



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

EMISSIONSFAKTOREN MODERNER PELLETKESEL UNTER TYPISCHEN HEIZBEDINGUNGEN

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Jürgen Good
Thomas Nussbaumer

Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 6048 Horw, www.hslu.ch

Horw, 8. Dezember 2009

Auftraggeber

Bundesamt für Energie

Auftragnehmer

Hochschule Luzern – Technik & Architektur
Fachgruppe Bioenergie
CH – 6048 Horw

Autoren

Dr. Jürgen Good, Hochschule Luzern – Technik & Architektur
Prof. Dr. Thomas Nussbaumer, Hochschule Luzern – Technik & Architektur

Mitarbeit

Adrian Lauber, Hochschule Luzern – Technik & Architektur
Dr. Marc-André Baillifard, Hochschule Luzern – Technik & Architektur
Martin Kiener, Hochschule Luzern – Technik & Architektur
Peter Odermatt, Hochschule Luzern – Technik & Architektur
Nina Boogen, Verenum, Zürich

Projekt-Begleitung

Dr. Sandra Hermle, Bundesamt für Energie
Daniel Binggeli, Bundesamt für Energie
Andres Jenni, Ardens GmbH, 4410 Liestal

Projekt-Partner

Lars Konersmann, SPF Institut für Solartechnik, HSR Hochschule Rapperswil
Robert Haberl, SPF Institut für Solartechnik, HSR Hochschule Rapperswil

Bundesamt für Energie

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen, Postadresse: CH-3003 Bern
Telefon +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00, www.bfe.admin.ch
BFE-Projektleiter: Daniel Binggeli

Dieser Bericht entstand im Auftrag des Bundesamts für Energie.
Für den Inhalt sind ausschliesslich die Autoren verantwortlich.

Inhalt

Zusammenfassung.....	5
1 Einleitung und Aufgabenstellung.....	6
1.1 Hintergrund und Zielsetzung	6
1.2 Aufgabenstellung	6
2 Resultate Pelletkessel A	8
2.1 Untersuchte Betriebszustände	8
2.2 Charakteristisches Betriebsverhalten.....	9
2.3 Typisches Emissionsverhalten.....	11
2.4 Reproduzierbarkeit.....	16
2.5 Staub (optische Beurteilung)	18
2.6 Aschezusammensetzung	19
2.7 Emissionen und Emissionsfaktoren	20
3 Resultate Pelletkessel B	24
3.1 Untersuchte Betriebszustände	24
3.2 Charakteristisches Betriebsverhalten.....	24
3.3 Typisches Emissionsverhalten.....	25
3.4 Reproduzierbarkeit.....	30
3.5 Staub (optische Beurteilung)	30
3.6 Aschezusammensetzung	32
3.7 Emissionen und Emissionsfaktoren	33
4 Schlussfolgerungen.....	37
5 Anhang.....	41
5.1 Randbedingungen	41
5.2 Wärmeabnahme.....	41
5.3 Messtechnik	43
5.4 Auswertungen/Berechnungen	47
6 Literatur.....	49

Zusammenfassung

In der vorliegenden Untersuchung wurden die Schadstoffemissionen von zwei modernen Pelletkesseln auf dem Versuchsstand der Hochschule Luzern – Technik & Architektur (HSLU) gemessen und Emissionsfaktoren unter typischen Betriebsbedingungen zur Bereitstellung von Warmwasser und Heizwärme in Wohnhäusern (EFH und MFH) bestimmt. Dazu wurde ein typischer Betrieb der Pelletkessel simuliert, wie er beim Einsatz mit und ohne Wärmespeicher und mit und ohne solare Warmwassererwärmung in Gebäuden auftritt. Nebst Betrieb bei stationären Leistungsstufen unter Voll- und Teillast wurden auch die Startphasen aus dem kalten und warmen Zustand, der Lastwechsel, der taktende Betrieb und das Ausschalten untersucht. Nebst den gasförmigen Schadstoffen an Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffen unterteilt in Methan und Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe sowie Stickoxiden wurden der Gesamtstaub durch gravimetrische Feststoffmessung sowie die Korngrößen- und Anzahlverteilung der Partikel mittels Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) und Optical Particle Counter (OPC) bestimmt. Gleichzeitig mit der Messung der Schadstoffkonzentrationen wurde der Abgasvolumenstrom erfasst und zur Bestimmung gewichteter Emissionsdaten verwendet. Daraus werden im vorliegenden Bericht Emissionsfaktoren unter verschiedenen Heizbedingungen berechnet, die vom Institut für Solartechnik (SPF) der Hochschule Rapperswil zur Bestimmung von Jahres-Emissionsfrachten der Pelletkessel verwendet werden.

Die Resultate zeigen, dass während der Startphase kurzfristig deutlich erhöhte Emissionen an unvollständig oxidierten Gasen sowie Feststoffen auftreten. Bei stationärem Betrieb sind die Emissionen gering und entsprechen bei einem Pelletkessel sogar den unter prüfstandsbedingungen (also ohne Berücksichtigung von Start und Ausschalten) ausgewiesenen Angaben. Beim Ausschalten treten wiederum kurzfristig deutlich erhöhte Emissionen auf. Je nach Regelungskonzept eines Pelletkessels und seiner realen hydraulischen Einbindung in ein System mit oder ohne Pufferspeicher treten auch Taktzyklen auf, bei denen nach dem Starten nur eine kurze Phase mit stationärem Betrieb und anschliessend wieder das Ausschalten und eine mehr oder weniger lange Stillstandsphase folgt. Da die Emissionen bei jedem Start- und Stoppvorgang einige Minuten lang bedeutend höher sind als bei stationärem Betrieb, ist taktender Betrieb grundsätzlich unerwünscht. Die Untersuchung zeigt, dass die Emissionen im Taktbetrieb für die untersuchten Kessel nur dann vertretbar sind, wenn die Laufzeit inklusive Starten und Ausschalten mindestens 80 bis 90 Minuten beträgt. Aus der Praxis ist aber bekannt, dass die Laufzeiten pro Start teilweise nur 15 Minuten betragen können, sofern die Kessel ohne Wärmespeicher betrieben werden oder die hydraulische Einbindung so ausgeführt ist, dass der Kessel trotz Wärmespeicher taktend betrieben wird.

1 Einleitung und Aufgabenstellung

1.1 Hintergrund und Zielsetzung

Zur Beurteilung der Emissionswerte und Wirkungsgrade von Pelletkesseln stehen umfangreiche Messwerte von Typenprüfungen zur Verfügung. Diese werden bei betriebswarmen Feuerungen und unter stationären Betriebsbedingungen erfasst. Das Verhalten unter realen Heizbedingungen kann jedoch deutlich von stationären Prüfstandsbedingungen abweichen und beeinflusst deshalb sowohl die in der Praxis effektiv erzielbaren Jahresnutzungsgrade, als auch die in der Praxis zu erwartenden Gesamtemissionen während eines Jahres oder einer Heizperiode. Um dazu verlässliche Aussagen zu ermöglichen, muss vorab das reale Betriebsverhalten bei typischen Heizbedingungen bekannt sein. Entsprechende Systemuntersuchungen in Verbindung mit solarthermischen Anlagen werden am Institut für Solartechnik (SPF) an der Hochschule Rapperswil durchgeführt. Die Kombination aus einem Testzyklus auf einem Prüfstand und anschliessender Jahressimulation (Concise Cycle Test, CCT [1]) liefert den charakteristischen Verlauf des System- und Kesselbetriebs für Heizung und Warmwasser über ein gesamtes Betriebsjahr. Der Testzyklus dauert 12 Tage, wobei jeder Messtag jeweils einen Monat des Jahres nachbildet. Mit diesem Verfahren kann unter anderem der Jahresnutzungsgrad eines Heizgerätes im praxisnahen Systembetrieb berechnet werden. Sind die Emissionen bei verschiedenen Betriebszuständen bekannt, kann mit dem Verfahren auch die Gesamtfracht der Emissionen über eine Heizperiode bzw. ein ganzes Betriebsjahr berechnet werden. Ziel der vorliegenden Untersuchung ist deshalb die Erhebung der Emissionsfaktoren moderner Pelletkessel unter Betriebsbedingungen, die bei einem Einsatz als Heizanlage als typische Praxisbedingungen erwartet und als simulierte Praxisbedingungen bezeichnet werden. Dazu sollen unter simulierten Praxisbedingungen im Labor folgende Emissionsfaktoren bestimmt werden:

- Staub als gravimetrischer Gesamtstaub und optional die Anzahlkonzentration sowie die Korngrösse der Feinpartikel
- Kohlenmonoxid (CO)
- Kohlenwasserstoffe (volatile organic compounds, VOC) unterteilt in
 - Methan und
 - Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe (NMVOC)
- Stickoxide (NO_x).

Nachdem die Emissionsfaktoren an der HSLU im Rahmen dieses Projektes bestimmt worden sind, werden sie am SPF dazu verwendet, um die Jahresemissionsfrachten zu berechnen.

1.2 Aufgabenstellung

Untersuchung des Emissionsverhaltens von modernen Pelletkesseln unter simulierten Praxisbedingungen und Bestimmung der Emissionsfaktoren.

Messgrössen:

- Abgaszusammensetzung und Hilfsgrössen, kontinuierlich
- O₂, CO₂, CO, NO_x sowie VOC als Methan und Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe
- Abgastemperatur, Abgasgeschwindigkeit, Kaminzug
- Luftüberschuss, feuerungstechnischer Wirkungsgrad
- Vor- und Rücklauftemperatur, Feuerungswärmeleistung, Kesselleistung

- Staub:
 - Gesamtstaub gravimetrisch, diskontinuierliche Probenahme auf Planfilter (Probenahmedauer i.d.R. 15 oder 30 Minuten)
 - Staubproben sammeln (soweit möglich)
 - Staubanalysen (OC oder Glühverlust, EC, Rest) für stationäre Phase und Anfahren
 - Ascheanalysen (organischer und anorganischer Kohlenstoff TOC und TIC)
 - Korngrössenspektrum und Anzahlverteilung (SMPS, OPC) bei einzelnen Betriebsphasen, quasikontinuierlich (3 Minuten). Diese Daten werden zu Vergleichszwecken auch auf Massenkonzentration umgerechnet, obwohl dieser Wert nicht dem gravimetrisch erfassten Staubgehalt entspricht.

Auswertungen:

- Grafische Darstellung der zeitlichen Verläufe
- Mittelwertbildung über die einzelnen Betriebszustände
- Mittelwerte in mg/m_n^3 bei 13 Vol.-% O_2
- Abschätzung eines mittleren und mit dem Abgasvolumenstrom gewichteten Emissionsfaktors. Dieser wird hier entsprechend der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) in mg/m_n^3 bei 13 Vol.-% O_2 angegeben und kann bei Bedarf auf zugeführte Energie umgerechnet und in mg/MJ ausgewiesen werden, was der Angabe von Emissionsfaktoren des Bundesamts für Umwelt (BAFU) [2] entspricht.

2 Resultate Pelletkessel A

2.1 Untersuchte Betriebszustände

Pelletkessel A weist gemäss Bedienungsanleitung die drei stationären Betriebszustände Nennlast, Mittellast und Minimallast auf, gemäss den aktuellen Settings der Kesselsteuerung entsprechen sie 100%, 70% und 50% der Nennleistung von rund 10 kW. Da Pelletkessel A bei der Typenprüfung bei einer Minimallast von 30% geprüft wurde, wurde als zusätzlicher stationärer Betriebszustand auch Minimallast bei 30% untersucht. Dazu mussten allerdings die Settings für Minimallast der Kesselsteuerung nach Rücksprache mit dem Kesselhersteller entsprechend verändert werden.

Die vorgängigen Untersuchungen mit Pelletkessel A am SPF zeigten, dass fast ausschliesslich der Betriebszustand Nennlast (100%) bzw. taktender Betrieb auftrat. Die Messungen im dynamischen Betrieb zeigten, dass dies auf die Kombination aus Kesselregelung und hydraulischer Einbindung des Kessels in das Gesamtsystem zurückzuführen ist. Der Kessel regelt die Leistungsmodulation über die Kesselvorlauftemperatur. Er reduziert die Leistung wenn die Vorlauftemperatur sich der Solltemperatur nähert. Aufgrund der Einstellung der Regelung (hohe Solltemperatur), sowie der hydraulischen Einbindung (konstanter Volumenstrom, minimale Rücklauftemperatur aufgrund Temperaturhochhaltung) wurde auch bei Nennleistung die Solltemperatur quasi nie erreicht, woraus ein stetiger Nennlastbetrieb bzw. häufiges Takten resultierte. Es ist zu erwarten bzw. aus der Praxis bekannt, dass Pelletkessel A bei hydraulischer Einbindung ohne Pufferspeicher durchaus auch modulierend betrieben wird.

Stationäre Betriebszustände:

- 100% / 70% / 50% / 30% der Nennleistung

Instationäre Betriebszustände:

- Starten
 - Kaltstart (Kesselwassertemperatur < 30 °C)
 - Warmstart (Kesselwassertemperatur > 50 °C)
- Lastwechsel:
 - 100% ---> 70%
 - 70% ---> 50%
 - 50% ---> 70%
 - 70% ---> 100%
- Stoppen
 - 100% ---> 0% (abruptes Ausschalten, Notstopp)
 - 50% ---> 0% (abruptes Ausschalten, Notstopp)
 - Normales Ausschalten
- Takten
 - 100% Takten bei einer konstanten Wärmeabnahme von 50% der Nennleistung
 - Modulierendes Takten bei einer konstanten Wärmeabnahme von 30% der Nennleistung
 - 100% Takten bei einer konstanten Wärmeabnahme von 30% der Nennleistung

2.2 Charakteristisches Betriebsverhalten

Das von der Kesselsteuerung vorgegebene Verhalten von Pelletkessel A beim Starten und Stoppen lässt sich am Zeitverlauf des gemessenen Abgasvolumenstroms in Bild 2.1 anschaulich und detailliert zeigen. Beim **Startvorgang** des Pelletkessel werden die zuvor zur Vermeidung von Rückbrand entleerte Beschickungseinrichtung wieder aktiviert und Pellets auf die Brennpfanne befördert. Zum Zünden der Pellets werden ein elektrischer Heizstab aktiviert, das Abgasgebläse auf Maximaldrehzahl geschaltet und die Zuluftklappen geöffnet. Das Abgasgebläse bleibt während ca. 4 Minuten bei Maximaldrehzahl, was dem zweifachen Abgasvolumenstrom im Vergleich zu Nennlast entspricht. Danach wird die Gebläsedrehzahl reduziert auf die Einstellung für die Stufe Nennlast. Nach weiteren ca. 6 Minuten wird die Leistungsregelung des Pelletkessels freigegeben, welche die Leistung des Pelletkessels je nach Kesseltemperatur zwischen Nennlast, Mittellast und Minimallast (entspricht 50% gemäss offiziellen Steuerungssettings) verändert. Wenn der Wärmebedarf unter die Minimalleistung des Pelletkessels sinkt, wird nach dem Überschreiten einer vorgegebenen Kesseltemperatur ein **Stoppbefehl** ausgelöst, bei dem als Erstes der Pelletnachschieber aus dem Vorratsbehälter gestoppt wird. Das Abgasgebläse bleibt während einer vorgegebenen Nachlaufzeit von ca. 8 Minuten bei Minimaldrehzahl, bis die in der Beschickungsschnecke verbliebenen Pellets auf die Brennpfanne gefördert und vollständig ausgebrannt sind. *(Kommentar: Wie die Messungen zeigen, ist die Dauer der Nachlaufzeit einige Minuten länger als die Pellets zum vollständigen Ausbrennen benötigen, denn der O₂-Gehalt steigt nach dem Ausbrennen deutlich an. Die CO-Werte bleiben beim Ausbrennen hoch, es ist deshalb zu vermuten, dass die Primärluft nicht ausreichend direkt an die Pellets gelangt, um diese vollständig auszubrennen.)* Anschliessend wartet der Pelletkessel auf den nächsten Startvorgang bzw. darauf, dass die Kesseltemperatur unter eine vorgegebene Einschalttemperatur sinkt.

Modulierendes Takten

Obwohl dieser Betriebszustand bei den vorgängigen Untersuchungen am SPF kaum auftrat, wurde er an der HSLU bezüglich Emissionen untersucht. Dies erfolgte mit dem Ziel auch andere Betriebs- oder Einbindungsarten bewerten zu können. Durch entsprechende Vorgaben in der Kesselsteuerung (*via Zugangscode für Fachmannebene*) und bei der Wärmeabnahme konnte der Pelletkessel zu modulierendem Takten gebracht werden. Bild 2.1 zeigt diesen modulierenden Betriebsmodus ab 12:30 Uhr. Bei einer konstanten Wärmeabnahme von rund 30% der Kesselnennleistung sinkt die Leistung des Kessels nach dem Starten bei Nennlast (100%) zuerst auf Mittellast (70%) und bleibt anschliessend längere Zeit bei Minimallast (50%). Da die freigesetzte Kesselleistung grösser ist als die abgenommene Leistung, steigt die Kesseltemperatur an, bis es zum Ausschalten kommt.

Die AUS-Phasen können theoretisch je nach Wärmeleistungsbedarf unterschiedlich lang sein, sofern die abgenommene Leistung kleiner ist als die Minimallast des Kessels. Die Anzahl der instationären Betriebsphasen (Kaltstart, Warmstart, Lastwechsel und Ausschalten) sowie die Dauer der stationären Betriebsphasen (Nennlast, Mittellast und Minimallast) hängen ebenfalls vom Wärmeleistungsbedarf ab. Modulierendes Takten ist typisch für einen Heizbetrieb ohne Speicher.

Nicht-Modulierendes Takten

Bei den vorgängigen Untersuchungen am SPF trat hauptsächlich dieser Betriebszustand auf, je nach Situation mit unterschiedlich langen EIN-Phasen bei Nennleistung und AUS-Phasen. In Bild 2.2 ist ab

17:30 Uhr ein taktender Betrieb erkennbar, bei dem der Pelletkessel die Leistung nicht modulieren konnte, d.h. die Leistung des Kessels blieb nach dem Starten bei Nennlast, bis der Stoppbefehl nach dem Überschreiten der Kesselsolltemperatur erfolgte.

Nicht-modulierendes Takten eines Kessels mit Speicher ist ein Indiz für eine ungenügende Kesselregelung oder eine ungenügende hydraulische Einbindung von Kessel und Pufferspeicher. Während der Speicherladung wird der Pelletkessel nach dem Startvorgang mit Nennleistung betrieben, bis der Speicher annähernd durchgeladen ist. Ist der Speicher durchgeladen, steigt die Kesseltemperatur so rasch an, dass ein modulierender Betrieb gar nicht mehr möglich ist, oder die externe Leistungsanforderung des durchgeladenen Speichers stoppt den Pelletkessel.

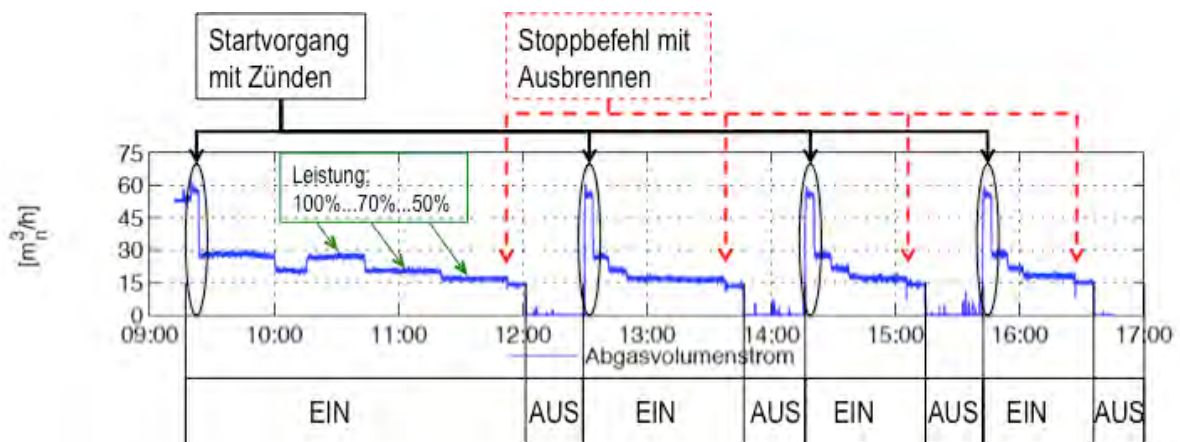


Bild 2.1 Charakteristisches Betriebsverhalten von Pelletkessel A, dargestellt am Zeitverlauf des Abgasvolumenstroms: Kaltstart (ab 9:10 Uhr) und modulierendes Takten (ab 12:30 Uhr).

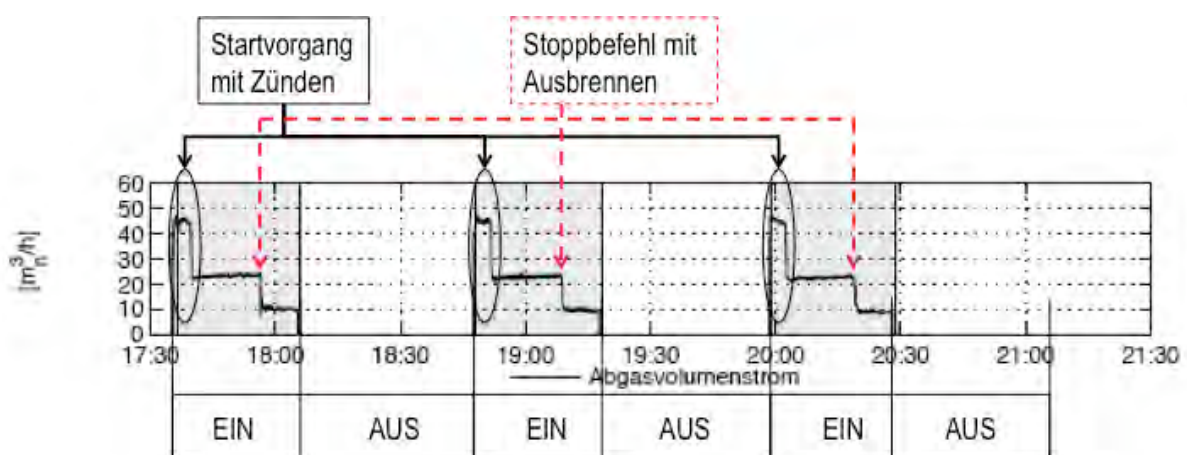


Bild 2.2 Charakteristisches Betriebsverhalten von Pelletkessel A, dargestellt am Zeitverlauf des Abgasvolumenstroms: Nicht-modulierendes Takten.

2.3 Typisches Emissionsverhalten

Das Emissionsverhalten lässt sich qualitativ am Zeitverlauf der verschiedenen Emissionen darstellen. Während bei stationärem Betrieb stabile Verbrennungsbedingungen zu gleichbleibenden Emissionen führen, sind die Verhältnisse bei taktendem Betrieb deutlich instabiler und führen vor allem beim Anfahren und Ausschalten zu erhöhten Emissionen. Diese Emissionspeaks sind auch in den Anzahlkonzentrationen und Partikeldurchmesser der quasikontinuierlichen Partikelmessungen sichtbar.

Die grauschattierten Bereiche sind Phasen, während derer gravimetrische Staubmessungen durchgeführt und Mittelwerte berechnet wurden. Die aus dem Abgasvolumenstrom und den Konzentrationen berechneten Frachten zeigen deutlich, wann erhöhte Emissionen auftreten.

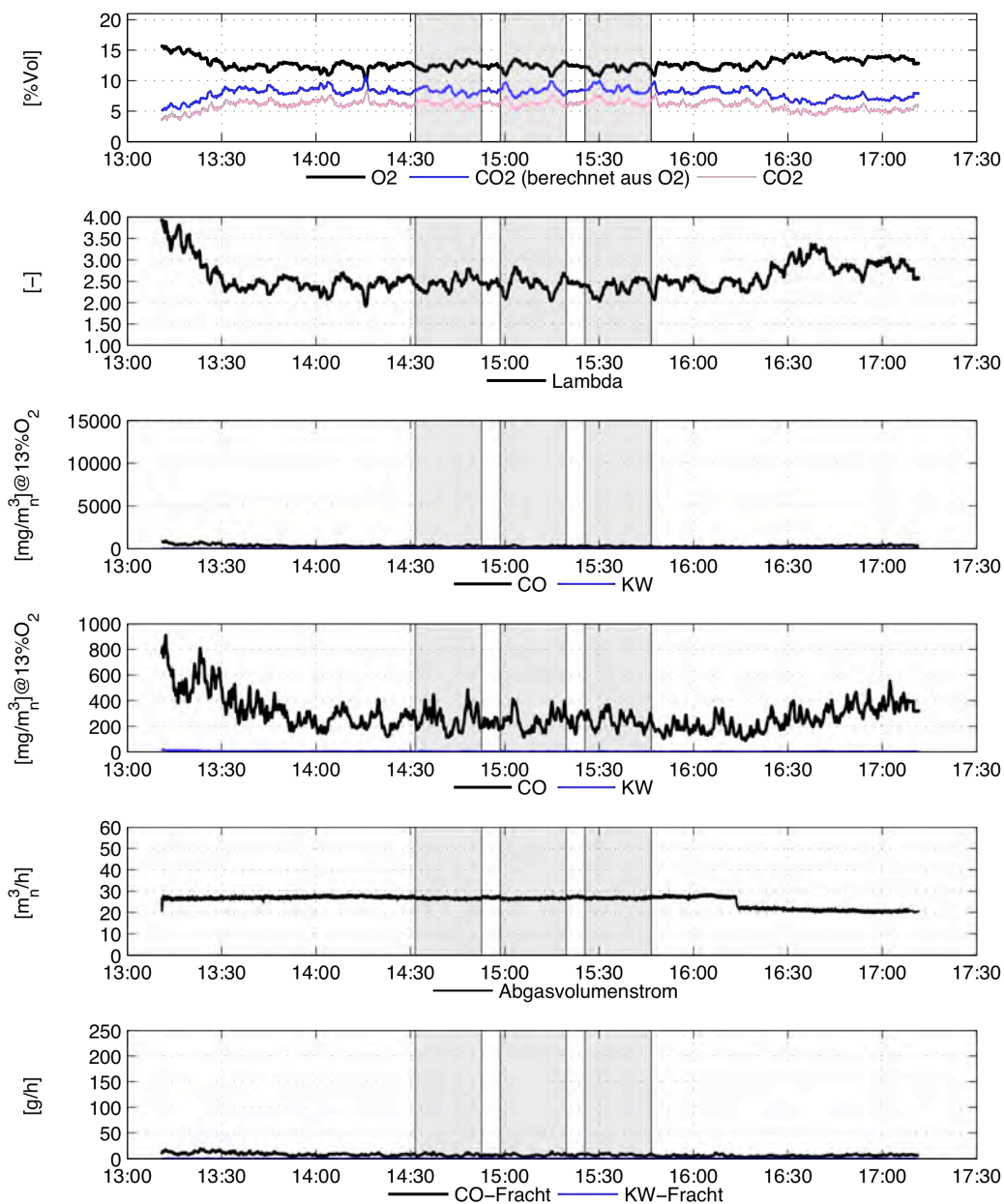


Bild 2.3 Emissionsverhalten von Pelletkessel A bei stationärem Betrieb bei Nennlast (100%).

1: O₂- und CO₂-Gehalt 2: Luftüberschusszahl Lambda 3: CO- und Kohlenwasserstoff(KW)-Gehalt bis 15'000 mg/m_n³ bei 13 Vol.-% O₂ 4: CO- und Kohlenwasserstoff(KW)-Gehalt bis 1'000 mg/m_n³ bei 13 Vol.-% O₂ 5: Abgasvolumenstrom 6: CO- und KW-Fracht.

Kommentar: 3 und 4 zeigen die gleichen Grössen in unterschiedlichen Skalierungen.

Kommentar: CO₂ (berechnet aus O₂) ist genauer als CO₂

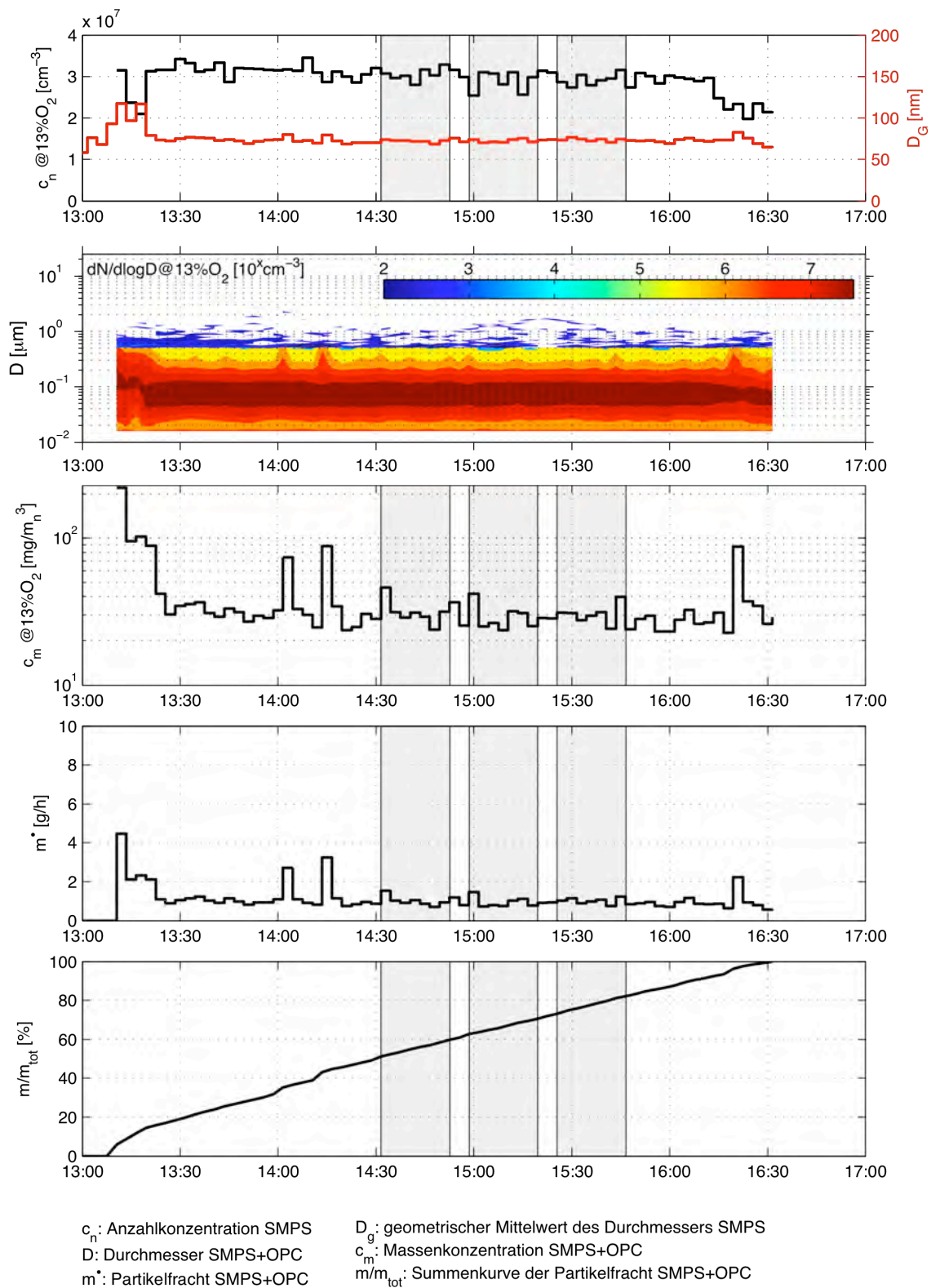


Bild 2.4 Emissionsverhalten von Pelletkessel A bei stationärem Betrieb bei Nennlast (100%).

1: Anzahlkonzentration und geometrischer Mittelwert des Durchmessers der Partikel (SMPS)
 2: Anzahlkonzentration der Partikeldurchmesser (SMPS+OPC) 3: Massenkonzentration der Partikel (SMPS+OPC) 4: Partikelfracht (SMPS+OPC) 5: prozentuale Summenkurve der Partikelfracht (SMPS+OPC).

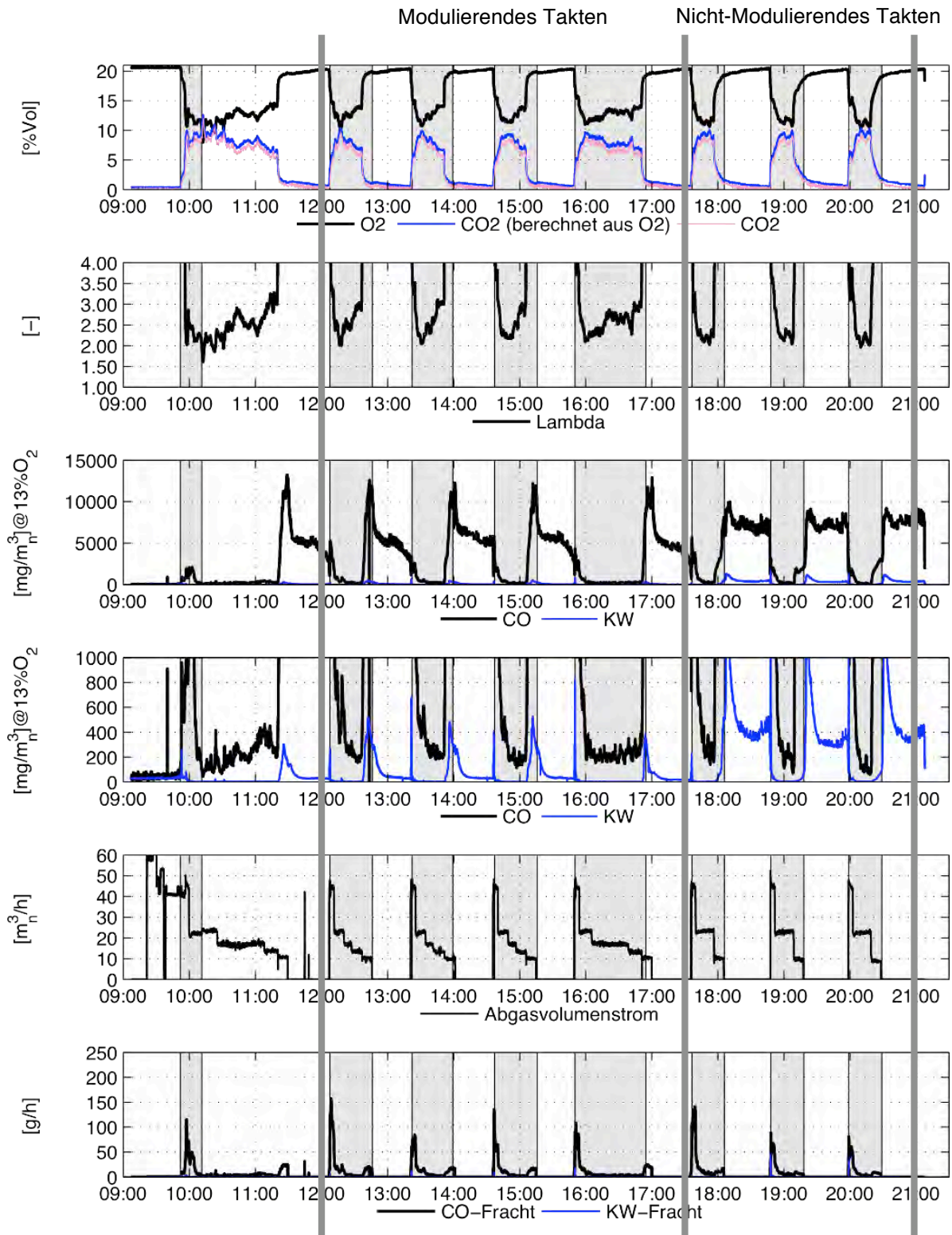


Bild 2.5

Emissionsverhalten von Pelletkessel A bei modulierendem (12:00 bis 17:30 Uhr) und nicht-modulierendem (17:30 bis 21:00 Uhr) Taktbetrieb mit EIN- und AUS-Phasen.

1: O₂- und CO₂-Gehalt 2: Luftüberschusszahl Lambda 3: CO- und Kohlenwasserstoff(KW)-Gehalt bis 15'000 mg/m³ bei 13 Vol.-% O₂ 4: CO- und Kohlenwasserstoff(KW)-Gehalt bis 1'000 mg/m³ bei 13 Vol.-% O₂ 5: Abgasvolumenstrom 6: CO- und KW-Fracht.

Kommentar: 3 und 4 zeigen die gleichen Grössen in unterschiedlichen Skalierungen.

Kommentar: Modulierendes Takten von 12:00 bis 17:30 Uhr; Nicht-Modulierendes Takten von 17:30 bis 21:00 Uhr.

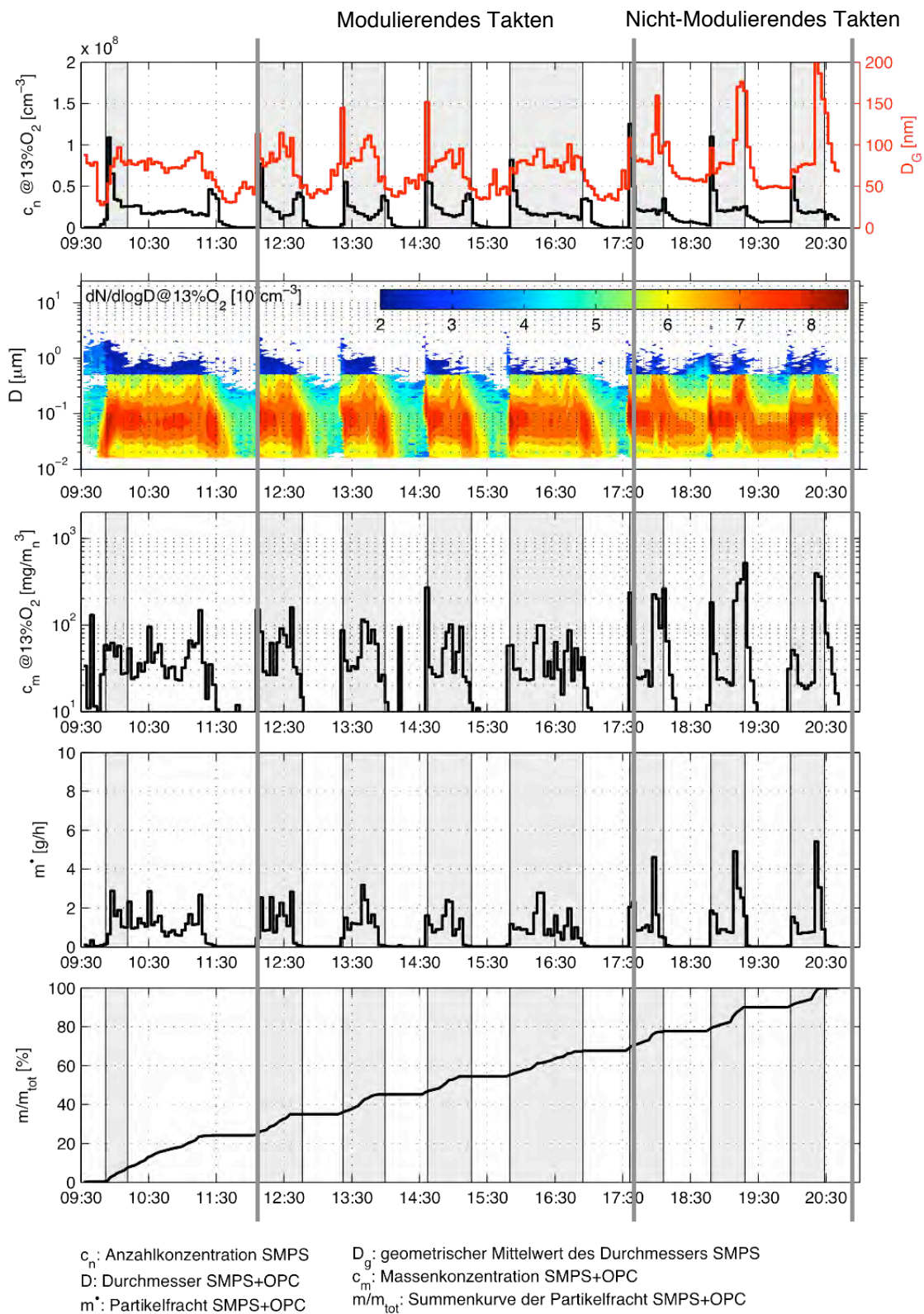


Bild 2.6

Emissionsverhalten von Pelletkessel A bei modulierendem (12:00 bis 17:30 Uhr) und nicht-modulierendem (17:30 bis 21:00 Uhr) Taktbetrieb mit EIN- und AUS-Phasen.

1: Anzahlkonzentration und geometrischer Mittelwert des Durchmessers der Partikel (SMPS), 2: Anzahlkonzentration der Partikeldurchmesser (SMPS+OPC), 3: Massenkonzentration der Partikel (SMPS+OPC), 4: Partikelfracht (SMPS+OPC), 5: prozentuale Summenkurve der Partikelfracht (SMPS+OPC).

Kommentar: Modulierendes Takten von 12:00 bis 17:30 Uhr; Nicht-Modulierendes Takten von 17:30 bis 21:00 Uhr.

2.4 Reproduzierbarkeit

Bild 2.7 zeigt eine Übersicht der gewichteten Konzentrationen für Feststoffe (gravimetrisch) und Kohlenmonoxid in mg/m_n^3 bei 13 Vol.-% O_2 in allen untersuchten Betriebszuständen. Innerhalb einer Kategorie sind teilweise mehrere Balken vorhanden, z.B. bei Kaltstart oder bei 100%. Dies bedeutet, dass der gleiche Betriebszustand an mehreren Tagen untersucht wurde. Bei bestimmten Betriebszuständen wurden an einem Messtag drei oder mehrere Wiederholungen nacheinander durchgeführt. Dies ist in Bild 2.7 erkennbar an denjenigen Balken, bei denen zusätzlich zum Messwert eine Standardabweichung angezeigt ist. Die Standardabweichungen sind vergleichsweise klein, somit kann die Reproduzierbarkeit der Mehrfachwiederholungen als gut bezeichnet werden. Die Resultate innerhalb einer Kategorie zeigen aber, dass die Unterschiede zwischen den Resultaten von unterschiedlichen Messtagen grösser ist als die Standardabweichung der Mehrfachwiederholungen an einem Messtag. Das Resultat für eine Kategorie bzw. einen Betriebszustand wurde somit als Mittelwert der Versuche an allen Messtagen berechnet und ist als Zahlenwert in Tabelle 2.2 zusammengefasst.

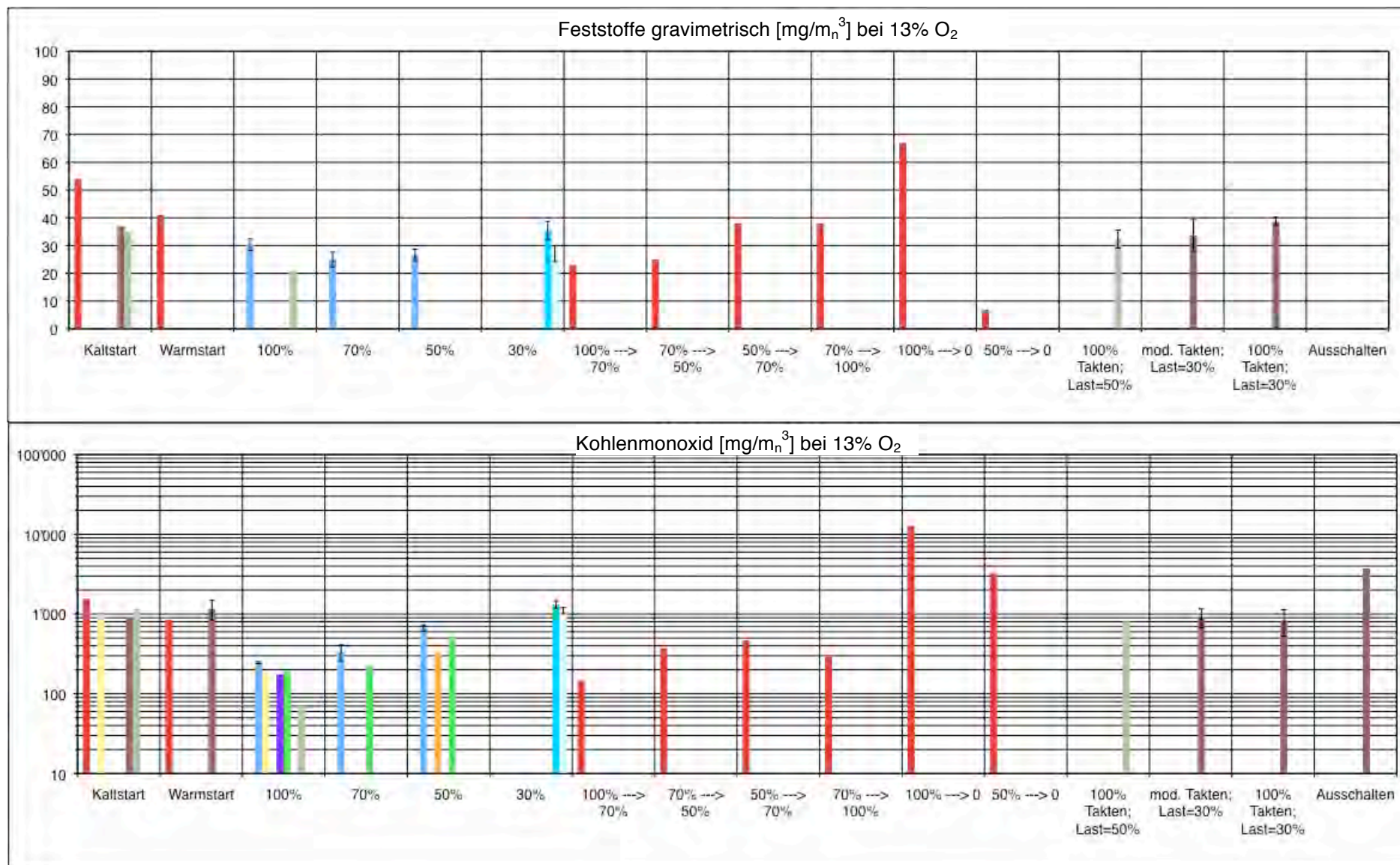


Bild 2.7 Reproduzierbarkeit der Versuche.

2.5 Staub (optische Beurteilung)

Bild 2.8 zeigt links die Planfilter von Pelletkessel A im stationären Betrieb bei Nennlast (Oben; drei Messungen in Serie), Mittellast (Mitte; drei Messungen in Serie) und Teillast (Unten; drei Messungen in Serie). Die Planfilter sind grau bis schwarz. Die Staubkonzentrationen bei stationärem Betrieb sind mit 25 bis 30 mg/m³ bei 13 Vol.-% O₂ zwar gering, aber auf Grund der optischen Beurteilung muss der Kohlenstoffanteil im Staub ist vergleichsweise hoch sein. Ursache für den hohen Kohlenstoffanteil im Staub dürften aus dem Brennstoffbett mitgerissene Partikel sein, die nicht mehr vollständig ausbrennen können. Diese Kohlenstofffracht dürfte als Black Carbon (BC) gesundheits- und klimarelevant sein.

Zum Vergleich zeigt Bild 2.8 rechts die Planfilter eines Stückholzkessels. Der Planfilter oben stammt von der Startphase des kalten Kessels, die weiteren vier Planfilter sind von stationärem Betrieb bei Nennleistung während der ersten und zweiten Brennstoffcharge. Die absoluten Staubkonzentrationen bei stationärem Betrieb sind beim Stückholzkessel ähnlich niedrig wie beim Pelletkessel, der Kohlenstoffanteil des Staubs muss allerdings auf Grund der optischen Beurteilung deutlich geringer sein, d.h. der Staub beim Stückholzkessel besteht vorwiegend aus farblosen Salzen.

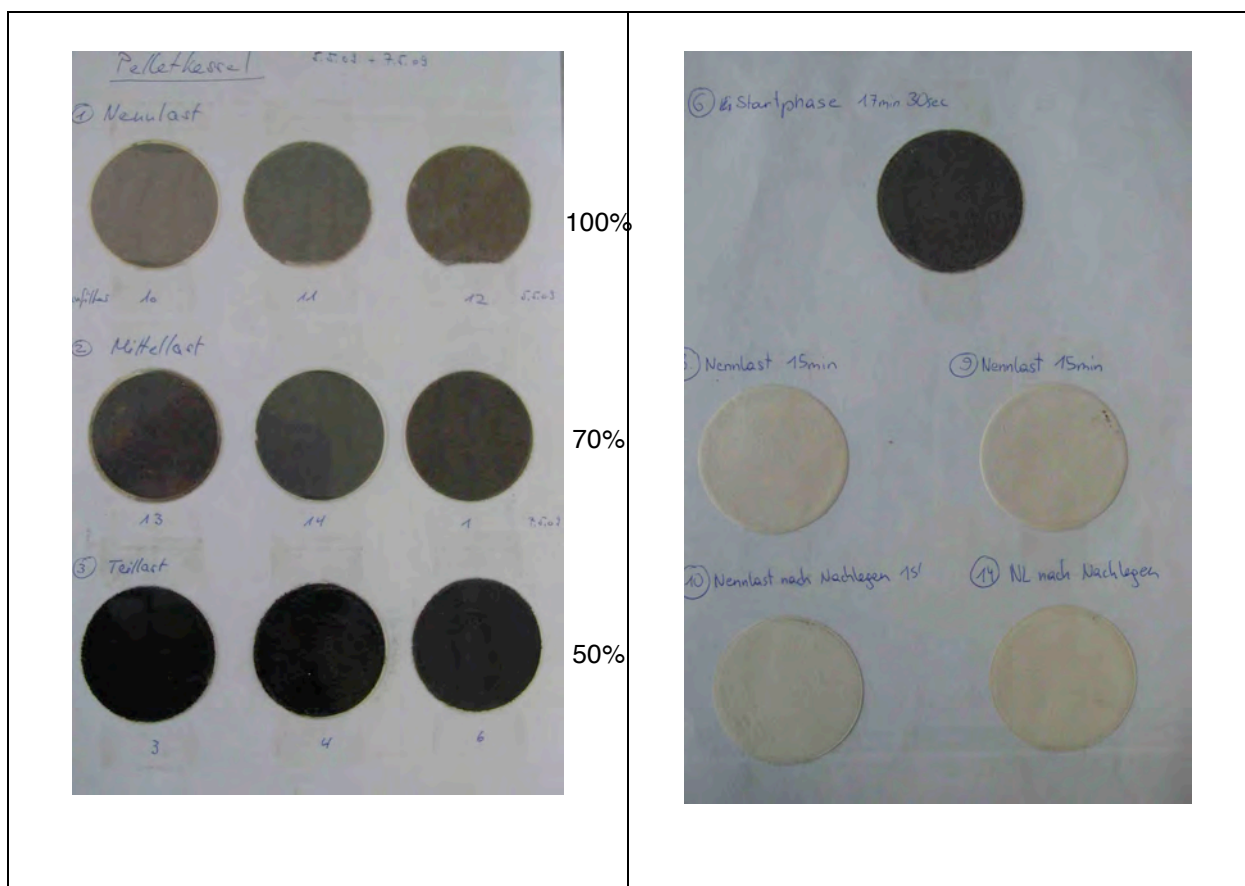


Bild 2.8 Links: Planfilter von Pelletkessel A bei Nennlast (Oben), Mittellast (Mitte) und Teillast (Unten);
Rechts: Planfilter eines Stückholzkessels zum Vergleich. Oben: Kaltstartphase, Mitte: Nennleistung während erster Brennstoffcharge, 2 Messungen in Serie, Unten: Nennleistung während zweiter Brennstoffcharge, 2 Messungen in Serie).

2.6 Aschezusammensetzung

Nach den Untersuchungen am SPF und HSLU wurde die Aschezusammensetzung einer Ascheprobe analysiert, die aus dem Aschebehälter des Kessels stammt. Dort sammeln sich die Rost- und ein Teil der Flugasche. Es ist zu beachten, dass die TOC-Angabe in Tabelle 2.1 zusätzlich zum organischen Kohlenstoff (OC) auch den elementaren Kohlenstoff (EC) enthält.

Tabelle 2.1 Aschezusammensetzung bei Pelletkessel A.

Aschezusammensetzung			
Kohlenstoff organisch	TOC (=TC-TIC)	% v. TS, angegeben als C	0.52
Kohlenstoff anorganisch	TIC	% v. TS, angegeben als C	3.72

2.7 Emissionen und Emissionsfaktoren

Tabelle 2.2 Pelletkessel A: Zusammenfassung Emissionen und Emissionsfaktoren.

Pelletkessel Nr. 1

Phasen			Starten		Stationär			Instationär						Normales		100% Takten	mod. Takten	100% Takten	BAFU	Gemäss Prüfbericht		
			Kaltstart	Warmstart	100%	70%	50%	30%	100% -> 70%	70% -> 50%	50%--> 70%	70% -> 100%	100% -> 0	50% -> 0	Ausschalten	Last=50%	Last=30%	Last=30%	let mit Ventilator	Nenn-	Kleinste	
Gewichtete Konzentrationen														Ganzer Zyklus			berechnet	leistung	Leistung			
Lambda			[-]		9.7	3.2	2.3	2.6	2.9	3.1	2.5	3.1	2.7	2.3	6.5	6.8	9.8	4.0	4.3	3.4		
CO			CO	[mg/mn3] @13%O2	927.9	1006.6	193.7	307.3	570.7	1214.6	147.5	374.4	468.2	287.6	12862.0	3297.3	3728.7	808.8	919.9	830.2	391	
Gesamt-KW			VOC	[mg/mn3] @13%O2	96.3	16.8	3.5	2.3	17.3	8.2	0.5	1.0	1.3	0.8	745.5	264.0	103.6	20.1	15.8	21.9	42	
Methan			CH4	[mg/mn3] @13%O2	28.4	7.3	2.1	1.9	16.6	3.9	0.5	0.6	0.5	0.2	224.6	131.6	48.3	6.9	7.8	8.5	31	
Nichtmethan			NMVOC	[mg/mn3] @13%O2	72.9	11.3	3.3	2.2	16.7	4.4	1.0	0.3	0.8	0.6	520.9	132.4	55.4	13.2	9.5	16.0	11	
NOx			NO2	[mg/mn3] @13%O2	63.8	106.7	98.9	100.8	96.6	92.6				92.0	70.0	62.0	94.2	102.0	21.9	266		
Feststoff gravimetrisch				[mg/mn3] @13%O2	42.0	41.0	28.0	25.0	26.7	32.0	23.0	25.0	38.0	38.0	67.0	7.0	32.3	33.7	38.7	47		
Feinpartikel SMPS+OPC			Massenkonzentration	[mg/mn3] @13%O2	59.0	24.9	31.0	27.9	46.9	54.0	33.6	52.8	30.6	26.8	28.0	9.7	48.1	55.5	79.1			
Feinpartikel SMPS+OPC			Anzahlkonzentration	[1/cmn3] @13%O2	3.65E+07	2.92E+07	2.98E+07	2.06E+07	1.20E+07	9.30E+06	2.41E+07	1.96E+07	2.29E+07	2.62E+07	1.91E+07	6.21E+06	2.68E+07	2.17E+07	2.32E+07			
Feinpartikel SMPS+OPC			Mittlerer geometr. Partikeldurchmesser	[nm]	79.3	71.1	72.7	76.5	83.9	94.5	70.1	75.4	77.8	77.1	67.8	45.2	75.6	79.7	102.5			

Phasen			Starten		Stationär			Instationär						Normales		100% Takten	mod. Takten	100% Takten	BAFU	Gemäss Prüfbericht	
(Faktor = 0.64)			Kaltstart	Warmstart	100%	70%	50%	30%	100% -> 70%	70% -> 50%	50% -> 70%	70% -> 100%	100% -> 0	50% -> 0	Ausschalten	Last=50%	Last=30%	Last=30%	Pellet	Nenn-	Kleinste
Emissionsfaktor aus gewichteten Konzentrationen																	Ganzer Zyklus		mit Ventilator	leistung	Leistung
CO			CO	[mg/MJ]	593.8	644.2	123.9	196.6	365.3	777.3	94.4	239.6	299.6	184.1	8231.7	2110.3	2386.4	517.6	588.7	531.3	250.0
Gesamt-KW			VOC	[mg/MJ]	61.6	10.7	2.2	1.4	11.1	5.3	0.3	0.6	0.8	0.5	477.1	169.0	66.3	12.9	10.1	14.0	27.0
Methan			CH4	[mg/MJ]	18.2	4.7	1.4	1.2	10.6	2.5	0.3	0.4	0.3	0.1	143.7	84.2	30.9	4.4	5.0	5.4	20.0
Nichtmethan			NMVOC	[mg/MJ]	46.6	7.2	2.1	1.4	10.7	2.8	0.6	0.2	0.5	0.4	333.4	84.7	35.4	8.4	6.1	10.2	7.0
NOx			NO2	[mg/MJ]	40.8	68.3	63.3	64.5	61.8	59.3				58.9	44.8	39.7	37.2	60.3	65.3	14.0	170
Feststoff gravimetrisch			Staub	[mg/MJ]	26.9	26.2	17.9	16.0	17.1	20.5	14.7	16.0	24.3	24.3	42.9	4.5		20.7	21.5	24.7	30
Feinpartikel SMPS+OPC			PM10	[mg/MJ]	37.7	16.0	19.8	17.8	30.0	34.5	21.5	33.8	19.6	17.2	17.9	6.2		30.8	35.5	50.6	30

Phasen			Starten		Stationär				Instationär						Normales	100% Takten	mod. Takten	100% Takten
			Kaltstart	Warmstart	100%	70%	50%	30%	100% -> 70%	70% -> 50%	50% -> 70%	70% -> 100%	100% -> 0	50% -> 0	Ausschalten	Last=50%	Last=30%	Last=30%
																Ganzer Zyklus		
Dauer		h	0.31	0.25	6.00	6.00	6.00	6.00	0.33	0.5	0.33	0.45	0.2	0.21	0.17	1.40	1.24	1.18
Dauer	gemessen	Min	18.6	15.0	360.0	360.0	360.0	360.0	19.8	30.0	19.8	27.0	12.0	12.6	10.0	84.3	74.3	70.8
Brennstoff zugeführt	gemessen	kg	0.744	0.600	15.600	13.500	10.300	4.900	0.759	0.750	0.627	1.305	0.046	0.034	0.010	1.910	1.078	0.980
Energie zugeführt	berechnet	MJ	12.86	10.37	269.57	233.28	177.98	84.67	13.12	12.96	10.83	22.55	0.79	0.58	0.18	33.00	18.62	16.93
Zugeführte Leistung	berechnet	kW	11.5	11.5	12.5	10.8	8.2	3.9	11.0	7.2	9.1	13.9	1.1	0.8	0.3	6.5	4.2	4.0

Takt-Zyklus berechnen aus Einzelphasen:				Takten	Takten	Takten	Zyklus
				Warmstart	Stationär	Stop	berechnet
CO	mg/MJ			644.2	123.9	2386.4	338
Energie zugeführt	MJ	berechnet		10.37	16.47	0.18	
Dauer	Min	gemessen		15	22	10	
				Summenprodukt (CO*MJ)/Summe(MJ)			

Dauer der stationären Phase, damit BAFU-Grenzwert eingehalten ist:				Takten	Takten	Takten	Zyklus
				Warmstart	Stationär	Stop	berechnet
CO	mg/MJ			644.2	123.9	2386.4	249
Energie zugeführt	MJ	berechnet		10.37	35.94	0.18	
Dauer	h			0.25	0.80	0.17	
Dauer	Min			15	48	10.02	

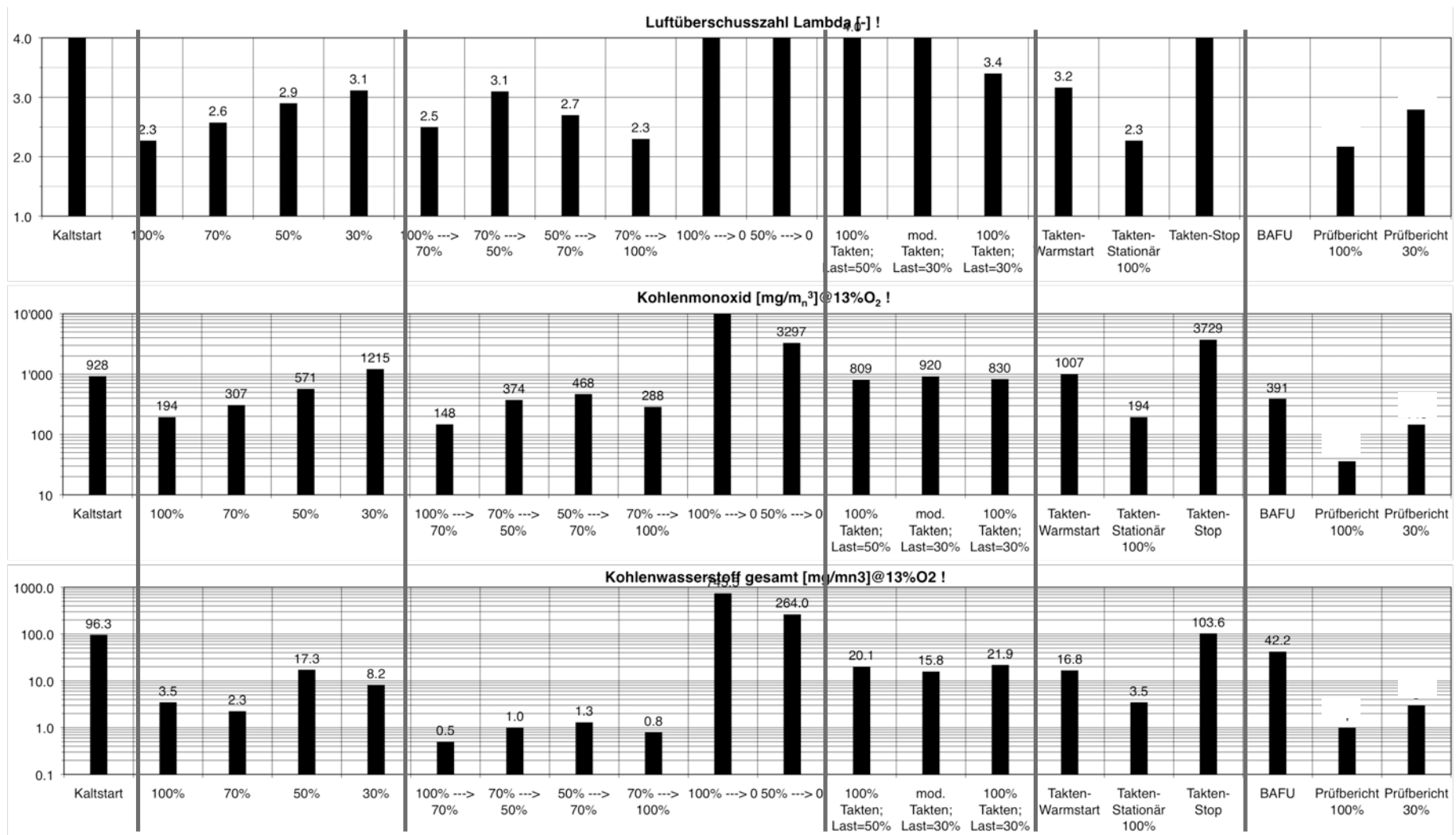


Bild 2.9 Pelletkessel A: Zusammenfassung der Resultate 1/3.

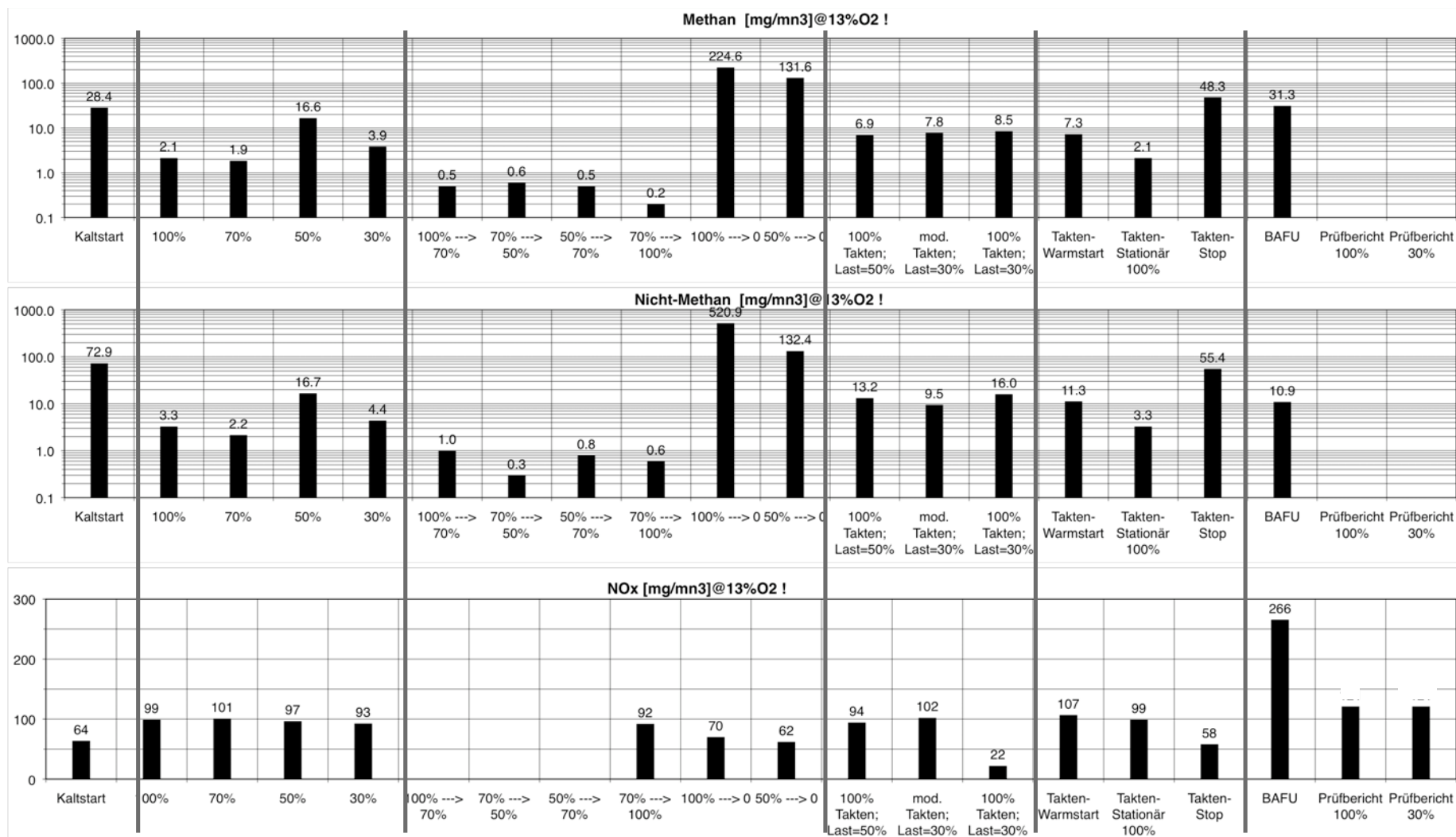


Bild 2.10 Pelletkessel A: Zusammenfassung der Resultate 2/3.

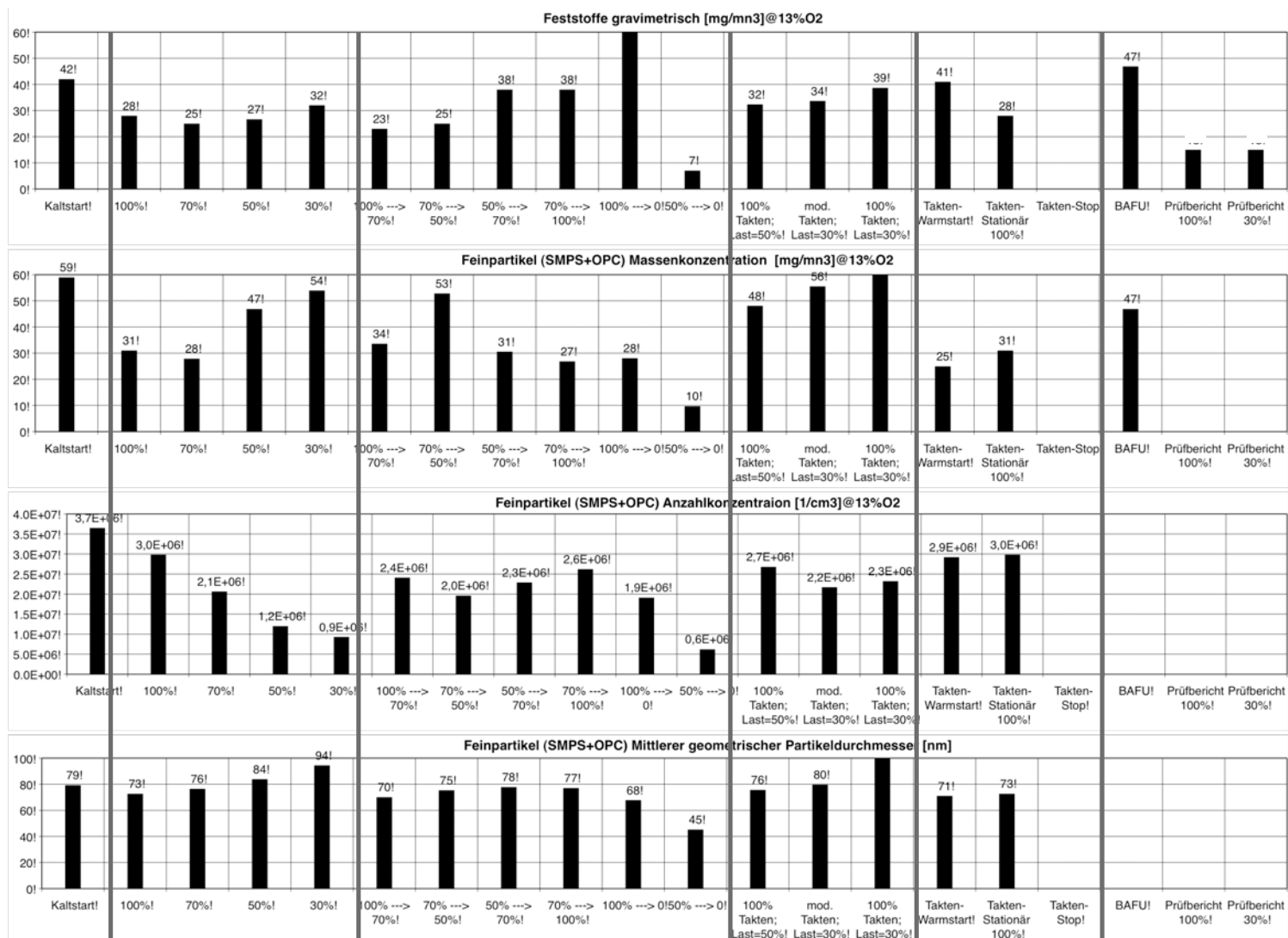


Bild 2.11 Pelletkessel A: Zusammenfassung der Resultate 3/3.

3 Resultate Pelletkessel B

3.1 Untersuchte Betriebszustände

Pelletkessel B besitzt eine Nenn-Wärmeleistung von ca. 11 kW, die bis ca. 2.5 kW stufenlos verändert werden kann. Die vorgängigen Untersuchungen am SPF zeigten ebenfalls auf, dass fast ausschliesslich der Betriebszustand Nennlast (100%) bzw. taktender Betrieb auftrat. Wie bei Pelletkessel A dürfte dies darauf zurückzuführen sein, dass die Kesselsteuerung im Fall des Betriebs mit einem technischen Speicher die Wärmeanforderung des Speichers nicht oder nur ungenügend verarbeiten kann. Der Speicher wird im Bedarfsfall mit Nennleistung des Holzkessels durchgeladen und anschliessend wird der Holzkessel ausgeschaltet. Es ist aus der Praxis bekannt, dass Pelletkessel B bei hydraulischer Einbindung ohne Pufferspeicher seine Fähigkeit zur Leistungsmodulation ausschöpfen kann.

Stationäre Betriebszustände:

- 100% / 70% / 30% der Nennleistung

Instationäre Betriebszustände:

- Starten
 - Kaltstart (Kesselwassertemperatur < 30 °C)
- Takten
 - 100% Takten bei einer konstanten Wärmeabnahme von 30% der Nennleistung.
 - Zusätzlich werden die einzelnen Phasen innerhalb eines Taktzyklusses (Warmstart / Stationär bei 100% / Stop) separat ausgewiesen.

3.2 Charakteristisches Betriebsverhalten

Das von der Kesselsteuerung vorgegebene Verhalten von Pelletkessel B beim Starten und Stoppen lässt sich am Zeitverlauf des gemessenen Abgasvolumenstroms in Bild 3.1 anschaulich und detailliert zeigen. Beim **Startvorgang** werden die zuvor zur Vermeidung von Rückbrand entleerte Beschickungseinrichtung wieder aktiviert und Pellets in die Brennzzone befördert. Zum Zünden werden ein elektrisches Heizgebläse aktiviert, das Abgasgebläse auf Nenndrehzahl geschaltet und die Zuluftklappen geöffnet. Das Abgasgebläse bleibt während ca. 7 Minuten bei einer etwas verminderten Drehzahl, danach wird die Leistungsregelung des Pelletkessels freigegeben und der Kessel moduliert seine Leistung stufenlos in Funktion des Wärmeleistungsbedarfs. Wenn der Wärmebedarf unter die Minimalleistung des Pelletkessels sinkt, überschreitet die Kesseltemperatur den Ausschaltwert und es erfolgt ein **Stoppbefehl**, bei dem der Pelletnachschieber aus dem Vorratsbehälter gestoppt wird und die sich noch in der Beschickungsschnecke verbliebenen Pellets vollständig ausgebrannt. Das Abgasgebläse schaltet erst nach ca. 12 Minuten aus, obwohl die Pellets wesentlich rascher ausgebrannt sind. Anschliessend wartet der Pelletkessel auf den nächsten Startvorgang.

Modulierendes Takten

Modulierendes Takten ist wegen der stufenlosen Leistungsanpassung nur möglich, wenn die Leistungsabnahme geringer ist als die kleinste Wärmeleistung des Pelletkessels. Der Kessel kann sich der aktuellen Last stufenlos anpassen und kann somit entweder via Speicher oder direkt an ein Heizsystem gekoppelt sein.

Nicht-Modulierendes Takten

Bei den vorgängigen Untersuchungen am SPF trat hauptsächlich dieser Betriebszustand auf, je nach Situation mit unterschiedlich langen EIN-Phasen bei Nennleistung und AUS-Phasen. Dieses Betriebsverhalten ist offensichtlich typisch für den Betrieb des Pelletkessels mit einem Pufferspeicher, da der Ladevorgang des Speichers nur bei Nennleistungsbetrieb erfolgt und ein modulierender Betrieb in den aktuellen Regelkonzepten nicht möglich ist.

Durch entsprechende Vorgaben in der Kesselsteuerung und bei der Wärmeabnahme wurde der Kessel zu nicht-modulierendem Takten gebracht, indem die Leistung des Pelletkessels bei 100% fixiert wurde. Bild 3.1 zeigt, dass die Leistung des Kessels nach dem Starten bei Nennlast blieb, bis der Stoppbefehl nach dem Überschreiten der Kessel-Solltemperatur erfolgte.

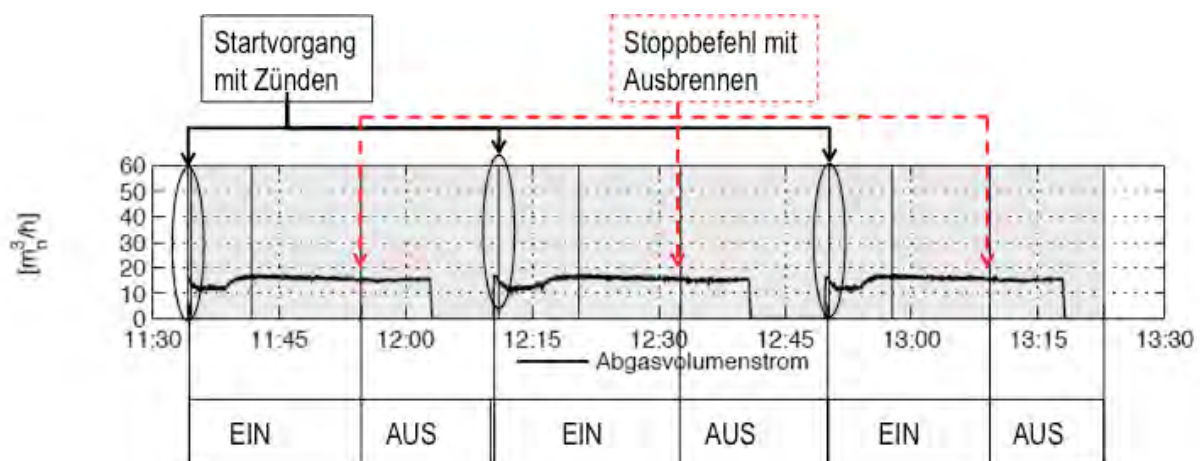


Bild 3.1 Charakteristisches Betriebsverhalten von Pelletkessel B, dargestellt am Zeitverlauf des Abgasvolumenstroms: Nicht-modulierendes Takten.

3.3 Typisches Emissionsverhalten

Das Emissionsverhalten lässt sich qualitativ am Zeitverlauf der verschiedenen Emissionen darstellen. Während bei stationärem Betrieb stabile Verbrennungsbedingungen zu gleichbleibenden Emissionen führen, sind die Verhältnisse bei taktendem Betrieb deutlich instabiler und führen vor allem beim Anfahren und Ausschalten zu erhöhten Emissionen. Diese Emissionspeaks sind auch in den Anzahlkonzentrationen und Partikeldurchmesser der quasikontinuierlichen Partikelmessungen sichtbar.

Die grauschattierten Bereiche sind Phasen, während derer gravimetrische Staubbmessungen durchgeführt und Mittelwerte berechnet wurden. Die aus dem Abgasvolumenstrom und den Konzentrationen berechneten Frachten zeigen deutlich, wann erhöhte Emissionen auftreten.

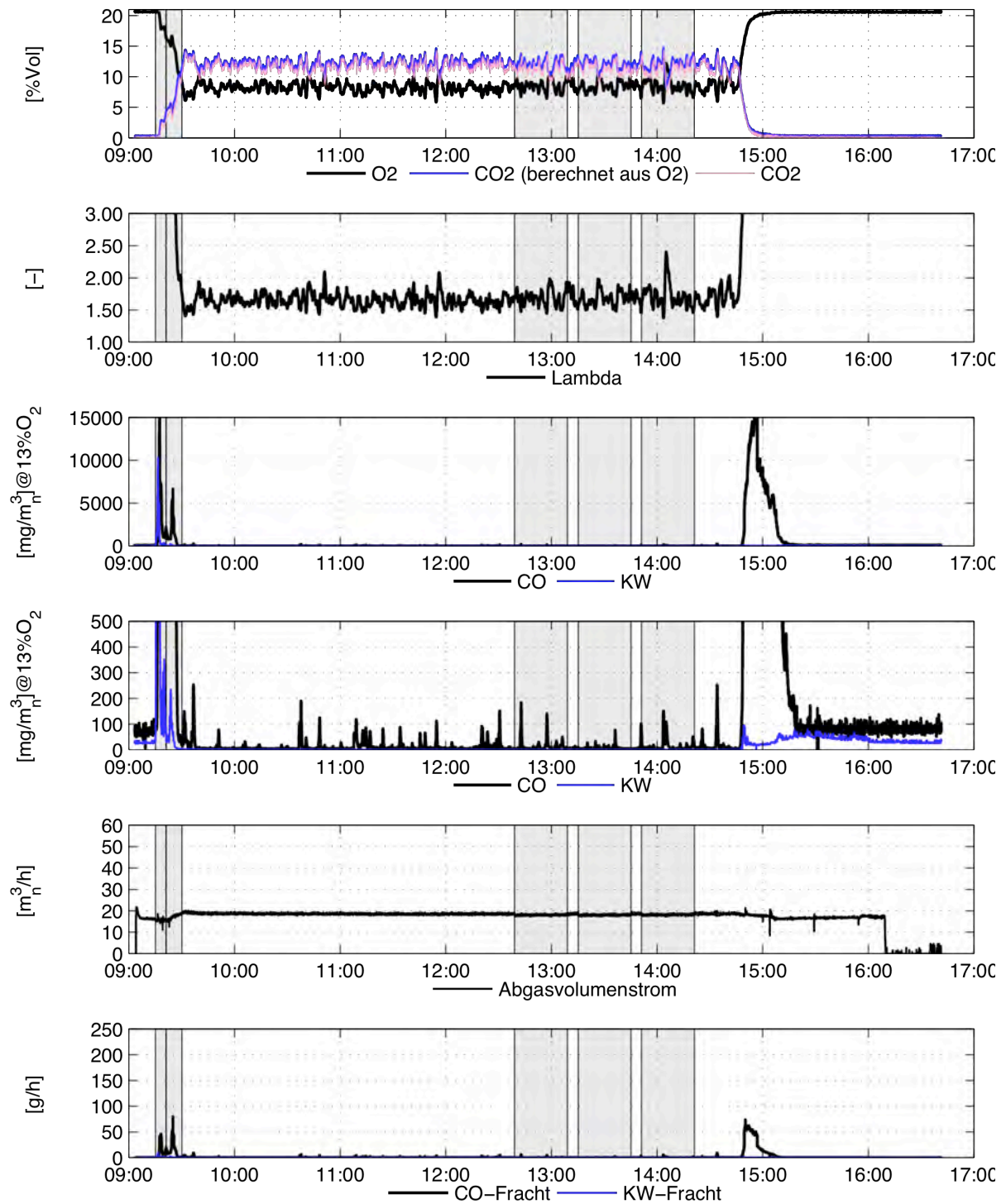


Bild 3.2 Emissionsverhalten von Pelletkessel B bei stationärem Betrieb bei Nennlast (100%).

1: O₂- und CO₂-Gehalt, 2: Luftüberschusszahl Lambda, 3: CO- und Kohlenwasserstoff(KW)-Gehalt bis 15'000 mg/m³ bei 13 Vol.-% O₂, 4: CO- und Kohlenwasserstoff(KW)-Gehalt bis 1'000 mg/m³ bei 13 Vol.-% O₂, 5: Abgasvolumenstrom, 6: CO- und KW-Fracht.
3 und 4 zeigen die gleichen Größen in unterschiedlichen Skalierungen.

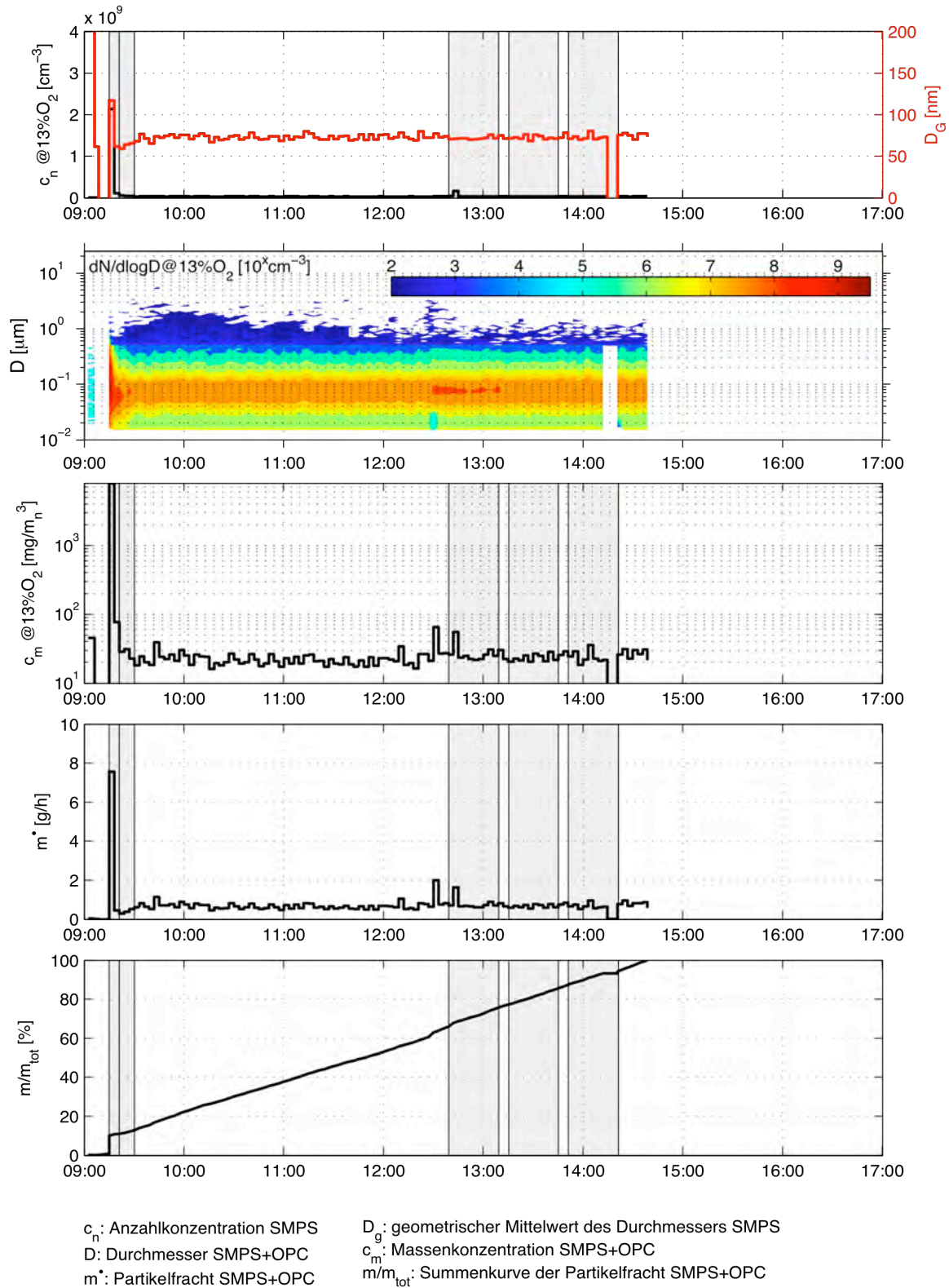


Bild 3.3 Emissionsverhalten von Pelletkessel B bei stationärem Betrieb bei Nennlast (100%).

1: Anzahlkonzentration und geometrischer Mittelwert des Durchmessers der Partikel (SMPS), 2: Anzahlkonzentration der Partikeldurchmesser (SMPS+OPC), 3: Massenkonzentration der Partikel (SMPS+OPC), 4: Partikelfracht (SMPS+OPC), 5: prozentuale Summenkurve der Partikelfracht (SMPS+OPC).

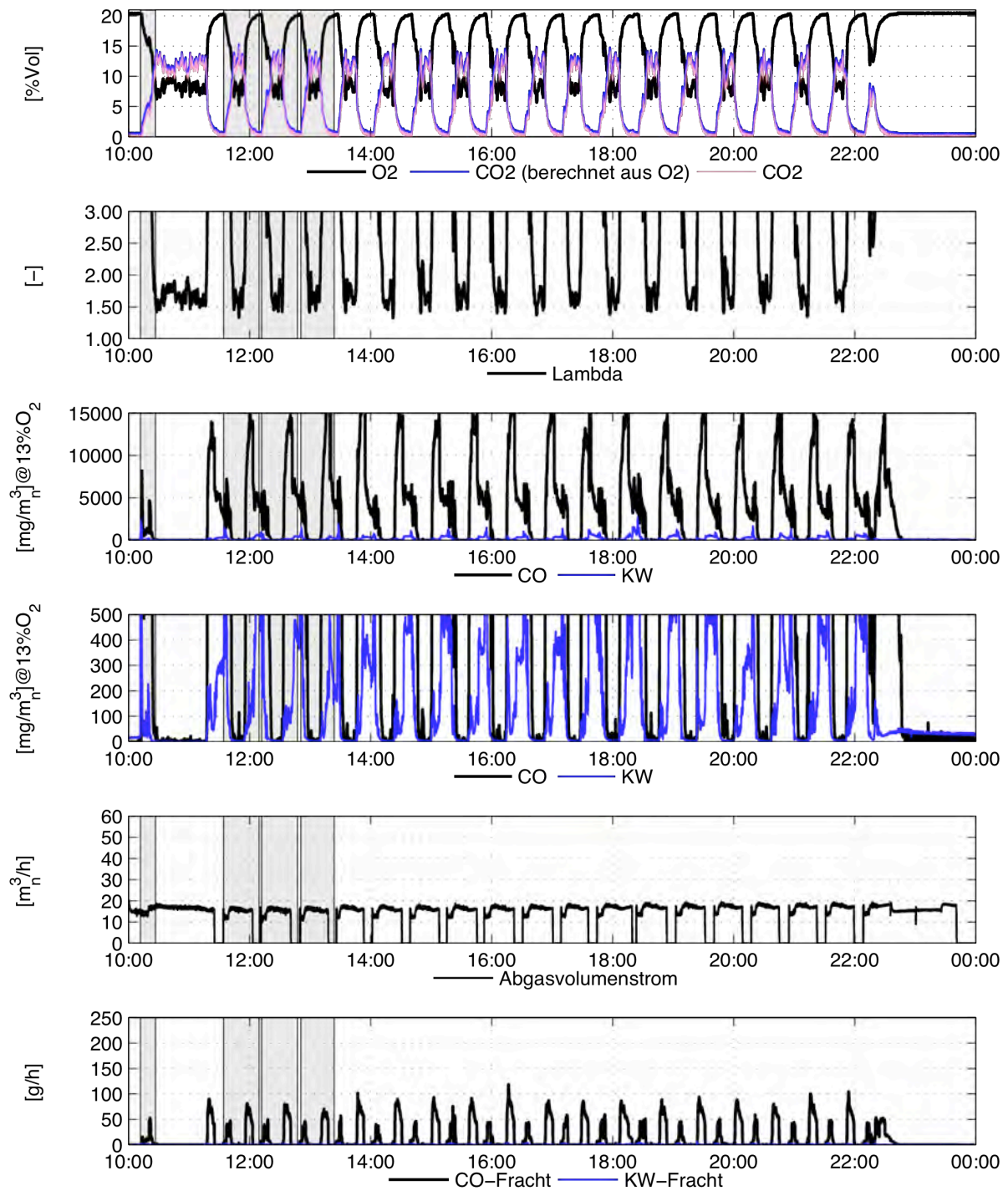


Bild 3.4

Emissionsverhalten von Pelletkessel B bei nicht-modulierendem Taktbetrieb.

1: O₂- und CO₂-Gehalt, 2: Luftüberschusszahl Lambda, 3: CO- und Kohlenwasserstoff(KW)-Gehalt bis 15'000 mg/m³ bei 13 Vol.-% O₂, 4: CO- und Kohlenwasserstoff(KW)-Gehalt bis 1'000 mg/m³ bei 13 Vol.-% O₂, 5: Abgasvolumenstrom, 6: CO- und KW-Fracht.
3 und 4 zeigen die gleichen Größen in unterschiedlichen Skalierungen.

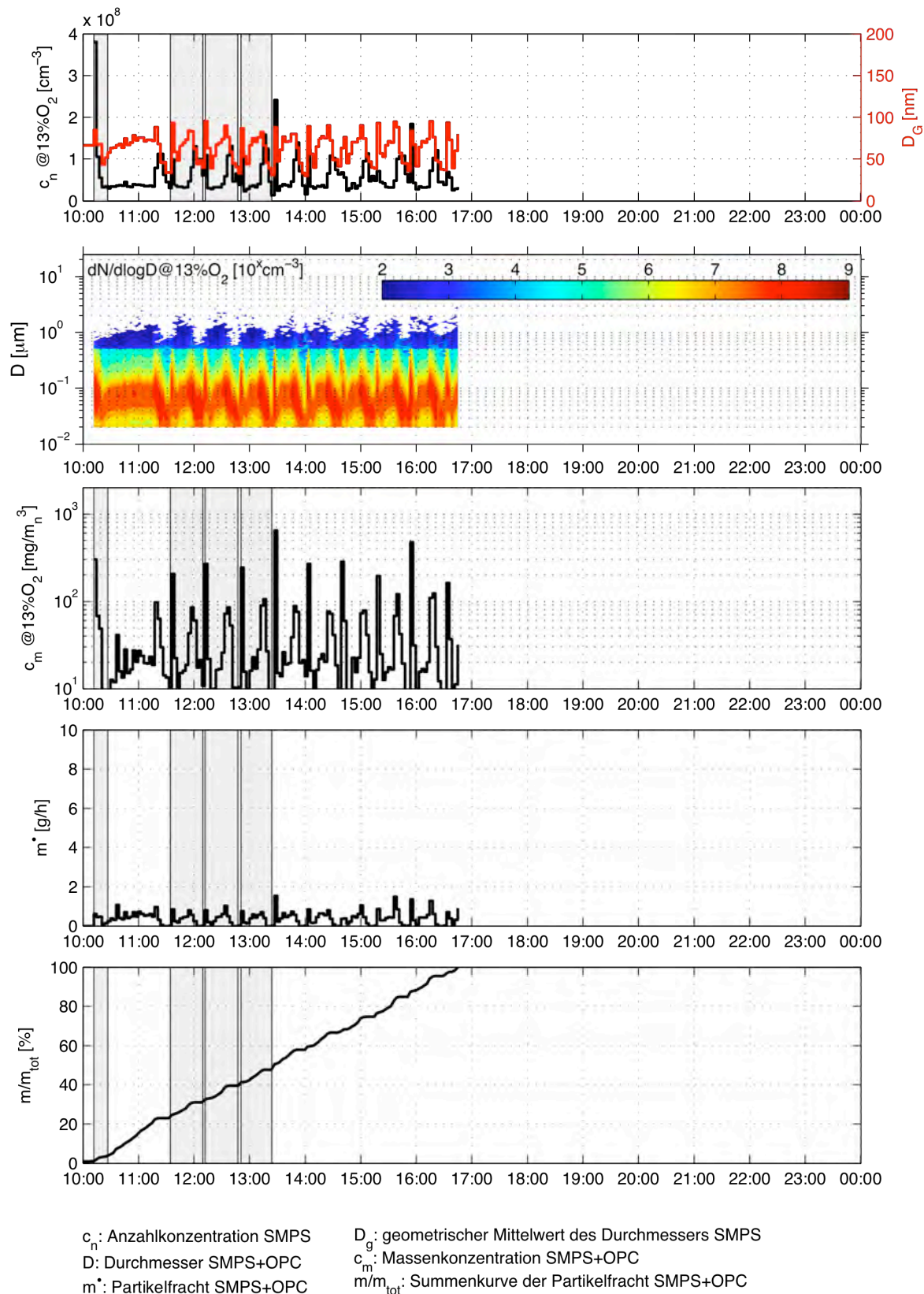


Bild 3.5 Emissionsverhalten bei nicht-modulierendem Taktbetrieb.

1: Anzahlkonzentration und geometrischer Mittelwert des Durchmessers der Partikel (SMPS), 2: Anzahlkonzentration der Partikeldurchmesser (SMPS+OPC), 3: Massenkonzentration der Partikel (SMPS+OPC), 4: Partikelfracht (SMPS+OPC), 5: prozentuale Summenkurve der Partikelfracht (SMPS+OPC).

3.4 Reproduzierbarkeit

Bild 3.6 zeigt eine Übersicht der Emissionsfaktoren in allen untersuchten Betriebszuständen. Die Fehlerbalken zeigen für jede Komponente die Standardabweichung der durchgeführten Versuche, worunter Versuchswiederholungen an unterschiedlichen Tagen und Mehrfachwiederholungen an einem Tag fallen. Die Reproduzierbarkeit kann als gut bezeichnet werden. Die Balken entsprechen den Zahlenwerten (Emissionsfaktoren) in Tabelle 3.2.

3.5 Staub (optische Beurteilung)

Bild 3.7 zeigt die Planfilter von Pelletkessel B im stationären Betrieb bei Nennlast, einer mittleren Leistung von 70% und der kleinsten Leistung von rund 30%, der erste Planfilter ist jeweils von der Kaltstartphase, die weiteren drei Planfilter vom stationären Betrieb. Die Planfilter der Kaltstartphase sind jeweils grau, die Planfilter bei 100% und 70% sind annähernd weiss. Dies ist ein Indiz, dass die Feststoffe sehr niedrigen Kohlenstoffgehalt aufweisen und vorwiegend aus Salzen bestehen. Die Planfilter bei 30% sind deutlich schwarz, obwohl im Verhältnis zu den anderen Planfiltern die gleiche Abgasmenge abgesaugt wurde. Der Kohlenstoffgehalt ist in diesem Fall viel höher, auch wenn der Feststoffgehalt noch vergleichsweise niedrig ist. Ursache für den hohen Kohlenstoffanteil im Staub bei Minimalleistung dürften aus dem Brennstoffbett mitgerissene Partikel sein, die nicht mehr vollständig ausbrennen können. Diese Kohlenstofffracht dürfte als Black Carbon (BC) gesundheits- und klimarelevant sein.

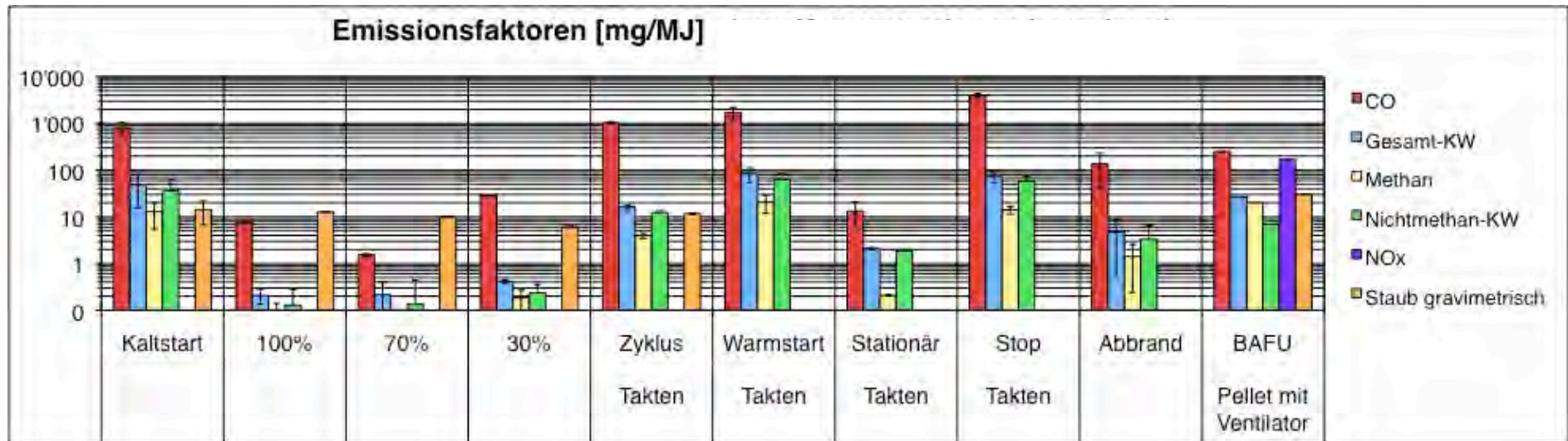


Bild 3.6 Reproduzierbarkeit der Versuche.

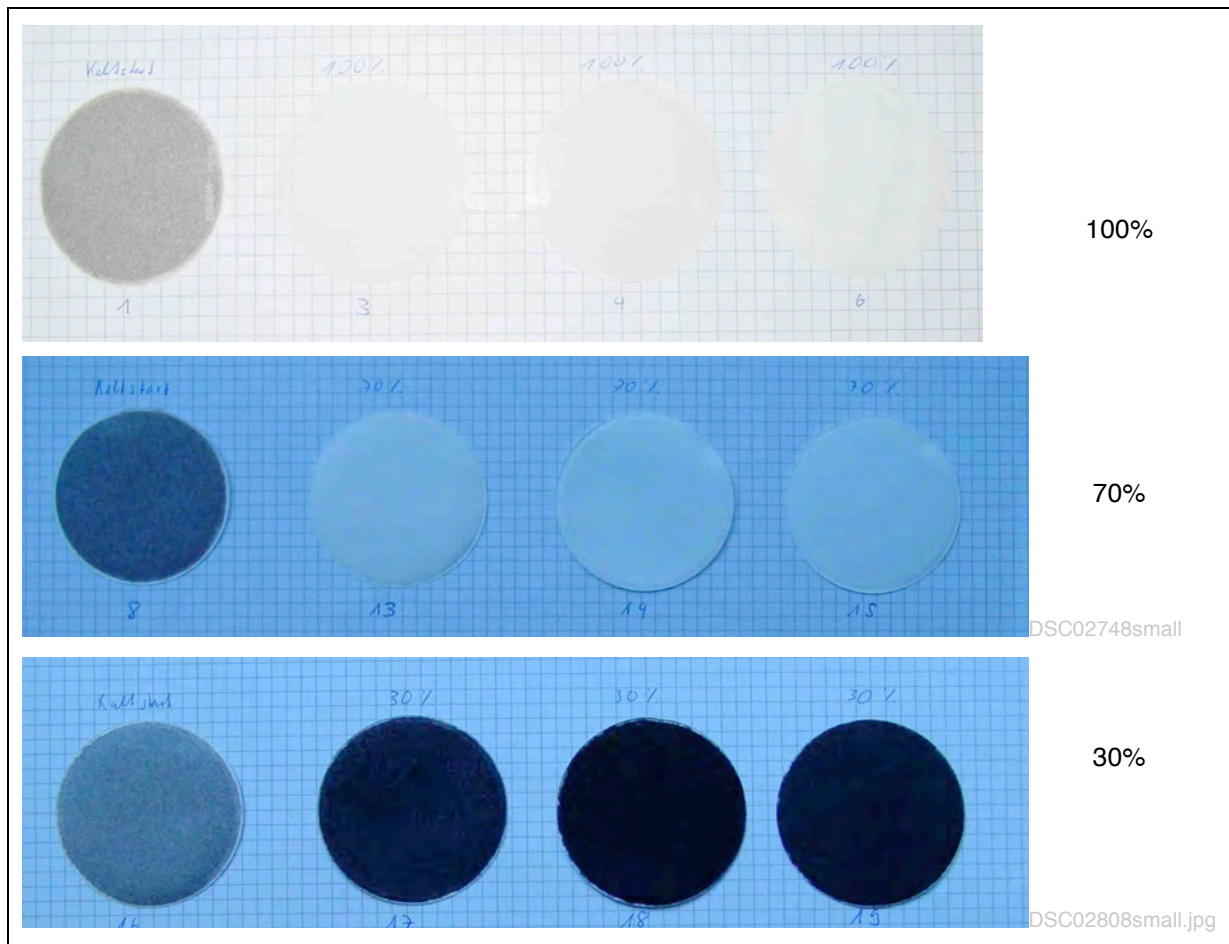


Bild 3.7 Planfilter von Pelletkessel B bei stationärem Betrieb.
 Oben Nennlast (100%), Mitte Mittellast (70%), Unten Teillast (30%);
 Erstes Planfilter jeweils Kaltstartphase, die weiteren drei Planfilter jeweils Wiederholungs-
 messungen bei stationärem Betrieb.

3.6 Aschezusammensetzung

Nach den Untersuchungen an der SPF und HSLU wurde die Aschezusammensetzung einer Asche-
 probe analysiert, die aus dem Aschebehälter des Kessels stammt. Dort sammeln sich die Rost- und
 ein Teil der Flugasche. Es ist zu beachten, dass die TOC-Angabe in Tabelle 3.1 zusätzlich zum orga-
 nischen Kohlenstoff (OC) auch den elementaren Kohlenstoff (EC) enthält.

Tabelle 3.1 Aschezusammensetzung bei Pelletkessel B.

Aschezusammensetzung			
Kohlenstoff organisch	TOC (=TC-TIC)	% v. TS, angegeben als C	9.09
Kohlenstoff anorganisch	TIC	% v. TS, angegeben als C	4.36

3.7 Emissionen und Emissionsfaktoren

Tabelle 3.2 Pelletkessel B: Zusammenfassung Emissionen und Emissionsfaktoren.

Pelletkessel Nr. 2

Phasen			Kaltstart	Stationär			Takten Zyklus	Warmstart	Takten Stationär	Stop	BAFU Pellet mit Ventilator	Gemäss Prüfbericht	
Gewichtete Konzentrationen				100%	70%	30%						Nenn-leistung	Kleinste Leistung
Lambda	—		8.1	1.7	1.8	2.2	3.1	4.6	1.7	7.4			
CO	CO mg/mn3 @13%O2		1253.9	11.9	2.4	44.2	1613.9	2643.6	20.8	6276.8	391		
Gesamt-KW	VOC mg/mn3 @13%O2		76.0	0.3	0.3	0.7	25.5	131.0	3.3	113.0	42		
Methan	CH4 mg/mn3 @13%O2		20.1	0.1	0.1	0.3	6.2	31.9	0.3	22.0	31		
Nichtmethan-KW	NMVOC mg/mn3 @13%O2		56.0	0.2	0.2	0.4	19.3	99.1	2.9	91.1	11		
NOx	NO2 mg/mn3 @13%O2		114.1	106.3	106.3	103.1	110.9	118.8	103.1	78.1	266		
Feststoff gravimetrisch			22	19	16	9	18				47		
Feinpartikel SMPS+OPC	Massenkonzentration mg/mn3 @13%O2		63.0	24.1	15.9	20.5	20.5						
Feinpartikel SMPS+OPC	Anzahlkonzentration 1/cmn3 @13%O2		8.50E+07	4.17E+07	2.35E+07	8.16E+06	3.63E+07						
Feinpartikel SMPS+OPC	Mittl. geometr. Partikeldurchmesser nm		66.1	72.7	74.7	82.4	59						

Phasen			Kaltstart	Stationär			Takten Zyklus	Warmstart	Takten Stationär	Stop	BAFU Pellet mit Ventilator	Gemäss Prüfbericht	
Emissionsfaktor aus gewichteten Konzentrationen				100%	70%	30%						Nenn-leistung	Kleinste Leistung
CO	CO	[mg/MJ]	802.5	7.6	1.5	28.3	1032.9	1691.9	13.3	4017.2	250.0		
Gesamt-KW	VOC	[mg/MJ]	48.7	0.2	0.2	0.4	16.3	83.8	2.1	72.3	27.0		
Methan	CH4	[mg/MJ]	12.8	0.1	0.1	0.2	4.0	20.4	0.2	14.1	20.0		
Nichtmethan-KW	NMVOC	[mg/MJ]	35.8	0.1	0.1	0.2	12.4	63.4	1.9	58.3	7.0		
NOx	NO2	[mg/MJ]	73	68	68	66	71	76	66	50	170		
Staub gravimetrisch		[mg/MJ]	14.3	12.7	10.0	6.0	11.7				30		

Phasen			Kaltstart	Stationär			Takten Zyklus	Warmstart	Takten Stationär	Stop
				100%	70%	30%				
Dauer		h	0.23	6.00	6.00	6.00	0.60	0.13	0.20	0.26
Dauer	gemessen	Min	14.1	360.0	360.0	360.0	35.9	8.0	12.2	15.8
Brennstoff zugeführt	berechnet via Abgasvolumenstrom	kg	0.190	15.30	10.50	4.00	0.67	0.102	0.464	0.107
Energie zugeführt	berechnet	MJ	3.28	264.38	181.44	69.12	11.64	1.76	8.02	1.85
Zugeführte Leistung	berechnet	kW	3.9	12.2	8.4	3.2	5.4	3.7	11.0	2.0

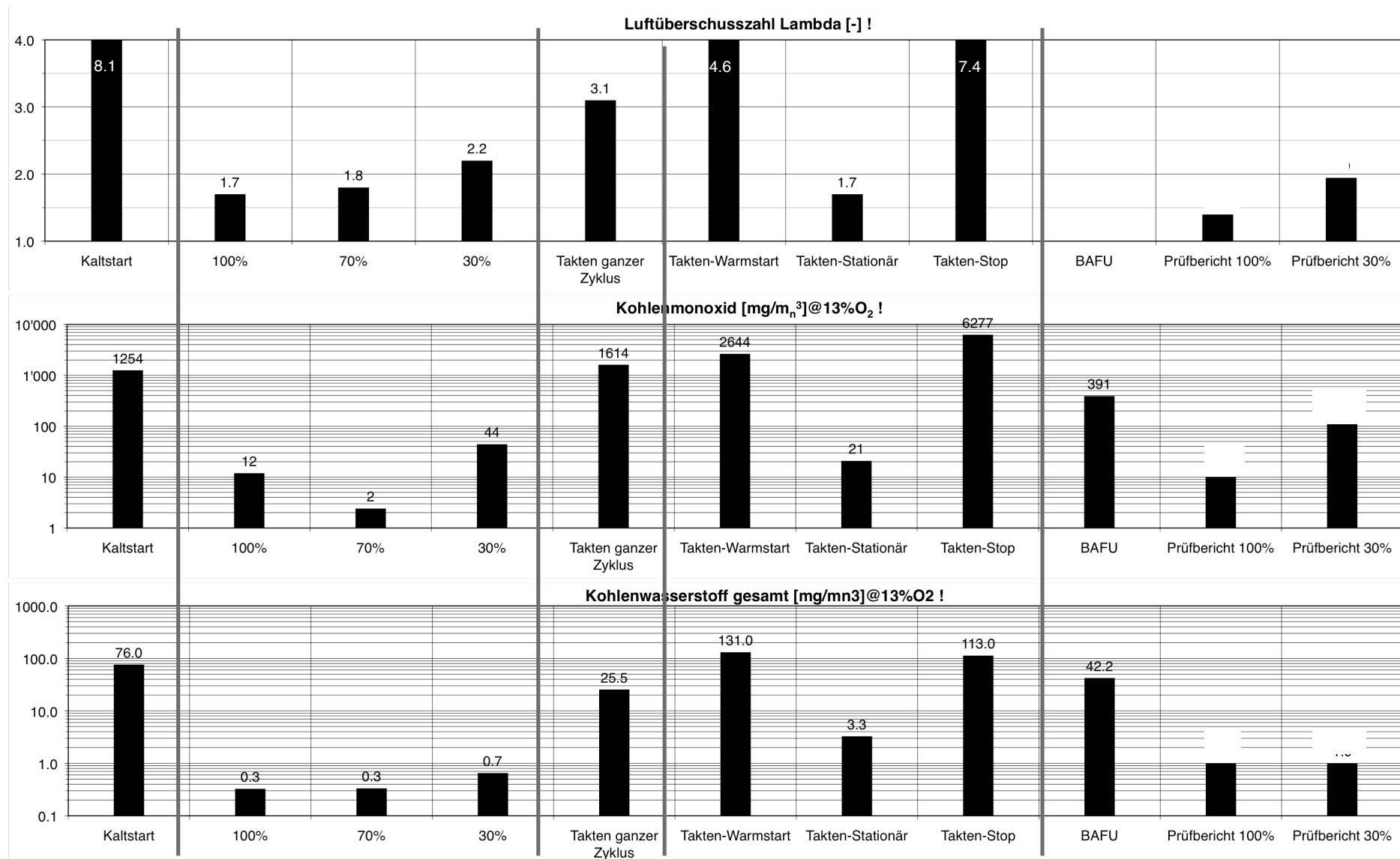


Bild 3.8 Pelletkessel B: Zusammenfassung der Resultate 1/3.

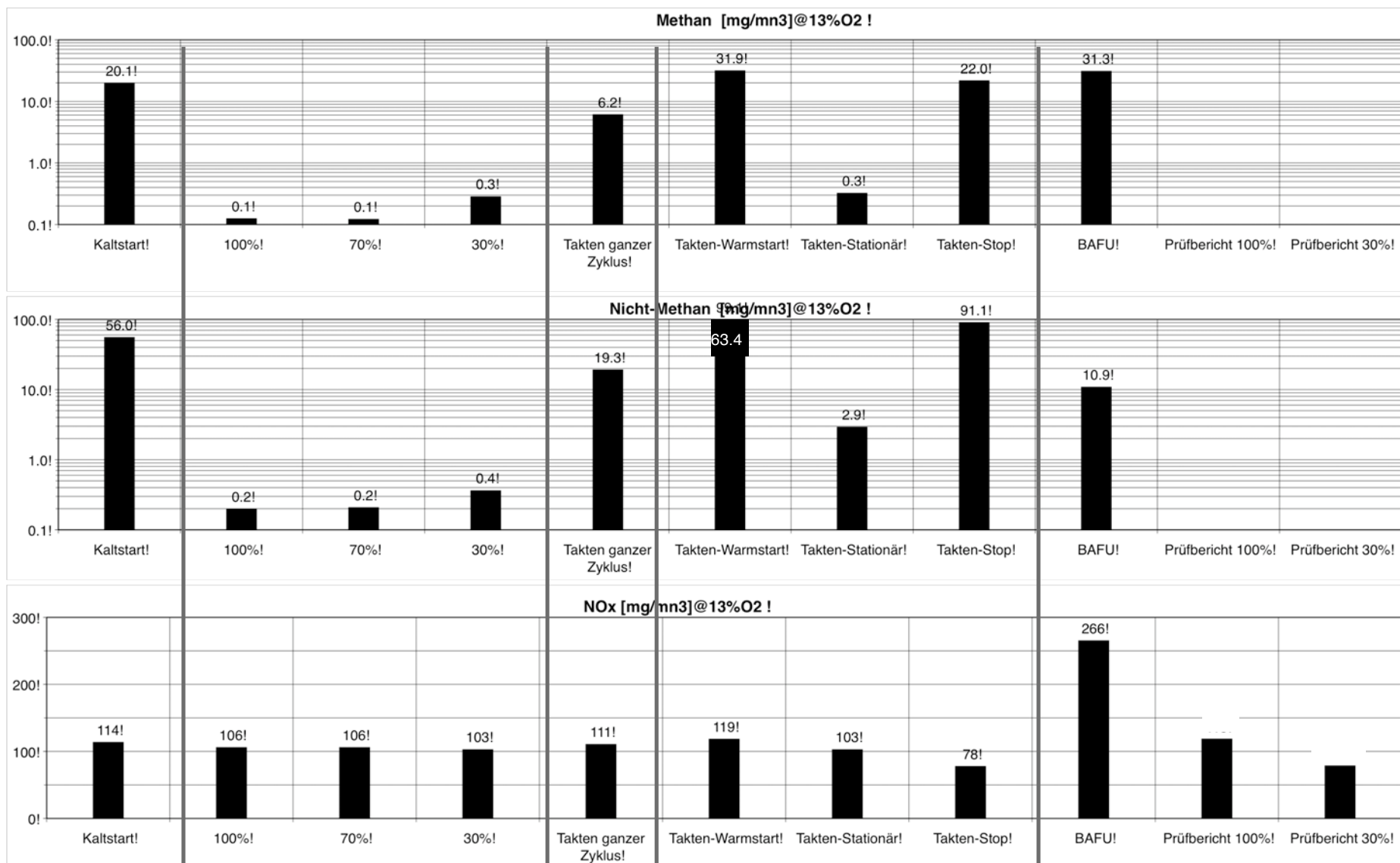


Bild 3.9 Pelletkessel B: Zusammenfassung der Resultate 2/3.

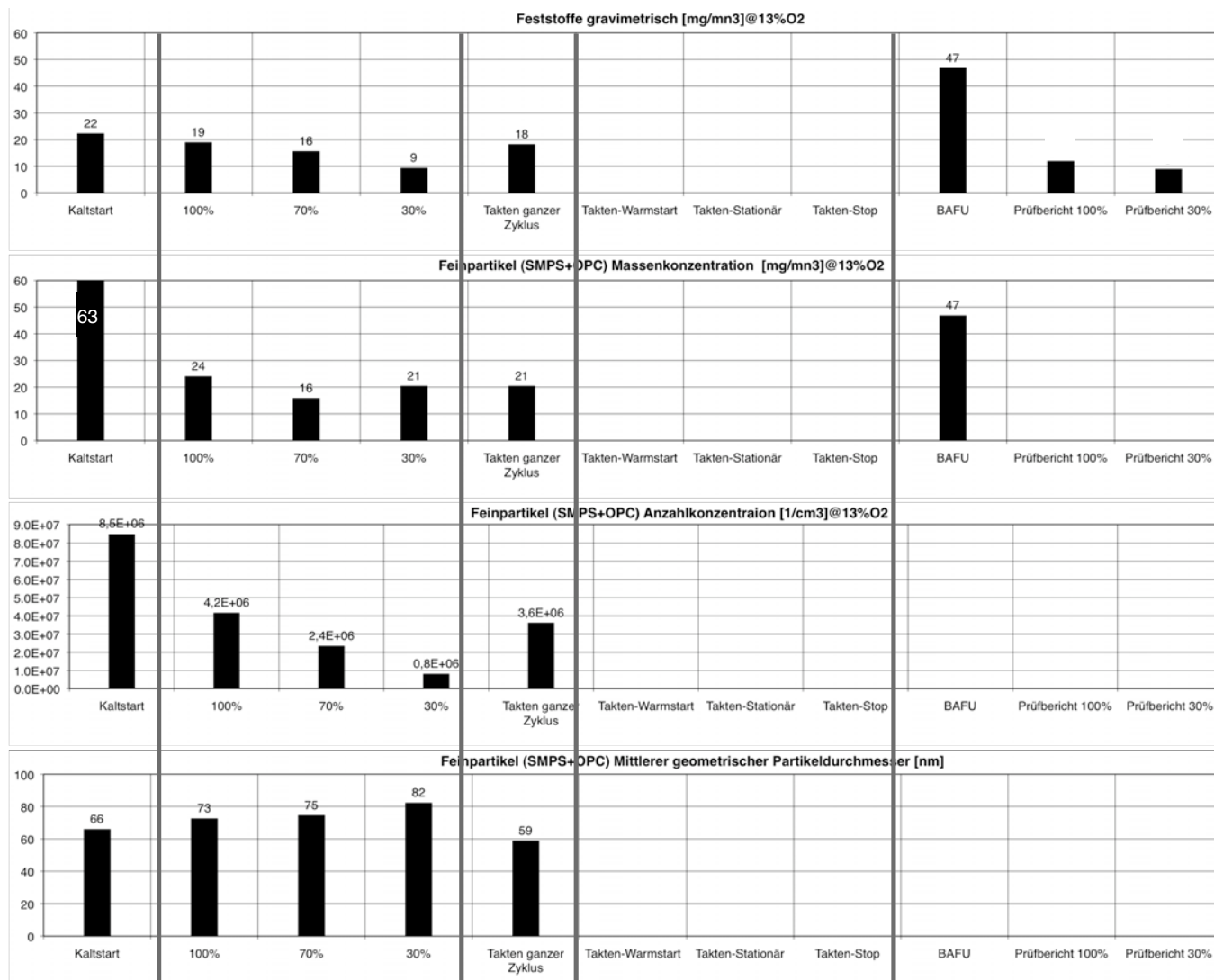


Bild 3.10 Pelletkessel B: Zusammenfassung der Resultate 3/3.

4 Schlussfolgerungen

Emissionsfaktoren unter simulierten Praxisbedingungen im Labor im Vergleich zu BAFU-Werten

- Die zwei modernen Pelletkessel verursachen bei stationärem Vollast-Betrieb Emissionen an Staub, CO und VOC, die deutlich unter den Emissionsfaktoren des BAFU liegen.
- Ein Betrieb mit stationärer Teillast verursacht einen Anstieg der gasförmigen unverbrannten Schadstoffe und zwar vor allem an Kohlenmonoxid und in geringerem Mass an VOC. Die Feststoffemissionen steigen dagegen bei stationärer Teillast nicht oder nur geringfügig an. Bei stationärer Teillast bis zu 50% der Maximallast bleiben die Emissionen jedoch insgesamt auf tiefem Niveau deutlich unter dem Emissionsfaktor des BAFU. Bei einem der beiden Kessel wurde bei stationärer Teillast mit 30% der Maximallast ein deutlicher Anstieg der CO-Emissionen über den Emissionsfaktor des BAFU beobachtet.
- Da die Emissionen während der Startphase kurzfristig deutlich erhöht sind, sind die Emissionsfaktoren bei taktendem Betrieb von der Laufzeit der Kessel abhängig. Ab Laufzeiten von rund 60 Minuten werden die Emissionsfaktoren des BAFU auch bei getaktetem Betrieb unterschritten. Deutlich kürzere Laufzeiten der Kessel führen dagegen zu deutlich erhöhten Gesamtemissionen.
- Die Startphase führt erwartungsgemäss zu einem Peak der Schadstoffemissionen. Dies gilt nicht nur für den Kaltstart, sondern in ähnlichem oder nur geringfügig reduziertem Mass auch für den Warmstart. Ausgeprägte Emissionspeaks mit einem Anstieg um mehr als einen Faktor 10 und damit von sehr tiefen auf relevante Emissionsniveaus treten für CO und VOC auf. Der Anstieg der Feststoffemissionen ist weniger stark ausgeprägt als für CO und VOC, dennoch werden bei kurzen Laufzeiten von weniger als ca. 20 Minuten die Emissionsfaktoren des BAFU um einen Faktor 5 überschritten. Vor diesem Hintergrund wird ersichtlich, dass Pelletkessel auf intelligente Art und Weise in das Heizsystem eingebunden sein müssen. Sowohl die Kesselregelung wie auch die hydraulische Einbindung spielen hierbei eine zentrale Rolle. Am SPF konnte gezeigt werden, dass bei den untersuchten Pelletkessel-basierten Heizsystemen (mit und ohne Pufferspeicher) praktisch immer übermässiges Takten auftrat [3]. Einfache Optimierungen an der Regelung bzw. an der hydraulischen Einbindung würden es jedoch ermöglichen, die Modulationsbreite der Geräte besser auszunutzen, um längere Laufzeiten zu erreichen und die Jahres-Emissionsfrachten sehr tief zu halten.
- Die Emissionen an NO_x liegen bei allen untersuchten Betriebszuständen unter den vom BAFU verwendeten Emissionsfaktoren.
- Lastwechsel wurden an Pelletkessel A untersucht. Sinkende Lastwechsel von 100% --> 70% oder von 70% --> 50% zeigen keine signifikant höheren Emissionen. Steigende Lastwechsel von 70% --> 100% oder von 50% --> 70% zeigen nur leicht höhere Feststoffemissionen. Abruptes Ausschalten führt zu markant höheren Emissionen. Es besteht ein Optimierungspotenzial um Geruchsemissionen nach dem Ausschalten zu vermindern, indem z.B. das Gebläse etwas früher ausgeschaltet wird, die Primärluftzufuhr unterbrochen wird und anschliessend die Sekundärluftzufuhr erst verzögert nach z.B. 5 Minuten geschlossen wird.

Im einzelnen wurden folgende Emissionswerte gefunden:

- BAFU-Wert für CO: 250 mg/MJ:
 - Dieser wird von Pelletkessel A bei stationärem Betrieb nur bei 100% und 70% Leistung eingehalten (120 bzw. 200 mg/MJ). Bei taktendem Betrieb mit Laufzeiten von 70 Minuten beträgt er

- rund das 2-fache und bei Minimalleistung bis zum 3-fachen des Emissionsfaktors (370...780 bzw. 550 mg/MJ).
- Pelletkessel B unterschreitet den Emissionsfaktor für CO bei stationärem Betrieb um das 10- bis 20-fache (5...25 mg/MJ). Bei taktendem Betrieb mit Laufzeiten von 35 Minuten betragen die Emissionen rund das 4-fache des Emissionsfaktors (ca. 1000 mg/MJ).
 - Wenn die stationäre EIN-Phase während des Taktbetriebs im Bereich einer Stunde liegt, wird der Emissionsfaktor für CO auch bei taktendem Betrieb gerade eingehalten.
 - BAFU-Wert für VOC: 27 mg/MJ (Gesamt-Kohlenwasserstoffe KW)
 - Pelletkessel A: bei stationärem Betrieb: 1...11 mg/MJ, bei taktendem Betrieb mit Laufzeiten von 70 Minuten ca. 13 mg/MJ.
 - Pelletkessel B: bei stationärem Betrieb: <1 mg/MJ, bei taktendem Betrieb mit Laufzeiten von 35 Minuten ca. 16 mg/MJ.
 - Die Emissionsfaktoren für VOC werden somit um mindestens das 2-fache unterschritten.
 - BAFU-Werte für CH₄: 20 mg/MJ (Methan)
 - Pelletkessel A: bei stationärem Betrieb: 1 mg/MJ, bei taktendem Betrieb mit Laufzeiten von 70 Minuten ca. 5 mg/MJ.
 - Pelletkessel B: bei stationärem Betrieb: <1 mg/MJ, bei taktendem Betrieb mit Laufzeiten von 35 Minuten ca. 4 mg/MJ.
 - Die Emissionsfaktoren für CH₄ werden somit um mindestens das 4-fache unterschritten.
 - BAFU-Werte für NMVOC: 7 mg/MJ (Nichtmethan-KW). Diese Werte ergeben sich als Differenz von VOC und CH₄. Entsprechend gilt:
 - Pelletkessel A: bei stationärem Betrieb: 1...11 mg/MJ, bei taktendem Betrieb mit Laufzeiten von 70 Minuten ca. 8 mg/MJ.
 - Pelletkessel B: bei stationärem Betrieb: <1 mg/MJ, bei taktendem Betrieb mit Laufzeiten von 35 Minuten ca. 12 mg/MJ.
 - Die Emissionsfaktoren für NMVOC werden erreicht oder knapp überschritten.
 - Aufteilung der VOC:
 - Der CH₄-Anteil an VOC beträgt rund ein Viertel im Vergleich zur Annahme im Arbeitsblatt von 20:27. Entsprechend beträgt der NMVOC-Anteil etwa drei Viertel statt 7:27.
 - BAFU-Wert für NO_x angegeben als NO₂: 170 mg/MJ (Stickoxide)
 - Pelletkessel A ca. 100 mg/MJ, Pelletkessel B ca. 70 mg/MJ.
 - BAFU-Wert für Staub: 30 mg/MJ (Feststoff, gravimetrisch)
 - Pelletkessel A: bei stationärem Betrieb: 4...13 mg/MJ, bei taktendem Betrieb mit Laufzeiten von 70 Minuten ca. 5 mg/MJ.
 - Pelletkessel B: bei stationärem Betrieb: 6...13 mg/MJ, bei taktendem Betrieb mit Laufzeiten von 35 Minuten ca. 12 mg/MJ.

Taktbetrieb

- Die Emissionsfaktoren für CO und VOC sind bei jedem Start- und Stoppvorgang einige Minuten lang bedeutend höher als die Werte bei stationärem Betrieb. Bei einer Mittelung über die ersten rund 10...15 Minuten, bis der Verbrennungsvorgang annähernd stationär ist, können die Werte zwischen 5- bis 100-mal höher sein als bei stationären Bedingungen.
- Die Emissionsfaktoren für Staub sind bei jedem Start- und Stoppvorgang ebenfalls kurzfristig deutlich höher als die Werte bei stationärem Betrieb. Bei einer Mittelung über die ersten rund 10...15 Minuten sind die Werte dennoch nur moderat höher als bei stationären Bedingungen.

- Wenn die stationäre Phase des Taktens rund eine Stunde dauert bzw. die gesamte Laufzeit rund 80 Minuten beträgt, werden die Emissionsfaktoren für alle Stoffe eingehalten. Sind die stationären Phasen kürzer oder treten gar nicht auf, dann werden die Emissionsfaktoren für CO um das bis zu 10...20-fache und für VOC um das bis zu 5-fache (davon Nichtmethan um das 10-fache) überschritten. Beim Staub ist aufgrund der quasikontinuierlichen Messung der Partikelanzahl und Grössenverteilung und der daraus berechneten Massenkonzentration davon auszugehen, dass der Emissionsfaktor um das ca. 10-fache überschritten wird.
- Das Verhalten kann detailliert am Zeitverlauf der Frachten beurteilt werden.
- Bei einer Wärmeabnahme von ca. 30% der Nenn-Wärmeleistung bei Pelletkessel A dauert die Startphase ca. 15 Minuten, die stationäre Phase rund 22 Minuten und die Stopphase bis zum nächsten Starten ca. 10 Minuten. Der gesamte Taktzyklus dauert somit ca. 47 Minuten. Bei einer Wärmeabnahme von ca. 30% der Nenn-Wärmeleistung bei Pelletkessel B dauert die Startphase ca. 8 Minuten, die stationäre Phase rund 12 Minuten und die Stopphase bis zum nächsten Starten ca. 15 Minuten. Der gesamte Taktzyklus dauert somit ca. 35 Minuten. Aus der Praxis ist bekannt, dass je nach Systemintegration von Kesselregelung und hydraulischer Einbindung mit oder ohne Pufferspeicher in der Praxis auch deutliche kürzere Taktzyklen von gegen 15 Minuten auftreten können.
- Bei einer Wärmeabnahme von ca. 30% der Nenn-Wärmeleistung bei Pelletkessel A unterscheidet sich modulierendes Takten nur unwesentlich von nicht-modulierendem Takten, das leicht höhere Nichtmethanwerte aufweist. Nur bei den Feinpartikelmessungen weist das nicht-modulierende Takten signifikant höhere Massenkonzentration und grössere Partikeldurchmesser auf, was hauptsächlich auf das Ausschalten zurückzuführen ist.

Emissionsfaktoren unter stationären Prüfstandsbedingungen (100% und 30%) im Labor im Vergleich zu Prüfstands-Werten

- Pelletkessel A überschreitet in der Praxis die Prüfstandswerte für CO und VOC um das 5-fache, für Staub um das 2-fache.
- Pelletkessel B erreicht in der Praxis annähernd die gleichen Emissionswerte bzw. Emissionsfaktoren wie bei der Typenprüfung, nur die Luftüberschusszahl Lambda wird leicht überschritten.

Staubgehalt und Aschezusammensetzung

- Moderne Pelletkessel erreichen unter Praxisbedingungen tiefe Staubwerte im Bereich von 10 ...25 mg/m³ bei 13 Vol.-% O₂. Bei Pelletkessel A sind die Planfilter der gravimetrischen Probe-nahme grau bis schwarz, was auf einen hohen Anteil an unverbranntem Kohlenstoff hindeutet. Bei Pelletkessel B sind die Planfilter bei Nennleistung und mittlerer Leistung annähernd weiss, was auf einen niedrigen Anteil an unverbranntem Kohlenstoff hindeutet.
- Die Ascheproben von Pelletkessel A und B weisen einen ähnlichen Anteil von ca. 4 %v. TS an-organischem Kohlenstoff auf. Der organische Kohlenstoffanteil unterscheidet sich bei den beiden Pelletkesseln, bei Kessel B ist er mit 9 %v. TS deutlich höher als bei Kessel A mit 0.5 %v. TS.
- Aus dem Brennstoffbett mitgerissene Partikel, die nicht mehr vollständig ausbrennen können, verursachen einen hohen Kohlenstoffanteil im Staub. Eine gleichmässig verteilte Primärluftzufuhr mit geringer Strömungsgeschwindigkeit ins Brennstoffbett könnte dies verbessern.

Einfluss des Brennstoffs

- Für die Versuche wurden handelsübliche Holzpellets nach DIN Plus verwendet. Die hier aus-gewiesenen Emissionsfaktoren haben nur Gültigkeit für Holzpellets der verwendeten Brenn-stoffqualität.
- Bei Bewertung der Emissionsfaktoren ist zu beachten, dass die Emissionswerte auch durch die Brennstoffqualität beeinflusst werden. Dies gilt in besonderem Mass für die NO_x-Emis-

sionen, welche vom Stickstoffgehalt des Brennstoffs abhängig sind und deshalb auch von den hier gefundenen Werten abweichen können.

- Die Emissionen an Feinstaub können vor allem bei erhöhtem Aschegehalt ansteigen.

Systemverhalten

- Um das Systemverhalten eines Pelletkessels im Sinne von weniger Taktbetrieb und mehr modulierender Betrieb zu verbessern, sollte die Kesselsteuerung die hydraulische Einbindung und unterschiedliche Lastanforderungen (Raumheizung, Brauchwarmwasser) besser integrieren.

5 Anhang

5.1 Randbedingungen

Die Kaminanlage ermöglicht das Vorgeben eines beliebigen Kaminzugs. Die beiden Pelletkessel wurden mit einem konstanten Kaminzug von 12 Pa betrieben. Als Brennstoff wurden handelsübliche Pellets (Hersteller AEK, Vertrieb LANDI Schweiz; Swiss Pellets nach DINplus, Säcke à 15 kg) verwendet. Der Wassergehalt betrug 8 Gew.-%, der daraus berechnete Heizwert betrug rund 4.8 kWh/kg oder 17.2 MJ/kg.

5.2 Wärmeabnahme

Die beiden Pelletkessel wurden gemäss Bild 5.1 hydraulisch eingebunden. Mit diesem Konzept der Wärmeabnahme wurde auch die Rücklaufhochhaltung sicher gestellt. Pelletkessel B war mit einer eigenen Kesselpumpe und einem Dreiwegeventil zur Rücklaufhochhaltung ausgerüstet. Das Dreiwegeventil wurde in offener Position fixiert und die Kesselpumpe wurde ausser Betrieb gesetzt. Das Durchströmen des Kessels wurde mit der Kesselkreispumpe der Wärmeabnahmeeinheit sicher gestellt. Der Durchfluss im Kesselkreis wurde entsprechen der hydraulischen Auslegung gemäss Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2 konstant auf je rund 10 Liter/min eingestellt. Der Durchfluss im Kaltwasserkreis wurde jeweils dem zu untersuchenden Betriebszustand angepasst.

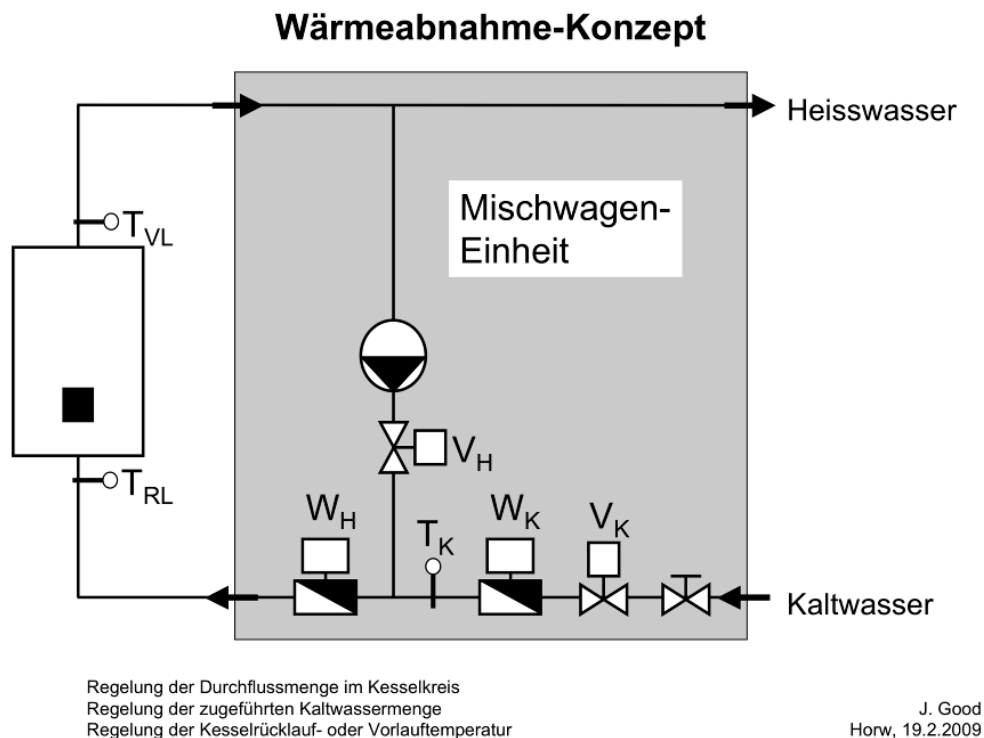


Bild 5.1 Hydraulische Einbindung.

Tabelle 5.1 Hydraulische Auslegung von Pelletkessel A.

Kesselkreis		100%	70%	50%
Nennleistung		10 kW	7 kW	5 kW
Vorlauf	T_VL	75 °C	70.5 °C	67.5 °C
Rücklauf	T_RL	60 °C	60 °C	60 °C
Mitteltemperatur	T_Wm	67.5 °C	65.25 °C	63.75 °C
Delta-T		15 °C	10.5 °C	7.5 °C
Durchfluss	m_W	0.159 kg/s	0.159 kg/s	0.159 kg/s
Dichte		0.9786 kg/dm3	0.9797 kg/dm3	0.9805 kg/dm3
		0.163 dm3/s	0.163 dm3/s	0.163 dm3/s
		9.8 dm3/min	9.8 dm3/min	9.8 dm3/min
		586.7 dm3/h	586.0 dm3/h	585.6 dm3/h
		0.587 m3/h	0.586 m3/h	0.586 m3/h
Leistung	Q_	10.0 KW	7.0 KW	5.0 KW
Wasser				
Temperatur		60 K		
Spez. Wärmekapazität	cp_W	4.18 kJ/kgK		
Dichte	roh_W	0.9786 kg/dm3		
Kaltwasserkreis				
Nennleistung		10 kW	7 kW	5 kW
Vorlauf		75 °C	70.5 °C	67.5 °C
Kaltwasser	T_KW	14 °C	14 °C	14 °C
Mitteltemperatur		44.5 °C	42.25 °C	40.75 °C
Delta-T		61 °C	56.5 °C	53.5 °C
Durchfluss	m_KW	0.039 kg/s	0.030 kg/s	0.022 kg/s
Dichte		0.9893 kg/dm3	0.9903 kg/dm3	0.9909 kg/dm3
		0.040 dm3/s	0.030 dm3/s	0.023 dm3/s
		2.4 dm3/min	1.8 dm3/min	1.4 dm3/min
		142.7 dm3/h	107.8 dm3/h	81.2 dm3/h
		0.143 m3/h	0.108 m3/h	0.081 m3/h
Leistung abgeführt		10.0 KW	7.0 KW	5.0 KW

Tabelle 5.2 Hydraulische Auslegung von Pelletkessel B.

Kesselkreis		100%	70%	30%
Nennleistung		11 kW	7.7 kW	3.3 kW
Vorlauf	T_VL	60 °C	55.5 °C	49.5 °C
Rücklauf	T_RL	45 °C	45 °C	45 °C
Mitteltemperatur	T_Wm	52.5 °C	50.25 °C	47.25 °C
Delta-T		15 °C	10.5 °C	4.5 °C
Durchfluss	m_W	0.175 kg/s	0.175 kg/s	0.175 kg/s
Dichte		0.9859 kg/dm3	0.9869 kg/dm3	0.9882 kg/dm3
		0.178 dm3/s	0.178 dm3/s	0.178 dm3/s
		10.7 dm3/min	10.7 dm3/min	10.7 dm3/min
		640.6 dm3/h	640.0 dm3/h	639.1 dm3/h
		0.641 m3/h	0.640 m3/h	0.639 m3/h
Leistung	Q_	11.0 KW	7.7 KW	3.3 KW
Wasser				
Temperatur		60 K		
Spez. Wärmekapazität	cp_W	4.18 kJ/kgK		
Dichte	roh_W	0.9859 kg/dm3		
Kaltwasserkreis				
Nennleistung		11 kW	7.7 kW	3.3 kW
Vorlauf		60 °C	55.5 °C	49.5 °C
Kaltwasser	T_KW	11.6 °C	11.6 °C	11.6 °C
Mitteltemperatur		35.8 °C	33.55 °C	30.55 °C
Delta-T		48.4 °C	43.9 °C	37.9 °C
Durchfluss	m_KW	0.054 kg/s	0.042 kg/s	0.021 kg/s
Dichte		0.9928 kg/dm3	0.9936 kg/dm3	0.9947 kg/dm3
		0.055 dm3/s	0.042 dm3/s	0.021 dm3/s
		3.3 dm3/min	2.5 dm3/min	1.3 dm3/min
		197.2 dm3/h	152.0 dm3/h	75.4 dm3/h
		0.197 m3/h	0.152 m3/h	0.075 m3/h
Leistung abgeführt		11.0 KW	7.7 KW	3.3 KW

5.3 Messtechnik

5.3.1 Geräteanordnung

Die Messtechnik der vorliegenden Studie umfassen die Bestimmung von:

- Abgaszusammensetzung und Hilfsgrößen, kontinuierlich
- O₂, CO₂, CO, NO_x und Gesamt-Kohlenwasserstoffe (VOC, Methan/Nichtmethan)
- Abgastemperatur, Abgasgeschwindigkeit, Kaminzug, Abgasvolumenstrom
- Luftüberschuss, feuerungstechnischer Wirkungsgrad,
- Vor- und Rücklauftemperatur, Durchflussmengen, Feuerungswärmeleistung, Kesselleistung
- Gesamtstaub gravimetrisch, diskontinuierliche Probenahme auf Planfilter (Probenahmedauer i.d.R. 15 Minuten oder 30 Minuten)
- Korngrössenspektrum und Anzahlverteilung (SMPS, OPC) bei einzelnen Betriebsphasen, quasikontinuierlich (3 Minuten). Diese Daten werden zur Dokumentation auf Massenkonzentration umgerechnet.

Kaminanlage: Die Kaminanlage steht senkrecht über dem Pelletkessel. Die Messstellen sind an einer senkrechten Messstrecke in Anlehnung an EN 303-4 angeordnet (Bild 5.2). In der vertikale Messstrecke mit einem Durchmesser von 150 mm sind Messports für gravimetrische Staubbmessung, Abgaszusammensetzung, Abgastemperatur und Partikelanalyse angebracht. Nach einer Verengung des Abgaskanals zur Messung der Gasgeschwindigkeit auch bei kleiner Leistung sind eine Drosselklappe, eine Nebenluftöffnung und ein Seitenkanalverdichter zur Regelung des Kaminzugs eingebaut:

1. Messport: Probenahme für gravimetrische Staubbmessung
2. Messport: Netzmessung für Abgastemperatur und Probenahme für Abgaszusammensetzung
3. Messport: Kaminzug
4. Messport: Probenahme für Partikelanalyse (Feinstaubmesstechnik)
5. Messport: frei
6. Messport: Pitotrohr für Geschwindigkeitsmessung
7. Messport: Abgastemperatur für Umrechnung des Abgasvolumenstroms auf Normbedingungen

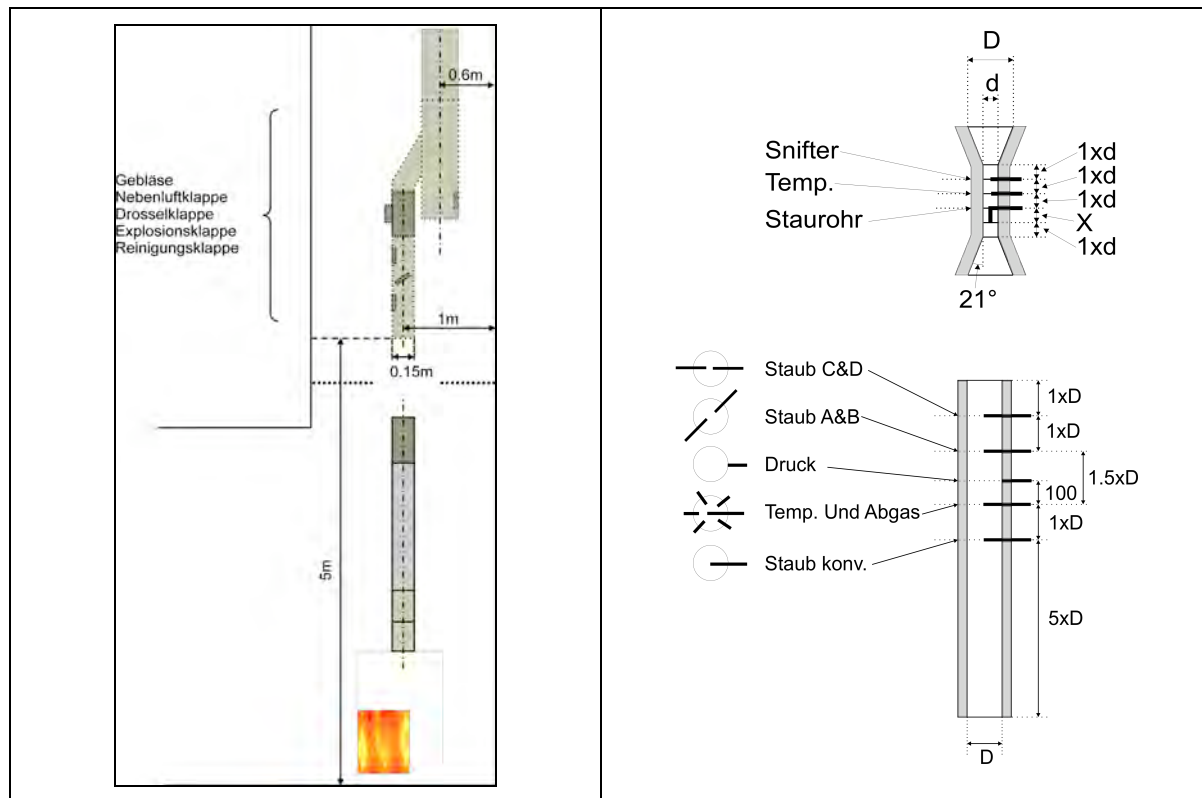


Bild 5.2 Anordnung der Messstellen an der Kaminanlage.

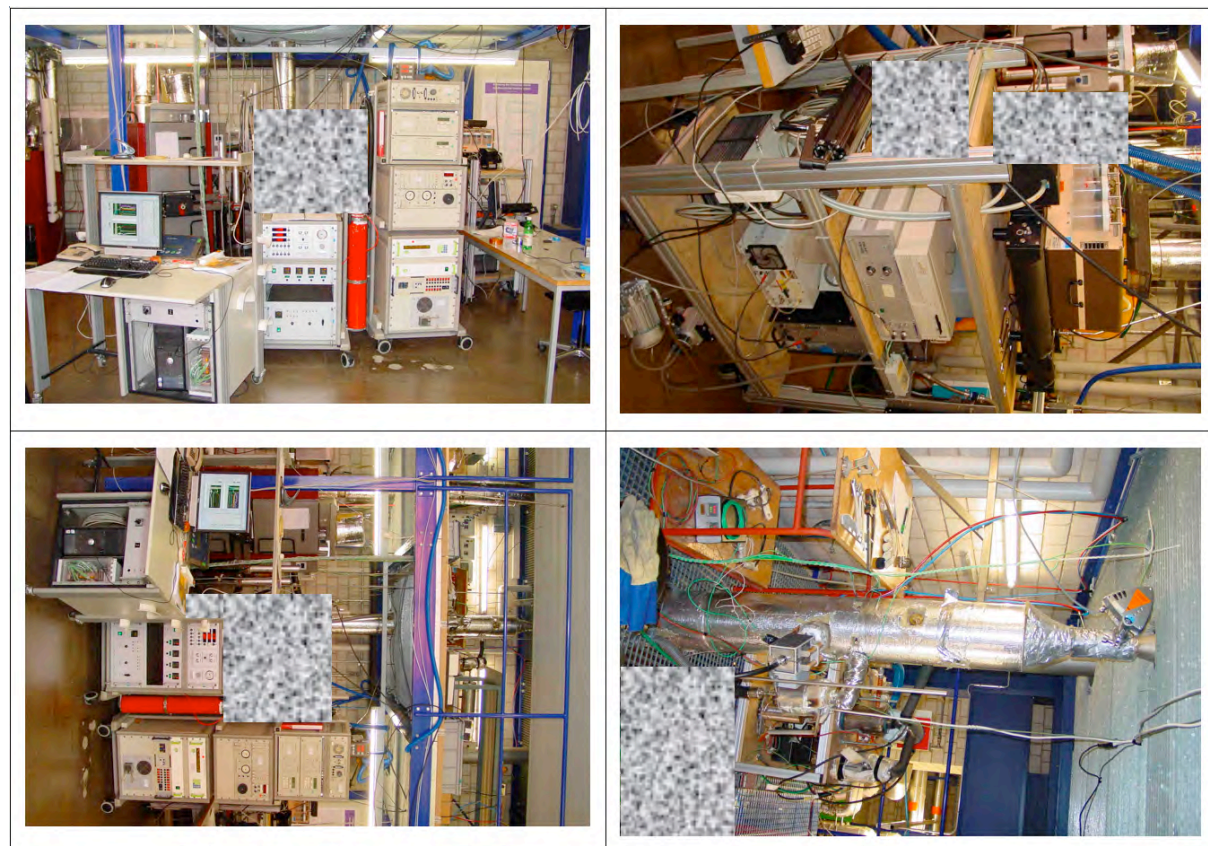


Bild 5.3 Fotos von Messtechnik und Kaminanlage.

5.3.2 Emissionen (gasförmig)

O₂-Messung: Paramagnetischer Analysator Hartmann&Braun, Typ Magnos 6G; Messbereich 0 – 25 Vol.-%, trockenes Messgas.

CO-Messung: Nicht-dispersiver Infrarot-Analysator (NDIR) Braun, Typ Uras 10P; zwei separate Messkanäle; Messkanal tief 0 – 1'000 ppm, Messkanal hoch 0 – 10 Vol.-% (100'000 ppm), trockenes Messgas.

CO₂-Messung: Nicht-dispersiver Infrarot-Analysator (NDIR) LeyboldHeraeus, Typ Binos 100; Messbereich 0 – 20 Vol.-%, trockenes Messgas (wird nur zu Kontrollzwecken verwendet).

CO-Messung: Nicht-dispersiver Infrarot-Analysator (NDIR) LeyboldHeraeus, Typ Binos 100; Messbereich 0 – 2 Vol.-%, trockenes Messgas (wird nur zu Kontrollzwecken verwendet).

HC-Messung (Methan / Nichtmethan-HC): Flammenionisationsdetektor (FID) JUM, Typ 109A; automatische Messbereichsumschaltung; Messbereiche 0 – 1 / – 10 / – 100 / - 1'000 / - 10'000 ppm für Methan (CH₄) und Nichtmethan- Kohlenwasserstoffe, beheizt auf 180 °C, feuchtes Messgas

NO_x-Messung (NO und NO₂): Chemilumineszenz-Analysator (CLD) ECO Physics, Typ CLD 700 EL ht; Messbereich 0 – 20 Vol.-%, trockenes Messgas (wird nur zu Kontrollzwecken verwendet).

H₂O-Gehalt: Der Wasserdampfgehalt im Abgas wird aus dem Wassergehalt des Brennstoffs und der Abgaszusammensetzung berechnet.

Messgasfluss: Probenahme im Abgaskanal, beheiztes Filter (180°C), beheizte Messgasleitung (180°C), beheizte Messgasfördereinheit (180°C), beheizte Messgasleitungen zu FID-Gerät und CLD-Gerät, Messgaskühler, Messgasfördereinheit, O₂-, CO-, CO₂-Gerät.

5.3.3 Feststoffe gravimetrisch

Staubgehalt gravimetrisch: Gravimetrische Gesamtstaub-Messeinrichtung Koneth, in Anlehnung an VDI 2066, isokinetische Probenahme bei 160°C (Durchmesser der Probenahmedüsen 30 mm, Absaugvolumenstrom ca. 0.7 m_n³/h), beheizter Filterhalter (160°C) für Planfilter, Bestimmung des Teilstromvolumens mit Trockengaszähler mit vorgeschaltetem Gaskühler und Trockenturm (Silicagel). Gewichtsbestimmung nach Probenkonditionierung mit:

Analysenwaage: Mettler Toledo, Typ AB204, Messbereich 0 – 210 g, d = 0.1 mg

5.3.4 Partikelanalyse (Feinstaubmesstechnik)

Korngrössenspektrum: Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) bestehend aus Diffusion Mobility Sizer (DMA) TSI 3071 und Condensable Particle Counter (CPC) TSI 3022, Messbereich 10 – 500 nm

Anzahlverteilung: Optical Particle Sizer (OPC) / Streulicht-Analysator Palas PCS 2000, Messbereich 500 – 10'000 nm

Messgasfluss: Probenahme im Abgaskanal, beheizte Messgasleitung (180°C), beheizte Verdünnungseinheit (1:10), unbeheizte Verdünnungseinheit (1:10), unbeheizte Messgasleitungen zu SMPS und OPC,

CO₂-Messung: Nicht-dispersiver Infrarot-Analysator (NDIR) LI-COR, Typ LI-820; Messbereich 0 – 2'000 ppm, trockenes Messgas (wird zur Berechnung des Verdünnungsfaktors verwendet), Verdünnungsfaktor berechnet aus CO₂-Messung im Abgas und CO₂ -Messung im verdünnten Messgas.

5.3.5 Kondensierbare Stoffe

Auf Grund der niedrigen Gehalte an Kohlenwasserstoffen wurden keine Kondensatmessungen durchgeführt.

Kondensatmessung: gemäss EPA-Methode 5H

Messgasfluss: Isokinetische Probenahme bei 160°C, beheizter Filterhalter (160°C) für Planfilter oder Filterhülsen, Gas-Waschflaschen für Kondensatproben bei 0°C, Planfilter, Bestimmung des Teilstromvolumens mit Trockengaszähler mit vorgeschaltetem Gaskühler und Trockenturm (Silicagel)

5.3.6 Wärmeleistungsmessung

Durchflussmessung Kesselkreis: Magnetisch-induktive Durchflussmessung, Endress+Hauser, Typ Promag 50H 22, DN 25, Messbereich 0 – 300 l/min (0 – 1.8 m³/h)

Durchflussmessung Kaltwasser: Magnetisch-induktive Durchflussmessung, Endress+Hauser, Typ Promag 33A T08, DN 08, Messbereich 1 – 30 l/min (0 – 0.18 m³/h)

Temperaturen: Vorlauftemperatur direkt beim Kessel, Rücklauftemperatur direkt beim Kessel, Kaltwassertemperatur bei Mischwagen-Einheit (Bild 5.1); kalibrierte Thermistoren PT100

5.3.7 Weitere Messgrössen

Abgasgeschwindigkeit: Die Bestimmung der Abgasgeschwindigkeit erfolgt mittels Pitotrohr und Differenzdruckmessung. Das Pitotrohr ist beim engsten Kaminquerschnitt positioniert. Zur Umrechnung von Pa zu m/s wird die Abgasdichte verwendet, die aus der Abgaszusammensetzung berechnet wird. Zur Umrechnung von feuchtem auf trockenes Abgasvolumen muss der Wassergehalt des Brennstoffs bekannt sein.

Differenzdruckmessumformer: Schiltknecht, Typ FCO44.1u-105, Messbereich -2 – 2 mbar

Kaminzug: Der Kaminzug wird gemäss EN 304 erfasst.

Differenzdruckmessumformer: Schiltknecht, ManoAir 500, Messbereich -500 – 500 Pa

Abgastemperaturen: Position und Anordnung gemäss EN 304, Netzmessung mit 5 Thermoelementen Typ K

Wassergehalt: Bestimmung in Anlehnung an CEN/TS 14774, Trocknung im Ofen (Heraeus, Typ KPM /KPV) bei ca. 105 °C bis Gewichtskonstanz, Wägung auf Sartorius, Typ PT3100, Messbereich 0 – 3'100 g, d = 0.1 g

Abbrandwaage: Mettler Toledo, Typ KD600, Messbereich 0 – 600 kg, max. 1'000 kg, d = 20 g

5.4 Auswertungen/Berechnungen

Mittelwertbildung

Im ersten Schritt werden die Rohdaten über den zu mittelnden Zeitbereich arithmetrisch gemittelt. Im zweiten Schritt werden die Mittelwerte in die Berechnungsformeln eingesetzt, um z.B. Wirkungsgrade oder Emissionen in mg/m_n^3 zu bestimmen. Im dritten Schritt werden die gemittelten Konzentrationen auf einen Sauerstoffgehalt von 13 Vol.-% normiert.

Mit Abgasvolumenstrom gewichtete, mittlere Konzentrationen

Bei instationären Phasen mit stark variierendem Abgasvolumenstrom werden die Konzentrationen im ersten Schritt über den zu mittelnden Zeitbereich mit dem Abgasvolumenstrom gewichtet gemäss folgender Formel. Im dritten Schritt, bei der Normierung bezüglich Sauerstoffgehalt, wird analog der mit dem Abgasvolumenstrom gewichtete O_2 -Gehalt verwendet [4, 5].

$$CO_{\text{gewicht mit Abgasvolumenstrom}} [\text{ppm}] = \frac{\int_t CO(t) [\text{ppm}] \cdot \dot{V}_{\text{Abgas}}(t) \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] dt}{\int_t \dot{V}_{\text{Abgas}}(t) \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] dt}$$

Emissionsfaktoren

Emissionsfaktoren werden üblicherweise in $[\text{mg}/\text{MJ}]$ angegeben, was zum Beispiel auch einen Vergleich verschiedener Brennstoffe ermöglicht. Als Basis für die Energie in $[\text{MJ}]$ dient meist die zugeführte Energie in Form des Heizwerts, die auch als Endenergie bezeichnet wird. Dies gilt etwa für die Emissionsfaktoren nach BAFU, die in $[\text{mg}/\text{MJ}_{\text{End}}]$ ausgewiesen werden.

Werte in $[\text{mg}/\text{MJ}_{\text{End}}]$ werden in der Regel aus normierten Konzentrationswerten berechnet. Für die Umrechnung sind Annahmen zu Heizwert, Wassergehalt und Zusammensetzung des Brennstoffs erforderlich [2, 3]. Für einen mittleren Heizwert von Holz von $18.3 \text{ MJ}/\text{kg}$ und eine Holzfeuchtigkeit von $u = 20\%$ ergibt sich zur Umrechnung von mg/m_n^3 bei 13 Vol.-% O_2 auf mg/MJ ein Umrechnungsfaktor von rund 0,667 bzw. 1.5, so dass gilt:

$$100 \text{ mg}/\text{MJ} = 150 \text{ mg}/\text{m}_n^3 \text{ bei } 13 \text{ Vol.}\% \text{ O}_2 \quad \text{bzw.} \quad 100 \text{ mg}/\text{m}_n^3 \text{ bei } 13 \text{ Vol.}\% \text{ O}_2 = 66,7 \text{ mg}/\text{MJ}$$

Im vorliegenden Bericht wurde für Holzpellets (Heizwert höher und Holzfeuchtigkeit tiefer) mit folgender Umrechnung gerechnet:

$$CO [\text{mg}/\text{MJ}] = 0.64 \cdot CO [\text{mg}/\text{m}_n^3] \text{ bei } 13 \text{ Vol.}\% \text{ O}_2$$

In der vorliegenden Untersuchung wurden die Emissionsfaktoren aus mit Abgasvolumenstrom gewichteten Konzentrationen bestimmt. Zum Vergleich wurden bei Pelletkessel B auch Emissionsfaktoren direkt aus der kumulierten Fracht und der in der untersuchten Zeiteinheit zugeführten Energiemenge berechnet. Die zugeführte Energiemenge ihrerseits wurde basierend auf dem Abgasvolumenstrom berechnet.

Emissionsfaktoren bei variablem Abgasvolumenstrom

Emissionsfaktoren werden in der Regel über langandauernde, möglichst stationäre Betriebsphasen bestimmt. Aus den gemittelten Konzentrationen bei Bezugsauerstoffgehalt kann dann unter Kenntnis des Heizwerts (bzw. des Wassergehalts und des Heizwerts des absolut trockenen Brennstoffs) der

Emissionsfaktor mit ausreichender Genauigkeit berechnet werden. Wenn sich der Abgasvolumenstrom während einer Betriebsphase stark verändert, ohne dass sich die Konzentration analog verändert, wird das beschriebene Berechnungsverfahren für Emissionsfaktoren ungenau. Dies ist vor allem beim Starten und Stoppen wichtig.

Wenn der Abgasvolumenstrom bekannt ist oder gemessen wird, kann der Emissionsfaktor auch bestimmt werden, in dem die Fracht über die zu untersuchende Phase aufsummiert oder integriert wird und durch die während der Phase zugeführte Energiemenge dividiert wird.

In der vorliegenden Untersuchung werden Emissionsfaktoren auch über kurze, teilweise instationäre Betriebsphasen angegeben. Dies ist möglich, weil der Abgasvolumenstrom gemessen und daraus auch die während der Phase zugeführte Energiemenge berechnet wird. So ist auch ein Vergleich möglich zwischen Emissionsfaktoren berechnet aus Konzentrationen und Emissionsfaktoren berechnet aus Frachten. Es zeigt sich, dass die Berechnung der Emissionsfaktoren aus Konzentrationen in den instationären Phasen wie Kalt- oder Warmstart sowie Lastwechseln ausreichend genau ist. Beim Ausschalten bzw. bei AUS-Phasen während Taktbetrieb werden die Differenzen grösser, die aus den Konzentrationen berechneten Emissionsfaktoren sind in der Regel grösser als die frachtbasierten Emissionsfaktoren, weil bei Stillstandsphasen der Abgasvolumenstrom bei geschlossenen Luftklappen annähernd auf Null geht. Dies kann bei den konzentrationsbasierten Emissionsfaktoren nicht berücksichtigt werden.

Aufsummieren von Emissionsfaktoren

Beim Hochrechnen von Emissionsfaktoren aus einzelnen Betriebsphasen Tabelle 5.3 müssen die Emissionsfaktoren der jeweiligen Betriebsphase mit der während der jeweiligen Betriebsphase zugeführten Energiemenge gewichtet werden. So kann beispielsweise der Emissionsfaktor für einen Taktzyklus aus den einzelnen Phasen (Warmstart/Stationär/Stop) berechnet werden:

$$\overline{CO} [mg/MJ] = \frac{\int_{i=1}^n CO_i [mg/MJ] * zugef. Energie_i [MJ]}{\int_{i=1}^n zugef. Energie_i [MJ]}$$

$$\overline{CO} [mg/MJ] = \frac{(CO_{Phase1} * zugef. Energie_{Phase1} + CO_{Phase2} * zugef. Energie_{Phase2} + CO_{Phase3} * zugef. Energie_{Phase3})}{(zugef. Energie_{Phase1} + zugef. Energie_{Phase2} + zugef. Energie_{Phase3})}$$

Die während der untersuchten Phase zugeführte Energiemenge ist aus der zugeführten Brennstoffmenge bekannt. Mit der Dauer der Phase kann somit auch die zugeführte Leistung verwendet werden.

Tabelle 5.3 Hochrechnen von Emissionsfaktoren aus einzelnen Betriebsphasen.

Dauer der stationären Phase, damit BAFU-Grenzwert eingehalten ist:					
		Takten	Takten	Takten	Zyklus
		Warmstart	Stationär	Stop	berechnet
CO	mg/MJ	1691.9	13.3	4017.2	254
Energie zugeführt	MJ	1.76	39.55	1.85	
Dauer	h	0.13	1.00	0.26	
Zugeführte Leistung	kW	3.7	11.0	2.0	

6 Literatur

- [1] Vogelsanger, P.: Jahresleistungsermittlung von Solarsystemen mit der Concise Cycle Test (CCT) Methode, <http://www.spf.ch/publ/systeme/KombiPruefmethodeCCT.pdf>, 2004
- [2] Arbeitsblatt Emissionsfaktoren Feuerungen, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BU-WAL, heute BAFU), Stand Oktober 2005 (10.30/2005-00180/03/2005.03.01-071/E244-0547)
- [3] Haberl, R., Konersmann, L., Frank, E.: Jahresbericht Pelletsolar-2: Systemoptimierung von Pelletfeuerungen in Kombination mit thermischen Solaranlagen basierend auf dynamischen Simulationen und Messungen im Prüfstand, Bundesamt für Energie, 2009
- [4] Nussbaumer, T., Wagner, D.: A New Method to measure the integrated Amount of Pollutants from non-stationary Wood Combustion Processes. *Advances in Thermochemical Biomass Conversion*, Blackie Academic & Professional, London 1994, ISBN 0 7514 0171 4
- [5] Wagner, D., Nussbaumer, T.: Messverfahren zur Erfassung des Emissionsverhaltens von Holzfeuerungen, Bundesamt für Energie, 1994