



verenum

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

PRAXISUNTERSUCHUNG ZUR VERMEIDUNG VON PARTIKELAUSWURF BEI HOLZFEUERUNGEN BIS 500 KW MIT ELEKTROABSCHIEDER

Schlussbericht

Adrian Lauber, Verenum, Zürich

Jürgen Good, Verenum, Zürich

Thomas Nussbaumer, Verenum, Zürich

Verenum, Zürich, 13. August 2018

Praxisuntersuchung zur Vermeidung von Partikelaustritt bei Holzfeuerungen bis 500 kW mit Elektroabscheider

Auftraggeber

Bundesamt für Energie
Kanton Aargau
Kanton Basel Land
Kanton Basel Stadt
Kanton Bern
Kanton Graubünden
Kanton St. Gallen

Autoren

Adrian Lauber, Verenum, Zürich
Dr. Jürgen Good, Verenum, Zürich
Dr. Thomas Nussbaumer, Verenum, Zürich

Projekt-Begleitung

Andres Jenni, Ardens GmbH, Liestal
Oekosolve GmbH, Plons
Rieben Heizanlagen AG, Oey

**Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.
Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.**

Adresse

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Postadresse: CH-3003 Bern
Infoline 0848 444 444, www.infoline.energieschweiz.ch
energieschweiz@bfe.admin.ch, www.energieschweiz.ch, twitter.com/energieschweiz

Inhalt

Zusammenfassung	5
1 Ausgangslage	6
2 Zielsetzung	6
3 Grundlagen	7
3.1 Arten von Grobstaub	7
3.2 Messung des Unterdrucks	8
4 Anlagenauswahl und Messstellenanordnung	9
5 Versuchsprogramm	10
6 Resultate	11
6.1 Anlage 1	11
6.2 Anlage 2	14
6.3 Druckabfall über dem Elektroabscheider	17
7 Massnahmen zur Reduktion von Grobstaubauswurf	18
8 Schlussfolgerungen	19
A Anhang	21
A.1 Datenmenge pro Betriebspunkt	21
A.2 Messtechnik	21
A.3 Zeitverlauf Anlage 1	22
A.4 Zeitverlauf Anlage 2	25

Zusammenfassung

Seit einiger Zeit wird bei Holzfeuerungen im Leistungsbereich bis 500 kW beobachtet, dass trotz Elektroabscheider sichtbare und meist schwarze Partikel aus der Kaminmündung ausgeworfen werden und sich in der Umgebung auf Dachterrassen, Balkonen, Fenstersimsen und parkierten Autos ablagern. Betroffen sind Feuerungen und Elektroabscheider verschiedener Hersteller. Für die Anwohner und Bauherren ist dies ein grosses Ärgernis.

Um die Ursachen für den Auswurf des Grobstaubs zu untersuchen, stellten ein Feuerungslieferant und ein Lieferant von Elektroabscheidern Anlagen zur Verfügung und unterstützten die Suche nach Lösungen. Es wurden zwei Praxisanlagen mit Baujahr 2015 bzw. 2016 ausgewählt, bei denen bekannt war, dass der Auswurf von Grobstaub nicht ausgeprägt ist, sondern dass die Grobstaubproblematik nur gelegentlich auftritt. Bei den Feuerungen handelt es sich um Seriengeräte mit 150 kW Nennleistung. Der untersuchte Feuerungstyp funktioniert mit Lambda-Regelung sowie ohne Primärluft-Ventilator und ohne integrierte Unterdruckregelung in der Brennkammer.

Als Basis für die Untersuchung wird vorausgesetzt und beschrieben, dass bei Grobstaub aus Holzfeuerungen zwischen aus der Brennkammer mitgerissenen Partikeln (z.B. Glutpartikel) und im Elektroabscheider agglomeriertem Russ unterschieden werden muss. Daraus wird abgeleitet, dass zur Vermeidung von Grobstaubauswurf bei den Bedingungen in der Brennkammer (Rostbedeckung, Verbrennungsqualität, etc.) und bei der Unterdruckregelung anzusetzen ist. Es wird auch erläutert, wieso zuverlässige Grobstaubabscheider (Sekundärmassnahmen) heute nicht verfügbar sind.

Basierend auf bereits bekannten Beobachtungen und den Resultaten der vorliegenden Untersuchung werden Massnahmen empfohlen, um den Auswurf von Grobstaub bei den untersuchten Anlagenkonzepten zu reduzieren. Diese Empfehlungen sollten bereits bei der Planung von Anlagen berücksichtigt werden. Sie können aber auch bei einer Betriebsoptimierung nützliche Hinweise liefern.

1 Ausgangslage

Seit einiger Zeit wird verschiedentlich bei automatischen Holzfeuerungen im Leistungsbereich bis 500 kW beobachtet, dass trotz Elektroabscheider sichtbare und meist schwarze Partikel aus der Kaminmündung ausgeworfen werden und sich in der Umgebung auf Dachterrassen, Balkonen, Fenstersimsen und Autos ablagern. Betroffen sind Feuerungen und Elektroabscheider verschiedener Hersteller. Für Anwohner und Bauherren ist dies ein grosses Ärgernis.

Bei einigen betroffenen Anlagen wird vermutet, dass dieser Grobstaubauswurf durch folgende Ursachen ausgelöst wird:

- 1) Zu hoher Unterdruck im Kamin bzw. zu hoher Kaminzug.
- 2) Zu geringer oder zu hoher Unterdruck in der Brennkammer.
- 3) Lange Betriebsphasen bei Teilleistung.
- 4) Unterdruckschwankungen im Heizraum.

Betroffene Feuerungen funktionieren meist mit Lambda-Regelung, sowie ohne Primärluft-Ventilator und ohne integrierte Unterdruckregelung in der Brennkammer. Bei Holzfeuerungen, bei denen dieser Effekt auftritt, versuchen die Feuerungslieferanten bisher die Situation mit verschiedenen Massnahmen zu entschärfen. Es werden unter anderem Kaminzugsregelungen, Zugregelklappen und Multizyklone nachgerüstet oder auch Änderungen am Kamin und der Brennkammer vorgenommen. Da die genauen Ursachen des Grobstaubauswurfs jedoch nicht bekannt sind, können Nachrüstungen das Problem oft nicht vollständig beseitigen.

2 Zielsetzung

Die Ursachen für den Grobstaubauswurf sollen mit Praxisuntersuchungen an zwei betroffenen Anlagen im Rahmen des BFE-Projekts QS-Support Holzfeuerungen aufgezeigt werden. Diese Untersuchung wurde zusätzlich von den Kantonen Aargau, Basel Land, Basel Stadt, Bern, Graubünden und St. Gallen unterstützt. Die Untersuchung soll klären, welche Einflussfaktoren zum Auswurf von Grobstaub führen und mit welchen Massnahmen dies verhindert werden kann.

3 Grundlagen

3.1 Arten von Grobstaub

Bei sichtbarem Partikelaustritt aus automatischen Holzfeuerungen handelt es sich um Grobstaub mit einer Grösse von ca. 10 µm bis mehrere Millimeter (Bild 1). Es müssen zwei mögliche Ursachen unterschieden werden:

- 1) Als primäre Quelle können grosse Partikel aus der Brennkammer aufgewirbelt und vom Abgasstrom mitgerissen werden. Dabei handelt es sich unter anderem um Glutpartikel (poröse Koks-Partikel) mit einer sehr geringen Dichte, welche noch nicht vollständig vergast wurden. Um den Austritt dieser Partikel zu verhindern, wird bei grösseren Anlagen oft ein Multizyklon nach der Feuerung eingesetzt.
- 2) Als sekundäre Quelle kann Russ (pulverförmiger Feinstaub), der im Brennraum gebildet wurde und in der Brennkammer nicht vollständig verbrannt wurde, in den Elektroabscheider gelangen. Dort wird der Russ aufgrund seiner hohen elektrischen Leitfähigkeit zwar vorerst abgeschieden, er kann aber an den Abscheiderflächen zu grossen Flocken agglomerieren. Wegen der hohen elektrischen Leitfähigkeit verlieren die agglomerierten Flocken ihre elektrische Ladung und damit die Bindungskräfte zur Abscheiderfläche, weshalb es nach kurzer Zeit zum Wiedereintritt von Russflocken in den Abgasstrom kommt. Aufgrund der geringen Dichte werden die Flocken mit dem Abgasstrom mitgerissen und aus dem Kamin ausgeworfen.



Bild 1 Zwei Beispiele für Ablagerungen in der Umgebung von Holzfeuerungen. Links ein Fensterbrett mit Grobstaub, der direkt aus der Brennkammer der untersuchten Anlage 2 ausgetragen wurde. Rechts auf dem Dach in der Nähe des Kamins der Waldhackschnitzelfeuerung des Versuchslabors an der HSLU, Grobstaub der bei schlechtem Betrieb der Anlage als agglomerierter Russ aus dem Elektroabscheider ausgetragen wurde.

3.2 Messung des Unterdrucks

Der Unterdruck in der Brennkammer hat einen grossen Einfluss auf den Verbrennungsprozess. Insbesondere bei Feuerungen ohne Regelung der Primärluftzufuhr stellen sich die Luftverhältnisse einzig aufgrund des Unterdrucks ein. Daher ist ein korrekter Unterdruck und bei einer Regelung dessen Messung entscheidend für den Anlagebetrieb.

Mit der Unterdruckmessung wird die Druckdifferenz des statischen Drucks im Abgaskanal gegenüber Umgebung gemessen. Dazu muss das Gas an der Messstelle möglichst still stehen. Deshalb ist die Unterdruckmessung am einfachsten an der Rohrwand des Abgaskanals möglich. Die Messung innerhalb des Abgasstroms ist dagegen anspruchsvoller, da die entsprechende Druckmesssonde genau parallel zur Strömung liegen muss.

Die Prüfstelle für Holzfeuerungen der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) empfiehlt die Messstelle für Unterdruckmessungen folgendermassen auszuführen (Bild 2):

- Die Bohrung in den Abgaskanal soll möglichst klein sein ($< 3 \text{ mm}$).
- Die Bohrung soll sauber entgratet sein.
- Der Druckanschluss soll am besten aufgeklebt und nicht angeschweisst werden. Schweissen verzieht die Wand und stört damit die Abgasströmung in Wandnähe.

Eine korrekte Unterdruckmessung ist nicht möglich, falls:

- Die Messstelle in der Nähe einer Umlenkung liegt, da dort Wirbel im Abgasstrom auftreten.
- Nahe bei Ventilatoren und anderen Einbauten im Abgaskanal.
- Mit geraden Gasentnahmesonden von tragbaren Emissionsmessgeräten, insbesondere in der Kanalmitte.

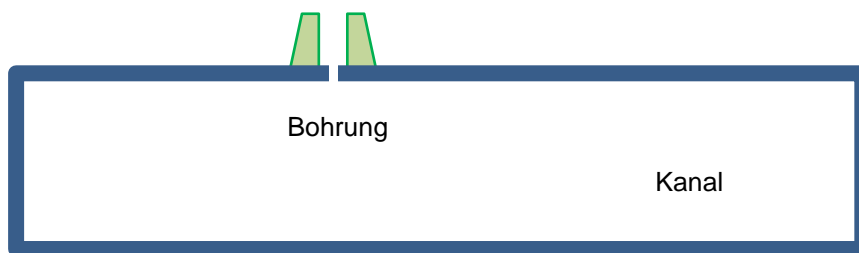


Bild 2 Schematische Darstellung einer Messstelle für die Unterdruckmessung in einem Abgaskanal (Quelle: Prüfstelle für Holzfeuerungen, FHNW).

4 Anlagenauswahl und Messstellenanordnung

Um den Einfluss des Unterdrucks im Kamin bzw. in der Brennkammer auf den Auswurf von Grobstaub zu untersuchen, stellten ein Feuerungslieferant und ein Lieferant von Elektroabscheidern Anlagen zur Verfügung und unterstützten die Suche nach Lösungen. Es wurden zwei Praxisanlagen mit Baujahr 2015 bzw. 2016 ausgewählt, bei denen bekannt war, dass der Grobstaubauswurf nicht ausgeprägt ist, sondern dass die Grobstaubproblematik nur gelegentlich auftritt.

Die zwei untersuchten Anlagen sind mit identischen Feuerungen und identischen Röhren-Elektroabscheidern ausgerüstet (Bild 3). Bei den Feuerungen handelt es sich um Seriengeräte mit 150 kW Nennleistung. Der untersuchte Feuerungstyp funktioniert mit Lambda-Regelung, sowie ohne Primärluft-Ventilator und ohne integrierte Unterdruckregelung in der Brennkammer. In der Annahme, damit einen guten Feuerungsbetrieb sicherzustellen und insbesondere auch Grobstaubauswurf zu verhindern, wurden beide Anlagen im Ein-/Aus-Betrieb mit Nennleistung und automatischer Zündung betrieben. Anlage 1 wird mit Restholz (Späne gemischt mit Briketts aus Schleifstaub) und Anlage 2 wird mit Holzpellets betrieben. Beide Anlagen sind mit einer nachgeschalteten Unterdruckregelung ausgerüstet. Dabei unterscheiden sich jedoch sowohl die Position der Messstelle zur Regelung des Unterdrucks als auch die Position der zugehörigen Ventilatoren. Bei der Anlage 1 bilden die Unterdruckregelung des Elektroabscheider-Lieferanten und der Multizyklon eine Einheit. Bei der Anlage 2 ist kein Multizyklon installiert und der Ventilator zur Unterdruckregelung ist an der Kaminmündung montiert und stammt von einer Drittfirma.

Für die Messungen wurden drei respektive vier Messstellen gewählt (Bild 3), an welchen der Unterdruck (p) gemessen wurde. Zusätzlich wurden an zwei Stellen Grobstaub und die Abgastemperatur (T) gemessen sowie an einer Stelle O_2 -Gehalt und CO -Konzentration. Aus den Steuerungen von Feuerung und Elektroabscheider wurden Betriebsdaten aufgezeichnet (Messstelle 5 und 6).

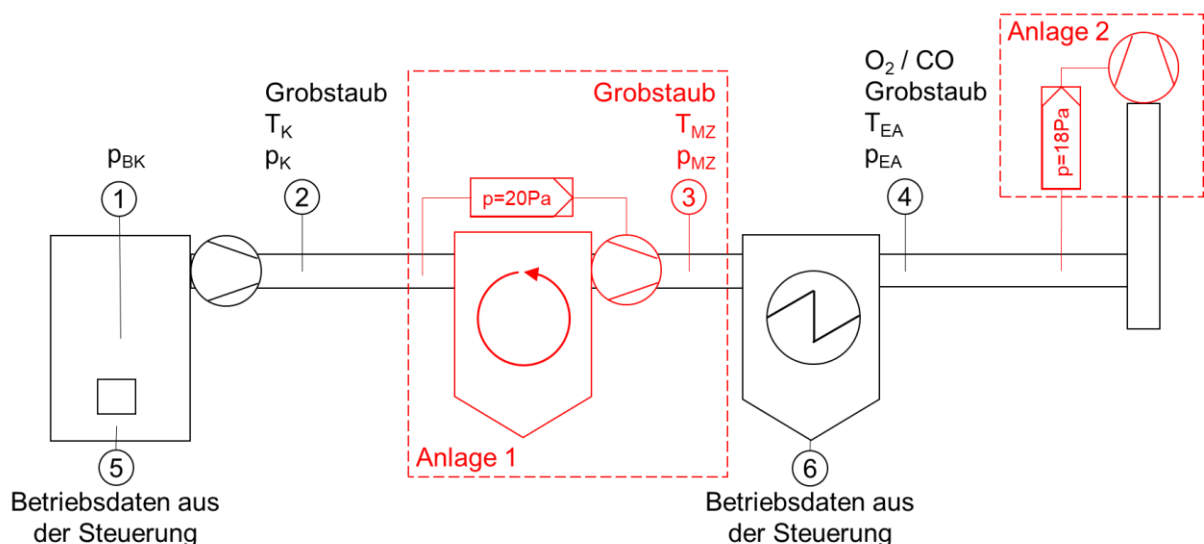


Bild 3 Anordnung der Messstellen 1 bis 6 bei den beiden Praxisanlagen bestehend von links nach rechts aus Feuerung mit integriertem Abgasventilator, Multizyklon, Elektroabscheider und Kaminanlage. Rot eingezeichnet sind die Komponenten, die bei Anlage 1 und 2 unterschiedlich ausgeführt sind: Anlage 1 verfügt über einen Multizyklon sowie einen zweiten Abgasventilator zur Unterdruckregelung vor dem Elektroabscheider, während Anlage 2 keinen Multizyklon aufweist und der zweite Abgasventilator zur Unterdruckregelung nach dem Elektroabscheider angeordnet ist

Die vier Drücke konnten nicht an idealen Messstellen gemessen werden (siehe Kapitel 3.2). Die Resultate können deshalb systematische Fehler enthalten. Die Qualität der Resultate ist jedoch ausreichend um den Einfluss des Unterdrucks in den verschiedenen Betriebspunkten untereinander zu vergleichen.

Der Grobstaub wurde semi-kontinuierlich mit einem an der Hochschule Luzern (HSLU) entwickelten Messgerät gemessen. Dieses neue Messgerät kann Grobstaub von ca. 50 µm bis 5 mm erfassen und qualitativ klassieren. Dieses Gerät stand in der Erprobungsphase, weshalb die Daten zeitweise nicht vollständig vorhanden sind. Auch hier ist nicht auszuschliessen, dass die Messresultate systematische Fehler aufweisen.

5 Versuchsprogramm

Bei der Anlage 1 wurde der Einfluss von Nennleistung (NL) und minimaler Teilleistung (TL) untersucht. Die Teilleistung wurde jeweils manuell eingestellt und solange beibehalten, wie es die Wärmeabnahme des Gebäudes erlaubte. Separat ausgewertet wurden das Anfahren (Anf) und Abfahren (Abf) des Kessels, die Lastwechsel der Feuerung (trans) und die Reinigung sowohl des Kessels (K-R) als auch des Elektroabscheiders (EA-R).

Bei der Anlage 2 wurde zusätzlich sowohl bei Nennleistung als auch bei minimaler Teilleistung die im Kamin installierte Unterdruckregelung manuell verändert. Um einen möglichst hohen Unterdruck (h) zu erreichen, wurde der Sollwert der Unterdruckregelung auf den maximal möglichen Wert angehoben. Um einen möglichst tiefen Unterdruck (t) zu erzielen, wurde der Sollwert der Unterdruckregelung auf den minimal möglichen Wert abgesenkt und zusätzlich eine Serviceklappe im Kamin geöffnet. Zudem wurden auch am Elektroabscheider manuelle Einstellungen vorgenommen. Es wurde zum einen nur die Hochspannung manuell ausgeschaltet (HV-a) sodass das Abgas weiterhin durch den Elektroabscheider strömte. Zum anderen wurde der gesamte Elektroabscheider manuell ausgeschaltet (EA-a), sodass das Abgas den Elektroabscheider via Bypass umströmte.

Tabelle 1 Zusammenstellung der untersuchten Betriebspunkte bei den Anlagen 1 und 2.

Bez.	Feuerung	Unterdruck	Elektroabscheider	Anwendung bei Anlage
NL	100 %	standard	Ein	1 & 2
NL-h	100 %	erhöht	Ein	2
NL-t	100 %	reduziert	Ein	2
TL	30 %	standard	Ein	1 & 2
TL-h	30 %	erhöht	Ein	1 & 2
TL-t	30 %	reduziert	Ein	2
Anf	Anfahren	standard	Ein	1 & 2
Abf	Abfahren	standard	Ein	1 & 2
trans	Lastwechsel (transient)	standard	Ein	1 & 2
K-R	Reinigungsmodus	standard	Ein & Aus	1 & 2
EA-R	beliebig	standard	Reinigungsmodus	1 & 2
HV-a	30 %	standard	Hochspannung Aus	2
EA-a	30 %	standard	Bypass-Betrieb	2

6 Resultate

6.1 Anlage 1

Unterdruckmessung (Bild 4):

- Der Unterdruck an den vier Messstellen war in jedem Betriebspunkt vergleichsweise konstant.
- Bei Teilleistung müssen jedoch zwei Betriebspunkte unterschieden werden (TL & TL-h). Wenn die Feuerung direkt nach dem Anfahren oder nach einer Kesselreinigung auf Teilleistung geht, nimmt der Unterdruck in der Brennkammer im Vergleich zur Nennleistung deutlich ab (TL). Wenn die Feuerung nach einer längeren Phase bei Nennleistung auf Teilleistung geht, bleibt der Unterdruck in der Brennkammer im Vergleich zu Nennleistung konstant (TL-h). Gemäss Kessellieferant liegt die Ursache für den unterschiedlichen Unterdruck in der Brennkammer bei der unterschiedlichen Rostbedeckung. Im ersten Fall ist die Rostbedeckung geringer und es besteht ein Ringspalt um den Rost, wodurch sich ein geringerer Unterdruck einstellt.
- Im Heizraum wurden Unterdrücke zwischen 1.2 Pa und 3.6 Pa gemessen. Diese Schwankungen wurden durch das Ein- und Ausschalten von den Luftabsaugungen für den Schleifstaub und einer Spritzkammer in den angrenzenden Werkstatträumen verursacht. Das Öffnen und Schliessen von Klappfenstern hatte keinen weiteren Einfluss auf den Unterdruck im Heizraum. Auf den Unterdruck in der Brennkammer hatten diese Druckschwankungen keinen Einfluss.

Grobstaubmessung (Bild 5):

- Nach dem Multizyklon konnten erhebliche Mengen Grobstaub ($> 50 \mu\text{m}$) gemessen werden. Der Multizyklon kann somit relevante Mengen des Grobstaubs nicht abscheiden. Der Betreiber berichtet auch, dass im Aschebehälter des Multizyklons kaum Asche anfällt, was die Resultate bestätigt.
- Bei Teilleistung wurde im Vergleich zu Nennleistung generell mehr Grobstaub aus der Brennkammer gemessen. Nach dem Multizyklon (Total_{MZ}) wurde bei Teilleistung und hohem Unterdruck (TL-h) 90 % und bei regulärem Unterdruck (TL) 65 % mehr Grobstaub gemessen als bei Nennleistung.
- Die normierte CO-Konzentration ist kein Indikator für Grobstaub. Bei Teilleistung (TL) betrug die CO-Konzentration 1035 mg/m^3 , bei Teilleistung mit hohem Unterdruck (TL-h) 629 mg/m^3 gegenüber 54 mg/m^3 bei Nennleistung (NL) (alle Werte bezogen auf 13 Vol.-% O₂).
- Hohe O₂-Konzentrationen sind eine mögliche Ursache für erhöhte Grobstaubemissionen. Bei Teilleistung stieg der O₂-Gehalt auf ca. 18 Vol.-% gegenüber 13 Vol.-% bei Nennleistung.
- Auch der Elektroabscheider konnte den Grobstaub in der Regel nicht abscheiden. Dessen elektrische Leistung war während der Versuche aufgrund regeltechnischer Einstellungen jedoch reduziert.
- Nur bei Teilleistung mit hohem Unterdruck in der Brennkammer (TL-h) konnte der Elektroabscheider die Anzahl Grobstaub-Partikel reduzieren. Gleichzeitig nahm der Durchmesser des Grobstaubs nach dem Elektroabscheider um rund 20 % zu (d_{75}). Auch die Anzahl Partikel grösser 0.6 mm nahm deutlich zu. Beides sind Indizien für eine Agglomeration von Russpartikeln im Elektroabscheider. Der Austrag von Flocken konnte jedoch erst nach mehreren Stunden in diesem Betriebszustand beobachtet werden. Der Austrag von Flocken wurden dann auch nach einer Leistungssteigerung

auf Nennleistung und einer automatischen Kesselreinigung nicht gestoppt (Zeitverlauf der Anzahl Partikel grösser 0.6 mm im Anhang A.3 vom 14.2.18).

- Auch während des Anfahrens war die Anzahl Partikel grösser 0.6 mm grösser als bei Nennleistung. Die Hauptursache dafür ist die Kesselreinigung während des Anfahrvorgangs. Gleichzeitig ist während des Anfahrens der Unterdruck in der Brennkammer gleich hoch wie bei Nennleistung. Wie dies den Anfahrvorgang beeinflusst ist unklar.
- Während der Kesselreinigung konnte sowohl nach dem Multizyklon als auch nach dem Elektroabscheider eine erhöhte Anzahl Partikel grösser 0.6 mm gemessen werden. Dies zeigt wiederum, dass weder der Multizyklon noch der Elektroabscheider allen Grobstaub abscheiden konnten.
- Bei den Reinigungen des Elektroabscheiders wurde sowohl nach dem Multizyklon als auch nach dem Elektroabscheider mehr Grobstaub grösser 0.6 mm gemessen. Nach dem Elektroabscheider war dies zu erwarten. Nach dem Multizyklon wurde möglicherweise an verschiedenen Stellen abgelagerter Grobstaub durch Druckschwankungen mitgerissen, die während der Reinigung des Elektroabscheiders durch das Umschalten auf Bypass-Betrieb auftreten.

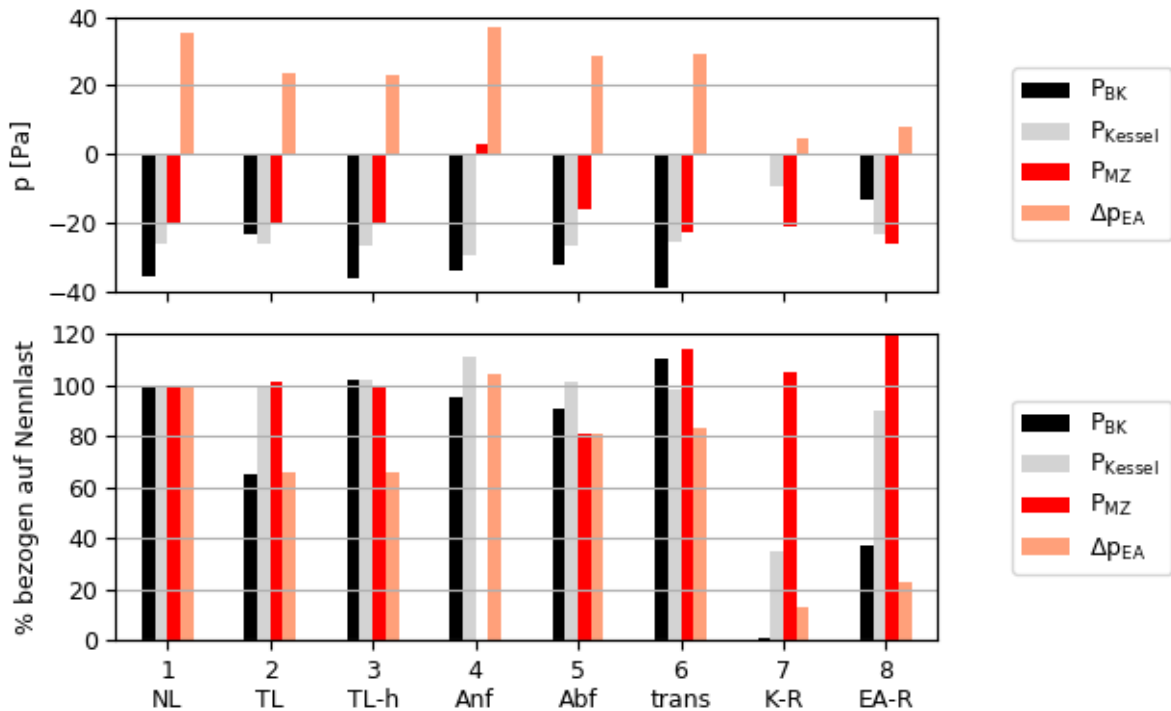


Bild 4 Absolute (oben) und relative (unten) Drücke bei Anlage 1 in Abhängigkeit des Betriebspunkts. Dargestellt sind die Unterdrücke (p) an drei Stellen (in Brennkammern p_{BK} , nach Kessel p_{Kessel} und nach Multizyklon (p_{MZ}) und der Differenzdruck über dem Elektroabscheider (Δp_{EA}).

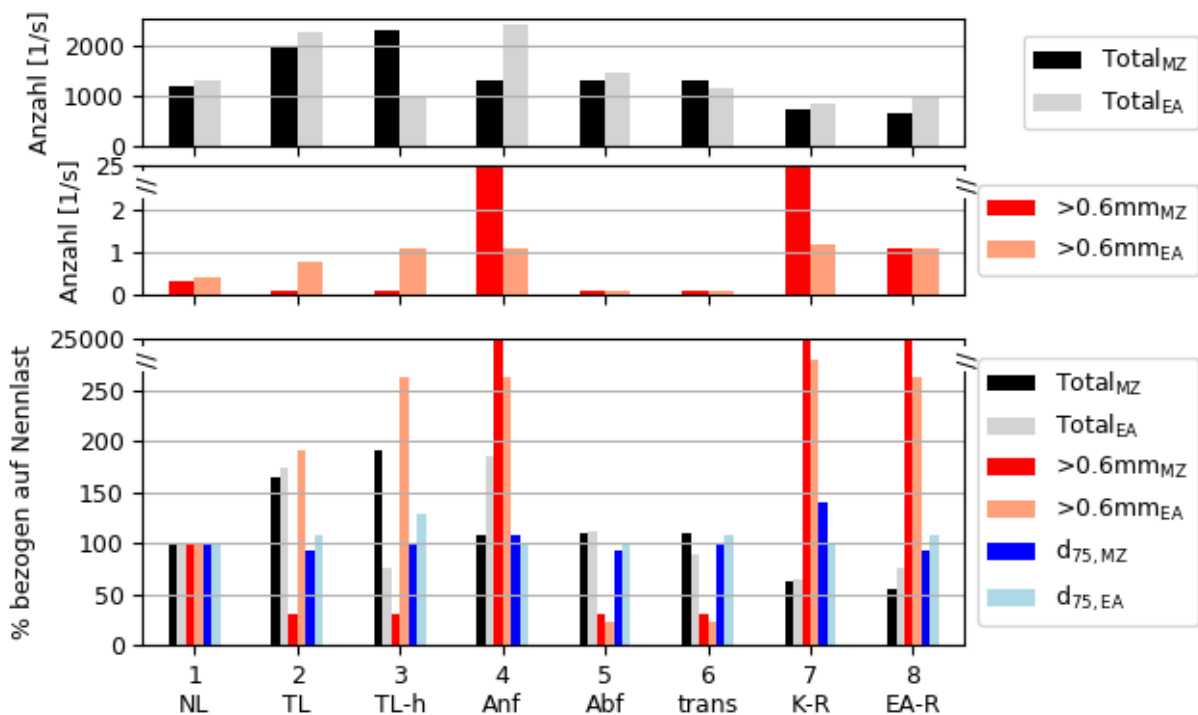


Bild 5 Absolute (oben und Mitte) und relative (unten) Anzahl und Grösse der Grobstaub-Partikel bei Anlage 1 in Abhängigkeit des Betriebspunkts. Dargestellt sind die Anzahl Partikel über den gesamten Messbereich von $50\ \mu\text{m}$ bis $5\ \text{mm}$ (Total) und die Anzahl Partikel grösser $0.6\ \text{mm}$ ($>0.6\text{mm}$) sowie der Durchmesser des obersten Quartils (d_{75}) aller Partikel. Messungen nach dem Multizyklon sind mit dem Index MZ und nach dem Elektroabscheider mit EA gekennzeichnet.

6.2 Anlage 2

Unterdruckmessung (Bild 6):

- Die bestehende Messung des Unterdrucks der Unterdruckregelung auf dieser Anlage lieferte falsche Resultate. Die Unterdruckregelung regelt auf einen Sollwert von 18 Pa im Kamin und erreichte diesen Wert auch. Tatsächlich betrug der Unterdruck im Kamin jedoch 40 Pa bis 45 Pa. Der in der Brennkammer gemessene Unterdruck war trotzdem tiefer als bei Anlage 1.
- Durch lange Betriebsphasen bei Teilleistung stellte sich kein erhöhter Unterdruck in der Brennkammer ein, wie das bei der Anlage 1 beobachtet wurde. Die auf der Anlage 1 beobachtete Flockenbildung bei langer Teilleistung konnte somit auf dieser Anlage nicht reproduziert werden.
- Um das Niveau der Unterdrücke zu variieren wurde die Unterdruckregelung manuell umgestellt und für einen minimalen Unterdruck zusätzlich eine Serviceklappe im Kamin geöffnet.

Grobstaubmessung (Bild 7):

- Gegenüber der Anlage 1 wurde nach dem Kessel von Anlage 2 sowohl für das Total als auch für Partikel grösser 0.6 mm rund 2.5-mal mehr Grobstaub-Partikel aus der Brennkammer gemessen.
- Sowohl bei Nenn- als auch bei Teilleistung wurde ein O_2 -Gehalt von über 16 Vol.-% gemessen, was deutlich höher ist als bei Anlage 1. Auch die Anzahl der Grobstaub-Partikel war in beiden Leistungsbereichen hoch.
- Der Elektroabscheider konnte den gemessenen Grobstaub aus der Brennkammer um bis zu 90 % reduzieren.
- Nur während des Anfahrens trat Grobstaub grösser 0.6 mm nach dem Elektroabscheider auf.

Grobstaubmessung bei manuellen Einstellungen (Bild 9):

- Eine Verdoppelung (NL-h) bzw. Halbierung (NL-t) des Unterdrucks im Kamin erhöhte bzw. reduzierte den Unterdruck in der Brennkammer nur um rund 20 %, die Anzahl der Grobstaub-Partikel aus der Brennkammer änderte jedoch in derselben Grössenordnung in Bezug auf den Standardfall bei Nennleistung (NL). Bei Teilleistung konnte das nicht so eindeutig wie bei Nennleistung beobachtet werden. Ein Grund dafür sind auch zu kurze Messperioden. Denn durch das Umstellen entstanden Druckschwankungen welche zu Emissionsspitzen führten, welche die Resultate dominieren.
- Bei Nennleistung und hohem Unterdruck (NL-h) konnte der Elektroabscheider den Grobstaub aus der Brennkammer weniger gut abscheiden. Sowohl die Gesamtanzahl als auch Grobstaub grösser 0.6 mm waren erhöht.
- Nach dem Elektroabscheider war kein Unterschied zwischen ausgeschaltetem Elektroabscheider (TL EA-a / Bypass-Betrieb) und manuell ausgeschalteter Hochspannung (TL HV-a) messbar. Der Elektroabscheider wirkt daher nicht als Absetzkammer für den Grobstaub aus der Brennkammer dieser Anlage.
- Bei der manuell ausgelösten Abreinigung des Elektroabscheiders mit geschlossenem Bypass konnten erwartungsgemäss grosse Partikel gemessen werden (Beispiel im Anhang).
- Bei der automatischen Abreinigung des Elektroabscheiders waren kaum erhöhte Grobstaubemissionen messbar (Beispiel Anhang).

- Aus den beobachteten Emissionsspitzen bei ansteigendem Unterdruck und Leistungssteigerungen wird geschlossen, dass es an verschiedenen Stellen zu Depotbildung von Grobstaub kam, welcher zeitverzögert ausgetragen wurde.

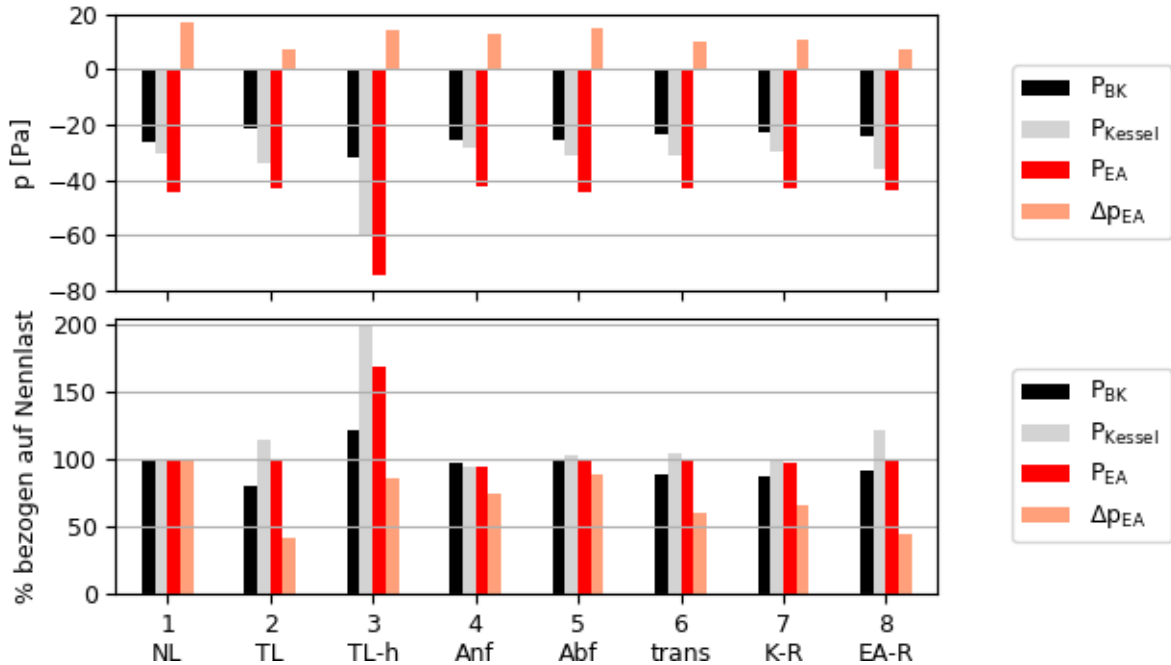


Bild 6 Absolute (oben) und relative (unten) Drücke bei Anlage 2 in Abhängigkeit des Betriebspunkts. Dargestellt sind die Unterdrücke (p) an drei Stellen (in Brennkammern p_{BK} , nach Kessel p_{Kessel} und nach Multizyklon (p_{MZ}) und der Differenzdruck über dem Elektroabscheider (Δp_{EA}).

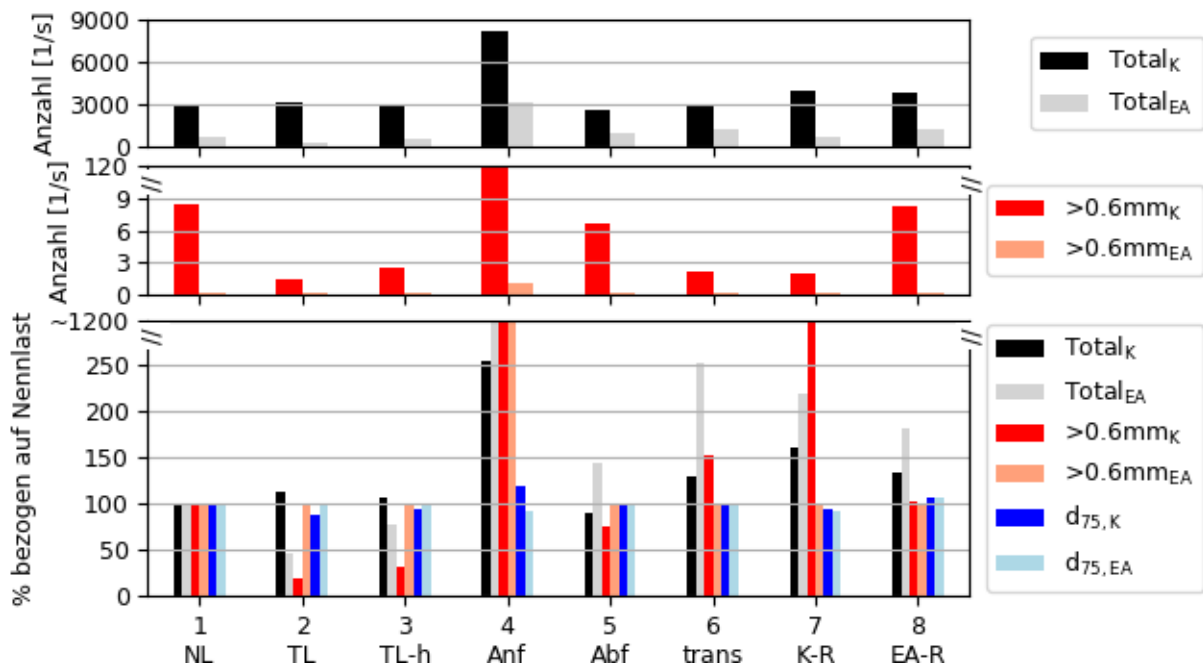


Bild 7 Absolute (oben und Mitte) und relative (unten) Anzahl und Grösse der Grobstaub-Partikel bei Anlage 2 in Abhängigkeit des Betriebspunkts. Dargestellt sind die Anzahl Partikel über den gesamten Messbereich von 50 μm bis 5 mm (Total) und die Anzahl Partikel grösser 0.6 mm ($>0.6mm$) sowie der Durchmesser des obersten Quartils (d_{75}) aller Partikel. Messungen nach dem Kessel sind mit dem Index K und nach dem Elektroabscheider mit EA gekennzeichnet.

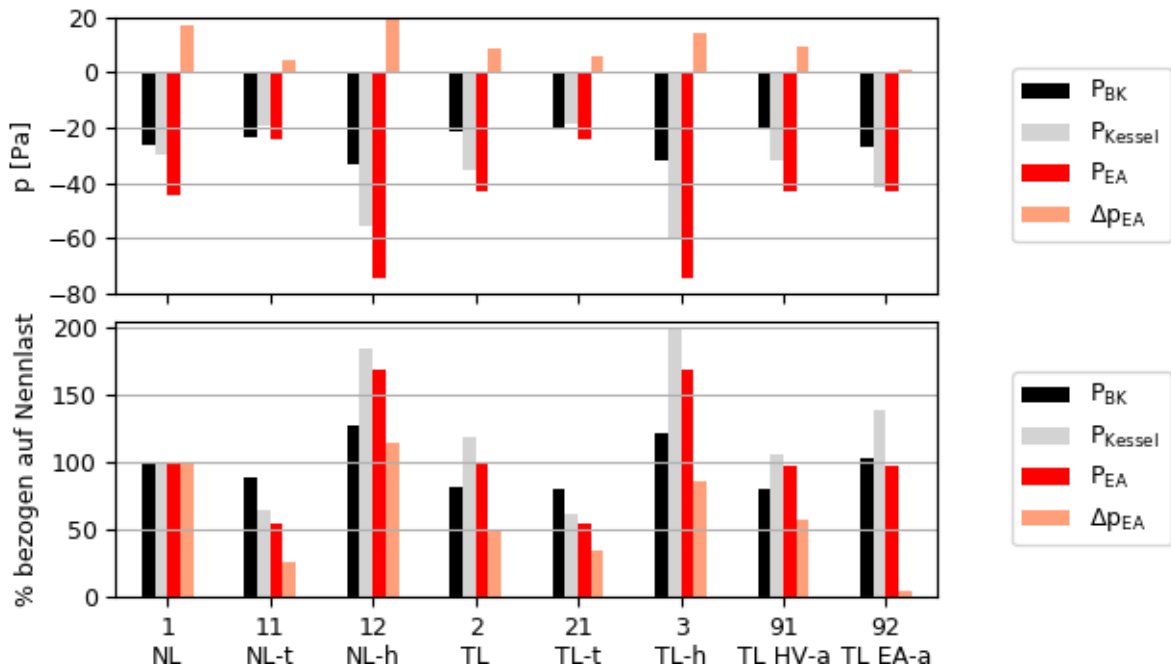


Bild 8 Absolute (oben) und relative (unten) Drücke bei der Anlage 2 abhängig vom Betriebszustand. Resultate von manuell eingestellten Betriebszuständen.

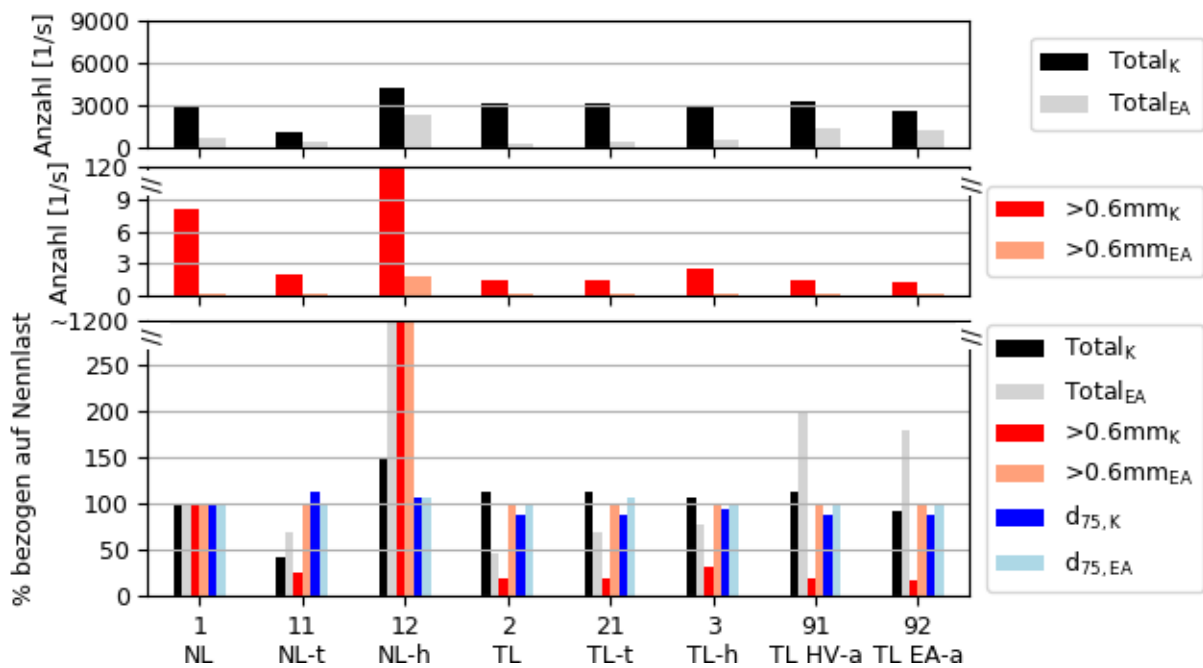


Bild 9 Absolute (oben) und relative (unten) Anzahl und Grösse der Grobstaub-Partikel bei der Anlage 2 abhängig vom Betriebszustand. Resultate von manuell eingestellten Betriebszuständen.

6.3 Druckabfall über dem Elektroabscheider

Der Elektroabscheider verursacht einen zusätzlichen Druckabfall in der Abgasleitung. Neben dem Strömungswiderstand des Geräts entsteht ein zusätzlicher Druckabfall durch die Temperaturdifferenz zwischen Abgas und Elektroabscheider (Bild 10). Grund dafür ist das Auskühlen des Abgases im Elektroabscheider. Dies reduziert die Geschwindigkeit und erhöht die Dichte des Abgases, was zu einem zusätzlichen Druckabfall führt. Insbesondere während des Anfahrens der Feuerung kann bei kaltem Elektroabscheider deshalb ein zusätzlicher Druckabfall auftreten und den Anfahrvorgang beeinflussen. Es ist deshalb wichtig, mit einer ausreichenden Wärmedämmung das Auskühlen des Elektroabscheiders und der Abgasleitungen soweit wie möglich zu reduzieren. Kann das Auskühlen des Elektroabscheiders während Stillstandsphasen nicht verhindert werden, muss gegebenenfalls der Unterdruck vor dem Elektroabscheider mit einer Unterdruckregelung geregelt werden.

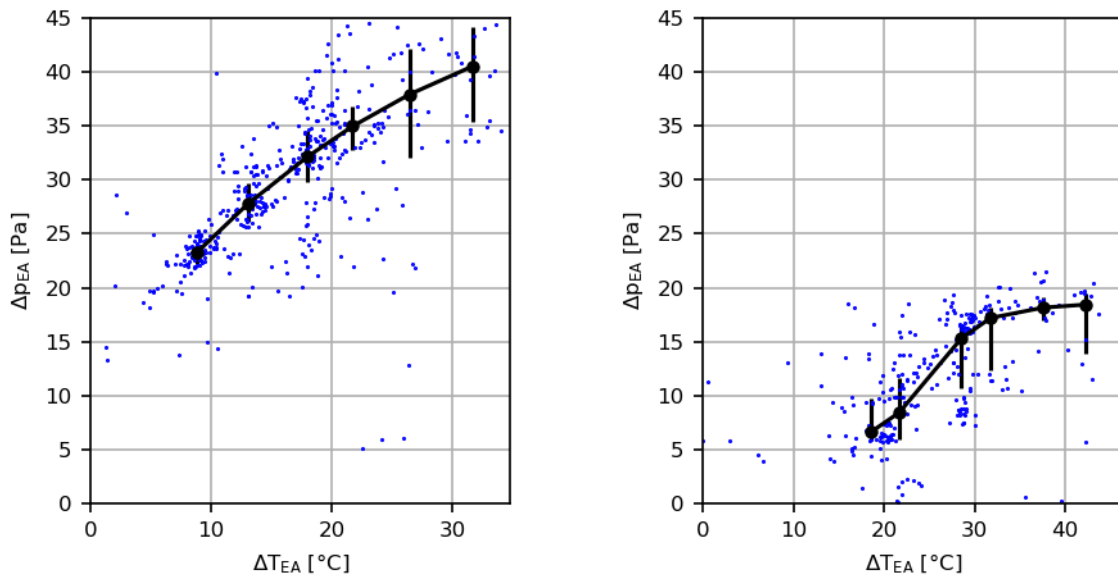


Bild 10 Druckabfall über dem Elektroabscheider (Δp_{EA}) in Funktion der Differenz der Abgastemperatur vor und im Elektroabscheider (ΔT_{EA}). Die schwarzen Balken zeigen die Quartille, die Messwerte sind als blaue Punkte dargestellt. Links Anlage 1, rechts Anlage 2.

7 Massnahmen zur Reduktion von Grobstaubauswurf

Basierend auf bereits bekannten Beobachtungen und den Resultaten der vorliegenden Untersuchung werden folgende Massnahmen empfohlen, um den Auswurf von Grobstaub bei den untersuchten Anlagenkonzepten zu reduzieren:

- 1) Einregulierung der Feuerung auf einen tiefen Luftüberschuss und ein optimales Verhältnis von Primär- zu Sekundärluft, um
 - eine homogene Rostbedeckung zu erzielen, die das Austragen von Glutpartikeln aus der Brennkammer reduziert.
 - die Bildung von Russ in der Brennkammer zu verhindern.
- 2) Ausreichend dimensionierte Zugregelklappe, um
 - zu hohem Unterdruck im Kessel aufgrund von Witterungseinflüssen zu verhindern, sofern kein dämpfender Multizyklon vorhanden ist.
- 3) Korrekt funktionierende Unterdruckregelung in der Feuerung oder in der Abgasanlage, um
 - das Verhältnis von Primär- zu Sekundärluft in der Brennkammer konstant zu halten. Idealerweise wird der Unterdruck direkt nach dem Kessel geregelt.
 - den Auswurf von Ablagerungen in den Geräten und der Abgasanlage zu vermindern.
- 4) Unterdruck abhängig von der Feuerungsleistung regeln, um
 - das Verhältnis von Primär- zu Sekundärluft in der Brennkammer konstant zu halten.
- 5) Regelung der Primärluftzufuhr, um
 - das Verhältnis von Primär- zu Sekundärluft in der Brennkammer einzustellen.
- 6) Ein nach QM Holzheizwerke dimensionierter Wärmespeicher mit Speicherladeregelung zur Leistungsvorgabe, um
 - wenige Anfahrvorgänge und lange Laufzeiten der Feuerung zu ermöglichen.
- 7) Ausreichende Wärmedämmung von Abgasleitungen und Elektroabscheider, um
 - zusätzliche Druckverluste durch das Aufheizen des Geräts zu reduzieren. Dies insbesondere, wenn keine Unterdruckregelung vorhanden ist oder deren Druckmessstelle nach dem Elektroabscheider platziert ist.
- 8) Ausreichend dimensionierter Bypass um den Elektroabscheider, um
 - einen erhöhten Druckabfall durch den Bypass-Betrieb während des Anfahrens zu vermeiden.
- 9) Das Reinigungsintervall des Elektroabscheiders gegebenenfalls verkürzen um
 - den (zeitverzögerten) Austrag haftender Russ-Agglomerate zu reduzieren. Es ist jedoch zu prüfen, ob durch die zusätzliche Reinigung insgesamt nicht mehr Grobstaub ausgeworfen wird.

Alle diese Massnahmen können Grobstaubauswurf nicht vollständig verhindern. Insbesondere während des Anfahrens des Kessels und bei Reinigungsvorgängen im Kessel und Elektroabscheider entsteht Grobstaub, welcher sich mit Multizyklon und Elektroabscheider nicht zuverlässig abscheiden lässt. Um den Grobstaub für die untersuchten Anlagekonzepte durch eine nachgeschaltete Massnahme zuverlässig und deutlich zu vermindern, muss ein neuartiges Gerät entwickelt werden, welches auch Grobstaub mit geringer Dichte abscheiden kann.

8 Schlussfolgerungen

Bei Grobstaub aus Holzfeuerungen muss zwischen aus der Brennkammer mitgerissenen Partikeln (z.B. Glutpartikel) und im Elektroabscheider agglomeriertem Russ unterschieden werden. Beide Arten von Grobstaub können eine sehr geringe Dichte aufweisen, weshalb dieser Grobstaub mit einem Multizyklon nicht in allen Fällen zuverlässig abgeschieden wird. Sofern der Grobstaub zudem einen hohen Kohlenstoffgehalt hat, weist er eine hohe elektrische Leitfähigkeit auf und kann auch in einem Elektroabscheider nicht zuverlässig abgeschieden werden. In beiden Fällen entscheiden die Partikeleigenschaften und somit die Bedingungen in der Brennkammer, ob Grobstaub abgeschieden oder ausgeworfen wird. Entscheidend ist deshalb die Einregulierung der Feuerung mit einem tiefen Luftüberschuss und einem optimalen Verhältnis von Primär- zu Sekundärluft.

Bei der Anlage 1 führten lange Betriebsphasen bei Teillast mit dem inhomogenen Brennstoff aus Spänen und Briketts zu einer unvollständigen Rostbedeckung. Dabei bildete sich in der Brennkammer Russ und in dessen Folge kam es zum Auswurf von Russ-Agglomeraten aus dem Elektroabscheider.

Bei der Anlage 2 wurden bei der Verbrennung von Holzpellets Glutpartikel aus der Brennkammer ausgezogen. Dabei konnte keine Korrelation zwischen diesem Austrag von Grobstaub aus der Brennkammer und der CO-Konzentration festgestellt werden. Dafür konnte der Grobstaub auf dieser Anlage, im Gegensatz zur Anlage 1, im Elektroabscheider zu 90 % abgeschieden werden. Die Gründe dafür konnten nicht ermittelt werden. Sowohl die reduzierte elektrische Leistung des Elektroabscheiders bei der Anlage 1 als auch die unterschiedlichen Eigenschaften des Grobstaubs in beiden Anlagen können die Ursache sein.

Bei beiden Partikelarten ist ein korrekter und stabiler Unterdruck in der Brennkammer entscheidend. Sowohl ein zu hoher als auch ein zu tiefer Unterdruck sind kritisch und können zu erhöhten Grobstaubemissionen führen. Genauso können von der Witterung oder einzelnen Anlagekomponenten verursachte starke Druckschwankungen Grobstaubemissionen verursachen. Ein Einfluss von Druckschwankungen im Heizraum konnte bei dieser Untersuchung dagegen nicht bestätigt werden. Dies gilt sofern der Querschnitt der Verbrennungsluftöffnung in den Heizraum genügend gross dimensioniert ist.

Deshalb sind oft eine ausreichend gross dimensionierte Zugregelklappe und eine korrekt funktionierende Unterdruckregelung entscheidend zur Verhinderung von Grobstaubauswurf. Für die Unterdruckregelung wird eine korrekte Messung des Unterdrucks vorausgesetzt. Position und Ausführung der Messstelle müssen deshalb sorgfältig geplant werden, um Fehlmessungen zu verhindern. Ebenso müssen Drucksensoren regelmässig überprüft, gewartet und gegebenenfalls ersetzt werden.

Weiter ist zu beachten, dass kalte Elektroabscheider während des Anfahrens der Feuerung einen zusätzlichen Druckabfall durch das Auskühlen des Abgases verursachen. Aber auch ein zu klein dimensionierter Bypass um den Elektroabscheider kann zu einem erhöhten Druckabfall führen. Beides kann zu ungünstigen Unterdrucksituationen in der Brennkammer führen und den Anfahrvorgang negativ beeinflussen bzw. den Grobstaubauswurf begünstigen. Eine ausreichende Wärmedämmung und ein ausreichend dimensionierter Bypass sind deshalb wichtig.

Trotzdem muss akzeptiert werden, dass auch bei der Umsetzung aller empfohlenen Massnahmen während des Anfahrens und bei Reinigungsvorgängen im Kessel und Elektroabscheider Grobstaub entsteht, welcher sich mit Multizyklon und Elektroabscheider nicht zuverlässig abscheiden lässt. Somit ist zur Vermeidung von Grobstaubauswurf bei den Bedingungen in der Brennkammer (Rostbedeckung,

Verbrennungsqualität, etc.) und der Unterdruckregelung anzusetzen. Um wenige Anfahrvorgänge und lange Laufzeiten der Feuerung zu ermöglichen, ist auch ein nach QM Holzheizwerke dimensionierter Wärmespeicher mit Speicherladeregelung notwendig. Dies ermöglicht eine Leistungsvorgabe für die Feuerung entsprechend der mittleren Lastabnahme. Zuverlässige Sekundärmaßnahmen sind heute nicht verfügbar. Um Grobstaub mit einer geringen Dichte abscheiden zu können, muss ein neuartiges Gerät entwickelt werden.

Mit den vorliegenden zwei Praxismessungen konnten einige vermutete Ursachen für Grobstaubauswurf bestätigt werden. Andere Vermutungen konnten jedoch nicht reproduziert werden. Die vorliegende Datenbasis erlaubt jedoch keine vollständige und abschliessende Beurteilung. Um die Mechanismen genau verstehen und beschreiben zu können, wären umfangreichere Versuche unter kontrollierten Bedingungen notwendig.

A Anhang

A.1 Datenmenge pro Betriebspunkt

Tabelle 2 Dauer der einzelnen Betriebszustände, welche im Bericht ausgewertet wurden für die Anlage 1 und die Anlage 2.

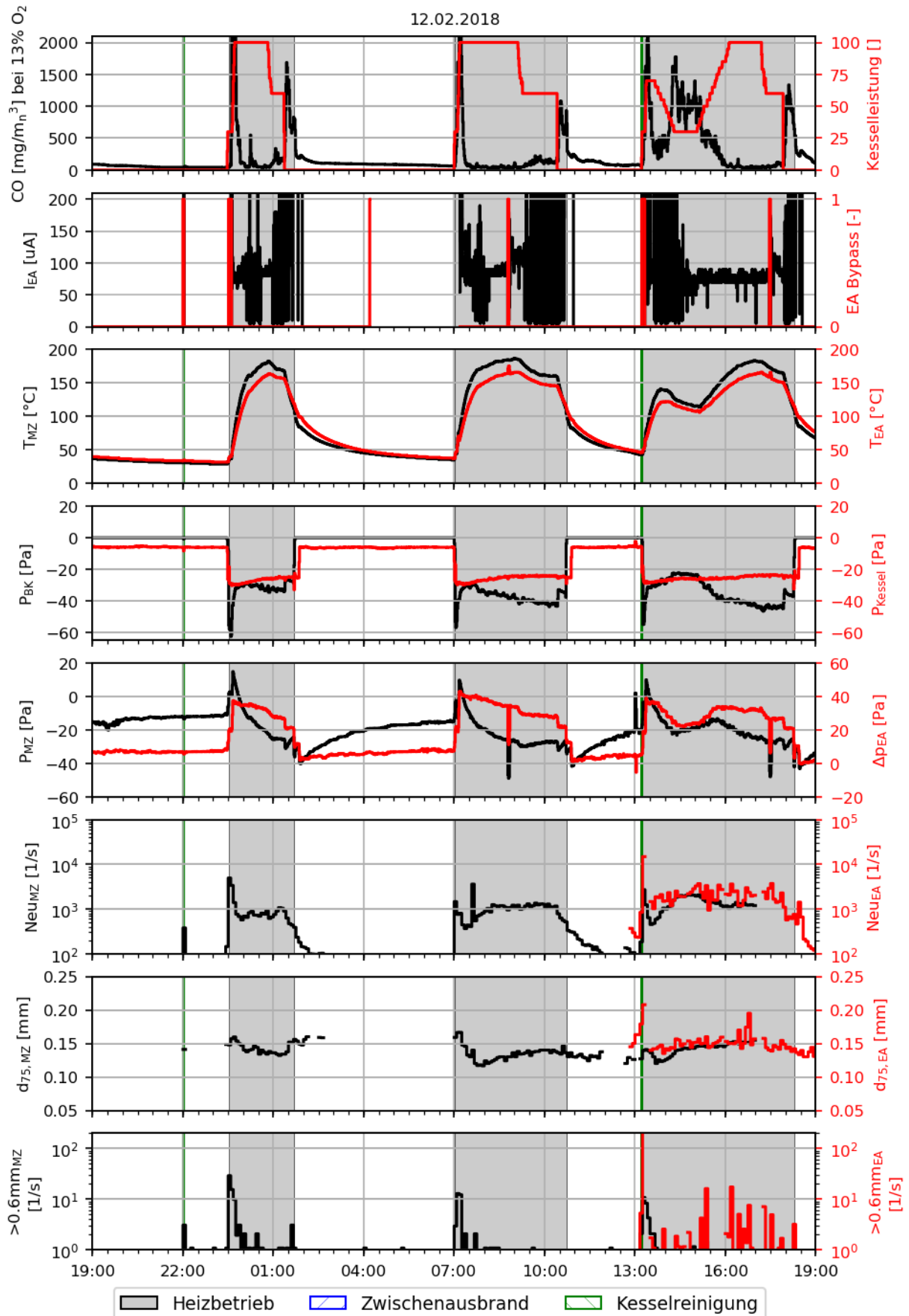
	Anlage 1	Anlage 2
	[Minuten]	[Minuten]
1 NL	595	371
2 TL	49	269
3 TL-h	286	44
4 Anf	98	98
5 Abf	32	213
6 trans	932	159
7 K-R	4	11
8 EA-R	8	8
11 NL-t		25
12 NL-h		46
31 TL-t		46
91 TL HV-a		100
92 TL EA-a		58

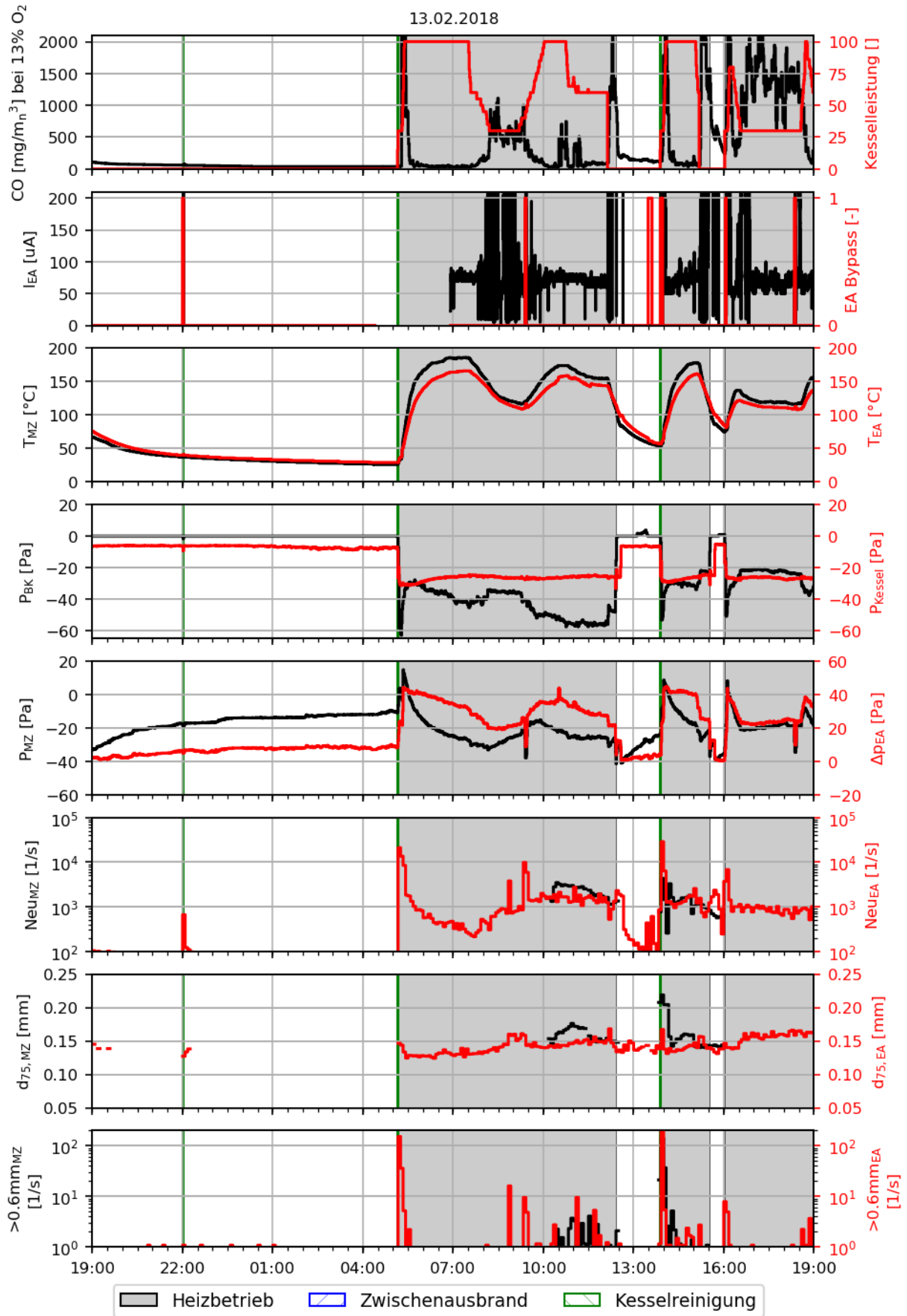
A.2 Messtechnik

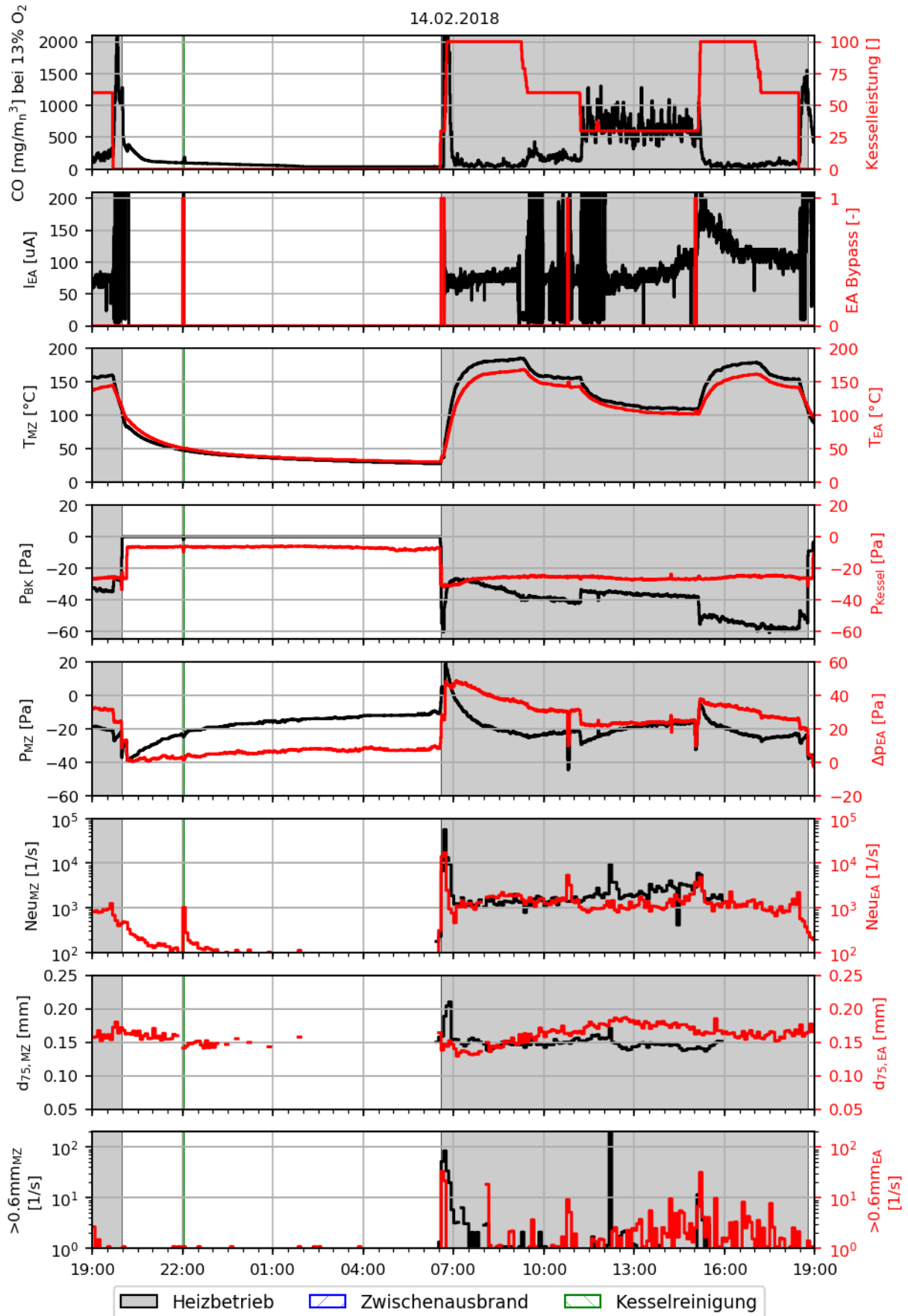
Tabelle 3 Zusammenstellung der für die Untersuchung eingesetzten Messgeräte.

Symbol	Einheit	Messbereich	Messgerät
p	Pa	-100 bis 100	Premasgard 1111
T	°C	0 bis 300	Thermoelement Typ K
O ₂	Vol.-%	0 bis 21	Ultramat 23
CO	ppm	0 bis 100000	Ultramat 23
Grobstaub	1/s mm	1 bis 10000 0.05 bis 5	Grobstaubzähler der HSLU

A.3 Zeitverlauf Anlage 1







A.4 Zeitverlauf Anlage 2

