

Universität Stuttgart

Abteilung
Reinhaltung der Luft

Emissionsmessungen bei der Verbrennung von Heupellets in einem Heizkessel mittlerer Leistung mit Gewebefilter



Institut für Feuerungs- und
Kraftwerkstechnik (IFK)

in Zusammenarbeit mit



Industrie Service

Emissionsmessungen bei der Verbrennung von Heupellets in einem Heizkessel mittlerer Leistung mit Gewebefilter

Dr.-Ing. Michael Struschka

Dipl.-Ing. Christian Schäfer

Dipl.-Ing. Tobias Ertl

B.Sc. Lena Münzenmaier

M.Sc. Johannes Brodbeck

Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart

Tel.: +49 711 685 6 8275

ifk@ifk.uni-stuttgart.de

<http://www.ifk.uni-stuttgart.de>

Durchführung Dioxin- und PAH-Messungen

Dipl.-Ing. Alexander Axarlis

TÜV SÜD Industrie Service GmbH

Niederlassung Stuttgart, Abteilung Messtechnik

Gottlieb-Daimler-Str. 7, 70794 FilderstadtTÜV

alexander.axarlis@tuev-sued.de

<http://www.tuev-sued.de/is>

Messbericht im Auftrag der
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)
Griesbachstr. 1, 76185 Karlsruhe

April 2014

Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Heu als Brennstoff	2
2.1	Qualitätsmerkmale von Festbrennstoffen	2
2.1.1	Elementarzusammensetzung	3
2.1.2	Brennstofftechnische Eigenschaften	6
2.2	Einflussfaktoren auf die Brennstoffqualität von Heu	10
2.2.1	Verbesserung der Heuqualität durch Auswaschung	12
2.3	Typische Elementarzusammensetzungen von Heu	13
2.4	Verwendete Heuqualitäten bei den Versuchen	14
3	Aufbau des Versuchsstandes	18
3.1	Feuerungsanlage.....	18
3.2	Verwendete Messtechnik.....	21
3.3	Kontinuierliche Messung der Gaskonzentrationen	23
3.4	Gravimetrische Bestimmung der Staubkonzentration	23
3.5	Nasschemische Bestimmung von Chlor und Schwefeloxiden	25
3.6	Bestimmung der PCDD/F- und PAH-Konzentrationen	26
3.7	Auswertung der Messungen	27
3.8	Grenzwerte	29
3.9	Messprogramm.....	30
4	Ergebnisse.....	33
4.1	Mittelwerte für die untersuchten Betriebszustände.....	36
4.1.1	Heuqualität 1.....	37
4.1.2	Heuqualität 3.....	42
4.2	Zusammengefasste Darstellung der Mittelwerte	46
4.2.1	Heuqualität 1.....	47
4.2.2	Heuqualität 3.....	48
4.3	Vergleich der Heuqualitäten 1 und 3	50
5	Ergebnisse der Ascheanalysen	53
6	Zusatzuntersuchung Bypass Gewebefilter.....	54

7	Vergleich Messwerte und Grenzwerte der TA-Luft	55
8	Zusammenfassung	56
9	Literaturverzeichnis	58
10	Anhang Messdaten IFK	61
	10.1 Heuqualität 1.....	61
	10.2 Heuqualität 3.....	66
11	Anhang Messbericht TÜV SÜD vom 19.2.2014.....	71

1 Einleitung

Steigende Preise fossiler Energieträger und, bedingt durch die starke Nachfrage aufgrund der z.T. deutlichen Bestandszunahme von Holzfeuerungen, auch von Energieholz, führt zur Suche nach alternativen Biomassen für die Wärmeerzeugung. Da regional, auch in Baden-Württemberg, Heu von minderer Qualität als Einstreu und Viehfutter kaum mehr nachgefragt wird, und auch für Landschaftsheu von den Landschaftspflegeflächen dringlich nach Verwertungswegen gesucht wird, wäre hier eine energetische Verwertung als Brennstoff sinnvoll.

Um die energetische Verwertung von Landschaftspflegeheu sowie von Heu minderer Qualität in Baden-Württemberg voranzubringen, kam es in den vergangenen zwei Jahren zu zahlreichen Aktivitäten. So wurden z.B. im Bioenergiewettbewerb Projekte zur Heupelletierung und Wärmeerzeugung aus Heu gefördert. Hierbei wurde deutlich, dass die Heuverbrennung nur dann mehr Zuspruch finden wird, wenn bestehende Wissenslücken zur Verbrennungstechnik und der damit verbundenen Emissionen an besonders umwelt- und gesundheitsschädlichen Luftschadstoffen geschlossen werden. Hieraus ergab sich die Zielrichtung dieses Projektes: es soll gezeigt werden, dass bei der Wärmeerzeugung aus pelletiertem Heu im Leistungsbereich >100 kW bis ca. 800 kW (maximale Kesselgröße der untersuchten Baureihe) die Technik für eine sichere Einhaltung der Grenzwerte der TA Luft vorhanden ist.

Das Messprogramm an einem, laut Herstellerangaben, für diesen Brennstoff geeigneten Heizkessel mit nachgeschaltetem Multizyklon sowie Gewebefilter soll insbesondere der Untersuchung der Emissionswerte von polychlorierten Dibenzodioxinen und -furanen (PCDD/F) und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH) dienen, die bei der Verbrennung von Heupellets in einer marktgängigen Kesselanlage entstehen können. Weiterhin soll durch das Messprogramm geklärt werden, wie wirksam partikelförmig vorliegende PCDD/F und PAHs sowie anorganische gasförmige Chlorverbindungen durch den Filterkuchen auf dem Gewebefilter zurückgehalten werden. Diese Klärung ist vor allem dann von besonderem Interesse, wenn die genannten Komponenten in höherer Konzentration im Rohgas vorliegen.

Neben den genannten Emissionskomponenten sollen in dem Messprogramm auch die Konzentrationen an Staub, CO, gasförmigen organischen Verbindungen (VOC) und NO_x erfasst werden. Je nach Emissionskomponente und untersuchtem Betriebszustand des Heizkessels finden die Messungen z.T. zeitgleich vor der Gewebefilter im Rohgas und nach dem Gewebefilter im Reingas statt. An stationären Betriebszuständen des Heizkessels sollen der Vollastbetrieb im Bereich der Nennwärmeleistung, der Teillastbetrieb bei möglichst geringer Wärmeleistung und der Gluterhaltbetrieb untersucht werden.

Es sollen drei Heuqualitäten mit unterschiedlichen Chlorkonzentrationen im Brennstoff eingesetzt werden. Hierzu soll eine Vorauswahl an pelletiertem und nicht pelletiertem Heu durchgeführt werden, um geeignete Heuqualitäten zu identifizieren. Für die Vorauswahl und für die Verbrennungsversuche sollten von der Firma Agrarhandel Müller GbR aus Böhringen Heuproben und Heupellets geliefert werden.

Die Messungen sollen an einer eigens für dieses Vorhaben errichteten Feuerungsanlage im Technikum des Instituts durchgeführt werden. Die Messungen zur Bestimmung der Konzentrationen an PCDD/F und PAH sollen vom TÜV SÜD Industrie Service GmbH (Niederlassung Stuttgart) durchgeführt werden.

2 Heu als Brennstoff

Halmgüter weisen, aufgrund ihrer Pflanzenstruktur, den Wachstumsbedingungen und des einjährigen Aufwuchses, aber auch beeinflusst durch andere Faktoren wie z.B. Düngung, Standort und Erntezeitpunkt, stärker variierende Eigenschaften im Vergleich zu Holz auf. Bei Heu kommt noch hinzu, dass neben unterschiedlichen Gräsern auch Kräuter und Leguminosen (Hülsenfrüchtler) in unterschiedlichen und stark variierenden Anteilen enthalten sind. Von besonderer Relevanz bei der Verwendung als Brennstoff sind, neben dem hohen Aschegehalt, den vergleichsweise geringen Ascheschmelztemperaturen und der geringeren Energiedichte im nicht verdichteten Material auch höhere Konzentrationen an Stickstoff, Schwefel und Chlor im Heu.

Große Aschemengen in Verbindung mit niedrigen Ascheschmelztemperaturen können Verschlackungen und verstärkte Ablagerungen im Brennraum sowie im Wärmetauscher verursachen. Erhöhte Konzentrationen an Schwefel, Stickstoff und Chlor führen zu einer verstärkten Freisetzung von SO_2 (neben SO_2 bilden sich auch geringe Mengen an SO_3), NO_x und Chlorverbindungen (z.B. HCl sowie PCDD/F). Gasförmige Chlor- und Schwefelbindungsformen aus der Verbrennung fördern auch die Bildung von Ablagerungen im Kessel und sind bei Korrosionsreaktionen an Metall und keramischen Materialien beteiligt.

Heu von minderer Qualität wird kaum noch in der Viehzucht oder Pferdehaltung verwendet. Dies betrifft auch das Landschaftsheu von Landschaftspflegeflächen. Bei der Suche nach alternativen Rohstoffen steht Heu nicht im Vordergrund, fällt jedoch zwangsläufig an und wird auch zunehmend aufgrund der erhöhten Nachfrage nach erneuerbaren Energiepflanzen (Miscanthus und Energiekorn) hierfür in Betracht gezogen.

Grundsätzlich kann Heu lose oder in pelletierter Form verfeuert werden. Wird Heu lose verfeuert, müssen die verpressten Heuballen (Hochdruck, Rund- oder Quaderballen) in einem Ballenauflöser wieder aufgelöst werden, damit der Brennstoff mit z.B. Schnecken der Feuerung zugeführt werden kann. Wird pelletiertes Heu verwendet, ist eine weitergehende Automatisierung der Brennstoffversorgung für die Feuerungsanlage möglich, da eine manuelle Beschickung des Ballenauflösers entfällt. Für Transport, Befüllung, Lagerung und Beschickung der Feuerungsanlage mit Heupellets kann im Wesentlichen die gleiche Technik eingesetzt werden wie für Holzpellets. Bisher hat sich allerdings noch kein Markt für Heupellets (als Brennstoff) herausgebildet, hier gibt es allenfalls einige regional tätige Unternehmen, die vergleichsweise geringe Mengen von Heupellets als Brennstoff verkaufen.

Zur Unterstützung des Projektes erklärte sich der Agrarhandel Müller GbR aus Böhringen bereit, entsprechende Heuqualitäten zur Vorauswahl und die Heupellets für die Verbrennungsversuche zu liefern.

2.1 Qualitätsmerkmale von Festbrennstoffen

Die qualitätsbestimmenden Eigenschaften von Festbrennstoffen lassen sich im Wesentlichen in die drei Merkmalgruppen Elementarzusammensetzung, brennstofftechnische und physikalische Eigenschaften einordnen. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Qualitätsmerkmale und ihre Wirkungen sind in Tabelle 2.1 aufgelistet.

Tabelle 2.1 Qualitätsmerkmale von Festbrennstoffen [nach Kaltschmitt et al., 2009]

Qualitätsmerkmal	wichtigste Auswirkung
Elementgehalt	
Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O)	Heizwert, Brennwert, Luftbedarf
Chlor (Cl)	Bildung von z.B. HCl und PCDD/F, Hochtemperaturkorrosion
Stickstoff (N)	Bildung von NO _x und N ₂ O
Schwefel (S)	Bildung von SO _x , Hochtemperaturkorrosion
Kalium (K)	Hochtemperaturkorrosion, Ascheerweichungsverhalten
Schwermetalle	Ascheverwertung, Emissionen, katalytische Wirkung bei PCDD/F-Bildung
Brennstofftechnische Eigenschaften	
Wassergehalt	Heizwert, Lagerfähigkeit, Brennstoffgewicht, Verbrennungstemperatur
Heizwert	Energiegehalt des Brennstoffes, Anlagenauslegung
Aschegehalt	Partikelemissionen, Rückstandsbildung
Ascheerweichungspunkt	Anlagenbetrieb, Verbrennungsbedingungen, Schlackebildung, Wartungsbedarf
Physikalische Eigenschaften	
Lagerungsdichte	Transport- und Lageraufwendung, Logistikplanung
Teilchendichte	Verbrennungseigenschaften
Größenverteilung	Rieselfähigkeit, Trocknungseigenschaft, Staubbildung
Feinanteil	Lagerdichte, Lagerfähigkeit, Staubbildung
Abriebfestigkeit	Entmischung, Verluste

2.1.1 Elementarzusammensetzung

Pflanzliche Biomasse setzt sich aus einer Vielzahl chemischer Elemente zusammen. Von den auf der Erde natürlich vorkommenden Elementen gelten 26 für die Pflanzen als biologisch notwendig, hierbei kann zwischen Haupt- und Spurenelementen unterschieden werden. Zu den Hauptelementen zählen außer den Elementen Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Wasserstoff (H), die aus der CO₂-Assimilation und der H₂O-Aufnahme stammen, vor allem die sechs Hauptnährstoffe Stickstoff (N), Kalium (K), Phosphor (P), Calcium (Ca), Magnesium (Mg) und Schwefel (S) sowie das ebenfalls relativ häufige Chlor (Cl), das aber nicht als Nährstoff zu bezeichnen ist. Diese Elemente sind wesentlich am stofflichen Aufbau der Biomasse beteiligt bzw. spielen als Düngemittelbegleitstoffe eine wichtige Rolle.

Neben diesen Hauptelementen enthält Biomasse zusätzlich eine ganze Reihe unterschiedlicher Spurenelemente, u. a. Silizium (Si), Natrium (Na), Eisen (Fe), Mangan (Mn), Zink (Zn), Kupfer (Cu), Molybdän (Mo), Kobalt (Co), Blei (Pb), Aluminium (Al), Chrom (Cr), Cadmium (Cd), Nickel (Ni), Quecksilber (Hg) sowie Arsen (As), von denen einige als essenzielle Mikronährstoffe gelten, während andere auch pflanzenschädlich wirken können.

Im Folgenden werden die Eigenschaften von Elementen im Brennstoff kurz diskutiert, welche für die Brennstoffwahl im Rahmen dieses Projektes bzw. für die Verbrennungseigenschaften wichtig sind.

Chlor

Der Chlorgehalt des Brennstoffes stellt im Rahmen dieses Projektes das wesentliche Qualitätsmerkmal dar. In den Halmgütern liegt Chlor überwiegend anorganisch in wasserlöslicher Form gebunden (z.B. als KCl und NaCl) vor und wird vorwiegend durch den Stoffwechsel mit der Umgebung in die Pflanzen eingeführt. Der Chlorgehalt wird sowohl durch pflanzenspezifische Eigenschaften, den Standortbedingungen und ggf. durch den Einsatz von chlorhaltigen Düngern beeinflusst.

Als möglicher Bildungsweg von HCl während der Verbrennung wird die Umwandlung von Kaliumchlorid zu Kaliumsulfat angesehen. In Gegenwart von Sauerstoff und Kupfer reagiert HCl bei höheren Temperaturen zu elementarem Cl₂, nach einer durch metallchloride katalysierten Deacon-Reaktion. Nach dem Mechanismus der De-novo-Synthese kann elementares Chlor dann im Temperaturbereich von ca. 250 bis 400 °C zur Bildung von Dioxinen und Furanen (PCDD/F) führen [z.B. Geiger et al., 1992]. Die quantitativen Zusammenhänge zwischen dem Chlorgehalt im Brennstoff und der PCDD/F-Emissionen wurde von unterschiedlichen Autoren [z.B. Launhardt et al., 1998] beschrieben.

Außerdem kann Chlor in Form von gasförmigem HCl oder in fester bzw. flüssiger Phase gebunden (z.B. als KCl) auch zu Korrosionsproblemen führen [z.B. Gattermig et al., 2010]. In Abbildung 2.1 sind die Korrosionsarten (Nieder- und Hochtemperatur-Korrosion sowie der Oxidationsverschleiß) unterschieden nach Gasphasen- Flüssigphasen- und Festphasenkorrosion schematisch dargestellt [Englisch und Slacik, 2010].

Messungen mit Halmgütern und Holz zeigen, dass die Abgaskonzentrationen von Chlorverbindungen (u.a. von HCl) in der Tendenz linear mit der Chlorkonzentration im Brennstoff zunehmen. Die überwiegenden Anteile des Brennstoffchlors liegen in partikelgebundener Form (z.B. als KCl in Flugasche, Wandablagerungen im Kessel und Wärmetauscher und in der Rostasche) vor. Brennstoffchlor wandelt sich nur zu einem geringeren Anteil (Größenordnung 18 %) in HCl um und liegt damit gasförmig im Abgas vor. Nur sehr geringe Mengen des Brennstoffchlors reagieren zu organischen Chlorverbindungen (z.B. Dichlormethan oder PCDD/F) [Kaufmann und Nussbaumer, 1999].

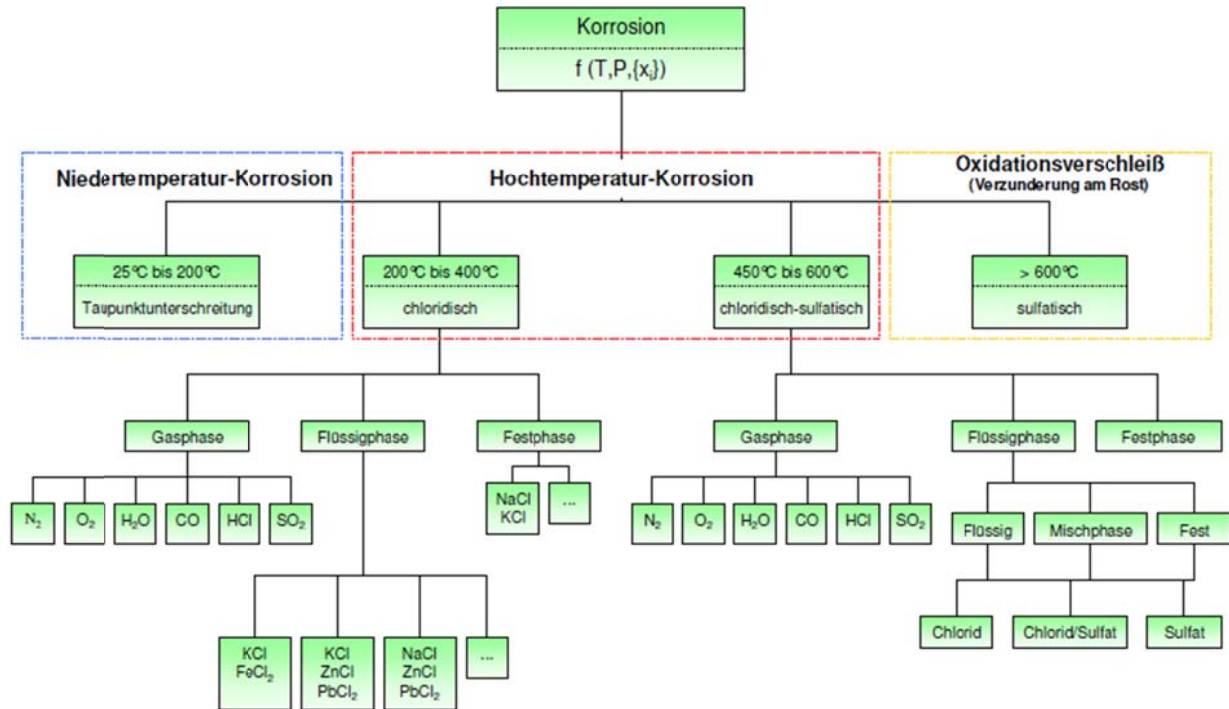


Abbildung 2.1 Schematische Darstellung der unterschiedlichen Korrosionsarten [Englisch und Slacik, 2010]

Stickstoff

Der Stickstoffgehalt variiert zwischen verschiedenen Biomassen deutlich, was die Unterschiede im stofflichen Aufbau der jeweiligen Biomasse sichtbar macht. Pflanzen oder Pflanzenteile mit einem hohen Eiweißgehalt haben grundsätzlich höhere Stickstoffgehalte als typische Lignocellulosematerialien wie Holz oder Stroh. Das gilt vor allem für die generativen Organe bei Getreide, Ölsaaten und Proteinpflanzen oder für Halmgüter mit einem hohen Futterwert. Entsprechend hoch ist damit der Stickstoffgehalt in Getreidekörnern, Getreideganzpflanzen und Futtergräsern [Kaltschmitt et al., 2009].

Der Stickstoffgehalt des Brennstoffs wirkt sich direkt auf die Stickstoffoxidemissionen bei Biomassefeuerungen in dem hier betrachteten Leistungsbereich aus. Die Stickstoffoxidkonzentrationen nehmen, bei vergleichbaren Verbrennungsbedingungen, mit steigendem Brennstoffstickstoffgehalt zu. Die Oxidation des im Brennstoff gebundenen Stickstoffs stellt hier der wichtigste NO_x -Bildungsmechanismus dar. Die Bildung von thermischem oder promptem NO ist aufgrund der Verbrennungsbedingungen (z.B. relativ geringe Flammentemperaturen und zu kurze Verweilzeit der Spezies bei sehr hohen Temperaturen) nur von untergeordneter Bedeutung [z.B. Struschka et al., 1995].

Schwefel

Auch die Bildung von Schwefeloxiden (SO_2 und in geringen Konzentrationen auch SO_3 in Form von H_2SO_4) ist primär vom Schwefelgehalt des Brennstoffs abhängig. Ein Teil des Brennstoffschwefels reagiert mit Aschebestandteilen zu z.B. Sulfaten.

Schwefel kann aber auch indirekt für ein erhöhtes Korrosionsrisiko durch eine Reaktion von Alkali- und Erdalkalichloriden zu Sulfaten verantwortlich sein. Hierdurch wird das korrosionsfördernde Cl_2 freigesetzt [Hartmann et al., 2000].

Der Schwefel bzw. das Schwefel-Chlor-Verhältnis im Brennstoff kann ebenfalls eine Rolle bei der PCDD/F-Bildung spielen, da SO_2 mit dem elementarem Chlor (Cl_2) aus der Deacon-Reaktion reagieren kann und somit weniger Cl_2 für die De-novo-Synthese von PCDD/F zur Verfügung steht [Geiger et al., 1992]. In verschiedenen Untersuchungen wird eine Minderung der PCDD/F-Bildung schon ab einem Cl/S-Verhältnis im Brennstoff von 1 belegt [Hartmann et al., 2000].

Kalium

Der Kaliumgehalt im Brennstoff besitzt einerseits eine indirekte Wirkung bei den Korrosionsvorgängen an Wärmetauschern und abgasführenden Bestandteilen der Feuerung und beeinflusst andererseits auch das Erweichungsverhalten der Asche. Im Gegensatz zum Calcium, bewirkt Kalium eine Erniedrigung des Ascheschmelzpunktes.

Die Mitwirkung an Korrosionsvorgängen beruht bei Kaliumchlorid, welches sich z.B. auf Metalloberflächen abgelagert hat, auf der Bildung von elementarem Chlor durch die Reaktion mit SO_2 aus dem Abgas unter Bildung von Kaliumsulfat. Das gebildete Cl_2 reagiert nun mit der Metalloberfläche zum flüchtigen Eisen(II)-chlorid (FeCl_2), welches an die Oberfläche der Ablagerungen drängt. Dort reagiert das Eisen(II)-chlorid mit Sauerstoff oder Schwefeldioxid und es bildet sich wiederum Cl_2 , welches in den inneren Schichten der Ablagerungen verbleibt und für die weitere Reaktion mit der Metalloberfläche zur Verfügung steht. Durch diese Reaktionen kommt es zu einer Anreicherung von Chlor an den Metalloberflächen, die zu einer raschen Zerstörung des Materials führen und Abtragraten von 1 bis 2 mm pro Jahr hervorrufen [z.B. Gatternig et al., 2010].

Schwermetalle

Die Schwermetalle bleiben, je nach ihrer Flüchtigkeit, zum großen Teil in der Rostasche zurück oder werden aus dem Kessel ausgetragen und scheiden sich im Staubabscheider ab. Somit beeinflussen die Schwermetalle auch die Verwertbarkeit von Rost- und Filterasche (z.B. als Düngemittel). Unter den hier relevanten Schwermetallen sind vor allem Cd, Zn, und Pb als leicht flüchtig anzusehen. Einige Schwermetalle besitzen auch katalytische Wirkung bei der Bildung von PCDD/F (z.B. Kupfer- und Eisenchloride) [z.B. Hartmann et al., 2000.]

2.1.2 Brennstofftechnische Eigenschaften

Die folgenden diskutierten brennstofftechnischen Eigenschaften sind Kenngrößen, welche die Möglichkeiten und Grenzen der thermo-chemischen Umwandlung bestimmen oder dabei eine entscheidende Rolle spielen. Neben dem Heiz- und Brennwert zählen hierzu der Wasser- und Aschegehalt sowie der Ascheerweichungspunkt.

Brennwert und Heizwert

Unter dem Heizwert H_u wird die Wärmemenge verstanden, die bei der vollständigen Oxidation eines Brennstoffs ohne Berücksichtigung der Kondensationswärme (Verdampfungswärme) des im Abgas befindlichen Wasserdampfes freigesetzt wird. Gemäß der entsprechenden Prüfnorm DIN EN 14918 [2009] ist der Heizwert definiert als der absolute Wert für die in Joule angegebene spezifische Verbrennungswärme, die freigesetzt wird, wenn eine Masseneinheit des Biobrennstoffes in Sauerstoff bei konstantem Volumen bzw. bei konstantem Druck unter Bedingungen verbrannt wird, unter denen das gesamte Wasser in den Reaktionsprodukten in dampfförmigem Zustand vorliegt (hypothetisch unter einem Druck von 0,1 MPa). Würde man die Verdampfungswärme des Wasserdampfes durch Kondensation gewinnen, wäre die abgegebene Wärmemenge etwas höher. Deshalb wurde der Heizwert früher auch als "unterer" Heizwert bezeichnet.

Im Unterschied zum Heizwert ist der Brennwert H_o als die bei der vollständigen Oxidation eines Brennstoffs freigesetzte Wärmemenge definiert, die verfügbar wird, wenn auch die Kondensationswärme des bei der Verbrennung gebildeten Wasserdampfes nutzbar gemacht wird. Dazu müssen die Abgase abgekühlt werden, damit der Wasserdampf kondensieren kann. Als Bezugstemperatur gilt hierfür gemäß der europäischen Norm DIN EN 14918 [2009] ein Wert von 25 °C. Verglichen mit dem Heizwert erhöht sich die Wärmeausbeute unter diesen Bedingungen entsprechend. Daher wurde der Brennwert früher auch als "oberer" Heizwert (H_o) bezeichnet.

Der bei der thermo-chemischen Umwandlung entstehende Wasserdampf, der die Ursache für die begriffliche Trennung darstellt, entstammt zum einen aus der chemischen Reaktion des im Brennstoff gebundenen Wasserstoffs mit Sauerstoff und zum anderen aus dem im biogenen Festbrennstoff vorhandenen freien und gebundenen Wasser.

- Für jeden Prozentpunkt Wasserstoffgehalt in der Trockensubstanz ergibt sich eine Kondensationswärmemenge von 218,3 J bezogen auf 1 g Brennstoff (bei 25 °C).
- Beim in der Biomasse vorhandenen freien und gebundenen Wasser beträgt die Kondensationswärmemenge für einen Prozentpunkt Wassergehalt bezogen auf 1 g Brennstoff 24,43 J.

Mit diesen spezifischen Werten kann die Abweichung zwischen Brennwert und Heizwert berechnet werden.

Brennwert und Heizwert können somit nicht alternativ zueinander verwendet werden. Für die Beurteilung der Energiemenge, die im Brennstoff chemisch gebunden ist, stellt der Heizwert die maßgebliche Bestimmungsgröße dar. Das liegt daran, dass die Kondensationswärme bei einer Feuerungsanlage zur Wärmebereitstellung nur dann sinnvoll genutzt werden kann, wenn sowohl das Wärmenutzungssystem auf ein ausreichend niedriges Temperaturniveau als auch die Konversionsanlage sowie das Kaminsystem für den Anfall von Kondensat ausgelegt sind (z. B. "Brennwertkessel"). Dies trifft jedoch im Regelfall für Anlagen zur Nutzung biogener Festbrennstoffe bisher nicht zu.

Wassergehalt

Der Wassergehalt ist die wesentliche Einflussgröße auf den Heizwert. Da wasserfreie Biomasse in der Natur praktisch nicht vorkommt, müssen mehr oder weniger große Mengen Feuchtigkeit während der Verbrennung oder Vergasung verdunsten. Die hierfür verwendete Wärme wird dem energetischen Prozess entnommen und mindert die Nettoenergieausbeute, da in der Regel keine Wasserdampfkondensation im Abgas vorgesehen ist. Aus diesem Grund besteht eine klare Abhängigkeit zwischen dem Heizwert und dem Wassergehalt, die sich nach folgender Gleichung berechnen lässt:

$$H_{u(W)} = \frac{H_{u(wf)} \cdot (100 - W) - 2,44 \cdot W}{100}$$

wobei der $H_{u(W)}$ der Heizwert des Brennstoffes (in MJ/kg) bei einem Wassergehalt von W (in Massen-%, bezogen auf die Gesamtmasse des feuchten Brennstoffes) ist. $H_{u(wf)}$ ist der Heizwert des Brennstoffes im wasserfreien (wf) Zustand, und die Konstante 2,44 ist die Verdampfungswärme des Wassers in MJ/kg, bezogen auf 25°C. [Hartmann et al., 2009]

Aschegehalt

Der Aschegehalt des Brennstoffes ist ein wichtiges brennstofftechnisches Merkmal. Mit zunehmendem Aschegehalt nimmt meist auch die Staubkonzentration im Abgas zu, wodurch sich ggf. der Aufwand für eine notwendige Entstaubung erhöht bzw. sich diese Notwendigkeit erst ergibt. Das gilt insbesondere für Anlagen, bei denen das Glutbett vermehrt mechanischen Einflüssen ausgesetzt ist bzw. direkt von Verbrennungsluft durchströmt wird. Hierdurch werden z.T. feinere Partikel mitgerissen und es erhöht sich die Temperatur im Glutbett, wodurch verstärkt leichtflüchtige Verbindungen austragen werden. Bei handbeschickten Feuerungen für stückige Brennstoffe wirken sich die Unterschiede im Aschegehalt der Brennstoffe infolge des weitgehend ungestörten Chargenabbrands weniger stark aus.

Für größere Feuerungsanlagen mit entsprechend hohen Ascheanfall (Rost- und Filterasche) stellt sich die Frage nach einer kostengünstigen Entsorgung bzw. Verwendung der Aschen. Bei Holzbrennstoffen ist die Rückstandsmenge aufgrund der niedrigen Aschegehalte meist deutlich geringer als bei Halmgütern, somit ist die Aschehandhabung und Entsorgung mit niedrigeren Kosten verbunden. Bei Halmgütern kann der Gehalt an toxischen Stoffen in der Filterasche (z.B. Schwermetalle, Chlor, PCDD/F und PAH) eine wichtige Rolle bei der Entsorgung spielen.

Agglomeration beim Entgasungsvorgang und Ascheschmelzverhalten

Erst nach Abschluss dieses Projektes wurde im Rahmen anderer Entwicklungsarbeiten beobachtet, dass die eingesetzten Heupellets bereits während des Entgasungsvorganges aneinander haften und große Agglomerate bilden. Dieses Verhalten setzt unmittelbar nach dem Anzünden der Pellets mit Beginn der Entgasungsreaktionen ein. Im Laufe der Brennstoffentgasung bilden sich immer größere und dichtere Agglomerate, die sich dann auch negativ auf

das Abbrandverhalten auswirken. Zum einen nimmt die Entgasungsrate in den Agglomeraten ab, was zu einer abnehmenden Feuerungswärmeleistung der Anlage führt und zum anderen verfestigen sich die Agglomerate gegen Ende der Entgasungsphase bzw. mit abnehmender Temperatur. Genauere Zusammenhänge, Ursachen und Abhängigkeiten dieses speziellen Verhaltens der Heupellets während der Brennstoffentgasung sind bisher nicht bekannt. Die Bildung großvolumiger Agglomerate beim Entgasungsvorgang unterscheidet sich grundsätzlich von ggf. folgenden Schmelzvorgängen der Brennstoffasche.

So können beim Verbrennungsprozess im Glutbett auch physikalische Veränderungen der Asche auftreten. Je nach Temperaturniveau und Dauer der Einwirkung der hohen Temperaturen kommt es zum Verkleben bis hin zur völligen Schmelze der Asche.

Bei Brennstoffen mit niedrigen Ascheschmelzpunkten besteht ein hohes Risiko, dass das Überschreiten einer kritischen Temperatur über längere Zeit zu Verschlackungen im Brennstoffbett und zu Verschmutzungen im Feuerraum- und im Wärmetauscherbereich kommen kann. Diese Verschlackungen und Verschmutzungen können zu Störungen, Betriebsunterbrechungen und zu Veränderungen bei der Verbrennungsluftzufuhr führen und müssen ggf. mechanisch entfernt werden. Zur Vermeidung von Verschlackungen im Brennstoffbett sind Maßnahmen zur Senkung der Betttemperatur (z.B. wassergekühlte Rostsysteme oder Brennmulden, Rauchgasrückführung) notwendig. Durch die geringeren Betttemperaturen wird auch der Austrag von partikelbildenden Verbindungen (z.B. Kaliumverbindungen) reduziert. Halmgüter weisen aufgrund der höheren Kaliumgehalte deutlich geringere Ascheschmelzpunkte als z.B. Hölzer auf.

Das Ascheschmelzverhalten wird nicht nur durch den Kaliumgehalt im Brennstoff beeinflusst, sondern auch vom Verhältnis der Gehalte an Kalium zu Calcium und anderen Aschebestandteilen wie Silicium, Phosphor, Chlor und Magnesium [siehe Tonn, 2011; Sommersacher, 2014, Struschka et al., 2008].

Für Untersuchungen zur Bestimmung des Ascheschmelzpunktes wird das in der DIN CEN/TS 15370-1 [2006] beschriebene Verfahren verwendet. Hierbei wird ein Probenkörper in einem Ofen erhitzt und dessen charakteristische Formänderung untersucht. Die einzelnen Phasen während des Schmelzvorganges der Asche sind in Abbildung 2.2 dargestellt.

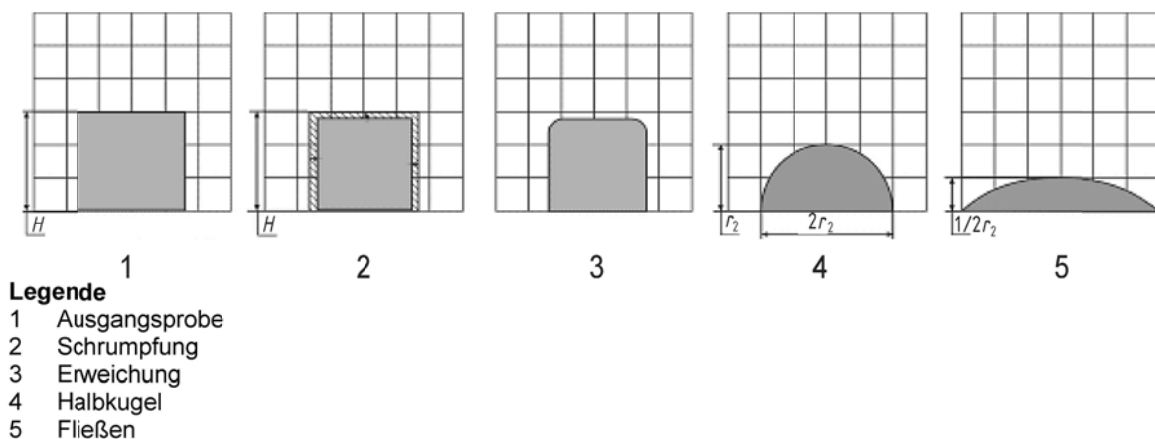


Abbildung 2.2 Phasen während des Schmelzvorganges der Asche (Ausgangsform = Form und Größe bei 550 °C) [DIN CEN/TS 15370-1, 2006]

Erreicht der Probenkörper die jeweilige charakteristische Phase wird hierzu die betreffende Temperatur ermittelt. Die Temperaturen sind wie folgt definiert:

- Temperatur am Beginn der Schrumpfung (Sinterbeginn): Temperatur, bei der das Schrumpfen des Probekörpers beginnt.
- Erweichungstemperatur: Temperatur, bei der erste Anzeichen einer Abrundung von Kanten des Probekörpers infolge Schmelzens auftreten.
- Halbkugeltemperatur: Temperatur, bei der die Form des Probekörpers annähernd halbkugelförmig wird.
- Fließtemperatur: Temperatur, bei der die Asche auf der sie tragenden Platte in einer Schicht ausgebreitet ist.

2.2 Einflussfaktoren auf die Brennstoffqualität von Heu

Landschaftspflegeheu unterscheidet sich vor allem durch die höheren Gehalte an N, Cl, S und Asche von Holz. Hierbei hängen die Zusammensetzung und damit die Brennstoffqualität von Heu von vielen Faktoren ab. Dies können der Standort der Heuproduktion, der Schnittzeitpunkt, die Dauer der Lagerung des Grünschnittes auf dem Feld sowie die Auswaschung durch Regen oder auch die Anteile von Gräsern, Kräutern und Leguminosen sein, siehe Abbildung 2.3.



Abbildung 2.3 Einflussfaktoren auf die Brennstoffqualität von Landschaftspflegeheu [Tonn, 2010]

Der Gehalt der Inhaltsstoffe in den Gräsern variiert über den Zeitraum deren Wachstums. Untersuchungen haben gezeigt, dass der Gehalt an Kalium in Gräsern und Kräutern von Landschaftspflegeflächen zwischen Juni und Oktober abnimmt. Das gleiche konnte beim Chlorgehalt nicht beobachtet werden. Dieser schwankt etwas, aber nimmt während diesem Zeitraum nicht stark ab. Im Gegenteil, bei Heu aus bestimmten Gegenden nimmt der Chlorgehalt während der Wachstumsperiode sogar zu. Die Aschegehalte von Gräsern und Kräutern sind stärker vom Standort als vom Zeitpunkt in der Wachstumsperiode beeinflusst. Der

Gehalt an Stickstoff in Gräsern und Kräutern ist ebenfalls stark vom Standort und bei einigen Standorten auch vom Zeitpunkt in der Wachstumsperiode abhängig, siehe Abbildung 2.4 [Tonn, 2010].

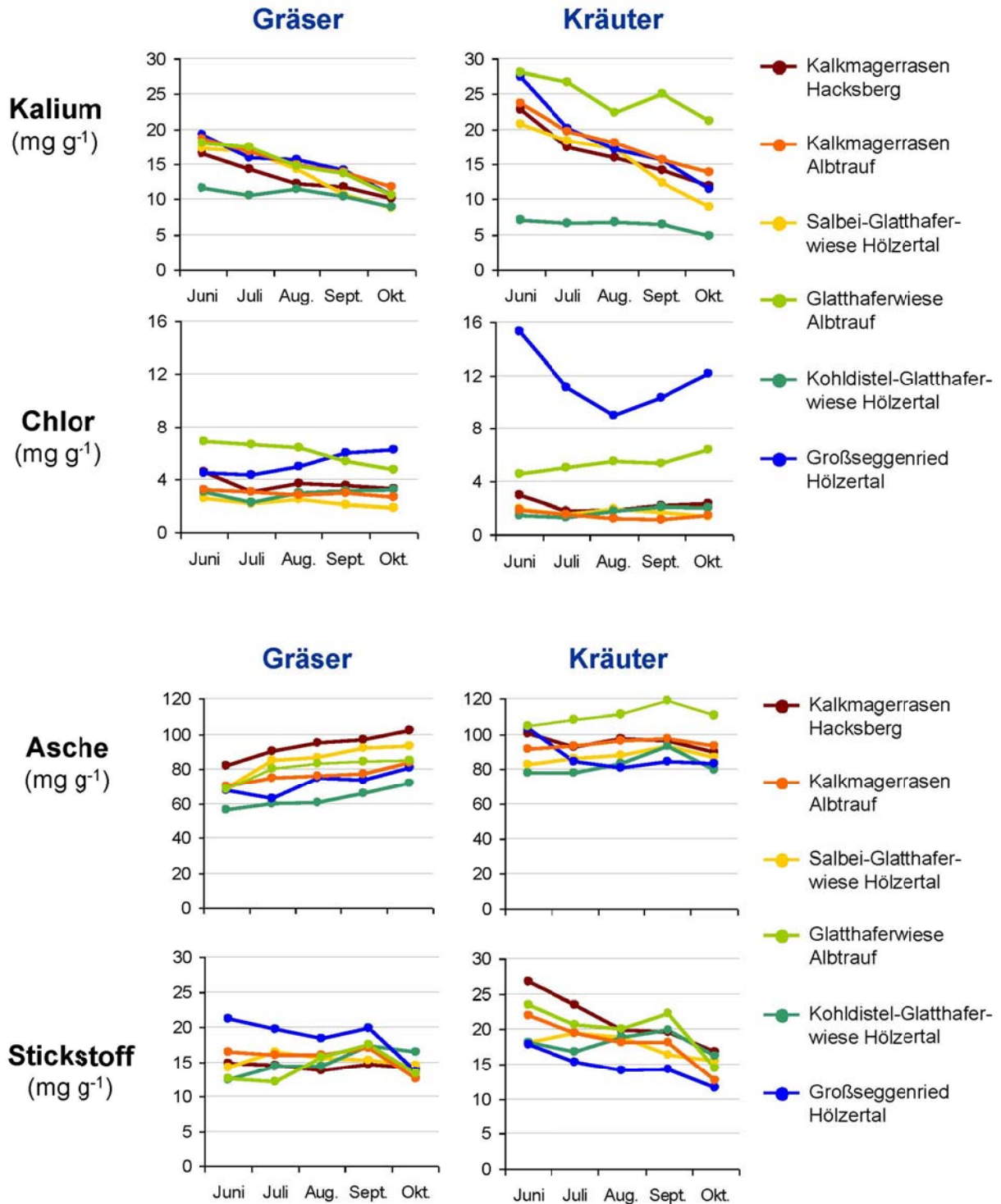


Abbildung 2.4 Verlauf der Gehalte an Kalium, Chlor, Asche und Stickstoff in Gräsern und Kräutern während der Wachstumsperiode an unterschiedlichen Standorten [Tonn, 2010]

Während der Wachstumsphase nimmt das K / Ca -Verhältnis der Gräser deutlich und der Kräuter nur gering ab, siehe Abbildung 2.5. Dies hat Auswirkungen auf das Ascheschmelzverhalten. Bei einem höheren K / Ca-Verhältnis reduziert sich die Ascheschmelztemperatur.

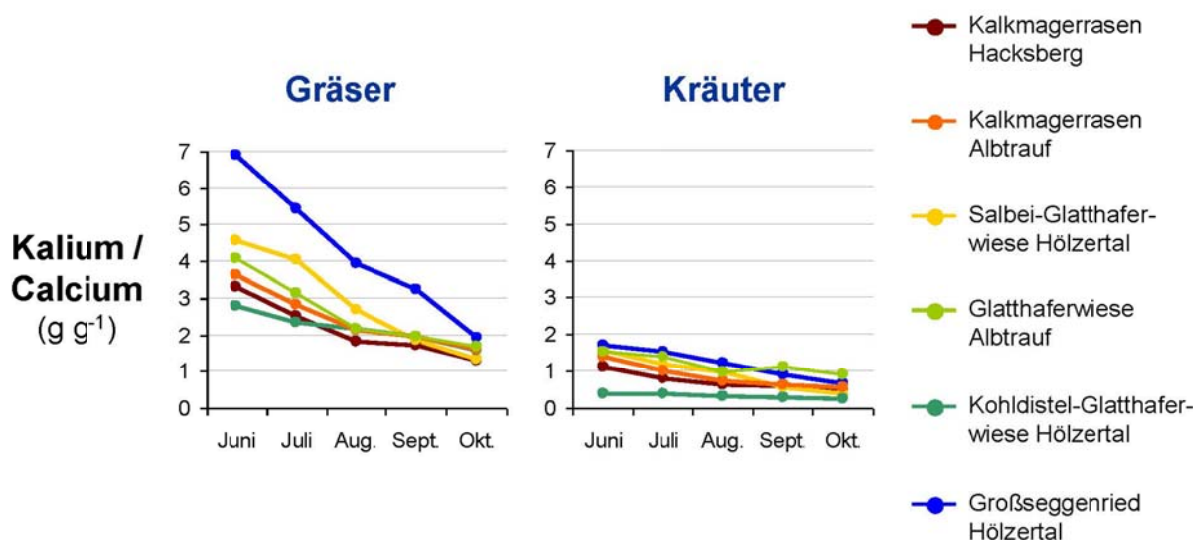


Abbildung 2.5 Verlauf des Kalium / Calcium - Verhältnisses bei Gräsern und Kräutern während der Wachstumsperiode an unterschiedlichen Standorten [Tonn, 2010]

Zusammengefasst lassen sich die Einflussfaktoren auf die Brennstoffqualität von Landschaftspflegeheu wie folgt beschreiben [Tonn, 2010]:

- **Botanische Zusammensetzung:** ist wichtigster Faktor für N-, Cl-, Ca- und Aschegehalt im Heu. Ein hoher Anteil an Gräsern wirkt sich positiv durch niedrigere Gehalte an N, K und Asche und negativ durch höhere Cl- und niedrigeren Ca-Gehalt aus.
- **Standort:** Gehalte an K und Ca stehen in engem Zusammenhang mit Bodennährstoffgehalten. Eine externe Nährstoffzufuhr durch Düngung und Grundwasser sind Hauptrisikofaktor für hohe K- und Cl-Gehalte im Heu.
- **Schnittzeitpunkt:** Änderungen zwischen Juni und Oktober sind nur für K-Gehalt bedeutend. Zwischen Oktober und Dezember sinken K- und Cl-Gehalte stark, N-Gehalte in etwa konstant, bei geringen Ertragsverlusten. Allerdings könnten so späte Schnittzeitpunkte u.a. aus naturschutzfachlicher Sicht negativ zu bewerten sein.

2.2.1 Verbesserung der Heuqualität durch Auswaschung

Niederschläge während der Feldtrocknungsphase können, bei einer ausreichenden Intensität, die Brennstoffqualität von Heu verbessern, da Kalium und Chlor ausgewaschen werden. Somit werden die Verbrennungseigenschaften durch die geringen Kaliumgehalte verbessert und die Chloremissionen reduziert. Auf die übrige Brennstoffzusammensetzung haben die Niederschläge kaum Auswirkungen. Allerdings ergeben sich einige andere Konsequenzen und Risiken, wenn das gemähte Heu gezielt Niederschlägen ausgesetzt wird. Neben einer begrenzten Feldliegezeit aufgrund des Wiederaufwuchses der Wiesen, dem Risiko von Er-

tragseinbußen bei anhaltender schlechten Witterung ist auch eine bestimmte Witterungsabfolge (trocken - hohe Niederschläge - trocken) notwendig. Die Wirkung von Niederschlägen, in diesem Fall durch Auswaschversuche dargestellt, zeigt Abbildung 2.6 [Tonn, 2010].

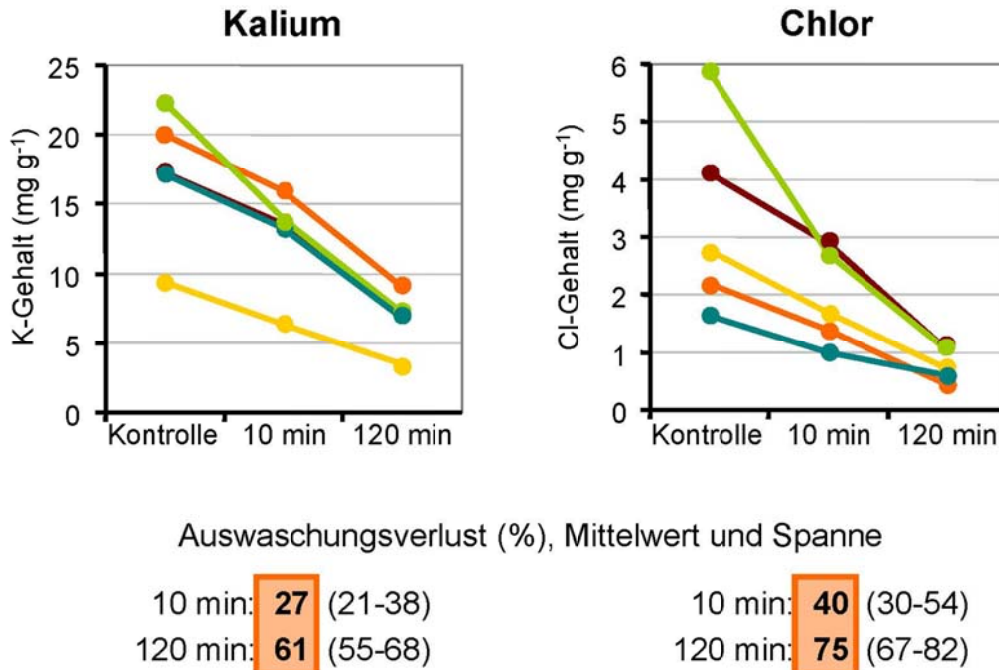


Abbildung 2.6 Abnahme der Gehalte an Kalium und Chlor von Gräsern aus 5 Standorten bei Auswaschversuchen [Tonn, 2010]

2.3 Typische Elementarzusammensetzungen von Heu

Die Konzentrationen von Elementen in Heu weisen eine große Bandbreite auf, die von vielen Faktoren wie z.B. Standort (und damit Wasserversorgung, Temperatur, Boden und Nährstoffe), Anteile an Gräsern, Kräutern und Leguminosen sowie pflanzenbaulichen Maßnahmen wie Bodenbearbeitung, Düngung, Pflanzenschutz und Erntemaßnahmen abhängen.

In Tabelle 2.2 werden für naturbelassenes Landschaftspflegeheu typische Elementarzusammensetzungen aus der Literatur angegeben.

Vor allem die Gehalte an Stickstoff, Kalium und Chlor streuen in einem weiten Bereich, die Gehalte der Hauptelemente Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff liegen vergleichsweise eng beieinander.

Die gilt auch für den Heizwert des trockenen Landschaftspflegeheus. Im Aschegehalt kann sich das Heu dagegen stark unterscheiden. Dies hängt letztlich auch vom Standort und vorgehen bei der Heuernte ab, da geerntetes Heu auch Bodenbestandteile enthalten kann.

Tabelle 2.2 Typische Elementarzusammensetzungen für Landschaftspflegeheu (bezogen auf Trockenmasse)

Quelle	C	H	O	N	K	Ca	Mg	P	S	Cl
	Massen-%									
A	45,5	6,1	41,5	1,14	1,49	0,50	0,16	0,19	0,16	0,31
B	45,0	6,2	42,0	1,04						0,22
C				1,2-2,2	0,8-1,9	0,12-0,68				0,2-0,7
D1	45,3	7,3	39,1	1,5						0,10
D2	46,3	8,1	37,2	1,5						0,06

Quelle	Heizwert MJ/kg	Asche Massen-%	flüchtige Bestandteile Massen-%	Ascheschmelzverhalten [Angaben in °C]		
				Erweichungs- temperatur	Halbkugel- temperatur	Fließ- temperatur
A	17,4	5,7	75,4	1.061		1.228
B	17,6	5,4	75,4	1.033	1.239 *	1.208
C		5,8-10,2				
D1		6,7		920	1.080	1.160
D2		6,8		1.070	1.190	1.220

* geringere Anzahl von Einzelproben

A: Kaltschmitt et al., 2009

B: Hartmann et al., 2000 (Mittelwert aus 14 Proben)

C: Tonn, 2010 (Angaben für Gräser)

D1: Struschka et al., 2006 (Angaben für nicht verregnetes Heu)

D2: Struschka et al., 2006 (Angaben für verregnetes Heu)

2.4 Verwendete Heuqualitäten bei den Versuchen

Zur Festlegung der Heuqualitäten, die in den Verbrennungsversuchen eingesetzt werden sollen, wurden zahlreiche Heuproben auf den Chlorgehalt hin untersucht. Der Chlorgehalt im Heu war das zentrale Auswahlkriterium. Auswahlziel war, eine Bandbreite von < 0,1 bis > 0,7 Massen-% Chlor im Brennstoff mit drei unterschiedlichen Qualitäten abzudecken.

Das Erreichen dieses Zieles erwies sich aus mehreren Gründen als schwierig. Bei Projektstart war geplant, die Untersuchungen an einer installierten Kesselanlage mit einer Nennwärmeleistung von 600 kW im Jahr 2011 durchzuführen. Für diese Versuche wären, bei dem geplanten Versuchsprogramm, je Heuqualität ca. 40 Tonnen benötigt worden. Diese Heumengen konnten zu damaligem Zeitpunkt in den drei unterschiedlichen Qualitäten gar nicht beschafft werden, da witterungsbedingt kaum Heu auf dem Markt für Verbrennungszwecke verfügbar war. Außerdem stellte sich dann im weiteren Projektverlauf heraus, dass aufgrund von Umbaumaßnahmen die installierte Kesselanlage nicht mehr für die Versuche zur Verfügung stand.

Dies führte zur Entscheidung, am Institut eine Kesselanlage mit einer Nennwärmeleistung von 120 kW für die Versuche zu errichten. Durch die geringere Kesselleistung und die geän-

derte Aufbausituation (kurze Wege für Brennstoffbeschickung) reduzierte sich der Brennstoffbedarf für die Versuche erheblich, so dass grundsätzlich einige bereits analysierte Heuqualitäten hätten verwendet werden können. Durch Verzögerungen bei der Lieferung, beim Aufbau und der Inbetriebnahme der Anlage standen diese Qualitäten dann nicht mehr zur Verfügung.

Die Chlorgehalte der im Vorfeld im Zeitraum von 2011 bis 2013 untersuchten 10 Heuproben sind in Abbildung 2.7 dargestellt.

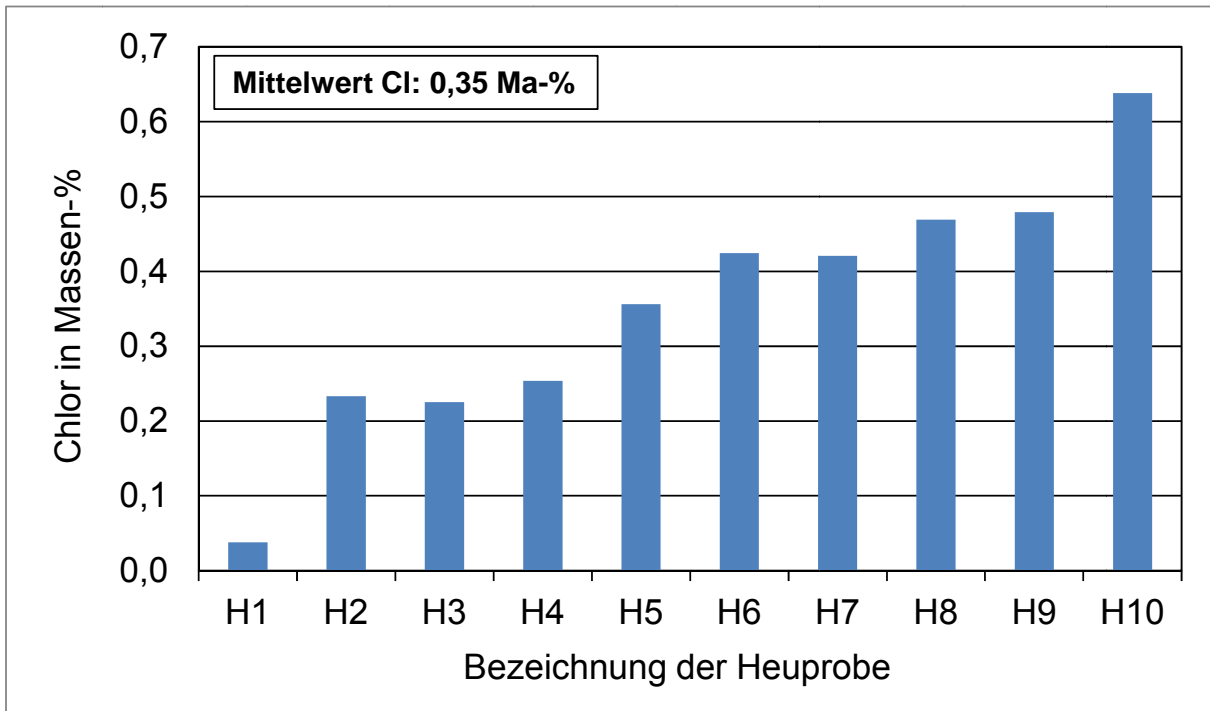


Abbildung 2.7 Chlorgehalte in 10 Heuproben - Analysen im Vorfeld zur Brennstoffauswahl (Bezug: Trockenmasse; Analysenzeitraum: 2011 bis 2013)

Die Chlorgehalte reichen von 0,04 bis 0,64 Massen-% (Bezug: Trockenmasse) und liegen im Mittel bei 0,35 Massen-%. Die Proben stammten überwiegend aus der Region und lagen meist lose (7 Proben: H1, H3, H4, H6, H8, H9, H10) bzw. in pelletierter Form (3 Proben: H2, H5, H7) vor. Der mittlere Chlorgehalt der Proben stimmt in etwa mit den aufgeführten Literaturangaben (siehe Tabelle 2.2 bzw. Kaltschmitt et al., 2009) überein und deckt auch in etwa die aufgeführte Bandbreite (siehe Tabelle 2.2 bzw. Tonn, 2010) ab.

Letztlich wurden drei weitere Heuproben analysiert, die dann als Brennstoffe ausgewählt wurden. Die Probenahme erfolgte durch die Firma Agrarhandel Müller GbR aus Böhningen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.8 gezeigt. Bei den Proben handelte es sich um eine Probe von Heupellets (H11) und 2 Proben von losem Heu (H12 und H13), die aus unterschiedlichen Ballen gleicher Herkunft gezogen wurden. Die Auswahl dieser Heuproben als Brennstoff für die Untersuchungen erfolgte in Abstimmung mit dem Umweltministerium Baden-Württemberg.

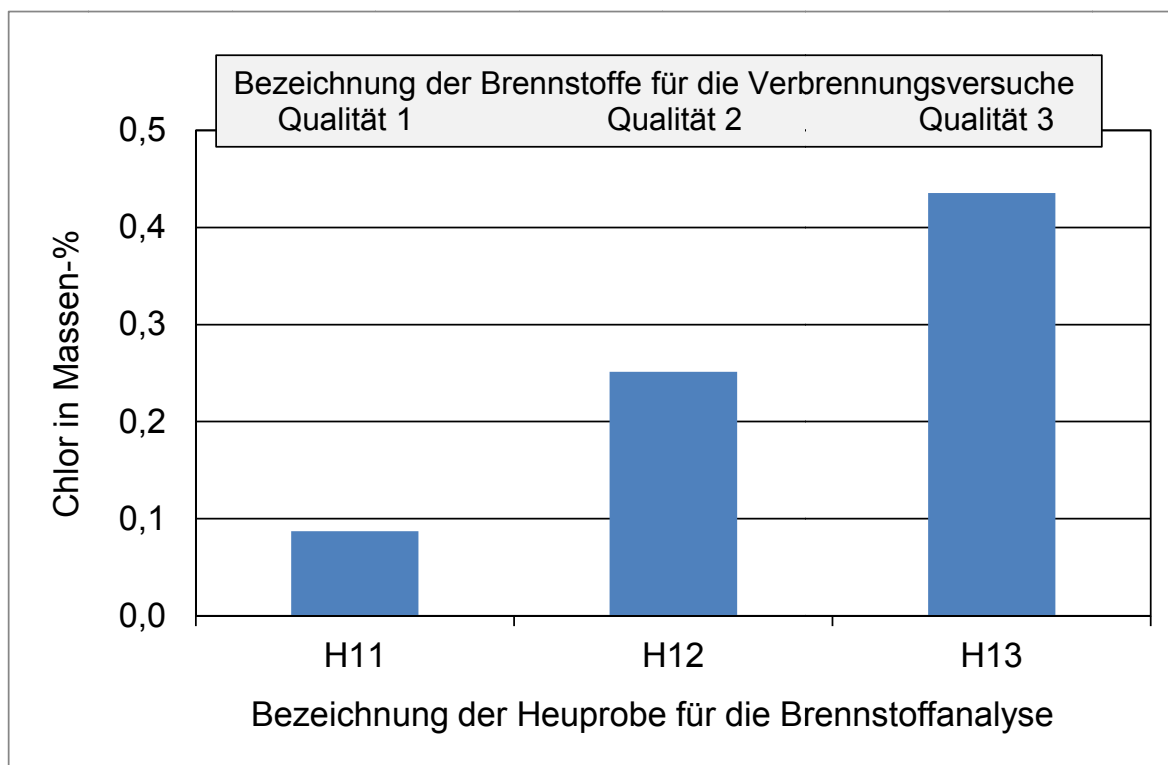


Abbildung 2.8 Chlorgehalte in 3 als Brennstoffe ausgewählten Heuproben (H11: Heupellets aus 2. Schnitt, H12: junges Heu (lose), H13: verregnetes Heu (lose); Bezug: Trockenmasse; Analysenzeitraum: Juni und Juli 2013)

Nach Festlegung der Brennstoffqualitäten wurden entsprechende Mengen von der Firma Agrarhandel Müller GbR bezogen, die auch die Pelletierung des Heus durchführte. In einer ersten Teillieferung wurden die Qualitäten der Heuproben H11 (Heu 2. Schnitt) und H13 (Heu verregnet) geliefert, mit denen auch in einer Messkampagnen der erste Teil der geplanten Verbrennungsversuche durchgeführt wurde. Das Heu 2. Schnitt wurde nach dem Mähen und Trocknen unmittelbar geborgen, während das Heu mit der Charakterisierung „verregnet“ nach dem Mähen noch einige Zeit Niederschlägen in unbekannter Anzahl und Intensität ausgesetzt wurde.

Während der Verbrennungsversuche wurden Brennstoffproben aus dem Tagesbehälter der Feuerungsanlage entnommen, so dass eine Mischprobe des verfeuerten Brennstoffes vorlag, die dann nochmals analysiert wurde. Die Ergebnisse dieser Analysen sind in Tabelle 2.3 dargestellt, Tabelle 2.4 enthält Angaben zum Ascheschmelzverhalten der verfeuerten Heuqualitäten. Im Folgenden wird der Brennstoff aus Heu vom 2. Schnitt als **Qualität 1** und der Brennstoff aus verregnetem Heu als **Qualität 3** bezeichnet.

Auffällig ist bei einem Vergleich der Tabelle 2.3 mit Abbildung 2.8, dass sich die Chlorgehalte der letztlich verfeuerten Heupellets von den Chlorgehalten in den Heuproben unterschieden, die zur Auswahl der Heuqualitäten herangezogen wurden. So wurde Heuprobe H11 (Heupellets aus 2. Schnitt) ausgewählt, da die Heuprobe einen sehr geringen Chlorgehalt aufwies. In der verfeuerten Heuqualität Q1 lag der Chlorgehalt nun deutlich höher. Demgegenüber unterschieden sich die Chlorgehalte in der Heuprobe H13 (verregnetes Heu, lose) deutlich weniger von der verfeuerten Heuqualität Q3.

Tabelle 2.3 Elementar- und Aschezusammensetzungen der verfeuerten Heuqualitäten Q1 und Q3

Qualität	Bezug: Rohsubstanz des Brennstoffs									
	C	H	O	S	N	Cl	Asche	Wasser- gehalt	flüchtige Stoffe	Heizwert Hu
	[Ma%]									
Q1	40,3	6,4	33,1	0,19	1,71	0,25	9,6	8,5	66,9	14.817
Q3	40,7	6,4	34,7	0,16	1,26	0,35	8,8	7,7	67,8	14.860

Qualität	Bezug: Masse der Brennstoffasche												
	Aluminium (Al ₂ O ₃)	Barium (BaO)	Kalzium (CaO)	Eisen (Fe ₂ O ₃)	Kalium (K ₂ O)	Magnesium (MgO)	Mangan (MnO)	Natrium (Na ₂ O)	Phosphor (P ₂ O ₅)	Schwefel (SO ₃)	Silizium (SiO ₂)	Strontium (SrO)	Titan (TiO ₂)
	[Ma%]												
Q1	3,40	0,041	11,89	1,66	23,34	6,70	0,130	0,319	7,09	2,83	42,39	0,022	0,175
Q3	3,00	0,043	12,23	1,63	22,25	5,58	0,083	0,274	6,50	2,97	45,27	0,029	0,144

**Tabelle 2.4 Ascheschmelzverhalten der verfeuerten Heuqualitäten Q1 und Q3 (Ver-
schungstemperatur: 550 °C)**

Qualität	Ascheschmelzverhalten [Angaben in °C]			
	Sinterbeginn	Erweichungs- temperatur	Halbkugel- temperatur	Fließ- temperatur
Q1	840	1.050	1.130	1.150
Q3	730	980	1.160	1.190

3 Aufbau des Versuchsstandes

3.1 Feuerungsanlage

Für die Verbrennungsversuche wurde im Technikum des Instituts eine Feuerungsanlage, bestehend aus Heizkessel, Multizyklon und Gewebefilter sowie Abgasgebläse mit einer Nennwärmeleistung von 120 kW aufgebaut. Die Feuerungsanlage mit der Typenbezeichnung ÖKOTHERM®-Biomasseheizanlage Compact C1L wurde von der Firma A. P. Bioenergetechnik GmbH (92242 Hirschau) geliefert. Diese stellte auch den Heizkessel und die elektronische Steuereinheit Compact-Control AM I zur Kesselregelung her. Die Abgasreinigung, bestehend aus Multizyklon und Gewebefilter mit zugehörigem Abgasgebläse sowie Schaltschrank wurde von der Firma NESTRO Lufttechnik GmbH (07619 Schkölen) gefertigt.

Laut Herstellerangaben ist der Heizkessel für Brennstoffe mit einer niedrigen Ascheschmelztemperatur besonders geeignet, da keine nennenswerte Schlackebildung auftreten soll. Hierzu wurde speziell eine wassergekühlte Brennermulde entwickelt, die übermäßige Asche- und Schlackeanbackungen an den Wänden vermeiden soll, welche durch partielles Überschreiten des Ascheschmelzpunktes entstehen könnten.

Der Heizkessel besteht aus einer selbsttragenden Stahlkonstruktion, in der Feuermulde, Nachbrennraum, Verbrennungsluftgebläse und Zündvorrichtung integriert sind. Die Feuermulde besitzt einen trapezförmigen Querschnitt, Primär- und Sekundärluft werden links und rechts durch Düsenöffnungen in bzw. über das Brennstoffbett mittels zwei separater Gebläse zugeführt. Verluste durch den Rostdurchfall treten nicht auf, da der Boden des Brennstoffbettes keine Öffnungen besitzt. Brennstoff wird auf der Kesselrückseite mittels einer Stokerschnecke zugeführt, deren Förderleistung kann in der Kesselregelung eingestellt werden. Die weitgehend ausgebrannten Verbrennungsrückstände werden im vorderen Bereich des Kessels mit einer Ascheschnecke in eine Aschetonne gefördert. Der Vorschub des Brennstoffes erfolgt durch ein am Muldenboden laufendes Schubelement (Ascheschieber). Dieser Ascheschieber führt eine Vor- und Rückwärtsbewegung aus. Die Häufigkeit der Bewegung und der Bewegungsablauf (Vor und Rücklauf durchgängig oder in Intervallen) kann in der Kesselregelung eingestellt werden. Die Bewegung des Ascheschiebers ist allerdings mit der Laufzeit der Ascheschnecke gekoppelt, d.h. Ascheschieber und Ascheschnecke lassen sich nicht getrennt ansteuern.

Der zweizügige Nachbrennraum ist für einen langen Flammenweg mit einer hohen Verweildauer ausgelegt. Durch eine tangentielle Verbrennungsluftzugabe soll eine Rotation der Gase erreicht werden, was zu niedrigen Emissionswerten führen soll.

Die Wärmeabfuhr erfolgt über einen zweizügigen Wärmetauscher. Die bei der Verbrennung entstehenden heißen Verbrennungsgase werden im Wärmetauscher gekühlt, dabei geben sie die Wärme an das Heizwasser ab, welches in Gegenrichtung zum Abgas durch den Wärmetauscher fließt.

Die Feuerungsanlage wird über die elektronische Steuerungseinheit bedient. Es handelt sich um eine abgasgeführte (mit Lambda-Sonde) Steuerungs- und Regelungstechnik mit integrierter Leistungsanpassung, welche laut Herstellerangaben im Leistungsbereich von 30-100 % für ein optimales Abbrandverhalten und unterdurchschnittliche Abgasemissionen sorgen soll. Die Menüeinstellungen können über ein digitales Bedienterminal eingestellt werden, welches

Fehlbedienungen minimiert und über den aktuellen Anlagenzustand informiert. Außerdem kann mittels einer speziellen Software der Anlagenzustand auch ausgelesen und gespeichert werden. In Abbildung 3.1 ist der Heizkessel sowohl mit Fotos als auch schematisch im Schnitt dargestellt.

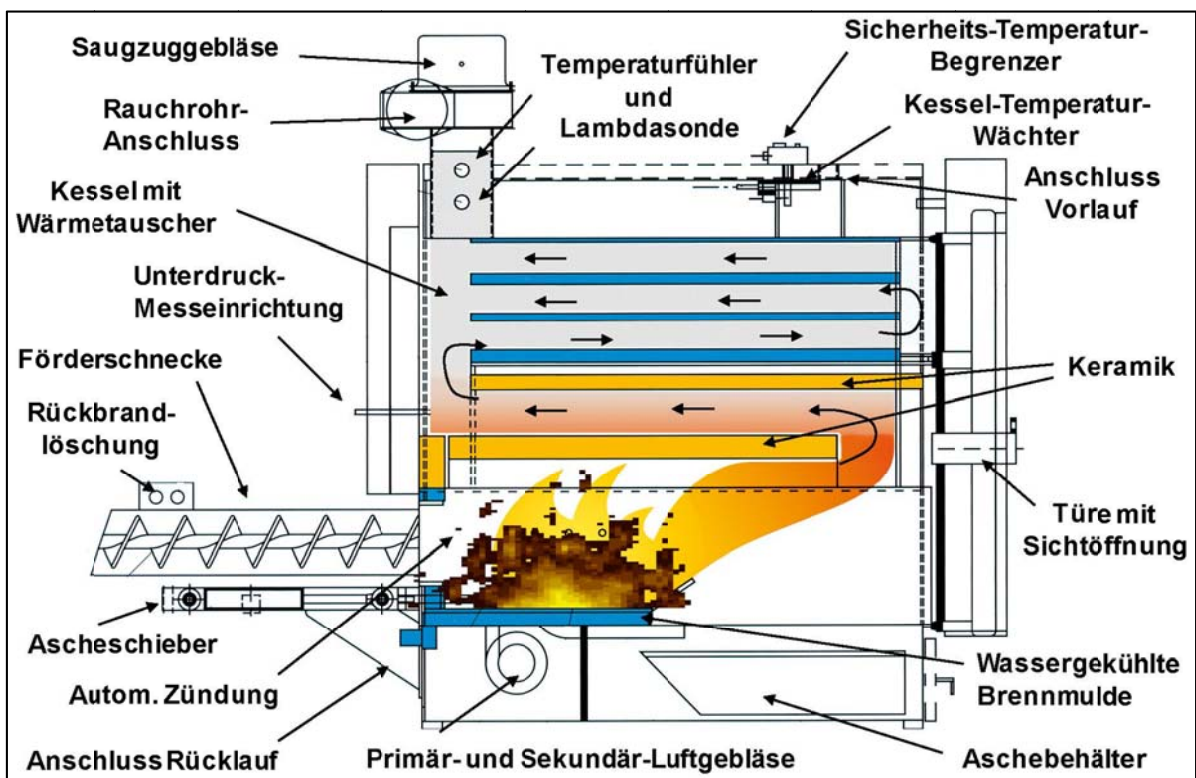


Abbildung 3.1 Fotos und Schnitt durch den Heizkessel mit den wichtigsten Komponenten (statt Aschebehälter wurde beim IFK-Heizkessel eine Ascheschnecke installiert) [Dobler, 2011]

Die Abgasreinigung der Firma NESTRO Lufttechnik GmbH, bestehend aus Multizyklon und Gewebefilter, ist beispielhaft in Abbildung 3.2 [ÖKOTHERM®, 2010] dargestellt. Vor dem Gewebefilter ist ein Multizyklon vorgeschaltet, um größere glühende Partikel abzuscheiden. Die eigentliche Staubabscheidung findet im Gewebefilter statt. In diesem sind 36 Filterschläuche aus PTFE (Polytetrafluorethylen, Dauerbetriebstemperatur 250 °C) mit einer Filterfläche von insgesamt 8,4 m² installiert. Laut Herstellerangaben soll ein Reststaubgehalt von ca. < 10 mg/m³ (bei 13 Vol% O₂) im Abgas erreicht werden.

Der Gewebefilter wirkt im Wesentlichen als Oberflächenfilter, d.h. auf dem Filtermaterial bildet sich ein Filterkuchen aus, in dem die Partikelabscheidung stattfindet. Durch den Aufbau des Filterkuchens erhöht sich der Druckverlust im Gewebefilter, was eine regelmäßige Abreinigung erfordert. Die Regeneration wird durch einen entgegen der Strömungsrichtung eingebrachten Druckluftimpuls erzeugt, der zum Abwerfen des Filterkuchens führen soll. Die Abstände zwischen den Druckluftimpulsen können je nach Staubkonzentration beliebig eingestellt werden, bei höheren Konzentrationen wird eine schnellere Regeneration benötigt.

Zum An- und Abfahren des Heizkessels und ggf. für den Teillastbetrieb ist der Gewebefilter mit einem Bypass ausgestattet. Der Bypass öffnet sich, wenn eine frei wählbare Abgastemperatur vor dem Gewebefilter unterschritten wird. Diese sollte so gewählt werden, dass der Wasserdampftaupunkt im Gewebefilter nicht unterschritten wird.

Da der Gewebefilter bei der Abreinigung mit Druckluft von Abgas durchströmt wird, ist die Reinigungswirkung nicht besonders gut, da ein Teil des abgelösten Filterkuchens sich sofort wieder an den Filterschläuchen ablagert, statt in die Aschetonne des Filters abzusinken. Deshalb muss der Gewebefilter in Abhängigkeit der Rohgasstaubkonzentration regelmäßig in frei einstellbaren Intervallen im Bypass abgereinigt werden. Während dieser Druckluftabreinigung öffnet sich der Bypass und das Abgas wird ungereinigt emittiert.

Bei der Feuerungsanlage des IFK wurden Bypassklappen zur Umgehung des Gewebefilters ohne besondere Anforderungen an die Dichtigkeit eingebaut.

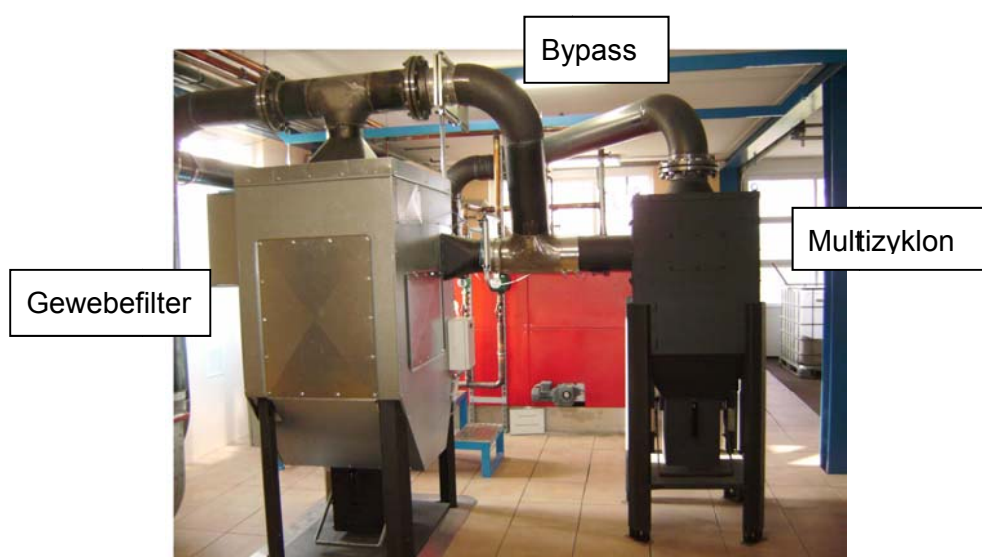


Abbildung 3.2 Abgasreinigung mit Multizyklon und Gewebefilter (beispielhaft) der Firma NESTRO Lufttechnik GmbH [ÖKOTHERM®, 2010]

Der Aufbau der Feuerungsanlage (Aufstellung der fertig montierten Teilkomponenten wie Heizkessel, Multizyklon und Gewebefilter, Abgasverrohrung mit Isolierung, Aufbau der Messstellen, Anschluss an Kühlwasser- und Frischwassernetz, Verlegung Steuer- und Versorgungsspannung, Anfertigung und Aufbau von Brennstoff-Tagesbehälter) wurde vom IFK übernommen. Die Erstinbetriebnahme des Gewebefilters (Beseitigung von Montagemängeln und geringfügige Änderungen, Precoating des Gewebefilters mit Kalkpulver, Einstellung und Überprüfung der Bypassklappen, Kontrolle der Filterfunktionen) wurde vom Filterhersteller durchgeführt. Die Erstinbetriebnahme des Heizkessels (Überprüfung der Funktionen, Einstellung von Parametern für Heupellets und die Beseitigung einiger Mängel - z.B. Austausch von defekter Kesselplatine und Frequenzumrichter) erfolgten durch den Kesselhersteller. Weitere Tests zur Optimierung der Kesseleinstellung wurden, in Absprache mit dem Kesselhersteller, vom IFK durchgeführt.

3.2 Verwendete Messtechnik

Bei den Verbrennungsversuchen wurden Messungen im Rohgas (Messposition zwischen Gewebefilter und Multizyklon) und im Reingas (Messposition nach Gewebefilter bzw. Abgasgebläse) durchgeführt. Kontinuierlich wurden hierbei die Konzentrationen im Roh- und Reingas an O_2 sowie die Konzentrationen im Reingas an CO_2 , CO , VOC sowie NO_x gemessen.

Diskontinuierlich wurden, soweit notwendig zeitgleich im Roh- und Reingas, die Konzentrationen an Staub (Gesamtstaub), HCl und SO_2 sowie PCDD/F und PAH gemessen. Die Messpositionen für die gemessenen Abgaskomponenten an der Roh- und Reingasmessstelle sind in Abbildung 3.3 und Abbildung 3.4 gezeigt.

Bei allen diskontinuierlichen (manuellen) Verfahren wird ein Teilvolumenstrom aus dem Abgasstrom entnommen (extraktive Probenahme) und die darin befindlichen Stoffe in einer geeigneten Sammelphase angereichert. Eine extraktive Probenahme für Partikel bzw. partikelgebundene Stoffe muss isokinetisch (geschwindigkeitsgleich) erfolgen.

Eine geschwindigkeitsgleiche Probenahme liegt vor, wenn die Probenahme mit einem Volumenstrom durchgeführt wird, bei dem die Geschwindigkeit und die Strömungsrichtung des Gases, das in die Entnahmesonde eintritt, die gleiche Geschwindigkeit und der Strömungsrichtung hat wie das Gas im Abgaskanal am Messpunkt.

Erfolgt die Probenahme nicht isokinetisch, so können Entmischungserscheinungen (aufgrund unterschiedlicher Dichten von Gas und Feststoffen) auftreten und dazu führen, dass größere (schwerere) Partikel über- oder unterproportional erfasst werden (zu geringer Absauggeschwindigkeit überproportional, zu hoher Absauggeschwindigkeit unterproportional).

Im Folgenden werden die eingesetzten kontinuierlichen und diskontinuierlichen Messverfahren bzw. Messgeräte genauer beschrieben.

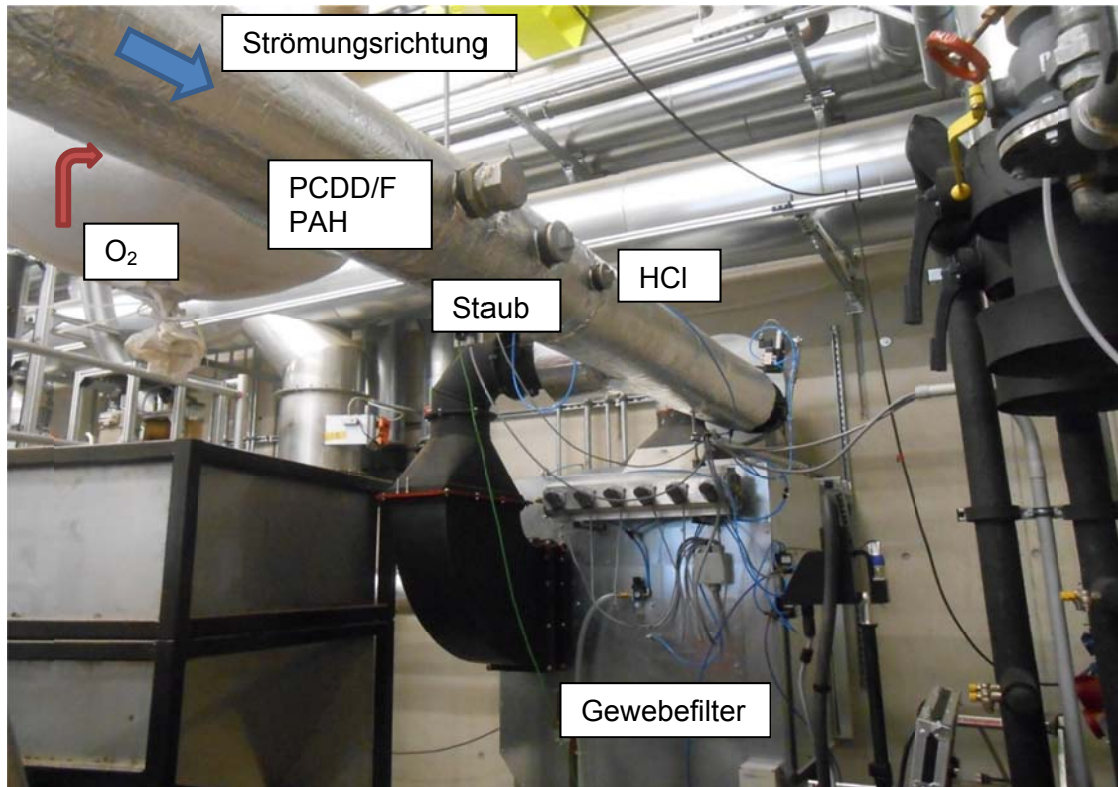


Abbildung 3.3 Messpositionen für die an der Messstelle Rohgas gemessenen Abgas-komponenten

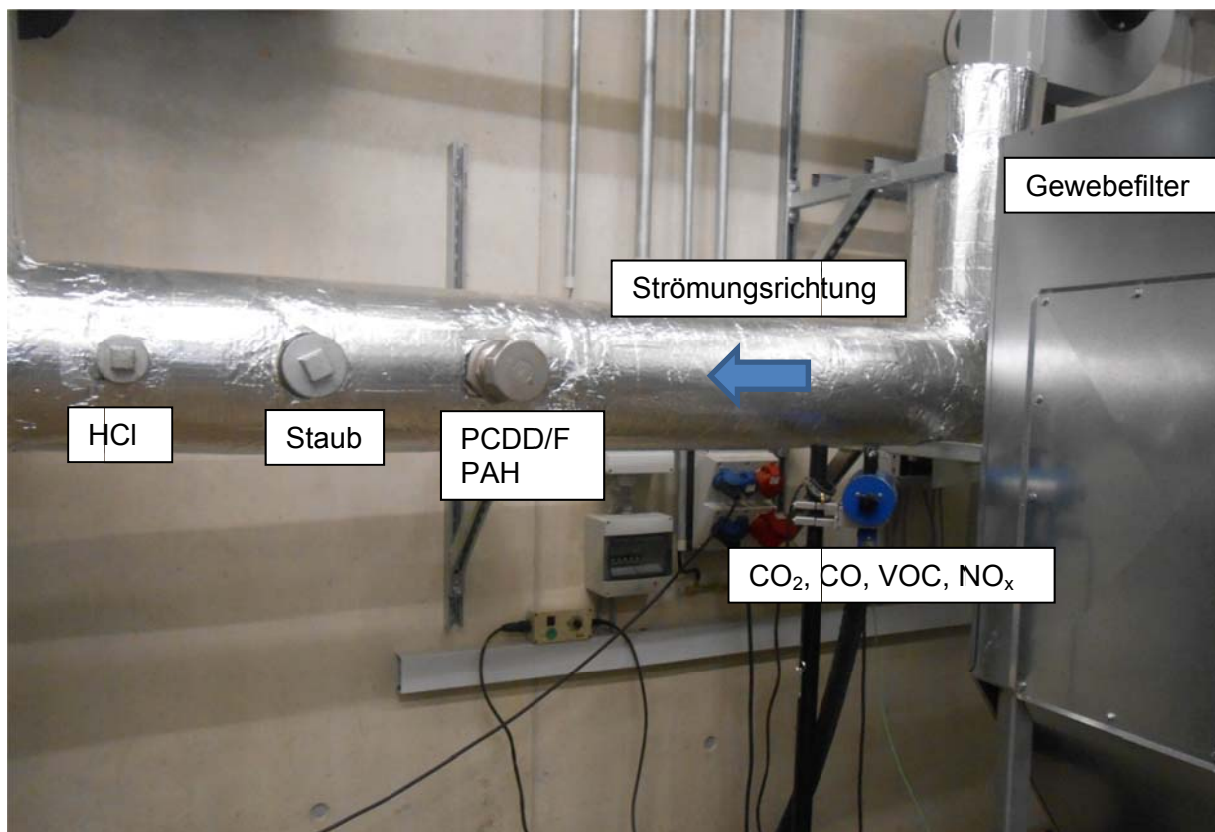


Abbildung 3.4 Messpositionen für die an der Messstelle Reingas gemessenen Abgas-komponenten

3.3 Kontinuierliche Messung der Gaskonzentrationen

Für die Messung der Komponenten O₂, CO₂, CO, VOC und NO_x wurden Standardmessgeräte eingesetzt, die in Tabelle 3.1 aufgelistet sind. Vor und nach jedem Messtag wurden die Nullpunkte der Messgeräte mit Stickstoff und die Kalibrierpunkte mit Prüfgas überprüft. Etwaige Gerätedriften wurden bei der Auswertung berücksichtigt.

Die Abgasprobe für die Analysatoren wurde an der Roh- und Reingasmessstelle über beheizte Filter entnommen und mittels einer beheizten Pumpe durch ebenfalls beheizte Schläuche dem jeweiligen Messgaskühler zugeführt und dann auf die einzelnen Analysatoren verteilt. Beim VOC wurde dem Flammenionisationsdetektor feuchtes Abgas über beheizte Schläuche zugeführt.

Tabelle 3.1 Messgeräte und Prüfgaskonzentrationen für kontinuierlich erfasste Komponenten an den Messstellen Roh- und Reingas

Komponente	Hersteller	Typ	Messbereich	Prüfgaskonzentration
Rohgas				
O ₂	Rosemount	Oxynos 100	0-25 Vol%	7,96
Reingas				
O ₂	Rosemount	NGA 2000	0-25 Vol%	7,96
CO ₂	Rosemount	NGA 2000	0-20 Vol%	12,1
CO	Rosemount	NGA 2000	0-1.500 ppm	785
CO	Rosemount	NGA 2000	0-3 Vol%	0,7
VOC	TESTA	FID 123	0-1.000 ppm	79,5
NO _x	Rosemount	NGA 2000	0-1.000 ppm	201

3.4 Gravimetrische Bestimmung der Staubkonzentration

Die Staubmessungen erfolgten gravimetrisch nach VDI-Richtlinie 2066 Blatt1 [VDI 2066, 2006], wobei gewisse Anpassungen vorgenommen wurden. Hierbei handelt es sich um ein quantitatives Verfahren, bei dem ein Teilvolumenstrom isokinetisch aus einem Hauptvolumenstrom abgesaugt und über einen Filter geleitet wird. Dabei wird der Staub auf einem vorab gewogenen Filter abgeschieden. Durch die Rückwägung des beladenen Filters wird die Staubmasse ermittelt. Zusätzlich werden Staubablagerungen in der Entnahmesonde berücksichtigt. Aus diesen beiden Staubmassen (Filter und Ablagerungen) und dem abgesaugten Teilvolumen erhält man die Staubkonzentration.

Bei den Messungen waren die Planfilterkopfgeräte, in denen die Staubfilter eingebaut sind, außerhalb des Abgasrohres aufgebaut und wurden deshalb elektrisch beheizt (auf ca. 70 °C), um eine Kondensation von Wasserdampf zu vermeiden. Der Teilvolumenstrom wird von einer Pumpe abgesaugt, im Trockenturm (Trockenmittel ist Silikagel) getrocknet und dann von einem Gaszähler mit Counter erfasst. Am Gaszähler werden auch Temperatur und Druck gemessen, um das abgesaugte Abgasvolumen auf Normvolumen umzurechnen.

Für die gravimetrische Staubbestimmung wurden zwei identische Messeinrichtungen aufgebaut, die alle Anforderungen der VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 (2006) erfüllen. Die Besonderheit des Aufbaus ist die automatische und kontinuierliche Regelung des Durchflusses, um die

isokinetische Probenahme zu jedem Zeitpunkt der Messung zu gewährleisten. Der schematische Messaufbau sowie in Fotos des Aufbaus sind in Abbildung 3.5 dargestellt.

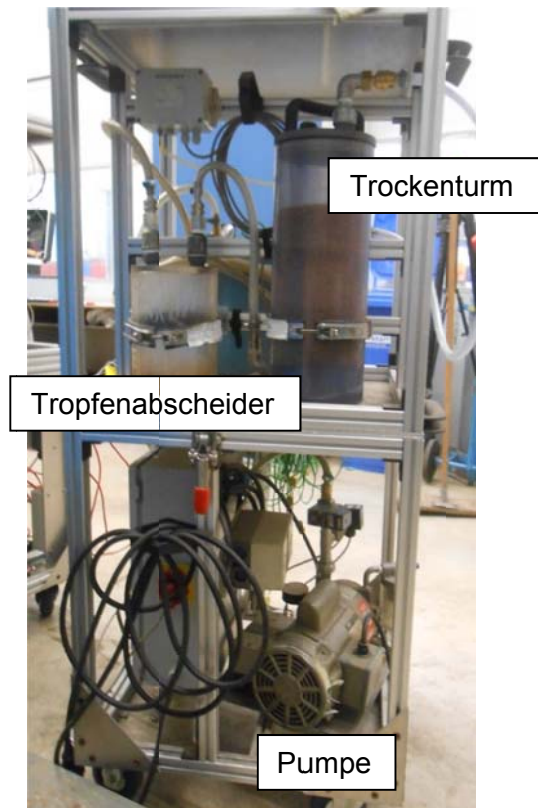
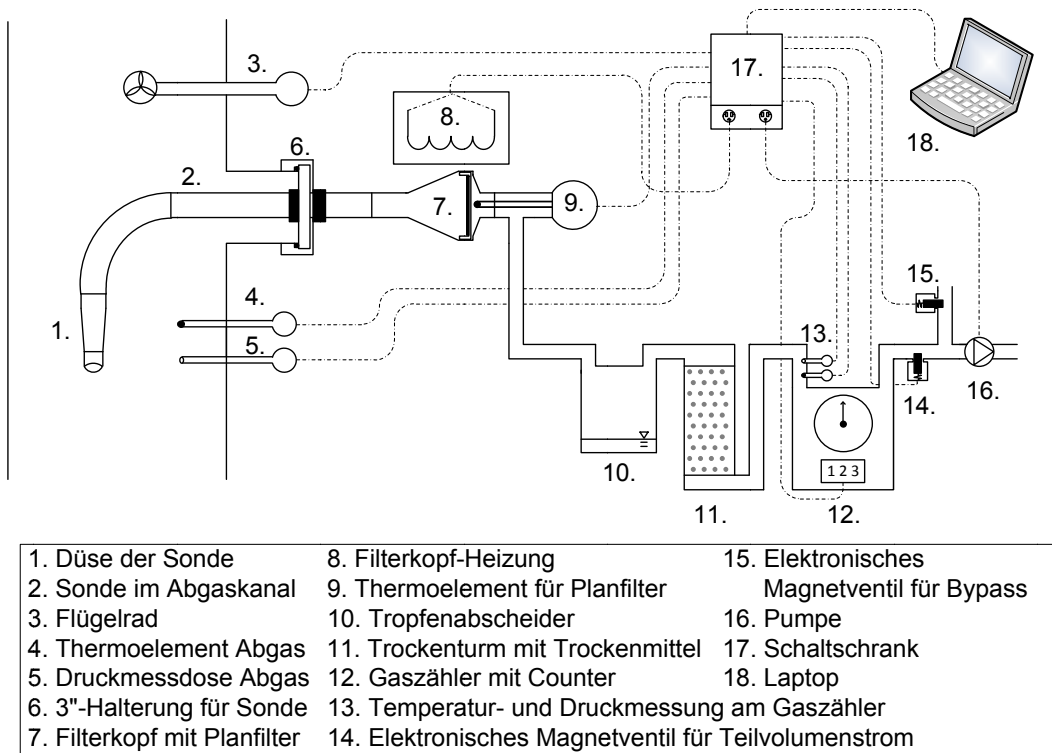


Abbildung 3.5 Staubaufbau (schematisch [Axarlis, 2011] und als Fotos) für die gravimetrische Staubbestimmung nach VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 [2006]

Nach jeder Messung wird die Entnahmesonde mit destilliertem Wasser und einer Lösung (je 50 % Aceton und Isopropanol) gereinigt und die Spülflüssigkeit in einem Fläschchen gesammelt. Hiermit werden auch Staubablagerungen vor dem Filter in der Entnahmesonde erfasst. Vor und nach den Messungen werden die Filter jeweils für eine Stunde in einem Trockenofen bei 115 °C ausgeheizt und anschließend im Exsikkator für mindestens 8 h gelagert. Danach erfolgt jeweils die Wägung der Filter. Das gleiche Prozedere wird auch bei den Fläschchen für die Spülflüssigkeit angewendet. Die Masse des bei der Probenahme gesammelten Gesamtstaubes ergibt sich somit aus der Filterbeladung und der Partikelmasse aus der Spülung.

3.5 Nasschemische Bestimmung von Chlor und Schwefeloxiden

Anorganische gasförmige Chlorverbindungen sowie Schwefeloxide werden durch Anreicherung in flüssigen Phasen absorbiert. Für die Absorption von Chlorverbindungen wird als Absorptionslösung destilliertes Wasser benutzt. Durch Zugabe einer Wasserstoffperoxidlösung zum destillierten Wasser können auch Schwefeloxide quantitativ erfasst werden. Nach der chemischen Bindung des Stoffes mit der Reaktionslösung, wird die Probe im Labor weiterverarbeitet und analysiert.

Bei dem angewendeten nasschemischen Messverfahren nach der DIN EN 1911 [2010] wird das Messgas aus dem Abgaskanal über eine Sonde entnommen. Die Entnahmesonde muss aus wechselwirkungsarmem Material sein. Bevor das Messgas durch die Absorptionslösung geführt wird, müssen die partikelförmigen Bestandteile abgeschieden werden. Dies geschieht durch einen vor der Absorptionslösung angebrachten Filter. Damit Abgasbestandteile nicht in der Entnahmesonde auskondensieren, muss diese vor dem Einbringen in den Abgaskanal und alle Teile außerhalb vom Abgaskanal auf mindestens 150°C beheizt werden.

Für die HCl- und SO_x-Messungen an der Heuverbrennungsanlage wurden zwei baugleiche Probenahmeeinrichtungen angefertigt und einer Qualitätsprüfung unterzogen. In Abbildung 3.6 ist der Messaufbau für die HCl- und SO_x-Messung schematisch dargestellt [Münzenmaier, 2013].

Die Absorption von gasförmigen Chlorverbindungen und Schwefeloxiden erfolgt in zwei hintereinander geschalteten Waschflaschen, die mit destilliertem Wasser (jeweils 98 ml) unter geringem Zusatz von Wasserstoffperoxid (jeweils 2 ml) gefüllt sind. Eine dritte Waschflasche dient dazu, ggf. restliches Kondensat abzuscheiden. Um das Verdampfen von Absorptionslösung im ersten Absorptionsgefäß zu verringern, werden die Waschflaschen gekühlt. Hierzu wurde eine Kühleinrichtung gebaut, in welche die Waschflaschen eingestellt werden. Die Kühleinrichtung wird von Kaltwasser durchströmt. Zur Abscheidung von Stäuben im Probegas wurde eine Sonde aus Quarzglas gefertigt, in die eine kommerziell erhältliche Filterhülse (aus Quarzglasfasermaterial) eingesteckt werden kann. Alle Teile außerhalb vom Abgasrohr wurden auf 200°C beheizt. Die Abgasprobe wird zentral aus Hauptströmung im Abgasrohr nicht-isokinetisch entnommen.

Anschließend an die Waschflaschen befinden sich die Messgeräte zur Bestimmung des Volumenstroms, der Temperatur und dem Druck an der Gasuhr. Vor dem Gaszähler sind ein Tropfenabscheider und ein Trockenturm geschaltet. Diese zwei Einrichtungen gewährleis-

ten, dass die Feuchte nahezu vollständig aus dem abgesaugten Volumenstrom abgeschieden wird. Ein gesteuertes Ventil regelt automatisch den abzusaugenden Volumenstrom.

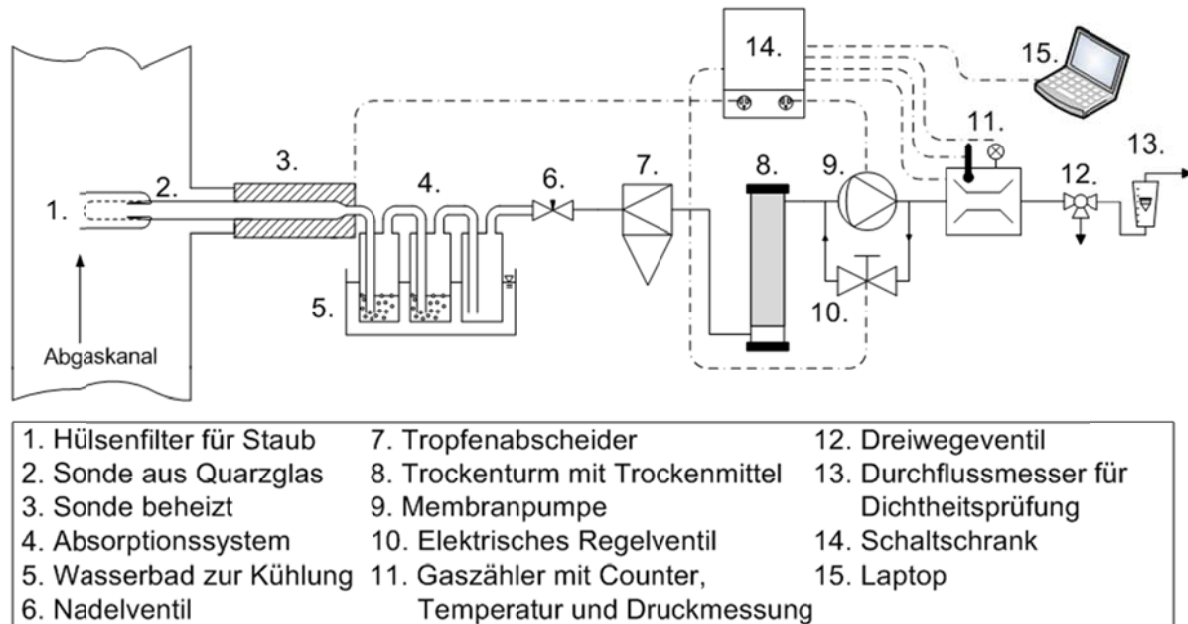


Abbildung 3.6 Schematische Darstellung der Messeinrichtungen zur Messung gasförmiger Chlor- und Schwefeloxidkonzentrationen [Münzenmaier, 2013]

Nach der Probenahme werden die Absorptionslösungen in Transportflaschen umgefüllt. Die Waschflaschen, die Probenahmesonde sowie alle anderen mit Probengas in Berührung kommende Glasteile werden mit destilliertem Wasser gespült. Die Spülung wird zu der jeweiligen Absorptionslösung aus der 1. bzw. 2. Waschflasche gegeben und im Labor mit einem Ionenchromatograph analysiert.

3.6 Bestimmung der PCDD/F- und PAH-Konzentrationen

Die Bestimmung der Konzentrationen an polychlorierten Dibenzodioxinen und -furanen (PCDD/F) und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH) erfolgte gemäß DIN EN 1948 Teil 1 bis 3 bzw. der VDI-Richtlinie 3874 [2006].

Die Probenahme erfolgte, wie bei der Staubmessung, isokinetisch. Die PCDD/F und PAH, die in der Gasphase und partikelgebunden vorliegen, werden in einer Sammeleinheit angereichert. Diese besteht aus einer Kombination von Kondensatabscheider, Planfilter und PU-Schaum. Das Probengas muss vor der Sammeleinheit gekühlt werden, dies geschieht mit einem gekühlten Absaugrohr. Der Kondensatabscheider wird ebenfalls gekühlt. Um die angereicherten Verbindungen nach der Messung im Probengut zu isolieren, führt man eine Extraktion mit Lösemittel (Toluol) durch. Die Probe wird im Labor ausgewertet (Trennung durch Gaschromatographie bzw. Flüssigchromatographie sowie Identifizierung und Quantifizierung durch Massenspektrometrie).

Die Messungen, Analysen und Auswertungen wurden vom bzw. im Auftrag des TÜV SÜD Industrie Service GmbH (Niederlassung Stuttgart) durchgeführt, siehe hierzu Bericht über die Durchführung von Emissionsmessungen bezüglich der Komponenten PCDD/F und PAH vom 19.2.2014 im Anhang.

3.7 Auswertung der Messungen

Alle kontinuierlich erfassten Messwerte (O_2 , CO_2 , CO, VOC und NO_x) werden als Mittelwerte über die Messdauer der zugehörigen diskontinuierlich erfassten Werte (Staub, HCl bzw. SO_x und PCDD/F) angegeben.

Mit Ausnahme der O_2 - und CO_2 -Konzentrationen, die in Vol% angegeben werden, werden alle anderen Abgasbestandteile als Massenkonzentration angegeben, siehe Tabelle 3.2.

Tabelle 3.2 Umrechnung der Messwert für die Abgaskomponenten in Massenkonzentrationen

Komponente	Messwert in	Umrechnungs-faktor	Massenkonzentration in
CO	ppm	1,25	mg/m ³
	Vol%	12.500	
VOC	ppm	1,61	mgC/m ³
NO_x	ppm	2,05	mgNO ₂ /m ³ , angegeben als mg/m ³
Staub			mg/m ³
HCl			mgHCl/m ³ , angeben als mg/m ³
SO_x			mgSO ₂ /m ³ , angeben als mg/m ³

Die PCDD/F- und PAH-Konzentrationen im Abgas des Heizkessels bei der Verbrennung von unterschiedlichen Heuqualitäten wurden vom TÜV SÜD Industrie Service GmbH ausgewertet. In Tabelle 3.3 sind die analysierten Kongenere (Einzelverbindungen) bzw. Homologe sowie die zugehörigen Toxizitätsäquivalentfaktoren (TEF) zur Berechnung der Toxizitätsäquivalente (TEQ) nach NATO/CCMS [1988] aufgelistet.

Jeder Einzelverbindung bzw. Homologe wird ein Toxizitäts-Äquivalenz-Faktor zugeordnet, mit dem die gemessene Konzentration dann multipliziert wird. Die Summe dieser Toxizitäts-Äquivalenz-Konzentration (TEQ) ergibt dann den Bewertungswert in ngTE/m³ nach I-TEQ (NATO/CCMS, 1988), wobei Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze nicht berücksichtigt werden.

Die in diesem Projekt gemessenen Einzelverbindungen von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAH) sind in Tabelle 3.4 aufgelistet. Aus diesen wird durch Addition der Einzelkonzentrationen die Summe der 16 besonders relevanten PAH nach EPA (U.S. Environmental Protection Agency) angegeben. Hierbei bleiben Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze unberücksichtigt.

Tabelle 3.3 Zusammenstellung der Toxizitätsäquivalentfaktoren (TEF) zur Berechnung der Toxizitätsäquivalente (TEQ) nach NATO/CCMS [1988]

PCDD		PCDF	
Kongenerere / Homologe	TEF	Kongenerere / Homologe	TEF
2,3,7,8-TetraCDD	1	2,3,7,8-TetraCDF	0,1
1,2,3,7,8-PentaCDD	0,5	1,2,3,7,8-PentaCDF	0,05
1,2,3,4,7,8-HexaCDD	0,1	2,3,4,7,8-PentaCDF	0,5
1,2,3,6,7,8-HexaCDD	0,1	1,2,3,4,7,8-HexaCDF	0,1
1,2,3,7,8,9-HexaCDD	0,1	1,2,3,6,7,8-HexaCDF	0,1
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDD	0,01	1,2,3,7,8,9-HexaCDF	0,1
OctaCDD	0,001	2,3,4,6,7,8-HexaCDF	0,1
		1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDF	0,01
		1,2,3,4,7,8,9-HeptaCDF	0,01
		OctaCDF	0,001

CDD Chlordibenzodioxin

CDF Chlordibenzofuran

Tabelle 3.4 Einzelverbindungen von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH) zur Ermittlung der Summenwerte nach EPA (z.B. in Björseth und Ramdahl, 1985)

Einzelkomponente	Abkürzung	Molekulargewicht
Naphthalin	NAP	128,17
Acenaphthylen	ACY	152,20
Acenaphthen	ACE	154,21
Fluoren	FLU	166,22
Phenanthren	PHE	178,23
Anthracen	ANT	178,23
Fluoranthren	FLUA	202,26
Pyren	PYR	202,26
Benz(a)anthracen	BaA	228,28
Chrysen	CHR	228,29
Benzo(b/j)fluoranthren	BbF / BjF	252,31
Benzo(k)fluoranthren	BkF	252,31
Benzo(a)pyren	BaP	252,31
Indeno(1,2,3-cd)pyren	IND	276,33
Dibenz(a,h)anthracen	DBahA	278,35
Benzo(ghi)perylen	BghiP	276,33

Zum Vergleich der verschiedenen Heuqualitäten und Betriebszustände sowie Messstellen müssen die Messwerte auf einen einheitlichen Bezugssauerstoffgehalt umgerechnet werden. Die Umrechnung erfolgt nach Formel 3.1 [BMU, 2002].

$$E_B = \frac{21 - O_B}{21 - O_M} \times E_M$$

Formel 3.1

Dabei ist:

- EM gemessene Massenkonzentration
- EB Massenkonzentration, bezogen auf Bezugssauerstoffgehalt
- OM gemessener Sauerstoffgehalt in Vol%
- OB Bezugssauerstoffgehalt (hier: 11 Vol%).

3.8 Grenzwerte

Laut § 3, Absatz 1, Nummer 8 der 1. BImSchV gehören Stroh oder ähnliche pflanzliche Stoffe zu den Regelbrennstoffen. Als stroh- oder strohähnliche Stoffe gelten Energiepflanzen wie z. B. Schilf, Miscanthus, Heu oder Maisspindeln. Die hier genannten Brennstoffe dürfen nur in automatisch beschickten Feuerungsanlagen eingesetzt werden, die nach Angaben des Herstellers für diese Brennstoffe geeignet sind und die im Rahmen der Typprüfung mit den jeweiligen Brennstoffen geprüft wurden [BMU, 2010].

Bei Feuerungsanlagen mit einer Nennwärmeleistung < 100 kW müssen die Grenzwerte in Tabelle 3.5 nach der 1. BImSchV [BMU, 2010] eingehalten werden. Für Feuerungsanlagen, die nach dem 31.12.2014 errichtet werden, gelten verschärfte Grenzwerte.

Tabelle 3.5 Grenzwerte nach 1. BImSchV für Brennstoffe § 3, Absatz 1, Nummer 8 für Feuerungsanlagen mit einer Nennwärmeleistung < 100 kW [BMU, 2010]

Grenzwerte der 1. BImSchV	bei Errichtung nach dem 22.03.2010	bei Errichtung nach dem 31.12.2014
Bezugssauerstoffgehalt in Vol%	13	13
Staub in g/m ³	0,10	0,02
CO in g/m ³	1,0	0,4
NO _x in g/m ³ (als NO ₂) *	0,6	0,5
PCDD/F ngTE/m ³ *	0,1	0,1

* Anforderung bei der Typprüfung

Biomassefeuerungen mit einer Nennleistung über 100 kW sind nach der 4. BImSchV genehmigungspflichtig. Es ist ein Genehmigungsverfahren nach § 19 BImSchG erforderlich, dabei muss die Einhaltung der Grenzwerte nach TA-Luft nachgewiesen werden. In Kapitel 5.4.1.3 der TA-Luft [BMU, 2002] sind für Anlagen der Nummer 1.3 bei Einsatz von Stroh oder ähnlichen pflanzlichen Stoffen (z.B. Getreidepflanzen, Gräser, Miscanthus) mit einer Feuerungswärmeleistung von weniger als 50 MW die Anforderungen festgelegt, diese sind in Tabelle 3.6 aufgelistet.

Tabelle 3.6 Grenzwerte nach TA-Luft für Anlagen der Nummer 1.3 [BMU, 2002] mit einer Feuerungswärmeleistung > 100 kW

Grenzwerte TA-Luft für Anlagen Nummer 1.3 mit Feuerungswärmeleistung <1 MW	
Bezugssauerstoffgehalt in Vol%	11
Gesamtstaub in mg/m ³	50
CO in g/m ³ (bei Nennlast)	0,25
NO _x in g/m ³ (angegeben als NO ₂)	0,50
organische Stoffe in mgC/m ³	50
SO _x in g/m ³ (angegeben als SO ₂)	0,35
gasförmige anorganische Chlorverbindungen in mg/m ³ (angegeben als HCl)	30
PCDD/F in ngTE/m ³ (angegeben als I-TEQ)	0,1

3.9 Messprogramm

In dem Projekt sollen drei Heuqualitäten mit unterschiedlichen Chlorkonzentrationen im Brennstoff in pelletierter Form eingesetzt werden. In einer ersten Messkampagne wurden zwei Heuqualitäten untersucht, die laut Vorauswahl des Brennstoffes eine geringe (Qualität Q1) und eine hohe (Qualität 3) Chlorkonzentration im Brennstoff erwarten ließen. Bei der Analyse der letztlich verfeuerten Heupellets zeigte sich dann, dass die Chlorkonzentration in der Qualität 1 deutlich höher lag als geplant.

Die Untersuchung der zweiten Qualität Q2 (laut ursprünglicher Projektplanung mit mittlerem Chorgehalt) wurde bis zur Bewertung der Ergebnisse der ersten Messkampagne zurückgestellt.

Für beide untersuchten Brennstoffqualitäten Q1 und Q3 wurde jeder Betriebszustand für einen Messtag an der Feuerungsanlage eingestellt. Die zu untersuchenden Betriebszustände sind Volllast, Teillast und Gluterhaltbetrieb. Bei Volllast und Teillast liegt die Abgastemperatur vor Gewebefilter so hoch, dass eine Taupunktunterschreitung im Filter nicht zu erwarten ist und damit der Bypass am Gewebefilter nur zu Abreinigungszwecken periodisch geöffnet wurde. Beim Betriebszustand Gluterhalt muss aufgrund der geringen Abgastemperatur das Abgas am Gewebefilter vorbei geleitet werden, der Bypass war in diesem Betriebszustand permanent geöffnet.

Bei den Messungen für die Betriebszustände Voll- und Teillast wurde zeitgleich im Rohgas vor Gewebefilter und im Reingas nach Gewebefilter gemessen. Somit kann für diese beiden Betriebszustände die Wirksamkeit des Gewebefilters und der Filterbetrieb bewertet werden.

Im Betriebszustand Gluterhalt war der Gewebefilter nicht in Betrieb, die Messungen erfolgten aufgrund der besseren Zugänglichkeit der Messstellen für die PCDD/F und PAH an der Messstelle Reingas und für Staub sowie HCl und SO_x an der Messstelle Rohgas.

Laut TA-Luft [BMU, 2002] soll die PCDD/F-Probenahme über einen Zeitraum von sechs Stunden erfolgen. Nach Rücksprache mit dem Umweltministerium Baden-Württemberg wurde die Probenahmezeit auf 3 h festgelegt, da die Nachweisgrenze des eingesetzten Analyseverfahrens für PCDD/F nicht über 0,005 ng/m³ liegt (siehe hierzu § 13 Abs. (3) der 17. BImSchV [BMUB, 2013]). Für jeden Betriebszustand wurden drei PCDD/F- bzw. PAH-

Einzelmessungen durchgeführt, wobei grundsätzlich zwei Messungen analysiert wurden, die Rückstellprobe sollte bei größerer Streuung der analysierten Messungen ausgewertet werden.

Während jeder 3 stündigen PCDD/F bzw. PAH-Probenahme wurden jeweils zwei Staub- und HCl- bzw. SO_x-Messungen mit einer vorgesehenen Probenahmezeit von 45 Minuten an den jeweiligen Messstellen statt. Die Staub- und HCl- bzw. SO_x-Messungen wurden zeitgleich ausgeführt.

Zusätzlich wurde von jeder Brennstoffqualität bei Voll- und Teillast jeweils eine Ascheprobe aus dem Kessel und dem Gewebefilter entnommen um auf PCDD/F analysiert.

In Tabelle 3.7 sind die in diesem Projekt durchgeführten Versuche und die Versuchsdauern für die PCDD/F- bzw. PAH-Probenahme aufgelistet.

Tabelle 3.7 Übersicht der im Projekt Verbrennung von Heupellets durchgeführten Versuche

Datum	Brennstoff	Laststufe	Messung Nr.	Probenahmedauer PCDD/Fe	
				Rohgas	Reingas
16.07.2013	Qualität 1	Volllast	1	08:05-11:05	8:05-11:05
			2	11:35-12:30 *	11:35-13:20 *
			3	14:00-16:25 *	14:00-17:00
17.07.2013	Qualität 1	Teillast	4	08:18-11:18	08:18-11:18
			5	11:40-14:40	11:40-14:40
			6	14:50-17:50	14:50-17:50
18.07.2013	Qualität 1	Gluterhalt	7		07:43-10:43
			8		10:53-13:53
			9		13:59-16:40 *
23.07.2013	Qualität 3	Volllast	10	08:40-11:40	08:40-11:40
			11	11:55-14:55	11:55-14:55
			12	15:04-18:04	15:04-18:04
24.07.2013	Qualität 3	Teillast	13	08:23-10:05 *	08:23-11:23
			14	11:36-14:36	11:36-14:36
			15	14:48-17:48	14:48-17:48
25.07.2013	Qualität 3	Gluterhalt	16		08:00-11:00
			17		11:06-13:56 *
			18		14:07-17:07
* vorzeitiger Stopp der Abgasprobenahme aufgrund von zu hohem Druckverlust					
standardmäßige Analyse zweier Proben je Betriebszustand					
Analyse von Rückstellproben					

Einige Messungen mussten vor Ablauf der vorgesehenen Probenahmedauer von 3 h für die PCDD/F- bzw. PAH-Probenahme abgebrochen werden, da aufgrund sehr hoher Staubkonzentrationen im Abgas der Druckverlust an den Probenfiltern zu hoch wurde. Sowohl die standardmäßig analysierten beiden Proben als auch die nachträglich analysierten Rückstellprobe sind entsprechend markiert. Die nicht markierten Rückstellproben wurden nicht analysiert.

Die vorgesehene Probedauer von 45 Minuten bei den Staub- sowie HCl- bzw. SO_x-Messungen konnte öfters aufgrund zu hoher Staubkonzentrationen und damit verbundener zu hoher Druckverluste nicht eingehalten werden. War dies der Fall, wurden beide Probenahmen zeitgleich früher beendet.

Nach Inbetriebnahme der Feuerungsanlage durch die Hersteller und einem kurzen Probebetrieb, im Wesentlichen mit Holzpellets, wurde mit dem Messprogramm begonnen. Zuvor wurde die Anlage nochmals gereinigt. Mit den Messungen wurde jeweils nach Erreichen eines stationären Betriebspunktes (Volllast, Teillast oder Gluterhaltbetrieb) begonnen. Vor dem Einsatz einer anderen Brennstoffqualität erfolgte jeweils eine Reinigung der Anlage und der Messstrecken.

Um stabile Betriebszustände zu erreichen, wurden einige Kesselparameter (z.B. Sollwert der Kesseltemperatur, maximale Rücklauftemperatur, Einschubzeit für die Stokerschnecke) an die jeweiligen Betriebszustände angepasst. Nicht verändert wurden hierbei die Vorgaben für die Verbrennungsregelung (z.B. Sollwert für O₂).

4 Ergebnisse

Während der ersten Messwoche bei den Untersuchungen der Heuqualität Q1 stellte sich heraus, dass die Feuerungsanlage in allen zu untersuchenden Betriebspunkten keinen stationären Leistungspunkt erreichen kann, obwohl die Kesselregelung dies eigentlich einstellen sollte.

Ursache hierfür war eine viel zu große Schalttoleranz beim Kesseltemperaturwächter (KTW), was dazu führte, dass die Anlage regelmäßig in den minimalen Teillastbetrieb schaltete. Der KTW soll ein Überhitzen des Heizkessels verhindern, bevor der Sicherheitstemperaturbegrenzer bzw. die thermische Ablaufsicherung anspricht. Ab einer Vorlauftemperatur von 86 °C soll der KTW den Heizkessel in den Nachlauf (kleinste Leistung mit 30 % der Nennwärmeleistung) schalten. Aufgrund des fehlerhaften KTW geschah dies aber bereits bei einer Kesseltemperatur von 80 °C, wobei die Solltemperatur bei 82 °C eingestellt war.

Nachdem die Ursache für den instationären Betrieb des Heizkessels ermittelt war, wurde der KTW für die Messungen in der zweiten Messwoche (Qualität 3) deaktiviert. Somit konnte die Kesselregelung die gewählten Lastpunkte besser einregeln und es konnte ein stabilerer Betrieb erreicht werden.

In Abbildung 4.1 sind die Verläufe der Kesselleistung bei Volllast beispielhaft mit defektem Kesseltemperaturwächter in der 1. Messwoche (Heuqualität 1) und mit deaktiviertem Kesseltemperaturwächter in der 2. Messwoche (Heuqualität 3) dargestellt. Beim Kesselbetrieb mit defektem KTW zeigt sich der stetige Wechsel zwischen Leistungsbrand (100 % Leistung) und Nachlauf (kleinste Wärmeleistung, 30 % Leistung), die Leistung des Heizkessels wird nicht über längere Zeit konstant gehalten. Beim Kesselbetrieb mit deaktiviertem KTW schaltet die Anlage nicht in den Nachlauf, deswegen schwankt der Leistungsverlauf weniger. Allerdings zeigt sich auch hier, dass eine wirklich konstante Leistungsregelung nicht erreicht wurde, obwohl die abgenommene Leistung konstant war. Ggf. könnte durch eine Anpassung von Parametern in der Kesselregelung hier noch ein konstanterer Betrieb realisiert werden.

Die nicht konstante Fahrweise des Kessels wirkt sich auch auf das Verbrennungs- und Emissionsverhalten der Anlage aus. In Abbildung 4.2 sind exemplarisch die Verläufe der Konzentrationen an O₂ und CO an der Messstelle Rohgas bei Volllast in der ersten und zweiten Messwoche dargestellt. Der in der Kesselsteuerung eingestellte Sollwert für Sauerstoff lag bei 8,5 Vol%.

Der O₂-Verlauf zeigt in der ersten Messwoche mit defektem Kesseltemperaturwächter eine sehr große Schwankungsbreite und reicht von etwas über 14 Vol% bis etwas unterhalb von 6 Vol%. Bei den geringen O₂-Konzentrationen liegt partieller Luftmangel in der Feuerung vor, dementsprechend steigen die CO-Konzentrationen zu diesen Zeitpunkten an und erreichen Spitzenwerte von über 28.000 mg/m³.

In der zweiten Messwoche bei deaktiviertem Kesseltemperaturwächter wird die O₂-Schwankungsbreite etwas geringer, es werden vor allem die Luftmangelsituationen verhindert, wodurch keine so hohen CO-Spitzenkonzentrationen wie in der ersten Messwoche mehr auftreten.

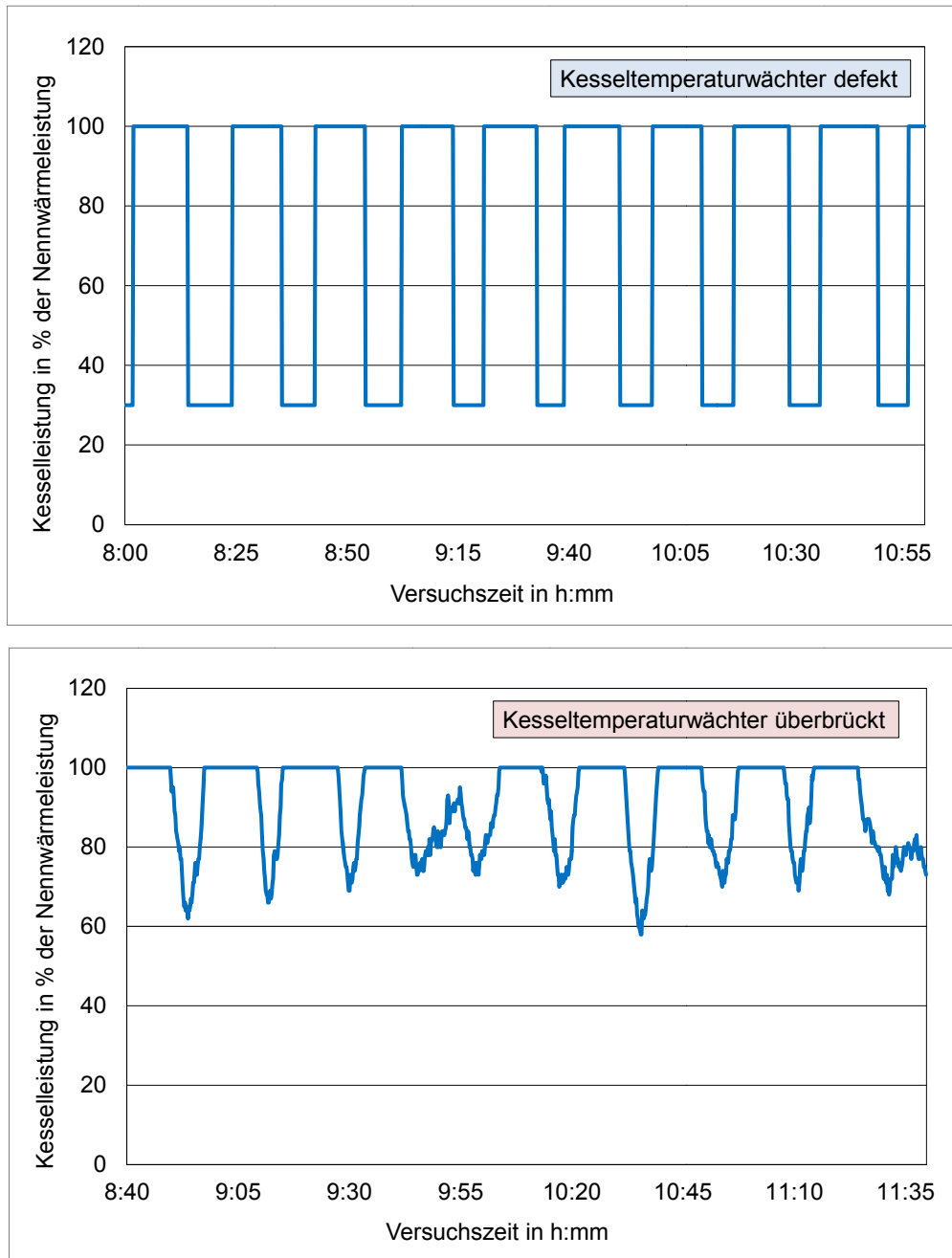


Abbildung 4.1 Beispielhafter Verläufe der Kesselleistung bei Volllast mit defektem Kesseltemperaturwächter in der 1. Messwoche (oben: Qualität 1, Messung Nr.1) und mit deaktivierten Kesseltemperaturwächter in der 2. Messwoche (unten: Qualität 3, Messung Nr.10)

In Tabelle 4.1 sind ausgewählte Einstellungen an der Kesselsteuerung der Feuerungsanlage für die 1. Messwoche mit Heuqualität 1 und die 2. Messwoche mit Heuqualität 3 aufgelistet.

In der ersten Woche wurden bei den aufgeführten Einstellparametern keine Veränderungen vorgenommen. In der 2. Messwoche wurden, nach der Deaktivierung des Kesseltemperaturwächters, vom Kesselhersteller weitere Änderungen der Leistungsparameter (Rücknahme der Kesselleistung) vorgenommen, mit dem Ziel, das Abbrandverhalten zu verbessern. Dies sollte vor allem dadurch erreicht werden, dass Verschlackungen im Feuerraum reduziert werden.

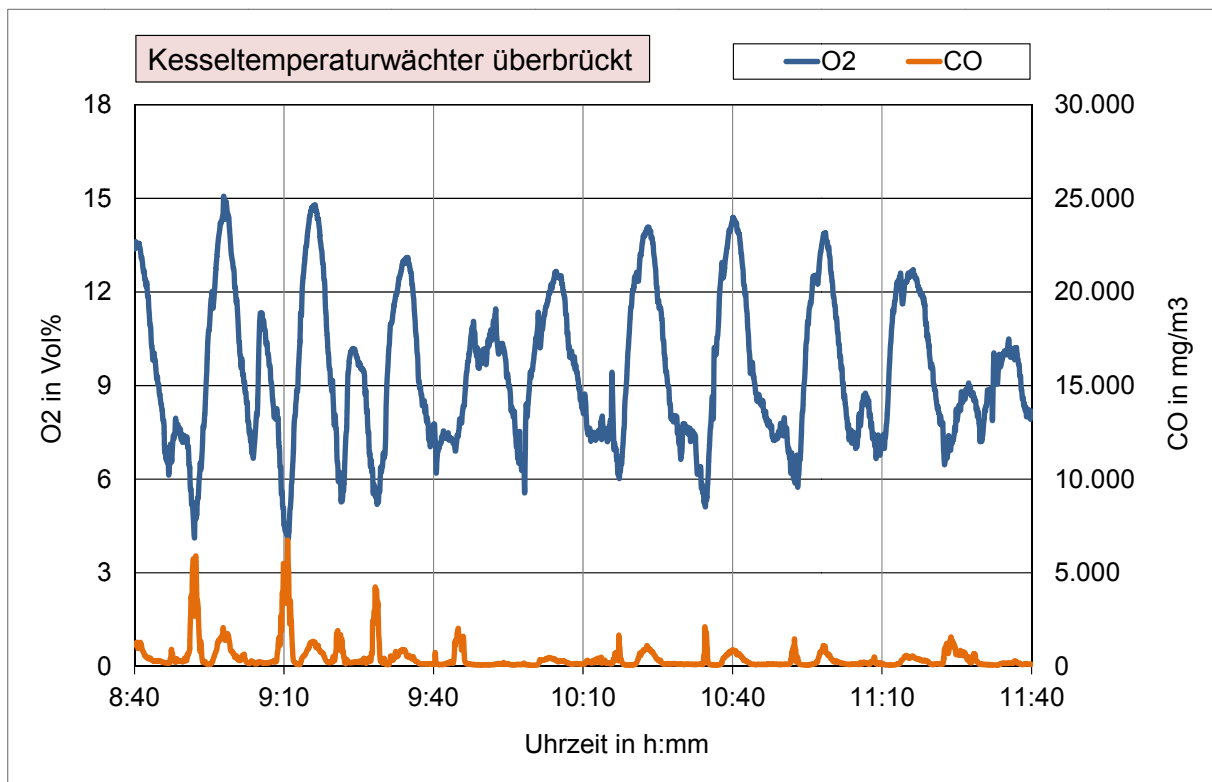
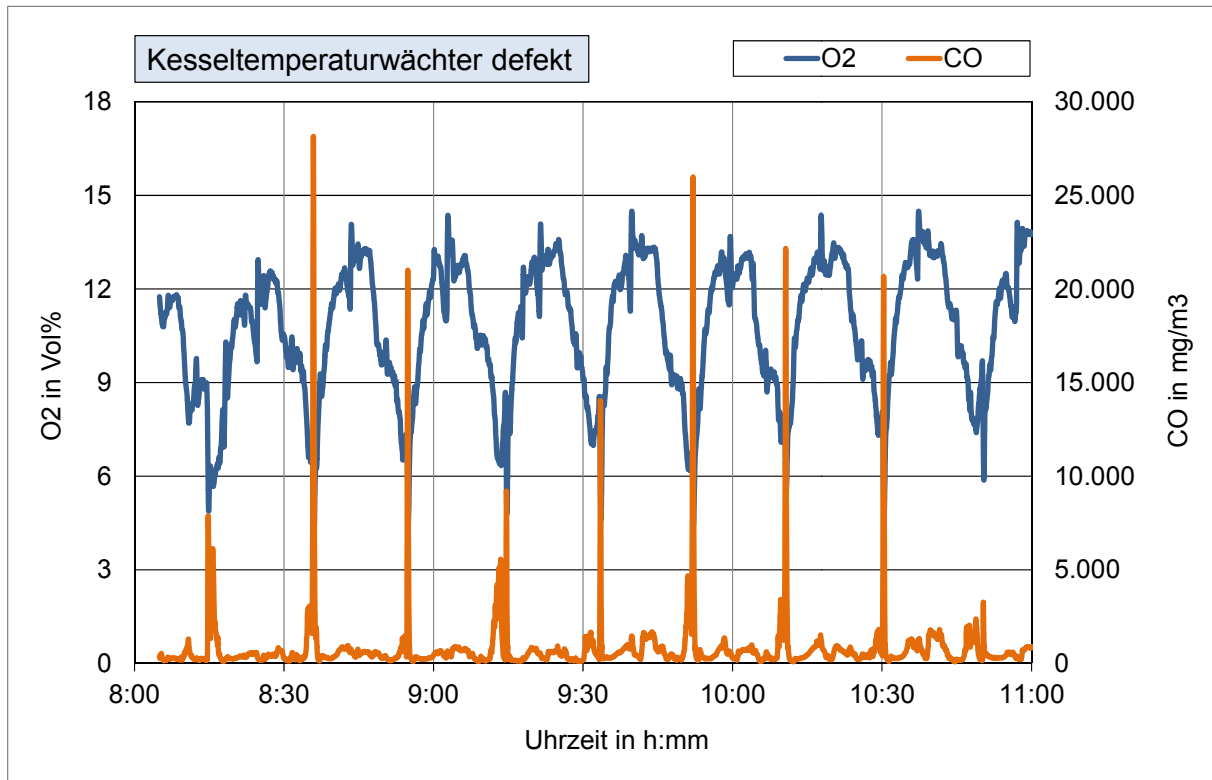


Abbildung 4.2 Verläufe der O₂- und CO-Konzentrationen bei Vollast mit defektem Kesseltemperaturwächter in der 1. Messwoche (oben: Qualität 1, Messung Nr.1) und mit deaktivierten Kesseltemperaturwächter in der 2. Messwoche (unten: Qualität 3, Messung Nr.10)

Diese vom Hersteller ergriffenen Maßnahmen waren letztlich nicht erfolgreich, ein störungsfreier Kesselbetrieb über mehrere Stunden war trotzdem nicht möglich.

Tabelle 4.1 Ausgewählte Einstellungen in der Kesselsteuerung der Feuerungsanlage für die 1. Messwoche mit Heuqualität 1 und die 2. Messwoche mit Heuqualität 3

Parameter	Volllast	Teillast	Gluterhalt
1. Messwoche mit Heuqualität 1			
Leistung [%]	100	70	30
Einschubzeit [s]	1	0,6	0,4
Pausenzeit [s]	Leistungsbrand: 19 Nachlauf: 38	Leistungsbrand: 19 Nachlauf: 38	Leistungsbrand: 19 Nachlauf: 38
Primärluftgebläse [%]	Leistungsbrand: 100 Nachlauf: 25	Leistungsbrand: 100 Nachlauf: 25	Leistungsbrand: 100 Nachlauf: 25
Sekundärluftgebläse [%]	Leistungsbrand: 25 Nachlauf: 100	Leistungsbrand: 25 Nachlauf: 25	Leistungsbrand: 25 Nachlauf: 25
2. Messwoche mit Heuqualität 3			
Leistung [%]	100	70	30
Einschubzeit [s]	1	1	0,4
Pausenzeit [s]	Leistungsbrand: 19-47,4 Nachlauf: 81	Leistungsbrand: 70-90 Nachlauf: 81	Leistungsbrand: 90-100 Nachlauf: 100,8
Primärluftgebläse [%]	Leistungsbrand: 100 Nachlauf: 25	Leistungsbrand: 30-50 Nachlauf: 25	Leistungsbrand: 35-25 Nachlauf: 25
Sekundärluftgebläse [%]	Leistungsbrand: 90 Nachlauf: 25	Leistungsbrand: 25 Nachlauf: 25	Leistungsbrand: 25 Nachlauf: 25

4.1 Mittelwerte für die untersuchten Betriebszustände

Für die untersuchten Heuqualitäten Q1 und Q3 wurden bei den betrachteten Betriebszuständen Volllast, Teillast und Gluterhaltbetrieb jeweils 3 PCDD/F- bzw. PAH-Probenahmen über ca. 3 h vorgenommen, von denen zwei, in einigen Fällen auch alle drei Proben, analysiert wurden. Während jeder PCDD/F- bzw. PAH-Probenahme wurden 2 Staub- sowie HCl- bzw. SO_x-Probenahmen durchgeführt. Bei den Betriebszuständen Voll- und Teillast erfolgten zeitgleiche Probenahmen im Rohgas vor Gewebefilter und im Reingas nach Gewebefilter. Die Messwerte dieser erfassten Komponenten wurden auf den Bezugssauerstoffgehalt von 11 Vol% O₂ bezogen, wobei jeweils die über die unterschiedlichen Messzeiten verwendete mittlere Sauerstoffkonzentration zur Bezugsrechnung herangezogen wurde.

Die Ergebnisse der Einzelmessungen sind im Anhang Messdaten IFK aufgeführt. Für die Einzelkomponenten bei den PCDD/F und PAH siehe Bericht über die Durchführung von Emissionsmessungen bezüglich der Komponenten PCDD/F und PAH des TÜV SÜD vom 19.2.2014 im Anhang. Im Folgenden sind, getrennt für die untersuchten Heuqualitäten, die Mittelwerte der gemessenen Abgaskomponenten für die jeweiligen Lastzustände und Messstellen aufgeführt. Mit angegeben ist jeweils der Minimal- und Maximalwert und die Standardabweichung, wobei letztere mit einer z.T. unterschiedlichen Anzahl an Messwerten berechnet wird.

4.1.1 Heuqualität 1

In Tabelle 4.2 sind die Mittelwerte für die Heuqualität 1 beim Volllastbetrieb an der Messstelle im Rohgas angegeben.

Tabelle 4.2 Mittelwerte der Messungen für die Heuqualität 1 an der Messstelle Rohgas bei Volllast

Heuqualität 1 / Rohgas / Volllast				
PCDD/F und PAH				
Anzahl Messungen PAH und PCDD/F: 2	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂	
			PAH in µg/m ³	PCDD/F in ngTE/m ³
Mittelwert	9,5	10,9	77	0,19
Minimalwert	9,3	10,7	66	0,17
Maximalwert	9,6	11,1	88	0,22
Standardabweichung	0,2	0,2	11	0,03
Staub				
Anzahl Messungen Staub: 6	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂ Staub in mg/m ³	
Mittelwert	9,6	10,8	657	
Minimalwert	8,9	10,3	474	
Maximalwert	10,1	11,6	813	
Standardabweichung	0,4	0,4	100	
HCl und SO₂				
Anzahl Messungen HCl und SO ₂ : 6	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂		
		HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³	
Mittelwert	10,8	64	354	
Minimalwert	10,3	45	275	
Maximalwert	11,6	79	416	
Standardabweichung	0,4	12	42	

Die mittleren O₂-Konzentrationen während der Dauer für die PCDD/F-, Staub- und HCl- und SO₂-Messung sind nahezu identisch, die Standardabweichung nimmt allerdings geringfügig bei den kürzeren Probenahmezeiten (Staub sowie HCl und SO₂) zu. Bei den PCDD/F wird der Mittelwert aus drei Messungen über einen längeren Messzeitraum gebildet, dadurch können Schwankungen im Mittel besser ausgeglichen werden. Beim Staub sowie HCl und SO₂ wird der Mittelwert aus sechs Messungen über einen kürzeren Messzeitraum gebildet, dadurch machen sich Schwankungen deutlicher bemerkbar.

Die Staub- sowie HCl- und SO₂-Konzentrationen weisen aufgrund des nicht stationären Kesselbetriebs eine vergleichsweise große Schwankungsbreite auf.

Für die beiden ausgewerteten PCDD/F-Proben ergeben sich bei den berechneten Summen der Toxizitäts-Äquivalenz-Konzentrationen nur geringe Unterschiede.

In Tabelle 4.3 sind die Mittelwerte für die Heuqualität 1 bei Vollastbetrieb an der Messstelle im Reingas angegeben.

Tabelle 4.3 Mittelwerte der Messungen für die Heuqualität 1 an der Messstelle Reingas bei Vollast

Heuqualität 1 / Reingas / Vollast							
PCDD/F und PAH							
Anzahl Messungen PAH und PCDD/F: 2	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂				PCDD/F in ngTE/m ³
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	PAH in µg/m ³	
Mittelwert	6,0	14,5	759	22	377	57	0,14
Minimalwert	5,9	14,4	659	20	352	54	0,14
Maximalwert	6,1	14,6	886	25	399	60	0,14
Standardabweichung	0,1	0,1	95	2	20	3	0,00
Staub							
Anzahl Messungen Staub: 6	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂				
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	Staub in mg/m ³]	
Mittelwert	6,1	14,4	811	25	373	128	
Minimalwert	5,8	14,1	483	15	328	107	
Maximalwert	6,4	14,6	1.215	38	412	170	
Standardabweichung	0,2	0,2	246	8	26	21	
HCl und SO₂							
Anzahl Messungen HCl und SO ₂ : 6	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂					
		HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³				
Mittelwert	14,3	34	314				
Minimalwert	14,1	23	233				
Maximalwert	14,6	45	343				
Standardabweichung	0,2	8	37				

Aufgrund von Undichtigkeiten im Abgasrohrsystem, in den Bypassklappen, im Gewebefilter und im Abgasgebläse liegt die Sauerstoffkonzentration an der Messstelle Reingas durchweg höher als an der Messstelle Rohgas. Insgesamt sind die mittleren O₂-Konzentrationen während der Dauer für die PCDD/F-, Staub- und HCl- und SO₂-Messung auch an dieser Messstelle nahezu identisch, bei leicht unterschiedlicher Standardabweichung.

Gegenüber der Messstelle Rohgas nehmen die mittleren Konzentrationen an PAH, PCDD/F, HCl und SO₂ geringfügig bis deutlicher (HCl) ab. Auch die Staubkonzentration liegt an der Messstelle Reingas deutlich niedriger als im Rohgas, allerdings ist die Minderung der Staubkonzentration durch den Gewebefilter bei weitem nicht so groß wie erwartet.

In Tabelle 4.4 sind die Mittelwerte für die Heuqualität 1 bei Teillastbetrieb an der Messstelle im Rohgas angegeben.

Tabelle 4.4 Mittelwerte der Messungen für die Heuqualität 1 an der Messstelle Rohgas bei Teillast

Heuqualität 1 / Rohgas / Teillast				
PCDD/F und PAH				
Anzahl Messungen PAH und PCDD/F: 2	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂	
			PAH in µg/m ³	PCDD/F in ngTE/m ³
Mittelwert	6,2	14,2	220	1,73
Minimalwert	5,9	13,9	214	1,51
Maximalwert	6,5	14,5	227	1,94
Standardabweichung	0,2	0,2	7	0,21
Staub				
Anzahl Messungen Staub: 6	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂	
			Staub in mg/m ³	
Mittelwert	6,8	13,6	624	
Minimalwert	4,1	11,6	528	
Maximalwert	8,6	16,3	954	
Standardabweichung	1,8	1,9	152	
HCl und SO₂				
Anzahl Messungen HCl und SO ₂ : 6	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂		
		HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³	
Mittelwert	13,6	36	355	
Minimalwert	11,6	23	295	
Maximalwert	16,3	61	402	
Standardabweichung	1,9	13	39	

Im Teillastbetrieb der Anlage nehmen die Schwankungen der Abgaskomponenten z.T. deutlich zu, weshalb sich bei den mittleren O₂-Konzentrationen während der Dauer für die PCDD/F-, Staub- und HCl- und SO₂-Messung auch, im Vergleich zur Volllast, größere Unterschiede ergeben. Auch bei den Staub- und PCDD/F-Konzentrationen nehmen die Schwankungsbreiten und die Standardabweichungen bei Teillast zu.

Da sich die Verbrennungsbedingungen verschlechtern, steigen die Konzentrationen an PAH und PCDD/F gegenüber der Volllast an. Die mittlere Staubkonzentration bei Teillast im Rohgas nimmt hingegen etwas ab.

Ein deutlicher Rückgang zeigt sich bei der mittleren HCl-Konzentration im Vergleich zur Volllast, die SO₂-Konzentration ist bei beiden Lastpunkten im Rohgas in etwa gleich.

In Tabelle 4.5 sind die Mittelwerte für die Heuqualität 1 bei Teillastbetrieb an der Messstelle im Reingas angegeben.

Tabelle 4.5 Mittelwerte der Messungen für die Heuqualität 1 an der Messstelle Reingas bei Teillast

Heuqualität 1 / Reingas / Teillast							
PCDD/F und PAH							
Anzahl Messungen PAH und PCDD/F: 2	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂				PCDD/F in ngTE/m ³
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	PAH in µg/m ³	
Mittelwert	3,2	17,3	3.211	52	370	139	0,65
Minimalwert	3,1	17,2	3.000	47	358	121	0,65
Maximalwert	3,3	17,3	3.530	61	388	156	0,65
Standardabweichung	0,1	0,1	230	6	13	17	0,00
Staub							
Anzahl Messungen Staub: 6	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂				
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	Staub in mg/m ³	
Mittelwert	3,6	16,9	2.989	47	386	176	
Minimalwert	2,2	15,6	1.535	28	298	121	
Maximalwert	4,8	18,5	5.294	68	508	237	
Standardabweichung	1,0	1,0	1.369	17	68	39	
HCl und SO ₂							
Anzahl Messungen HCl und SO ₂ : 6	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂					
		HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³				
Mittelwert	16,9	6	336				
Minimalwert	15,6	1	293				
Maximalwert	18,5	18	384				
Standardabweichung	1,0	6	37				

Auch an der Messstelle Reingas ist im Teillastbetrieb der Anlage die größere Schwankungsbreite einiger Abgaskomponenten deutlich zu erkennen. Besonders ersichtlich wird dies an den mittleren CO-Konzentrationen während der Dauer für die PCDD/F-, Staub- und HCl- und SO₂-Messung. Im Vergleich zur Volllast ergeben sich hier größere Unterschiede bei den mittleren Konzentrationen und den Standardabweichungen.

Die ungünstigeren Verbrennungsbedingungen führen bei Teillast zu höheren CO-, VOC-, PAH-Konzentrationen. Außerdem nimmt auch die Staubkonzentration im Reingas zu, obwohl die Rohgaskonzentration bei Teillast sogar etwa unterhalb der Rohgaskonzentration bei Volllast liegt. Dies bedeutet, dass die Abscheidewirkung des Gewebefilters bei Teillast abnimmt.

Auf die NO_x- und SO₂-Konzentrationen hat die Kesselleistung keinen großen Einfluß. Die Konzentrationen dieser beiden Komponenten unterscheiden sich bei Voll- und Teillast nur wenig. Die HCl-Konzentration hingegen nimmt bei Teillast gegenüber Volllast deutlich ab.

In Tabelle 4.6 sind die Mittelwerte für die Heuqualität 1 beim Gluterhaltbetrieb angegeben.

Tabelle 4.6 Mittelwerte der Messungen für die Heuqualität 1 beim Gluterhaltbetrieb

Heuqualität 1 / Gluterhalt							
PCDD/F und PAH (Messstelle Reingas)							
Anzahl Messungen PAH und PCDD/F: 2	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂				
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	PAH in µg/m ³	PCDD/F in ngTE/m ³
Mittelwert	1,5	19,2	6.427	507	328	3.111	1,06
Minimalwert	1,4	18,9	6.138	372	298	2.694	0,76
Maximalwert	1,8	19,4	6.779	733	348	3.528	1,36
Standardabweichung	0,2	0,2	265	161	22	417	0,30
Staub (Messstelle Rohgas)							
Anzahl Messungen Staub: 6	CO ₂ in Vol%		O ₂ in Vol%		bezogen auf 11 Vol% O ₂ Staub in mg/m ³		
Mittelwert	1,9		18,8		1.202		
Minimalwert	0,6		16,1		448		
Maximalwert	4,6		20,3		2.387		
Standardabweichung	1,4		1,5		715		
HCl und SO ₂ (Messstelle Rohgas)							
Anzahl Messungen HCl und SO ₂ : 6	O ₂ in Vol%		bezogen auf 11 Vol% O ₂				
			HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³			
Mittelwert	18,8		10	456			
Minimalwert	16,1		1	70			
Maximalwert	20,3		28	1.148			
Standardabweichung	1,5		9	343			

Beim Gluterhaltbetrieb wird Brennstoff nur nach großen Unterbrechungen zugeführt, die Verbrennungsluftversorgung ist auf ein Minimum reduziert, entsprechend gering ist die Wärmeleistung des Heizkessels in diesem Betriebsmodus. Ein kontinuierlicher und geregelter Verbrennungsvorgang liegt hier nicht mehr vor. Durch die schlechten Verbrennungsbedingungen steigen die Konzentrationen von Produkten unvollständiger Verbrennung (CO, VOC und PAH) stark an. Da der Gewebefilter aufgrund der niedrigen Abgastemperatur nicht mehr genutzt werden kann, strömt das Abgas im Bypass an dem Filter vorbei. Hierdurch steigt die Staubkonzentration stark an. Die Staubfracht nimmt allerdings nicht im gleichen Verhältnis zu, da der Abgasvolumenstrom stark abnimmt.

Die PCDD/F-Konzentration im Gluterhaltbetrieb liegt auch etwas höher als bei Teillast an der Messstelle Reingas.

Die mittlere NO_x-Konzentration nimmt beim Gluterhaltbetrieb, gegenüber dem Teil- oder Volllastbetrieb, etwas ab. Die HCl- und SO₂-Konzentrationen nehmen, im Vergleich zur Teillast, zu.

4.1.2 Heuqualität 3

In Tabelle 4.7 sind die Mittelwerte für die Heuqualität 3 bei Volllastbetrieb an der Messstelle im Rohgas angegeben.

Tabelle 4.7: Mittelwerte der Messungen für die Heuqualität 3 an der Messstelle Rohgas bei Volllast

Heuqualität 3 / Rohgas / Volllast				
PCDD/F und PAH				
Anzahl Messungen PAH und PCDD/F: 3	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂	
			PAH in µg/m ³	PCDD/F in ngTE/m ³
Mittelwert	11,6	8,9	14	0,47
Minimalwert	10,8	8,2	9	0,35
Maximalwert	12,3	9,7	20	0,66
Standardabweichung	0,6	0,6	5	0,14
Staub				
Anzahl Messungen Staub: 6	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂	
			Staub in mg/m ³	
Mittelwert	11,6	9,0	355	
Minimalwert	10,5	7,9	273	
Maximalwert	12,6	10,0	430	
Standardabweichung	0,7	0,7	53	
HCl und SO₂				
Anzahl Messungen HCl und SO ₂ : 6	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂		
		HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³	
Mittelwert	9,0	89	308	
Minimalwert	7,9	85	271	
Maximalwert	10,0	93	329	
Standardabweichung	0,7	3	19	

Die mittleren O₂-Konzentrationen während der Dauer für die PCDD/F-, Staub- und HCl- und SO₂-Messung sind nahezu identisch, die Standardabweichung ist vergleichbar, liegt allerdings etwas höher als bei der Heuqualität 1 bei Volllast. Insgesamt ergab sich bei der Heuqualität 3 ein gleichmäßigerer Kesselbetrieb, wodurch auch die mittleren CO₂-Konzentrationen im Abgas höher liegen als bei der Heuqualität 1. Die insgesamt günstigeren Verbrennungsbedingungen zeigen sich auch an den geringeren mittleren PAH- und Staub-Konzentrationen im Vergleich zur Heuqualität 1.

Für die beiden ausgewerteten PCDD/F-Proben ergeben sich bei den berechneten Summen der Toxizitäts-Äquivalenz-Konzentrationen größere Unterschiede, was auch durch die höhere Standardabweichung im Vergleich zur Heuqualität 1 deutlich wird. Die mittlere PCDD/F-Konzentration bei Volllast mit der Heuqualität 3 war trotz der gleichmäßigeren Verbrennung höher als bei der Heuqualität 1. Aufgrund der vergleichsweise großen ermittelten Konzentra-

tionsunterschiede bei den beiden zuerst analysierten PCDD/F-Proben wurde hier die Rückstellprobe zusätzlich ausgewertet.

Bei der HCl-Konzentration ergaben sich höhere Werte bei der Heuqualität 3 im Vergleich zur Heuqualität 1, bei der SO₂-Konzentration war es umgekehrt. Sowohl die mittleren HCl- als auch SO₂-Konzentrationen zeigen eine deutlich geringere Bandbreite bei der Heuqualität 3.

In Tabelle 4.8 sind die Mittelwerte für die Heuqualität 3 beim Volllastbetrieb an der Messstelle im Reingas angegeben.

Tabelle 4.8 Mittelwerte der Messungen für die Heuqualität 3 an der Messstelle Reingas bei Volllast

Heuqualität 3 / Reingas / Volllast							
PCDD/F und PAH							
Anzahl Messungen PAH und PCDD/F: 3	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂				PCDD/F in ngTE/m ³
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	PAH in µg/m ³	
Mittelwert	7,0	13,5	258	10	368	17	0,50
Minimalwert	6,5	13,1	185	8	348	10	0,29
Maximalwert	7,5	13,9	364	12	380	29	0,86
Standardabweichung	0,4	0,4	77	2	14	8	0,25
Staub							
Anzahl Messungen Staub: 6	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂				
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	Staub in mg/m ³	
Mittelwert	7,1	13,4	266	10	372	100	
Minimalwert	6,3	12,7	152	7	326	84	
Maximalwert	7,8	14,2	561	16	400	117	
Standardabweichung	0,5	0,5	137	3	23	12	
HCl und SO₂							
Anzahl Messungen HCl und SO ₂ : 6	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂					
		HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³				
Mittelwert	13,4	51	270				
Minimalwert	12,7	45	252				
Maximalwert	14,2	60	293				
Standardabweichung	0,5	6	14				

Durch den gleichmäßigeren Kesselbetrieb und damit verbunden durch die günstigeren Verrennungsbedingungen liegen die mittleren CO-, VOC-, PAH- und Staub-Konzentrationen bei der Heuqualität 3 im Reingas niedriger als bei der Heuqualität 1. Allerdings trifft dies nicht für die mittlere PCDD/F-Konzentration zu, diese liegt höher als bei der Heuqualität 1. Zwischen der PCDD/F-Konzentration im Roh- bzw. Reingas ergibt sich bei der Heuqualität 3 nahezu kein Unterschied. Für Volllast und die Messstelle Reingas wurde ebenfalls die PCDD/F-Rückstellprobe analysiert.

Ergebnisse

Der höhere Chlorgehalt in der Heuqualität 3 führt auch zu höheren HCl-Konzentrationen, dies gilt sowohl für das Roh- als auch das Reingas. Der niedrigere Schwefelgehalt in der Heuqualität 3 führt dementsprechend zu geringeren SO₂-Konzentrationen im Abgas an den Messstellen Roh- und Reingas.

In Tabelle 4.9 sind die Mittelwerte für die Heuqualität 3 bei Teillastbetrieb an der Messstelle im Rohgas angegeben.

Tabelle 4.9 Mittelwerte der Messungen für die Heuqualität 3 an der Messstelle Rohgas bei Teillast

Heuqualität 3 / Rohgas / Teillast				
PCDD/F und PAH				
Anzahl Messungen PAH und PCDD/F: 2	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂	
			PAH in µg/m ³	PCDD/F in ngTE/m ³
Mittelwert	7,1	13,4	91	4,30
Minimalwert	7,0	13,2	71	3,96
Maximalwert	7,3	13,5	111	4,64
Standardabweichung	0,2	0,1	20	0,34
Staub				
Anzahl Messungen Staub: 6	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂	
			Staub in mg/m ³	
Mittelwert	7,1	13,4	405	
Minimalwert	6,7	13,0	303	
Maximalwert	7,4	13,8	591	
Standardabweichung	0,2	0,3	99	
HCl und SO₂				
Anzahl Messungen HCl und SO ₂ : 6	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂		
		HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³	
Mittelwert	13,4	64	314	
Minimalwert	13,0	55	249	
Maximalwert	13,8	90	352	
Standardabweichung	0,3	12	35	

Auch für Teillast und die Messstelle Rohgas gilt, dass durch den gleichmäßigeren Kesselbetrieb und damit verbunden durch die günstigeren Verrennungsbedingungen die mittleren PAH- und Staub-Konzentrationen bei der Heuqualität 3 niedriger ist als bei der Heuqualität 1. Allerdings ist auch hier die mittlere PCDD/F-Konzentration bei der Heuqualität 3 höher als bei der Heuqualität 1.

Der höhere Chlorgehalt in der Heuqualität 3 führt auch in der Teillast zu höheren HCl-Konzentrationen und der geringere Schwefelgehalt im Heu führt zu geringeren SO₂-Konzentrationen an der Messstelle Rohgas im Vergleich zur Heuqualität 1.

In Tabelle 4.10 sind die Mittelwerte für die Heuqualität 3 beim Teillastbetrieb der Anlage an der Messstelle im Reingas angegeben.

Tabelle 4.10 Mittelwerte der Messungen für die Heuqualität 3 an der Messstelle Reingas bei Teillast

Heuqualität 3 / Reingas / Teillast							
PCDD/F und PAH							
Anzahl Messungen PAH und PCDD/F: 2	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂				
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	PAH in µg/m ³	PCDD/F in ngTE/m ³
Mittelwert	4,8	15,6	1.250	16	328	53	1,20
Minimalwert	4,8	15,3	916	7	260	44	1,17
Maximalwert	4,9	15,7	1.862	24	362	61	1,24
Standardabweichung	0,0	0,2	433	8	48	8	0,03
Staub							
Anzahl Messungen Staub: 6	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂				
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	Staub in mg/m ³	
Mittelwert	5,0	15,5	1.426	19	321	109	
Minimalwert	4,6	14,9	796	7	228	76	
Maximalwert	5,6	15,9	2.888	34	383	158	
Standardabweichung	0,3	0,4	723	12	63	29	
HCl und SO ₂							
Anzahl Messungen HCl und SO ₂ : 6	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂					
		HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³				
Mittelwert	15,5	17	287				
Minimalwert	14,9	4	208				
Maximalwert	15,9	27	310				
Standardabweichung	0,4	7	36				

Im Teillastbetrieb mit der Heuqualität 3 steigen ebenfalls, im Vergleich zum Vollastbetrieb, die Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung an, allerdings weniger stark als bei der Heuqualität 1. Auch bei Teillast ist die mittlere PCDD/F-Konzentration bei der Heuqualität 3 höher als bei der Heuqualität 1.

Die mittlere NO_x-Konzentration ist im Teillastbetrieb mit der Heuqualität 3 geringer als bei der Heuqualität 1, im Vollastbetrieb ergab sich kein Unterschied zwischen den Heuqualitäten.

Der höhere Chlorgehalt bzw. geringere Schwefelgehalt in der Heuqualität 3 führt auch bei Teillast an der Messstelle Reingas zu höheren HCl-Konzentrationen bzw. geringeren SO₂-Konzentrationen im Vergleich zur Heuqualität 1.

In Tabelle 4.11 sind die Mittelwerte für die Heuqualität 3 beim Gluterhaltbetrieb aufgelistet.

Tabelle 4.11 Mittelwerte der Messungen für die Heuqualität 3 beim Gluterhaltbetrieb

Heuqualität 3 / Gluterhalt							
PCDD/F und PAH (Messstelle Reingas)							
Anzahl Messungen PAH und PCDD/F: 3	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂				
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	PAH in µg/m ³	PCDD/F in ngTE/m ³
Mittelwert	1,6	19,0	4.259	262	360	1.985	2,91
Minimalwert	1,4	18,6	3.146	119	347	519	1,07
Maximalwert	1,8	19,3	5.887	534	379	3.499	4,69
Standardabweichung	0,2	0,3	1.176	192	14	1.217	1,48
Staub (Messstelle Rohgas)							
Anzahl Messungen Staub: 6	CO ₂ in Vol%		O ₂ in Vol%		bezogen auf 11 Vol% O ₂ Staub in mg/m ³		
Mittelwert	2,4		18,3		478		
Minimalwert	1,3		17,7		303		
Maximalwert	3,0		19,4		622		
Standardabweichung	0,5		0,5		113		
HCl und SO ₂ (Messstelle Rohgas)							
Anzahl Messungen HCl und SO ₂ : 6	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂					
		HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³				
Mittelwert	18,3	25	240				
Minimalwert	17,7	6	120				
Maximalwert	19,4	39	280				
Standardabweichung	0,5	12	59				

Im Gluterhaltbetrieb mit der Heuqualität 3 sind die ermittelten mittleren Konzentrationen von CO, VOC, PAH und Staub deutlich niedriger als bei der Heuqualität 1, liegen aber dennoch deutlich über den Werten beim Teillastbetrieb mit dem Heuqualität 3. Allerdings liegt die mittlere PCDD/F-Konzentration bei der Heuqualität 3 im Gluterhaltbetrieb höher als bei der Heuqualität 1.

Die mittlere NO_x-Konzentration ist im Gluterhaltbetrieb mit der Heuqualität 3 höher als bei der Heuqualität 1.

Der höhere Chlorgehalt bzw. geringer Schwefelgehalt in der Heuqualität 3 führt auch im Gluterhaltbetrieb zu höheren HCl-Konzentrationen bzw. geringeren SO₂-Konzentrationen im Abgas im Vergleich zur Heuqualität 1.

4.2 Zusammengefasste Darstellung der Mittelwerte

Im Folgenden sind die in Tabelle 4.2 bis Tabelle 4.11 aufgeführten Mittelwerte der gemessenen Abgaskomponenten für die jeweiligen Lastzustände und Messstellen für die beiden untersuchten Heuqualitäten 1 und nochmals zusammengefasst dargestellt.

4.2.1 Heuqualität 1

In Tabelle 4.12 sind die Ergebnisse der Heuqualität 1 als Mittelwerte der gemessenen Abgaskomponenten zusammengefasst aufgeführt (siehe auch Tabelle 4.2 bis Tabelle 4.6).

Tabelle 4.12 Mittelwerte der Messungen für die Heuqualität 1 an der Messstelle Roh und Reingas bei Volllast, Teillast und Gluterhaltbetrieb

Heuqualität 1								
PCDD/F und PAH								
Mess- stelle	Laststufe	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂				PCDD/F in ngTE/m ³
				CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	PAH in µg/m ³	
Rohgas	Volllast	9,5	10,9				77	0,19
Reingas		6,0	14,5	759	22	377	57	0,14
Rohgas	Teillast	6,2	14,2				220	1,73
Reingas		3,2	17,3	3.211	52	370	139	0,65
Reingas	Gluterhalt	1,5	19,2	6.427	507	328	3.111	1,06
Staub								
Mess- stelle	Laststufe	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂			Staub in mg/m ³	
				CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³		
Rohgas	Volllast	9,6	10,8				657	
Reingas		6,1	14,4	811	25	373	128	
Rohgas	Teillast	6,8	13,6				624	
Reingas		3,6	16,9	2.989	47	386	176	
Rohgas	Gluterhalt	1,9	18,8				1.202	
HCl und SO ₂								
Mess- stelle	Laststufe	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂					
			HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³				
Rohgas	Volllast	10,8	64	354				
Reingas		14,3	34	314				
Rohgas	Teillast	13,6	36	355				
Reingas		16,9	6	336				
Rohgas	Gluterhalt	18,8	10	456				

Aufgrund von Undichtigkeiten im Abgasweg ist die Sauerstoffkonzentration an der Messstelle im Reingas immer höher als im Rohgas. Die Sauerstoffkonzentration hängt auch vom Lastzustand des Kessels ab, beim Volllastbetrieb ist sie am niedrigsten, beim Gluterhaltbetrieb am höchsten, die Kohlendioxidkonzentration verläuft entsprechend gegenläufig.

Die Konzentrationen an CO, VOC und PAH hängen von den Verbrennungsbedingungen ab, diese sind im Volllastbetrieb relativ am günstigsten und verschlechtern sich bei ebenfalls

untersuchten Teil- und Gluterhaltbetrieb merklich. So steigen vor allem die VOC- und PAH-Konzentrationen im Gluterhaltbetrieb überproportional an. Da die PAH bei den herrschenden Abgastemperaturen auch zu größeren Anteilen partikelgebunden vorliegen, nimmt deren Konzentration im Reingas ab, wobei die Abnahme in der Teillast mit rund 37 % deutlicher ausfällt als bei Volllast mit rund 26 %.

Die höhere prozentuale Abnahme der PAH-Konzentration im Reingas bei Teillast ergibt sich trotz höherer Staubkonzentration an der Messstelle Reingas im Vergleich zum Volllastbetrieb. Dies lässt darauf schließen, dass bei Teillast aufgrund der geringeren Abgastemperaturen die PAH deutlich verstärkt partikelgebunden vorliegen und damit im Gewebefilter abgeschieden werden.

Im Voll- und Teillastbetrieb unterscheiden sich die Staubkonzentrationen an der Messstelle im Rohgas kaum, der Messwert ist bei Volllast nur etwas größer. Der Abscheidegrad des Gewebefilters beträgt bei Volllast rund 81 % und bei Teillast rund 72 % und liegt damit weit unterhalb der Erwartungswerte nach dem Stand der Technik.

Im Gluterhalt steigt die Staubkonzentration stark an, da zum einen sehr schlechte Verbrennungsbedingungen vorliegen und das Abgas auch nicht mehr durch den Gewebefilter geleitet wird.

Die PCDD/F-Konzentration im Rohgas ist im Teillastbetrieb am höchsten und bei Volllast am geringsten. Diese beiden Werte unterscheiden sich sehr stark voneinander (ca. Faktor 9), die Konzentration im Gluterhaltbetrieb liegt dazwischen. Im Volllastbetrieb verringert der Gewebefilter die PCDD/F-Konzentration um rund 29 % und bei Teillast um rund 62 %.

Die gemessenen NO_x -Konzentrationen unterscheiden sich im Voll- und Teillastbetrieb nur wenig, auch im Gluterhaltbetrieb nimmt die Konzentration nur geringfügig ab.

Die Konzentration an HCl ist im Rohgas beim Volllastbetrieb am höchsten und im Gluterhalt am niedrigsten. Im Gewebefilter wird ein beträchtlicher Teil der gasförmigen Chlorverbindungen abgeschieden. So nimmt bei Volllast die gemessene HCl-Konzentration im Reingas um rund 48 % und bei Teillast um rund 82 % ab. D.h. je geringer die Rohgaskonzentration an gasförmigen Chlorverbindungen ist, desto besser werden diese im Gewebefilter abgeschieden.

Die SO_2 -Konzentrationen im Rohgas sind bei Voll- und Teillast nahezu identisch und steigen im Gluterhaltbetrieb sogar noch deutlich an. Durch den Gewebefilter verringert sich die SO_2 -Konzentration nur wenig (ca. 11% bei Volllast und ca. 5 % bei Teillast).

4.2.2 Heuqualität 3

In Tabelle 4.13 sind die Ergebnisse der Heuqualität 3 als Mittelwerte der gemessenen Abgaskomponenten zusammengefasst aufgeführt (siehe auch Tabelle 4.7 bis Tabelle 4.11).

Auch bei diesem Brennstoff liegt aufgrund von Undichtigkeiten im Abgasweg die Sauerstoffkonzentration an der Messstelle im Reingas immer höher als im Rohgas. Aufgrund des gleichmäßigeren Kesselbetriebs nimmt bei der Heuqualität 3 die Sauerstoffkonzentrationen für alle untersuchten Lastzustände gegenüber den Werten bei der Heuqualität 1 ab.

Tabelle 4.13 Mittelwerte der Messungen für die Heuqualität 3 an der Messstelle Roh und Reingas bei Volllast, Teillast und Gluterhaltbetrieb

Heuqualität 3								
PCDD/F und PAH								
Mess- stelle	Laststufe	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂				
				CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	PAH in µg/m ³	PCDD/F in ngTE/m ³
Rohgas	Volllast	11,6	8,9				14	0,47
Reingas		7,0	13,5	258	10	368	17	0,50
Rohgas	Teillast	7,1	13,4				91	4,30
Reingas		4,8	15,6	1.250	16	328	53	1,20
Reingas	Gluterhalt	1,6	19,0	4.259	262	360	1.985	2,91
Staub								
Mess- stelle	Laststufe	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂				
				CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	Staub in mg/m ³	
Rohgas	Volllast	11,6	9,0				355	
Reingas		7,1	13,4	266	10	372	100	
Rohgas	Teillast	7,1	13,4				405	
Reingas		5,0	15,5	1.426	19	321	109	
Rohgas	Gluterhalt	2,4	18,3				478	
HCl und SO ₂								
Mess- stelle	Laststufe	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂					
			HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³				
Rohgas	Volllast	9,0	89	308				
Reingas		13,4	51	270				
Rohgas	Teillast	13,4	64	314				
Reingas		15,5	17	287				
Rohgas	Gluterhalt	18,3	25	240				

Auch bei der Heuqualität 3 wurden im Volllastbetrieb die niedrigsten Konzentrationen an CO, VOC und PAH gemessen, im Teil- und Gluterhaltbetrieb steigen die Konzentrationen dieser Abgaskomponenten merklich an. Allerdings ist der Anstieg nicht so stark wie bei der Heuqualität 1 und die Werte liegen auch durchweg auf niedrigerem Niveau. Ursache hierfür ist der gleichmäßigere Kesselbetrieb bei der Heuqualität 3, welche durch die Überbrückung des Kesseltemperaturwächters erreicht wurde und nicht durch die verfeuerte Heuqualität beeinflusst wird. Die PAH-Konzentration im Reingas liegt bei der Heuqualität 3 bei Volllast etwas über den Werten im Rohgas und nimmt bei Teillast um rund 42 % ab.

Bei der Heuqualität 3 wurden im Reingas bei Voll- und Teillast ähnliche Staubkonzentrationen ermittelt. Im Voll- und Teillastbetrieb unterscheiden sich die Staubkonzentrationen an der Messstelle im Rohgas bei dieser Heuqualität deutlicher, was aber nicht an der Heuquali-

tät an sich liegt sondern am gleichmäßigeren Kesselbetrieb, was sich bei Volllast am deutlichsten zeigt. Insgesamt liegen die Staubkonzentrationen durch das bessere Leistungsverhalten des Kessels bei allen untersuchten Lastzuständen bei der Heuqualität 3 deutlich unter den Werten der Heuqualität 1. Der Abscheidegrad des Gewebefilters beträgt bei Volllast rund 72 % und bei Teillast rund 73 % und liegt damit auch bei der Heuqualität 3 weit unterhalb der Erwartungswerte nach dem Stand der Technik.

Die PCDD/F-Konzentration im Rohgas ist auch bei der Heuqualität 3 im Teillastbetrieb am höchsten und bei Volllast am geringsten. Diese beiden Werte unterscheiden sich sehr stark voneinander (ca. Faktor 9), die Konzentration im Gluterhaltbetrieb liegt dazwischen. Im Volllastbetrieb liegt die PCDD/F-Konzentration im Reingas nach Gewebefilter sogar etwas über der Rohgaskonzentration, bei Teillast nimmt die PCDD/F-Konzentration im Reingas um rund 72 % ab.

Die gemessenen NO_x -Konzentrationen unterscheiden sich im Voll- und Teillastbetrieb nur wenig, auch im Gluterhaltbetrieb liegt die NO_x -Konzentration im selben Bereich. Auch gegenüber der Heuqualität 1 unterscheiden sich die NO_x -Konzentrationen bei der Heuqualität 3 nur wenig.

Die Konzentration an HCl ist im Rohgas beim Volllastbetrieb am höchsten und im Gluterhalt am niedrigsten. Im Gewebefilter wird ein beträchtlicher Teil der gasförmigen Chlorverbindungen abgeschieden. So nimmt bei Volllast die gemessene HCl-Konzentration im Reingas um rund 42 % und bei Teillast um rund 73 % ab. Aufgrund des höheren Chlorgehalts im Brennstoff liegen auch die gemessenen HCl-Konzentrationen bei der Heuqualität 3 durchweg über denen der Heuqualität 1.

Die SO_2 -Konzentrationen im Rohgas sind bei Voll- und Teillast nahezu identisch und nehmen im Gluterhaltbetrieb leicht ab. Durch den Gewebefilter verringert sich die SO_2 -Konzentration nur wenig (ca. 12% bei Volllast und ca. 9 % bei Teillast). Der geringere Schwefelgehalt in der Heuqualität 3 zeigt sich auch in geringeren SO_2 -Konzentrationen im Vergleich zur Heuqualität 1.

4.3 Vergleich der Heuqualitäten 1 und 3

In Tabelle 4.14 sind die Mittelwerte der Ergebnisse für die Heuqualität 1 und 3 mit einer Auswahl der gemessenen Abgaskomponenten zusammengefasst aufgeführt (siehe auch Tabelle 4.12 und Tabelle 4.13).

Wie bereits ausgeführt, ist hierbei folgendes erkennbar:

- Die verbesserte Leistungsregelung des Heizkessels durch eine Deaktivierung des fehlerhaften Kesseltemperaturwächters führt zu günstigeren Verbrennungsbedingungen und damit zu geringeren Konzentrationen an Produkten unvollständiger Verbrennung (CO, VOC und PAH) im Abgas bei der Heuqualität 3.
- Bei beiden Heuqualitäten nehmen die Konzentrationen an Produkten unvollständiger Verbrennung mit abnehmender Kesselleistung zu, im Gluterhaltbetrieb werden hier mit Abstand die höchsten Werte gemessen.

Tabelle 4.14 Vergleich der Mittelwerte für die Heuqualität Q1 und Q3 an den Messstellen Roh und Reingas bei Volllast, Teillast und Gluterhaltbetrieb

Heuqualität 1 und 3												
Volllast												
Heuqualität	Messstelle	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂							Staub in mg/m ³	HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	PAH in µg/m ³	PCDD/F in ngTE/m ³					
Q1	Rohgas	10,9				77	0,19	657	64	354		
Q3	gas	8,9				14	0,47	355	89	308		
Q1	Rein-	14,5	759	22	377	57	0,14	128	34	314		
Q3	gas	13,5	258	10	368	17	0,50	100	51	270		
Teillast												
Heuqualität	Messstelle	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂							Staub in mg/m ³	HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	PAH in µg/m ³	PCDD/F in ngTE/m ³					
Q1	Rohgas	14,2				220	1,73	624	36	355		
Q3	gas	13,4				91	4,30	405	64	314		
Q1	Rein-	17,3	3.211	52	370	139	0,65	176	6	336		
Q3	gas	15,6	1.250	16	328	53	1,20	109	17	287		
Gluterhalt												
Heuqualität	Messstelle	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂							Staub in mg/m ³	HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	PAH in µg/m ³	PCDD/F in ngTE/m ³					
Q1	*)	19,2	6.427	507	328	3.111	1,06	1.202	10	456		
Q3		19,0	4.259	262	360	1.985	2,91	478	25	240		

O₂, CO, VOC und NO_x mittlere Konzentrationen für die PCDD/F- / PAH- Probenahmedauer
*) keine Unterscheidung zwischen Roh- und Reingasmessstelle (Gewebefilter wird nicht von Abgas bei diesem Betriebszustand durchströmt)

- Die NO_x-Konzentrationen im Abgas des Heizkessels werden nur wenig vom Lastzustand und der Heuqualität beeinflusst. Die Stickstoffgehalte der Heuqualitäten 1 und 3 betragen 1,71 bzw. 1,26 Massen-%. Der höhere Stickstoffgehalt der Heuqualität 1 (ca. 36 % höher als bei der Heuqualität 3) wirkt sich allerdings nur gering auf die NO_x-Konzentrationen im Abgas (Heuqualität 1 bei Volllast ca. 2 % höher als bei Heuquali-

tät 3) aus. Allerdings ist bei der Bewertung zu berücksichtigen, dass sich die Verbrennungsbedingungen bei den beiden Heuqualitäten deutlich unterscheiden. Inwieweit sich der höhere Stickstoffgehalt der Heuqualität 1 auf die NO_x -Konzentrationen im Abgas bei den Verbrennungsbedingungen für die Heuqualität auswirken würde, kann hier nicht beurteilt werden.

- Die PCDD/F-Konzentrationen sind bei der Heuqualität 3 bei allen untersuchten Lastzuständen höher als bei der Heuqualität 1. Die höchsten PCDD/F-Konzentrationen wurden bei jeder Heuqualität im Teillastbetrieb ermittelt, hier wurde der höchste PCDD/F-Mittelwert überhaupt mit $4,30 \text{ ngTE/m}^3$ (bezogen auf 11 Vol\% O_2) im Rohgas gemessen. Die PCDD/F-Reingaskonzentrationen mit der Heuqualität 1 bewegen sich im Bereich von $0,14$ (Volllast) bis $1,06$ (Gluterhaltbetrieb) ngTE/m^3 (bezogen auf 11 Vol\% O_2). Bei der Heuqualität 3 liegen die PCDD/F-Reingaskonzentrationen im Bereich von $0,50$ (Volllast) bis $2,91$ (Gluterhaltbetrieb) ngTE/m^3 (bezogen auf 11 Vol\% O_2). Somit liegen die PCDD/F-Reingaskonzentrationen bei der Heuqualität 3 um den Faktor ca. $3,7$ (Volllast) bis ca. $1,9$ (Teillast) höher als bei Heuqualität 1. Bei der Heuqualität 3 wurde allerdings nur ein um den Faktor ca. $1,4$ höhere Chlorkonzentration im Brennstoff ermittelt.
- Die HCl-Konzentrationen im Abgas an der Messstelle Rohgas nehmen beim Volllastbetrieb in etwa proportional der Chlorkonzentration im Brennstoff zu. Bei den beiden anderen untersuchten Lastzuständen ist die Zunahme sogar überproportional hoch. Ein beträchtlicher Anteil der flüchtigen Chlorverbindungen wird im Gewebefilter abgeschieden.
- Die im Rohgas gemessenen SO_2 -Konzentrationen sind nur vergleichsweise gering vom Lastzustand und in etwa proportional vom Schwefelgehalt der Heuqualität abhängig. Der etwas höhere Schwefelgehalt in der Heuqualität 1 (ca. 19% mehr als in der Heuqualität 3) zeigt sich auch in etwas höheren SO_2 -Konzentrationen im Rohgas (bei Volllast: Heuqualität 1 um ca. 13% höher als bei Heuqualität 3). Im Gluterhaltbetrieb ergibt sich allerdings ein weit überproportionaler Anstieg der SO_2 -Konzentration bei der Heuqualität 1 im Vergleich zur Heuqualität 3.
- Die Staubkonzentrationen an der Rohgasmessstelle sind sowohl bei der Heuqualität 1 als auch bei der Qualität 3 hoch und liegen im Bereich von ca. 660 bis 360 mg/m^3 (bei 11 Vol\% O_2). Die ungünstigeren Betriebsbedingungen des Heizkessels bei der Heuqualität 1 führen auch zu deutlich höheren Staubkonzentrationen im Rohgas. Die Abscheideleistung des Gewebefilters (in diese Bewertung ist die Abgasführung mit Bypassklappen zur Umgehung des Gewebefilters mit eingeschlossen) ist vergleichsweise gering. Die Staubkonzentrationen im Reingas lagen im Bereich zwischen 100 mg/m^3 (bei 11 Vol\% O_2 ; Volllast mit Heuqualität 3) und 176 mg/m^3 (bei 11 Vol\% O_2 ; Teillast mit Heuqualität 1) und damit deutlich höher als laut Herstellerangaben zu erwarten gewesen wäre.

5 Ergebnisse der Ascheanalysen

Asche ist ein fester Rückstand aus der Verbrennung organischen Materials und besteht vor allem aus Oxiden und (Bi-)Karbonaten diverser Metalle. Die Verbrennungsrückstände verlassen mit dem Abgasstrom z.T. den Feuerraum, der überwiegende Teil verbleibt nach dem Abbrand im Feuerraum bzw. wird in diesem Fall mittels Ascheschieber und Ascheschnecke in die Aschetonne gefördert.

Verbrennungsrückstände, die mit dem Abgasstrom die Feuerung verlassen, werden bei der untersuchten Anlagenkonfiguration zu einem sehr geringen Teil im Multizyklon (nur sehr grobe Partikel) und vor allem im Gewebefilter abgeschieden. allerdings liegen hier die Verbrennungsrückstände (Aschebestandteile) nicht in reiner Form vor, sondern sind mit Rußpartikeln gemischt. Dieser Rußanteil ist abhängig von den Verbrennungsbedingungen, je schlechter diese sind, umso höher ist der Rußanteil. Bei sehr schlechten Verbrennungsbedingungen (z.B. im Gluterhaltbetrieb) können auch noch hochsiedende organische Verbindungen (z.B. PAH) an die Ruß- und Aschepartikel angelagert sein.

Für die Ascheanalyse auf PCDD/F wurde von jeder Brennstoffqualität bei Voll- und Teillast jeweils eine Ascheprobe aus dem Kessel (Rostasche) und dem Gewebefilter (Filterasche) entnommen und analysiert. Hierzu wurde ein Mischprobe zu je ca. 50 Massen-% aus der Volllast- bzw. Teillastprobe hergestellt. Die Analyseergebnisse für die untersuchten Rost- und Filterascheproben sind als Summen der Toxizitäts-Äquivalenz-Konzentrationen in Tabelle 5.1 aufgeführt. Die Ergebnisse zu den einzelnen Kongeneren sind im Bericht über die Durchführung von Emissionsmessungen bezüglich der Komponenten PCDD/F und PAH des TÜV SÜD vom 19.2.2014 im Anhang aufgelistet.

Tabelle 5.1 PCDD/F-Analyseergebnisse der Ascheproben aus den Verbrennungsversuchen mit der Heuqualität 1 und 3 bei Voll- und Teillast

	Heuqualität	Rostasche	Filterasche
Q1	PCDD/F in ngTE/kg	ND	3,260
Q3	PCDD/F in ngTE/kg	0,105 *)	4,830

ND nicht bestimmt, da keines der entsprechenden Kongenere oberhalb der Bestimmungsgrenze des Analyseverfahrens lag

*) nur 2,3,7,8-TetraCDF über Bestimmungsgrenze, alle anderen Kongenere lagen unterhalb der Bestimmungsgrenze

In der Rostasche konnte ein Bewertungswert in ngTE/kg nach I-TEQ (NATO/CCMS, 1988) nur bei der Heuqualität 3 ermittelt werden. Dieser ergab sich allerdings nur durch eine Konzentration oberhalb der Bestimmungsgrenze für 2,3,7,8-TetraCDF, alle anderen Kongenere lagen unterhalb der Bestimmungsgrenze.

In der Filterasche wurden bei beiden Heuqualitäten ein PCDD/F-Konzentration nachgewiesen, wobei für die Heuqualität 3, entsprechend der PCDD/F-Abgaskonzentration, ein höherer Wert ermittelt wurde.

6 Zusatzuntersuchung Bypass Gewebefilter

Laut Herstellerangaben des Gewebefilters (Firma NESTRO Lufttechnik GmbH) soll ein Reststaubgehalt von ca. $< 10 \text{ mg/m}^3$ (bei 13 Vol% O_2) im Reingas erreicht werden. Die Ergebnisse der Verbrennungsversuche mit der Heuqualität 1 und 3 ergaben allerdings wesentlich höhere Staubkonzentrationen im Reingas (Bereich 100 bis 176 mg/m^3 (bei 11 Vol% O_2 , siehe Tabelle 4.14). Diverse Rückfragen zu den hohen Staubkonzentrationen im Reingas und möglichen Ursachen an den Filterhersteller wurden nicht beantwortet.

Um die mögliche Ursache für die hohen Reingasstaubkonzentration zu ermitteln, wurde deshalb eine Zusatzuntersuchung durchgeführt, Ergebnisse siehe Tabelle 6.1. Hierzu wurde der Bypass des Gewebefilters mit einem Blech verschlossen, so dass eine mögliche Undichtigkeit der Bypassklappe nicht zu erhöhten Staubkonzentrationen im Reingas führen konnte. Verfeuert wurde bei diesem Versuch die Heuqualität 3 bei Volllastbetrieb des Heizkessels. Gemessen wurden zeitgleich die Konzentrationen an O_2 und Staub im Roh- und Reingas.

Tabelle 6.1 Zusatzuntersuchung Bypassklappe - Mittelwerte der O_2 - und Staubkonzentrationen für die Heuqualität Q3 an den Messstellen Roh und Reingas bei Volllast

Zusatzuntersuchung		Bypass original		Bypass verschlossen	
Messstelle	Laststufe	O_2 in Vol%	Staub in mg/m^3 *	O_2 in Vol%	Staub in mg/m^3 *
Rohgas	Volllast	9,0	601	5,3	652
Reingas		11,5	114	6,2	< 10
Rohgas	Teillast	8,9	667	9,3	579
Reingas		11,2	129	11,7	< 10

* bezogen auf 11 Vol% O_2

Die Ergebnisse der Zusatzuntersuchung mit dem vom Hersteller gelieferten Bypass ergaben für die Roh- und Reingaskonzentrationen für Staub in etwa vergleichbare Werte zu den zuvor durchgeführten Versuchen. Wird der Bypass mit einem Blech verschlossen, so dass kein Abgas am Gewebefilter vorbei direkt auf die Reingasseite strömen kann, liegen die gemessenen Reingasstaubkonzentrationen deutlich unter 10 mg/m^3 (bezogen auf 11 Vol% O_2) und damit im Bereich der Herstellerangaben.

Die Ursache für die hohen Staubkonzentrationen an der Messstelle Reingas sind somit Undichtigkeiten der Bypassklappe, so dass ein nicht unerheblicher Anteil des Rohgases am Gewebefilter vorbei direkt auf die Reingasseite gelangt.

Mit dem verschlossenen Bypass kann der Gewebefilter allerdings nicht über längere Zeit betrieben werden, da dieser in regelmäßigen Abständen für eine effektive Abreinigung im Bypass betrieben werden muss. Außerdem muss der Gewebefilter auch zum An- und Abfahren der Anlage umgangen werden.

7 Vergleich Messwerte und Grenzwerte der TA-Luft

In Tabelle 7.1 sind die Grenzwerte nach TA-Luft für Anlagen der Nummer 1.3 [BMU, 2002] mit einer Feuerungswärmeleistung von > 100 kW und < 1 MW den Messwerten der Messstelle Reingas für die Heuqualitäten 1 und 3 bei Voll- und Teillast gegenüber gestellt.

Tabelle 7.1 Vergleich der Grenzwerte nach TA-Luft für Anlagen der Nummer 1.3 [BMU, 2002] mit einer Feuerungswärmeleistung > 100 kW und < 1 MW mit den Messwerten der Messstelle Reingas für die Heuqualitäten 1 und 3

Grenzwerte nach TA-Luft (Bezugssauerstoffgehalt 11 Vol%)			Messergebnisse für			
			Heuqualität 1 bei		Heuqualität 3 bei	
			Volllast	Teillast	Volllast	Teillast
Staub	50	mg/m ³	128	176	100	109
CO *	0,25	g/m ³	0,76		0,26	
NO _x	0,50	gNO ₂ /m ³	0,38	0,37	0,37	0,33
VOC	50	mgC/m ³	22	52	10	16
SO _x	0,35	gSO ₂ /m ³	0,31	0,34	0,27	0,29
HCl **	30	mg/m ³	34	6	51	17
PCDD/F ***	0,1	ngTE/m ³	0,1	0,7	0,5	1,2

* bei Nennlast

** gasförmige anorganische Chlorverbindungen in mg/m³ (angegeben als HCl)

*** angegeben als I-TEQ

Mit der untersuchten Anlagenkonfiguration und den verfeuerten Heuqualitäten wurden hierbei die Grenzwerte der TA-Luft für NO_x und SO_x sowohl bei Volllast als auch bei Teillast eingehalten. Für VOC wurde bei der Heuqualität 3 bei Voll- und Teillast der Grenzwert eingehalten, bei der Heuqualität 1 gilt dies nur für Volllast. Der Grenzwert für HCl konnte jeweils nur im Teillastbetrieb eingehalten werden. Der Grenzwert für PCDD/F konnte nur bei der Heuqualität 1 beim Volllastbetrieb eingehalten werden.

Bei allen anderen Grenzwerten traten z.T. erhebliche Grenzwertüberschreitungen auf. Dies gilt insbesondere für die Grenzwerte von Staub und PCDD/F (für Teillast bei Heuqualität 1 und beide aufgeführten Lastzustände für Heuqualität 3).

Die aufgetretenen Grenzwertüberschreitungen bei den untersuchten Heuqualitäten 1 und 3 sowie die nicht in diesem Projekt lösbaren Betriebsprobleme führte zu der Entscheidung, das Vorhaben vorzeitig zu beenden und auf eine Untersuchung der noch ausstehenden Heuqualität 2 zu verzichten.

Inwiefern sich Emissionskomponenten die, je nach Abgastemperatur, teilweise oder überwiegend an Stäube gebunden sind (z.B. PAH, PCDD/F) bzw. im Filterkuchen des Gewebefilters angelagert werden (z.B. HCl) bei einer besseren Staubabscheidung (TA-Luft Grenzwert wird sicher eingehalten) reduzieren würden, konnte im Rahmen des Projektes nicht bewertet werden.

8 Zusammenfassung

Um die energetische Verwertung von Landschaftspflegeheu sowie von Heu minderer Qualität in Baden-Württemberg voranzubringen, wurde das Emissionsverhalten eines, laut Herstellerangaben, für diesen Brennstoff geeigneten Heizkessels untersucht. Dieser war mit einem nachgeschaltetem Multizyklon sowie Gewebefilter ausgerüstet. Bei den Verbrennungsversuchen wurden letztlich nur zwei, statt wie geplant drei, unterschiedliche Heuqualitäten als Pellets eingesetzt, die sich im Wesentlichen durch den Chlorgehalt im Brennstoff unterscheiden. Neben polychlorierten Dibenzodioxinen und -furanen (PCDD/F) und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH) wurden auch die Emissionskomponenten Staub, CO, gasförmigen organischen Verbindungen (VOC), NO_x, anorganische gasförmige Chlorverbindungen sowie Schwefeloxide bei unterschiedlichen Lastzuständen des Heizkessels (Volllast, Teillast, Gluterhaltbetrieb) gemessen. Bei Voll- und Teillast fanden die Messungen z.T. zeitgleich vor dem Gewebefilter im Rohgas und nach dem Gewebefilter im Reingas statt.

Die Auswahl der Heuqualitäten mit unterschiedlichen Chlorkonzentrationen im Brennstoff erfolgte mit Unterstützung der Firma Agrarhandel Müller GbR aus Böhringen. Diese produzierte auch die Heupellets für die Verbrennungsversuche an.

Die Messungen wurden an einer eigens für dieses Vorhaben errichteten Feuerungsanlage im Technikum des Instituts durchgeführt werden. Die Messungen zur Bestimmung der Konzentrationen an PCDD/F und PAH wurden vom TÜV SÜD Industrie Service GmbH (Niederlassung Stuttgart) durchgeführt.

Heupellets weisen vergleichsweise geringe Ascheschmelztemperaturen auf, dies war bereits vor Projektbeginn bekannt, weshalb auch eine Kesselkonstruktion für die Verbrennungsversuche gewählt wurde, die aufgrund eines wassergekühlten Brennstoffbetts als besonders geeignet erschien. Nicht bekannt war, dass Heupellets bereits während der Entgasungsphase aneinander haften und große Agglomerate bilden. Dieses Verhalten setzt unmittelbar nach dem Anzünden der Pellets mit Beginn der Entgasungsreaktionen ein und im Laufe der Brennstoffentgasung bilden sich immer größere und dichtere Agglomerate, die sich dann negativ auf das Abbrandverhalten auswirken. Dieses besondere Abbrandverhalten der Heupellets sowie technische Unzulänglichkeiten der Anlagenkonfiguration führten bei den Untersuchungen zu folgenden zusammengefassten Ergebnissen:

- Ein störungsfreier Kesselbetrieb war mit Heupellets nicht möglich. Durch massive Verschlackungen im Feuerraum kam es nach relativ kurzer Betriebszeit immer wieder zum Austritt von Schwelgasen aus der Brennstoffzuführung und das Verbrennungsverhalten verschlechterte sich.
- Durch Undichtigkeiten im Bypass des Gewebefilters konnten keine niedrigen Staubkonzentrationen im Reingas erreicht werden. Außerdem muss der Gewebefilter in regelmäßigen Abständen (ca. stündlich) mit offenem Bypass abgereinigt werden. Während dieser Zeit werden Rohgasemissionen emittiert.
- Durch einen fehlerhaften Kesseltemperaturwächter konnte bei der ersten untersuchten Heuqualität kein stabiler Lastpunkt erreicht werden. Durch die permanenten Lastwechsel des Kessel (z.B. bei Einstellung Volllastbetrieb: zwischen Volllast und 30% Volllast) lagen die Rohgasemissionen (z.B. Staub, PAH) sehr hoch. Außerdem

traten höhere Konzentrationen an Produkten unvollständiger Verbrennung auch im Reingas (z.B. CO und VOC) auf.

- Auch beim gleichmäßigeren Kesselbetrieb bei der zweiten untersuchten Heuqualität lagen die Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung z.T. knapp über dem Grenzwert der TA-Luft (CO) bzw. stiegen im Teillastbetrieb deutlich an. Ursache hierfür sind u.a. Verschlackungsprobleme im Feuerraum und immer noch vorhandene Leistungsschwankungen, die zu ungünstigen Verbrennungsbedingungen führen.
- Mit beiden untersuchten Heuqualitäten konnten die Grenzwerte der TA-Luft für die Komponenten NO_x und SO_x durchgängig und für VOC überwiegend und für HCl bei Teillast eingehalten werden. Für PCDD/F wurde der Grenzwert der TA-Luft nur bei der ersten untersuchten Heuqualität und hier beim Vollastbetrieb erreicht.
- Ansonsten wurden die Grenzwerte der TA-Luft für Staub und CO durchgängig und für VOC bei Teillast mit der ersten Heuqualität, für HCl jeweils bei Vollast mit beiden untersuchten Heuqualitäten und für PCDD/F überwiegend überschritten.

Insgesamt stellte sich bei den Untersuchungen heraus, dass die untersuchte Anlagenkonfiguration bei der Verbrennung von Heupellets aufgrund von massiven Betriebsproblemen nicht praxistauglich ist und bei wichtigen Komponenten die Grenzwerte der TA-Luft nicht einhalten kann. Um die gesetzlichen Anforderungen und auch eine volle Praxistauglichkeit der Anlage zu erreichen, ist eine Weiterentwicklung des Heizkessels und des Gewebefilters notwendig.

9 Literaturverzeichnis

Axarlis, A. G., 2011.

Untersuchungen zur isokinetischen Probenahme bei Staubmessungen an Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe. Diplomarbeit Nr. 3007 am Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik der Universität Stuttgart, Stuttgart.

Björseth, A. und Ramdahl, T. 1985.

Sources and Emissions of PAH. In: Handbook of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Vol. 2, S. 1 - 20. Björseth, A., Ramdahl, T. (Eds.), Marcel Dekker, New York.

BMU, 2002.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft. 24.07.2002. Internetfassung unter: http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/taluft.pdf_2002

BMU, 2010.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. 1. Bundesimmissionsschutzverordnung: Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen. 1. BImSchV. 26.01.2010. Internet: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschv_1_2010/gesamt.pdf

BMUB. 2013

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. 17. BImSchV. Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen. 2.5.2013. Internetfassung unter: <http://www.bmub.bund.de/bmub/parlamentarische-vorgaenge/detailansicht/artikel/17-bimschv-verordnung-zur-durchfuehrung-des-bundes-immissionsschutzgesetzes-verordnung-ueber-die-verbrennung-und-die-mitverbrennung-von-abfaellen/>

DIN EN 1911. 2010.

Emissionen aus stationären Quellen - Bestimmung der Massenkonzentration von gasförmigen Chloriden, angegeben als HCl - Standardreferenzverfahren. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 1948 Teil 1. 2006.

Emissionen aus stationären Quellen - Bestimmung der Massenkonzentration von PCDD/PCDF und dioxin-ähnlichen PCB - Teil 1: Probenahme von PCDD/PCDF. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 1948 Teil 2. 2006.

Emissionen aus stationären Quellen - Bestimmung der Massenkonzentration von PCDD/PCDF und dioxin-ähnlichen PCB - Teil 2: Extraktion und Reinigung von PCDD/PCDF. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 1948 Teil 3. 2006.

Emissionen aus stationären Quellen - Bestimmung der Massenkonzentration von PCDD/PCDF und dioxin-ähnlichen PCB - Teil 3: Identifizierung und Quantifizierung von PCDD/PCDF. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 14918. 2009.

Feste Biobrennstoffe - Bestimmung der Heizwerte. Beuth Verlag, Berlin.

DIN CEN/TS 15370-1. Vornorm. 2006.

Feste Brennstoffe. Verfahren zur Bestimmung des Schmelzverhaltens der Asche. Teil 1: Verfahren zur Bestimmung charakteristischer Temperaturen. Beuth Verlag, Berlin.

Dobler, U.. 2011.

Heizen mit Stroh und Holz. Energie vom Acker und aus dem Wald. Vortrag Beratungsgruppe Bioenergie Mecklenburg-Vorpommern. A.P. Bioenergietechnik GmbH, Hirschau.

Englisch, Martin und Slacik, Alfred. 2010.

Korrosion und Emission in Biomasseanlagen. Österreichisches Forschungsinstitut für Chemie und Technik.

Gatternig, B., Hohenwarter, U., Karl, J.. 2010.

Ascheproblematik in biomassegefeierten Wirbelschichtanlagen. 11. Symposium Energieinnovation. 10.-12.2.2010 in A-Graz.

Geiger, T.; Hagenmaier, H.; Hartmann, E.; Römer, R.; Seifert, H.. 1992.

Einfluß des Schwefels auf die Dioxin- und Furanbildung bei der Klärschlammverbrennung. VGB Kraftwerkstechnik 72 (1992) Heft 2, S. 159-165.

Hartmann, Hans; Böhm, Thorsten, Maier; Leonhard. 2000.

Naturbelassene biogene Festbrennstoffe - umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Hrsg. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München. Umwelt & Entwicklung. Materialien 154.

Kaltschmitt, Martin; Hartmann, Hans; Hofbauer, Hermann. 2009.

Energie aus Biomasse, Kapitel 9: Grundlagen der thermo-chemischen Umwandlung biogener Festbrennstoffe. Springer Verlag, Berlin

Kaufmann, Hanspeter; Nussbaumer, Thomas. 1999.

Bildung und Eigenschaften von Chlorverbindungen bei der Verbrennung biogener Brennstoffe. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft Nr. 7/8, S. 267-272.

Launhardt, Thomas; Hurm, Reinhold; Schmid, Volker; Link, Heiner. 1998.

Dioxin- und PAH-konzentrationen in Abgas und Aschen von Stückholzfeuerungen. Hrsg. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München. Umwelt & Entwicklung. Materialien 142.

Münzenmaier, L.. 2013.

Verbrennung von Heupellets - Untersuchungen zur Qualitätssicherung bei der Chlormessung. Bachelorarbeit Nr. 3162 am Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart, Stuttgart.

NATO-CCMS. 1988.

Pilot Study on International Exchange on Dioxins and Related Compounds - International Toxicity Equivalency Factor (I-TEF) Method of Risk Assessment for Complex Mixtures of Dioxins and Related Compounds. Report No. 176. North Atlantic Treaty Organisation - Committee on Challenges of Modern Society.

ÖKOTHERM®, 2010.

Abgas-Reinigung durch Gewebefilter und Multizyklon. A.P. Bioenergietechnik GmbH, Hirschau.

- Sommersacher, Peter; Brunner, Thomas; Obernberger, Ingwald. 2014.
Neue Methoden zur Charakterisierung von Biomasse-Brennstoffen. Central European Biomass Conference CEBC, Graz 15. bis 18. Januar 2014.
- Struschka, Michael; Sprung, Joachim, Baumbach; Günter. 1995.
Stickstoffoxid-Emissionen kleiner, chargenweise beschickter Holzfeuerungen. BWK Bd. 47 (1995) Nr. 11/12 S. 504- 509.
- Struschka, Michael; Juschka, Winfried; Baumbach, Günter; Schütz, David. 2006.
Emissionsmessungen an der Heuverbrennungsanlage in Sonnenbühl. Messbericht im Auftrag der Landesanstalt für Landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen der Universität Hohenheim. Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Stuttgart.
- Struschka, Michael; Zieba, Mariusz, Juschka, Winfried, Hammer, Frank, Turowski, Peter, Hartmann, Hans. 2008.
Dezentrale energetische Nutzung von Getreide und Stroh. Entwicklung neuer genehmigungsfähiger Verbrennungsanlagen. Endbericht des mit Mitteln aus dem Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe geförderten Vorhabens FKZ 220 189 03, Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD), Stuttgart.
- Tonn, Bettina. 2010.
Verbrennungseignung von Landschaftspflegeheu. Landwirtschaftliches Zentrum Baden-Württemberg, Grünlandwirtschaft Aulendorf, Bad Waldsee, 15. April 2010
- Tonn, Bettina. 2011.
Nutzungsmöglichkeiten von Grünland zwischen Naturschutz und betrieblichen Erfordernissen. Naturschutz und Landwirtschaft im Dialog, Internationale Naturschutzakademie Insel Vilm, 4. bis 7.10.2011.
- VDI-Richtlinie 2066, Blatt 1. 2006.
Messen von Partikeln - Staubmessung in strömenden Gasen, gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung. Beuth Verlag, Berlin.
- VDI-Richtlinie 3874. 2006.
Messen von Emissionen - Messen von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH) - GC/MS-Verfahren. Beuth Verlag, Berlin.

10 Anhang Messdaten IFK

10.1 Heuqualität 1

Tabelle 10.1 Mittelwerte der Einzelmessungen für Heuqualität 1 an der Messstelle Rohgas bei Vollast

Heuqualität 1 / Rohgas / Vollast				
PCDD/F und PAH				
Messung Nr.	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂	
			PAH in µg/m ³	PCDD/F in ngTE/m ³
1	9,6	10,7	66	0,22
2	9,3	11,1	*	*
3	9,6	10,8	88	0,17
Staub				
in Messung Nr.	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂ Staub in mg/m ³	
1	9,5	10,8	474	
1	9,7	10,6	678	
2	8,9	11,6	650	
2	9,9	10,4	688	
3	10,1	10,3	637	
3	9,4	11,0	813	
HCl und SO ₂				
in Messung Nr.	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂		
		HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³	
1	10,5 #	45	275	
1	10,6	52	348	
2	11,6	69	416	
2	10,4	64	359	
3	10,3	79	374	
3	11,0	77	351	

* Rückstellprobe nicht analysiert

im Vergleich zu Staub geringfügig andere Probenahmedauer

Tabelle 10.2 Mittelwerte der Einzelmessungen für Heuqualität 1 an der Messstelle Reingas bei Volllast

Heuqualität 1 / Reingas / Volllast							
PCDD/F und PAH							
Messung Nr.	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂				PCDD/F in ngTE/m ³
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	PAH in µg/m ³	
1	6,1	14,4	733	22	380	60	0,14
2	5,9	14,5	886	25	352	*	*
3	5,9	14,6	659	20	399	54	0,14
Staub							
in Messung Nr.	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂			Staub in mg/m ³	
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³		
1	6,2	14,3	836	26	389	112	
1	6,4	14,1	830	26	360	120	
2	6,0	14,5	957	28	377	170	
2	6,1	14,3	1.215	38	328	122	
3	6,2	14,3	483	15	373	107	
3	5,8	14,6	546	15	412	137	
HCl und SO ₂							
in Messung Nr.	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂					
		HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³				
1	14,2 #	24	233				
1	14,1	23	343				
2	14,5	38	336				
2	14,3	30	323				
3	14,3	45	328				
3	14,6	41	321				

* Rückstellprobe nicht analysiert

im Vergleich zu Staub geringfügig andere Probenahmedauer

Tabelle 10.3 Mittelwerte der Einzelmessungen für Heuqualität 1 an der Messstelle Rohgas bei Teillast

Heuqualität 1 / Rohgas / Teillast				
PCDD/F und PAH				
Messung Nr.	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂	
			PAH in µg/m ³	PCDD/F in ngTE/m ³
4	5,9	14,5	214	1,51
5	6,5	13,9	*	*
6	6,2	14,1	227	1,94
Staub				
in Messung Nr.	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂	
			Staub in mg/m ³	
4	8,5	11,7	528	
4	4,9	15,6	954	
5	6,1	14,4	540	
5	8,3	12,0	531	
6	8,6	11,6	557	
6	4,1	16,3	632	
HCl und SO₂				
in Messung Nr.	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂		
		HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³	
4	11,7	29	381	
4	15,6	25	295	
5	14,4	32	327	
5	12,0	61	334	
6	11,6	45	394	
6	16,3	23	402	

* Rückstellprobe nicht analysiert

Tabelle 10.4 Mittelwerte der Einzelmessungen für Heuqualität 1 an der Messstelle Reingas bei Teillast

Heuqualität 1 / Reingas / Teillast							
PCDD/F und PAH							
Messung Nr.	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂				PCDD/F in ngTE/m ³
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	PAH in µg/m ³	
4	3,3	17,3	3.530	61	388	156	0,65
5	3,3	17,2	3.103	47	358	*	*
6	3,1	17,3	3.000	48	364	121	0,65
Staub							
in Messung Nr.	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂			Staub in mg/m ³	
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³		
4	4,8	15,6	1.535	31	358	179	
4	2,7	17,8	4.249	68	428	237	
5	3,1	17,5	2.984	51	395	121	
5	4,2	16,2	2.016	28	298	191	
6	4,3	16,1	1.858	35	331	132	
6	2,2	18,5	5.294	68	508	194	
HCl und SO ₂							
in Messung Nr.	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂					
		HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³				
4	15,6	2	347				
4	17,8	6	293				
5	17,5	4	299				
5	16,2	18	314				
6	16,1	7	381				
6	18,5	1	384				

* Rückstellprobe nicht analysiert

Tabelle 10.5 Mittelwerte der Einzelmessungen für Heuqualität 1 beim Gluterhaltbetrieb

Heuqualität 1 / Gluterhalt							
PCDD/F und PAH (Messstelle Reingas)							
Messung Nr.	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂				
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	PAH in µg/m ³	PCDD/F in ngTE/m ³
7	1,4	19,3	6.364	733	348	*	*
8	1,4	19,4	6.779	372	339	2.694	1,36
9	1,8	18,9	6.138	417	298	3.528	0,76
Staub (Messstelle Rohgas)							
in Messung Nr.	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂ Staub in mg/m ³				
7	4,6	16,1	682				
7	1,0	19,9	561				
8	2,8	17,9	1.837				
8	0,8	19,9	448				
9	1,9	18,5	1.299				
9	0,6	20,3	2.387				
HCl und SO ₂ (Messstelle Rohgas)							
in Messung Nr.	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂					
		HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³				
7	16,1	28	338				
7	19,9	1	70				
8	17,9	5	532				
8	19,9	6	218				
9	18,5	6	430				
9	20,3	14	1.148				

* Rückstellprobe nicht analysiert

10.2 Heuqualität 3

Tabelle 10.6 Mittelwerte der Einzelmessungen für Heuqualität 3 an der Messstelle Rohgas bei Vollast

Heuqualität 3 / Rohgas / Vollast				
PCDD/F und PAH				
Messung Nr.	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂	
			PAH in µg/m ³	PCDD/F in ngTE/m ³
10	12,3	8,2	20	0,66
11	11,6	9,0	11 *	0,39 *
12	10,8	9,7	9	0,35
Staub				
in Messung Nr.	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂	
			Staub in mg/m ³	
10	12,6	7,9	430	
10	12,2	8,4	407	
11	11,8	8,8	317	
11	11,0	9,5	342	
12	11,4	9,2	273	
12	10,5	10,0	359	
HCl und SO ₂				
in Messung Nr.	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂		
		HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³	
10	7,9	89	298	
10	8,4	86	271	
11	8,8	89	324	
11	9,5	90	309	
12	9,2	85	329	
12	10,0	93	317	

* Rückstellprobe analysiert

Tabelle 10.7 Mittelwerte der Einzelmessungen für Heuqualität 3 an der Messstelle Reingas bei Volllast

Heuqualität 3 / Reingas / Volllast							
PCDD/F und PAH							
Messung Nr.	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂				
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	PAH in µg/m ³	PCDD/F in ngTE/m ³
10	7,5	13,1	364	12	348	29	0,86
11	7,1	13,4	185	9	380	13 *	0,37 *
12	6,5	13,9	224	8	377	10	0,29
Staub							
in Messung Nr.	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂				
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	Staub in mg/m ³	
10	7,8	12,7	561	16	326	117	
10	7,1	13,5	231	9	364	113	
11	7,4	13,1	169	8	373	99	
11	6,9	13,6	263	9	389	89	
12	7,0	13,5	221	9	378	84	
12	6,3	14,2	152	7	400	98	
HCl und SO ₂							
in Messung Nr.	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂					
		HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³				
10	12,7	46	269				
10	13,5	49	258				
11	13,1	45	252				
11	13,6	50	266				
12	13,5	56	293				
12	14,2	60	282				

* Rückstellprobe analysiert

Tabelle 10.8 Mittelwerte der Einzelmessungen für Heuqualität 3 an der Messstelle Rohgas bei Teillast

Heuqualität 3 / Rohgas / Teillast				
PCDD/F und PAH				
Messung Nr.	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂	
			PAH in µg/m ³	PCDD/F in ngTE/m ³
13	7,0	13,5	*	*
14	7,1	13,5	111	3,96
15	7,3	13,2	71	4,64
Staub				
in Messung Nr.	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂	
			Staub in mg/m ³	
13	7,4	13,0	476	
13	7,3	13,1	591	
14	7,0	13,5	359	
14	7,0	13,6	303	
15	6,7	13,8	357	
15	7,1	13,4	342	
HCl und SO₂				
in Messung Nr.	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂		
		HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³	
13	13,0	61	249	
13	13,1	60	352	
14	13,5	57	311	
14	13,6	63	300	
15	13,8	90	352	
15	13,4	55	321	

* Rückstellprobe nicht analysiert

Tabelle 10.9 Mittelwerte der Einzelmessungen für Heuqualität 3 an der Messstelle Reingas bei Teillast

Heuqualität 1 / Reingas / Teillast							
PCDD/F und PAH							
Messung Nr.	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂				
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	PAH in µg/m ³	PCDD/F in ngTE/m ³
13	4,8	15,7	1.862	24	260	*	*
14	4,9	15,7	973	-	362	61	1,17
15	4,9	15,3	916	7	361	44	1,24
Staub							
in Messung Nr.	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂				
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	Staub in mg/m ³	
13	5,6	14,9	1.736	27	228	109	
13	5,0	15,5	2.888	34	239	158	
14	4,9	15,7	1.013	-	347	131	
14	4,8	15,8	877	-	367	76	
15	5,2	15,2	796	8	362	82	
15	4,6	15,9	1.248	7	383	96	
HCl und SO ₂							
in Messung Nr.	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂					
		HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³				
13	14,9	4	208				
13	15,5	14	310				
14	15,7	16	292				
14	15,8	22	299				
15	15,2	27	304				
15	15,9	21	307				

* Rückstellprobe nicht analysiert

- Ausfall Messgerät

Tabelle 10.10 Mittelwerte der Einzelmessungen für Heuqualität 3 beim Gluterhaltbetrieb

Heuqualität 3 / Gluterhalt							
PCDD/F und PAH (Messstelle Reingas)							
Messung Nr.	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂				
			CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	NO _x in mg/m ³	PAH in µg/m ³	PCDD/F in ngTE/m ³
16	1,4	19,3	5.887	534	379	1.938	4,69
17	1,6	19,2	3.146	135	347	3.499 *	2,96 *
18	1,8	18,6	3.745	119	353	519	1,07
Staub (Messstelle Rohgas)							
in Messung Nr.	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂ Staub in mg/m ³				
16	1,3	19,4	471				
16	2,7	18,0	622				
17	2,8	17,9	613				
17	2,5	18,3	398				
18	2,4	18,3	461				
18	3,0	17,7	303				
HCl und SO ₂ (Messstelle Rohgas)							
in Messung Nr.	O ₂ in Vol%	bezogen auf 11 Vol% O ₂					
		HCl in mg/m ³	SO ₂ in mg/m ³				
16	19,4	11	120				
16	18,0	29	280				
17	17,9	33	279				
17	18,3	39	278				
18	18,3	6	208				
18	17,7	34	274				

* Rückstellprobe analysiert

11 Anhang Messbericht TÜV SÜD vom 19.2.2014