



verenum

*Verenum Dr. Thomas Nussbaumer
Ingenieurbüro für Verfahrens-, Energie- und Umwelttechnik*

Erfolgskontrolle zum Pilotprojekt Feinstaubabscheider im Misox

Schlussbericht

Adrian Lauber

Thomas Nussbauer

Auftraggeber

Kanton Graubünden

Amt für Natur und Umwelt GR

Hans Michel

Gürtelstrasse 89

7001 Chur

Verenum, Zürich, 27.9.2019

Inhalt

Zusammenfassung	3
Sintesi	5
1 Ausgangslage	7
2 Zielsetzung	7
3 Vorgehen	8
3.1 Betriebsdatenaufzeichnung	8
3.2 Staubmessungen	9
3.3 Betriebsprotokolle	10
4 Resultate	11
4.1 Abscheiderbetrieb und Verfügbarkeit	11
4.2 Betrieb des Hochspannungsnetzteils	12
4.3 Einschaltkriterien des Elektroabscheiders	13
4.4 Störungserkennung und Unterhalt	15
4.5 Staubmessungen	16
4.6 Betriebsprotokolle der ersten Heizperiode.....	21
4.7 Betriebsdatenaufzeichnung	21
5 Schlussfolgerungen	22
6 Conclusioni	23
7 Anhang	24
7.1 Kenngrößen Monatsübersicht	24
7.2 Beispiele Betriebsdaten	26
7.3 Zeitverläufe Staubmessungen	34
7.4 Stellungnahme Oekosolve	38

Zusammenfassung

Das Amt für Natur und Umwelt (ANU) des Kantons Graubünden startete im Herbst 2017 im Misox ein Pilotprojekt, in dem sieben Kamine mit einem Elektroabscheider des Typs OekoTube der Firma Oeko-solve AG ausgerüstet wurden. Dazu wurden drei Chemineés, zwei Stückholzöfen, ein Stückholzkessel, ein Pelletofen und ein Pelletkessel unter 70 kW ausgewählt. Während zwei Heizperioden von Herbst 2017 bis Frühling 2019 wurde mit der vorliegenden Erfolgskontrolle die Praxistauglichkeit dieser Anlegekonfiguration evaluiert. Dazu wurden Betriebsdaten ausgewertet und Feinstaub- sowie Grobstaubmessungen durchgeführt.

Die Untersuchung zeigt, dass die Elektroabscheider zuverlässig funktionieren, wenn sie sachgerecht eingesetzt werden und ihre Steuerung den Feuerungsbetrieb korrekt detektiert. So erzielten alle untersuchten Elektroabscheider während des detektierten Feuerungsbetriebs eine Verfügbarkeit von über 84 %, mehr als die Hälfte sogar von über 95 %. Orientierende Staubmessungen an vier Feuerungen während der zweiten Heizperiode ergaben bei ausgeschaltetem Elektroabscheider mittlere Feinstaubkonzentrationen zwischen 25 mg/m³ und 150 mg/m³ bezogen auf 13 Vol.-% O₂ und bei aktivem Feinstaubabscheider zwischen 4 mg/m³ und 40 mg/m³. Für die vier Anlagen resultierten daraus Feinstaub-Abscheidegrade zwischen 55 % und 90 %. Zudem wurde während der zwei Heizperioden keine signifikante Leistungsminderung der Elektroabscheider – also keine Erhöhung der Spannung und keine Reduktion der Stromstärke – festgestellt, was auf eine Verminderung des Abscheidegrads durch zunehmende Verschmutzung hindeuten würde. Somit wurde auch kein erhöhter Reinigungsbedarf für die Elektroabscheider festgestellt. Die Erfolgskontrolle zeigt jedoch, dass nicht alle Elektroabscheider optimal betrieben wurden, sondern folgende Einschränkungen aufwiesen:

- 1) Bei drei Elektroabscheidern war die Hochspannung während der ersten Heizperiode gedrosselt, so dass die Staubabscheidung nur mit niedrigen Stromstärken erfolgte. Mit einer neuen Software und neuen Sprühelektroden konnten die Stromstärken in der zweiten Heizperiode bei den drei Anlagen deutlich angehoben und der Feinstaub-Abscheidegrad damit erhöht werden.
- 2) Bei zwei Pelletfeuerungen war die Abgastemperatur sehr tief, sodass die Elektroabscheider den aus der Differenz zwischen Abgas- und Umgebungstemperatur sowie aus Temperatursprüngen im Abgas ermittelten Feuerungsbetrieb nicht zuverlässig detektieren konnten. Zudem ist der Temperaturfühler für das Abgas am Kaminrand montiert, sodass die vom Elektroabscheider gemessene Temperatur noch deutlich unter derjenigen in der Kaminmitte liegt. In der zweiten Heizperiode wurde deshalb der Schwellenwert für die Temperaturdifferenz von 20 K auf 5 K reduziert. Dadurch verlängerten sich im Beobachtungszeitraum die Phasen mit aktiver Feinstaubabscheidung von 5 % auf bis zu 66 %. Ob die Elektroabscheider bei den Pelletfeuerungen damit tatsächlich während des Feuerungsbetriebs aktiv waren, kann aus den vorliegenden Daten allerdings nicht zuverlässig beurteilt werden, weil die gemessene Temperaturdifferenz für eine eindeutige Beurteilung zu klein war. Für einen zuverlässigen Betrieb an Feuerungen mit tiefen Abgastemperaturen ist deshalb eine elektrische Verbindung zwischen Feuerung und Elektroabscheider notwendig, oder die Elektroabscheider werden näher bei der Feuerung montiert, z.B. durch den Einsatz von Geräten des Typs OekoTube-Inside.

- 3) Bei zwei Elektroabscheidern traten im beobachteten Zeitraum während bis zu 11 % der Zeit Störungen auf. Die Betriebsdaten zeigen Störungsphasen mit einer Dauer von bis zu fünf Tagen. Da die Geräte keine gut sichtbare Statusanzeige hatten, waren die Störungen für die Betreiber nicht feststellbar. Der Betriebszustand der Elektroabscheider sollte daher für den Betreiber besser erkennbar sein. Dies insbesondere auch deshalb, weil die Betriebsdatenaufzeichnung gezeigt hat, dass eine kostengünstige Fernüberwachung und Alarmierung im Störfall zum heutigen Zeitpunkt nicht zuverlässig funktioniert.
- 4) Der Einsatz der Elektroabscheider kann insbesondere bei unvollständiger Verbrennung zu erhöhten Emissionen an Grobstaub führen. Mittels einer Grobstaubmessung konnte gezeigt werden, dass entsprechende Russagglomerate als grosse Flocken aus dem Kamin ausgeworfen werden können. Aus Sicht der Lufthygiene ist dies unproblematisch, in der Nachbarschaft kann es aber zu störenden Ablagerungen kommen. Aus diesem Grund ist auch beim Einsatz von Elektroabscheidern grundsätzlich ein guter Feuerungsbetrieb sicher zu stellen. Mangels Langzeiterfahrungen können aber keine Aussagen gemacht werden, ob der Feuerungsbetrieb solcher Anlagen durch häufigere Reinigung durch den Kaminfeger deutlich verbessert werden könnte.

Die Messresultate zeigen aber auch, dass die Emissionen der Pelletfeuerung im Vergleich zu den Stückholzfeuerungen insgesamt deutlich tiefer waren. Die Feinstaubkonzentration der Pelletfeuerung bei ausgeschaltetem Elektroabscheider lag in derselben Grössenordnung wie bei den Stückholzfeuerungen mit aktivem Elektroabscheider. Auch die CO-Emissionen der Pelletfeuerung waren um eine Grössenordnung tiefer als bei den Stückholzfeuerungen.

Aus diesen Erfahrungen werden folgende Empfehlungen abgeleitet:

- 1) Um sicherzustellen, dass installierte Elektroabscheider optimal betrieben werden, muss eine umfassende Funktionskontrolle bei der Inbetriebnahme durchgeführt werden.
- 2) Nebst einer periodischen Reinigung von Kamin und Elektroabscheider ist auch eine periodische Kontrolle des Elektroabscheiders durch eine Fachperson erforderlich.
- 3) Der Betriebszustand des Elektroabscheiders muss für den Betreiber gut ersichtlich sein.
- 4) Um tiefe Emissionen zu erreichen, ist eine hohe Verbrennungsqualität in der Feuerung sicher zu stellen. Handbeschickte Feuerungen müssen dafür richtig angefeuert werden, wozu unter anderem das Merkblatt von Holzenergie-Schweiz als Empfehlung dienen kann. Feuerungen, welche keine hohe Verbrennungsqualität ermöglichen, sind zu ersetzen.

Sintesi

L'Ufficio per la natura l'ambiente (UNA) del Cantone dei Grigioni ha avviato in Mesolcina nell'autunno del 2017 un progetto pilota, che ha previsto l'equipaggiamento di 7 camini con un separatore (filtro) elettrostatico delle polveri fini del tipo OekoTube prodotto dall'azienda OekoSolve AG. Per la realizzazione del progetto sono stati scelti tre caminetti, due stufe a cippato, una caldaia a cippato, una stufa a pellet e una caldaia a pellet con potenza termica inferiore a 70 kW. Nel corso di due periodi di riscaldamento dall'autunno del 2017 fino alla primavera del 2019 è stata valutata, tramite la verifica dei risultati qui presentata, la funzionalità pratica di questa configurazione dell'impianto a combustione a legna. A tal fine sono stati analizzati i dati d'esercizio ed eseguite analisi tanto delle polveri fini che delle polveri grossolane.

L'indagine mostra che i filtri elettrostatici funzionano in modo affidabile se vengono montati correttamente e se i loro comandi rilevano adeguatamente lo stato d'esercizio dell'impianto a combustione. Tutti i filtri elettrostatici esaminati hanno così raggiunto, durante la fase di combustione rilevata, una disponibilità di oltre l'84%, e più della metà di loro perfino maggiore del 95%. Da misurazioni qualitative delle polveri effettuate su quattro degli impianti a combustione durante il secondo periodo di riscaldamento sono risultate concentrazioni medie di polveri fini tra 25 mg/m³ e 150 mg/m³ riferite a un tenore di O₂ del 13% vol. con il filtro elettrostatico disattivato, e tra 4 mg/m³ und 40 mg/m³ con il filtro antiparticolato attivo. Per i quattro impianti ne è perciò risultato un grado di separazione delle polveri fini tra il 55% e il 90%. Inoltre, durante i due periodi di riscaldamento non sono stati constatate riduzioni significative di prestazione da parte dei filtri elettrostatici – ossia nessun aumento della tensione e nessuna riduzione dell'intensità di corrente – , cosa che sarebbe stata indicativa di una riduzione del grado di separazione delle polveri conseguente all'aumento dello sporco. Di conseguenza non si è constatata neppure una maggiore esigenza di pulizia relativa ai filtri elettrostatici. La verifica dei risultati ha tuttavia evidenziato che non tutti i filtri elettrostatici sono stati fatti funzionare in modo ottimale, evidenziandosi le seguenti limitazioni:

- 1) Per tre filtri elettrostatici l'alta tensione durante il primo periodo di riscaldamento era ridotta, così che la separazione delle polveri avveniva solo a basse intensità di corrente. Con un nuovo software e nuovi elettrodi, nel secondo periodo di riscaldamento le intensità di corrente nei tre impianti hanno potuto essere significativamente alzate, aumentando così il grado di separazione delle polveri fini.
- 2) Nei due impianti alimentati con pellet le temperature dei gas di scarico erano molto basse, non potendo così il separatore elettrostatico rilevare in modo affidabile lo stato d'esercizio dell'impianto dalla differenza tra temperatura dei gas di scarico e quella dell'ambiente nonché dagli sbalzi di temperatura nei gas di scarico. Inoltre il sensore della temperatura per i gas di scarico è montato sul bordo del camino, per cui la temperatura rilevata dal separatore elettrostatico è significativamente più bassa di quella al centro del camino. Nel secondo periodo di riscaldamento perciò il valore di soglia per la differenza di temperatura è stato ridotto da 20 K a 5 K. In tal modo, durante il periodo di osservazione si sono prolungate le fasi di separazione attiva delle polveri fini dal 5% fino al 66%. Se però i filtri elettrostatici montati presso gli impianti a pellet fossero effettivamente attivi durante l'accensione dell'impianto non può essere stabilito in modo attendibile, perché la differenza di temperatura misurata era troppo ridotta per una valutazione univoca. Per un funzionamento affidabile con impianti a combustione con basse temperature dei gas di scarico è perciò necessario un allacciamento elettrico tra impianto e filtro elettrostatico, oppure l'installazione del filtro in un punto più vicino all'impianto, p.e. con l'impiego di un apparecchio del tipo OekoTube-Inside.

- 3) Per due dei separatori elettrostatici si sono verificate, durante la fase temporale di osservazione, perturbazioni per una durata di circa l'11% del periodo. I dati d'esercizio mostrano fasi di perturbazioni di una durata fino a 5 giorni. Poiché gli apparecchi non erano dotati di un indicatore di stato ben visibile, le perturbazioni non potevano essere riscontrate da parte del gestore dell'impianto. Lo stato d'esercizio del separatore elettrostatico perciò dovrebbe essere meglio verificabile da parte del gestore dell'impianto, in particolare anche perché la registrazione dei dati d'esercizio ha mostrato come, ad oggi, un monitoraggio a distanza e allarme in caso di perturbazione che sia anche economico non funziona in modo affidabile.
- 4) L'impiego di filtri elettrostatici può condurre, in particolare con combustione incompleta, a maggiori emissioni di polveri grossolane. Tramite una misurazione delle polveri grossolane è stato possibile verificare come agglomerati di fuliggine vengano espulsi dal camino come grandi fiocchi. Sotto il profilo dell'igiene dell'aria ciò non comporta problemi, ma nelle vicinanze può dare origine a sedimenti molesti. Per questo motivo, anche con l'impiego di un filtro elettrostatico deve comunque essere fondamentale assicurato un buon esercizio dell'impianto a combustione. In mancanza di esperienze sul lungo periodo non è però possibile asserire se l'esercizio di tali impianti a combustione possa essere migliorato significativamente tramite una maggiore frequenza di pulizia da parte dello spazzacamino.

I risultati delle misurazioni mostrano però anche che le emissioni dell'impianto a pellet sono state, in confronto agli impianti a cippato, nel complesso significativamente inferiori. La concentrazione di polveri fini dell'impianto a pellet con filtro elettrostatico disattivato si trovava nel medesimo ordine di grandezza degli impianti a cippato con filtro elettrostatico attivo. Le emissioni di CO dell'impianto a pellet erano in ordine di grandezza inferiori rispetto agli impianti a cippato.

Da tali esperienze possono essere evinte le seguenti raccomandazioni:

- 1) Per poter assicurare che i separatori elettrostatici installati funzionino in modo ottimale, dev'essere eseguita al momento della messa in esercizio una esaustiva verifica funzionale.
- 2) Oltre alla pulizia periodica del camino e del filtro elettrostatico, è necessario anche un controllo periodico della funzionalità dell'apparecchio eseguito da un tecnico.
- 3) Lo stato d'esercizio del filtro elettrostatico deve essere ben visibile da parte del gestore dell'impianto.
- 4) Per ottenere basse emissioni, dev'essere assicurata un'alta qualità di combustione nell'impianto. Gli impianti caricati manualmente devono essere correttamente accesi, a tal fine può essere utile come raccomandazione il Promemoria di Energia legno Svizzera. Gli impianti che non permettono una qualità ottimale della combustione devono essere sostituiti.

1 Ausgangslage

Aufgrund der häufigen Inversionslagen ist das Misox im Winter oft von hohen Feinstaubbelastungen betroffen, weshalb das Misox ein lufthygienisches Massnahmegebiet ist. Als hauptsächliche Quelle des Feinstaubes wurden schon vor einigen Jahren die weit verbreiteten handbeschickten Holzfeuerungen identifiziert. Infolge dessen startete das Amt für Natur und Umwelt (ANU) des Kantons Graubünden im Herbst 2017 ein Pilotprojekt, in welchem sieben private Wohnhäuser mit einem Elektroabscheider des Typs OekoTube von der Firma Oekosolve AG ausgerüstet wurden (Tabelle 1).

Tabelle 1 Kenndaten der untersuchten Anlagen des Pilotprojekts im Misox. (n.b. = nicht bekannt)

Oekosolve ID	1000	1001	1003	1004	1005	1006	1007
Feuerungstyp	Speicherofen	Speicherofen & Pelletofen	Cheminée	Cheminée-kassette	Pelletkessel	Cheminée	Zentralheizungs-herd
Brennstoff	Stückholz	Stückholz & Holzpellets	Stückholz	Stückholz	Holzpellets	Stückholz	Stückholz
Baujahr	2004	2017	2011	2017	2014	n.b.	n.b.
Nennleistung [kW]	8	10 + 10	11	12.9	15	12	21
Kamindurchmesser [mm]	150	180	200	180	150	200 x 200	150
Kaminhut	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja

2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist eine Erfolgskontrolle, in der die Verfügbarkeiten und Abscheidegrade der Elektroabscheider im Praxiseinsatz evaluiert werden. Zudem sollen die Zuverlässigkeit und die Störungserkennung durch den Betreiber bestimmt und der Aufwand für die Reinigung und den Unterhalt der Geräte abgeschätzt werden.

3 Vorgehen

3.1 Betriebsdatenaufzeichnung

Die Elektroabscheider wurden für die Erfolgskontrolle mit einem Zusatzmodul ausgestattet, damit sie Betriebsdaten in eine Cloud-Datenbank von Oekosolve AG senden konnten (Tabelle 2). Bei bestehender Internet-Verbindung wurden diese Momentanwerte alle 10 Sekunden an die Datenbank gesendet. Bei unterbrochener Internet-Verbindung gingen die Betriebsdaten verloren. Bei der Auswertung wurden nur Zeitstempel verwendet, von welchen alle Signale vorlagen. Die auswertbaren Daten werden in diesem Bericht als Betrachtungsdauer bezeichnet. Die Zuverlässigkeit der Elektroabscheider, ausgewiesen als Verfügbarkeit, und deren Einschaltkriterien werden in der vorliegenden Erfolgskontrolle gesondert beurteilt.

Die Elektroabscheider erkennen den Feuerungsbetrieb anhand der Temperaturdifferenz zwischen der Abgastemperatur und der Temperatur in der Steuerbox (Tabelle 3). Die Temperatur der Steuerbox dient als Indikator für die Umgebungstemperatur. Die Steuerbox ist an der Kaminaussenseite angebracht und wird im Betrieb mit Umgebungsluft umströmt. Die so gemessene Temperatur entspricht bei ausreichender Durchströmung der Umgebungstemperatur. Bei geringer Durchströmung kann die gemessene Temperatur zum Beispiel infolge von Sonnenbestrahlung auch deutlich höher sein als die Umgebungstemperatur. Wenn der Feuerungsbetrieb detektiert wird, wird das Hochspannungsmodul eingeschaltet (Zustand, Bit 4). In der Auswertung wurde dieses Signal für den Feuerungsbetrieb verwendet (Tabelle 4). Aus dem Status (Zustand, Bit 0-3) wurde abgeleitet, ob die Feinstaubabscheidung während des Feuerungsbetriebs aktiv oder unterbrochen war. Daraus wurde die Verfügbarkeit berechnet. Für die Phasen mit aktiver Feinstaubabscheidung wurden Mittelwerte der Betriebsdaten als Kenngrößen ermittelt.

Zur Beurteilung der Einschaltkriterien wurden die in Tabelle 3 definierten Einschaltkriterien von Oekosolve AG nachträglich auf die Betriebsdaten angewendet und ausgewertet.

Tabelle 2 Betriebsdaten, die in der Datenbank von Oekosolve AG aufgezeichnet wurden.

Bezeichnung	Einheit	Signal
Zustand	-	Betriebszustand des Elektroabscheiders als Zahlencode
U	kV	Spannung an der Sprühelektrode
I	µA	Stromstärke an der Sprühelektrode
P	W	elektrische Leistung des Hochspannungsnetzgeräts
T _{AG}	°C	Abgastemperatur am Kaminrand
T _{Box}	°C	Temperatur in der Steuerbox als Referenz für die Regelung

Tabelle 3 Definition des Feuerungsbetriebs wie er von Oekosolve AG zur Regelung der Elektroabscheider verwendet wurde.

Betriebszustand	Kriterium
Kriterium 1 (Temperaturdifferenz)	$(T_{AG} - T_{Box}) > T_{Schwelle}$ Heizperiode 2017 – 2018: $T_{Schwelle} = 20 \text{ K}$ Heizperiode 2018 – 2019: $T_{Schwelle} = 5 \text{ K}$
Kriterium 2 (Temperatursprung)	$\Delta T_{AG} > 2 \text{ K} / 10 \text{ s}$
Feuerungsbetrieb	Kriterium 1 ODER Kriterium 2 + Nachlaufzeit von 15 Minuten

Tabelle 4 Definition von Kenngrössen der Elektroabscheider (EA) wie sie im vorliegenden Bericht zur Auswertung verwendet wurden.

Betriebszustand	Kriterium
Feuerungsbetrieb	Hochspannungsmodul = Ein (Zustand, Bit 4)
EA aktiv	Feuerungsbetrieb & Status = «Filter Ein» (Zustand, Bit 0-3)
EA Unterbruch	Feuerungsbetrieb & Status = «Störung» ODER «Fehler» (Zustand, Bit 0-3)
EA Verfügbarkeit	$\frac{t_{EA \text{ aktiv}}}{t_{EA \text{ aktiv}} + t_{EA \text{ Unterbruch}}}$

3.2 Staubmessungen

Verenum hat zusammen mit Oekosolve AG im April, Oktober und November 2018 orientierende Staubmessungen an vier Feuerungen an drei Kaminen durchgeführt. Das Ziel war die Bestimmung eines Abscheidegrads zur Beurteilung der Funktion der Elektroabscheider. Dazu wurden vereinfachte gravimetrische Staubmessungen mit einem Wöhler SM 96 und Feinstaubmessungen (Partikel < PM2.5) mit einem Testo 380 durchgeführt. Zur Durchführung der Messungen wurde ein Kaminrohr als Messaufsatz auf den Elektroabscheider aufgesetzt (Bild 1). Da das Testo 380 temperaturempfindlich ist, wurde für dieses Messgerät ein Sonnen- bzw. Kälteschutz verwendet. Zusätzlich wurde der Grobstaub semi-kontinuierlich mit einem an der Hochschule Luzern (HSLU) entwickelten Messgerät gemessen. Dieses kann Grobstaub von ca. 50 µm bis 5 mm erfassen, qualitativ klassieren und quantifizieren. Abgas wird dabei mit einer 20 mm Sonde abgesaugt und auf einer Impaktorplatte abgeschieden und analysiert.

In Saas-Fee wurden in einem BAFU-Projekt der FHNW ebenfalls Feinstaubmessungen an handbeschickten Holzfeuerungen mit baugleichen Elektroabscheidern durchgeführt. Dabei wurde ein speziell für diesen Einsatz entwickeltes Messprinzip DIEM¹ verwendet. Dieses Messprinzip erfasst Partikel mit

¹ Wüest, J.; Lohberger, N.; Griffin, T.; Wildhaber, E., Field Particle Emission Measurement on Domestic Wood Firing Systems Retrofitted with Electrostatic Particle Precipitators. In 27th European Biomass Conference and Exhibition Proceedings, Lisbon, doi:10.5071/27thEUBCE2019-2AO.2.4, 2019.

einem miniDiSC von Testo, welches die Partikeloberfläche misst. Daraus wurde die Partikelmasse berechnet. Dieses Messgerät benötigt keinen Messaufsatz und misst mit einem Probenahmering am Kaminausgang im verdünnten Abgas (Bild 1, rechts). Für die Normierung auf den Bezugssauerstoffgehalt wird die gemessene CO₂-Konzentration verwendet. Damit ein Vergleich zwischen den Resultaten beider Projekte möglich ist, wurde im November 2018 in Zusammenarbeit mit der FHNW im Misox eine Parallelmessung auf einem Kamin mit zwei Feuerungen durchgeführt.

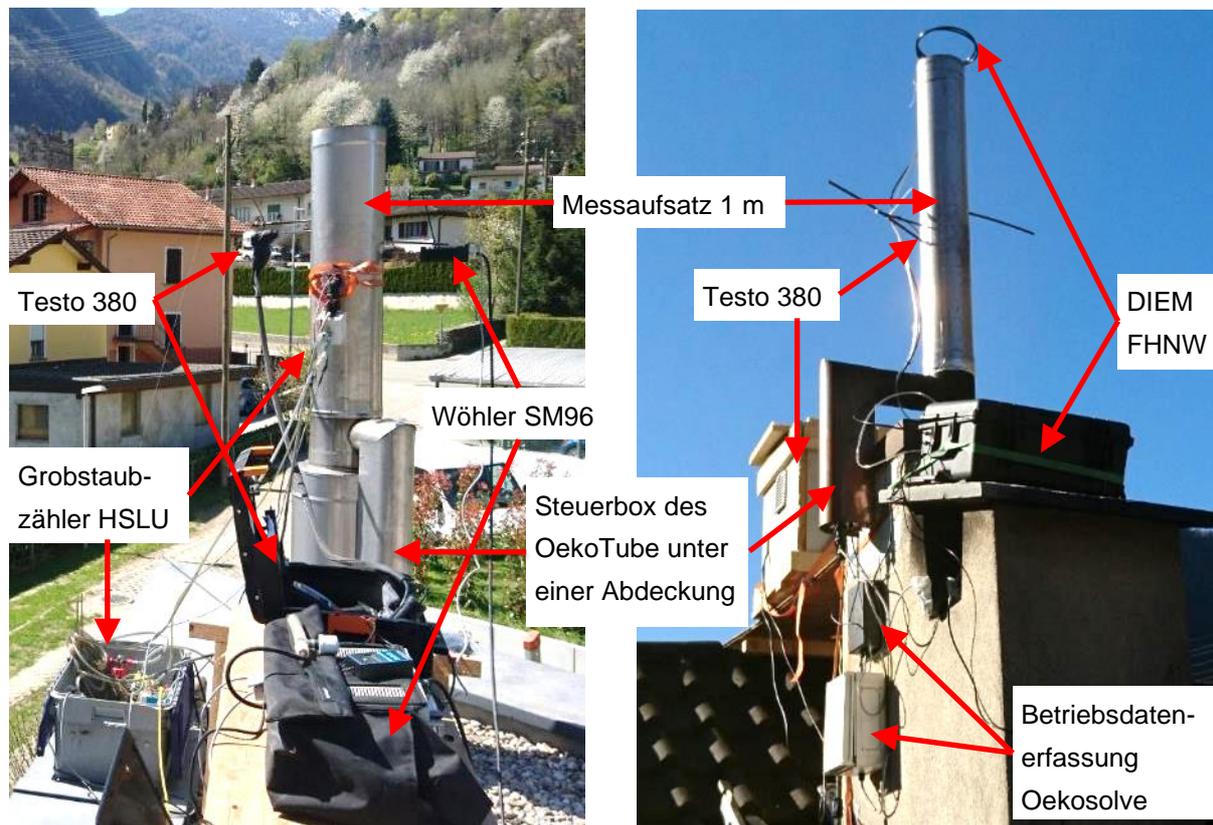


Bild 1 Messaufbau für die Staubmessungen. Links: Staubmessung mit Testo 380, Wöhler SM 96 und Grobstaubsensor HSLU. Rechts: Vergleichsmessung zwischen Testo 380 und DIEM FHNW.

3.3 Betriebsprotokolle

Während der ersten Heizperiode 2017 bis 2018 waren die Betreiber angehalten, vom Kanton bereitgestellte Betriebsprotokolle auszufüllen. Darin wurde an jedem Tag in fünf vordefinierten Zeitbereichen die vom Betreiber geschätzte Holzmenge eingetragen, welche im entsprechenden Zeitbereich verbrannt wurde. Bei den beiden Pelletfeuerungen wurde die Brennstoffmenge geschätzt und kann nicht einer bestimmten Tageszeit zugeordnet werden.

Während der ersten Heizperiode wurden die Anlagen zudem monatlich durch den Kaminfeger kontrolliert. Dabei wurde die Dicke der abgeschiedenen Staubschicht im Elektroabscheider und deren Beschaffenheit protokolliert.

Während der zweiten Heizperiode wurde auf diese Protokolle und Kontrollen verzichtet. Das Ziel der zweiten Heizperiode war, den realen Praxisbetrieb und allfällige Störungserkennung durch die Betreiber auszuwerten.

4 Resultate

4.1 Abscheiderbetrieb und Verfügbarkeit

Während den beiden untersuchten Heizperioden waren die Elektroabscheider während des detektierten Feuerungsbetriebs meist aktiv. Unterbrüche aufgrund von Störungen traten nur wenige auf (Bild 2). Daraus resultieren hohe Verfügbarkeiten zwischen 84 % und 100 % (Bild 3).

Die Anlagen 1003 und 1004 hatten in beiden Heizperioden nur wenige Betriebsstunden. Bei diesen beiden Anlagen handelte es sich um Cheminees in relativ neuen Häusern. Bei den beiden Pelletfeuerungen Anlagen 1001 und 1005 nahm die Dauer des detektierten Feuerungsbetriebs in der zweiten Heizperiode deutlich zu (Bild 2). Grund für diese Veränderung waren Anpassungen beim Einschaltkriterium nach der ersten Heizperiode. Der Einfluss der Einschaltkriterien auf die Dauer des Abscheiderbetriebs wird in Kapitel 4.3 detailliert beschrieben.

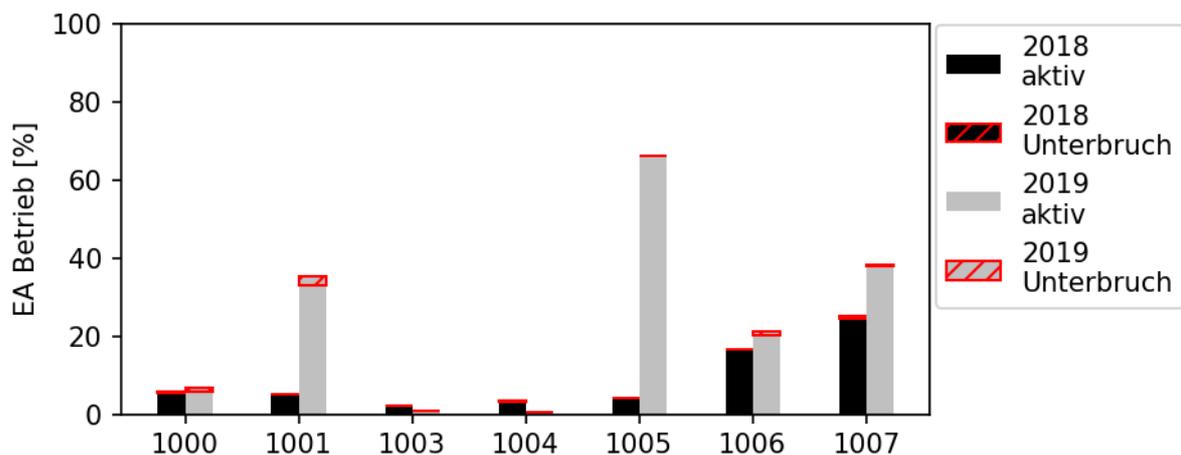


Bild 2 Aktive und unterbrochene Feinstaubabscheidung der sieben Elektroabscheider (EA) im Betrachtungszeitraum der beiden untersuchten Heizperioden. Die Summe der beiden Betriebszustände entspricht der Dauer des detektierten Feuerungsbetriebs.

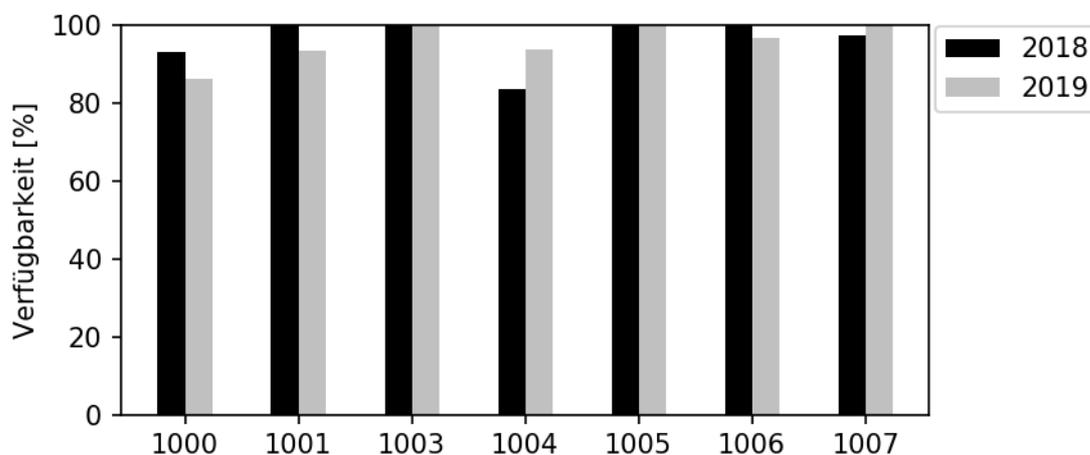


Bild 3 Verfügbarkeit der sieben Elektroabscheider während des detektierten Feuerungsbetriebs im Betrachtungszeitraum der beiden untersuchten Heizperioden.

4.2 Betrieb des Hochspannungsnetzteils

Der Abscheidegrad von Elektroabscheidern wird durch dessen Bauform, das elektrische Feld und die physikalischen Eigenschaften des Abgases bestimmt. Die Regelung von Elektroabscheidern kann nur die Spannung des Hochspannungsnetzteils einstellen. Die eingestellte Spannung ergibt in Abhängigkeit von der Sprühelektrode und den Eigenschaften des Abgases eine bestimmte Stromstärke. Spannung und Strom erzeugen das elektrische Feld, das die Abscheidung der Partikel aus dem Abgas bewirkt.

Nach der ersten Heizperiode wurden bei allen Elektroabscheidern Sprühelektroden mit einer grösseren mechanischen Stabilität und eine neue Software zur Regelung des Hochspannungsnetzteils eingesetzt. Ein Grund für diese Massnahme war, dass in der ersten Heizperiode bei drei Elektroabscheidern das Hochspannungsnetzteil nur sehr tiefe Stromstärken aufwies (Bild 4). Die tiefen Ströme waren das Resultat einer manuell eingestellten Spannungsbegrenzung auf 20 kV. Mit den umgesetzten Massnahmen konnten die Stromstärken dieser drei Anlagen in der zweiten Heizperiode deutlich erhöht werden, da sich mit der neuen Software höhere Spannungen einstellen liessen (Bild 4).

Es kann davon ausgegangen werden, dass damit auch der Abscheidegrad der Elektroabscheider erhöht und die Feinstaubkonzentration im Reingas reduziert werden konnte. Die effektive Erhöhung des Abscheidegrads kann aus den vorliegenden Daten jedoch nicht bestimmt werden, da in der ersten Heizperiode keine entsprechenden Staubmessungen durchgeführt wurden.

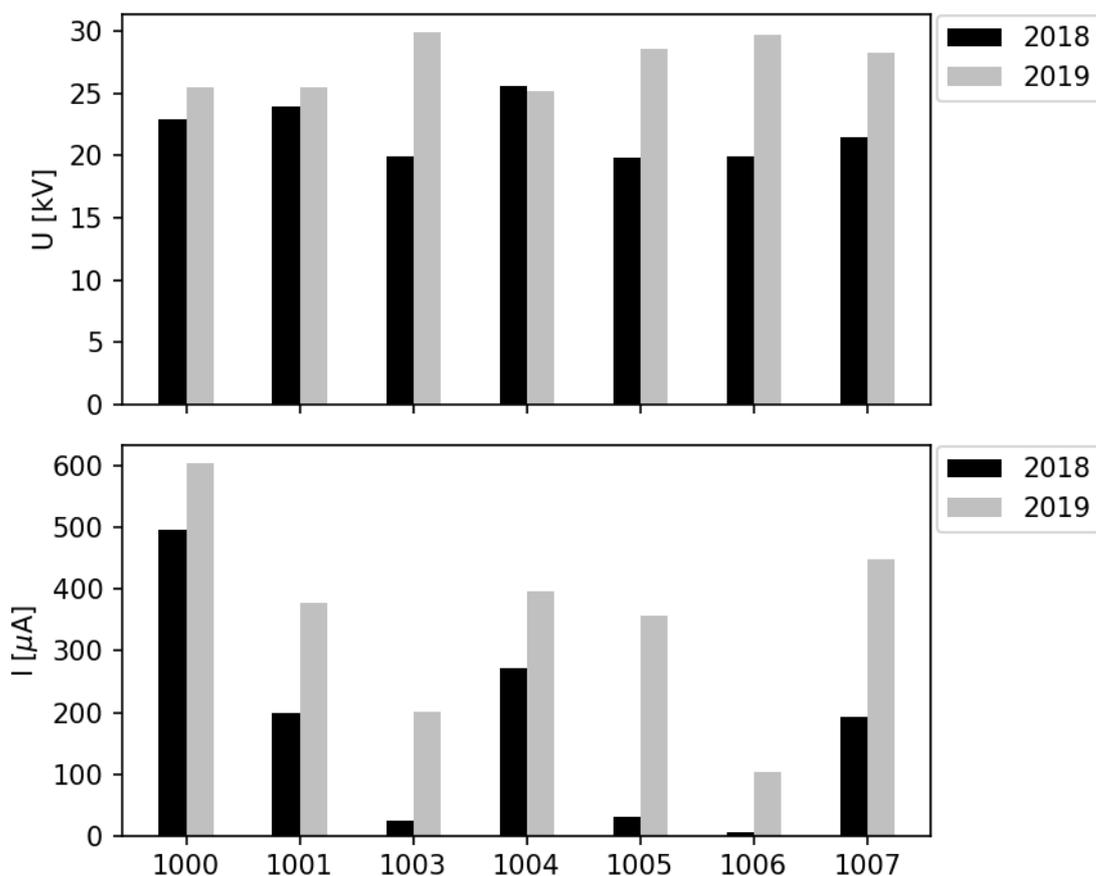


Bild 4 Mittelwerte von Spannung (U) und Stromstärke (I) in den sieben Elektroabscheidern während der aktiven Feinstaubabscheidung im Betrachtungszeitraum der beiden untersuchten Heizperioden.

4.3 Einschaltkriterien des Elektroabscheiders

Im Preissegment der eingesetzten Elektroabscheider ist ein Signalaustausch mit der Feuerung nicht praxistauglich. Deshalb müssen die Elektroabscheider den Feuerungsbetrieb autonom detektieren. Dies erfolgt anhand der Temperaturdifferenz zwischen Abgas- und Umgebungstemperatur, sowie aus Temperatursprüngen im Abgas (Tabelle 3). Der Abgastemperaturfühler ist am Kaminrand montiert, der Umgebungstemperaturfühler in dessen Steuerbox an der Aussenseite des Kamins.

Bei den sechs untersuchten Stückholzfeuerungen funktionierten die Einschaltkriterien zuverlässig, da die Abgastemperatur während des Feuerungsbetriebs mit mindestens 30 °C bis über 100 °C jeweils deutlich über der Temperatur der Steuerbox respektive der Umgebung lag (Anhang, Bild 15 bis Bild 22). Bei den Pelletfeuerungen wurden dagegen deutlich tiefere Abgastemperaturen von 20 °C bis 50 °C gemessen. Die während der ersten Heizperiode verwendete Temperaturschwelle von 20 K als Einschaltkriterium wurde bei diesen Anlagen deshalb nur selten erreicht (Bild 5). Daraus resultierte eine tiefe Betriebsdauer der Elektroabscheider während der ersten Heizperiode (Bild 2).

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde der Schwellenwert für die Temperaturdifferenz in der zweiten Heizperiode bei allen Anlagen von 20 K auf 5 K reduziert. Bei den Pelletfeuerungen verlängerte sich damit die detektierte Feuerungsbetriebsdauer im Betrachtungszeitraum von rund 5 % auf 35 % respektive 66 % (Bild 2). Bei den Stückholzfeuerungen wurde die detektierte Feuerungsbetriebsdauer ebenfalls verlängert, jedoch weniger ausgeprägt. Die Temperatursprünge im Abgas als Einschaltkriterium spielen bei den meisten Anlagen eine untergeordnete Rolle (Bild 6). Dieser Anteil nimmt ab, je tiefer der Schwellenwert für die Temperaturdifferenz gesetzt wird.

Ob die Elektroabscheider mit dem tieferen Schwellenwert tatsächlich während des Feuerungsbetriebs aktiv waren, kann aus den vorliegenden Daten allerdings nicht zuverlässig beurteilt werden. Denn insbesondere bei der Anlage 1005 war die gemessene Temperaturdifferenz zwischen der Abgastemperatur und der Steuerbox gering und das Rauschen auf den Messwerten vergleichsweise hoch (Bild 5). Auf dieser Basis ist eine zuverlässige Detektion des Feuerungsbetriebs schwierig.

Insgesamt wurde festgestellt, dass mit dem tieferen Schwellenwert für die Temperaturdifferenz in der zweiten Heizperiode und aus den Temperatursprüngen die Elektroabscheider häufiger ein- und ausschalten, insbesondere während des Ausbrands (Anhang, Bild 22). Mit einer verlängerten Nachlaufzeit könnten diese Schaltvorgänge jedoch reduziert werden. Zudem wurden bei mehreren Geräten vermehrt Kurzschlüsse aufgezeichnet, was möglicherweise die Störungsanfälligkeit der Elektroabscheider erhöhen kann.

Die Detektion des Feuerungsbetriebs basierend auf den gemessenen Temperaturen ist unscharf. Bei Anlagen mit tiefen Abgastemperaturen im Elektroabscheider kann das Einschaltkriterium aus Tabelle 3 nicht zuverlässig angewendet werden. Dies betrifft Feuerungen mit tiefen Abgastemperaturen wie z.B. Pelletfeuerungen und auch Anlagen mit zu gross dimensionierten Kamindurchmessern und langen oder ungenügend wärmegeämmten Kaminen. Die in Kapitel 4.5 beschriebenen Staubmessungen haben gezeigt, dass deutlich höhere Temperaturdifferenzen messbar wären, wenn der Temperatursensor nicht am Kaminrand, sondern näher beim Kernstrom platziert würde (Tabelle 5). Demgegenüber wäre eine Lambda-Sonden im Elektroabscheider aufgrund des hohen Luftüberschusses vieler Kleinf Feuerungen (Kapitel 4.5) keine verlässliche Alternative zu einer Temperaturmessung.

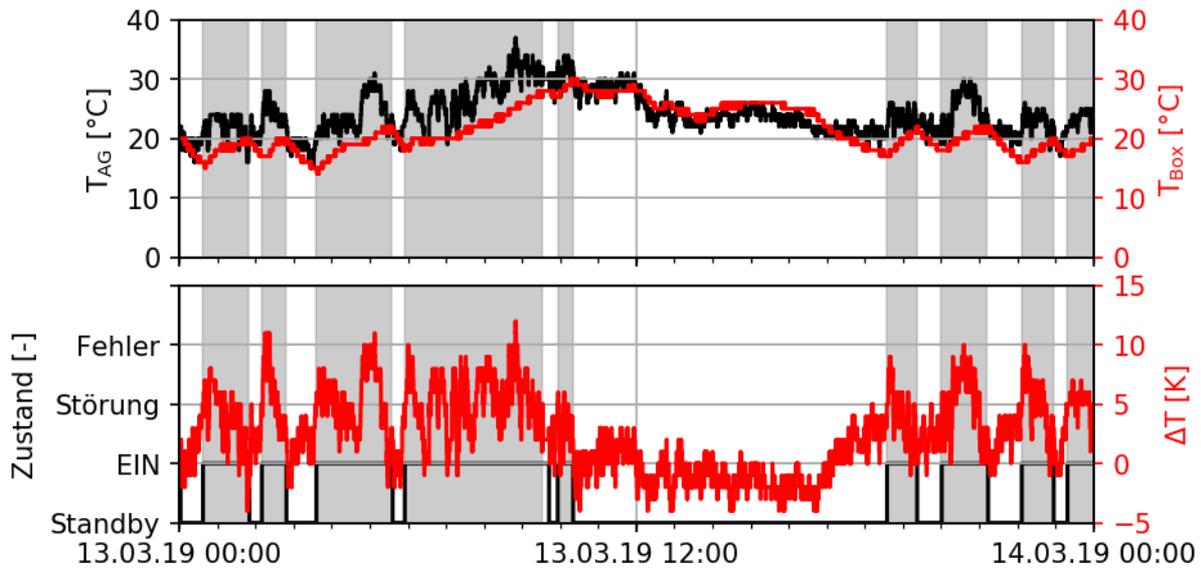


Bild 5 Ausschnitt aus den Betriebsdaten des Elektroabscheiders von Anlage 1005. Dargestellt sind die Abgastemperatur (T_{AG}), die Temperatur der Steuerbox (T_{Box}) und die resultierende Differenz (ΔT) als Einschaltkriterium und der Betriebszustand. Grau hinterlegt sind Phasen, während derer das Gerät Feuerungsbetrieb detektierte.

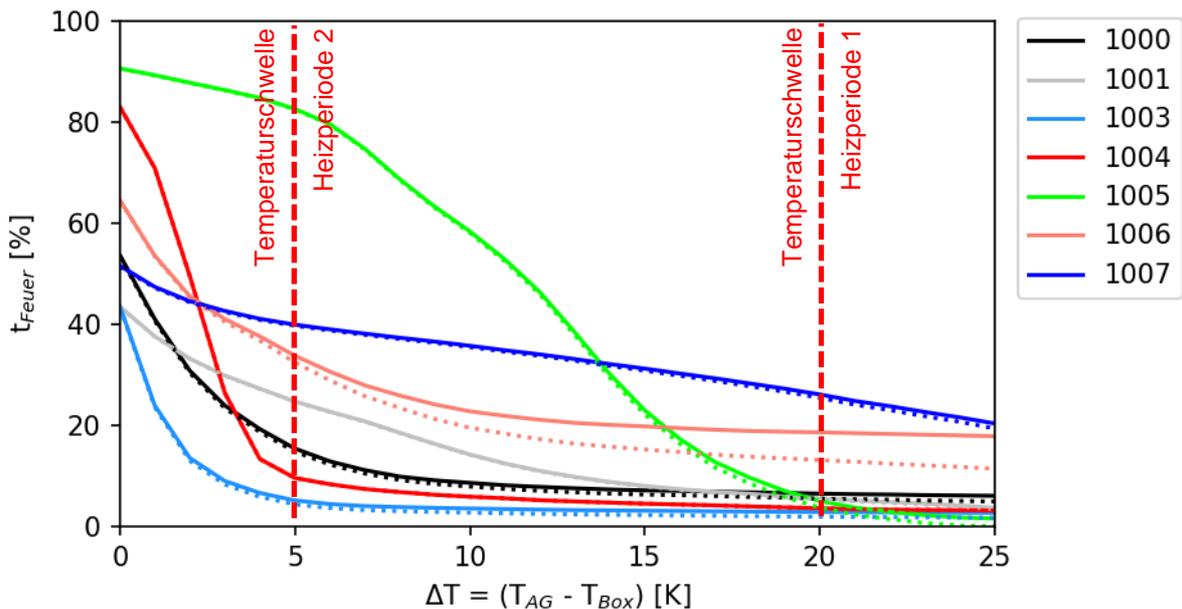


Bild 6 Feuerungsbetriebsdauer (t_{Feuer}) der sieben untersuchten Anlagen gemäss den Kriterien aus Tabelle 4 in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Abgas- und Umgebungstemperatur (T_{AG} , T_{Box}) für den Betrachtungszeitraum der ersten Heizperiode als volle Linien. Als gepunktete Linien ist die Feuerungsbetriebszeit nur für das Kriterium 1 ohne das Kriterium 2 (Temperatursprung) dargestellt. Die rote vertikale Linie stellt die in der ersten und zweiten Heizperiode verwendeten Schwellenwerte für das Kriterium 1 dar.

Lesebeispiel: Die Dauer des detektierten Feuerungsbetriebs von Anlage 1005 wird durch die Reduktion der Temperaturschwelle für das Kriterium 1 von 20 K auf 5 K von rund 5 % auf 85 % erhöht.

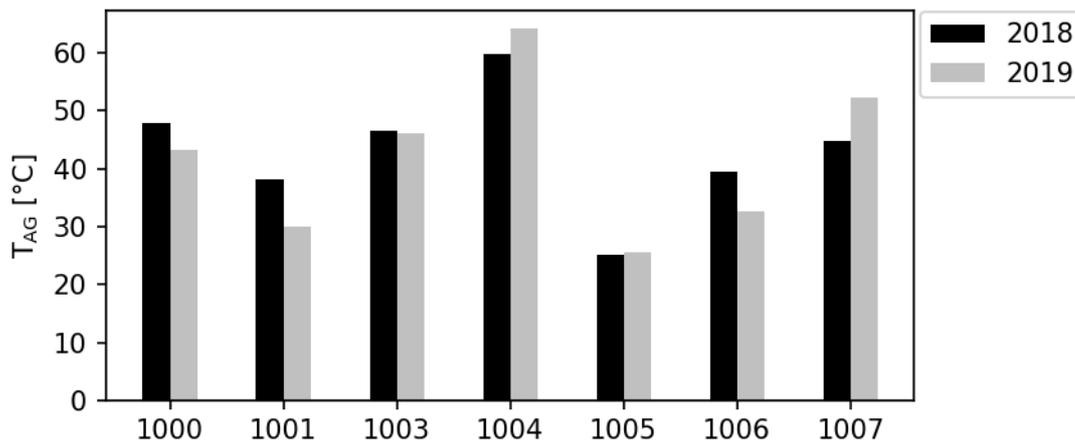


Bild 7 Mittlere Abgastemperatur (T_{AG}) der sieben Elektroabscheider während des Feuerungsbetriebs im Betrachtungszeitraum der beiden untersuchten Heizperioden.

4.4 Störungserkennung und Unterhalt

Während der ersten Heizperiode wurden die Feinstaubabscheider monatlich durch den Kaminfeger kontrolliert. Reinigungen während der Heizperiode wurden dagegen keine durchgeführt. In der zweiten Heizperiode wurde bewusst auf Kontrollen verzichtet, um den realen Praxisbetrieb und allfällige Störungserkennung durch die Betreiber auszuwerten.

Im Verlauf der zwei untersuchten Heizperioden wurde bei keiner der untersuchten Anlagen eine signifikante Erhöhung der Spannung oder Reduktion der Stromstärke von der Hochspannungsquelle beobachtet (Anhang, Bild 13 & Bild 14). Bei zwei Anlagen wurde gegen Ende der zweiten Heizperiode eine Abnahme der Verfügbarkeit festgestellt. Gleichzeitig nahm aber auch die Feuerungsbetriebszeit deutlich ab. Aus diesem Grund kann aus den vorliegenden Daten kein Bedarf für erhöhter Reinigungen bei den Elektroabscheidern erkannt werden.

Während den beiden untersuchten Heizperioden traten keine kritischen Störungen auf, welche von den Betreibern hätten erkannt werden müssen. Störungen beschränkten sich meist auf kurze Phasen, was auf temporäre Kurzschlüsse an den Isolatoren hindeutet. Gründe für Kurzschlüsse können unter anderem Kondensat sowie leitfähige und feuchte Staubschichten auf den Hochspannungsisolatoren sein. Diese Art von Störungen sind für die Feinstaubabscheider in der Regel unkritisch.

Bei der Anlage 1000 lag jedoch in der zweiten Heizperiode während rund 11 % der Betrachtungsdauer eine Störung vor (Bild 8). Davon ergaben 10 Störungen mit einer Dauer von bis zu fünf Tagen einen Anteil von rund 8 %. Dieser hohe Anteil resultiert daher, dass Störungen auch bei inaktivem Feinstaubabscheider nicht gelöscht werden, damit der Betreiber sie sehen kann. Nur wenn während des Feuerungsbetriebs die Hochspannungsquelle erneut gestartet werden kann, wird die Störung zurückgesetzt. Da die Feuerung im Beispiel in Bild 9 nicht täglich benutzt wurde, lag die Störung länger als 2.5 Tage vor. Bei der Anlage 1001 zeigte sich ein ähnliches Bild. Da die Geräte keine gut sichtbare Statusanzeige hatten, konnten die Betreiber diese Störungen nicht erkennen.

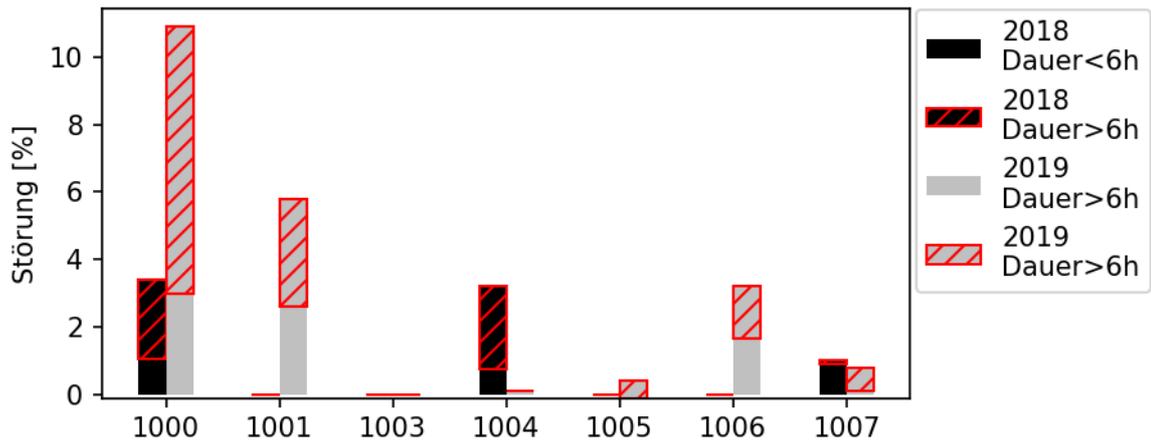


Bild 8 Gesamtdauer von Störungen der sieben Elektroabscheider im Betrachtungszeitraum der beiden untersuchten Heizperioden. Störungen mit einer Dauer von maximal 6 Stunden und längeren Störungen sind separat dargestellt. Störungen können auch aktiv sein, wenn die Feuerung ausser Betrieb ist.

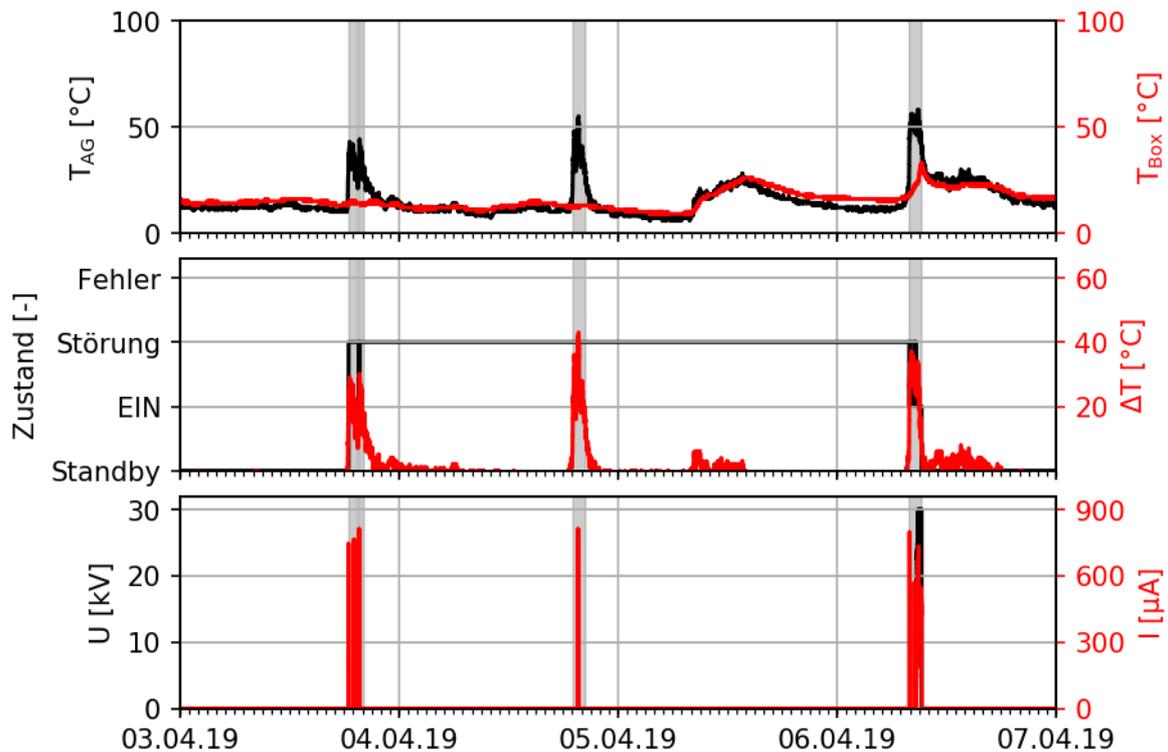


Bild 9 Ausschnitt aus den Betriebsdaten des Elektroabscheiders von Anlage 1000 mit einer aktiven Störung während mehr als 2.5 Tagen. Dargestellt sind die Abgastemperatur (T_{AG}), die Temperatur der Steuerbox (T_{Box}), der Zustand des Elektroabscheiders, die Temperaturdifferenz zwischen Abgas und Steuerbox als Einschaltkriterium, sowie Spannung (U) und Stromstärke (I) im Elektroabscheider.

4.5 Staubmessungen

An vier Feuerungen bei drei Kaminen wurden Feinstaub- und Grobstaubmessungen durchgeführt. Die Messunsicherheit war bei diesen Messungen aufgrund der vereinfachten Messtechnik und durch die kurzen Messphasen hoch. Die Resultate haben deshalb nur einen orientierenden Charakter. Um den Feinstaub-Abscheidegrad und dessen Verlauf zu bestimmen, wurde die Elektroabscheider während der

kontinuierlichen Staubmessungen in einem Intervall von fünf Minuten manuell ein- und ausgeschaltet (Bild 11). Kurz vor den Feinstaubmessungen wurden neue Sprühelektroden in die Elektroabscheider eingebaut, so dass die Verschmutzung der Geräte während den Messungen gering war. Vor der Vergleichsmessung mit der FHNW war der Elektroabscheider rund 20 Tage in Betrieb.

Die mit dem Testo 380 gemessenen Feinstaubkonzentrationen lagen bei ausgeschaltetem Elektroabscheider zwischen 80 mg/m^3 und 550 mg/m^3 bezogen auf 13 Vol.-% O_2 . Mit aktivem Elektroabscheider sanken die Feinstaubkonzentrationen auf Werte zwischen nicht messbar und 50 mg/m^3 (Tabelle 5). Die höchsten Feinstaubkonzentrationen wurden während des Kaltstarts beim Speicherofen gemessen. Im Vergleich zu den Stückholzfeuerungen waren die Emissionen des Pelletofens insgesamt deutlich tiefer. Bei diesen Messungen mit dem Testo 380 erzielten die Elektroabscheider durchschnittliche Abscheidegrade zwischen 60 % und 86 % (Tabelle 5). Je nach Betriebsphase der Feuerung schwankten jedoch Spannung und Strom im Elektroabscheider und infolge dessen auch die Abscheidegrade teilweise stark.

Grobstaubpartikel mit einer Grösse von bis zu 5 mm wurden hauptsächlich beim Zentralheizungsherd gemessen. Die höchsten Emissionen traten direkt nach dem Anfeuern bei ausgeschaltetem Elektroabscheider auf (Bild 11). Aus den Resultaten der Grobstaubmessung und den in der Umgebung der Anlage abgelagerten Grobstaubpartikeln ist erkennbar, dass es sich dabei hauptsächlich um Russ-Flocken handelte (Bild 10). Grobstaub kann sowohl aus der Feuerung als auch als agglomerierter Staub aus dem Elektroabscheider ausgeworfen werden. Ursache dafür ist eine unvollständige Verbrennung. Russ im Abgas führt im Elektroabscheider zu einem flockigen Schichtaufbau. Eine entsprechend flockige Staubschicht wurde bei den monatlichen Kontrollen durch den Kaminfeger auf drei Anlagen protokolliert (Tabelle 6). Diese Schicht haftet nur ungenügend und kann durch Mitreissen wieder in den Abgasstrom gelangen und aus dem Elektroabscheider ausgeworfen werden. In den vorliegenden Versuchen wurde dieser Austrag von Flocken durch das periodische Ein- und Ausschalten der Hochspannung vermutlich gefördert. Grobstaub wurde beim Pellet-Zimmerofen keiner gemessen, beim Speicherofen konnte Grobstaub nur während der Betätigung der Bypass-Klappe während des Nachlegens und kurz danach gemessen werden.

Aufgrund der kurzen Phasen mit stabilem Feuerungsbetrieb und den insgesamt hohen O_2 -Konzentrationen an der Messstelle waren gravimetrische Staubmessungen mit dem kompakten Staubmessgerät Wöhler SM 96 nicht möglich. Die in einer ersten Messkampagne während der ersten Heizperiode auf den Filterhülsen gesammelten Staubmengen waren für eine Auswertung zu gering.

Die Messungen mit dem Testo 380 haben zudem gezeigt, dass die vom Elektroabscheider gemessene Abgastemperatur deutlich unter der in der Kaminmitte gemessenen Abgastemperatur lag (Tabelle 5). Wie in Kapitel 4.3 beschrieben, kann der Elektroabscheider deshalb bei einigen Anlagen den Feuerungsbetrieb nicht zuverlässig erkennen. Grund dafür ist, dass der Temperaturfühler des Elektroabscheiders am Kaminrand platziert ist. Dies ist so ausgeführt, damit der Temperatursensor nicht zu nahe an der Hochspannung liegt und durch diese beeinflusst wird. Die Beeinflussung der Temperaturmessung des Testo 380 durch die Hochspannung kann in Bild 11 deutlich gesehen werden.

Ein Vergleichsmessung des Testo 380 mit einem von der FHNW neu entwickelten Messgerät DIEM zeigt Feinstaub-Abscheidegrade in einer vergleichbaren Grössenordnung (Tabelle 5). Die gemessenen Feinstaubkonzentrationen zeigten dagegen grössere Abweichungen, weil die physikalischen Messprinzipien unterschiedlich sind. Zudem resultiert beim Testo 380 bei der Normierung auf die Bezugs-sauerstoffkonzentration aufgrund der hohen O_2 -Konzentration im Abgas eine grosse Messunsicherheit

(Bild 12 und Anhang, Bild 26). Zusätzlich kann das Testo 380 derart geringe Staubkonzentrationen wie bei der Pelletfeuerung kaum messen und zeigt einen Offset, so dass die Messunsicherheit sehr gross wird. Auf weitergehende Vergleiche zwischen den beiden Messprinzipien wurde deshalb verzichtet.

Tabelle 5 Medianwerte von Kenngrössen der Feinstaubmessungen mit dem Testo 380 an drei Feuerungen. Die Kenngrössen beziehen sich auf Betriebsphasen mit gemessenen O₂-Konzentrationen kleiner 19.5 Vol.-% und aktivem oder ausgeschaltetem Elektroabscheider (EA AUS). Bei der Anlage 1001 wurde zusätzlich mit dem Feinstaubmessgerät DIEM der FHNW eine Vergleichsmessung durchgeführt (2).

Oekosolve ID		1001 Speicher- ofen	1003 Cheminée	1007 Zentral- heizungsherd	1001 (2) Pellet- ofen	1001 (2) Speicher- ofen
Feinstaub EA aktiv	mg/m ³ bei 13 Vol.-% O ₂	21	29	37	4	39
Feinstaub EA AUS	mg/m ³ bei 13 Vol.-% O ₂	147	131	111	26	98
Feinstaub Abscheidegrad	%	86	78	66	83	60
Feinstaub DIEM EA aktiv	mg/m ³ bei 13 Vol.-% O ₂	–	–	–	2	30
Feinstaub DIEM EA AUS	mg/m ³ bei 13 Vol.-% O ₂	–	–	–	17	67
Feinstaub Abscheidegrad DIEM	%	–	–	–	91	55
Spannung EA aktiv	kV	30	30	26	30	30
Strom EA aktiv	µA	139	207	589	321	173
O ₂	Vol.-%	19.0	19.0	18.0	18.7	18.4
CO	mg/m ³ bei 13 Vol.-% O ₂	3914	4656	4357	319	3846
T _{AG, Testo380}	°C	63	120	199	30	84
T _{AG, EA}	°C	34	52	84	23	47

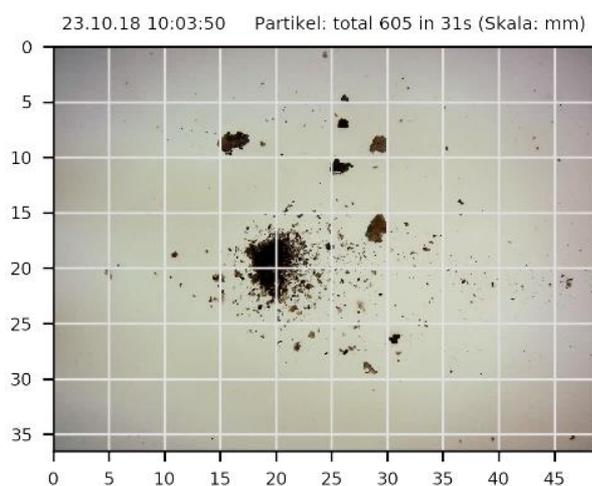


Bild 10 Beispielbilder von Grobstaubemissionen des Zentralheizungsherds der Anlage 1007 kurz nach dem Anfeuern bei ausgeschaltetem Elektroabscheider. Links: Bild des Grobstaubsensors. Rechts: Ablagerungen im Freien auf den Messgeräten neben dem Kamin während der Messung.

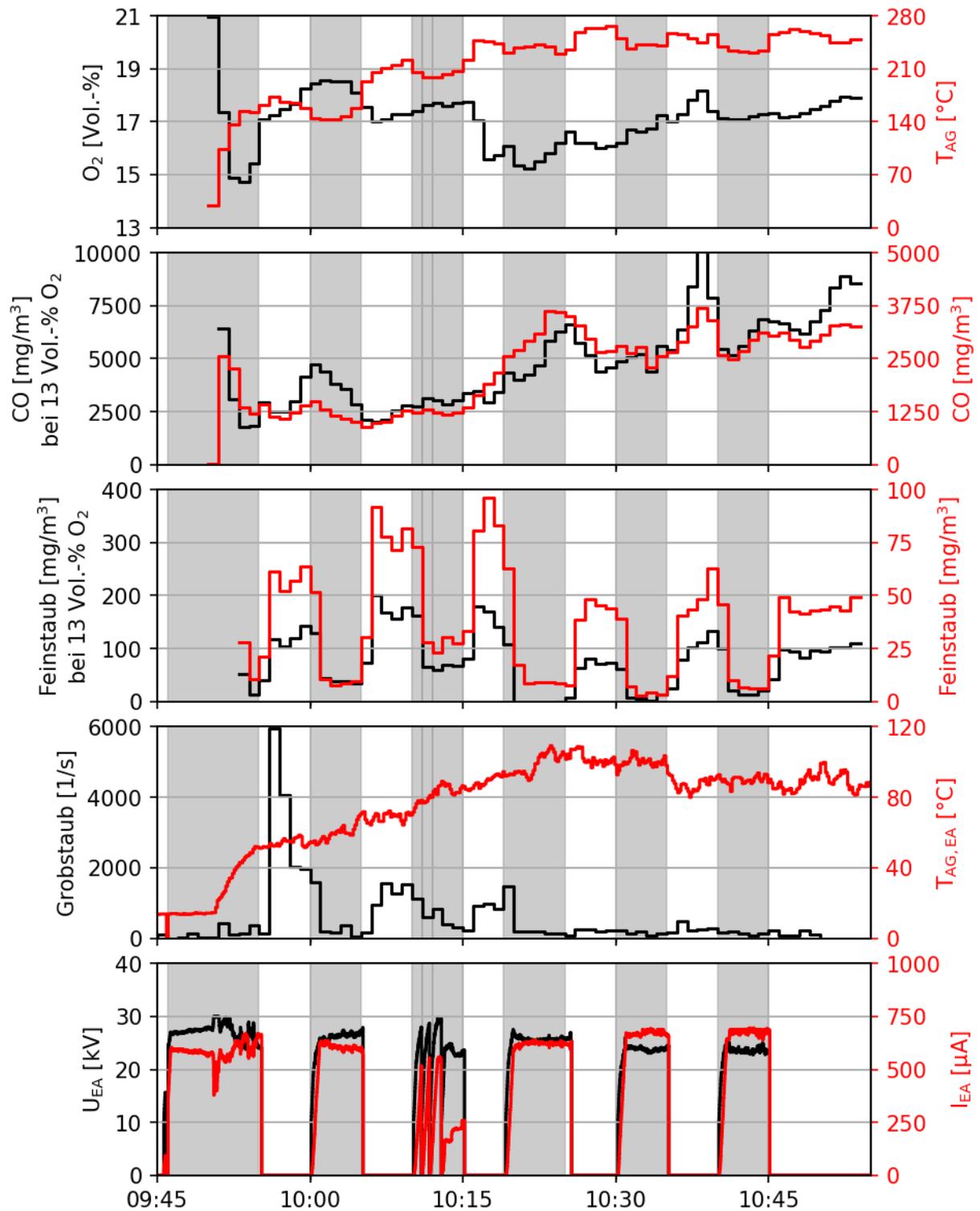


Bild 11 Resultate der Staubmessung am Zentralheizungsherd der Anlage 1007, Abbrand 1. Mit dem Testo 380 wurden die O₂- und CO-Konzentration, die Abgastemperatur (T_{AG}) und der Feinstaub gemessen. Der Grobstaub wurde mit dem Grobstaubzähler der HSLU gemessen und vom Elektroabscheider sind zusätzlich noch Abgastemperatur (T_{AG,EA}), Spannung (U_{EA}) und Strom (I_{EA}) dargestellt. Grau hinterlegt sind Betriebsphasen mit aktivem Elektroabscheider.

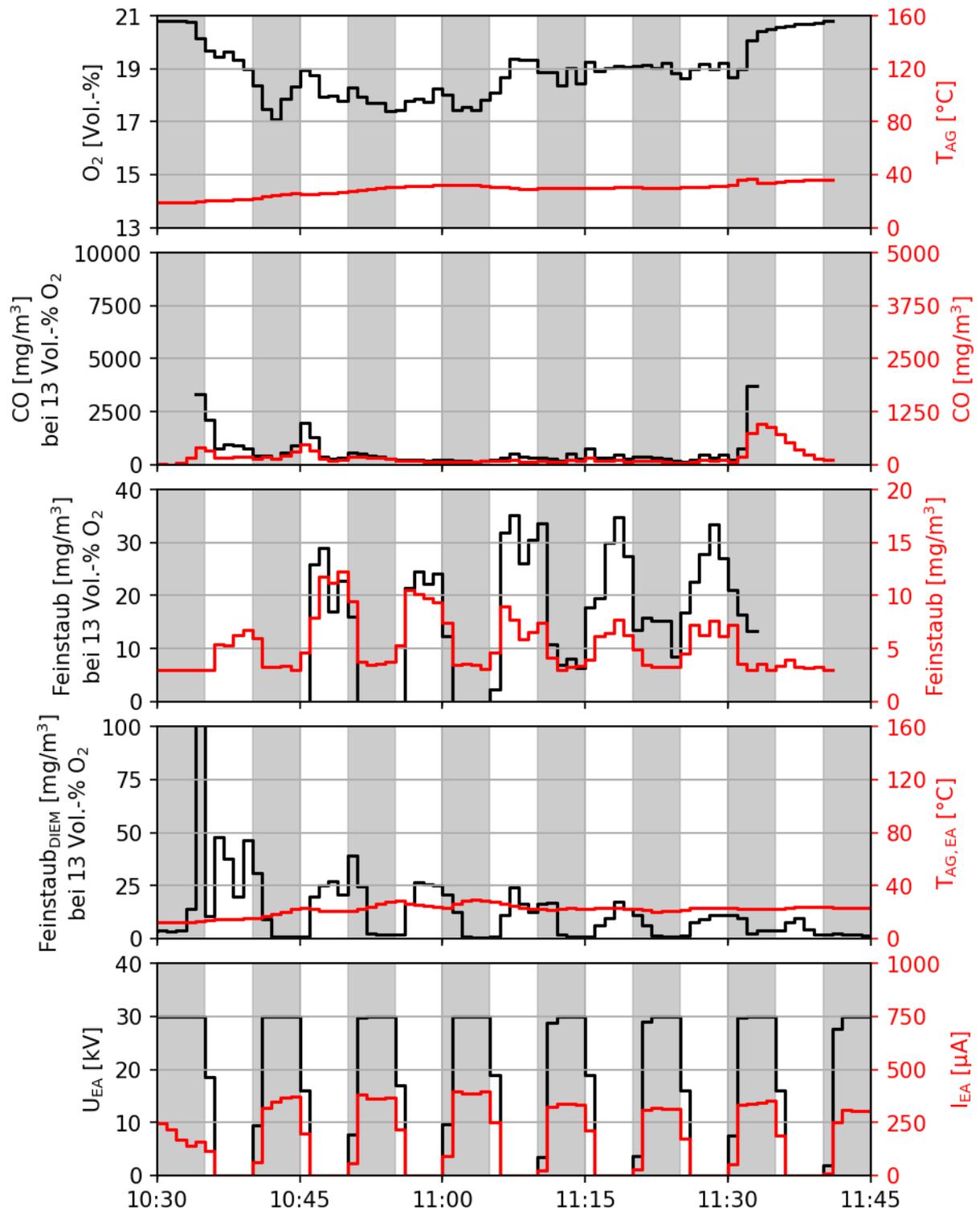


Bild 12 Resultate der Vergleichsmessung zwischen Testo 380 und DIEM FHNW am Pelletofen der Anlage 1001. Mit dem Testo 380 wurden die O₂- und CO-Konzentration, die Abgastemperatur (T_{AG}) und der Feinstaub gemessen. Mit dem DIEM FHNW wurde der Feinstaub mit einem zweiten physikalischen Messprinzip gemessen. Vom Elektroabscheider sind zusätzlich noch Abgastemperatur (T_{AG,EA}), Spannung (U_{EA}) und Stromstärke (I_{EA}) dargestellt. Grau hinterlegt sind Betriebsphasen mit aktivem Elektroabscheider.

4.6 Betriebsprotokolle der ersten Heizperiode

Während der ersten Heizperiode wurden von den Betreibern Betriebsprotokolle zum Holzverbrauch und Feuerungsbetrieb geführt (Tabelle 6). Der Vergleich der Betriebsdaten mit den Betriebsprotokollen zeigt eine gute Übereinstimmung bei sechs von sieben Anlagen (Anhang, Bild 15 bis Bild 22). Die Betriebsprotokolle der Anlage 1006 zeigen erhebliche Verschiebungen bei den Tagen zu den aufgezeichneten Betriebsdaten. Bei der Anlage 1003 mit nur einzelnen Abbränden gibt es ebenfalls einzelne Unstimmigkeiten.

Während der ersten Heizperiode wurden die Feinstaubabscheider monatlich durch den Kaminfeger kontrolliert und der Zustand protokolliert (Tabelle 6). Bei den Pellet-Feuerungen 1001 und 1005 wurden trotz vergleichsweise hohem Brennstoffverbrauch nur geringe Schichtdicken an abgeschiedenem Staub im Elektroabscheider gemessen. Gründe dafür sind wahrscheinlich die in der ersten Heizperiode deutlich kürzere Betriebsdauer der Elektroabscheider gegenüber der zweiten Heizperiode aufgrund der Einschaltkriterien. Auch die geringe Stromstärke in der ersten Heizperiode bei der Anlage 1001 ergab wahrscheinlich einen tieferen Abscheidegrad.

Der flockige Schichtaufbau des abgelagerten Feinstaubes wurde bei drei Anlagen festgestellt. Potenziell muss damit bei drei Anlagen mit dem in Kapitel 4.5 beschriebenen Auswurf von Russ-Flocken gerechnet werden. Entsprechende Meldungen von Betreibern und Nachbarn liegen jedoch keine vor.

Tabelle 6 Protokollierte Daten der sieben untersuchten Anlagen nach der ersten Heizperiode. Der Brennstoffverbrauch wurde jeweils vom Betreiber protokolliert. Die Schichtdicke des abgeschiedenen Feinstaubes am Rohr des Elektroabscheiders (Niederschlagselektrode, NE) und an der Sprühelektrode (SE) wurde monatlich vom Kaminfeger erfasst.

Oekosolve ID		1000	1001	1003	1004	1005	1006	1007
Brennstoffverbrauch	[kg]	1850	885 + 940	160	75	3120	1565	6230
Schichtdicke NE	[mm]	5	2	1	1	2	3	6
Schichtdicke SE	[mm]	3	1	1	1	1	2	3
flockige Schicht		ja/nein	nein	nein	nein	nein	ja	ja

4.7 Betriebsdatenaufzeichnung

Die Aufzeichnung der Betriebsdaten war in der ersten Heizperiode von Oktober 2017 bis Mai 2018 und in der zweiten Heizperiode vom November 2018 bis April 2019 aktiv. Während beider Heizperioden kam es zu Störungen bei der Datenübertragung in die Cloud-Datenbank von Oekosolve AG. Daher waren in der ersten Heizperiode nur Betriebsdaten zwischen 108 und 228 Tagen und in der zweiten Heizperiode zwischen 131 und 143 Tagen in einem Beobachtungszeitraum von rund 240 Tagen respektive 180 Tagen vorhanden (Anhang, Bild 13 und Bild 14). Dies hat gezeigt, dass eine kostengünstige Fernüberwachung und Alarmierung im Störfall zum heutigen Zeitpunkt noch nicht zuverlässig funktioniert

5 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass die Elektroabscheider zuverlässig funktionieren, wenn sie sachgerecht eingesetzt werden und wenn die Steuerung den Feuerungsbetrieb richtig detektiert. So erzielten alle untersuchten Elektroabscheider eine Verfügbarkeit von über 84 %, mehr als die Hälfte sogar von über 95 % und erreichten einen Feinstaub-Abscheidegrad zwischen 55 % und 90 %. Die Messresultate zeigen aber auch, dass die Feinstaubemissionen der Pelletfeuerung bei ausgeschaltetem Elektroabscheider in derselben Grössenordnung wie bei den Stückholzfeuerungen mit aktivem Elektroabscheider lagen. Zudem wurde während der zwei Betrachtungszeiträume keine signifikante Erhöhung der Spannung und Reduktion der Stromstärke im Elektroabscheider festgestellt, was auf eine Reduktion des Abscheidegrads aufgrund von zunehmender Verschmutzung hindeuten würde. Somit wurde kein erhöhter Reinigungsbedarf für die Elektroabscheider festgestellt. Während diese Resultate zeigen, dass durch Einsatz der Elektroabscheider eine deutliche Reduktion der Feinstaubemissionen möglich ist, sind für einen wirksamen Einsatz folgende Bedingungen zu beachten:

Der Einsatz der Elektroabscheider kann insbesondere bei unvollständiger Verbrennung zu erhöhten Emissionen an Grobstaub führen. Aus diesem Grund ist auch bei Einsatz von Elektroabscheidern grundsätzlich ein guter Feuerungsbetrieb sicher zu stellen. Mangels Langzeiterfahrungen können aber keine Aussagen gemacht werden, ob der Feuerungsbetrieb solcher Anlagen durch häufigere Reinigung durch den Kaminfeger deutlich verbessert werden könnte.

Von den sieben untersuchten Elektroabscheidern wurden vier in der ersten Heizperiode der Erfolgskontrolle nicht optimal betrieben. Bei drei Geräten war die Spannung gedrosselt, so dass die Staubabscheidung nur mit niedrigen Stromstärken erfolgte. Ausserdem haben zwei Geräte den Feuerungsbetrieb nicht zuverlässig detektiert. Für die Betreiber war dies nicht erkennbar. Um sicherzustellen, dass installierte Elektroabscheider optimal betrieben werden, muss deshalb die Funktionskontrolle bei der Inbetriebnahme sichergestellt werden. Zudem muss auch für die Betreiber der Betriebszustand des Elektroabscheiders klar ersichtlich sein. Ausserdem ist nebst einer periodischen Reinigung von Kamin und Elektroabscheider auch eine periodische Kontrolle des Elektroabscheiders durch eine Fachperson erforderlich.

Mit diesen Voraussetzungen soll gewährleistet werden, dass die Elektroabscheider:

- mit hohen Werten für Spannung und Stromstärke betrieben werden und damit einen hohen Abscheidegrad zu erzielen,
- den Feuerungsbetrieb zuverlässig detektieren oder bei zu tiefen Abgastemperaturen und zu grossen Kamindurchmessern mit einem alternativen Einschaltkriterium betrieben werden,
- Fehlfunktionen den Betreibern klar anzeigen und
- bei Bedarf optimiert werden.

6 Conclusioni

La presente indagine dimostra che i filtri elettrostatici funzionano in modo affidabile se vengono montati in modo appropriato e se i comandi rilevano correttamente l'esercizio dell'impianto a combustione. Tutti i filtri elettrostatici esaminati hanno così raggiunto un grado di disponibilità superiore all'84%, e più della metà di essi superiore addirittura al 95%, e hanno raggiunto un grado di separazione delle polveri fini tra il 55% ed il 90%. I risultati delle misurazioni mostrano però anche che le emissioni di polveri fini degli impianti a combustione alimentati con pellet, con filtro elettrostatico disattivato, erano quantitativamente simili a quelle originate da impianti a cippato con filtro elettrostatico attivato. Inoltre, nel corso dei due periodi di rilevamento non è stato constatato nel separatore elettrostatico un significativo aumento della tensione e una riduzione dell'intensità di corrente, cosa che avrebbe significato una riduzione del grado di separazione delle polveri fini in conseguenza dell'aumento dello sporco. Pertanto non è stato constatato un aumento dell'esigenza di pulizia per i separatori elettrostatici. Avendo dimostrato tali risultati che l'impiego di separatori elettrostatici rende possibile una significativa riduzione delle emissioni di polveri fini, per un impiego efficiente devono essere osservate le seguenti condizioni:

Con l'impiego di filtri elettrostatici può originarsi, in particolare con combustioni incomplete, un aumento delle emissioni di polveri grossolane. Per questo motivo, anche con l'impiego di filtri elettrostatici, dev'essere garantito un buon esercizio dell'impianto a combustione. A causa della mancanza di esperienze di lungo periodo non si può però affermare che l'esercizio della combustione di questi impianti possa essere migliorato in modo significativo con una pulizia più frequente da parte dello spazzacamino.

Dei sette separatori elettrostatici di polveri fini esaminati, durante il primo periodo di riscaldamento oggetto della verifica quattro non sono stati fatti funzionare in modo ottimale. In tre apparecchi la tensione era ridotta, per cui la separazione delle polveri fini avveniva solo con una bassa intensità di corrente. Inoltre, due di essi non hanno rilevato correttamente lo stato d'esercizio dell'impianto a combustione, cosa che i gestori dell'impianto non erano in grado di ravvisare. Per poter assicurare l'esercizio ottimale dei filtri elettrostatici installati perciò è necessario che la funzione di controllo sia accertata al momento della messa in servizio. Inoltre, lo stato di funzionamento del filtro elettrostatico deve essere chiaramente verificabile da parte del gestore dell'impianto. È necessario infine, oltre alla pulizia periodica del camino e del filtro elettrostatico, che quest'ultimo sia regolarmente controllato da un tecnico.

Sulla base di questi presupposti, è necessario garantire che i filtri elettrostatici:

- siano messi in esercizio con alti valori di tensione e intensità di corrente, per poter così raggiungere un alto grado di separazione delle polveri;
- che essi rilevino correttamente lo stato d'esercizio dell'impianto a combustione, oppure, in caso di temperature troppo basse dei gas di scarico e di sezione troppo grande del camino, che possano essere fatti funzionare tramite un criterio di accensione diverso;
- che le perturbazioni di funzionamento siano chiaramente rilevabili dal gestore; e
- qualora se ne presentasse l'esigenza, essi siano ottimizzati.

7 Anhang

7.1 Kenngrößen Monatsübersicht

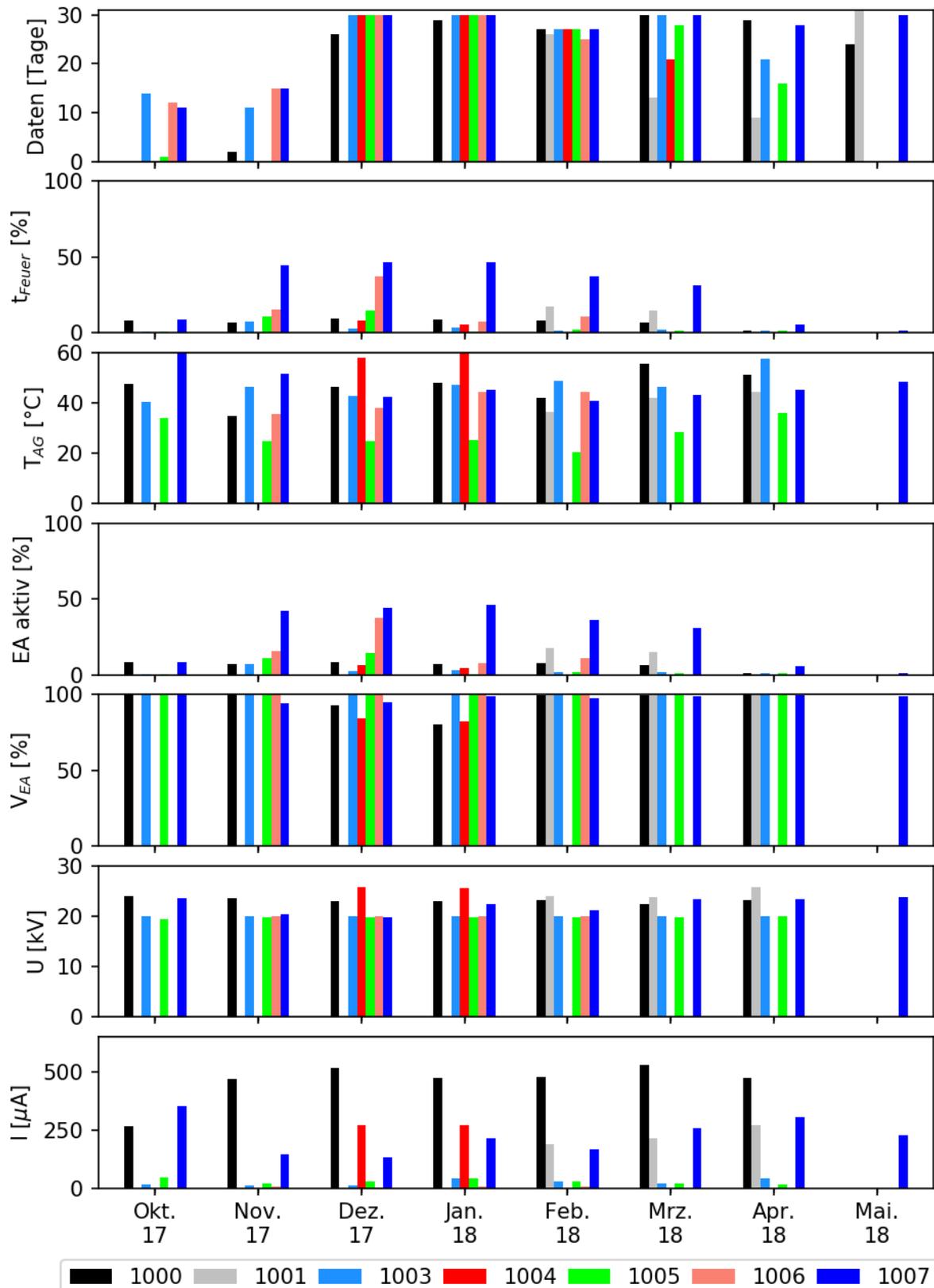


Bild 13 Zusammenstellung der Durchschnittswerte aufgeteilt auf die Monate der Heizsaison 2017/2018 aufgezeichneten Betriebsdaten der untersuchten Anlagen. Ausgewertet wurde nach den Kriterien aus Tabelle 4. Die Kenndaten des Elektroabschleiders (EA) beziehen sich auf den EA-Betrieb, die Temperaturen beziehen sich auf den Feuerungsbetrieb.

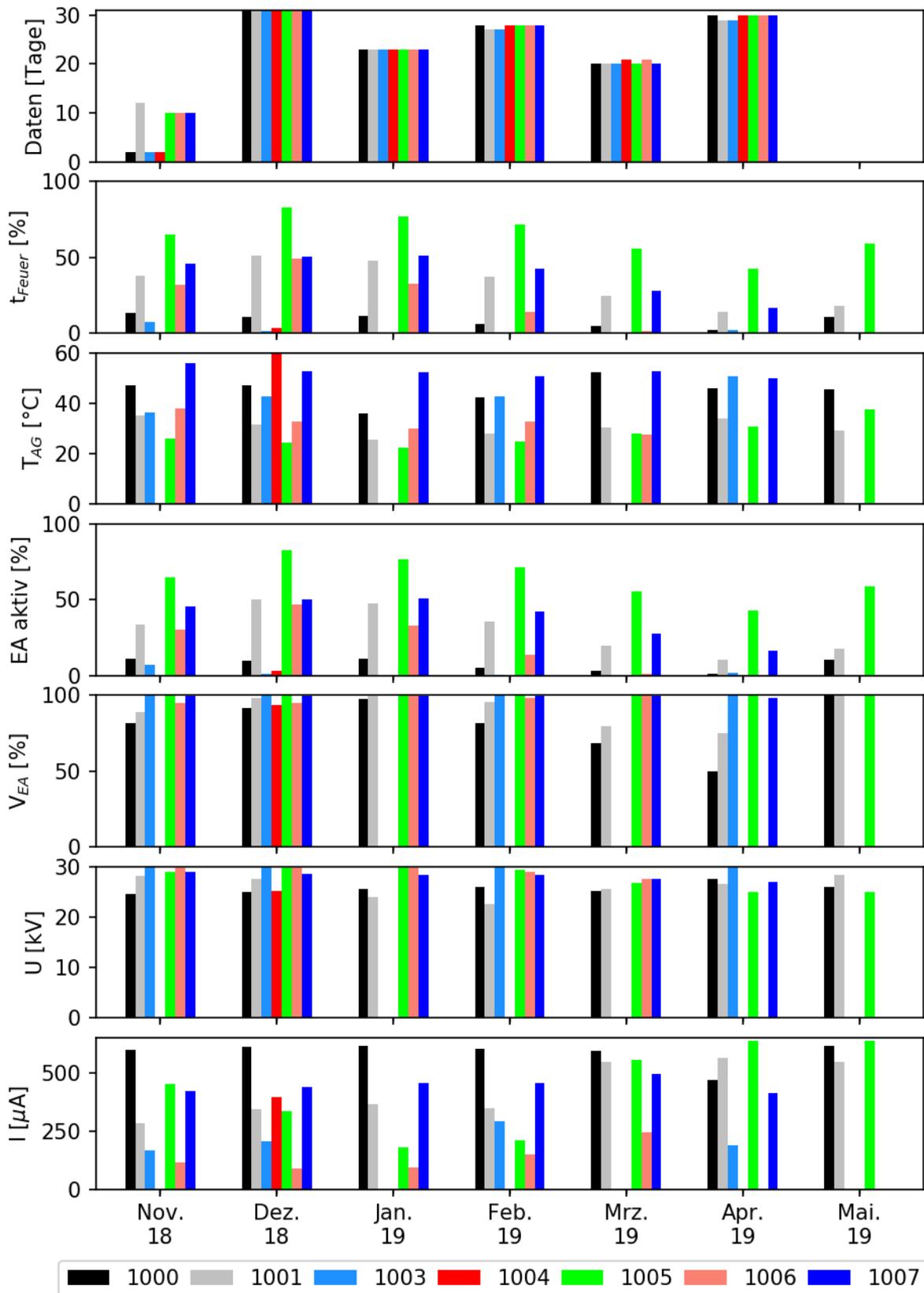


Bild 14 Zusammenstellung der Durchschnittswerte aufgeteilt auf die Monate der Heizsaison 2017/2018 aufgezeichneten Betriebsdaten der untersuchten Anlagen. Ausgewertet wurde nach den Kriterien aus Tabelle 4. Die Kenndaten des Elektroabschneiders (EA) beziehen sich auf den EA-Betrieb, die Temperaturen beziehen sich auf den Feuerungsbetrieb.

7.2 Beispiele Betriebsdaten

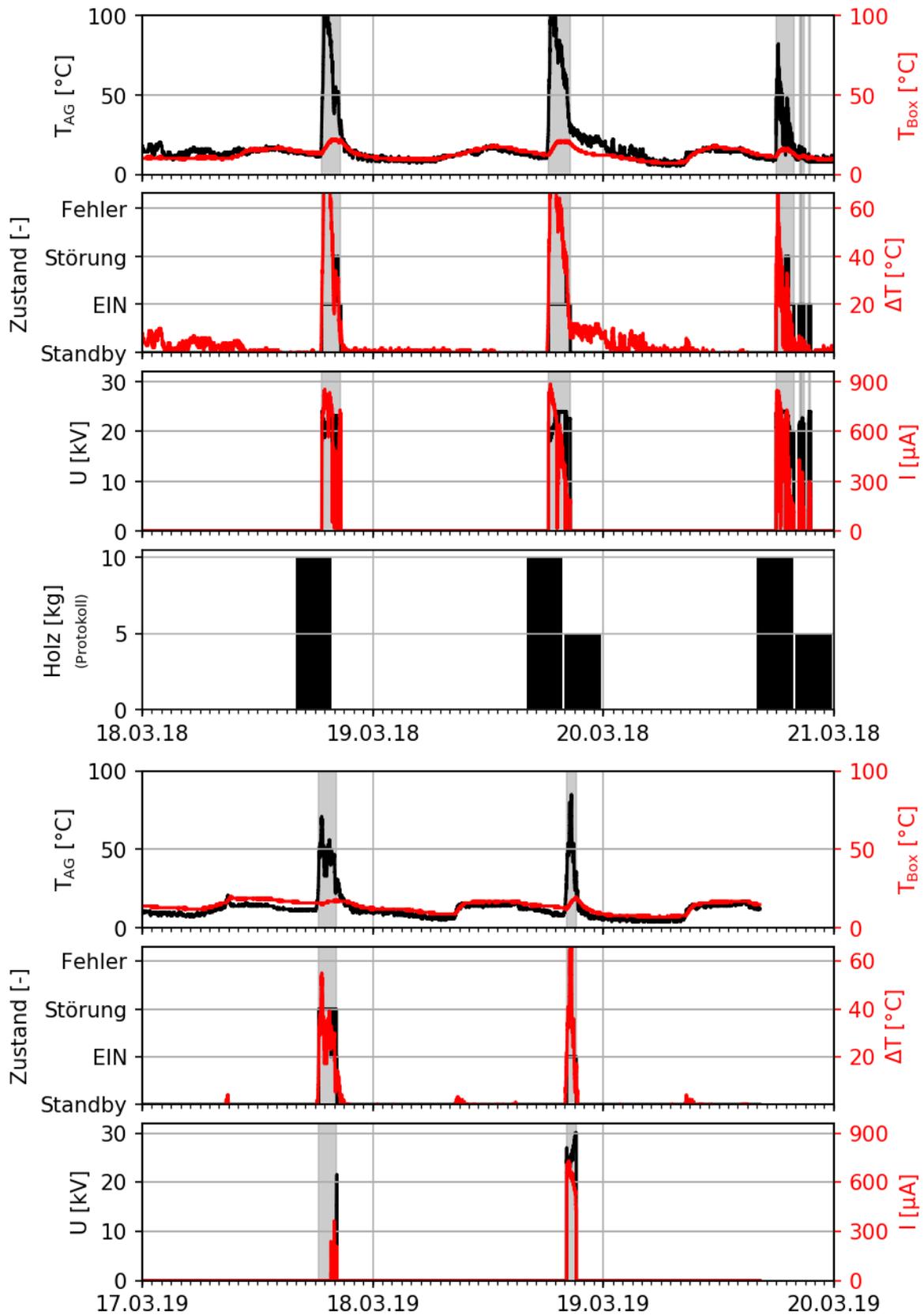


Bild 15 Ausschnitt aus den Betriebsdaten des Elektroabscheiders von Anlage 1000. Dargestellt sind die Abgastemperatur (T_{AG}), die Temperatur der Steuerbox (T_{Box}) und die resultierende Differenz (ΔT) als Einschaltkriterium, die Hochspannung (U) der Strom (I) und der Betriebszustand. Grau hinterlegt sind Phasen, während derer das Gerät Feuerungs-betrieb erkannt hat. Die verbrannte Holzmenge wurde in der ersten Heizsaison 17 – 18 vom Betreiber in fünf vordefinierten Tagesabschnitten protokolliert.

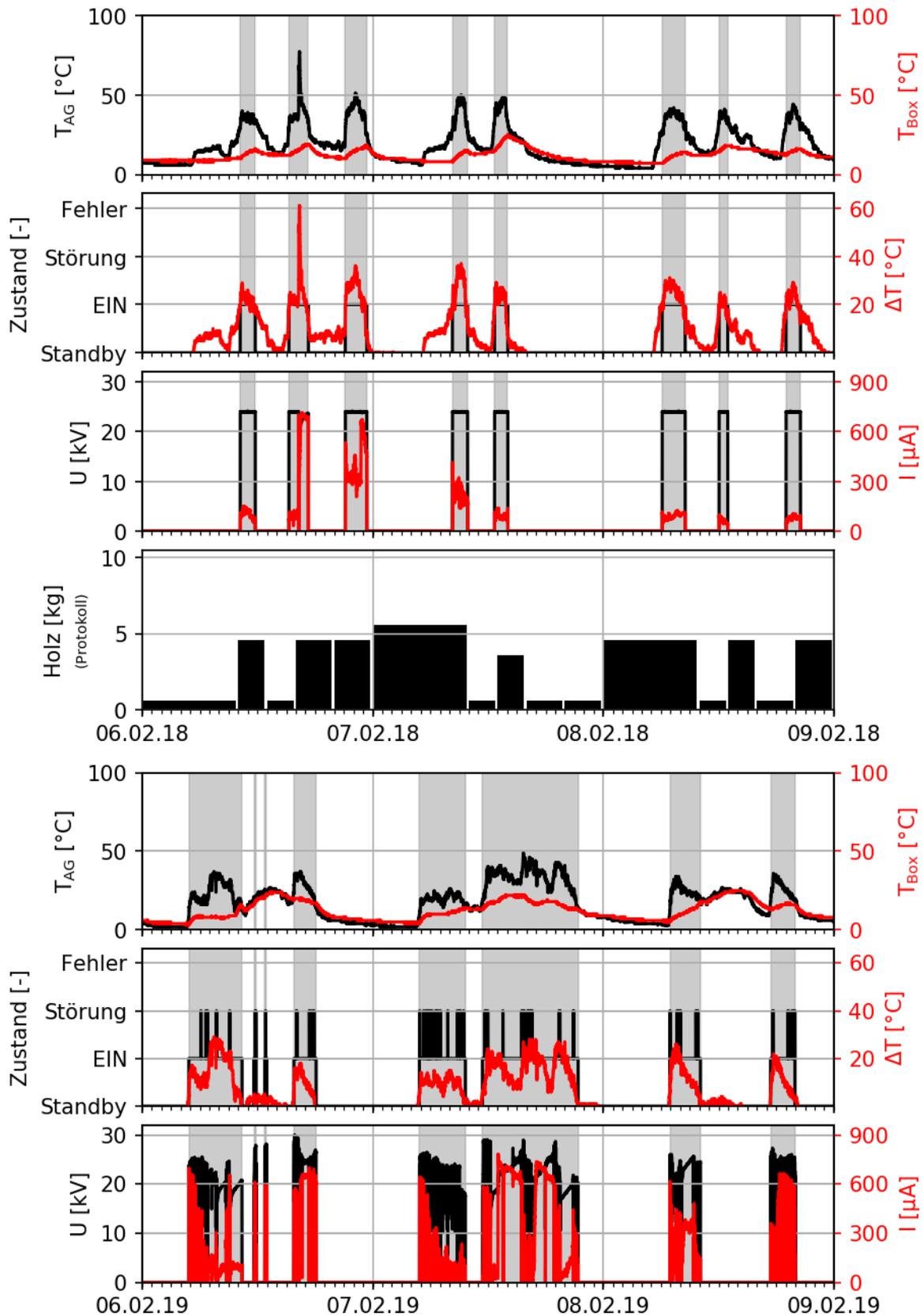


Bild 16 Ausschnitt aus den Betriebsdaten des Elektroabscheiders von Anlage 1001. Dargestellt sind die Abgastemperatur (T_{AG}), die Temperatur der Steuerbox (T_{Box}) und die resultierende Differenz (ΔT) als Einschaltkriterium, die Hochspannung (U) der Strom (I) und der Betriebszustand. Grau hinterlegt sind Phasen, während derer das Gerät Feuerungs-betrieb erkannt hat. Die verbrannte Holzmenge wurde in der ersten Heizsaison 17 – 18 vom Betreiber in fünf vordefinierten Tagesabschnitten protokolliert.

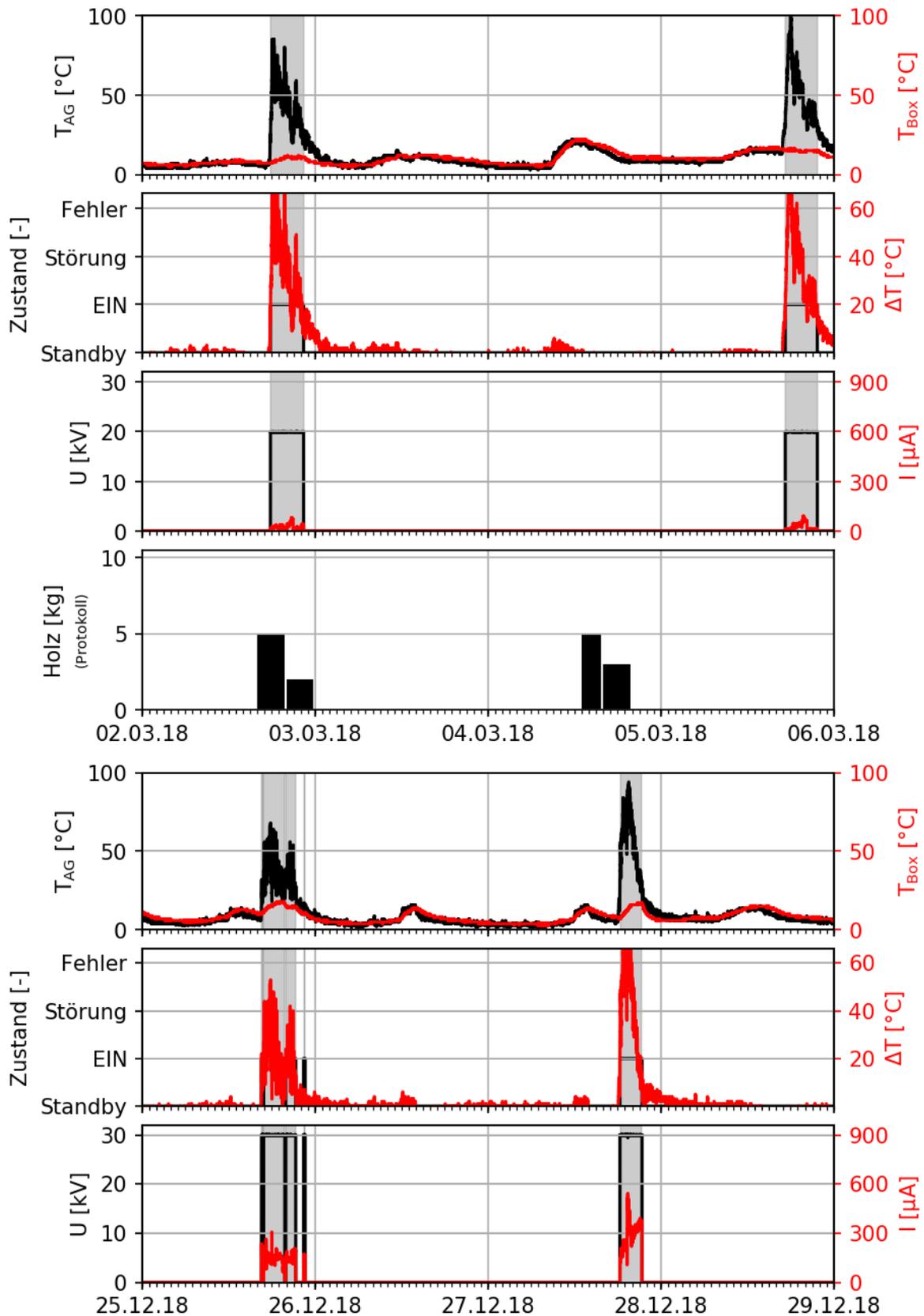


Bild 17 Ausschnitt aus den Betriebsdaten des Elektroabscheiders von Anlage 1003. Dargestellt sind die Abgastemperatur (T_{AG}), die Temperatur der Steuerbox (T_{Box}) und die resultierende Differenz (ΔT) als Einschaltkriterium, die Hochspannung (U) der Strom (I) und der Betriebszustand. Grau hinterlegt sind Phasen, während derer das Gerät Feuerungs-betrieb erkannt hat. Die verbrannte Holzmenge wurde in der ersten Heizsaison 17 – 18 vom Betreiber in fünf vordefinierten Tagesabschnitten protokolliert.

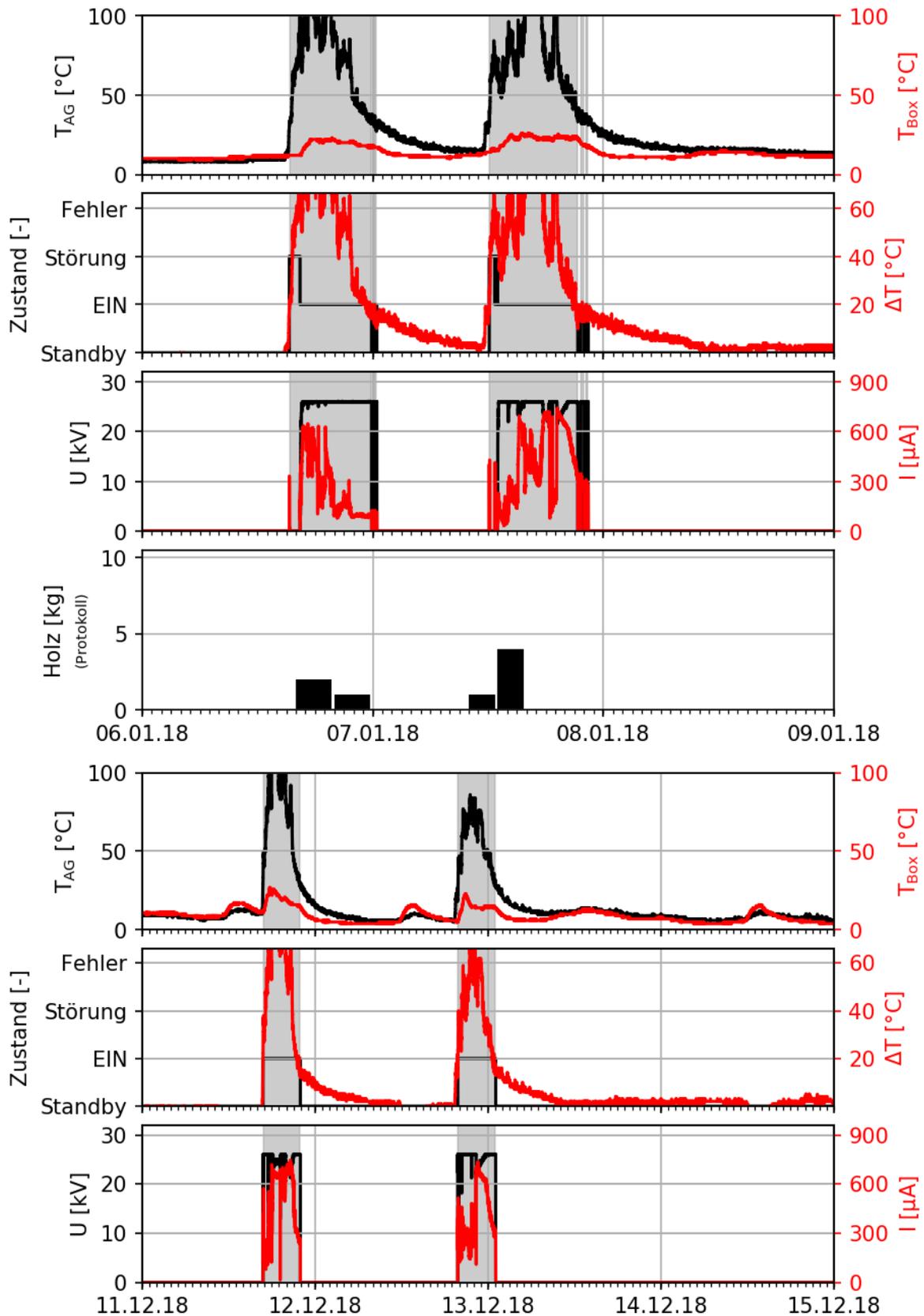


Bild 18 Ausschnitt aus den Betriebsdaten des Elektroabscheiders von Anlage 1004. Dargestellt sind die Abgastemperatur (T_{AG}), die Temperatur der Steuerbox (T_{Box}) und die resultierende Differenz (ΔT) als Einschaltkriterium, die Hochspannung (U) der Strom (I) und der Betriebszustand. Grau hinterlegt sind Phasen, während derer das Gerät Feuerungs-betrieb erkannt hat. Die verbrannte Holzmenge wurde in der ersten Heizsaison 17 – 18 vom Betreiber in fünf vordefinierten Tagesabschnitten protokolliert.

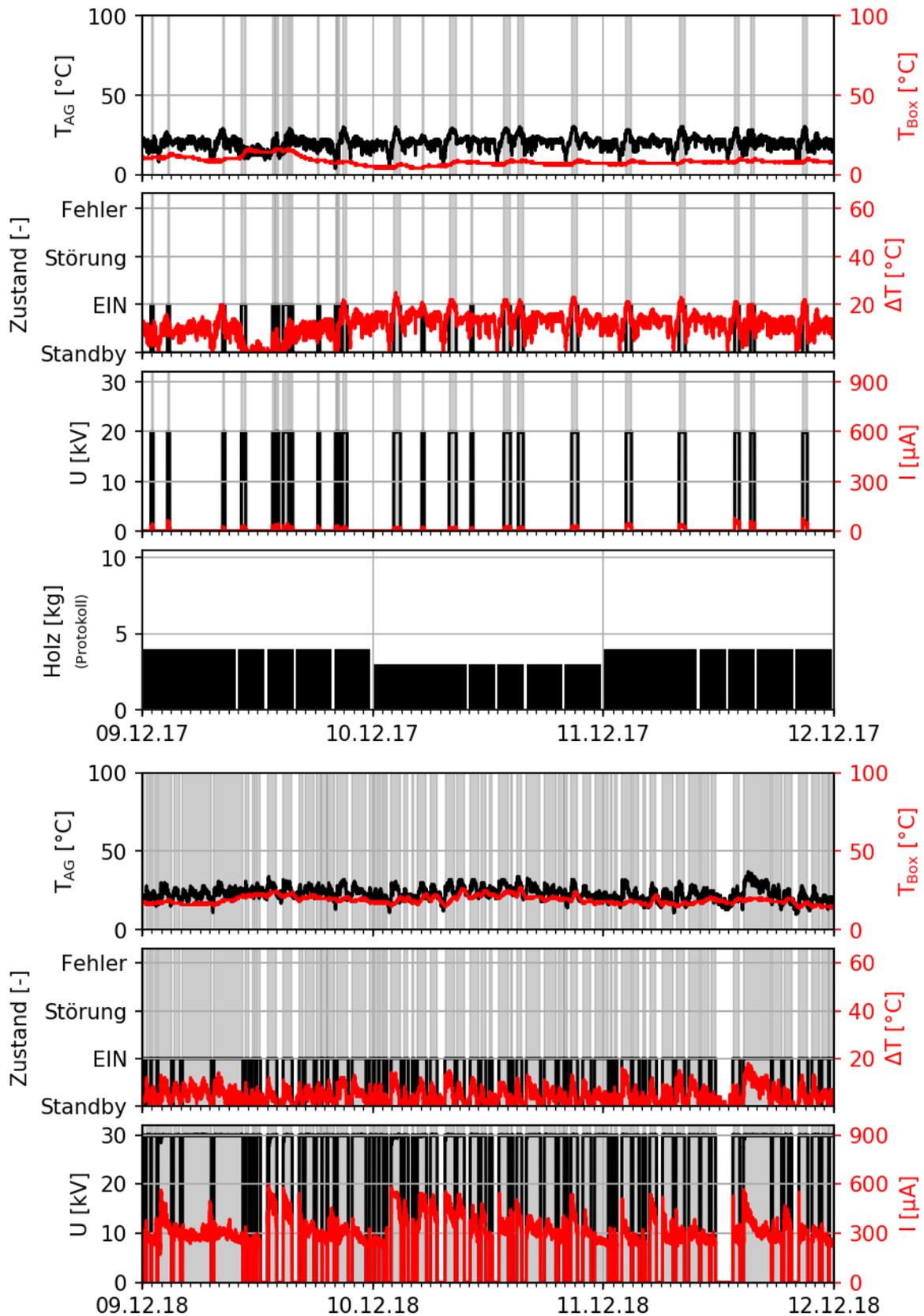


Bild 19 Ausschnitt aus den Betriebsdaten des Elektroabscheiders von Anlage 1005. Dargestellt sind die Abgastemperatur (T_{AG}), die Temperatur der Steuerbox (T_{Box}) und die resultierende Differenz (ΔT) als Einschaltkriterium, die Hochspannung (U) der Strom (I) und der Betriebszustand. Grau hinterlegt sind Phasen, während derer das Gerät Feuerungs-betrieb erkannt hat. Die verbrannte Holzmenge wurde in der ersten Heizsaison 17 – 18 vom Betreiber in fünf vordefinierten Tagesabschnitten protokolliert.

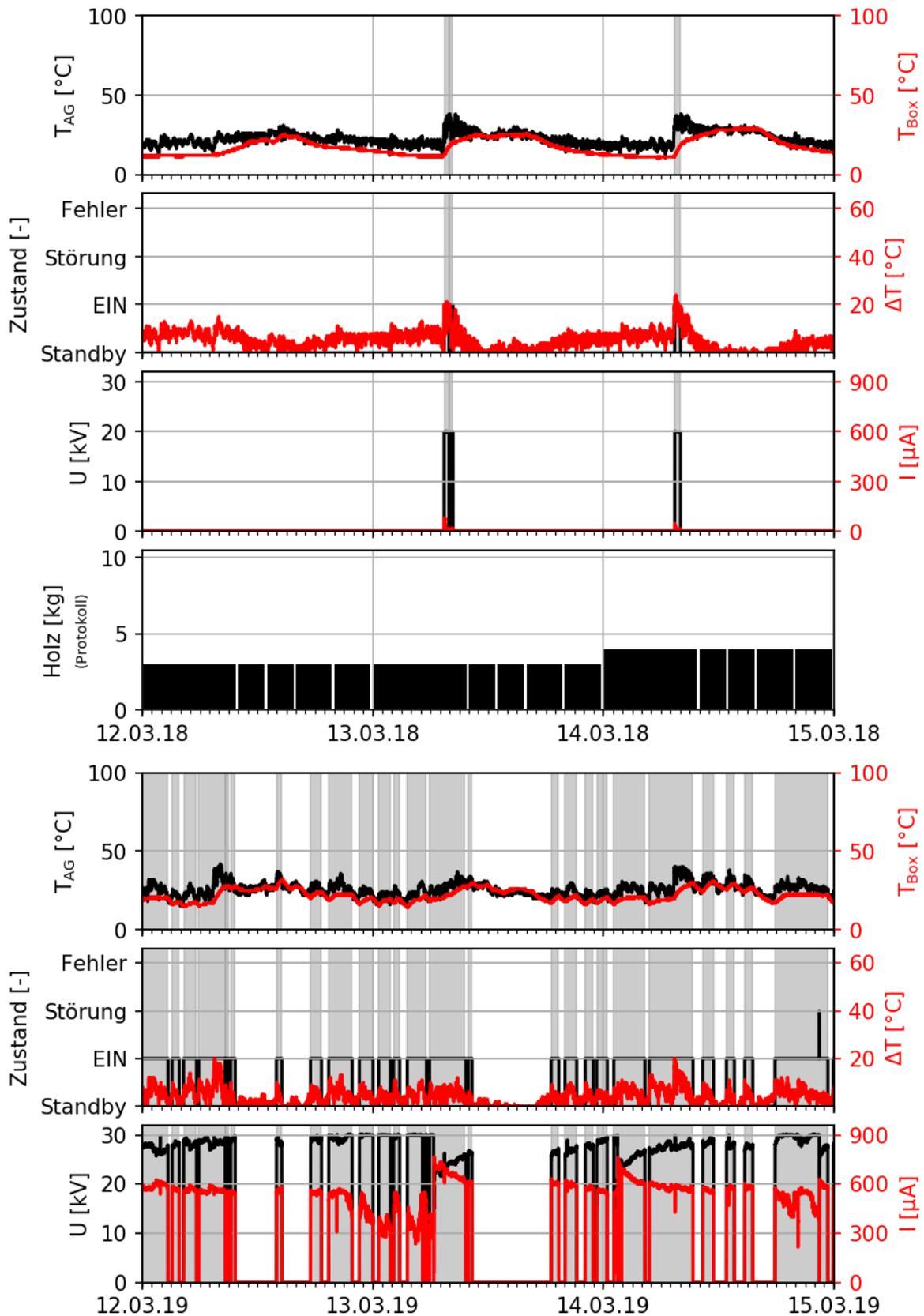


Bild 20 Ausschnitt aus den Betriebsdaten des Elektroabscheiders von Anlage 1005. Dargestellt sind die Abgastemperatur (T_{AG}), die Temperatur der Steuerbox (T_{Box}) und die resultierende Differenz (ΔT) als Einschaltkriterium, die Hochspannung (U) der Strom (I) und der Betriebszustand. Grau hinterlegt sind Phasen, während derer das Gerät Feuerungs-betrieb erkannt hat. Die verbrannte Holzmenge wurde in der ersten Heizsaison 17 – 18 vom Betreiber in fünf vordefinierten Tagesabschnitten protokolliert.

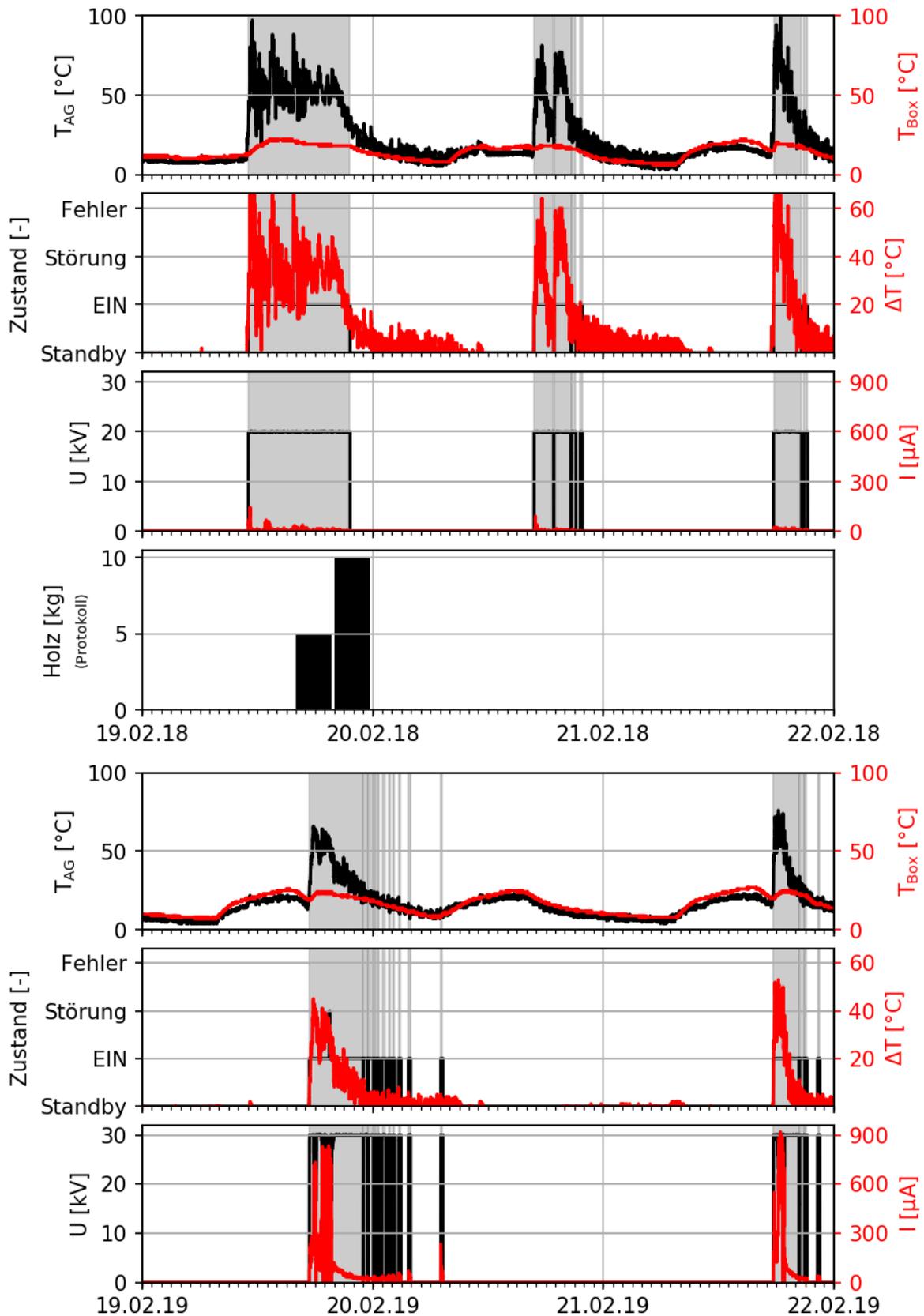


Bild 21 Ausschnitt aus den Betriebsdaten des Elektroabscheiders von Anlage 1006. Dargestellt sind die Abgastemperatur (T_{AG}), die Temperatur der Steuerbox (T_{Box}) und die resultierende Differenz (ΔT) als Einschaltkriterium, die Hochspannung (U) der Strom (I) und der Betriebszustand. Grau hinterlegt sind Phasen, während derer das Gerät Feuerungs-betrieb erkannt hat. Die verbrannte Holzmenge wurde in der ersten Heizsaison 17 – 18 vom Betreiber in fünf vordefinierten Tagesabschnitten protokolliert.

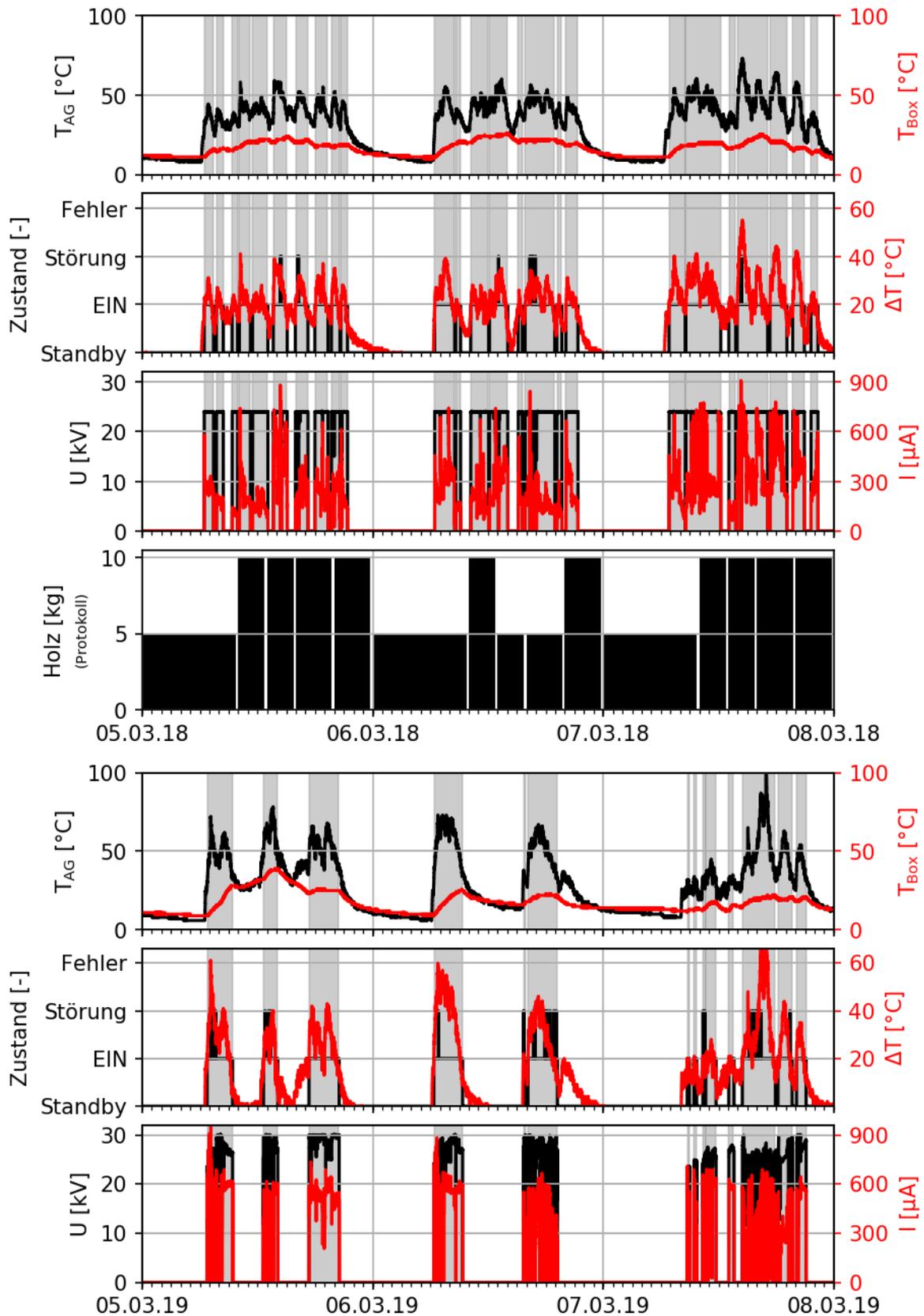


Bild 22 Ausschnitt aus den Betriebsdaten des Elektroabscheiders von Anlage 1007 Dargestellt sind die Abgastemperatur (T_{AG}), die Temperatur der Steuerbox (T_{Box}) und die resultierende Differenz (ΔT) als Einschaltkriterium, die Hochspannung (U) der Strom (I) und der Betriebszustand. Grau hinterlegt sind Phasen, während derer das Gerät Feuerungs-betrieb erkannt hat. Die verbrannte Holzmenge wurde in der ersten Heizsaison 17 – 18 vom Betreiber in fünf vordefinierten Tagesabschnitten protokolliert.

7.3 Zeitverläufe Staubmessungen

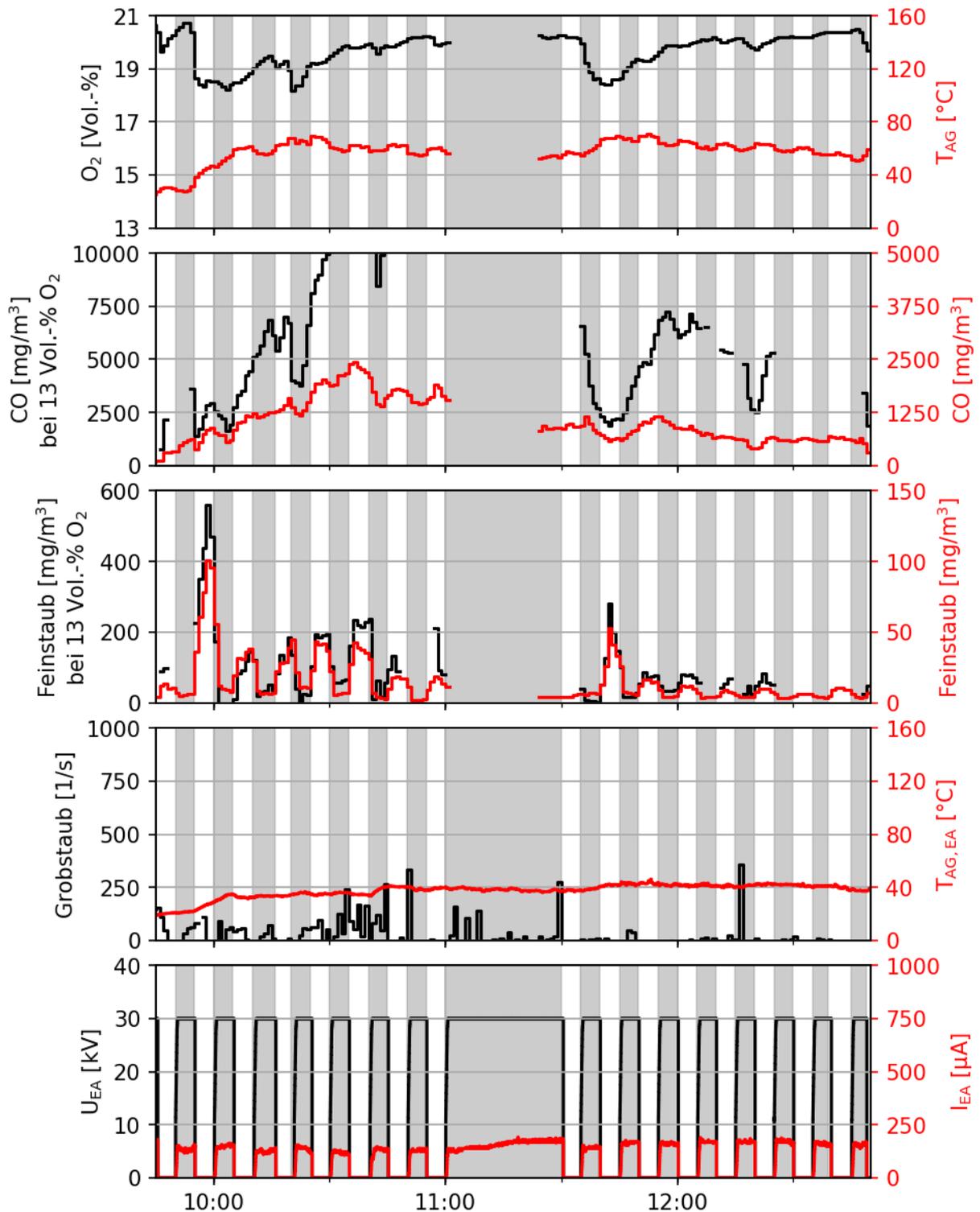


Bild 23 Resultate der Staubmessung am Speicherofen von Anlage 1001. Mit dem Testo 380 wurden die O₂- und CO-Konzentration, die Abgastemperatur (T_{AG}) und der Feinstaub gemessen. Der Grobstaub wurde mit dem Grobstaubzähler der HSLU gemessen und vom Elektroabscheider sind zusätzlich noch Abgastemperatur (T_{AG,EA}), Spannung (U_{EA}) und Strom (I_{EA}) dargestellt. Grau hinterlegt sind Betriebsphasen mit aktivem Elektroabscheider.

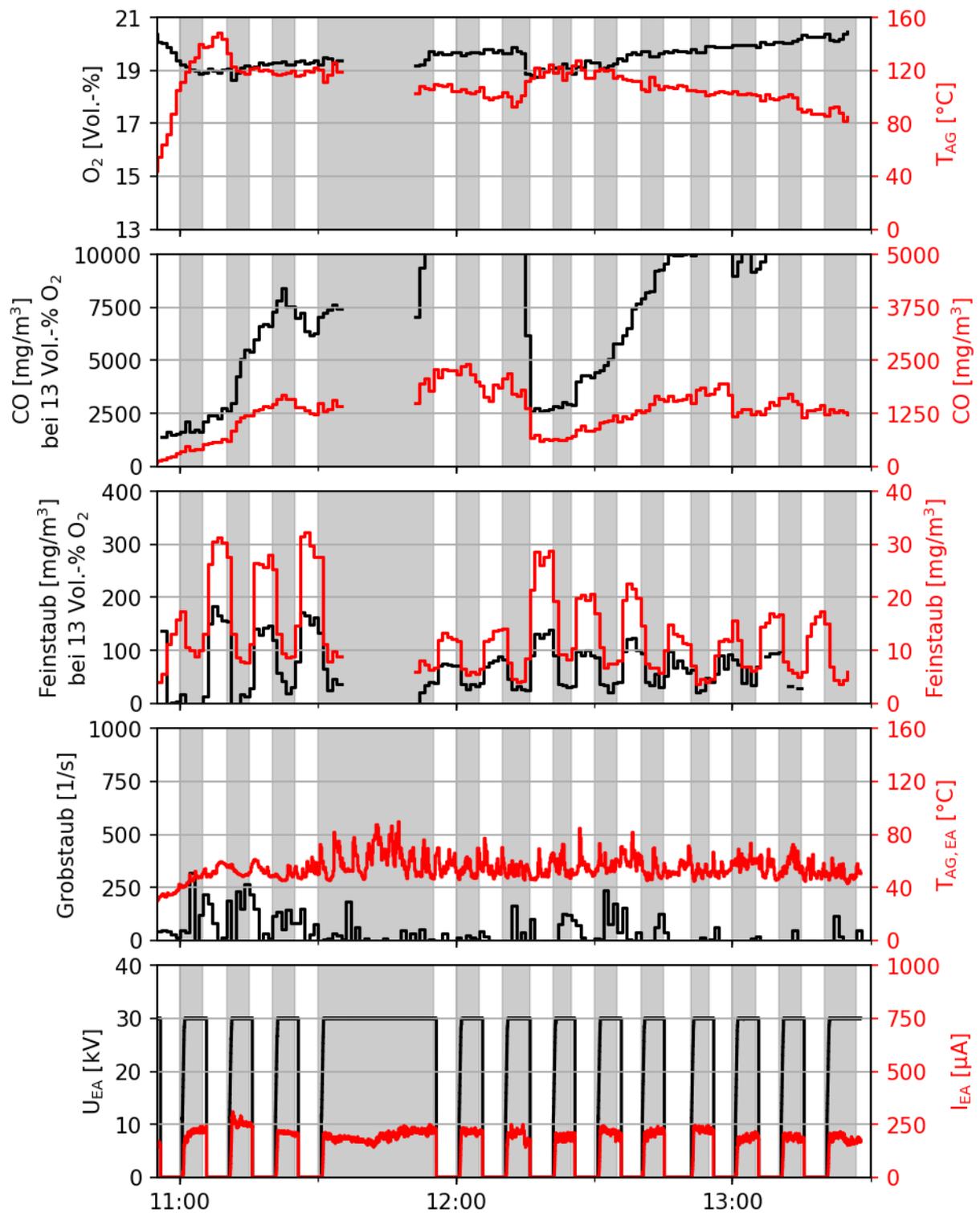


Bild 24 Resultate der Staubmessung am Cheminée von Anlage 1003, Abbrand 1. Mit dem Testo 380 wurden die O₂- und CO-Konzentration, die Abgastemperatur (T_{AG}) und der Feinstaub gemessen. Der Grobstaub wurde mit dem Grobstaubzähler der HSLU gemessen und vom Elektroabscheider sind zusätzlich noch Abgastemperatur (T_{AG,EA}), Spannung (U_{EA}) und Strom (I_{EA}) dargestellt. Grau hinterlegt sind Betriebsphasen mit aktivem Elektroabscheider.

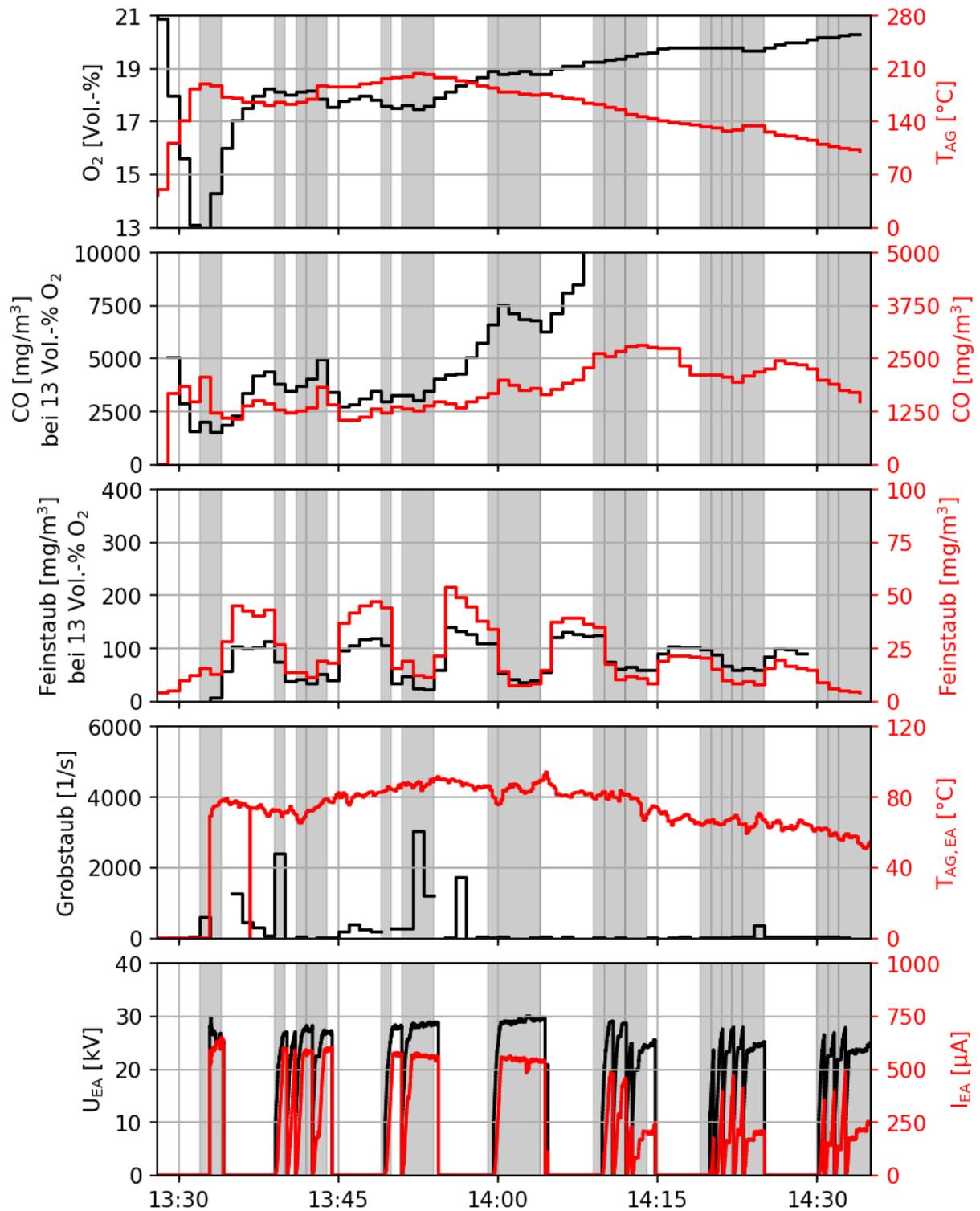


Bild 25 Resultate der Staubmessung am Zentralheizungsherd von Anlage 1007, Abbrand 2. Mit dem Testo 380 wurden die O₂- und CO-Konzentration, die Abgastemperatur (T_{AG}) und der Feinstaub gemessen. Der Grobstaub wurde mit dem Grobstaubzähler der HSLU gemessen und vom Elektroabscheider sind zusätzlich noch Abgastemperatur (T_{AG,EA}), Spannung (U_{EA}) und Strom (I_{EA}) dargestellt. Grau hinterlegt sind Betriebsphasen mit aktivem Elektroabscheider.

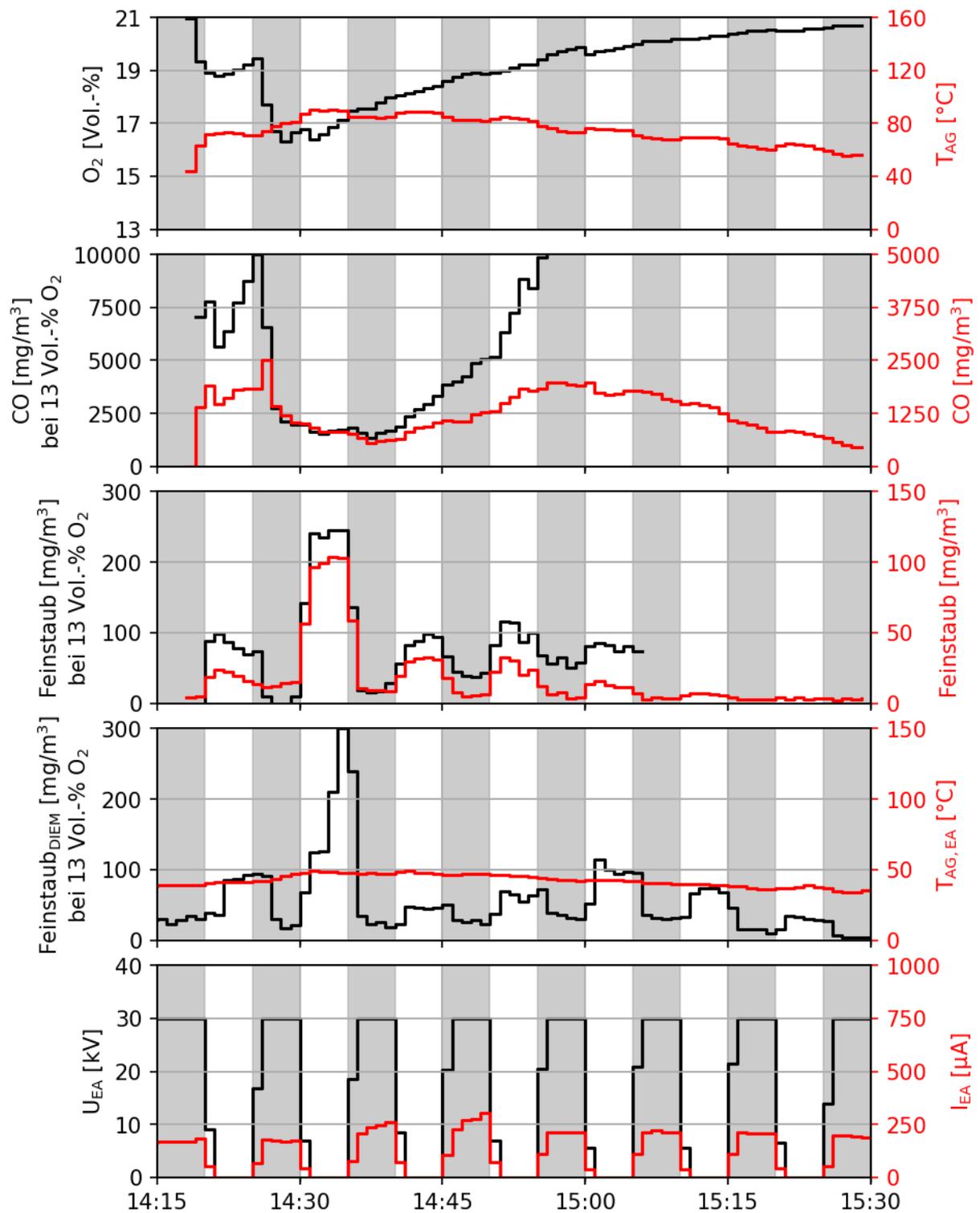


Bild 26

Resultate der Vergleichsmessung zwischen Testo 380 und DIEM FHNW am Speicherofen von Anlage 1001. Mit dem Testo 380 wurden die O₂- und CO-Konzentration, die Abgastemperatur (T_{AG}) und der Feinstaub gemessen. Mit dem DIEM FHNW wurde der Feinstaub mit einem zweiten physikalischen Messprinzip gemessen. Vom Elektroabscheider sind zusätzlich noch Abgastemperatur (T_{AG,EA}), Spannung (U_{EA}) und Strom (I_{EA}) dargestellt. Grau hinterlegt sind Betriebsphasen mit aktivem Elektroabscheider.

7.4 Stellungnahme Oekosolve

OekoSolve: Stellungnahme zum Bericht von Verenum

Erfolgskontrolle zum Pilotprojekt Feinstaubabscheider im Misox

1 Marktsituation Feinstaubabscheider

Die Firma OekoSolve hat kurz nach Verabschiedung der LRV-Verschärfung im Jahr 2007 mit der Entwicklung des Feinstaubabscheiders OekoTube begonnen und das Produkt im Jahr 2008 auf den Markt gebracht. Gerade für Wohnzimmerfeuerungen ist der OekoTube das ideale Produkt und wir sahen ein grosses Potential in diesem Bereich die Feinstaubemissionen zu reduzieren.

Leider bot die LRV sehr viele Schlupflöcher, sodass z.B. fast jede nicht genormte Feuerung als kunsthandwerklich hergestellt deklariert werden konnte. Weiter werden neue Wohnzimmerfeuerungen mit Typenprüfung in den Verkehr gebracht, welche zwar auf dem Prüfstand die geforderten Resultate erfüllen, in der Realität jedoch weit davon abweichen. Auch mit der neuen LRV-Verschärfung von 2018 sind diese praxisfremden Prüfungen zugelassen und es werden somit weiterhin Geräte auf den Markt gebracht, welche in der Praxis die Grenzwerte weit überschreiten. Dies bedeutet, dass der Austausch von alten Feuerungen leider nicht zwingend zu geringeren Feinstaubemissionen führen wird.

Generell kann gesagt werden, dass in der Schweiz sehr wenig gegen die Feinstaubproblematik von Kleinholzfeuerungen – ausgenommen automatische Feuerungen (Kesselanlagen) - unternommen wird.

Momentan gilt die allgemeine Meinung, dass eher die Feuerungen ausgetauscht werden sollen als auf Sekundärmassnahmen zu setzen. Dies kann jedoch Jahrzehnte dauern und es wird wie oben bereits erwähnt nicht zwangsläufig zu tieferen Emissionen führen.

Der Einsatz eines Feinstaubabscheiders kann hingegen kurzfristig mit einer Investition von CHF 3'000.- realisiert und so eine nachhaltige Lösung zur Feinstaubreduktion geschaffen werden.

2 Messkampagne Misox

Das Amt für Umwelt Graubünden hat als eines der wenigen in der Schweiz aktiv Massnahmen ergriffen und in der „Problemregion“ Misox eine Messkampagne lanciert.

Die positiven Ergebnisse dieser Kampagne zeigen, dass innerhalb kurzer Zeit eine Verbesserung der Luftqualität möglich wäre. Eine Verringerung des Feinstaubes aus Holzfeuerungen um 60-85% würde sich sehr positiv auf die lokale Luftqualität auswirken.

Insbesondere bei Öfen mit hoher Wärmespeicherkapazität, welche in der Regel einmal täglich angefeuert werden, macht der Einsatz eines Abscheiders Sinn. Auf diesen Öfen wurden nach dem Filter gute Staubresultate sowie hohe Verfügbarkeiten gemessen und man kann davon ausgehen, dass diese Öfen auch in den nächsten Jahren nicht ausgetauscht werden.

Bei Öfen ohne Speichermedium macht die Nachrüstung eines Elektroabscheiders kaum Sinn, da diese Öfen nebst Feinstaub noch andere Emissionen im hohen Mass ausstossen und energetisch nicht sinnvoll sind. Diese Geräte sollten durch gute Öfen mit hoher Speichermasse (wenn möglich mit Ventilator und Abbrandsteuerung) oder Pelletfeuerungen, beides mit Abscheidetechnik, ersetzt werden.

2.1 Verbesserungen

Die Messkampagne hat nebst den positiven Ergebnissen auch einige Verbesserungsmöglichkeiten bezüglich Abscheidewirkung, Funktionskontrolle und Verfügbarkeit aufgezeigt.

2.2 Verfügbarkeit

Es wurde der Beweis erbracht, dass die Abscheider zuverlässig funktionieren. Die Verfügbarkeit betrug zwischen 84% und 100%.

Bei den automatischen (Pellet-)feuerungen kann der Abscheider über ein Kommunikationskabel mit der Feuerung verbunden werden, sodass sich der Filter bei Feuerungsstart und –stopp automatisch ein- bzw. ausschaltet. Mit dieser Massnahme kann die Verfügbarkeit bei automatischen Feuerungen weiter gesteigert werden.

2.3 Sichtbarkeit Funktionskontrolle

Es wurde bemängelt, dass die Betreiber die Störungen nicht feststellen konnten, da die LED zur Funktionskontrolle an der Steuerung auf der Kaminmündung angebracht und somit nicht gut sichtbar ist. Wir bieten deshalb ab sofort eine LED-Anzeige an, welche im Wohnbereich oder an einer anderen gut sichtbaren Stelle montiert werden kann. Mittels eines Kommunikationskabels zwischen OekoTube-Steuerung und der LED-Anzeige wird der Betriebszustand gut sichtbar angezeigt.

2.4 Wartung und Inbetriebnahme

Die Erfahrung von OekoSolve aus den letzten Jahren sowie die Erkenntnisse von Verenum zeigen, dass eine Inbetriebnahme und die regelmässige Wartung durch eine Fachperson notwendig sind. Hierzu muss ein Konzept mit einem Wartungsabonnement erstellt und so die Kontrolle sichergestellt werden. Die Wartung kann durch OekoSolve oder durch geschulte Fachpersonen vor Ort durchgeführt werden.

2.5 Abscheidewirkung Feinstaub

Tabelle: Staubgehalte der Feuerungen mit aktivem und mit ausgeschaltetem Abscheider sowie daraus berechnete Verfügbarkeit und Abscheidemenge

		Speicher- ofen 1001	Cheminée 1003	Zentral- heizungs- herd 1007	Pelletofen 1001 [2]	Speicher- ofen 1001 [2]
Abscheider aktiv	mg/m ³ bei 13 Vol.-% O ₂	21	29	37	4	39
Abscheider AUS	mg/m ³ bei 13 Vol.-% O ₂	147	131	111	26	98
Abscheidegrad	%	86	78	66	83	60
Abscheide- menge	mg/m ³ bei 13 Vol.-% O ₂	126	102	74	22	59

Mit einem Abscheidegrad von 66 – 86% konnten bei allen fünf Anlagen die Feinstaubemissionen auf $\leq 50 \text{ mg/m}^3$ bei 13 Vol.-% O₂ gesenkt werden. Dies ist der Feinstaub-Grenzwert für Kesselanlagen bis zu 500 kW. Dies bedeutet auch für die Anlagen mit Abscheidegraden zwischen 60% und 66% eine Abscheidemenge von 59 bzw. 74 mg/m³ bei 13% Vol.-% O₂, welche ohne Abscheider ausgestossen würden.

Gerade bei handbeschickten Feuerungen können sehr viele Fehlerfaktoren wie z.B. falsches Anfeuern, schlechte Brennstoffqualität, Kaminzug oder defekte Feuerungen die Verbrennungsqualität beeinflussen. Die durch diese Fehler verursachten höheren Feinstaubemissionen werden mit dem Abscheider um wenigstens 60% reduziert.

Die lokale Politik kann beeinflussen, ob mit Abscheider max. 39 mg/m³ oder weiter wie bisher ohne Abscheider bis zu 147 mg/m³ die lokale Luftqualität beeinträchtigen.

3 Fazit

Zusammenfassend sind wir der Meinung, dass die Luftqualität im Misox sehr schnell durch ein Verbot der schlechten Feuerstätten (ohne/wenig Speicher) und dem Einsatz von Feinstaubabscheidern bei den Öfen mit hoher Speichermasse verbessert werden könnte. Mit der Messkampagne konnte gezeigt werden, dass mit dem Feinstaubfilter OekoTube ein technisch zuverlässiges Gerät verfügbar ist und es aus technischer Sicht keine Vorbehalte mehr gibt, mit Feinstaubfiltern die Emissionen aus Holzfeuerungen nachhaltig zu reduzieren. Somit hat die Behörde ein technisches Mittel, welches zur unmittelbaren Verbesserung der Luftqualität im Misox beiträgt.

Italianische Übersetzung (Abs. 2 aus Stellungnahme):

2 Campagna di misurazione nella Mesolcina

L'Ufficio per la natura e l'ambiente dei Grigioni è stato uno dei pochi in Svizzera ad aver preso attivamente dei provvedimenti ed ha avviato nella "regione problematica" della Mesolcina una campagna di misurazioni.

I positivi risultati di questa campagna dimostrano come un miglioramento della qualità dell'aria sarebbe possibile in tempi brevi. Una riduzione delle polveri fini emesse dagli impianti a combustione a legna del 60-85% avrebbe un effetto molto positivo sulla qualità dell'aria della zona.

L'impiego di un separatore è in particolare utile per le stufe provviste di un'alta capacità di accumulo di calore, che vengono di norma accese una volta al giorno. Dopo l'installazione del filtro, per queste stufe sono stati verificati buoni risultati riguardo alle emissioni delle polveri ed un'alta affidabilità, e si può inoltre presumere che tali stufe non verranno sostituite ancora nei prossimi anni.

Per le stufe prive di elemento di accumulo, la dotazione di un filtro elettrostatico non ha granché senso perché esse rilasciano, oltre a polveri fini, anche altre emissioni in notevoli quantità e sotto il profilo energetico non sono efficienti. Questi impianti dovrebbero essere sostituiti con buone stufe ad alta massa di accumulo (se possibile con ventilatore e comando di combustione) oppure da impianti a pellet, entrambi dotati di tecnica di separazione delle polveri.