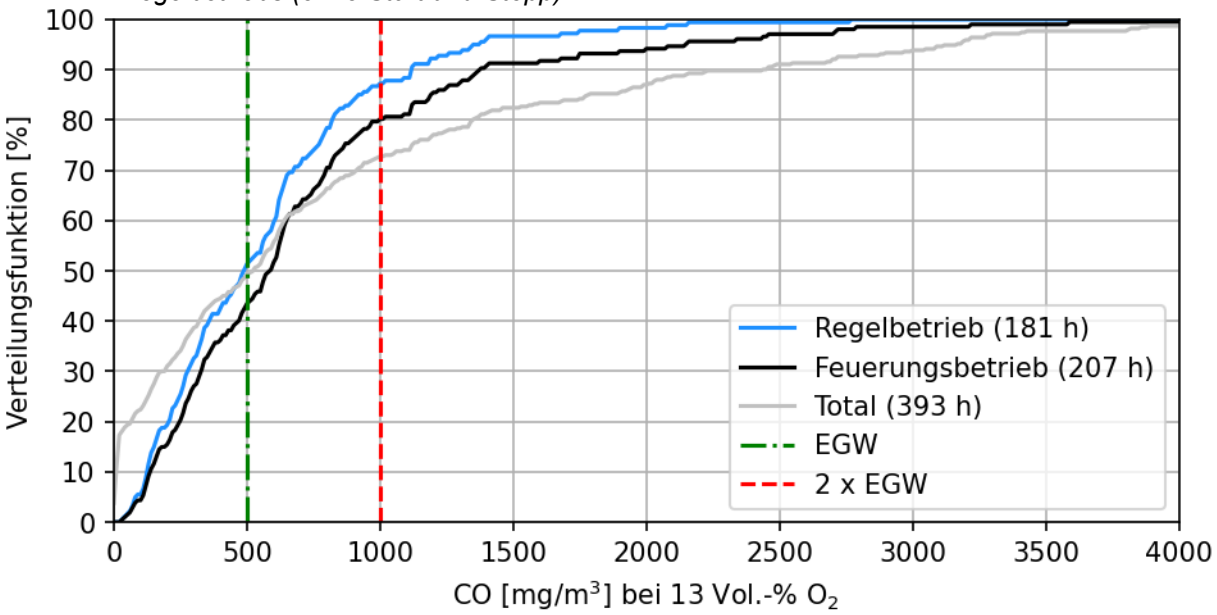


Bild 38: Summenkurve der 1h Mittelwerte von Kessel B. EGW = Emissionsgrenzwert. Feuerungsbetrieb beinhaltet neben dem Regelbetrieb auch die Anfahrphasen und die Zeitpunkte der Abfahrphasen in denen O_2 < 18 Vol.-% war. Total beinhaltet alle Werte der gesamten Messperiode, also die Werte des Feuerungsbetriebs, aber auch die Werte der Betriebsphase Abfahren, die nicht zum Feuerungsbetrieb gezählt werden (wo O_2 > 18% ist) und die Werte während der Kessel im Standby ist.

1h Mittelwert CO Regelbetrieb < 2-facher EGW (Anforderung 100%)	88 % (161 / 182)
1h Mittelwert NOx Regelbetrieb < 2-facher EGW (Anforderung 100%)	100 % (182 / 182)
24h Mittelwert CO Regelbetrieb < EGW (Anforderung 100%)	62 % (10 / 16)
24h Mittelwert NOx Regelbetrieb< EGW (Anforderung 100%)	81 % (13 / 16)

9.3.4.2 minimale Tagesheizlast QM Holzheizwerke FAQ 12

Tagesheizlast > Anforderung FAQ12 (Tag, Anforderung 100%) [5]

Tagesmittelwert Q_{Soll} > Q_{min} (Q_{min} = 20%) 100 % (13 / 13)

9.3.5 Kessel B - Kleine Entaschung

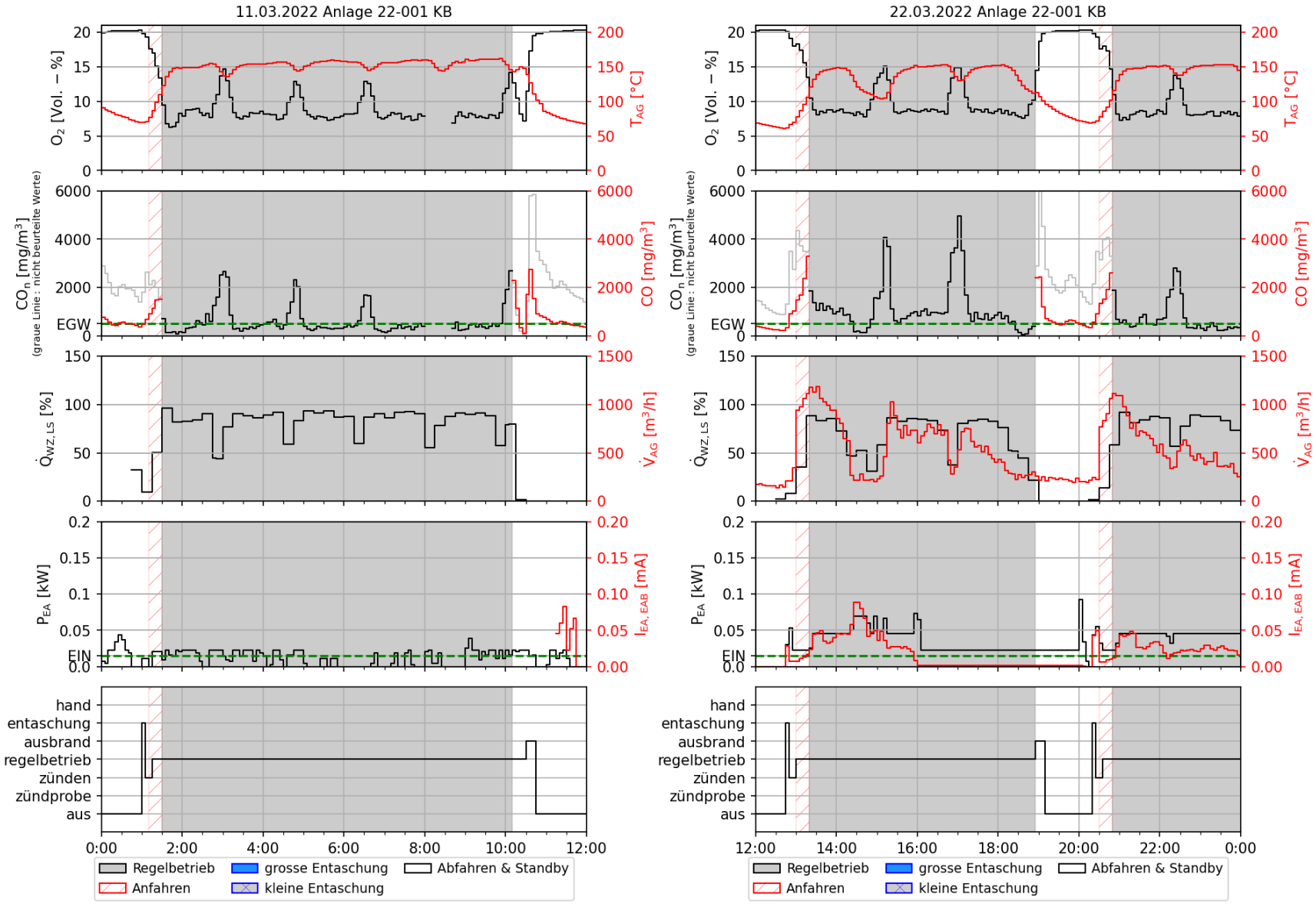


Bild 39: Zeitverläufe von 5min Mittelwerten von zwei ausgewählten Tagen. Schwarzes Signal CO_n = CO normiert auf 13% O_2, rotes Signal CO = CO nicht normiert. Graues Signal CO_n = CO normiert für jene Phasen, die nach LRV nicht beurteilt werden. Die kleine Entaschung wird in der Regel alle 90 min durchgeführt und führt bei Kessel B zu deutlich erkennbaren periodischen Emissionsspitzen, wo auch O_2 im Vergleich zum Regelbetrieb erhöht ist.

9.3.5.1 Kriterien LRV Art 15 Ziffer 4 - Beurteilung der Emissionen der kontinuierlichen Messung des Regelbetriebs (ohne Start und Stopp) ohne Phasen mit kleiner Entaschung

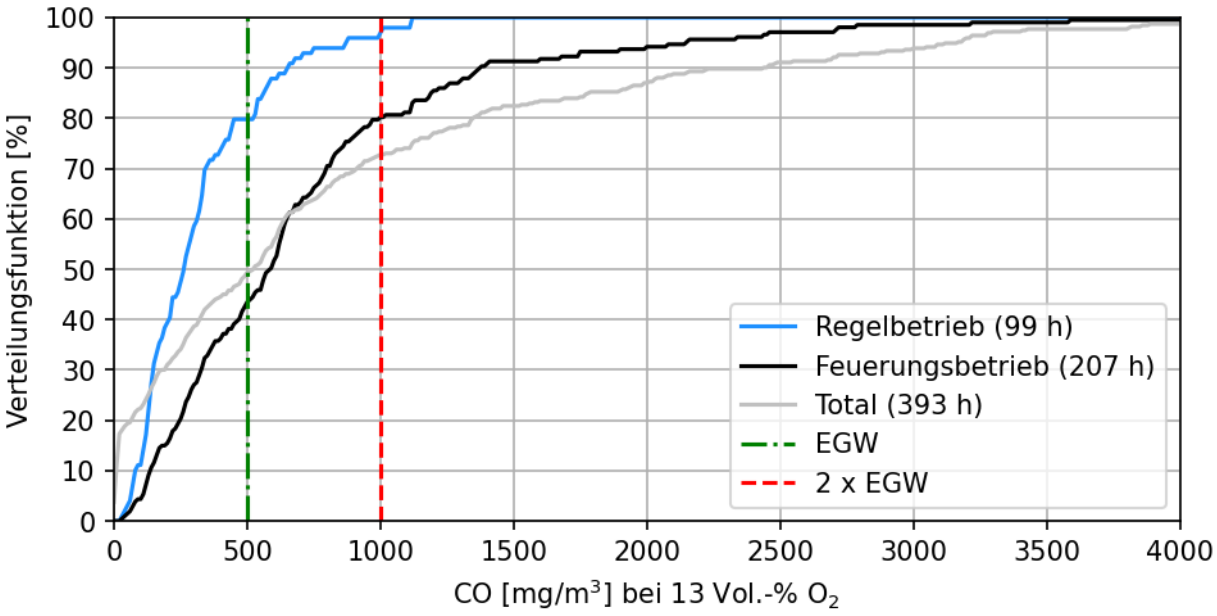


Bild 40: Summenkurve der 1h Mittelwerte von Kessel B ohne Phasen mit kleiner Entaschung. EGW = Emissionsgrenzwert. Feuerungsbetrieb beinhaltet neben dem Regelbetrieb auch die Anfahrphasen und die Zeitpunkte der Abfahrphasen in denen O_2 < 18 Vol.-% war. Total beinhaltet alle Werte der gesamten Messperiode, also die Werte des Feuerungsbetriebs, aber auch die Werte der Betriebsphase Abfahren, die nicht zum Feuerungsbetrieb gezählt werden (wo O_2 > 18% ist) und die Werte während der Kessel im Standby ist.

1h Mittelwert CO < 2-facher EGW (Anforderung 100%)	98 % (98 / 100)
1h Mittelwert NOx < 2-facher EGW (Anforderung 100%)	100 % (100 / 100)
24h Mittelwert CO Regelbetrieb < EGW (Anforderung 100%)	88 % (14 / 16)
24h Mittelwert NOx Regelbetrieb< EGW (Anforderung 100%)	94 % (15 / 16)

9.3.6 Kessel C – QSH Auswertung gesamte Periode

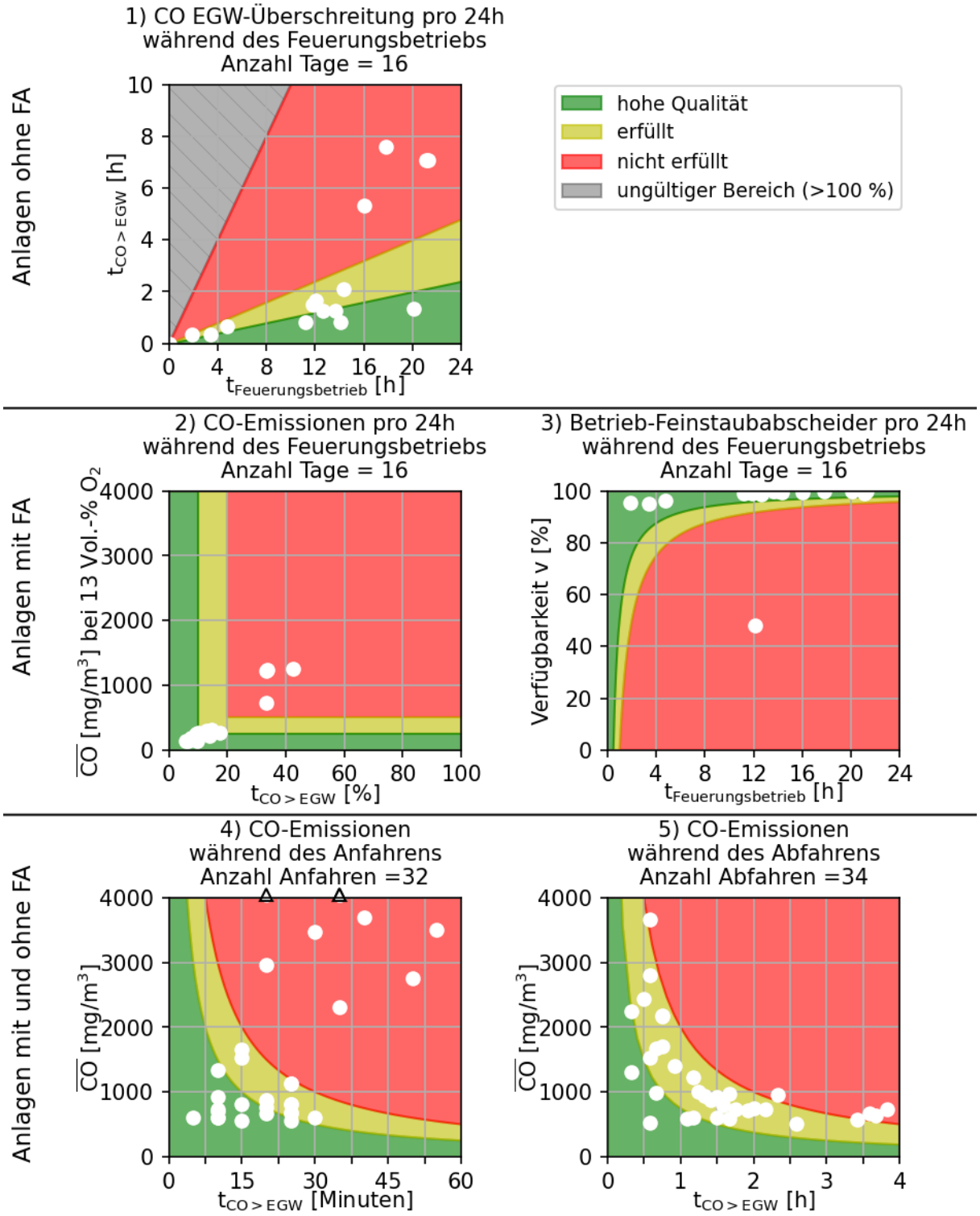


Bild 41: QSH Auswertung für Kessel C für die gesamte Messperiode. Grafiken ganz unten beinhalten neben den «regulären» Ab- und Anfahrphasen auch jene, die aufgrund einer grossen Entaschung durchgeführt wurden. Punkte, die mit einem Dreieck markiert sind, befinden sich ausserhalb gezeigten Bereichs.

9.3.6.1 Kriterien LRV Art 15 Ziffer 4 - Beurteilung der Emissionen der kontinuierlichen Messung des Regelbetriebs (ohne Start und Stopp)

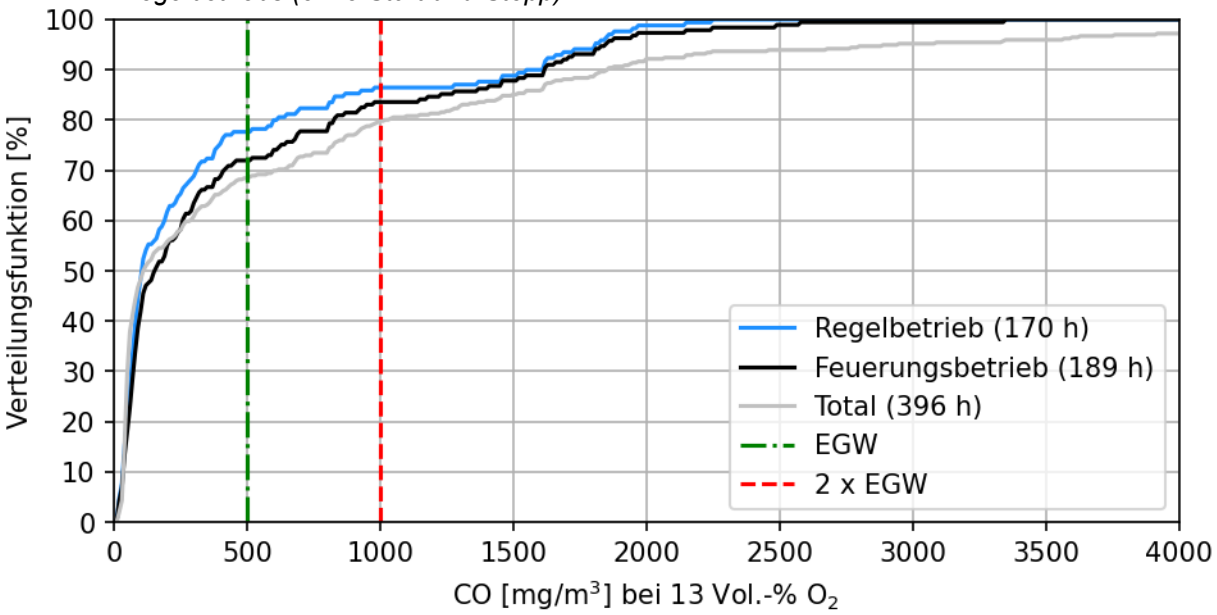


Bild 42: Summenkurve der 1h Mittelwerte von Kessel C. EGW = Emissionsgrenzwert. Feuerungsbetrieb beinhaltet neben dem Regelbetrieb auch die Anfahrphasen und die Zeitpunkte der Abfahrphasen in denen O_2 < 18 Vol.-% war. Total beinhaltet alle Werte der gesamten Messperiode, also die Werte des Feuerungsbetriebs, aber auch die Werte der Betriebsphase Abfahren, die nicht zum Feuerungsbetrieb gezählt werden (wo O_2 > 18% ist) und die Werte während der Kessel im Standby ist.

1h Mittelwert CO < 2-facher EGW (Anforderung 100%)	87 % (148 / 171)
1h Mittelwert NOx < 2-facher EGW (Anforderung 100%)	100 % (171 / 171)
24h Mittelwert CO Regelbetrieb < EGW (Anforderung 100%)	75 % (12 / 16)
24h Mittelwert NOx Regelbetrieb< EGW (Anforderung 100%)	94 % (15 / 16)

9.3.6.2 minimale Tagesheizlast QM Holzheizwerke FAQ 12

Tagesheizlast > Anforderung FAQ12 (Tag, Anforderung 100%) [5]

Tagesmittelwert Q_{Soll} > Q_{min} (Q_{min} = 20%)	94 % (15 / 16)

9.3.7 Kessel C – QSH Auswertung nur Zeitraum 11.03 bis 22.03

Dieser Zeitraum beinhaltet nur Tage, in denen Holzhackschnitzel aus unbehandeltem Restholz mit tiefem Wasser- und Feingutanteil verbrannt wurden (siehe Kapitel 9.2).

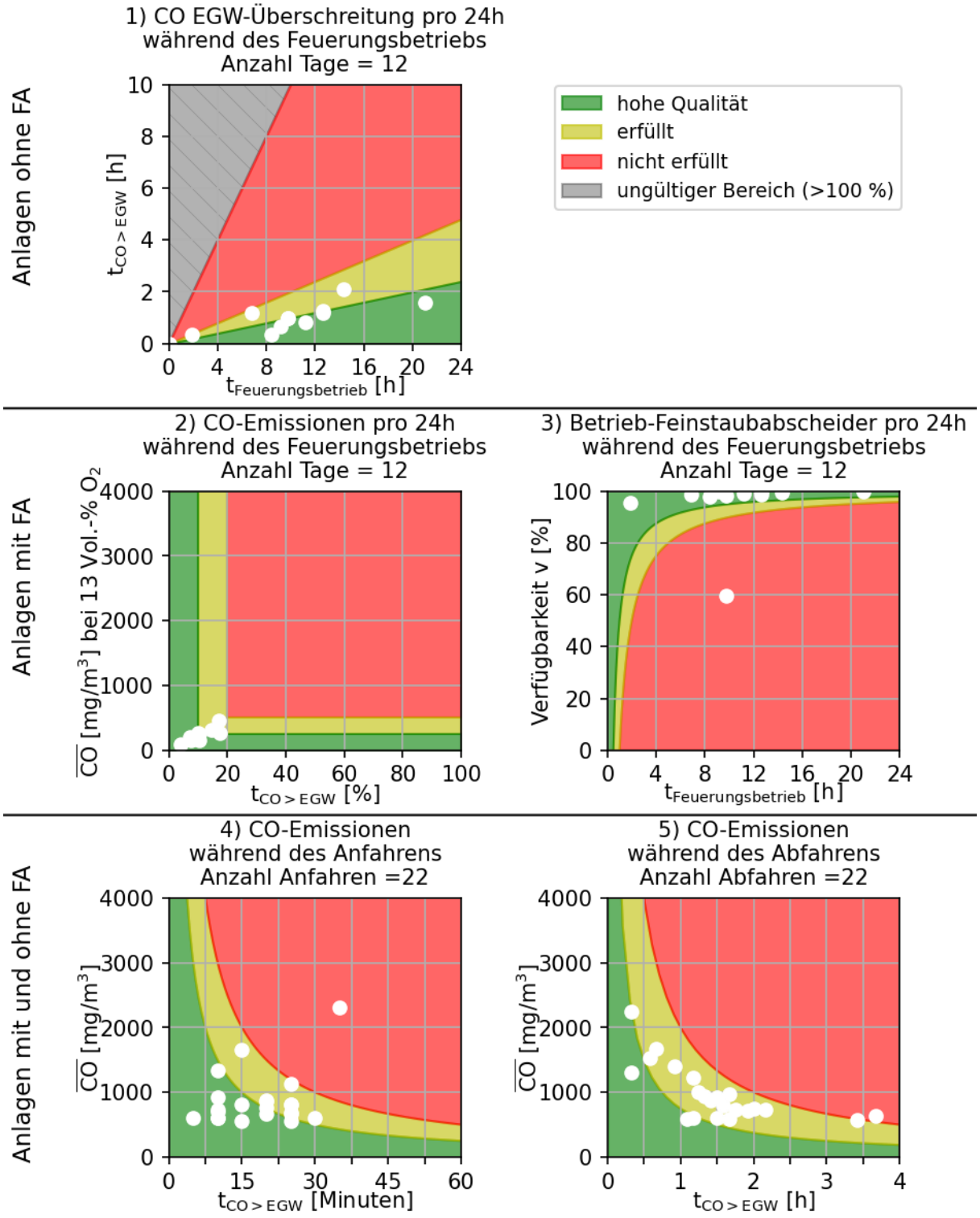


Bild 43: QSH Auswertung für Kessel C für jene Tage, an denen Restholz mit geringem Wassergehalt und Feingutanteil verbrannt wurden. Grafiken ganz unten beinhalten neben den «regulären» Ab- und Anfahrphasen auch jene, die aufgrund einer grossen Entaschung durchgeführt wurden. Punkte, die mit einem Dreieck markiert sind, befinden sich ausserhalb gezeigten Bereichs.

9.3.7.1 Kriterien LRV Art 15 Ziffer 4 - Beurteilung der Emissionen der kontinuierlichen Messung des Regelbetriebs (ohne Start und Stopp)

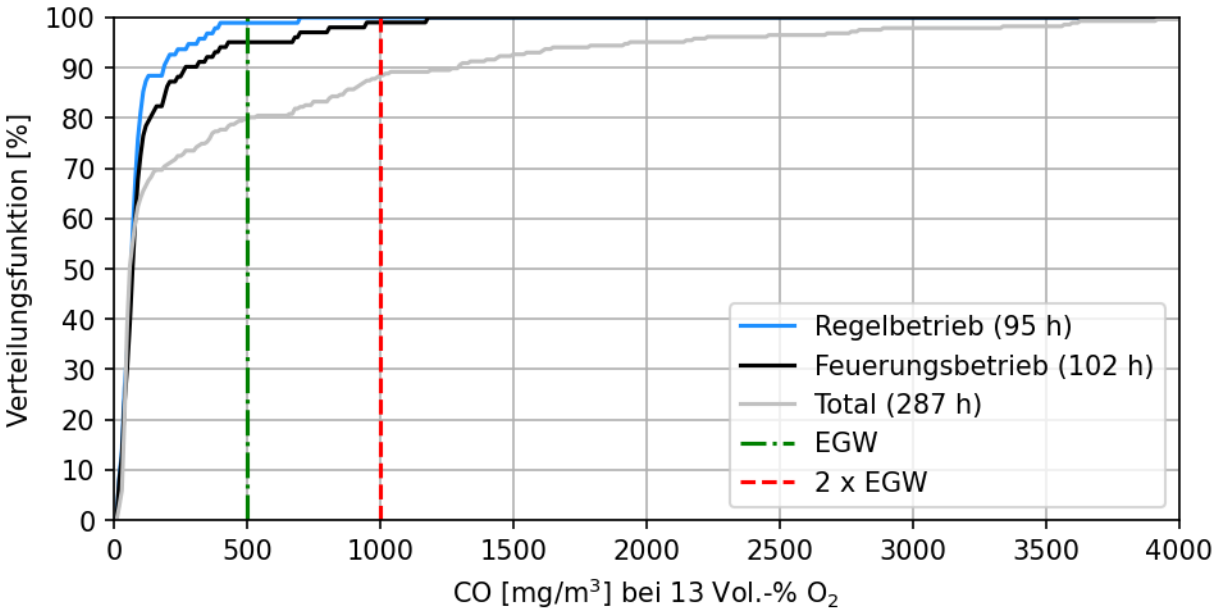


Bild 44: Summenkurve der 1h Mittelwerte von Kessel C von jenen Tagen, an denen Hackschnitzel aus Restholz mit geringem Feingutanteil und Wassergehalt eingesetzt wurden. EGW = Emissionsgrenzwert Feuerungsbetrieb beinhaltet neben dem Regelbetrieb auch die Anfahrphasen und die Zeitpunkte der Abfahrphasen in denen O_2 < 18 Vol.-% war. Total beinhaltet alle Werte der gesamten Messperiode, also die Werte des Feuerungsbetriebs, aber auch die Werte der Betriebsphase Abfahren, die nicht zum Feuerungsbetrieb gezählt werden (wo O_2 > 18% ist) und die Werte während der Kessel im Standby ist.

1h Mittelwert CO Regelbetrieb < 2-facher EGW (Anforderung 100%)	100 % (95 / 95)
1h Mittelwert NOx Regelbetrieb < 2-facher EGW (Anforderung 100%)	100 % (95 / 95)
24h Mittelwert CO Regelbetrieb < EGW (Anforderung 100%)	92 % (11 / 12)
24h Mittelwert NOx Regelbetrieb < EGW (Anforderung 100%)	92 % (11 / 12)

9.3.7.2 minimale Tagesheizlast QMH FAQ 12

Tagesheizlast > Anforderung FAQ12 (Tag, Anforderung 100%)

Tagesmittelwert Q_{Soll} > Q_{min} (Q_{min} = 20%)	92 % (11 / 12)

9.3.8 Kessel C – Kleine Entaschung

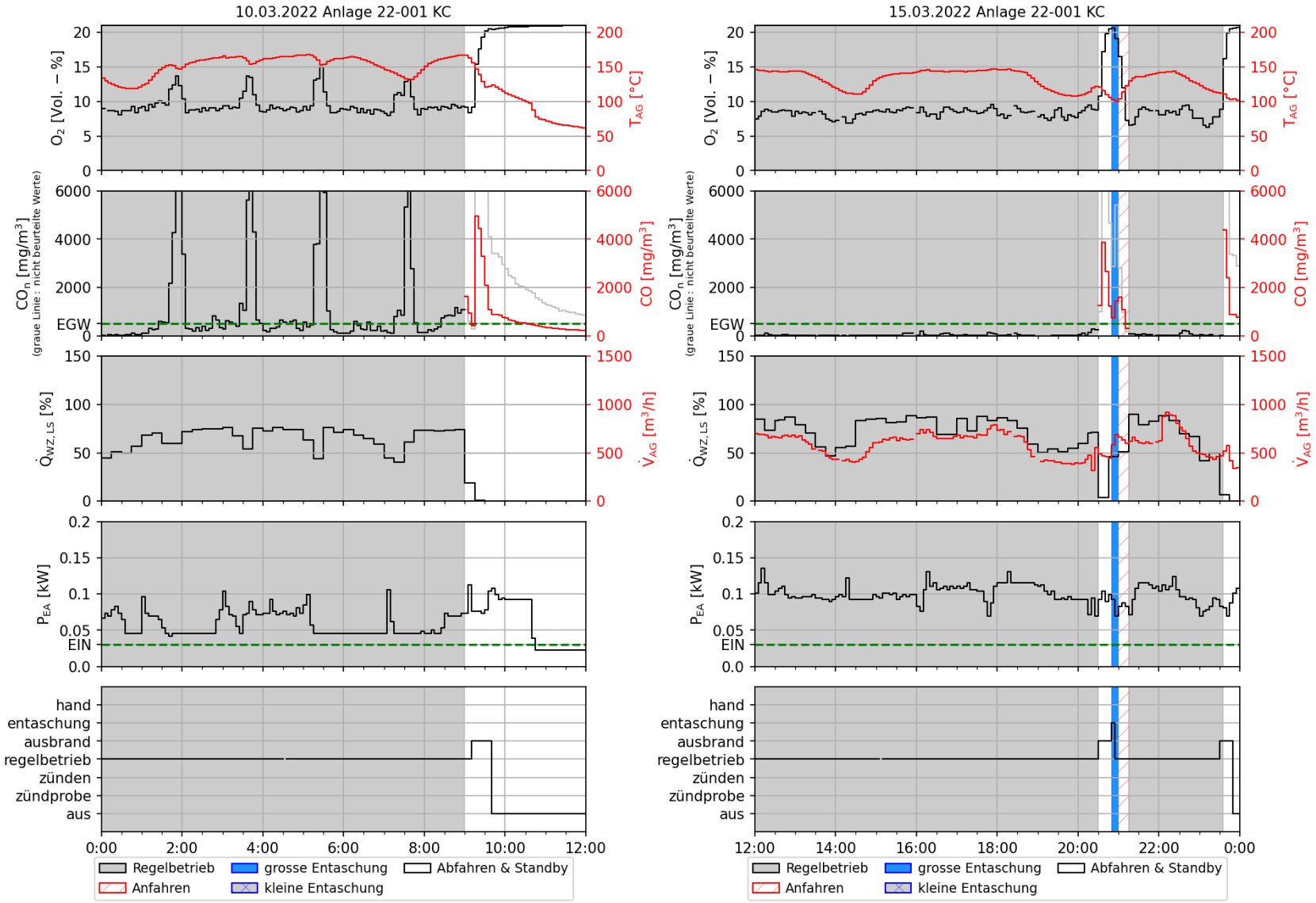


Bild 45: Zeitverläufe von 5min Mittelwerten von zwei ausgewählten Tagen. Schwarzes Signal CO_n = CO normiert auf 13% O_2, rotes Signal CO = CO nicht normiert. Links: Zeitverlauf eines Tages mit Waldhackschnitzel und Wassergehalt >30%. Hier sind die periodischen Emissionsspitzen aufgrund der kleinen Entaschung deutlich erkennbar. Rechts: Zeitverlauf eines Tages mit Hackschnitzel aus Restholz mit geringem Wasser- und Feingutanteil. Hier sind kleinen Entaschungen nicht mehr vom Regelbetrieb zu unterscheiden.

9.3.9 Kessel E – QSH Auswertung

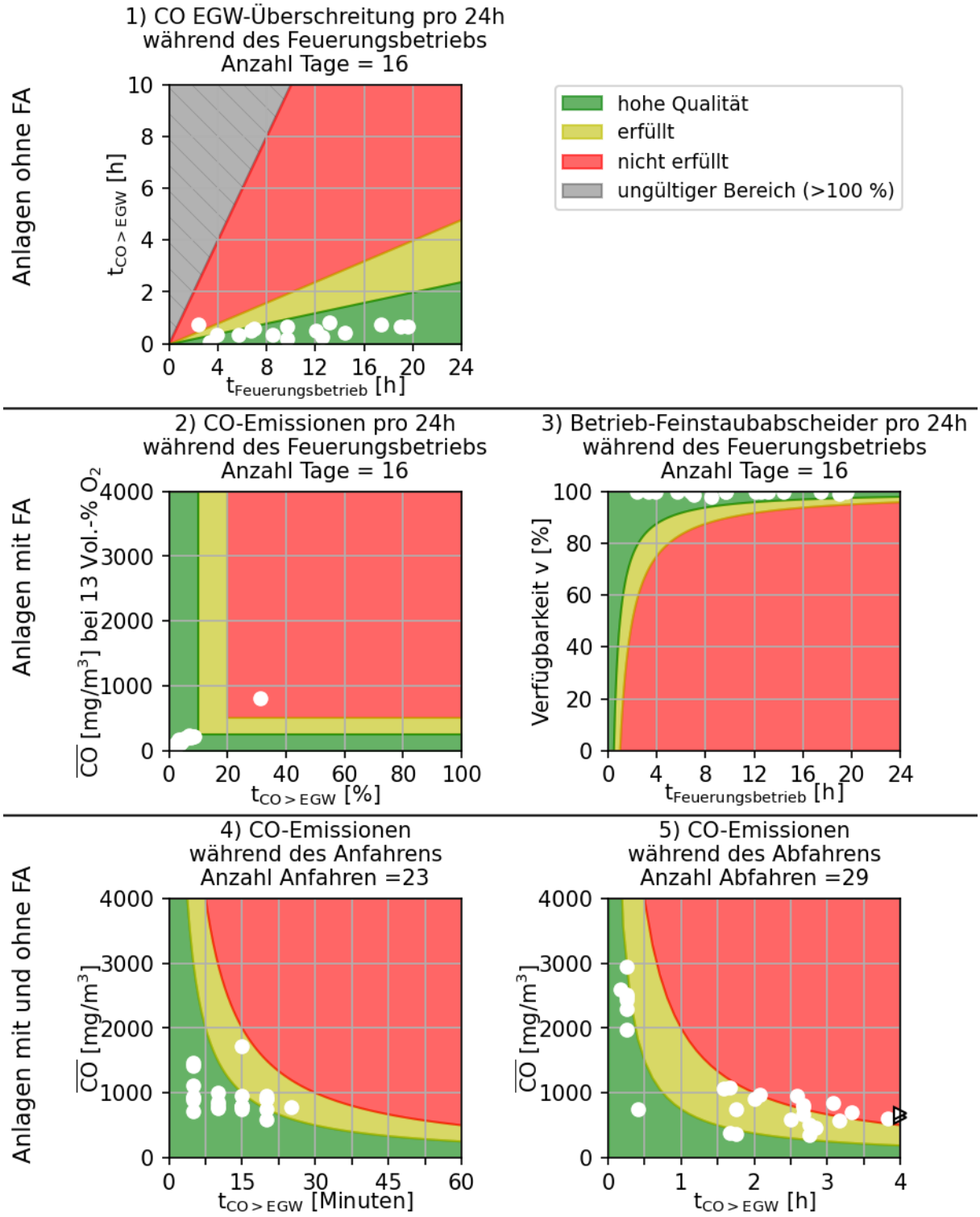


Bild 46: QSH Auswertung für Kessel E für die gesamte Messperiode. Grafiken ganz unten beinhalten neben den «regulären» Ab- und Anfahrphasen auch jene, die aufgrund einer grossen Entaschung durchgeführt wurden. Punkte, die mit einem Dreieck markiert sind, befinden sich ausserhalb gezeigten Bereichs.

9.3.9.1 *Kriterien LRV Art 15 Ziffer 4 - Beurteilung der Emissionen der kontinuierlichen Messung des Regelbetriebs (ohne Start und Stopp)*

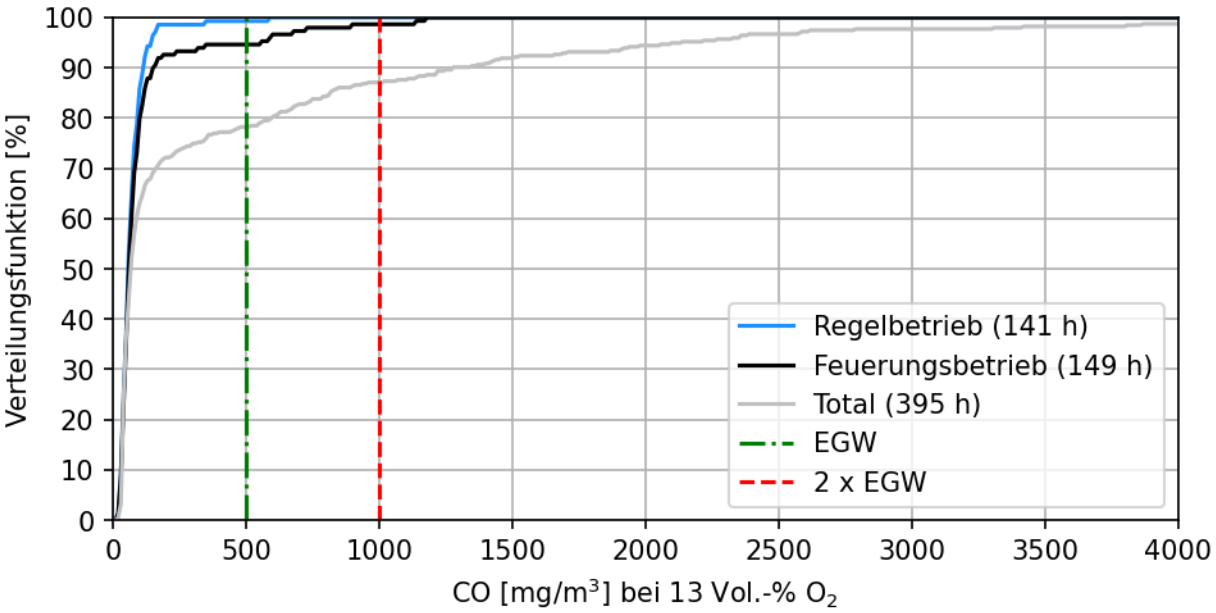


Bild 47: Summenkurve der 1h Mittelwerte von Kessel E. EGW = Emissionsgrenzwert. Feuerungsbetrieb beinhaltet neben dem Regelbetrieb auch die Anfahrphasen und die Zeitpunkte der Abfahrphasen in denen O_2 < 18 Vol.-% war. Total beinhaltet alle Werte der gesamten Messperiode, also die Werte des Feuerungsbetriebs, aber auch die Werte der Betriebsphase Abfahren, die nicht zum Feuerungsbetrieb gezählt werden (wo O_2 > 18% ist) und die Werte während der Kessel im Standby ist.

1h Mittelwert CO < 2-facher EGW (Anforderung 100%)	100 % (143 / 143)
1h Mittelwert NOx < 2-facher EGW (Anforderung 100%)	100 % (143 / 143)
1h Mittelwert CO Regelbetrieb < 1.2-facher EGW (Anforderung 97%)	100% (143 / 143)
1h Mittelwert NOx Regelbetrieb < 1.2-facher EGW (Anforderung 97%)	100 % (143 / 143)
24h Mittelwert CO Regelbetrieb < EGW (Anforderung 100%)	100 % (16 / 16)
24h Mittelwert NOx Regelbetrieb < EGW (Anforderung 100%)	100 % (16 / 16)

9.3.9.2 *minimale Tagesheizlast QM Holzheizwerke FAQ 12*

Tagesheizlast > Anforderung FAQ12 (Tag, Anforderung 100%) [5]

Tagesmittelwert Q_{Soll} > Q_{min} (Q_{min} = 20%) 100 % (16 / 16)

9.3.10 Kessel E – Kleine Entaschung

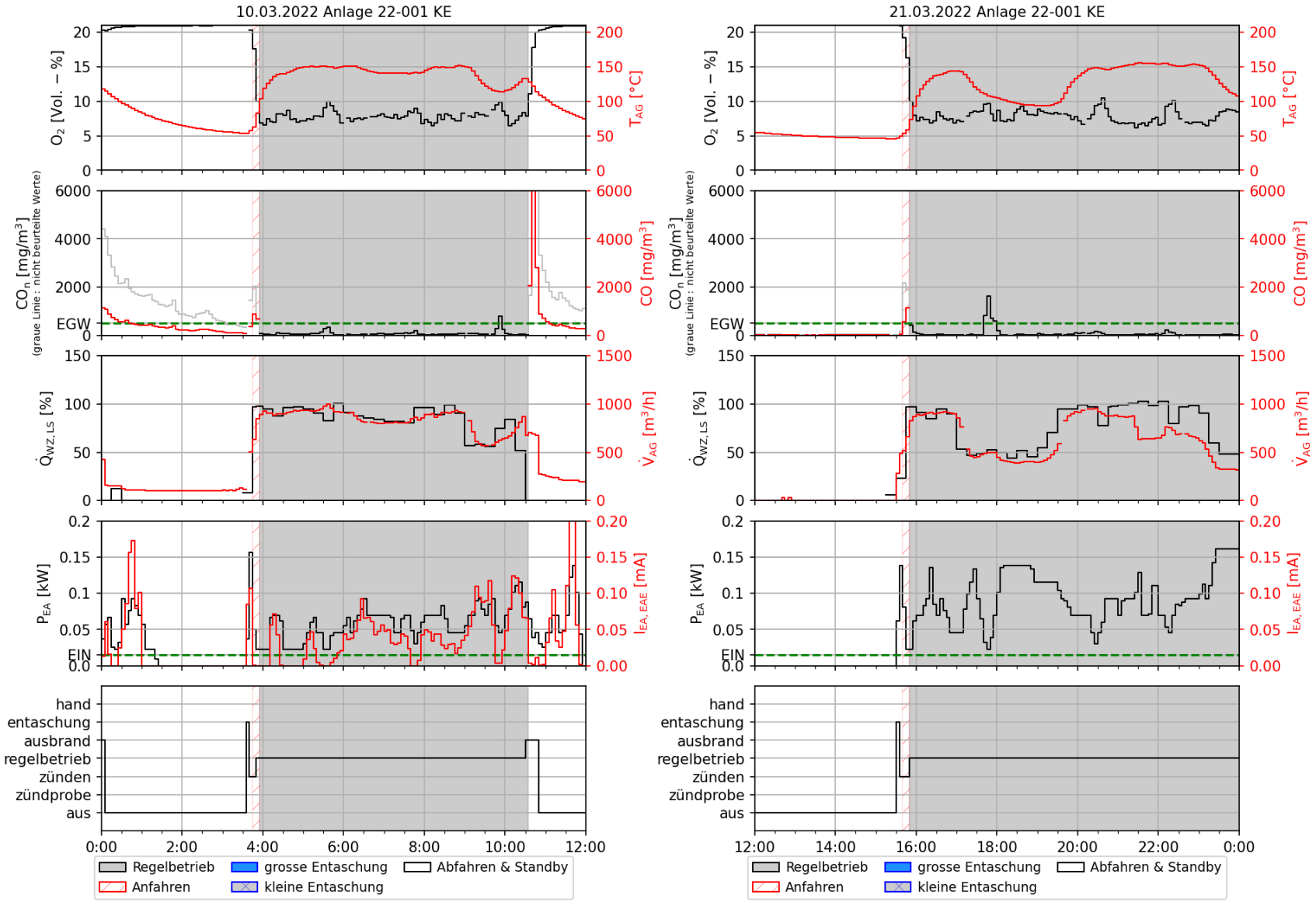


Bild 48: Zeitverläufe von 5 min Mittelwerten von zwei ausgewählten Tagen. Schwarzes Signal CO_n = CO normiert auf 13% O_2, rotes Signal CO = CO nicht normiert. Graues Signal CO_n = CO normiert für jene Phasen, die nach LRV nicht beurteilt werden. Die kleinen Entaschungen sind teilweise zu erkennen, führen jedoch in der Regel nicht zu Emissionsspitzen mit Werten > EGW.

9.3.11 Vergleich mit Pelletanlage Standort C (2x 90 kW und 2x 200 kW, selber Kesselhersteller wie am Standort B)

Bei Pelletfeuerungen dieser Baureihe findet keine kleine Entaschung statt, sondern nur die grosse Entaschung. Die LZM wurde im Juni 2021 durchgeführt. Die Emissionen wurden im gemeinsamen Kamin, in dem die Abgase aller 4 Feuerungen zusammengeführt werden, gemessen. Die Beurteilung des Feuerungsbetrieb sowie der An- und Abfahrphasen werden, mit einer einzigen Ausnahme, nach QSH mit hoher Qualität beurteilt.

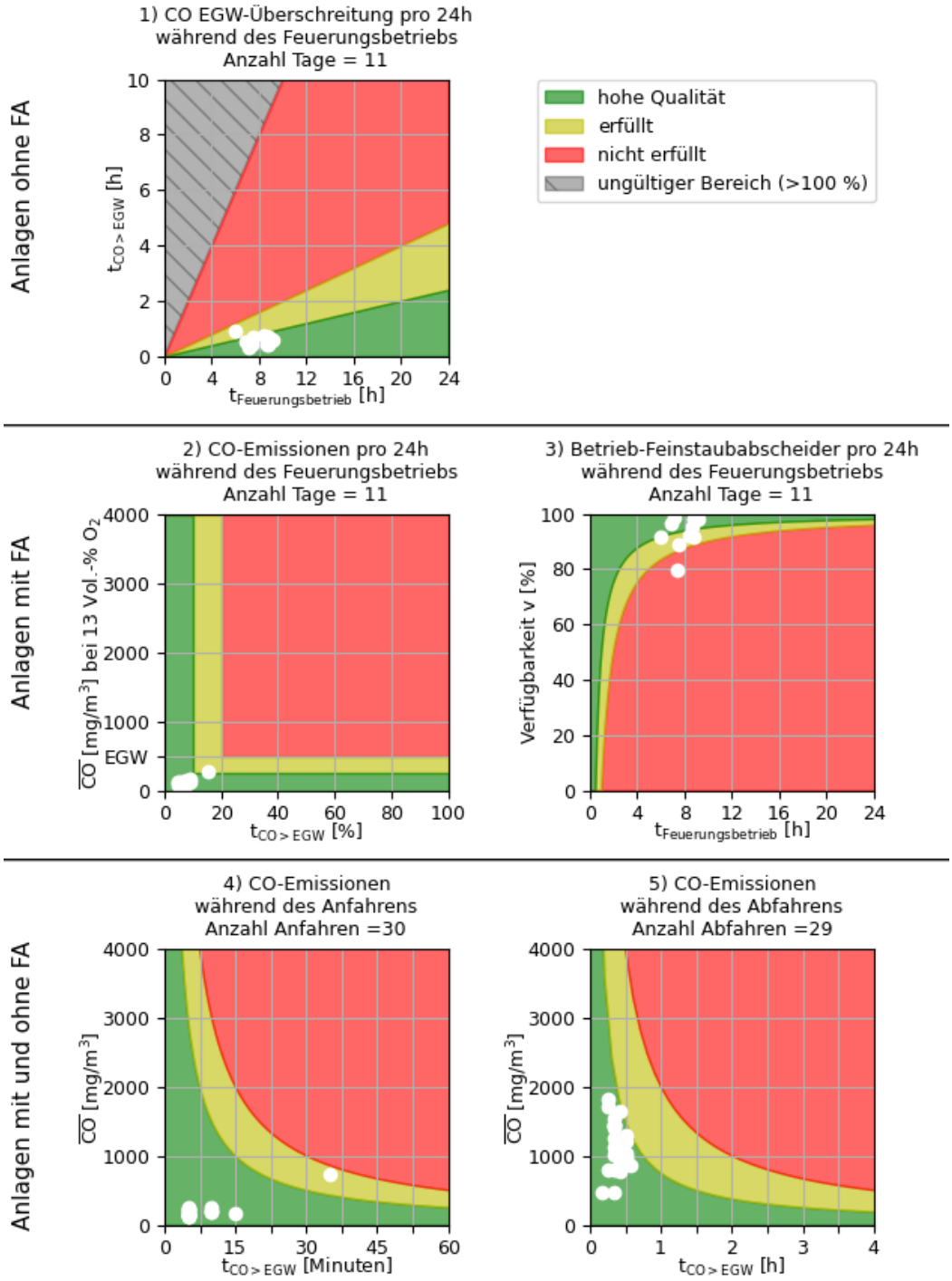


Bild 49: Grafische Beurteilung der Langzeitmessung nach QSH am Standort C. Beurteilt werden die Emissionen der Gesamtanlage. FA = Feinstaubabscheider, Δ = Punkt ausserhalb des dargestellten Bereichs.

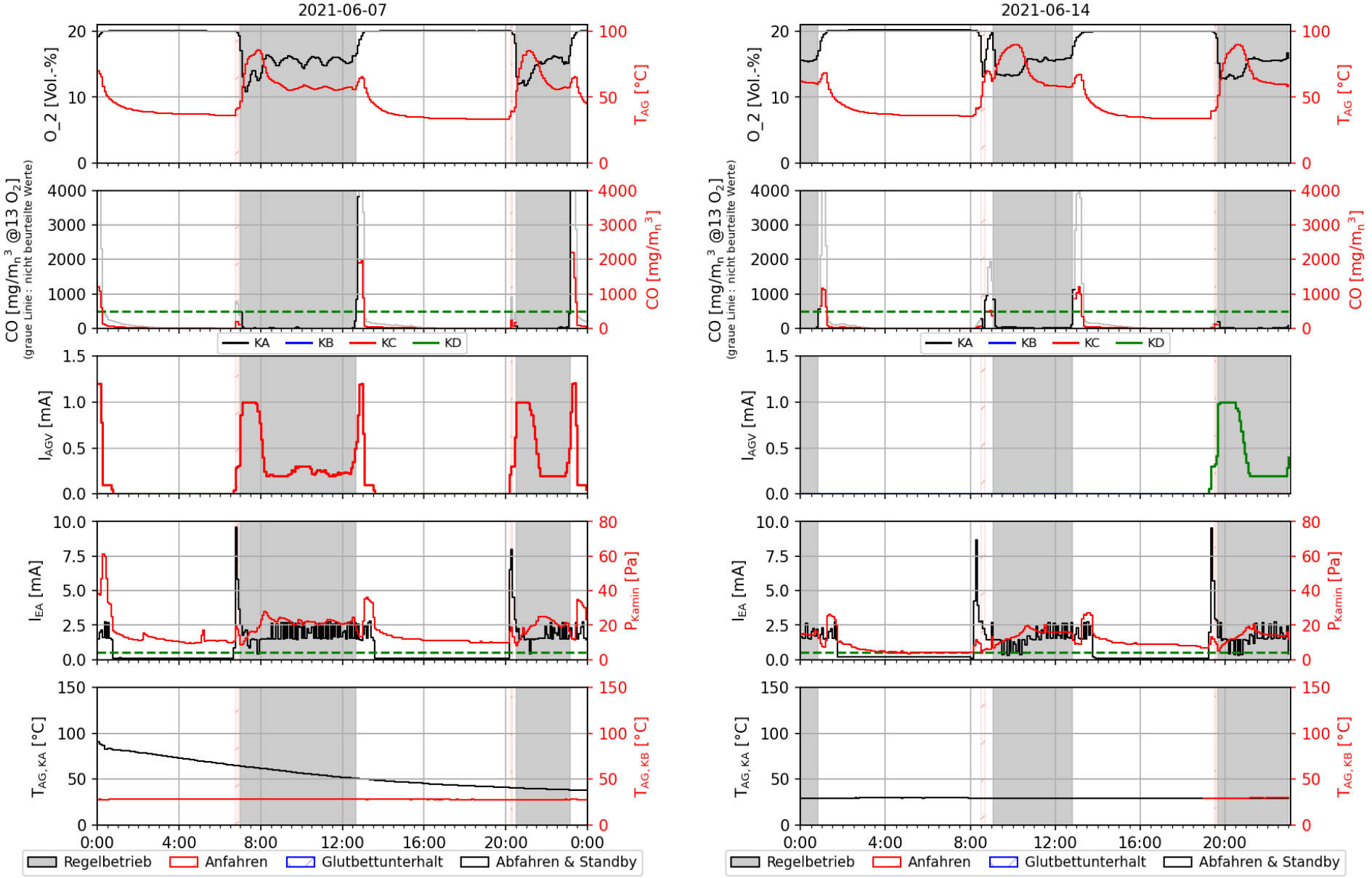


Bild 50: Zeitverläufe von 5min Mittelwerten von zwei ausgewählten Tagen der LZM am Standort C. Schwarzes Signal CO_n = CO normiert auf 13% O_2, rotes Signal CO = CO nicht normiert. Graues Signal CO_n = CO normiert für jene Phasen, die nach LRV nicht beurteilt werden.

9.3.12 Unterschiede zwischen verschiedenen Anfahrvorgängen (Warm vs. Kalt-Start) sowie zwischen «regulären» Anfahr- und Abfahrvorgängen und grosser Entaschung

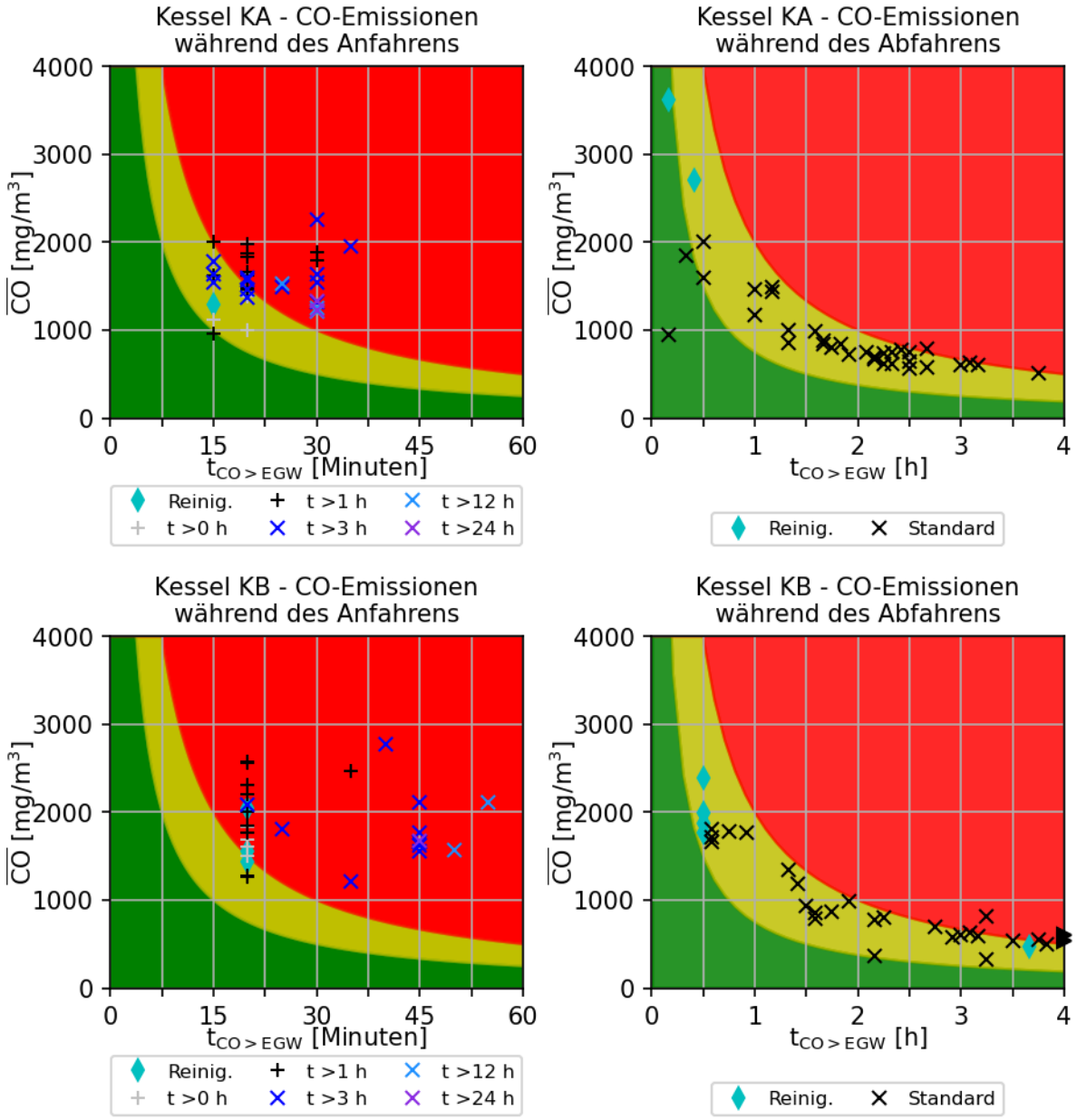


Bild 51: QSH Auswertung für die An- und Abfahrphasen mit Unterscheidung für verschiedene Zustände von Kessel A (oben) und Kessel B (unten). Reinigung = grosse Entaschung, t >0 h = Stillstandszeit 0-1 h, t >1 h = Stillstandszeit 1-3 h, t >3 h = Stillstandszeit 3-12 h, t >12h = Stilstandszeit 12-24 h, t >24 h = Stillstandsdauer > 24 h
Links: Unterschiedliche Stillstandsdauer vor «regulären» Anfahrvorgängen und Unterscheidung zwischen «regulären» Anfahrvorgängen und Anfahrvorgängen aufgrund einer grossen Entaschung.
Rechts: Unterscheidung zw. «regulären» Abfahrvorgängen und Abfahrvorgängen aufgrund einer grossen Entaschung.

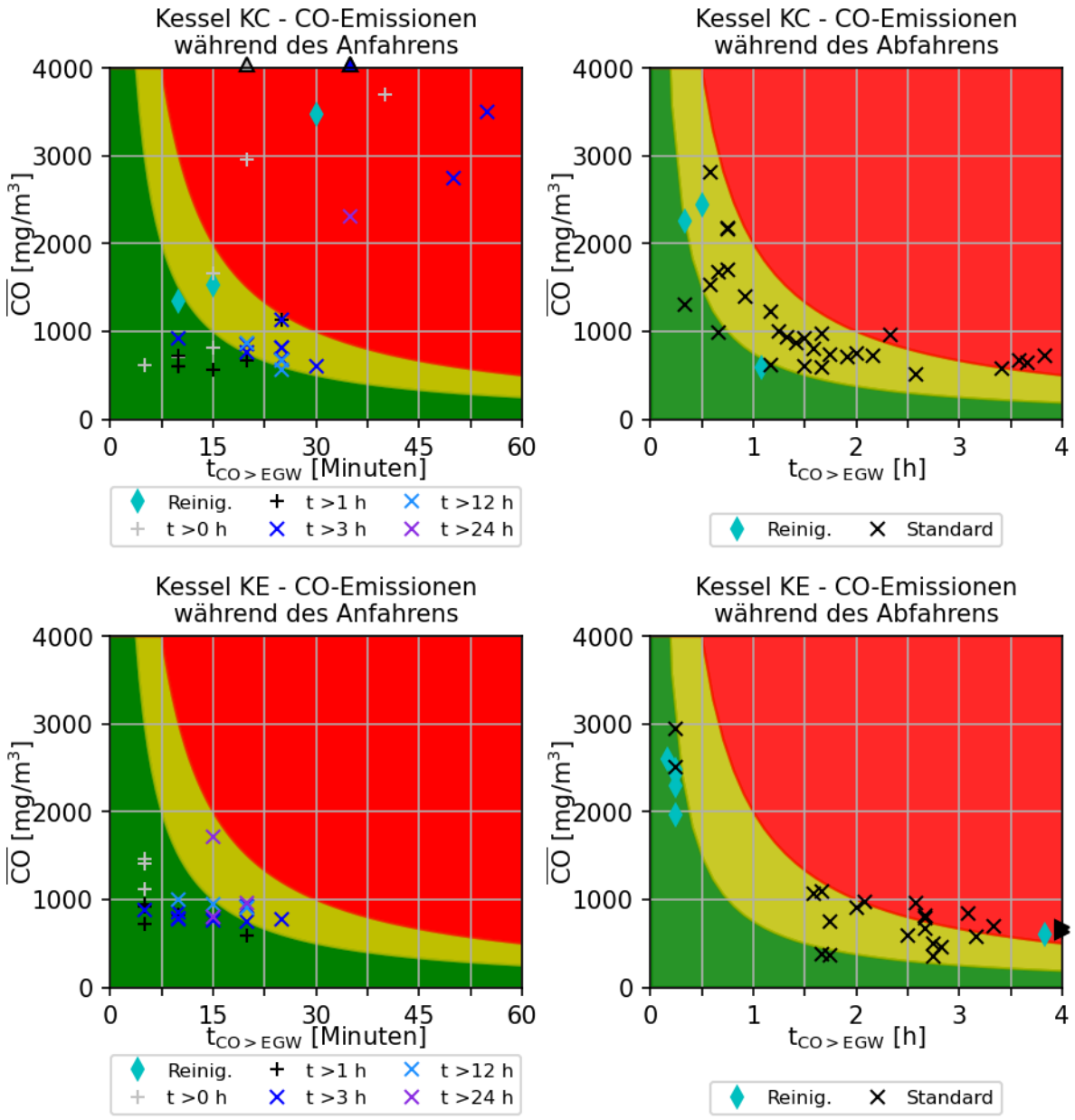


Bild 52: *QS-Support Auswertung für die An- und Abfahrphasen mit Unterscheidung für verschiedene Zustände von Kessel C (oben) und Kessel E (unten). Reinigung = grosse Entaschung, t >0 h = Stillstandszeit 0-1 h, t >1 h = Stillstandszeit 1-3 h, t >3 h = Stillstandszeit 3-12 h, t >12h = Stilstandszeit 12-24 h, t >24 h = Stillstandsdauer > 24 h*
Links: Unterschiedliche Stillstandsdauer vor «regulären» Anfahrvorgängen und Unterscheidung zwischen «regulären» Anfahrvorgängen und Anfahrvorgängen aufgrund einer grossen Entaschung.
Rechts: Unterscheidung zw. «regulären» Abfahrvorgängen und Abfahrvorgängen aufgrund einer grossen Entaschung.

Es sind keine signifikanten Unterschiede für das Anfahren nach verschiedene Stillstandszeiten zu erkennen. Auch die Anfahrphasen nach einer Entaschung zeigen keine höheren CO-Emissionen als «reguläre» Anfahrphasen. Es ist jedoch deutlich erkennbar, dass die Anfahrphasen nach einer Entaschung in der Regel kürzer sind. Die Abfahrphasen aufgrund einer Entaschung sind wegen des Betriebskonzepts meist kürzer als reguläre Abfahrphasen.

9.4 Auswertung gravimetrische Staubmessung

9.4.1 Staubemissionen der verschiedenen Kessel und Betriebsphasen

Tabelle 8: Übersicht über die Mittelwerte der untersuchten Betriebsphasen der gravimetrischen Staubmessungen.

Betriebs-phase	**O_2** nach EA		**PM_{grav} normiert** [mg/Nm³ @ 13% O_2] vor EA		nach EA		**Abscheidegrad**	
	Kessel A	Kessel E	Kessel A	Kessel E	Kessel A	Kessel E	Kessel A	Kessel E
Regelbetrieb	10.2 %	8.6 %	110	17	18	6	85 %	65 %
Warmstart	13.2 %	15.8 %	478	86	16	26	97 %	69 %
Kalt-Start	14.6 %	15.0 %	539.2	96	254	46*	52 %	-48 %
Ausbrand	15.1 %	17.3 %	237	331	33	128	86 %	60 %
kl.Entaschung	11.2 %	10.2 %	202	123	24	18	89 %	86 %

*Mit dem Abscheidegrad derselben Phase von Kessel A berechnet

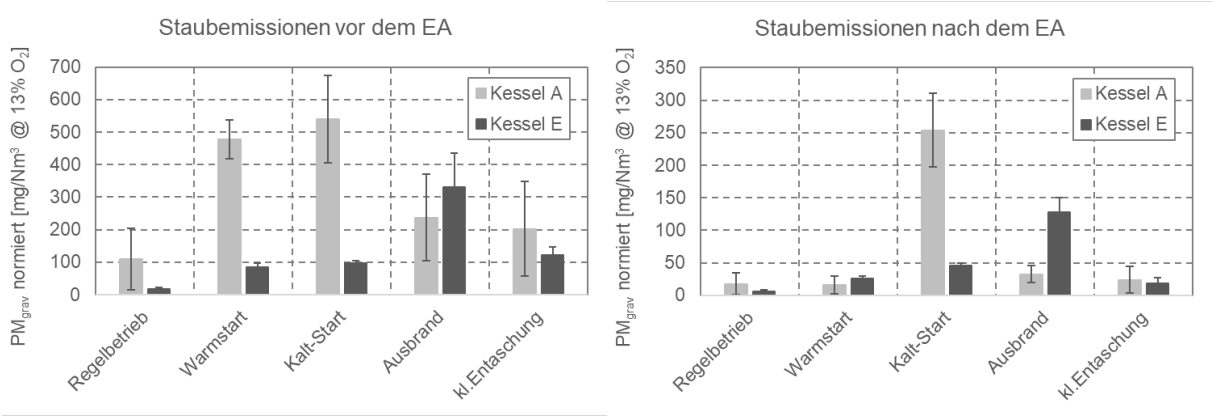


Bild 53: Mittelwerte und Standardabweichung der Staubemissionen der verschiedenen Betriebsphasen von Kessel A und Kessel E. Links: Werte vor dem Elektroabscheider (EA). Rechts: Werte nach dem EA.

- Da der Mittelwert von O2 für alle Betriebsphasen <18 % ist, können die Staubemissionen (PM_{grav}) auf den Bezugssauerstoff normiert werden.
- Ausser den Betriebsphasen «Kalt-Start» bei Kessel A und «Ausbrand» bei Kessel E sind die Staubemissionen kleiner als der Emissionsgrenzwert (50 mg/m³).
- Der negativer Abscheidegrad der Betriebsphase «Kalt-Start» bei Kessel E wurde bei insgesamt 3 Messungen festgestellt. Dies ist eher ungewöhnlich und die genauen Gründe dafür sind nicht bekannt. Eine mögliche Ursache liegt in der speziellen Betriebsweise des EAs Typ 2, der auf der Anlage am Standort B bereits einige Zeit vor der Messung vom Filterhersteller 2 eingeführt wurde. Bei diesem EA gibt es keinen Bypass-Betrieb. Möglicherweise werden im kalten Zustand des Filters, wenn die Hochspannung noch ausgeschaltet ist, abgelagerte Partikel mitgerissen.
- Kessel A mit dem Filter Typ 1 weist, ausser für die «kleine Entaschung» deutlich höhere Abscheidegrade auf.
- Die tieferen Abscheidegrade beim EA Typ 2 bei Kessel E sind wahrscheinlich auf Partikel, die aus dem EA mitgerissen werden, zurückzuführen (siehe Bild 54).

Kessel E

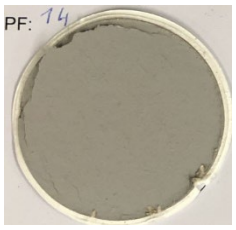
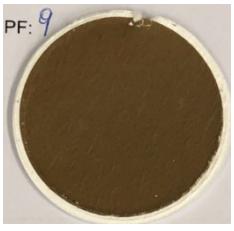
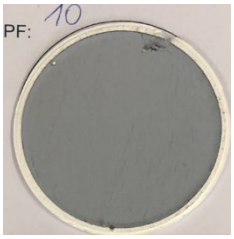
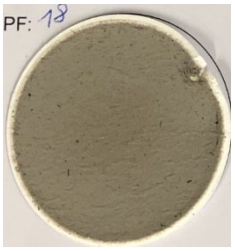
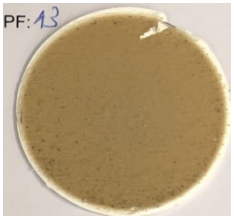
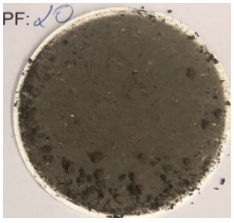
	Warm-Start	Ausbrand	Kalt-Start
Vor EA			
Nach EA			

Bild 54: Fotos von Planfiltern der gravimetrischen Staubmessung an Kessel E.

9.4.2 Staubemissionen des gesamten Betriebs und der Gesamtanlage

Ein fiktiver zeitlicher Verlauf der Staubemissionen der gesamten Messperiode wurde für alle Kessel berechnet, da die Staubmessungen nur punktuell durchgeführt wurden. Dazu wurde ein neues Signal für alle Kessel erstellt, welches eine kontinuierliche Staubmessung über die gesamte Periode simuliert. Dazu wurden die Mittelwerte der Staubmessung der jeweiligen Betriebsphase für alle selben Betriebsphasen der kontinuierlichen Daten verwendet. Z.B. für alle Datenpunkte der kontinuierlichen Messung, die mit Ausbrand gekennzeichnet sind, wurde der Mittelwert der Staubmessungen des jeweiligen Kessels für Ausbrand (siehe Tabelle 2) eingesetzt. Da für Kessel B und C keine Staubmessungen durchgeführt wurden, wurden für diese beiden Kessel die Werte von Kessel A eingesetzt.

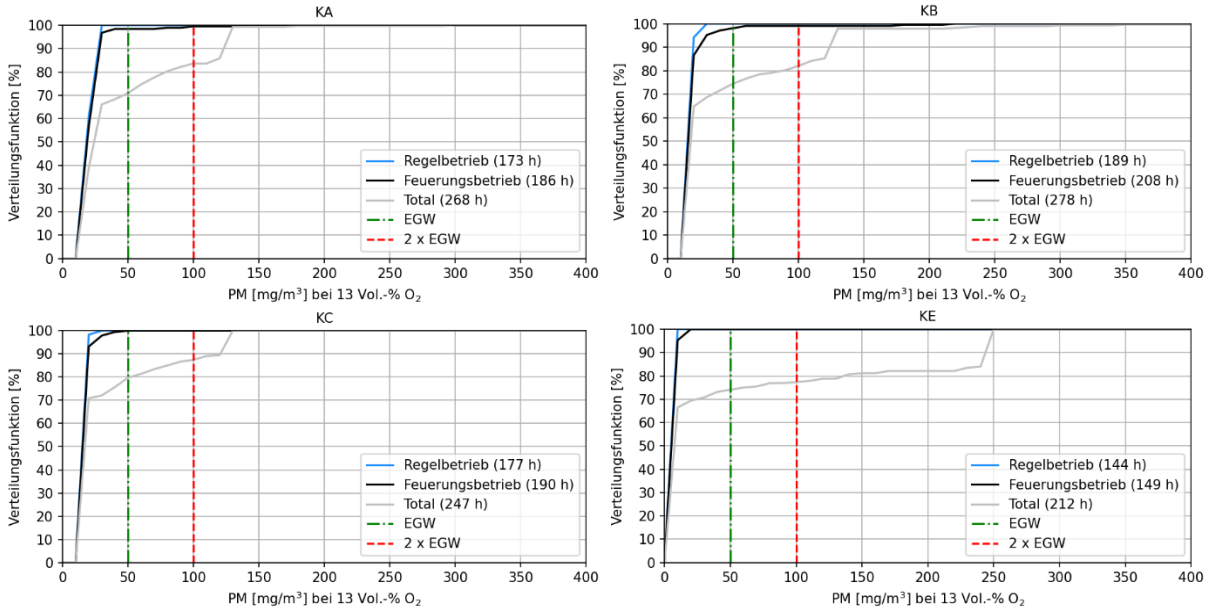


Bild 55: Summenkurve der 1h Mittelwerte von allen Kesseln. EGW = Emissionsgrenzwert. Feuerungsbetrieb beinhaltet neben dem Regelbetrieb auch die Anfahrphasen und die Zeitpunkte der Abfahrphasen in denen O_2 < 19 Vol.-% war. Total beinhaltet alle Werte der gesamten Messperiode. Also die Werte des Feuerungsbetriebs, aber auch die Werte der Betriebsphase Abfahren, die nicht zum Feuerungsbetrieb gezählt werden (wo O_2 > 19% ist) und die Werte während der Kessel im Standby ist.

In Bild 55 sind die Summenkurven der 1h Mittelwert der Staubemissionen zu sehen. Wie man erkennen kann, sind die Werte auch während des Feuerungsbetriebs, der auch Teile des An- und Abfahrens enthält, fast zu 100% unter dem Emissionsgrenzwert von 50 mg/m^3.

Analog zu CO wurde auch für PM_{grav} der zeitliche Verlauf (siehe Bild 23) der Emissionen der Gesamtanlage berechnet (siehe Kapitel 7) und die Summenkurve der 1h Mittelwerte der Staubemissionen der Gesamtanlage berechnet (siehe Bild 24). Die auf die gesamte Messperiode hochgerechneten 1h Mittelwerte der Staub-Emissionen der Gesamtanlage während des Feuerungsbetriebs sind zu rund 93% der Zeit unter dem Grenzwert von 50 mg/m^3. Wenn für die verschiedenen Betriebsphasen von allen Kesseln der jeweils grösste aus den Messungen bestimmte Wert eingesetzt wird (entsprich dem «Worst-Case» Szenario), sind die Staub-Emissionen der Gesamtanlage zu rund 80% der Zeit unter dem EGW.

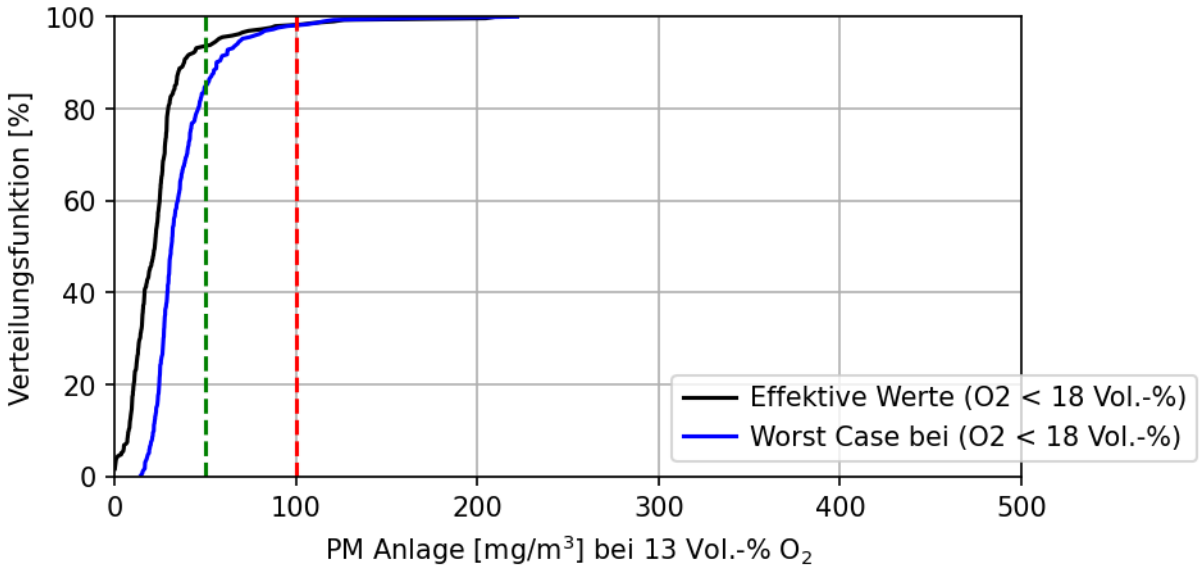


Bild 56: Summenkurve der 1h Mittelwerte der Gesamte-Emissionen der 4-Kesselanlage. Die grüne Linie kennzeichnet den Emissionsgrenzwert (EGW) und die rote Linie den 2-fachen EGW. Worst Case: Für alle Betriebsphasen von allen Kesseln wurde der jeweils grösste aus den Messungen bestimmte Wert eingesetzt. Während der LZM gab es 120 An- und Abfahrvorgänge was rund 7 An- und Abfahrvorgänge pro Tag für die Gesamtanlage entsprechen.

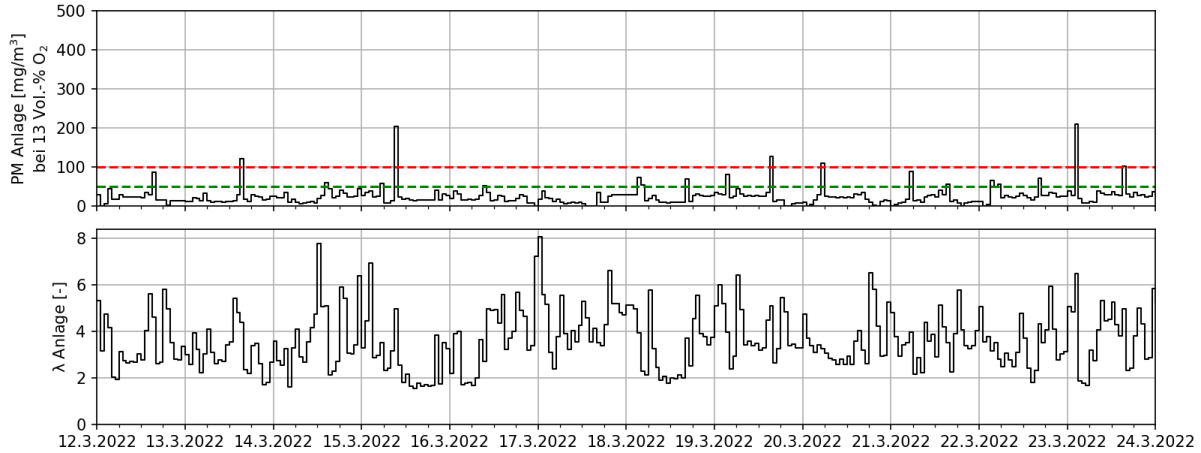


Bild 57: 1h Mittelwerte der Gesamt-Emissionen der 4-Kesselanlage. Die Gesamtemissionen wurden über die Fracht berechnet und beinhalten alle Betriebsphasen (Anfahren, Abfahren, Regelbetrieb und Standby/AUS). Die grüne Linie kennzeichnet den Emissionsgrenzwert (EGW) und die rote Linie den 2-fachen EGW.

Mit die Staubfracht in [g/h], dem Betriebsabgasvolumenstrom V_{AG} [m^3/h] und der gesamten Zeit in [h] der jeweiligen Betriebsphase innerhalb der gesamten Messperiode wurden die Gesamt-Emissionsfracht und die mittlere Staubkonzentration der gesamten Messperiode für Kessel A und E berechnet (Tabelle 11). Um diese Staubkonzentration auf Bezugs-O_2 normieren zu können, wurde ein mit V_{AG} gewichteter O_2 Wert der gesamten Messperiode berechnet. Ausserdem wurden die Anteile der Staubemissionen der verschiedenen Betriebsphasen berechnet (Tabelle 9 und Tabelle 10, Bild 58). Die Ergebnisse der Frachtberechnungen für die Staubemissionen (PM_{grav}) ergeben für die gesamte Messperiode einen normierten Staubwert von rund 24 mg/m^3 und 7 mg/m^3 für Kessel A und Kessel E (Tabelle 11). Diese Werte beinhalten für Kessel A 36 und für Kessel E rund 25 An- und Abfahrphasen und sind klar unter dem Emissionsgrenzwert für von 50 mg/m^3, der für den Regelbetrieb gilt.

Zusätzlich wurden noch Staubemissionen für Kessel A und E mit einem 3 Mal höheren Anteil der An- und Abfahrphasen an der Gesamtzeit simuliert. Dies entspricht einer Erhöhung von ca. 4 Starts pro Tag für Kessel E und 6 Starts für Kessel A. Auch mit der höheren Anzahl Starts pro Tag halten beide Kessel die QSH Vorgabe von 20% der Zeit < EGW ein (siehe Tabelle 11).

Tabelle 9: Eingabeparameter für Berechnung Gesamt-Staubemissionen Kessel A und Anteile der Staubemissionen pro Betriebsphase an den Gesamt-Staubemissionen

	O_2 [%]	**PM_{grav}**	**V_{AG}**	**Zeit**	**Zeit**	**Anteil PM_{grav}**
	[%]	[mg/m^3]	[m^3/h]	[%]	[h]	[%]
Anfahren Warmstart <6h	19.0	14	216	2.1	7.8	**0.8%**
Anfahren Kaltstart >12h	18.8	235	495	0.6	2.4	**8.2%**
Anfahren 6-12h	18.6	124	460	0.5	2.0	**3.4%**
Abfahren	18.2	33	351	4.6	18.3	**4.8%**
kl. Entaschung	12.0	24	622	6.2	24.6	**14.2%**
Regelbetrieb	11.1	24	511	42.5	168.7	**68.6%**
AUS	20.9	0	0	43.5	172.9	**0%**
Total					397	

Tabelle 10: Eingabeparameter für Berechnung Gesamt-Staubemissionen Kessel E und Anteile der Staubemissionen pro Betriebsphase an den Gesamt-Staubemissionen

	O_2 [%]	**PM_{grav}**	**V_{AG}**	**Zeit**	**Zeit**	**Anteil PM_{grav}**
	[%]	[mg/m^3]	[m^3/h]	[%]	[h]	[%]
Anfahren Warmstart <6h	14.1	34	712	0.6	1.6	**1.8%**
Anfahren Kaltstart >12h	16.6	71	643	0.4	1.4	**4.2%**
Anfahren 6-12h	17.1	53	590	0.3	1.2	**2.2%**
Abfahren	20.2	65	580	2.4	8.7	**22.2%**
kl. Entaschung	12.3	58	613	0.6	2.4	**5.6%**
Regelbetrieb	7.6	7	824	39.4	156.4	**64.0%**
AUS	21.0	0	0	56.5	224.3	**0%**
Total					397	

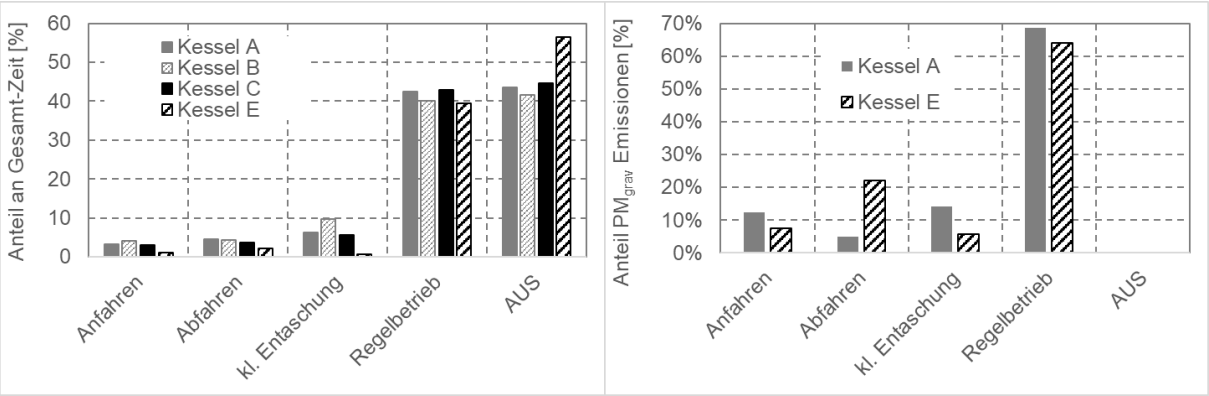


Bild 58: Links: Anteile der Dauer der verschiedenen Betriebsphasen an der gesamten Messperiode. Rechts: Anteile der gravimetrisch bestimmten Staubemissionen (PM_{grav}) Emissionen der verschiedenen Betriebsphase an den Gesamt-PM_{grav}-Emissionen der gesamten Messperiode. Die Anteile wurden mittels der Frachten und Anteile an der Gesamtzeit der jeweiligen Betriebsphasen berechnet. Während der Messperiode gab es 36 An- und Abfahrvorgänge bei Kessel A und 25 bei Kessel E. Dies entspricht im Durchschnitt rund 6 An- und Abfahrvorgänge der Gesamtanlage pro Tag.

Tabelle 11: Ergebnisse Berechnung Gesamt-Staubemissionen Kessel A und E

		O_2 gewichtet [%]	**PM_{grav} total norm** [mg/Nm3 @13%O2]	**Zeit PM_{grav} > EGW** [%]	**Zeit PM_{grav} > EGW** [h total]	**Zeit PM_{grav} > EGW** [h /24h]
Kessel A	**Messperiode**	**11.9**	**23.5**	**1.1**	**4.4**	**0.3**
	3x höher Anteil An- & Abfahren*	13.5	34.4	3.3	13.2	0.8
Kessel E	**Messperiode**	**10.1**	**6.8**	**3.7**	**14.5**	**0.9**
	3x höher Anteil An- & Abfahren*	11.3	11.9	9.4	37.2	2.2
	3x höher Anteil An- & Abfahren* u. höherer Wert für Kalt-Start**	11.3	13.5	9.4	37.2	2.2

* Dazu wurden die Zeiten für An- und Abfahren aus Tabelle 9 und Tabelle 10 mit 3 multipliziert, der Zeit- Anteil der kleinen Entaschung und des Standby (AUS) blieben unverändert und der Anteil des Regelbetriebs wurde dementsprechend reduziert.

**PM_{grav} Wert für den Betriebszustand «Kalt-Start» vor EA mit dem Wert nach EA gleichgesetzt. Da die Anteile der verschiedene Betriebsphasen am Gesamtbetrieb gleich bleiben, ändert sich nur die Konzentration von PM_{grav} im Vergleich zum Fall «3x höherer Anteil An- & Abfahren»

10 Literatur

1. BAFU, *Emissionsmessung bei stationären Anlagen. Emissions-Messempfehlungen. 1. Aktualisierte Fassung vom Dezember 2018. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1320: 155 S, verfügbar unter: https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien/publikationen/emissionsmessung-bei-stationaeren-anlagen.html*. 2018.
2. Lauber A., Good J., and Nussbaumer Th., *Beurteilung von automatischen Holzfeuerungen mittels Langzeitmessungen im Praxisbetrieb, Bundesamt für Energie, Bern 14.7.2016, verfügbar unter: https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/8392*. 2016.
3. Nussbaumer Th., et al., *Holzkessel Kaskadenanlagen mit Speicher (HoKaSpe) - Dimensionierung und Regelung von Kaskadenanlagen mit Holzheizungen und Wärmespeicher, Bundesamt für Energie, Bern 06.04.2022, verfügbar unter: https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=44227&Sprache=de-CH*. 2022.
4. Lauber A., Nussbaumer Th., and Zotter P., *Holzbacköfen in Bäckereien und Pizzerien - Grundlagen und Empfehlungen zum Vollzug der Luftreinhalte-Verordnung, verfügbar unter: https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/ekud/anu/ANU_Dokumente/ANU-409-19d_Vollzug_LRV_Holzbackoefen.pdf*. 2020.
5. *QM Holzheizwerke, FAQ 12 - Wie gross muss die Minimallast eines Holzkessels im Schwachlastbetrieb sein?, 2009, verfügbar unter: https://www.qmholzheizwerke.ch/de/faqs.html (letzer Zugriff: 01.02.2022).*

11 Anhang

11.1 Beschreibung der QSH Beurteilung

QSH beurteilt eine Anlage nach insgesamt fünf Kriterien. Für Anlagen ohne und mit Feinstaubabscheider gilt folgende Unterscheidung:

- für Anlagen ohne Feinstaubabscheider kommt Kriterium 1 zur Anwendung,
- für Anlagen mit Feinstaubabscheider kommen die Kriterien 2 und 3 zur Anwendung.

Die Kriterien 4 und 5 kommen für alle Anlagen zur Anwendung.

Der Erfüllungsgrad der einzelnen Kriterien und das Gesamtresultat werden in drei Kategorien angegeben: hohe Qualität / erfüllt / nicht erfüllt

Kriterium 1 (für Anlagen ohne Feinstaubabscheider):
CO EGW-Überschreitung pro 24h während des Feuerungsbetriebs

Während des Feuerungsbetriebs mit relevantem Abgasvolumenstrom soll der EGW für CO grundsätzlich eingehalten werden. Bei Anlagen ohne Feinstaubabscheider werden aber erhöhte Anforderungen an die Verbrennungsqualität gestellt. Die über einen Zeitraum von 24 Stunden kumulierte Dauer der EGW-Überschreitung darf deshalb 20 % der Feuerungsbetriebszeit nicht überschreiten. Zur Abgrenzung des Bereichs „hohe Qualität“ wird die zulässige Dauer der Überschreitung auf 10 % begrenzt.

Kriterium 2 (für Anlagen mit Feinstaubabscheider):
CO-Mittelwert pro 24h während des Feuerungsbetriebs

Während des Feuerungsbetriebs mit relevantem Abgasvolumenstrom soll der EGW für CO grundsätzlich eingehalten werden. Bei Kriterium 2 muss entweder das Kriterium 1 eingehalten werden oder die durchschnittliche auf den O_2-Bezugswert normierte CO-Konzentration während des Feuerungsbetriebs liegt unter dem EGW. Über einen Zeitraum von 24 Stunden darf der CO-Mittelwert den EGW nur dann überschreiten, wenn der EGW während weniger als 20 % der Feuerungsbetriebszeit (was Kriterium 1 entspricht) überschritten wird. Dies kann z.B. der Fall sein, wenn die CO-Konzentration während des Heizbetriebs im Bereich des EGW liegt. In diesem Fall kann der CO-Mittelwert über dem EGW liegen, auch wenn die Dauer der EGW-Überschreitung nur kurz ist. Zur Abgrenzung des Bereichs „hohe Qualität“ wird der CO-EGW halbiert.

Kriterium 3 (für Anlagen mit Feinstaubabscheider):
Verfügbarkeit Feinstaubabscheider pro 24h

Während des Feuerungsbetriebs mit relevantem Abgasvolumenstrom soll der EGW für Staub grundsätzlich eingehalten werden. Dies wird indirekt über die Verfügbarkeit des Feinstaubabscheiders beurteilt. Als Indikator für den Betrieb des Feinstaubabscheiders wird bei Elektroabscheidern die elektrische Leistung des Hochspannungsnetzgeräts und bei Gewebefiltern der Druckabfall über das Filter verwendet.

Der Feinstaubabscheider darf phasenweise inaktiv sein. Zulässig ist eine Ausfallzeit von 1 Stunde pro 24 Stunden. Dies entspricht einer Verfügbarkeit von 96 % bei einer Feuerung im Dauerbetrieb. Zur Abgrenzung des Bereichs „hohe Qualität“ wird die zulässige Ausfallzeit auf 30 Minuten halbiert.

Kriterium 4 (für alle Anlagen): CO-Emissionen während des Anfahrens

Das Anfahren der Feuerung soll möglichst kurz und emissionsarm erfolgen. Beurteilt werden deshalb die Höhe der CO-Konzentration und die Dauer der Phasen mit Überschreitung des EGW. Das Produkt aus dem CO-Gehalt und der Dauer eines Anfahrvorgangs darf 500 $(mg/m^3)\cdot h$ nicht überschreiten. Der beurteilte Zeitraum ist auf maximal 1 Stunde begrenzt.

Kriterium 5 (für alle Anlagen): CO-Emissionen während des Abfahrens

Die Beurteilung des Abfahrens erfolgt analog zum Anfahren. Das Produkt aus dem CO-Gehalt und der Dauer eines Anfahrvorgangs darf 2000 $(mg/m^3)\cdot h$ nicht überschreiten. Der beurteilte Zeitraum auf maximal 4 Stunden begrenzt.

11.2 Vereinfachtes Emissionsmessgerät der HSLU

Dieses kostengünstige (Hardwarekosten von < 2000 CHF) Messsystem wurde an der Hochschule Luzern entwickelt und ist speziell für Langzeitemissionsmessungen (LZM) von >10 Tagen, welche an mehreren Kesseln gleichzeitig durchgeführt werden, konzipiert. Das Messsystem ist automatisiert und beinhaltet einen Messkoffer (Sensorbox) mit verschiedenen Abgasmesssensoren, eine autonome Überprüfung der Sensoren mit Plausibilitätstests und Alarmierung bei Fehlfunktion, eine verschlüsselte Datenübertragung in eine zentrale Datenbank (Sensor Data Cloud) und eine Quasi-Echtzeit-Visualisierung der Daten und Auswertung im Internet. Die Sensorbox erfasst die wichtigsten gasförmigen Emissionen (CO und NO_x) und Parameter des Betriebs der Holzfeuerung (O_2, Abgastemperatur, Betrieb des Abgas- oder Primärluftventilators) und des Elektroabscheiders.

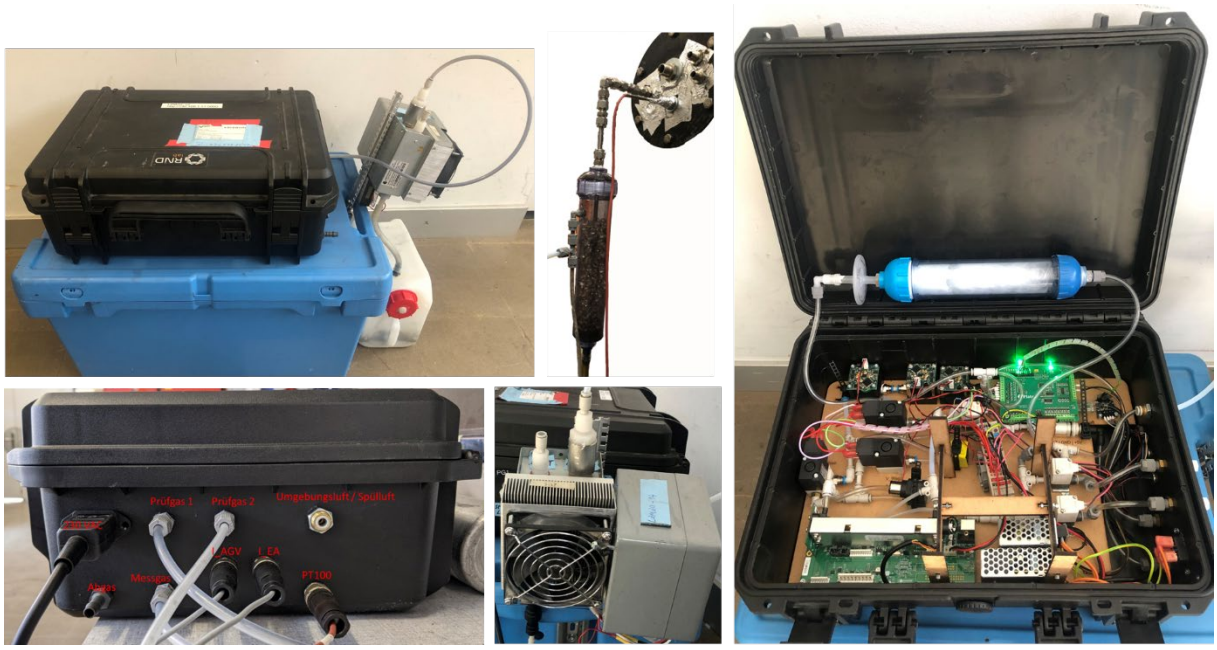


Bild 59: Fotos des Messsystems

Die Messtechnikhardware besteht ausschliesslich aus kommerziell verfügbaren Komponenten. Es besteht aus einem NDIR Gassensor zur Messung von CO (0-15 %) und CO_2 (0-20 %), sowie elektrochemischen Gassensoren für den tiefen CO Messbereich (0-2000 ppm) und NO. Ausserdem wurde das Messsystem mit einer günstigen, einfachen und wartungsarmen Messgasaufbereitung konzipiert. Dies wurde mittels geringen Volumenströmen (1 l/min Absaugrate), den Verzicht auf die sonst üblichen beheizten Messgasleitungen bis zum Gaskühler und die automatisch umschaltbaren Filterlinien erreicht. Zusätzlich verfügt das Messsystem über einen Anschluss für Prüfgase, mit denen automatisiert in regelmässigen Abständen, die Gassensoren überprüft werden. Das Messsystem wird mittels eines kleinen integrierten PC (Raspberry Pi) gesteuert, der auch die Messdaten aufgezeichnet. Ein Prinzipschema und Fotos des Messsystems sind in Bild 59 und Bild 60 zu finden.

Die Abgase werden mit ~1 Liter pro Minute über den nicht beheizten Wasservorabscheider abgesaugt, der direkt am Kamin montiert ist. Der Wasservorabscheider, der mit vielen kleinen Glaskugeln gefüllt ist, ist direkt mit einem luftdicht verschlossenem Kondensatgefäss verbunden. Die Abgase werden dort im Wasservorabscheider abgekühlt und es findet eine gewisse Filtration von sehr grossen Partikeln statt. Die Abgase werden dann aus dem Wasservorabscheider über einen nicht-beheizten PVC- oder Teflon-Schlauch mit 6mm Durchmesser zum Gaskühler der Sensorbox geleitet. Der Gaskühler, der das Abgas auf ca. 5°C abkühlt, ist direkt mit einem luftdicht verschlossenem Kondensatgefäss verbunden. Aus dem Gaskühler gelangen die Abgase in die Sensorbox, wo sie sich wieder auf Umgebungstemperatur erwärmen. Durch das Abkühlen im Gaskühler sollte ein Grossteil des Wasserdampfes kondensieren und durch die Erwärmung des Abgases nach dem Gaskühler sollte das Abgas praktisch trocken sein.

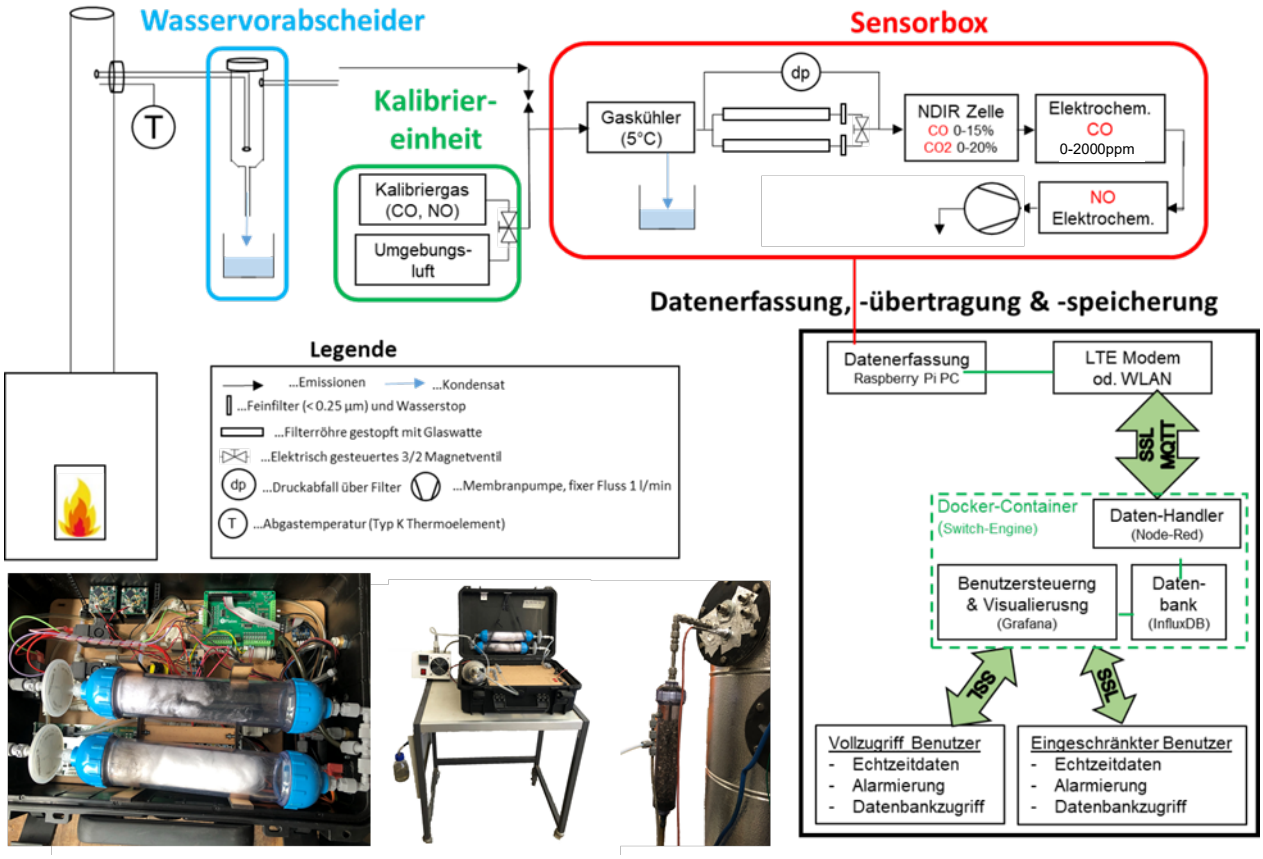


Bild 60: Schematische Darstellung des Messsystems.

In der Sensorbox wird das Abgas über einen „Grobfilter“ (Filtergehäuse, welches mit Glaswolle gestopft ist) geleitet. Dem Grobfilter nachgeschaltet ist ein Feinfilter (Porengrösse 2.5 µm), der auch ein Wasserstopp-Filter ist und als zusätzlicher Schutz der Sensoren dient. Die Abgase gelangen zuerst in die NDIR-Zelle, wo CO (0-15 %) und CO_2 (0-20 %) gemessen werden. Nach der NDIR Zelle werden die Abgase über ein 3-Wege Ventil in die elektrochemischen Zellen (CO 0-2000 ppm und NO) geleitet. Bei CO-Konzentrationen > 2000 ppm besteht die Gefahr einer Schädigung der elektrochemischen CO-Messzelle. In solchen Fällen wird das 3-Wege Ventil automatisch auf Umgebungsluft umgeschaltet und es findet nur mehr eine Messung in der NDIR-Zelle statt. Zusätzlich findet dieses Umschalten in jedem Fall alle 30min statt, um die elektrochemischen Zellen für jeweils 5min mit Umgebungsluft zu spülen. Der Sauerstoffgehalt O_2 wird näherungsweise aus CO_2 berechnet ($O_2 = 21\text{-}CO_2$, siehe Planungshandbuch QM Holzheizwerke: https://www.qmholzheizwerke.ch/publikationen.html).

11.3 Abgasvolumenstrommessung

Für die LZM in diesem Projekt wurde auch der Abgasvolumenstrom kontinuierlich für jeden Kessel über sehr lange Perioden gemessen. Dies wurde mit Differenzdruckmessungen mittels Prantl-Rohren durchgeführt. Die Prantl-Rohre wurden an den Messstellen der Gas- und gravimetrischen Staubmessung installiert (siehe Bild 64). Bei der kontinuierlichen Messung mit Prantl-Rohren ohne automatische Reinigung (solche Geräte sind normalerweise nur für sehr grosse industrielle Anlagen >10 MW verfügbar) können Messfehler aufgrund von Verschmutzung auftreten. Die Prantl-Rohre wurden bei jedem Anlagenbesuch (5 Mal in 19 Tagen) rückgespült. Zudem wurde überprüft, ob eine systematische Abnahme des Volumenstroms erkennbar ist und ob die gemessenen Werte den theoretischen Werten für diese Anlagengrösse entsprechen.

Am Standort B wurde bei einer Leistungsvorgabe der Kesselsteuerung von 70-100% bei den 4 Kesseln mittlere Abgasvolumenströme von 350-510 Nm^3 gemessen. Gemäss Planungshandbuch QM-Holzheizwerke Bilder 20.2 und 20.3 fällt dies in die zu erwartende Bandbreite für die am Standort B installierten Kesselleistungen (330 kW_{NWL} pro Kessel).

In Bild 61 sind die Stundenmittelwerte des Betriebsabgasvolumenstrom (V_{AG} [m^3/h]) der vier Kessel während des Regelbetriebs zu sehen. Für die Kessel B, C und E ist keine systematische Abnahme von V_{AG} zu sehen. Die Schwankungen sind auf die Leistungsmodulation zurückzuführen. Bei Kessel A ist in der zweiten Hälfte eine Abnahme von V_{AG} zu erkennen. Diese dürfte aber auf ein generell tieferes Leistungsniveau zurückzuführen sein, da Lambda in der zweiten Hälfte erhöht ist.

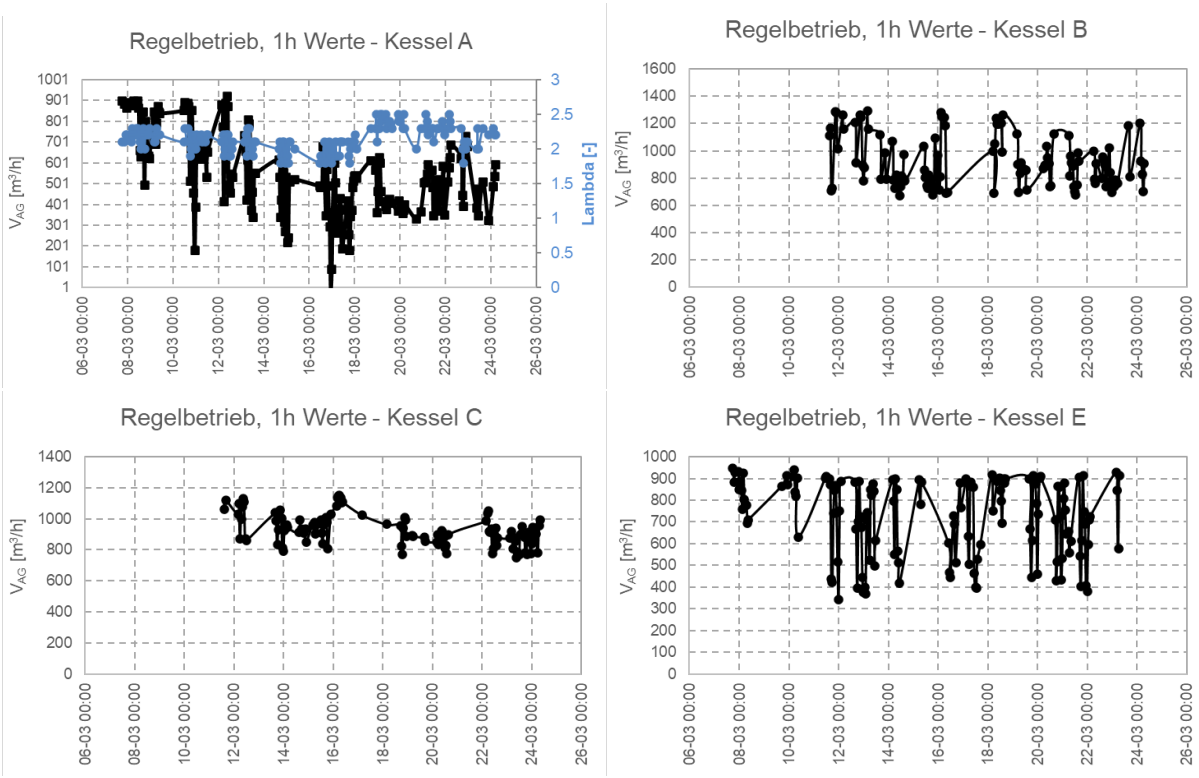


Bild 61 *Stundenmittelwerte des Betriebsabgasvolumenstrom (V_{AG} [m^3/h]) der vier Kessel während des Regelbetriebs.*

11.4 Gravimetrische Staubmessung

11.4.1 Messung

Die gravimetrische Staubmessung wurde gemäss BAFU Messempfehlung durchgeführt. Der Düsendurchmesser sowie die Absaugrate für die isokinetische Probenahme wurde am Tag der Messung vorab über die Abgasvolumenstrommessung bestimmt. Am Standort B wurde jeweils gleichzeitig vor und nach dem Elektroabscheider gemessen und daher wurden zwei Staubmessgeräte eingesetzt. Am Standort A waren die Elektroabscheider im Kessel integriert und daher wurde jeweils mit ein- und ausgeschaltetem EA mit nur einem Staubmessgerät gemessen. Bei beiden Anlagen wurde die Staubmessung an derselben Messstelle, wie die Gas- und Abgasvolumenstrommessung durchgeführt (Bild 64) Das Schema der Messung sowie Fotos der Komponenten sind in Bild 62 bis Bild 64 zu sehen.

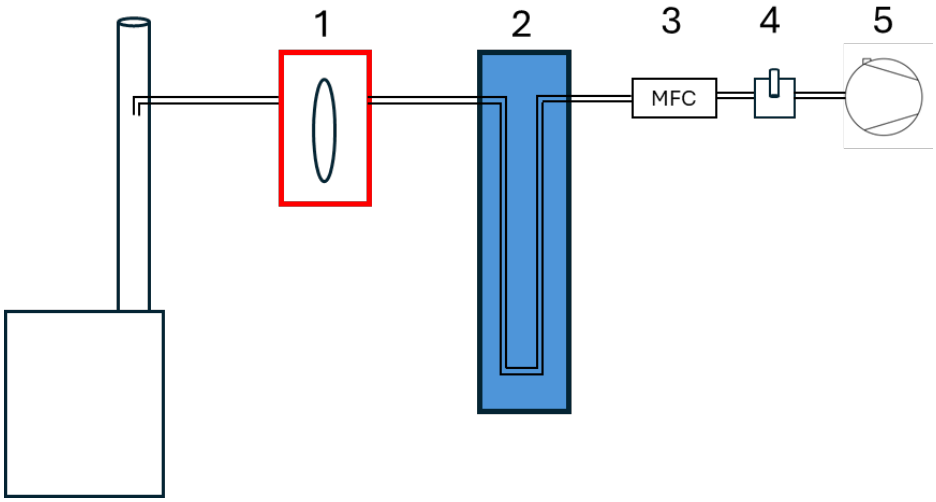


Bild 62 Schema der gravimetrischen Staubmessung gemäss BAFU Messempfehlung. 1) beheizter Filterhalter 2) Gaskühler, der mit Leitungswasser betrieben wird 3) Massflow Controller zum Einstellen der Absaugrate in Liter pro Minute und zur Bestimmung des abgesaugten Gasvolumens in Nm^3 4) Lambdasonde zur Bestimmung der O_2-Konzentration in der Probenahme 5) Gaspumpe. Fotos der verschiedenen Komponenten sind in Bild 63 und Bild 64 zu sehen.

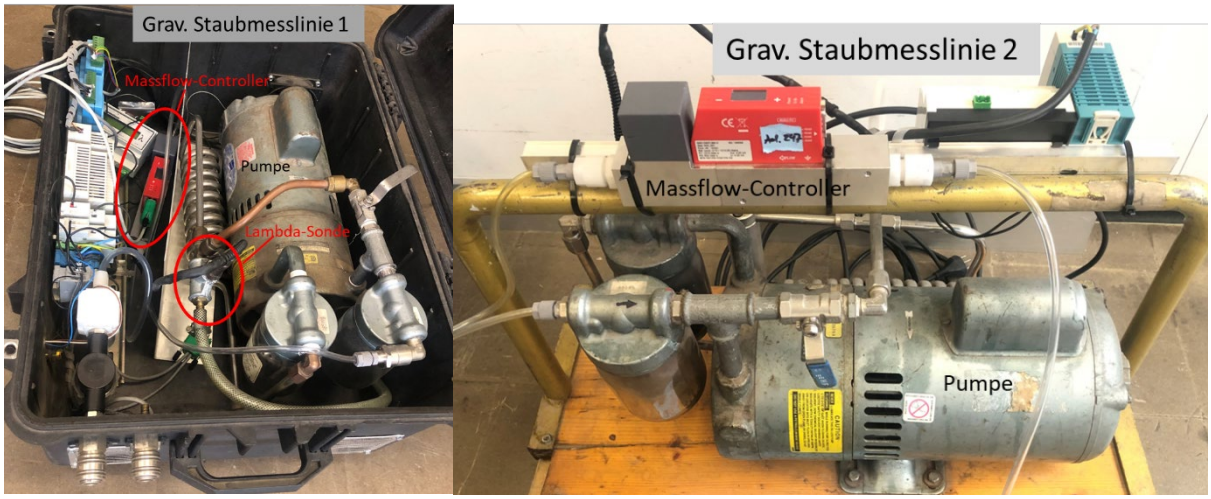


Bild 63 Fotos der gravimetrischen Staubmessgeräte.



Bild 64 Fotos der Messstelle (links), des Gaskühlers (mitte) und des beheizten Filterhalter (rechts).

11.4.2 Übersicht über alle Resultate

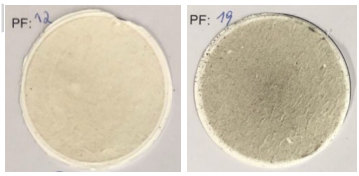
11.4.2.1 Standort A (2-Kessel Pelletanlage)

Tabelle 12 Resultate der gravimetrischen Messungen des stationären Betriebszustands beider Kessel am Standort A. Der Abscheidegrad wurde normierten sowie nicht-normierte Staubkonzentrationen berechnet.

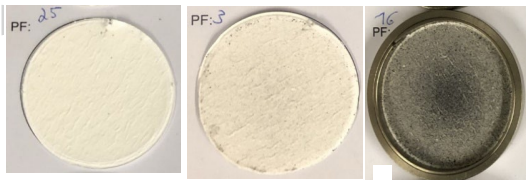
Betriebszustand Stationär									
Datum	**Betriebs-zustand**	**Kessel**	**EA** EIN/AUS	**Filter Nr**	**O2 [%] an Messstelle**	**Staub [mg/mn3 @13 %O2]**	**Staub [mg/mn3]**	**Abscheide-grad**	
04.04.2022	stationär, 100% Leistung	K2	EIN	12	10.1	8.8	12.0		
07.04.2022			EIN	19	9.4	3.0	4.3		
04.04.2022			AUS	25	10.8	15.1	19.2		
08.04.2022			AUS	3	9.4	2.6	3.7		
22.04.2022			AUS	16	10.1	25.8	35.2		
04.04.2022		K1	EIN	34	10.5	48.3	63.4		
07.04.2022			EIN	31	9.0	9.7	14.5		
15.04.2022			EIN	13	8.5	20.7	32.3		
04.04.2022			AUS	8	10.8	34.7	44.1		
08.04.2022			AUS	29	9.9	76.2	105.2		
15.04.2022			AUS	4	9.7	45.6	64.6		
Mittelwert		K2	EIN		9.7	5.9	8.1		
			AUS		10.1	14.5	19.4	59%	58%
		K1	EIN		9.3	26.2	36.7		
			AUS		10.1	52.1	71.3	50%	48%
Median		K1	EIN		9.0	20.7	32.3		
			AUS		9.9	45.6	64.6	55%	50%
		K2	EIN		9.7	5.9	8.1		
			AUS		10.1	15.1	19.2	61%	58%
Stabw		K1	EIN		1.0	19.9	24.8		
			AUS		0.6	21.5	31.1		
Stabw in %			EIN		11%	76%	67%		
			AUS		6%	41%	44%		
Stabw		K2	EIN		0.5	4.1	5.4		
			AUS		0.7	11.6	15.8		
Stabw in %			EIN		5%	70%	67%		
			AUS		7%	80%	81%		

Kessel 2

EA EIN

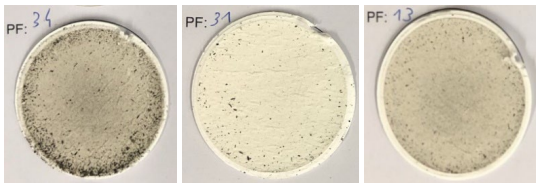


EA AUS



Kessel 1

EA EIN



EA AUS

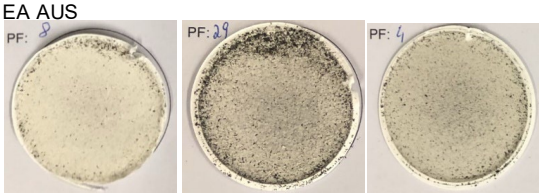


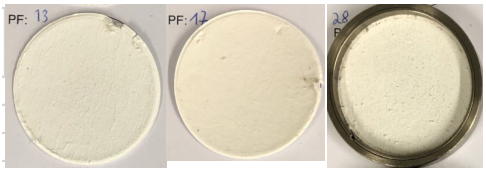
Bild 65 *Fotos aller Planfilter beider Kessel mit ein und ausgeschaltetem Elektroabscheider am Standort A für den stationären Betriebszustand bei 100% Leistungsvorgabe. Die Planfilternummer (PF auf den Fotos) sind in der Tabelle 12 markiert.*

Tabelle 13 *Resultate der gravimetrischen Messungen des Betriebszustands «Ausbrand» beider Kessel am Standort A. Der Abscheidegrad wurde normierten sowie nicht-normierte Staubkonzentrationen berechnet.*

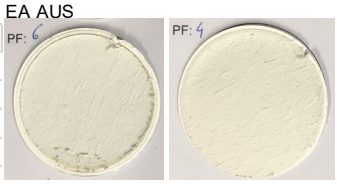
Betriebszustand Ausbrand									
Datum	**Betriebszustand**	**Kessel**	**EA** EIN/AUS	**Filter Nr**	**O2 [%] an Messstelle**	**Staub [mg/mn3 @13 %O2]**	**Staub [mg/mn3]**	**Abscheidegrad**	
07.04.2022	Ausbrand	K2	EIN	13	16.9	227.5	115.8		
08.04.2022			EIN	17	16.3	172.7	102.4		
24.04.2022			EIN	28	17.5	166.9	74.1		
04.04.2022			AUS	6	15.5	254.9	174.0		
07.04.2022			AUS	4	16.6	222.8	122.9		
07.04.2022		K1	EIN	18	17.1	52.4	25.4		
11.04.2022			EIN	11	16.9	91.6	47.0		
12.04.2022			EIN	35	17.9	32.1	12.6		
08.04.2022			AUS	16	16.3	160.9	94.4		
15.04.2022			AUS	18	17.1	181.6	88.1		
Mittelwert		K2	EIN		16.9	169.8	88.3		
			AUS		16.1	238.8	148.4	29%	41%
		K1	EIN		17.3	58.7	28.3		
			AUS		16.7	171.3	91.2	66%	69%
Median		K2	EIN		16.9	172.7	102.4		
			AUS		16.1	238.8	148.4	28%	31%
		K1	EIN		17.1	52.4	25.4		
			AUS		16.7	171.3	91.2	69%	72%
Stabw		K2	EIN		0.6	33.4	21.3		
			AUS		0.7	22.7	36.1		
Stabw in %		K2	EIN		4%	20%	24%		
			AUS		5%	9%	24%		
Stabw		K1	EIN		0.5	30.2	17.4		
			AUS		0.6	14.6	4.5		
Stabw in %		K1	EIN		3%	52%	61%		
			AUS		3%	9%	5%		

Kessel 2

EA EIN

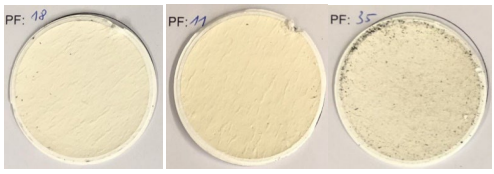


EA AUS



Kessel 1

EA EIN



EA AUS

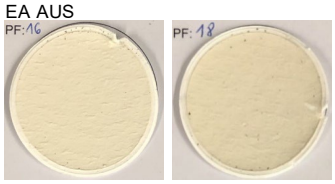


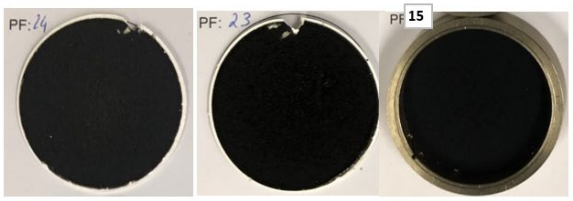
Bild 66 *Fotos aller Planfilter beider Kessel mit ein und ausgeschaltetem EA am Standort A für den Betriebszustand «Ausbrand». Die Planfilternummer (PF auf den Fotos) sind in der Tabelle 13 markiert.*

Tabelle 14 *Resultate der gravimetrischen Messungen des Betriebszustands «Warm-Start» beider Kessel am Standort A. Der Abscheidegrad wurde normierten sowie nicht-normierte Staubkonzentrationen berechnet.*

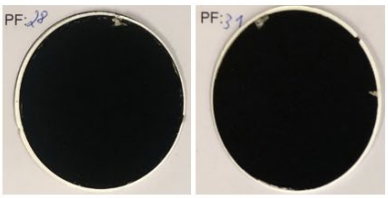
Betriebszustand Warm-Start									
Datum	**Betriebszustand**	**Kessel**	**EA** EIN/AUS	**Filter Nr**	**O2 [%] an Messstelle**	**Staub [mg/mn3 @13 %O2]**	**Staub [mg/mn3]**	**Abscheidegrad [%]**	
07.04.2022	Warm Start	K2	EIN	24	14.9	18.8	14.4		
14.04.2022		K2	EIN	23	15.4	52.4	36.4		
22.04.2022		K2	EIN	15	15.2	24.8	18.0		
08.04.2022		K2	AUS	28	16.1	30.8	18.9		
15.04.2022		K2	AUS	31	15.5	42.7	29.4		
07.04.2022		K1	EIN	15	15.8	229.1	149.1		
11.04.2022		K1	EIN	34	17.0	41.0	20.7		
12.04.2022		K1	EIN	20	16.0	45.7	28.8		
08.04.2022		K1	AUS	21	15.5	65.1	44.7		
14.04.2022		K1	AUS	32	17.9	16.2	6.3		
22.04.2022		K1	AUS	3	18.0	57.1	21.7		
Mittelwert		K2	EIN		15.2	32.0	23.0		
			AUS		15.8	36.7	24.2	13%	5%
		K1	EIN		16.2	43.4	24.7		
			AUS		16.7	46.1	24.2	6%	-2%
Median		K2	EIN		15.2	24.8	18.0		
			AUS		15.8	36.7	24.2	32%	26%
		K1	EIN		16.5	43.4	24.7		
			AUS		17.9	57.1	21.7	24%	-14%
Stabw		K2	EIN		0.3	17.9	11.8		
			AUS		0.4	8.4	7.4		
Stabw in %		K2	EIN		2%	56%	51%		
			AUS		3%	23%	31%		
Stabw		K1	EIN		0.7	3.3	5.7		
			AUS		1.4	26.2	19.3		
Stabw in %		K1	EIN		4%	8%	23%		
			AUS		8%	57%	80%		

Kessel 2

EA EIN

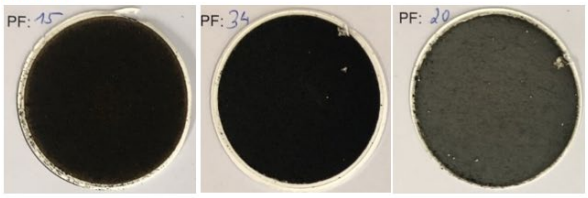


EA AUS



Kessel 1

EA EIN



EA AUS

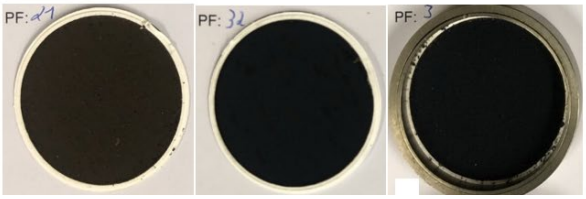


Bild 67 *Fotos aller Planfilter beider Kessel mit ein und ausgeschaltetem EA am Standort A für den Betriebszustand «Warm-Start». Die Planfilternummer (PF auf den Fotos) sind in der Tabelle 14 markiert.*

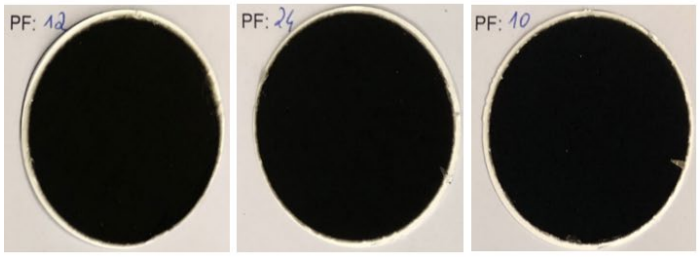
Tabelle 15 *Resultate der gravimetrischen Messungen des Betriebszustands «Kalt-Start» beider Kessel am Standort A. Der Abscheidegrad wurde normierten sowie nicht-normierte Staubkonzentrationen berechnet.*

Betriebszustand Kalt-Start									
Datum	**Betriebszustand**	**Kessel**	**EA** EIN/AUS	**Filter Nr**	**O2 [%] an Messstelle**	**Staub [mg/mn3 @13 %O2]**	**Staub [mg/mn3]**	**Abscheidegrad**	
12.04.2022		K2	EIN	12	16.8	16.2	8.6		
15.04.2022		K2	EIN	24	14.0	5.8	5.1		
15.04.2022		K2	EIN	10	13.2	2.1	2.0		
11.04.2022		K2	AUS	8	13.6	6.7	6.2		
14.04.2022	Kalt-Start	K2	AUS	9	13.5	11.1	10.4		
07.04.2022		K1	EIN	27	13.7	7.6	6.9		
11.04.2022		K1	EIN	33	13.3	16.6	16.0		
08.04.2022		K1	AUS	14	14.3	3.8	3.2		
12.04.2022		K1	AUS	25	13.5	24.7	23.1		
Mittelwert		K2	EIN		13.6	3.9	3.5		
			AUS		13.5	8.9	8.3	56%	57%
		K1	EIN		13.5	12.1	11.4		
			AUS		13.9	14.3	13.1	15%	13%
Stabw		K2	EIN		0.6	2.6	2.1		
			AUS		0.0	3.1	2.9		
Stabw in %		K2	EIN		4%	67%	61%		
			AUS		0%	35%	35%		
Stabw		K1	EIN		0.3	6.4	6.4		
			AUS		0.6	14.8	14.1		
Stabw in %		K1	EIN		2%	53%	56%		
			AUS		4%	104%	107%		

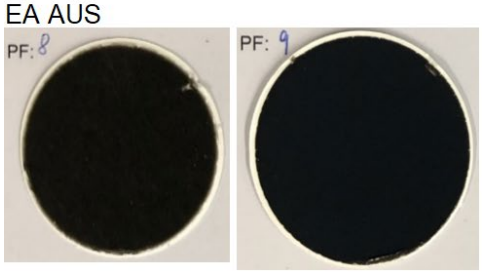
Messungen mit Werten, die von jenen des selben Betriebszustands signifikant abweichen. Diese Messungen wurden wiederholt und nicht in der Auswertung berücksichtigt

Kessel 2

EA EIN

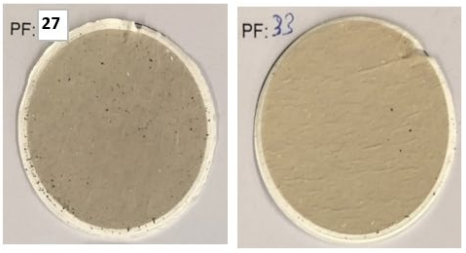


EA AUS



Kessel 1

EA EIN



EA AUS

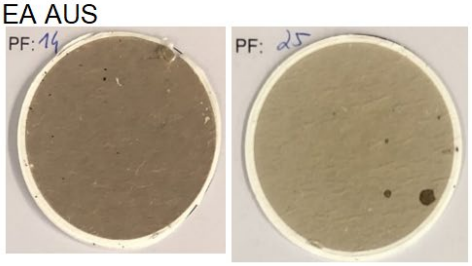


Bild 68 *Fotos aller Planfilter beider Kessel mit ein und ausgeschaltetem EA am Standort A für den Betriebszustand «Kalt-Start». Die Planfilternummer (PF auf den Fotos) sind in der Tabelle 15Tabelle 13 markiert.*

11.4.2.2 Standort B (4-Kessel Hackschnitzelanlage)

Legende / Erklärungen

- Die gravimetrischen Staubmessungen wurden gleichzeitig mit 2 verschiedenen Messlinien vor und nach dem Elektroabscheider durchgeführt
- Die Messungen wurden an den Kesseln A (ausgestattet mit einem Elektroabscheider von Typ 1) und E (ausgestattet mit einem Elektroabscheider vom Filterhersteller 2) durchgeführt
- Die Messungen wurden gestartet, wenn
    - Statonär: beliebiger Zeitpunkt wenn Werte stabil sind
    - Warmstart, Kalt-Start, kl. Entaschung und Ausbrand: wenn die CO-Werte und/oder die Staub Werte am Testo (welches ebenfalls für viele Messungen vor dem EA installiert war) zu steigen begonnen haben
- Die Messungen wurden gestoppt, wenn
    - Stationär: nach ca. 15min
    - Ausbrand: Wenn Die O2-Werte 20% erreicht haben
    - Kalt-Start, Warmstart, kl. Entaschung: Ungefähr bis die CO Werte unter den Grenzwert gesunken sind. Wenn dies in weniger als 10min erreicht war, wurde die Messung trotzdem auf 10min verlängert
- Weitere Ausführungen zur Kaltstart Messung:
    - Kessel A:
        - Die Kalt-Start-Messung wurde auf 2 aufeinanderfolgende Filter verteilt. Filter 1: Messung bis die EA einschaltet (also bei EA = AUS), Filter 2: Messung mit EA = EIN für 10min
    - Kessel E:
        - Es gab beim EA keinen Bypassbetrieb und der EA wurde immer durchströmt auch wenn die Hochspannung = AUS war. Daher wurde nur 1 Filter gemessen für ca. 25min (Stopp Kriterium siehe oben)
        - Dieser EA Betrieb ohne Bypass könnte evtl. der Grund sein, dass die Kalt-Start Werte bei Kessel E nach dem EA für alle Messungen grösser sind, als jene vor dem EA

- Auf den Filtern (siehe Bilder rechts), sind deutlich die vielen grossen Stückchen zu sehen und das Ergebnis wurde mehrmals reproduziert --> die Messwerte, die höher sind nach dem EA, sind plausibel
- Nachdem wir nicht wissen, ob alle Filter vom Filterhersteller 2 EA auch bei anderen Anlagen ohne Bypass Betrieb betrieben werden, sind die Werte bei Kalt-Start von Kessel E nach dem EA mit "Vorsicht" zu betrachten

	Werte von Kessel E nach dem Elektroabscheider (EA) am 11.03 werden nicht verwendet, da das Ascheabsaugen aus dem Aschebehälter anscheinend sehr viel Grobstaub aufgewirbelt hat und die Messungen nach dem EA den ganzen Tag über höher waren als vor dem EA
	Unter der Annahme, dass der Filter Typ 2 den gleichen Abscheidegrad hat wie an anderen Tagen in der gleichen Feuerungsbetriebsphase oder den gleichen Abscheidegrad aufweist, wie der Filter Typ 1 für die gleiche Feuerungsbetriebsphase

Tabelle 16 Resultate der gravimetrischen Messungen den stationären Betriebszustands von Kessel A und E für den Standort B. Der Abscheidegrad des EA wurde für die normierten Staubkonzentrationen berechnet.

Betriebszustand Stationär												
Datum	Betriebszustand	Kessel	Filter Nr		O2 [%] an Messstelle		Staub [mg/mn3 @13 % O2]			Staub [mg/mn3]		Abscheide-grad
			vor EA	nach EA	vor EA	nach EA	vor EA	nach EA	n. EA korr	vor EA	nach EA	
07.03.2022		A	12	18	8.6	10.1	48.8	5.2		75.7	7.0	89%
07.03.2022		A	13	11	8.6	10.1	52.0	1.4		80.7	1.9	97%
10.03.2022		E	35	22	6.9	8.4	11.5	4.2		20.3	6.7	63%
10.03.2022	stationär	A	33	17	9.5	10.7	247.4	35.9		356.1	46.2	86%
10.03.2022		A	30	32	8.5	9.9	91.0	28.7		142.7	40.1	68%
11.03.2022		E	11	8	7.3	8.7	23.2	38.7	8.1	39.7	59.3	-67%
16.03.2022		E	36	28	7.5	8.6	15.9	5.3		26.8	8.2	66%
Mittelwert KA	**stationär**	**A**			8.8	10.2	**109.8**	**17.8**		163.8	23.8	**85%**
Median KA					8.6	10.1	**71.5**	**17.0**		111.7	23.6	**87%**
Stabw KA					0.5	0.4	93.7	17.1		131.8	22.5	12%
Stabw KA in %					5%	4%	85%	96%		80%	95%	
Mittelwert KE	**stationär**	**E**			7.2	8.6	**16.9**	16.1	**5.9**	28.9	7.4	**65%**
Median KE					7.3	8.6	**15.9**	5.3	**5.3**	26.8	7.4	**65%**
Stabw KE					0.3	0.2	5.9	19.6	2.0	9.8	1.1	2%
Stabw KE in %					5%	2%	35%	122%	34%	34%	15%	
Anzahl Messungen					7							
Mittelwert total	**stationär**	**A+E**			8.1	9.5	**70.0**	17.1	**12.7**	106.0	24.2	**78%**
Median total					8.5	9.9	**48.8**	5.3	**5.3**	75.7	8.2	**77%**
Stabw total					0.9	0.9	82.9	16.6	13.7	117.9	0.8	14%
Stabw in %					11%	10%	118%	97%	108%	111%	3%	18%

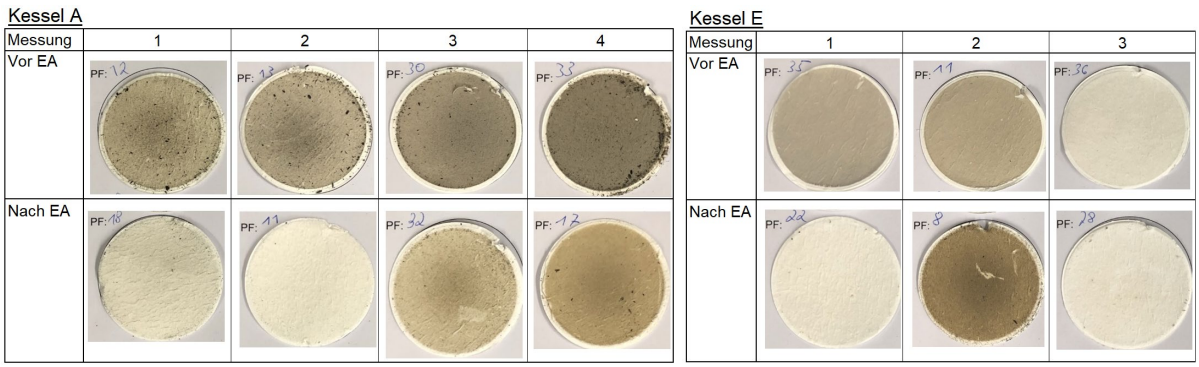
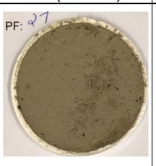
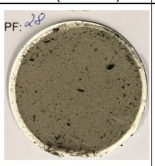
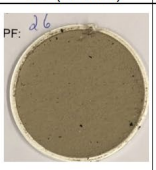
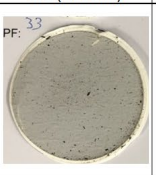
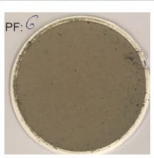
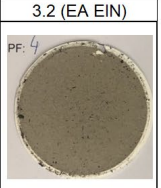
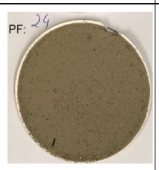
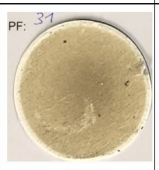
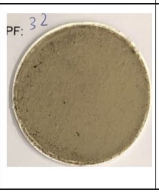
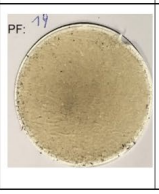
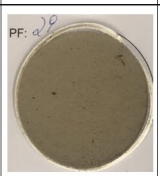
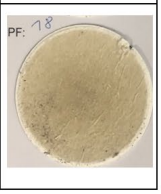


Bild 69 Fotos aller Planfilter von Kessel A (links) und Kessel E (rechts) vor und nach dem EA am Standort B für den stationären Betriebszustand. Die Planfilternummer (PF auf den Fotos) sind in der Tabelle 16Tabelle 13 markiert.

Tabelle 17 Resultate der gravimetrischen Messungen den Betriebszustand «Kalt-Start» von Kessel A und E am Standort B. Der Abscheidegrad des EA wurde für die normierten Staubkonzentrationen berechnet.

Betriebszustand Kalt-Start												
Datum	Betriebszustand	Kessel	Filter Nr		O2 [%] an Messstelle		Staub [mg/mn3 @13 % O2]			Staub [mg/mn3]		Abscheide-grad EA [%]
			vor EA	nach EA	vor EA	nach EA	vor EA	nach EA	n. EA korr	vor EA	nach EA	
10.03.2022	Kaltstart Filter #1	A	21	24	18.5	18.9	2126.1	1534.9		677.3	400.0	28%
10.03.2022	Kaltstart Filter #2	A	28	31	7.9	9.0	405.7	48.5		666.2	72.7	88%
10.03.2022	Kaltstart kombiniert	A	21+28	24+31	13.2	14.0	686.7	318.1		673.2	279.9	54%
11.03.2022	Kalt Start	E	25	20	15.3	16.1	105.3	394.3	50.2	75.1	243.9	-275%
16.03.2022	Kaltstart Filter #1	A	26	32	18.4	18.8	1989.9	1217.0		643.6	339.8	39%
16.03.2022	Kaltstart Filter #2	A	33	19	9.4	10.7	110.6	46.3		160.0	59.5	58%
16.03.2022	Kaltstart kombiniert	A	'26+33	'32+19	13.9	14.7	423.0	234.7		374.3	183.6	45%
16.03.2022	Kaltstart	E	21	17	15.4	13.9	93.6	145.0	44.6	65.2	129.1	-55%
24.03.2022	Kaltstart	E	10	20	14.5	15.2	89.6	125.7	42.7	73.1	91.2	-40%
24.03.2022	Kaltstart Filter #1	A	6	29	18.2	18.7	1274.0	731.7		448.8	209.3	43%
24.03.2022	Kaltstart Filter #2	A	4	18	10.2	11.5	302.9	67.3		408.1	79.6	78%
24.03.2022	Kaltstart kombiniert	A	6+4	29+18	14.2	15.1	507.7	209.6		431.5	154.0	59%
Mittelwert KA	**Kalt Start**	**A**			13.8	14.6	**539.2**	**254.1**		493.0	205.8	52%
Median KA					13.9	14.7	**507.7**	**234.7**		431.5	183.6	54%
Stabw Kessel A					0.5	0.6	134.6	56.8		158.7	65.8	7%
Stabw Kessel in %					3.9%	4.1%	25.0%	22.4%		32.2%	32.0%	
Mittelwert KE	**Kalt Start**	**E**			15.1	15.0	**96.2**	135.4	**45.9**	71.1	154.7	-48%
Median KE					15.3	15.2	**93.6**	135.4	**44.6**	73.1	129.1	-48%
Stabw Kessel E					0.5	1.1	8.2	13.7	3.9	5.3	79.6	10%
Stabw Kessel in %					3.5%	7.3%	8.5%	10.1%	8.5%	7.4%	51.4%	
Anzahl total	**Kalt Start**	**A+E**			6							
Mittelwert total					14.4	14.8	**317.7**	206.6	**150.0**	282.1	167.5	
Median total					14.3	14.9	**264.2**	209.6	**129.9**	224.7	154.0	
Stabw total					0.9	0.8	257.2	76.8	119.6	251.9	71.4	
Stabw in %					6%	6%	81%	37%	80%	89%	43%	

Kessel A

Messung	1.1 (EA aus)	1.2 (EA EIN)	2.1 (EA aus)	2.2 (EA EIN)	3.1 (EA aus)	3.2 (EA EIN)
Vor EA						
Nach EA						

Kessel E

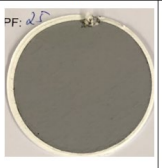
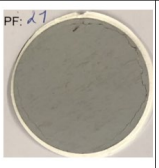
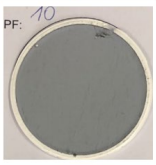
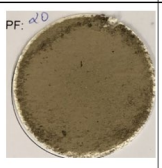
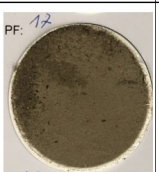
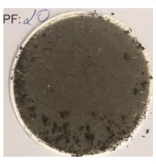
Messung	1	2	3
Vor EA			
Nach EA			

Bild 70 Fotos aller Planfilter von Kessel A (links) und Kessel E (rechts) vor und nach dem EA am Standort B für den Betriebszustand «kleine Entaschung». Die Planfilternummer (PF) sind in der Tabelle 17 markiert.

Tabelle 18 Resultate der gravimetrischen Messungen den Betriebszustand «Warm-Start» von Kessel A und E am Standort B. Der Abscheidegrad des EA wurde für die normierten Staubkonzentrationen berechnet.

Betriebszustand Warm Start												
Datum	Betriebszustand	Kessel	Filter Nr		O2 [%] an Messstelle		Staub [mg/mn3 @13 % O2]			Staub [mg/mn3]		Abscheide-grad EA [%]
			vor EA	nach EA	vor EA	nach EA	vor EA	nach EA	n. EA korr	vor EA	nach EA	
07.03.2022	Warm Start Filter #1	A	8	14	15.4	16.2	998.8	11.3		694.0	6.8	99%
07.03.2022	Warm Start Filter #2	A	15	3	7.2	8.4	210.1	4.3		362.5	6.7	98%
07.03.2022	Warm Start kombiniert	A	8+15	14+3	11.3	12.3	436.5	6.2		528.1	6.8	99%
11.03.2022	Warm Start	A	4	15	13.3	14.2	519.3	25.2		501.9	21.4	95%
11.03.2022	Warm Start	E	14	18	14.0	15.0	90.7	93.6	27.8	79.2	70.1	-3%
16.03.2022	Warm Start	E	34	23	16.1	17.2	73.3	22.0		44.7	10.4	70%
24.03.2022	Warm Start	E	15	8	14.1	15.1	93.3	29.2		80.8	21.4	69%
Mittelwert KA	**Warm Start**	**A**			12.3	13.2	**477.9**	**15.7**		515.0	14.1	**97%**
Median KA					12.3	13.2	**477.9**	**15.7**		515.0	14.1	**97%**
Stabw KA					1.4	1.4	58.6	13.4		18.5	10.4	2%
Stabw KA in %					11%	10%	12%	86%		4%	74%	
Mittelwert KE	**Warm Start**	**E**			14.7	15.8	**85.8**	48.3	**26.4**	68.2	34.0	**69%**
Median KE					14.1	15.1	**90.7**	29.2	**27.8**	79.2	21.4	**69%**
Stabw KE					1.2	1.2	10.9	39.4	3.8	20.4	31.8	1%
Stabw KE in %					8%	8%	13%	82%	14%	30%	93%	
Anzahl Messungen					5							
Mittelwert total	**Warm Start**	**A+E**			13.7	14.7	**242.6**	35.3	**22.1**	246.9	15.0	**88%**
Median					13.6	14.6	**93.3**	25.2	**25.2**	80.8	10.4	**95%**
Stabw total					2.0	2.0	216.9	33.8	9.3	245.3	7.6	16%
Stabw in %					15%	14%	89%	96%	42%	99%	51%	18%

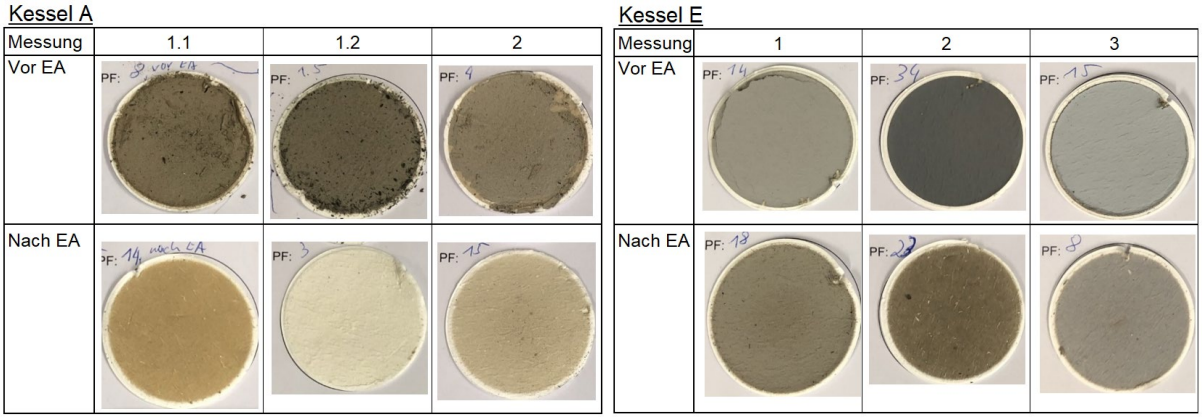
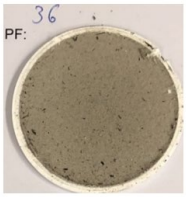
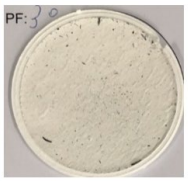
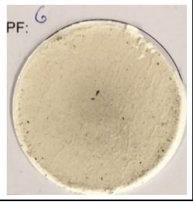


Bild 71 Fotos aller Planfilter von Kessel A (links) und Kessel E (rechts) vor und nach dem EA am Standort B für den Betriebszustand «Warm-Start». Die Planfilternummer (PF) sind in der Tabelle 18 und Tabelle 13 markiert.

Kessel A

Messung	1	2
Vor EA		
Nach EA		

Kessel E

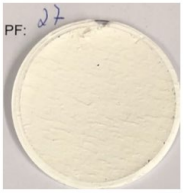
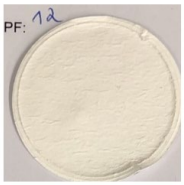
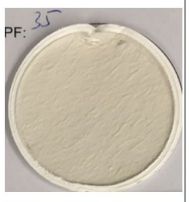
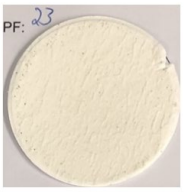
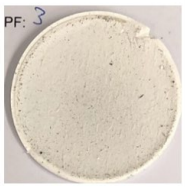
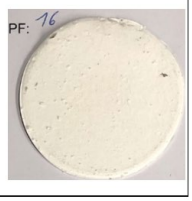
Messung	1	2	3
Vor EA			
Nach EA			

Bild 72 *Fotos aller Planfilter von Kessel A (links) und Kessel E (rechts) vor und nach dem EA am Standort B für den Betriebszustand «kleine Entaschung». Die Planfilternummer (PF) sind in der Tabelle 19 markiert.*

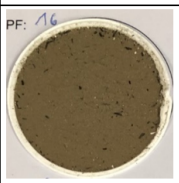
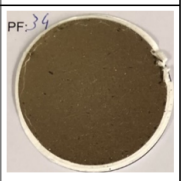
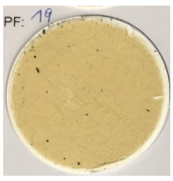
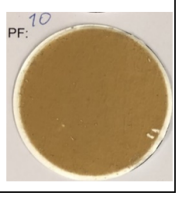
Tabelle 19 *Resultate der gravimetrischen Messungen für den Betriebszustand «kleine Entaschung» von Kessel A und E am Standort B. Der Abscheidegrad wurde für die normierten Staubkonzentrationen berechnet.*

Betriebszustand kleine Entaschung												
Datum	Betriebszustand	Kessel	Filter Nr		O2 [%] an Messstelle		Staub [mg/mn3 @13 % O2]			Staub [mg/mn3]		Abscheide-grad EA [%]
			vor EA	nach EA	vor EA	nach EA	vor EA	nach EA	n. EA korr	vor EA	nach EA	
10.03.2022	kl. Entaschung	E	27	23	8.9	10.6	145.7	27.8		220.0	36.3	81%
10.03.2022		A	36	6	10.9	12.2	305.3	38.8		385.0	42.7	87%
11.03.2022		E	12	3	8.3	10.1	127.5	91.0	17.9	202.8	124.3	29%
16.03.2022		E	35	16	8.8	9.9	96.5	8.6		146.9	11.9	91%
16.03.2022		A	30	22	8.9	10.1	99.3	9.3		150.0	12.6	91%
Mittelwert KA	**kl. Entaschung**	**A**			9.9	11.2	**202.3**	**24.0**		267.5	27.7	**89%**
Median KA					9.9	11.2	**202.3**	**24.0**		267.5	27.7	**89%**
Stabw KA					1.4	1.5	145.7	20.8		166.2	21.2	2%
Stabw KA in %					14%	13%	72%	87%		62%	77%	
Mittelwert KE	**kl. Entaschung**	**E**			8.7	10.2	**123.3**	42.5	**18.1**	189.9	57.5	**86%**
Median KE					8.8	10.1	**127.5**	27.8	**17.9**	202.8	36.3	**86%**
Stabw KE					0.3	0.3	24.9	43.1	9.6	38.2	59.1	86%
Stabw KE in %					4%	3%	20%	101%	53%	20%	103%	
Anzahl Messungen					5							
Mittelwert total	**kl. Entaschung**	**A+E**			9.2	10.9	**154.9**	35.1	**20.5**	220.9	45.6	**87%**
Median					10.6	9.2	**127.5**	27.8	**17.9**	202.8	36.3	**89%**
Stabw total					1.1	1.3	86.6	33.7	12.9	97.2	46.1	5%
Stabw in %					12%	12%	56%	96%	63%	44%	101%	

Tabelle 20 Resultate der gravimetrischen Messungen den Betriebszustand «Ausbrand» von Kessel A und E am Standort B. Der Abscheidegrad wurde für die normierten Staubkonzentrationen berechnet.

Betriebszustand Ausbrand												
Datum	Betriebszustand	Kessel	Filter Nr		O2 [%] an Messstelle		Staub [mg/mn3 @13 % O2]			Staub [mg/mn3]		Abscheide-grad EA [%]
			vor EA	nach EA	vor EA	nach EA	vor EA	nach EA	n. EA korr	vor EA	nach EA	
07.03.2022	Ausbrand	A	16	19	12.8	13.9	142.9	23.3		146.5	20.7	84%
10.03.2022		E	29	26	15.6	16.4	261.0	118.9		174.8	67.7	54%
10.03.2022		A	34	10	15.7	16.3	331.1	41.7		219.4	24.4	87%
11.03.2022		E	9	13	17.2	17.7	280.4	154.9	111.6	133.4	64.5	45%
24.03.2022		E	31	11	17.1	17.7	451.5	153.6		221.4	64.2	66%
Mittelwert KA	**Ausbrand**	**A**			14.2	15.1	**237.0**	**32.5**		182.9	22.6	**86%**
Median KA					14.2	15.1	**237.0**	**32.5**		182.9	22.6	**86%**
Stabw KA					2.1	1.7	133.1	13.0		51.5	2.6	3%
Stabw KA in %					14%	11%	56%	40%		28%	12%	
Mittelwert KE	**Ausbrand**	**E**			16.6	17.3	**331.0**	142.5	**128.0**	176.5	65.4	**60%**
Median KE					17.1	17.7	**280.4**	153.6	**118.9**	174.8	64.5	**60%**
Stabw KE					0.9	0.7	104.8	20.4	22.5	44.0	1.9	8%
Stabw KE in %					5%	4%	32%	14%	18%	25%	3%	
Anzahl Messungen	**Ausbrand**	**A+E**			5							
Mittelwert total					15.7	16.4	**293.4**	98.5	**89.8**	179.1	48.3	**73%**
Median					15.7	16.4	**280.4**	118.9	**111.6**	174.8	64.2	**75%**
Stabw total					1.8	1.5	112.1	62.3	55.1	40.6	23.6	15%
Stabw in %					11%	9%	38%	63%	61%	23%	49%	

Kessel A

Messung	1	2
Vor EA		
Nach EA		

Kessel E

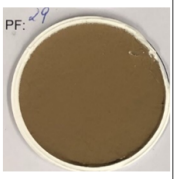
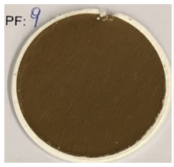
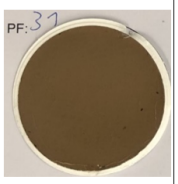
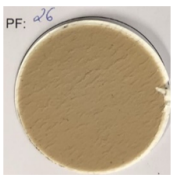
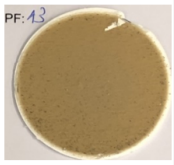
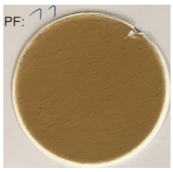
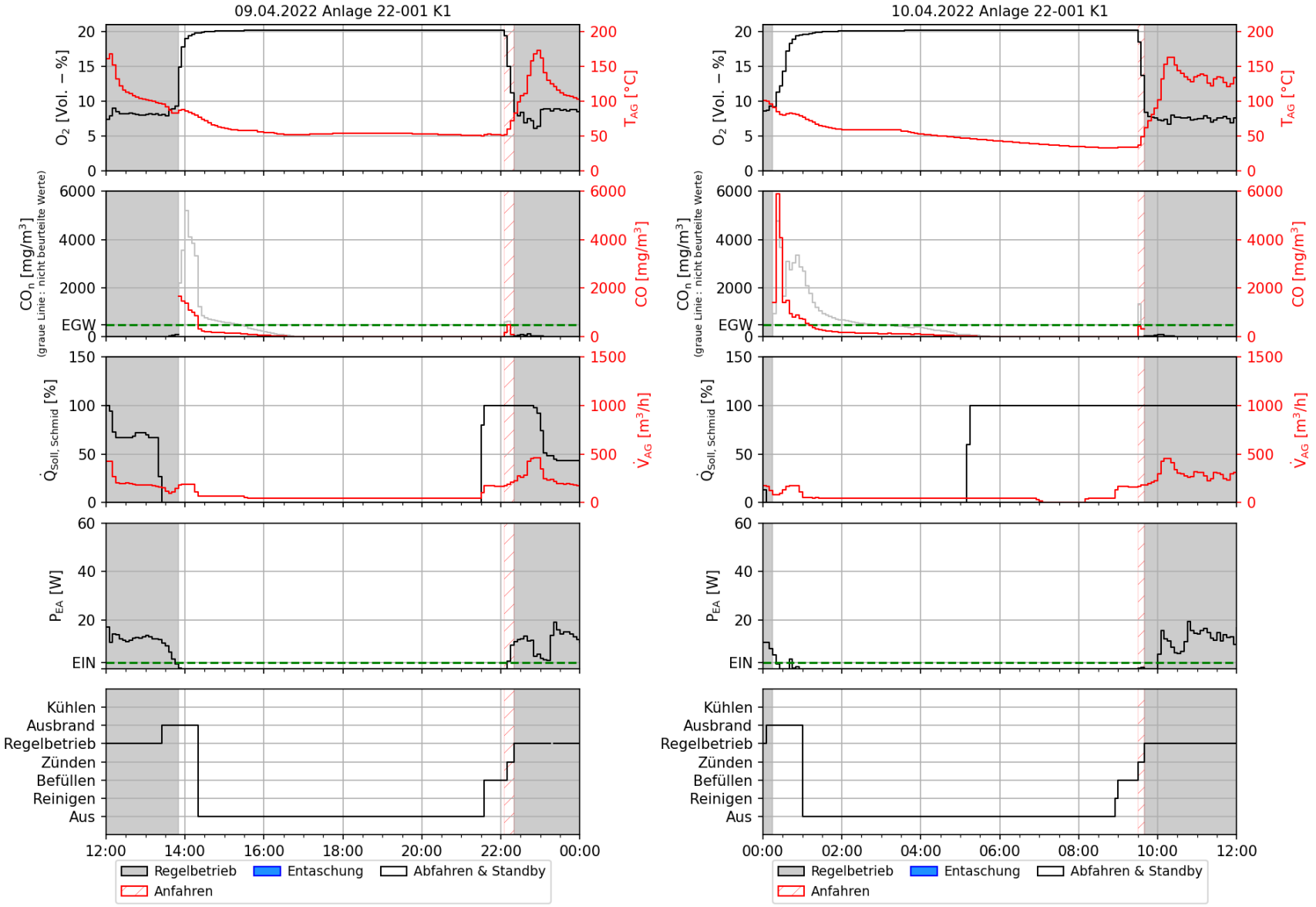
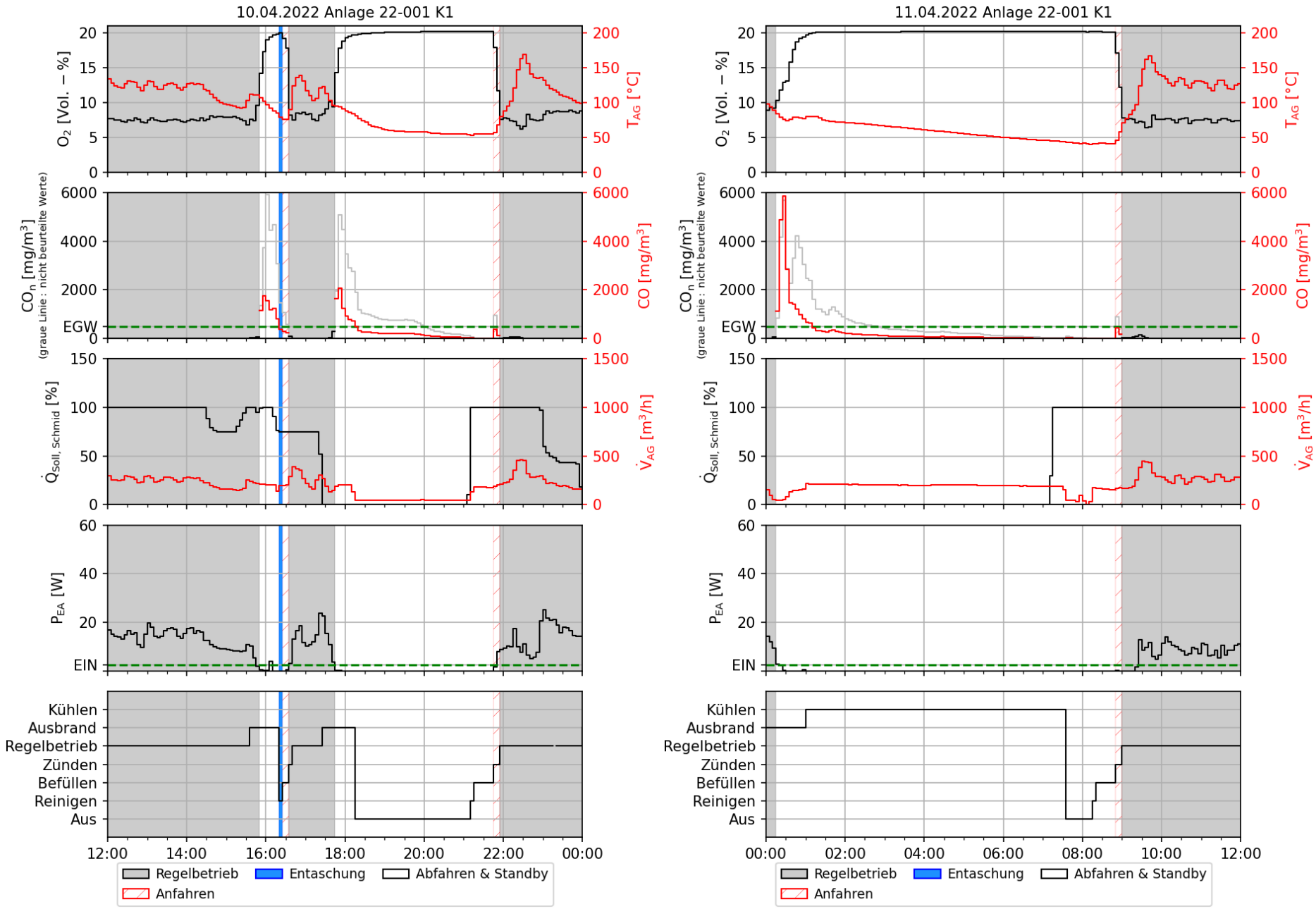
Messung	1	2	3
Vor EA			
Nach EA			

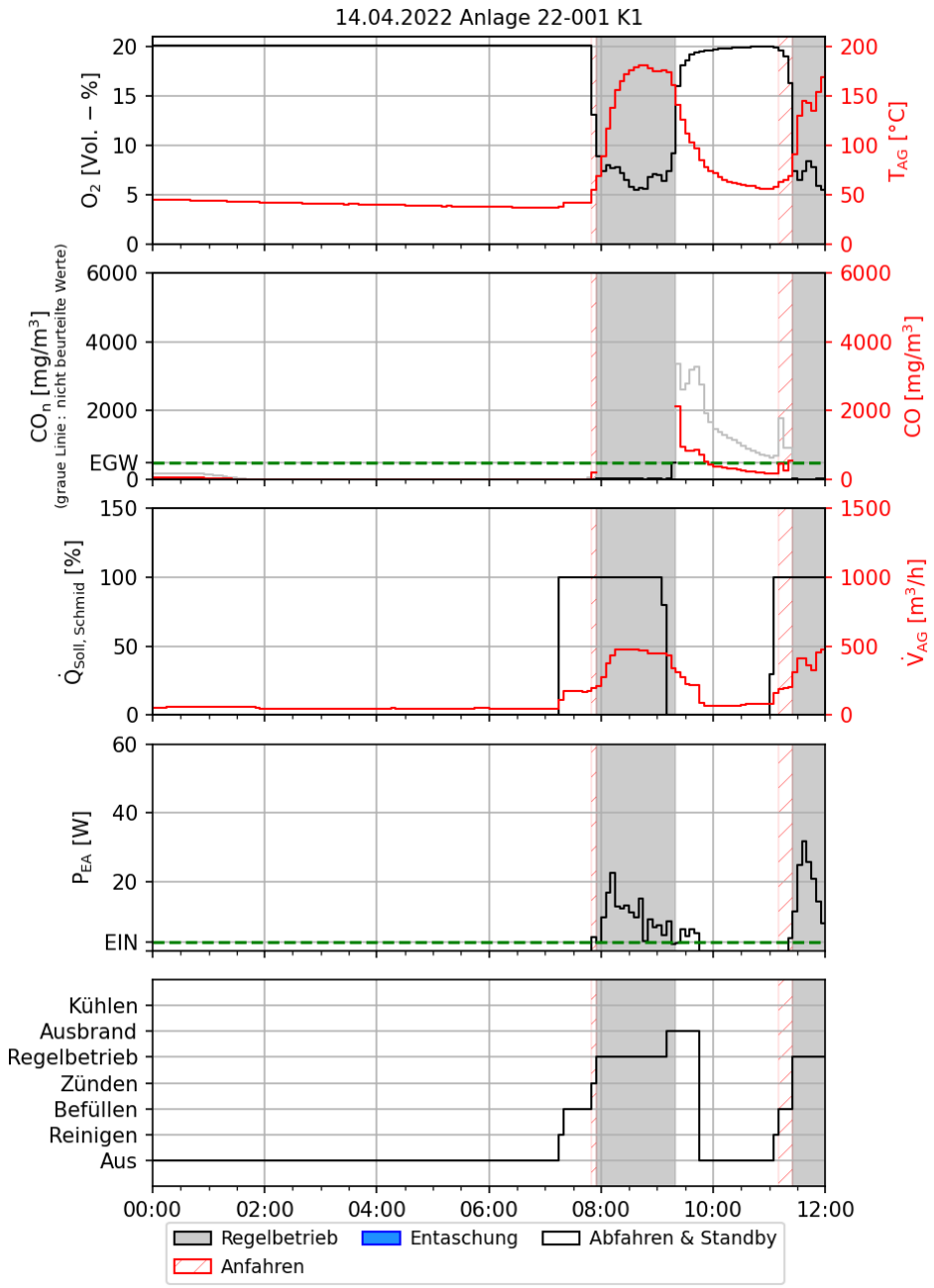
Bild 73 Fotos aller Planfilter von Kessel A (links) und Kessel E (rechts) vor und nach dem EA am Standort B für den Betriebszustand «Ausbrand». Die Planfilternummer (PF) sind in der Tabelle 20 markiert.

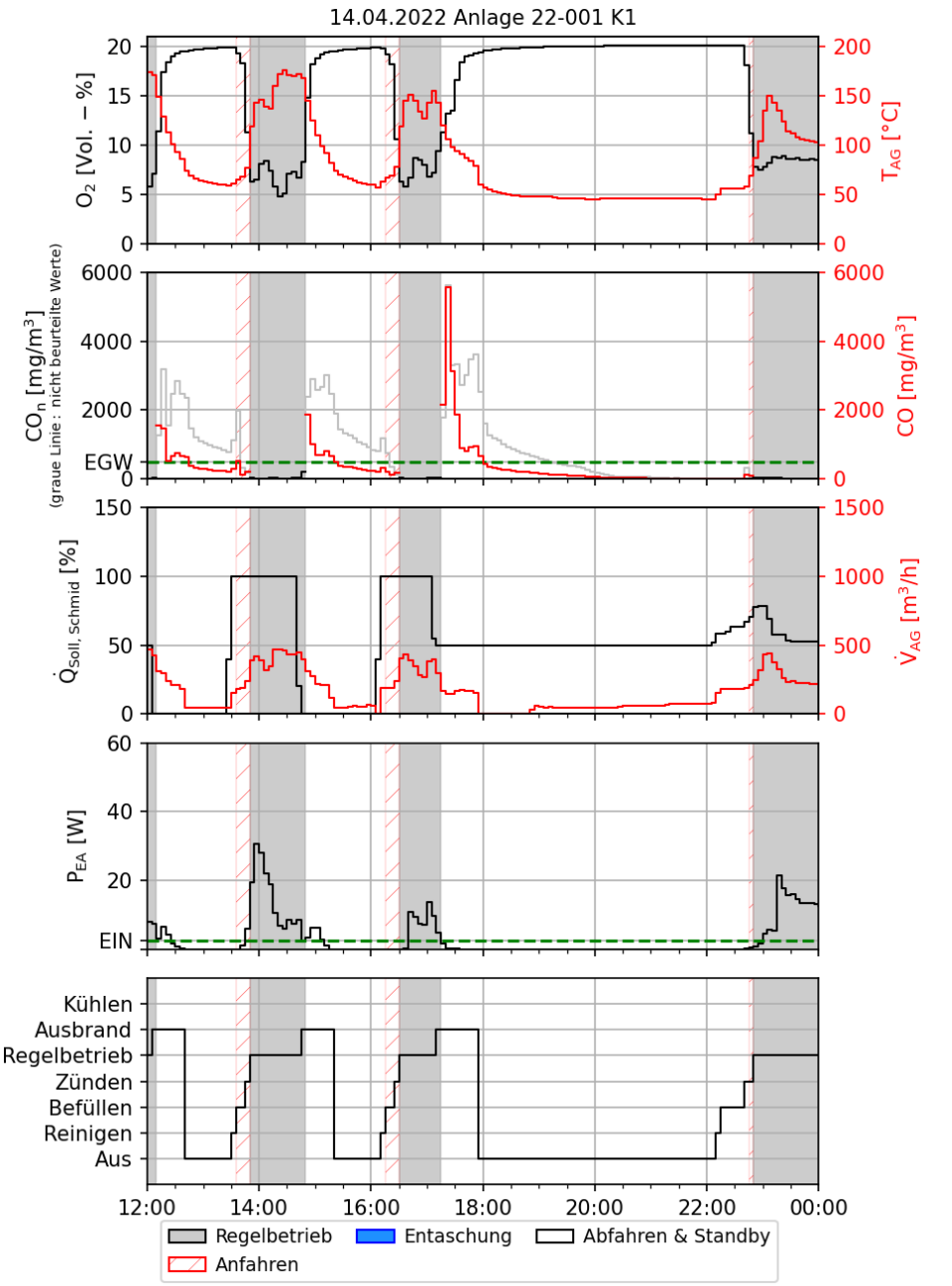
11.5 Weitere Zeitverläufe der LZM - Anlage Standort A

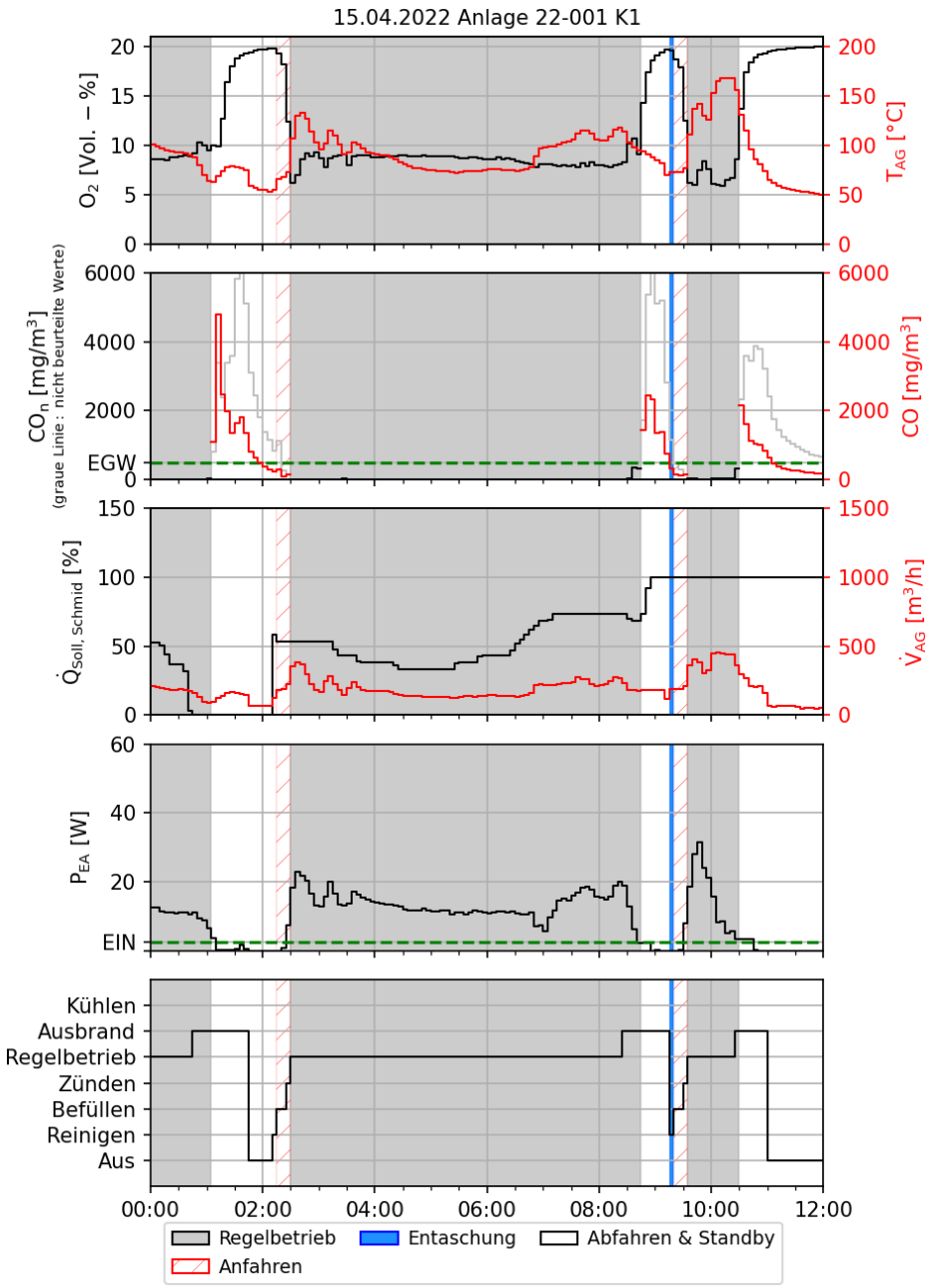
Kessel1

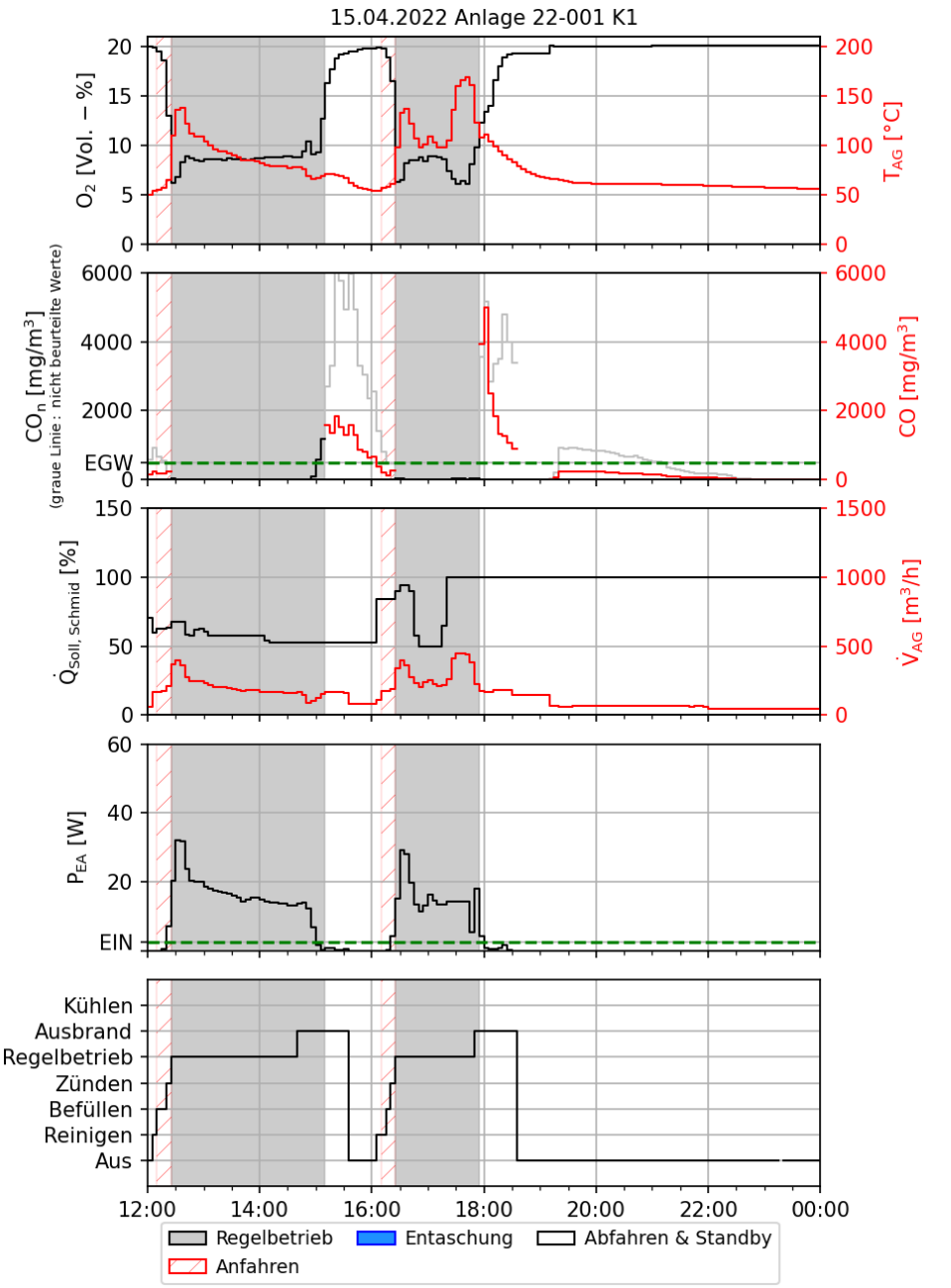



10.04.2022 Anlage 22-001 K1
11.04.2022 Anlage 22-001 K1
O2 [Vol. – %]
TAG [°C]
COn [mg/m³]
(graue Linie : nicht beurteilte Werte)
CO [mg/m³]
EGW
Q̇Soll, Schmid [%]
V̇AG [m³/h]
PEA [W]
EIN
Kühlen
Ausbrand
Regelbetrieb
Zünden
Befüllen
Reinigen
Aus
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
00:00
02:00
04:00
06:00
08:00
10:00
12:00
Regelbetrieb
Entaschung
Abfahren & Standby
Anfahren

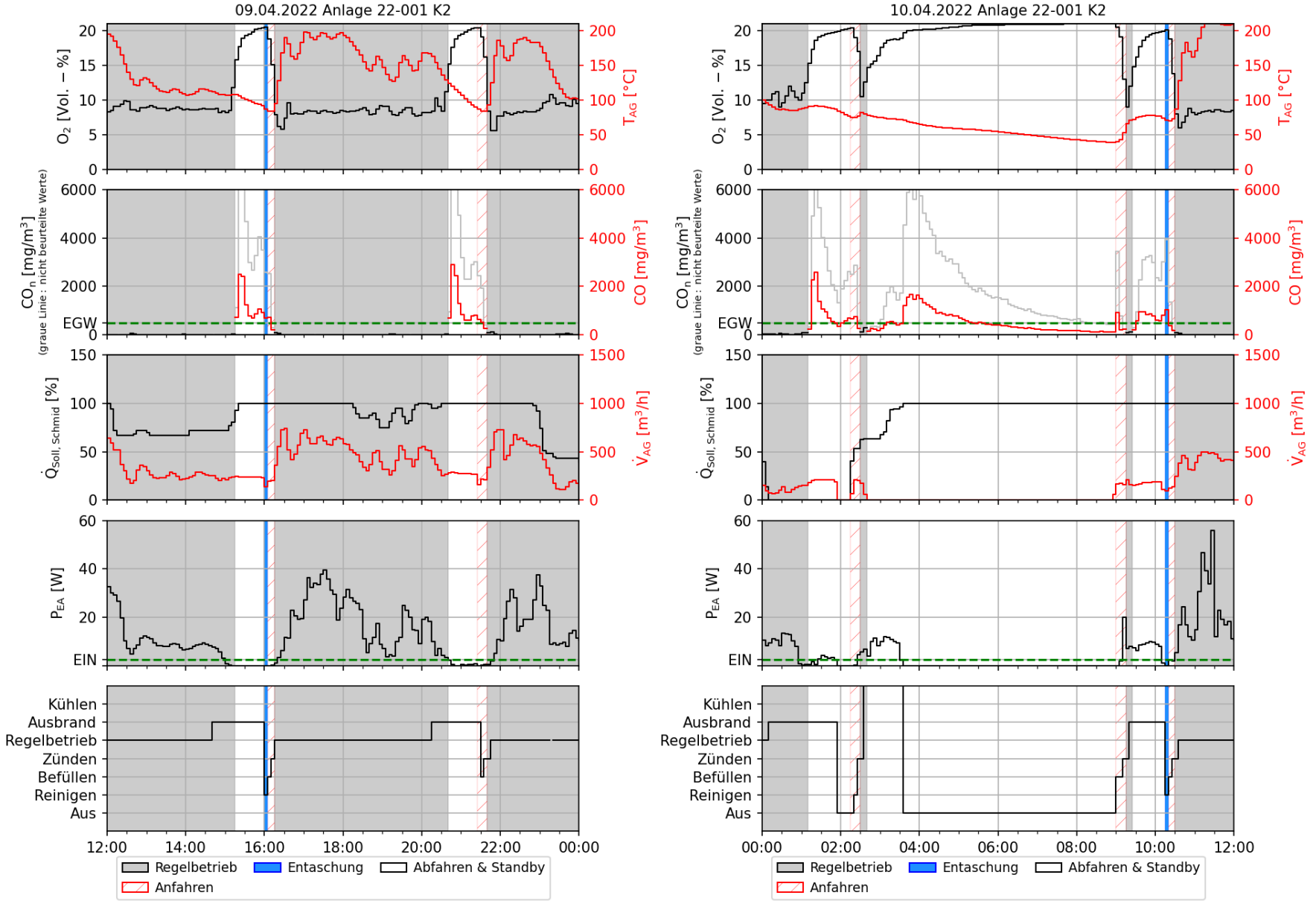

14.04.2022 Anlage 22-001 K1
O2 [Vol. – %]
TAG [°C]
COn [mg/m³]
(graue Linie : nicht beurteilte Werte)
CO [mg/m³]
EGW
Q̇Soll, Schmid [%]
V̇AG [m³/h]
PEA [W]
EIN
Kühlen
Ausbrand
Regelbetrieb
Zünden
Befüllen
Reinigen
Aus
00:00
02:00
04:00
06:00
08:00
10:00
12:00
Regelbetrieb
Entaschung
Abfahren & Standby
Anfahren

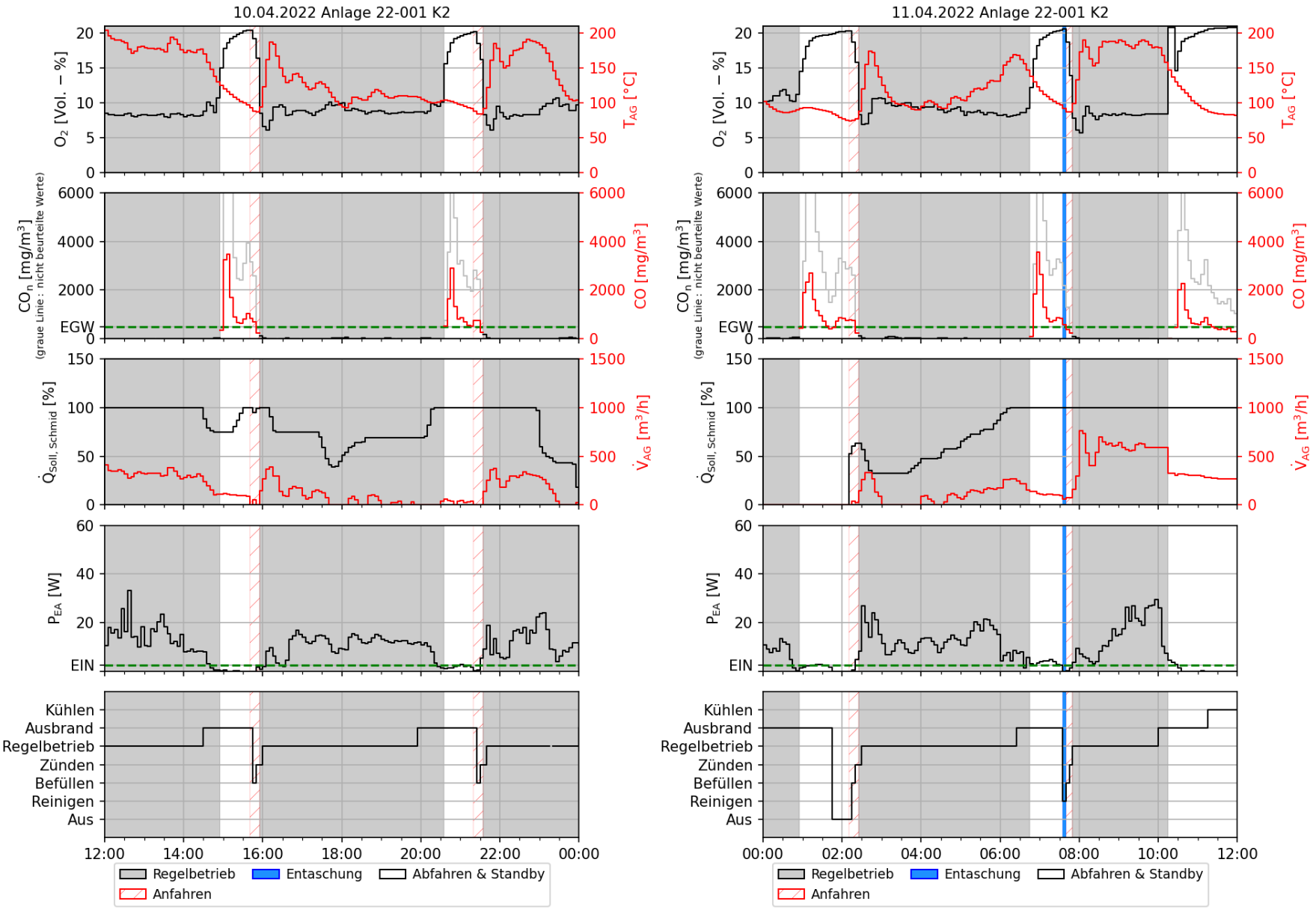

14.04.2022 Anlage 22-001 K1
O2 [Vol. – %]
TAG [°C]
COn [mg/m³]
(graue Linie : nicht beurteilte Werte)
CO [mg/m³]
EGW
Q̇Soll, Schmid [%]
V̇AG [m³/h]
PEA [W]
EIN
Kühlen
Ausbrand
Regelbetrieb
Zünden
Befüllen
Reinigen
Aus
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
00:00
Regelbetrieb
Entaschung
Abfahren & Standby
Anfahren


15.04.2022 Anlage 22-001 K1
O2 [Vol. – %]
TAG [°C]
COn [mg/m³]
(graue Linie : nicht beurteilte Werte)
CO [mg/m³]
EGW
Q̇Soll, Schmid [%]
V̇AG [m³/h]
PEA [W]
EIN
Kühlen
Ausbrand
Regelbetrieb
Zünden
Befüllen
Reinigen
Aus
00:00
02:00
04:00
06:00
08:00
10:00
12:00
Regelbetrieb
Entaschung
Abfahren & Standby
Anfahren

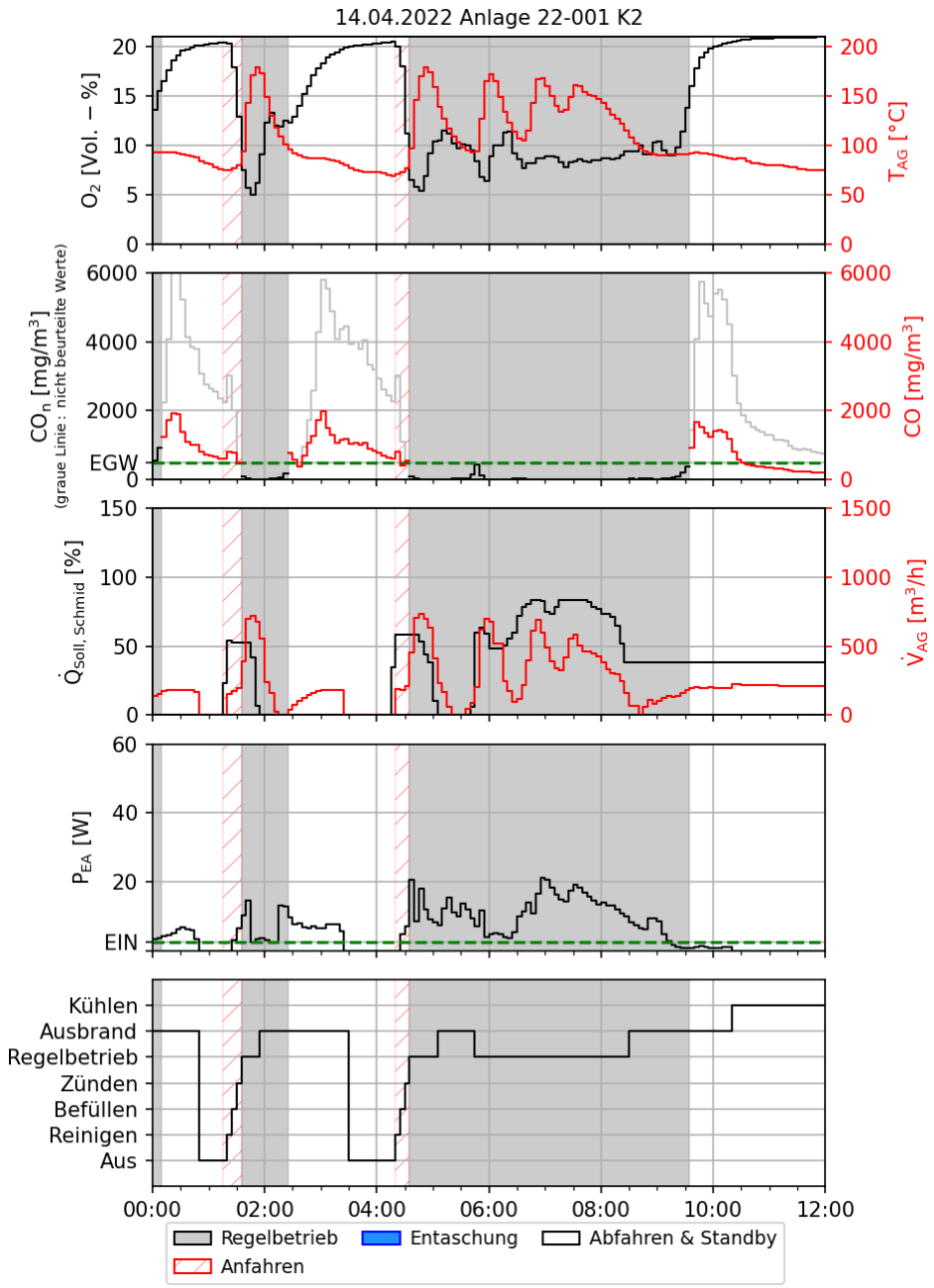

15.04.2022 Anlage 22-001 K1
O2 [Vol. – %]
TAG [°C]
COn [mg/m³]
(graue Linie : nicht beurteilte Werte)
CO [mg/m³]
EGW
Q̇Soll, Schmid [%]
V̇AG [m³/h]
PEA [W]
EIN
Kühlen
Ausbrand
Regelbetrieb
Zünden
Befüllen
Reinigen
Aus
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
00:00
Regelbetrieb
Entaschung
Abfahren & Standby
Anfahren

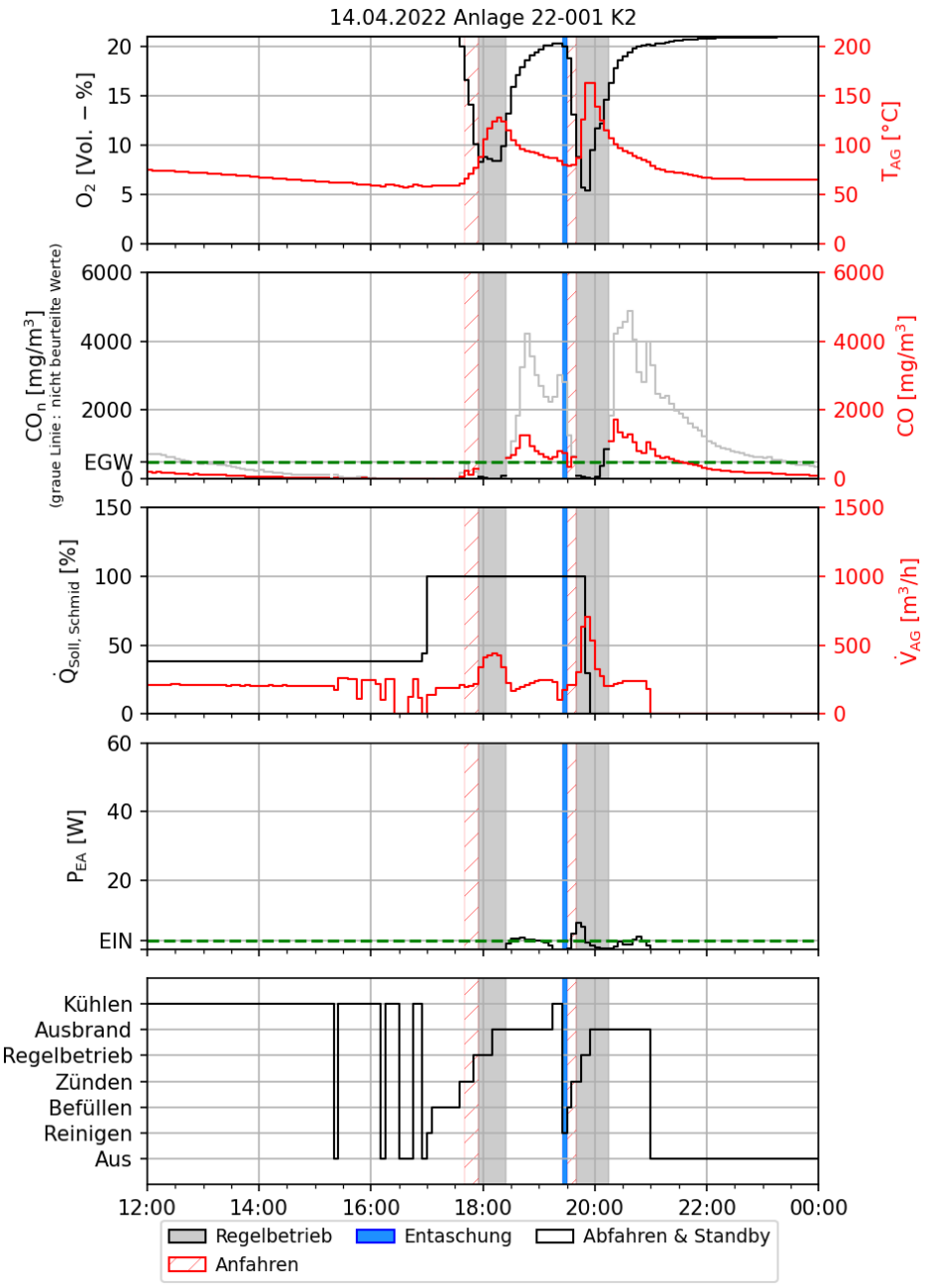
Kessel 2

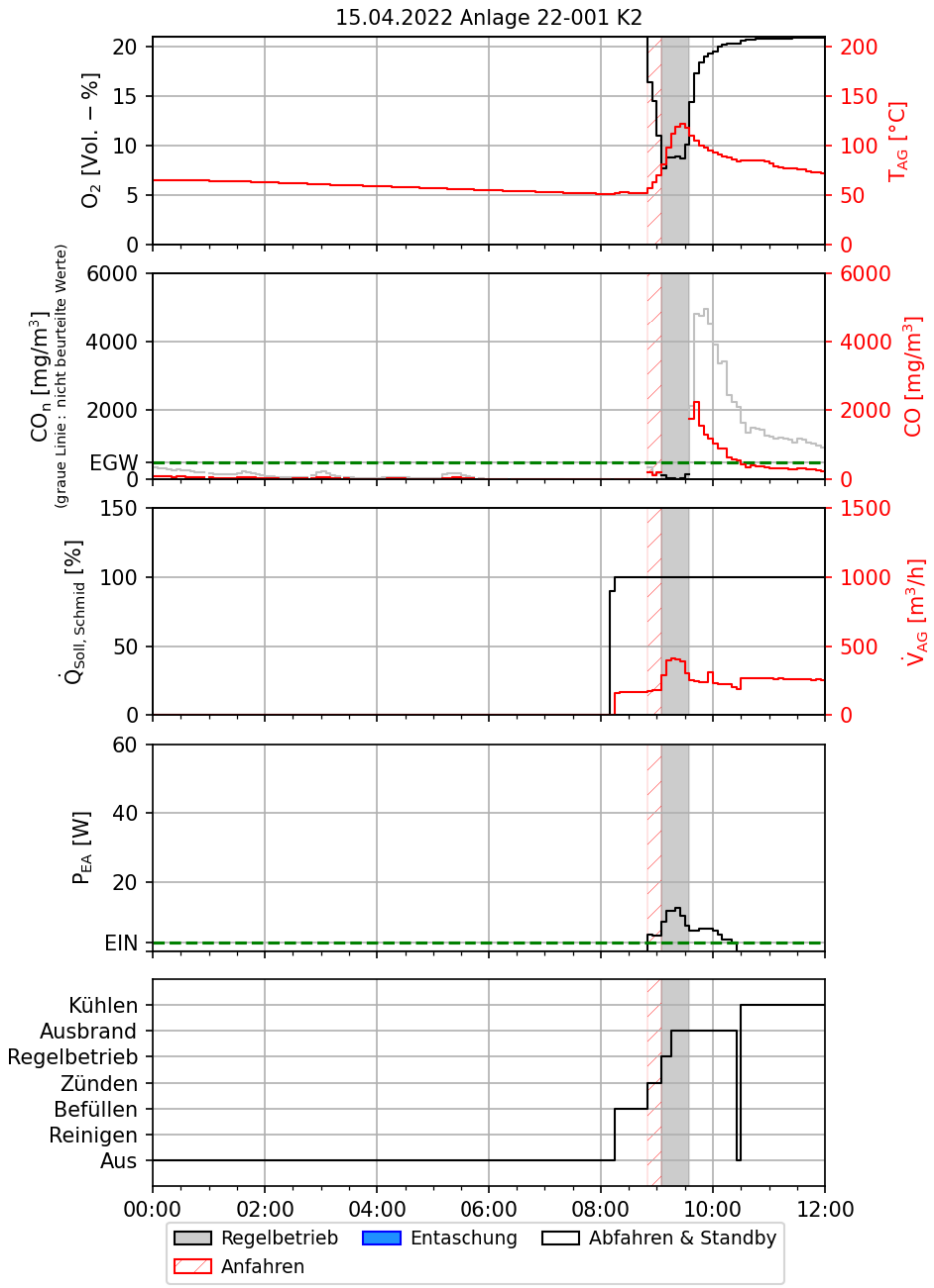

09.04.2022 Anlage 22-001 K2
10.04.2022 Anlage 22-001 K2
O2 [Vol. – %]
TAG [°C]
COn [mg/m³]
(graue Linie : nicht beurteilte Werte)
CO [mg/m³]
EGW
Q̇Soll, Schmid [%]
V̇AG [m³/h]
PEA [W]
EIN
Kühlen
Ausbrand
Regelbetrieb
Zünden
Befüllen
Reinigen
Aus
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
00:00
02:00
04:00
06:00
08:00
10:00
12:00
Regelbetrieb
Entaschung
Abfahren & Standby
Anfahren

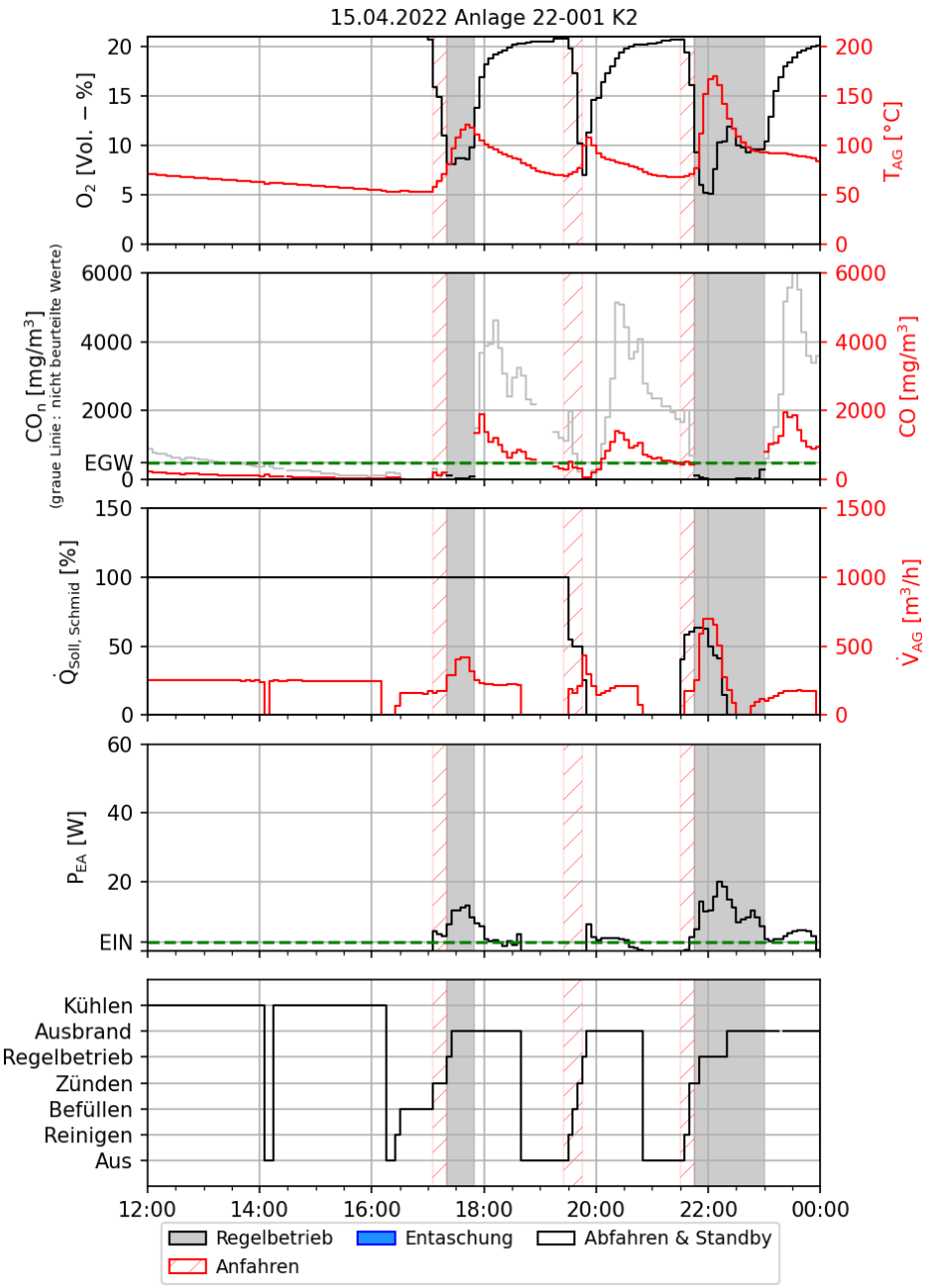


Am 10.04 sieht man Anzeichen, dass das Staurohr teilweise verstopft war. Ab 11.04 ca. 08:00, nach dem Eintreffen auf der Anlage und dem Durchblasen des Staurohrs, steigen die Werte sprunghaft wieder auf ein Niveau an, welches mit anderen Perioden vergleichbar ist.


14.04.2022 Anlage 22-001 K2
O2 [Vol. – %]
TAG [°C]
COn [mg/m³]
(graue Linie : nicht beurteilte Werte)
CO [mg/m³]
EGW
QSoll, Schmid [%]
VAG [m³/h]
PEA [W]
EIN
Kühlen
Ausbrand
Regelbetrieb
Zünden
Befüllen
Reinigen
Aus
00:00
02:00
04:00
06:00
08:00
10:00
12:00
Regelbetrieb
Entaschung
Abfahren & Standby
Anfahren

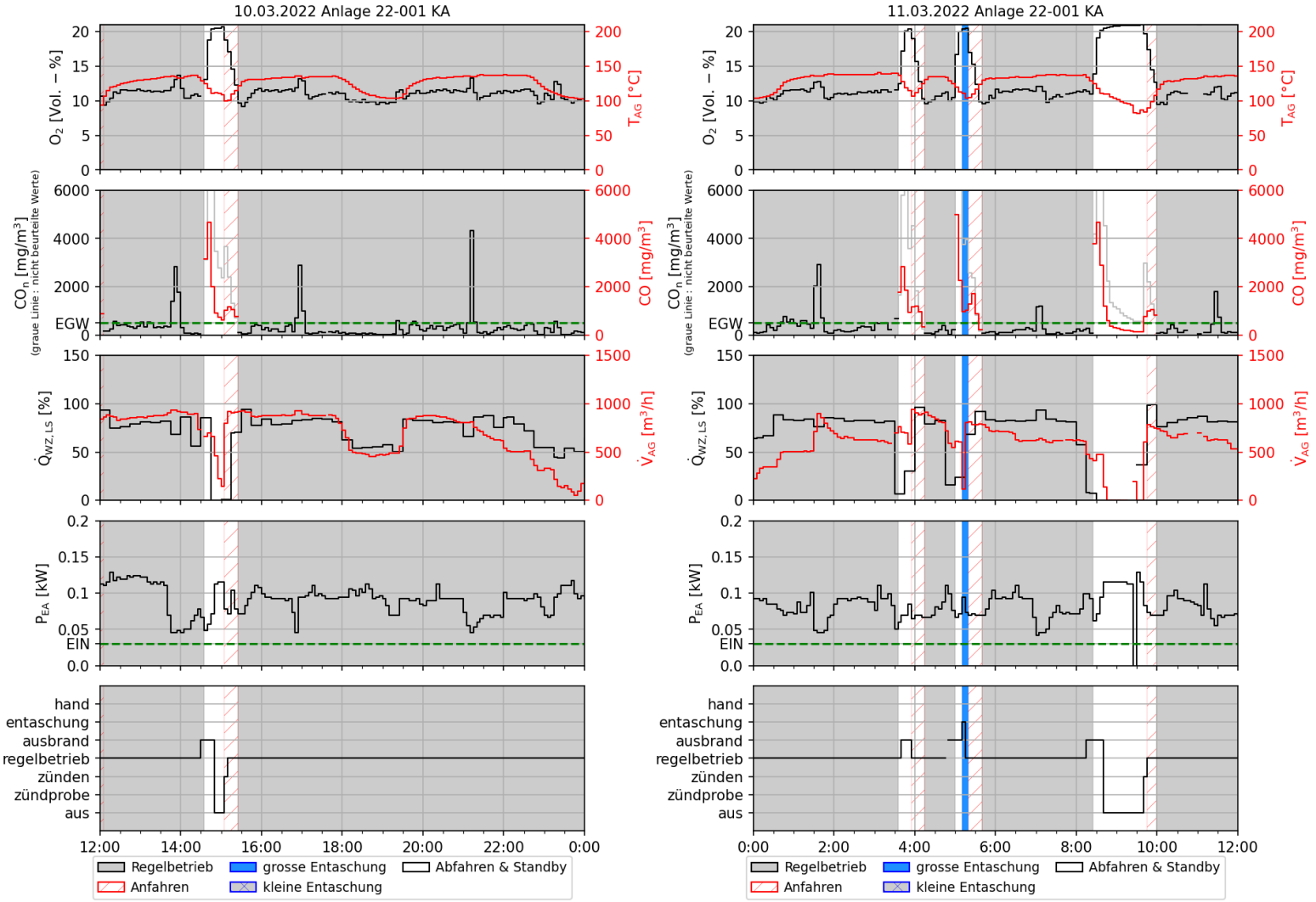

14.04.2022 Anlage 22-001 K2
O2 [Vol. – %]
TAG [°C]
COn [mg/m³]
(graue Linie : nicht beurteilte Werte)
CO [mg/m³]
EGW
QSoll, Schmid [%]
VAG [m³/h]
PEA [W]
EIN
Kühlen
Ausbrand
Regelbetrieb
Zünden
Befüllen
Reinigen
Aus
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
00:00
Regelbetrieb
Entaschung
Abfahren & Standby
Anfahren

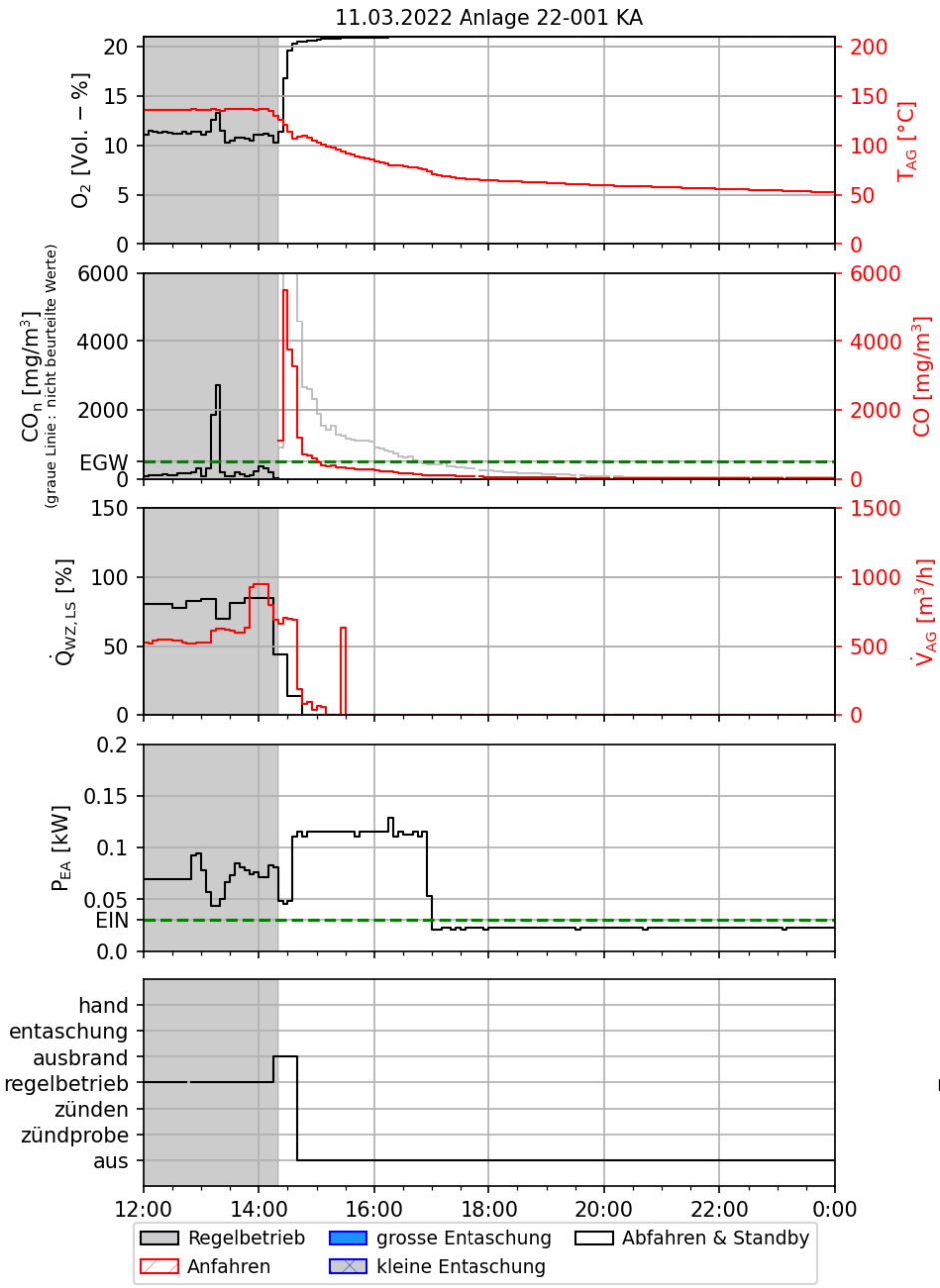

15.04.2022 Anlage 22-001 K2
O2 [Vol. – %]
TAG [°C]
COn [mg/m³]
(graue Linie : nicht beurteilte Werte)
CO [mg/m³]
EGW
QSoll, Schmid [%]
VAG [m³/h]
PEA [W]
EIN
Kühlen
Ausbrand
Regelbetrieb
Zünden
Befüllen
Reinigen
Aus
00:00
02:00
04:00
06:00
08:00
10:00
12:00
Regelbetrieb
Entaschung
Abfahren & Standby
Anfahren

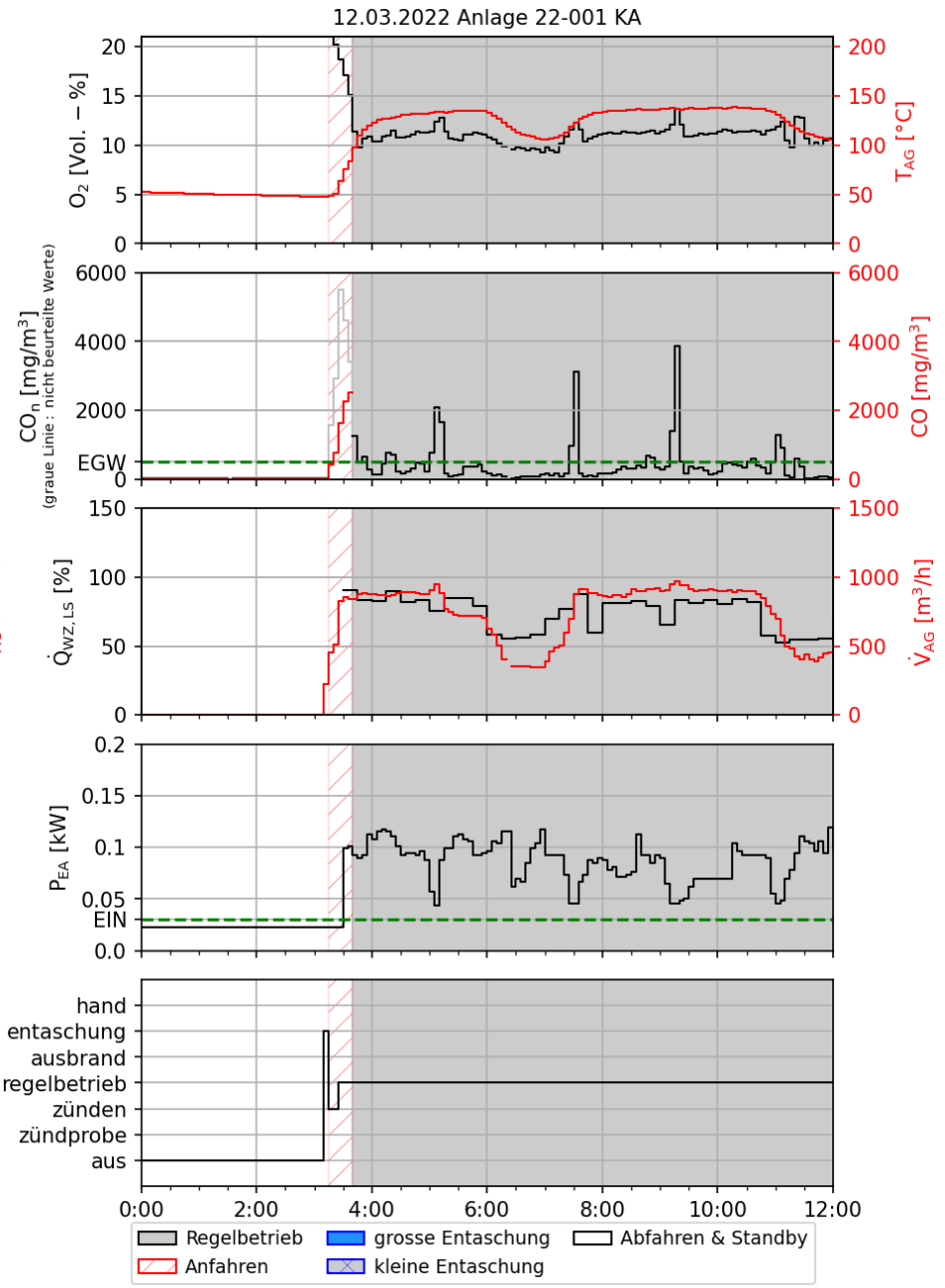

15.04.2022 Anlage 22-001 K2
O2 [Vol. – %]
TAG [°C]
COn [mg/m³]
(graue Linie : nicht beurteilte Werte)
CO [mg/m³]
EGW
QSoll, Schmid [%]
VAG [m³/h]
PEA [W]
EIN
Kühlen
Ausbrand
Regelbetrieb
Zünden
Befüllen
Reinigen
Aus
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
00:00
Regelbetrieb
Entaschung
Abfahren & Standby
Anfahren

11.6 Weitere Zeitverläufe der LZM - Anlage Standort B

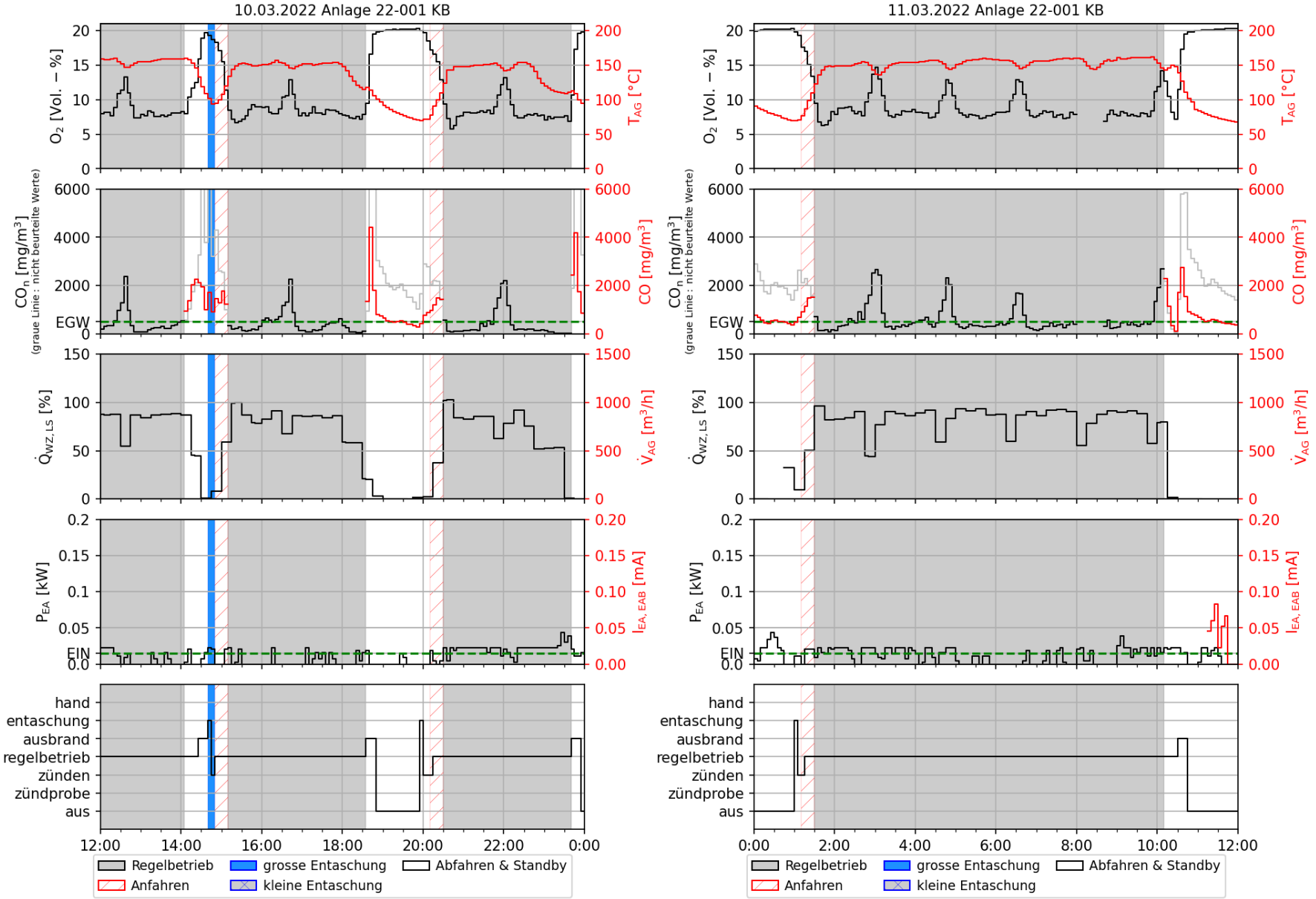
Kessel A

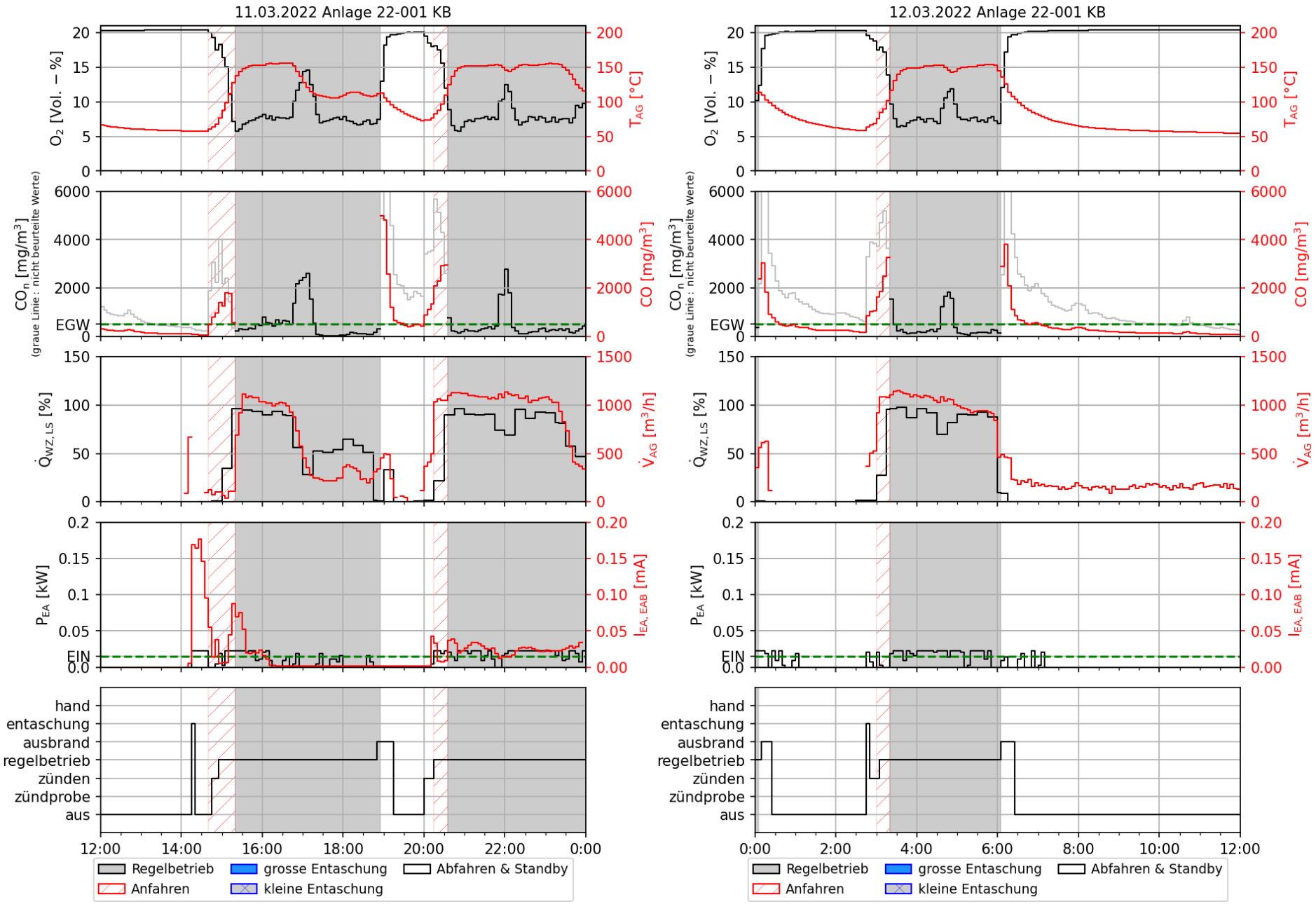



11.03.2022 Anlage 22-001 KA
O2 [Vol. – %]
TAG [°C]
COn [mg/m³]
(graue Linie : nicht beurteilte Werte)
CO [mg/m³]
EGW
QWZ,LS [%]
V̇AG [m³/h]
PEA [kW]
EIN
hand
entaschung
ausbrand
regelbetrieb
zünden
zündprobe
aus
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
0:00
Regelbetrieb
grosse Entaschung
Abfahren & Standby
Anfahren
kleine Entaschung

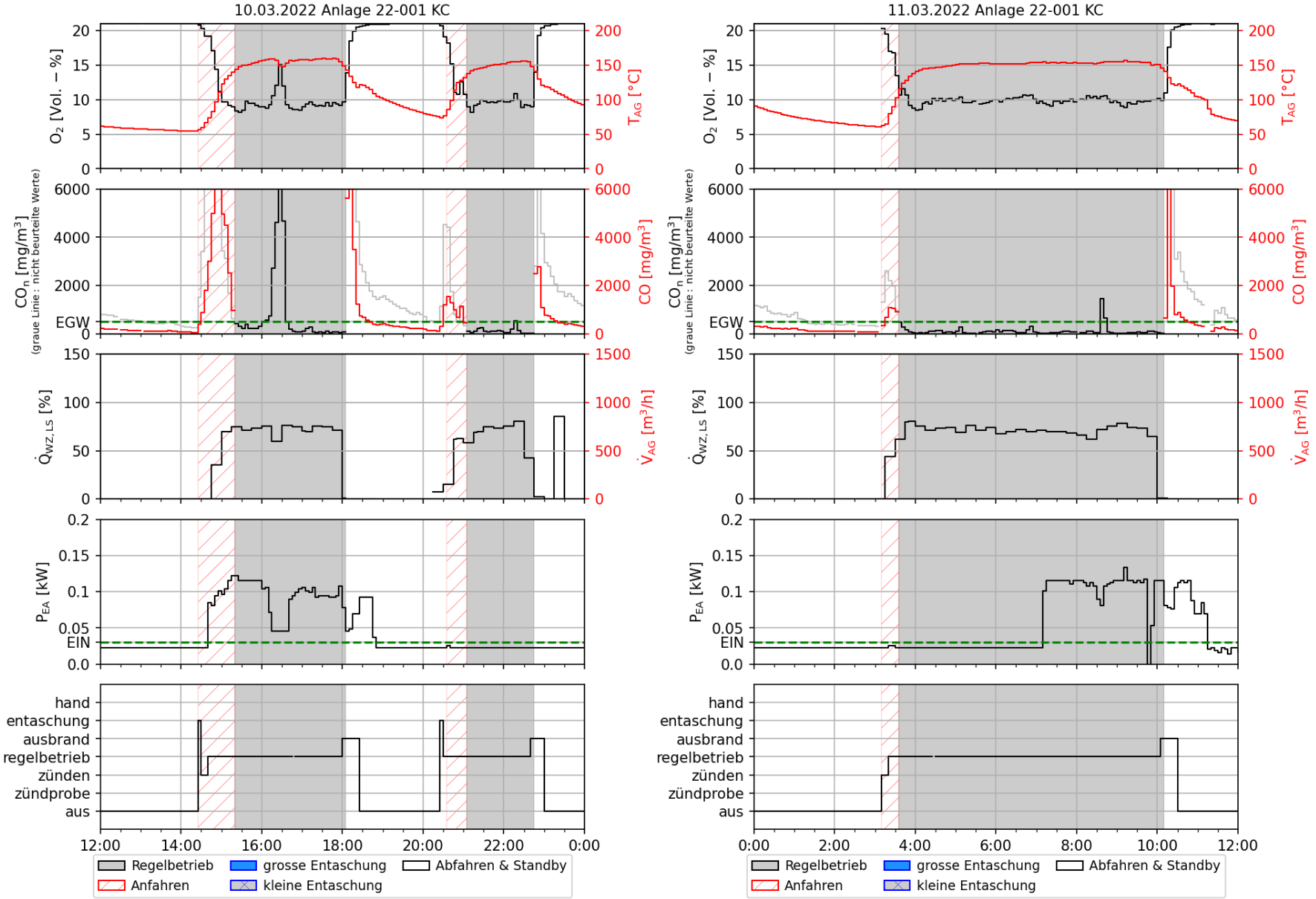

12.03.2022 Anlage 22-001 KA
O2 [Vol. – %]
TAG [°C]
COn [mg/m³]
(graue Linie : nicht beurteilte Werte)
CO [mg/m³]
EGW
QWZ,LS [%]
V̇AG [m³/h]
PEA [kW]
EIN
hand
entaschung
ausbrand
regelbetrieb
zünden
zündprobe
aus
0:00
2:00
4:00
6:00
8:00
10:00
12:00
Regelbetrieb
grosse Entaschung
Abfahren & Standby
Anfahren
kleine Entaschung

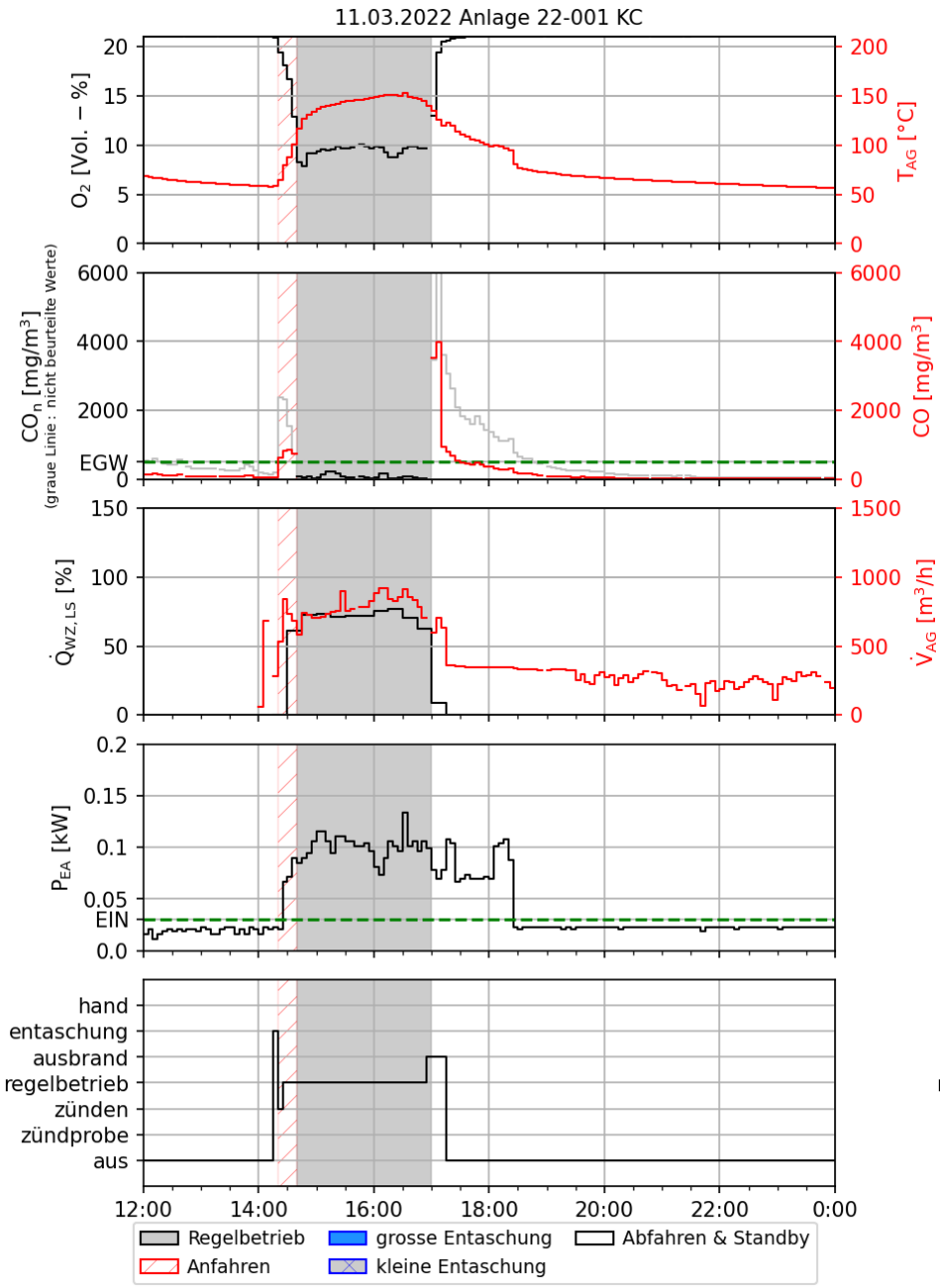
Kessel B

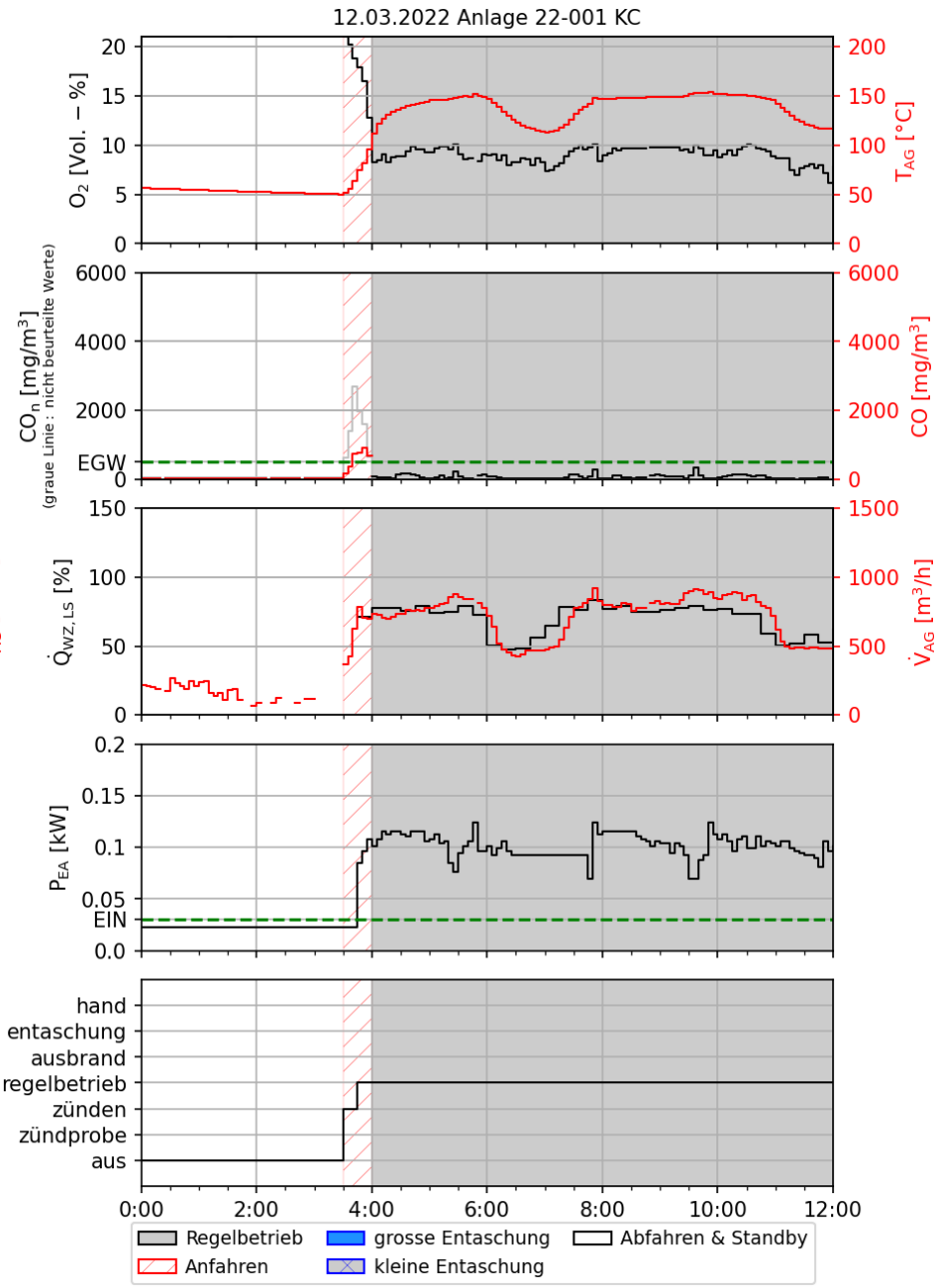

10.03.2022 Anlage 22-001 KB
11.03.2022 Anlage 22-001 KB
O2 [Vol. – %]
TAG [°C]
COn [mg/m³]
(graue Linie : nicht beurteilte Werte)
CO [mg/m³]
EGW
QWZ,LS [%]
VAG [m³/h]
PEA [kW]
IEA, EAB [mA]
EIN
hand
entaschung
ausbrand
regelbetrieb
zünden
zündprobe
aus
Regelbetrieb
grosse Entaschung
Abfahren & Standby
Anfahren
kleine Entaschung


11.03.2022 Anlage 22-001 KB
12.03.2022 Anlage 22-001 KB
O2 [Vol. – %]
TAG [°C]
COn [mg/m³]
(graue Linie : nicht beurteilte Werte)
CO [mg/m³]
EGW
QWZ,LS [%]
VAG [m³/h]
PEA [kW]
IEA,EAB [mA]
EIN
hand
entaschung
ausbrand
regelbetrieb
zünden
zündprobe
aus
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
0:00
2:00
4:00
6:00
8:00
10:00
12:00
Regelbetrieb
grosse Entaschung
Abfahren & Standby
Anfahren
kleine Entaschung

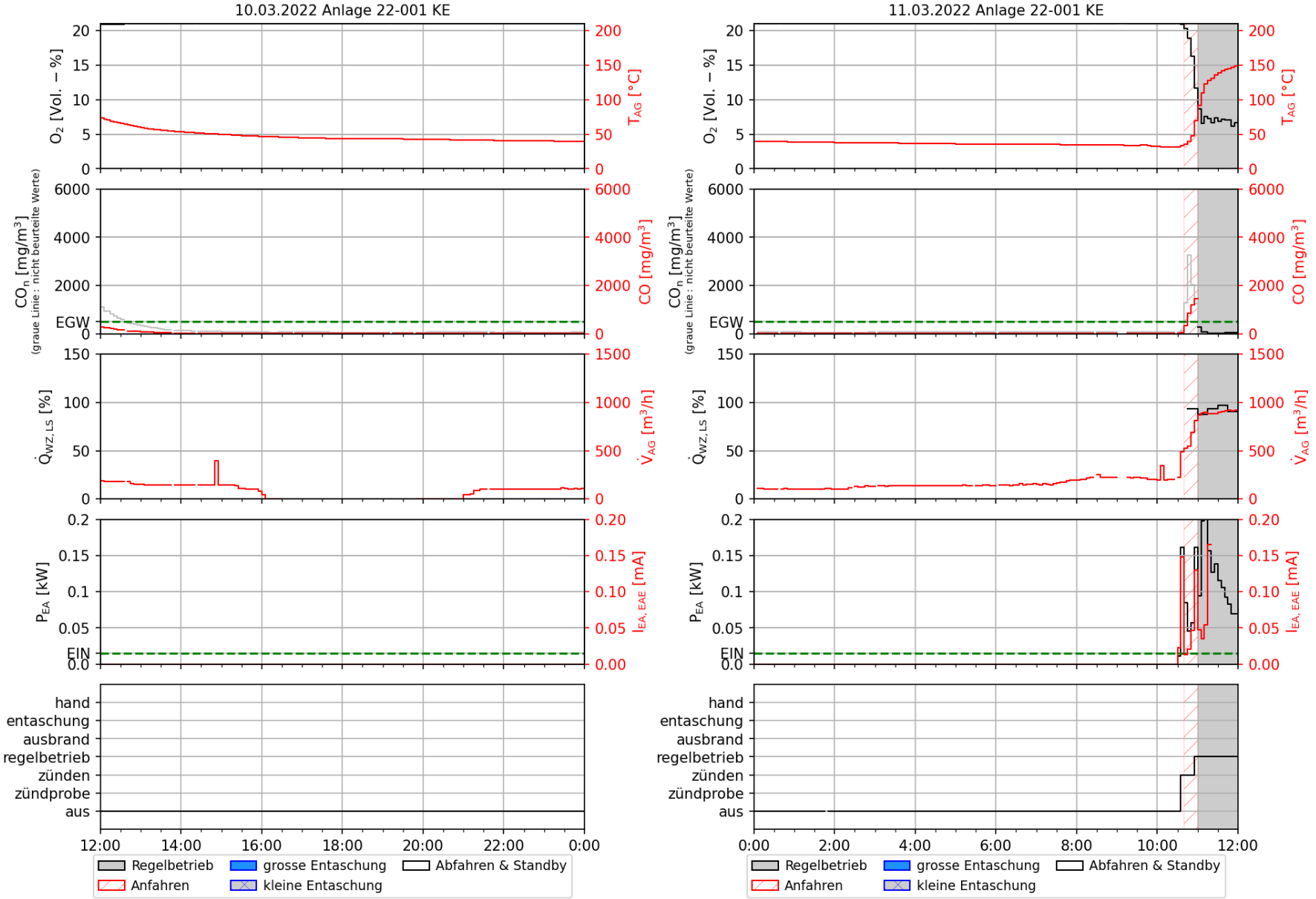
Kessel C

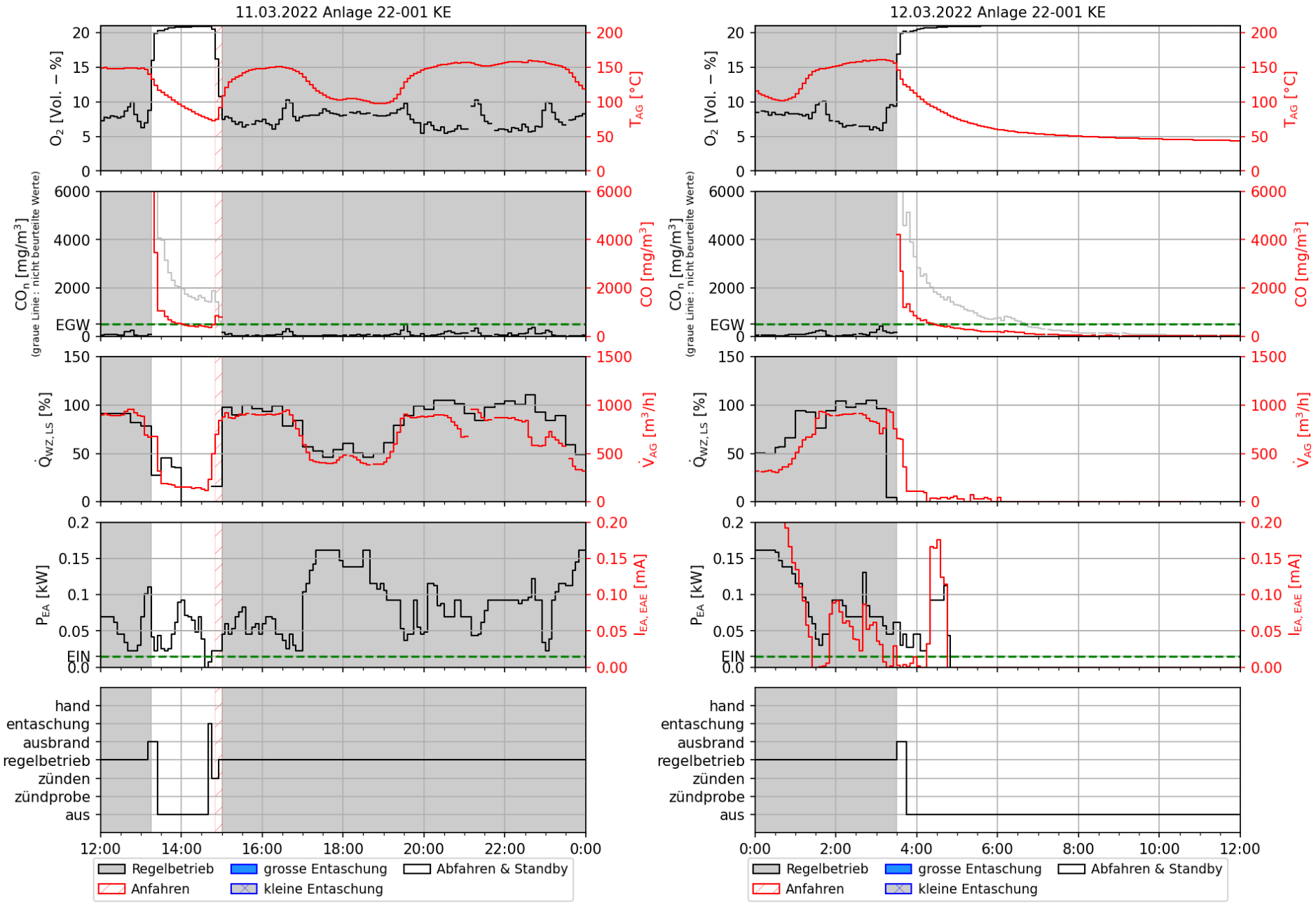

10.03.2022 Anlage 22-001 KC
11.03.2022 Anlage 22-001 KC
O2 [Vol. – %]
TAG [°C]
COn [mg/m³]
(graue Linie : nicht beurteilte Werte)
CO [mg/m³]
EGW
QWZ,LS [%]
VAG [m³/h]
PEA [kW]
EIN
hand
entaschung
ausbrand
regelbetrieb
zünden
zündprobe
aus
Regelbetrieb
grosse Entaschung
Abfahren & Standby
Anfahren
kleine Entaschung


11.03.2022 Anlage 22-001 KC
O2 [Vol. – %]
TAG [°C]
COn [mg/m³]
(graue Linie : nicht beurteilte Werte)
CO [mg/m³]
EGW
QWZ,LS [%]
V̇AG [m³/h]
PEA [kW]
EIN
hand
entaschung
ausbrand
regelbetrieb
zünden
zündprobe
aus
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
0:00
Regelbetrieb
Anfahren
grosse Entaschung
kleine Entaschung
Abfahren & Standby


12.03.2022 Anlage 22-001 KC
O2 [Vol. – %]
TAG [°C]
COn [mg/m³]
(graue Linie : nicht beurteilte Werte)
CO [mg/m³]
EGW
QWZ,LS [%]
V̇AG [m³/h]
PEA [kW]
EIN
hand
entaschung
ausbrand
regelbetrieb
zünden
zündprobe
aus
0:00
2:00
4:00
6:00
8:00
10:00
12:00
Regelbetrieb
Anfahren
grosse Entaschung
kleine Entaschung
Abfahren & Standby

Kessel E

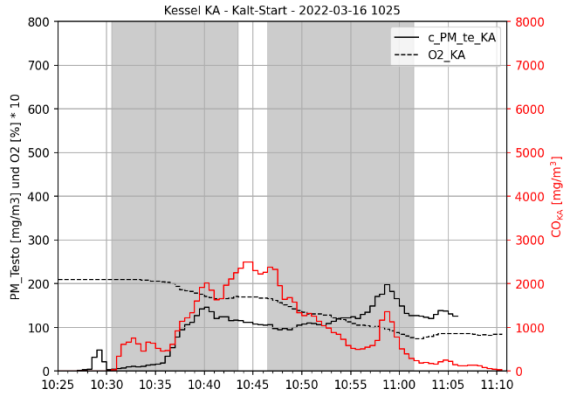

10.03.2022 Anlage 22-001 KE
11.03.2022 Anlage 22-001 KE
O2 [Vol. – %]
TAG [°C]
COn [mg/m³]
(graue Linie : nicht beurteilte Werte)
CO [mg/m³]
EGW
QWZ,LS [%]
VAG [m³/h]
PEA [kW]
IEA, EAE [mA]
EIN
hand
entaschung
ausbrand
regelbetrieb
zünden
zündprobe
aus
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
0:00
2:00
4:00
6:00
8:00
10:00
12:00
Regelbetrieb
grosse Entaschung
Abfahren & Standby
Anfahren
kleine Entaschung

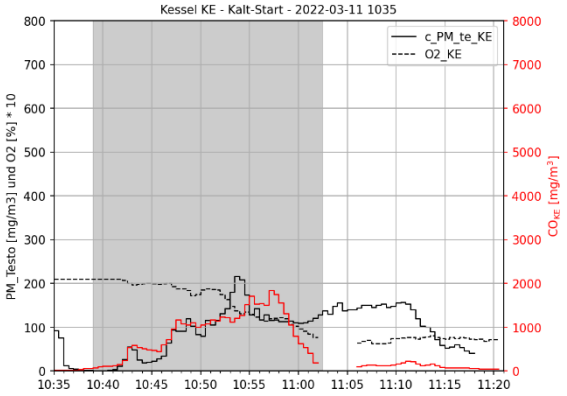

11.03.2022 Anlage 22-001 KE
12.03.2022 Anlage 22-001 KE
O2 [Vol. – %]
TAG [°C]
COn [mg/m³]
(graue Linie : nicht beurteilte Werte)
CO [mg/m³]
EGW
QWZ, LS [%]
VAG [m³/h]
PEA [kW]
IEA, EAE [mA]
EIN
hand
entaschung
ausbrand
regelbetrieb
zünden
zündprobe
aus
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
0:00
2:00
4:00
6:00
8:00
10:00
12:00
Regelbetrieb
grosse Entaschung
Abfahren & Standby
Anfahren
kleine Entaschung

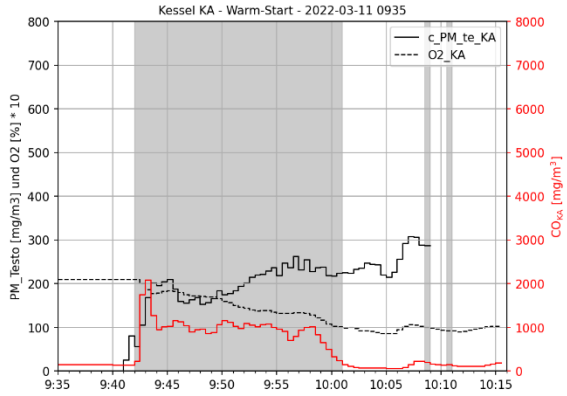
11.7 Zeitverläufe O_2, CO und PM Testo von einigen Staubmessungen

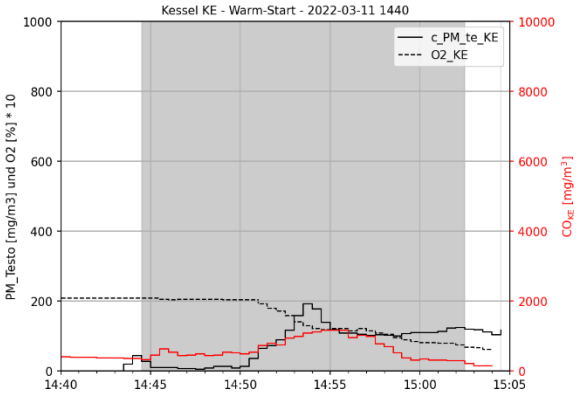
Die grau schraffierten Flächen in den nachfolgenden Grafiken markieren jene Perioden, in denen die gravimetrische Staubmessung gemäss BAFU Messempfehlung durchgeführt wurde. Die Zeitverläufe zeigen exemplarisch, ob die gravimetrischen Staubmessungen, vor allem jene während instationärer Phasen, zur richtigen Zeit (Anstieg CO und PM_{Testo}) gestartet wurden.

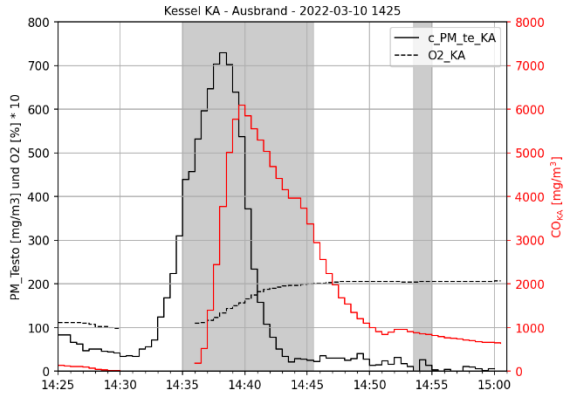
11.7.1 Anlage Standort B

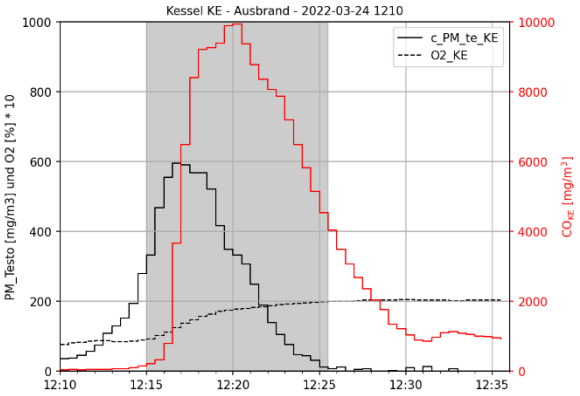


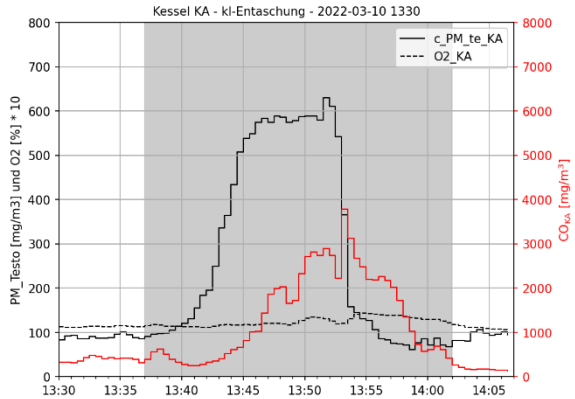


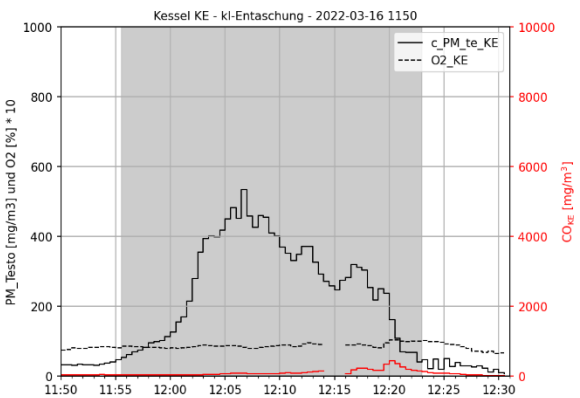






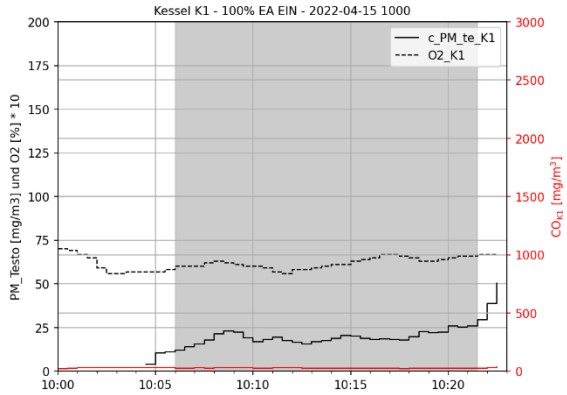


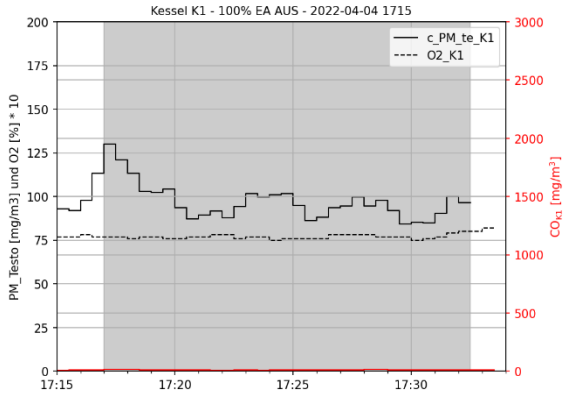


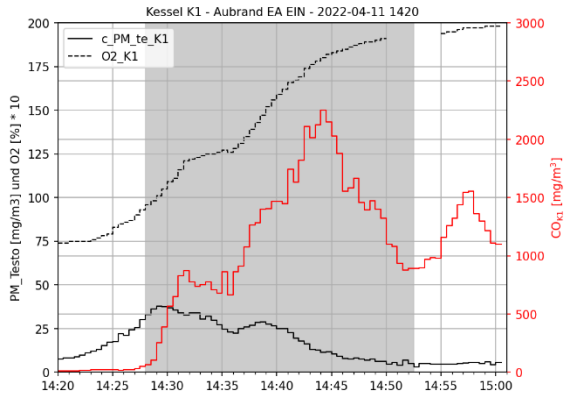


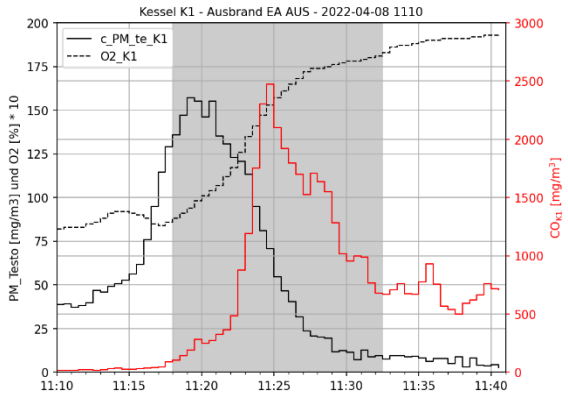
11.7.2 Anlage Standort A

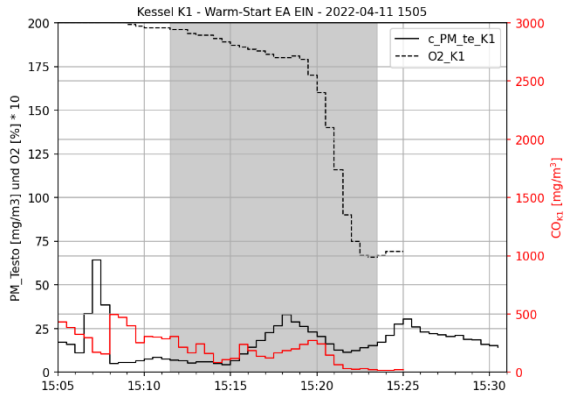
Kessel 1:

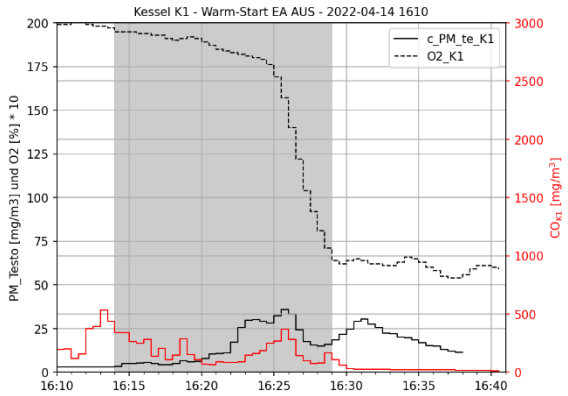


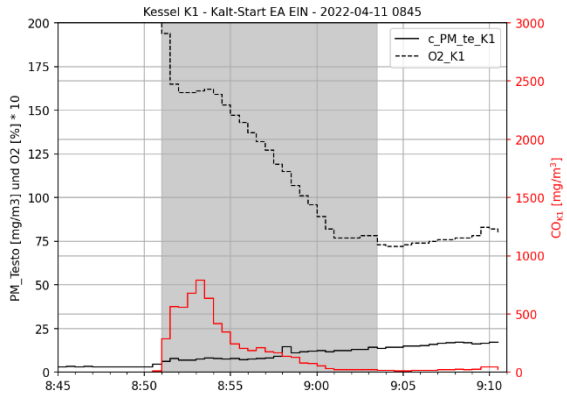


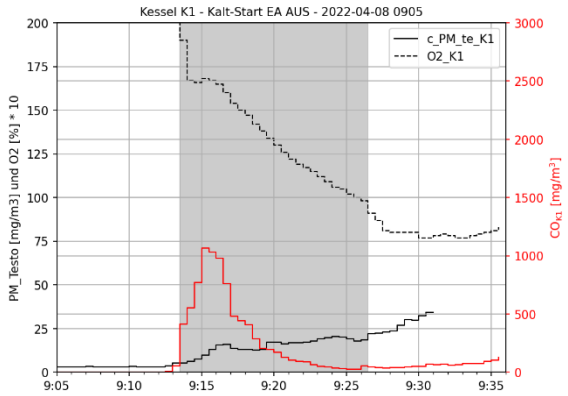












Kessel 2:

Aufgrund von Problemen mit dem Testo gibt es für Kessel 2 im Ausbrand und EA Ein keine Daten mit vom Testo.

