Fachhochschule Köln
Cologne University of Applied Sciences

Fakultät für Anlagen,
Energie- und Maschinensysteme

Institut für Landmaschinentechnik und Regenerative Energien
Labor für Bioenergie

Abschlussbericht

zum Projekt

Verbundprojekt: C4-Kompakt "Entwicklung einer optimierten Produktionskette für die Bereitstellung von Miscanthus-Mischpellets zur Nutzung in Biomassefeuerungsanlagen"
Teilprojekt 2
gefördert über die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR e.V.)

Antragstellung:
Universität Bonn
Forschungsbereich Nachwachsende Rohstoffe
Prof. Dr. Ralf Pude

Kooperationspartner:
Fachhochschule Köln
Institut für Landmaschinentechnik und Regenerative Energien
Prof. Dr. Christiane Rieker
Prof. Dr. Dagmar Gaese

Laufzeit des Projektes: **01.08.2010 – 31.01.2013**
(verlängert bis 31.10.2013)

Datum: 31.12.2013

Erarbeitet von Dipl.-Ing. Robert Steinbüchel
Endgültige Bearbeitung: Prof. Dr. Christiane Rieker

Kurzfassung

Der Bericht fasst die Ergebnisse des Teilprojekts 2 im Projekt C4-Kompakt zusammen. Die in den durchgeführten Versuchen gewonnenen Erkenntnisse in den Bereichen Zerkleinerung von Miscanthus, Mischen der Substrate Holz und Miscanthus mit Zugabe von Additiven, Pelletierung und die Verbrennung von Miscanthus-Mischpellets werden aufgeführt. Die Zielsetzung, ein Miscanthus-Mischpellet zu entwickeln, welches problemlos in Kleinfeuerungsanlagen verbrannt werden kann, wurde bedingt erreicht. Es werden aus den Ergebnissen resultierende Fragestellungen und weiterer Forschungsbedarf aufgeführt.

Inhalt

1 Einleitung 1
1.1 Zielsetzung 2
2 Grundlagen 4
2.1 Pelletierung 4
2.1.1 Zerkleinerung 4
2.1.2 Konditionierung 6
2.1.3 Pressung 6
2.1.4 Kühlung 8
2.2 Verbrennung biogener Festbrennstoffe 8
2.2.1 Emissionen 10
2.2.2 Anlagentechnik 13
2.3 Additive 14
2.4 Gesetzliche Vorschriften 16
3 Versuchsaufbau 19
3.1 Zerkleinerungsmechanismen 19
3.2 Konditionierung 24
3.3 Pelletierpressen 24
3.4 Verbrennungsanlagen 27
3.4.1 Twin-Heat (Versuchsaufbau 1) 27
3.4.2 HDG Compact 50 (Versuchsaufbau 2) 33
3.4.3 KÖB Vitoligno 300-P (Versuchsaufbau 3) 34
3.5 Messtechnik 35
4 Methodik 39
4.1 Zerkleinerung 39
4.2 Mischen 39
4.3 Pelletierung 40
4.4 Verbrennung 41
5 Versuchsdurchführung 42

5.1 Zerkleinerung 42
5.2 Pelletierung 45
5.3 Verbrennung 47
5.3.1 Versuchchsreihe 1 47
5.3.2 Versuchsreihe 2 51
5.3.3 Versuchsreihe 3 55
5.3.4 Versuchsreihe 4 59
5.3.5 Versuchsreihe 5 / Langzeitversuch 63
5.3.6 Versuchsreihe 6 68
6 Diskussion 69
6.1 Zerkleinerung 69
6.2 Mischen 69
6.3 Pelletierung 70
6.4 Verbrennung 70
7 Zusammenfassung 71
Quellenverzeichnis 73
Anhang 75
Anhang 1: FID – Technische Daten 75
Anhang 2: Spezifikationen zu Calciumhydroxid 77
Anhang 3: Spezifikationen zu Kaolin (Pharmaware) 78
Anhang 4: Spezifikation zu Kaolin M20 79
Anhang 5: Verbrennungsversuche – Versuchsreihe 1 80
Anhang 6: Verbrennungsversuche – Versuchsreihe 2 84
Anhang 7: Verbrennungsversuche – Versuchsreihe 3 87
Anhang 8: Verbrennungsversuche – Versuchsreihe 4 92
Anhang 9: Verbrennungsversuche – Versuchsreihe 5 95
Anhang 10: Prüfbericht – Dioxin- und Furanmessung
Anhang 11: Prüfbericht – Verbrennungsversuch bei Firma KÖB

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beanspruchungsarten nach Rumpf [19] 5
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Verbrennung am Beispiel Holz [13] 10
Abbildung 3: Emissionsgrenzwerte der TA-Luft 18
Abbildung 4: Schemazeichnung Zerfaserung [22] 19
Abbildung 5: Zerfaserungsanlage [20] 20
Abbildung 6: Kollergang [7] 21
Abbildung 7: Vergleich der Presskanalgeometrie der Kollermühle (links) und der Pelletpresse (rechts) [21] 21
Abbildung 8: Schemazeichnung der Kollermühle [25] 22
Abbildung 9: Messerkamm der Nachzerkleinungsanlage [20] 23
Abbildung 10: Pelletpresse Kahl 33-390 26
Abbildung 11: Schematische Darstellung der Verbrennungsanlage 27
Abbildung 12: Übersichtszeichnung TwinHeat M20i [10] 29
Abbildung 13: Position der Thermoelemente, Ansicht: Links [15] 31
Abbildung 14: Position der Thermoelemente, Ansicht: Draufsicht [15] 31
Abbildung 15: Methode zur Überwachung der Brennstoffzufuhr[13] 32
Abbildung 16: HDG Compact 50 33
Abbildung 17: HDG Compact 50 - Schnittansicht 33
Abbildung 18: KÖB Vitoligno 300-P 34
Abbildung 19: Schematische Darstellung der Messtechnik [17] 36
Abbildung 20: Partikelgrößenverteilung des zerkleinerten Materials, Anteile in Massenprozent [20] 42
Abbildung 21: Mikroskopische Aufnahmen des zerkleinerten Materials [20] 44
Abbildung 22: Mittelwerte der Ascheerweichungstemperaturen von verschiedenen Miscanthus-Paulownia- Gemischformen mit unterschiedlich hohen Kaolinzugabemengen in Relation zu dem Grenzwert von ENplusA2 Pellets. Signifikanz der Ascheerweichungstemperaturen geprüft mit Tukey-Test; a - c (p≤0,05), n=3 [21] 48
Abbildung 23:1. Versuchsreihe; Vergleich der Emissionsmessungen, Leistung und Wirkungsgrad; Minimal- und Maximalwerte punktförmig dargestellt; logarithmische Darstellung der Y-Achse; Grenzwerte der 1. BImSchV. 49
Abbildung 24: Schematische Darstellung des Ablaufs der Verschlackung vom Brennrohr [17] 50
Abbildung 25: 2. Versuchsreihe; Vergleich der Emissionsmessungen, Leistung und Wirkungsgrad; Minimal- und Maximalwerte punktförmig dargestellt; 52
Abbildung 29: Asche des ersten Versuchs, Versuchsreihe 2, [13] 54
Abbildung 29: Asche des zweiten Versuchs, Versuchsreihe 2, [13] 54
Abbildung 29: Rückstände im Wärmetauscher nach zweiten Versuch, Versuchsreihe 2, [13] 54
Abbildung 29: Asche des dritten Versuchs, Versuchsreihe 2, [13] 54

Abbildung 30: 3. Versuchsreihe; Vergleich der Emissionsmessungen, Leistung und Wirkungsgrad; Minimal- und Maximalwerte punktförmig dargestellt; logarithmische Darstellung der Y-Achse; Grenzwerte der 1. BImSchV. 56
Abbildung 31: Ascherückstand des fünften Versuchs, Versuchsreihe 3 57
Abbildung 32: 4. Versuchsreihe; Vergleich der Emissionsmessungen, Leistung und Wirkungsgrad; Minimal- und Maximalwerte punktförmig dargestellt; logarithmische Darstellung der Y-Achse; Grenzwerte der 1. BImSchV. 60
Abbildung 35: Schlacke, 3. Versuche, Versuchsreihe 4 61
Abbildung 35: Asche des dritten Versuchs, Versuchsreihe 4 61
Abbildung 35: Asche des ersten Versuchs, Versuchsreihe 4 61
Abbildung 36: 5. Versuchsreihe; Vergleich der Emissionsmessungen, Leistung und Wirkungsgrad; Minimal- und Maximalwerte punktförmig dargestellt; logarithmische Darstellung der Y-Achse; Grenzwerte der 1. BImSchV. 63
Abbildung 37: Betriebsstunden Anzeige, Langzeitversuch 67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schmelzpunkte ausgewählter Additive [14] 15
Tabelle 2. Spezifikationen von Holzpellets nach DIN EN 14961 – 2 [6] 16
Tabelle 3. Emissionsgrenzwerte der 1. BImSchV (Bezug 0_2 = 13%) [9] 17
Tabelle 4: Technische Daten der Zerfaserungsanlage [23] 20
Tabelle 5: Technische Daten der Kollermühle [4] 22
Tabelle 6: Technische Daten der Nachzerkleinerungsanlage (mütek Systemtechnik - Hartmut Müller GmbH, 2013) 23
Tabelle 7: Matrizen für Kahl Laborpresse 14-175 24
Tabelle 8: Parameter der Kahl Laborpresse 14-175 [5] 24
Tabelle 9: Technische Daten der Pelletierpresse Kahl 33-390 25
Tabelle 10: Matrizen für Pelletierpresse Kahl 33-390 25
Tabelle 11: Kennwerte vom TwinHeat M20i [10] 30
Tabelle 12: Kennwerte der Kampmann Tip 5000 Lufterhitzer 30
Tabelle 13: Eigenschaften der Thermoelemente 31
Tabelle 14: Ausgabewerte des Wöhler A97– Analysencomputer [11] 36
Tabelle 15: Materialkennwerte des zerkleinerten Materials 42
Tabelle 16: Untersuchte Mischungsverhältnisse in Vorversuchen 45
Tabelle 17: Zusammensetzung der Pelletmischungen, Versuchsreihe 1 46
Tabelle 18: Brennstoffzusammensetzungen, Versuchsreihe 1 47
Tabelle 19: Brennstoffkennwerte, Versuchsreihe 1 47
Tabelle 20: Kesseleinstellungen, Werkseinstellungen und manuell angepasste Parameter 50
Tabelle 21: Brennstoffzusammensetzung, Versuchsreihe 2 51
Tabelle 22: Brennstoffkennwerte, Versuchsreihe 2 51
Tabelle 23: Brennstoffzusammensetzung, Versuchsreihe 3 55
Tabelle 24: Brennstoffkennwerte, Versuchsreihe 3 55
Tabelle 25: Brennraumtemperatur, Mittelwerte Messpunkt 1, Grenzwert Messpunkt 2 57
Tabelle 26: Brennstoffzusammensetzung, Versuchsreihe 4 59
Tabelle 27: Brennstoffkennwerte, Versuchsreihe 4 59
Tabelle 28: Messwerte der Messreihe zur Ermittlung der Dioxin- und Furan-Emissionen, Typprüfung (1. BImSchV), nach § 26 durch zertifiziertes Messinstitut Fa. Eurofins 65

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung/Symbol	Bedeutung
$\dot{Q}_{ab}$	Nutzbare Wärmemenge
$\dot{Q}_{zu}$	Zugeführte Wärmemenge
1. BImSchV	Erste Verordnung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
Abs.	Absatz
AGT	Aschegehalt
$Al_2Si_2H_4O_9$	Kaolin
BAV	Bergischer Abfallverband
BImSchG	Bundes-Immersionsschutzgesetz
C_4H_{10}	Butan
C_6H_6	Benzol
$Ca(OH)_2$	Calciumhydroxid
$CaCO_3$	Calciumcarbonat
CH_4	Methan
Cl	Chlor
C_nH_m	Kohlenwasserstoffe
CO	Kohlenmonoxid
CO_2	Kohlendioxid
DK	Dänemark
FID	Flammenisonisationsdetektor
Ges.-C.	Unverbrannter Kohlenstoff im Abgas
H	Wasserstoff
H_2O	Wasser
H_2SO_3	Schwefelige Säure
H_2SO_4	Schwefelsäure
HCl	Chlorwasserstoff
H_U	Heizwert

$H_{U(w)}$	Heizwert vom Substrat mit spezifischen Wassergehalt
$H_{U(wf)}$	Heizwert vom wasserfreien Substrat
m_{ab}	Abgeführte Masse
m_B	Masse trockener Biomasse
m_W	Masse Wasser
m_{zu}	Zugeführte Masse
n	Wiederholungen
N_2	Stickstoff
NO_X	Stickoxide (Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid)
NZA	Nachzerkleinerungsanlage
O_2	Sauerstoff
org. C	Organischer Kohlenstoff (unverbrannt im Abgas)
PCDD	Dibenzodioxine
PCDF	Dibenzofurane
PM10	Feinstaub
q_{chem}	Chemische Verluste
q_{therm}	Thermische Verluste
SO_2	Schwefeloxid
$V_{Luft,ges}$	Luftvolumen welches der Verbrennung tatsächlich zugeführt wird
$V_{Luft,min}$	Luftvolumen, welches für eine stöchiometrische Verbrennung erforderlich ist
w	Wassergehalt
η_f	Feuerungstechnischer Wirkungsgrad
η_K	Kesselwirkungsgrad
λ	Lambda – Luftüberschusszahl

Einheit	**Bedeutung**

1/min	Umdrehung pro Minute
ha	Hektar
kg/h	Kilogramm pro Stunde
% (w/w)	Massenprozent
m/s	Meter pro Sekunde
MJ	Megajoule
Nm^3	Normkubikmeter
s	Sekunden
Vol-%	Volumenprozent

1 Einleitung[1]

Aufgrund der steigenden Nachfrage nach Holzpellets und gleichzeitig wachsender Nachfrage von Holz als Brennstoff ist es von besonderem Interesse, Substitute für Holz in der Pelletproduktion zu finden.

In Deutschland konnte in den letzten 10 Jahren der Anbau von Miscanthus als schnell nachwachsender Rohstoff fest etabliert werden. Derzeit werden in Deutschland ca. 3.500 ha Miscanthus angebaut (PUDE, 2012), wobei der größte Teil dieses Rohstoffes thermoenergetisch verwertet wird. Aufgrund der hohen Ertragsleistung von Miscanthus, bei gleichzeitig minimalem Einsatz von Produktionsmitteln wie Düngung und Pflanzenschutz, bietet es sich an, Miscanthus als Substitut für Holz in der Pelletherstellung zu untersuchen.

In Hinblick auf die Brennstoffeigenschaften von Miscanthus, wie z.B. der relativ hohe Aschegehalt oder der niedrige Ascheschmelzpunkt, kann bei der Produktion von Qualitätspellets Miscanthus nicht zu 100% Holz substituieren. Aus diesem Grund kann Miscanthus nur in Form von Mischpellets kompaktiert werden, sofern Qualitätspellets für den Markt von Kleinfeuerungsanlagen produziert werden sollen. Diese neuen Pellets könnten eine Möglichkeit darstellen, um die Produktpalette an Qualitätspellets zu erweitern.

Im Jahr 2011 wurde die neue Pelletnorm **EN 14961-2** für den europäischen Pelletmarkt eingeführt. Diese Norm ist im Raum der Europäischen Union eine unverbindliche Vorgabe, die Qualitätsanforderungen an Pellets für verschiedene Feuerungsanlagen festlegt. Zuvor hatten nur wenige EU-Länder eigene nationale Normen, wie z.B. der **DIN 51731** oder der **ÖNORM M 7135**.

Das problematische an der Brennstoffnorm EN 14961-2 ist, dass diese Norm keinen rechtlich bindenden Charakter hat. Derzeit dient diese Norm nur als Vorlage für die EN plus-Pelletzertifizierung, wobei im Jahr 2011 in der EU bereits zwei Millionen Tonnen nach Maßgaben der neuen EN-Norm produziert wurden (ZENG 2012).

Rechtlich bindend ist in Deutschland hingegen nur die DIN Norm 51 731, da die 1. BundesImmissionsSchutzVerordnung (1. BImSchV.) vorschreibt, dass nur Holzpellets, konform zu der DIN 51 731, in Kleinfeuerungsanlagen verbrannt werden dürfen.

Im Gegensatz zu den bisher geltenden nationalen Normen sieht die neue Europäische Pelletnorm drei verschiedene Qualitätsstufen vor (siehe Tabelle 2).

Neben der B Norm für Großfeuerungsanlagen wurden zwei Qualitätsstufen für Kleinfeuerungsanlagen impliziert. Darunter ist die ENplus A2 Norm, die es ermöglicht, „qualitativ schlechtere“ Rohstoffe wie Rindenholz mit höheren Aschegehalten der Pelletproduktion zu zuführen. Diese Norm sieht jedoch

[1] Gemeinsam mit Teilprojekt 1

neben Additiven aus landwirtschaftlichen Nebenprodukten, die nur zu max. 2% (w/w) der gesamten Pelletmasse zugefügt werden dürfen, lediglich chemisch unbehandeltes Holz als Rohstoff vor.

Daraus ergibt sich, dass Miscanthus bisher nicht als Rohstoff für Pellets, die in Kleinfeuerungsanlagen verbrannt werden dürfen, zugelassen ist. Wenn es aber gelingen würde, Miscanthus-Mischpellets zu produzieren, die den chemischen und physikalischen Anforderungen der Pelletnorm EN 14961-2 entsprechen, könnte dieser Norm der Rohstoff Miscanthus beigefügt werden.

1.1 Zielsetzung

Unter Berücksichtigung des Gesamtziels einer optimierten Produktionskette für die Produktion „normgerechter" Miscanthus-Mischpellets sind die zunächst angestrebten Ziele wie folgt:

Herstellung von Pellets, welche in physikalischen und chemischen Eigenschaften den Anforderungen der Norm DIN EN 14961-2, Kategorie A2 gerecht werden (vgl. Kap. 2.4).

Produktion von Pellets mit einem möglichst hohen Miscanthusanteil, dessen Hauptzuschlagsstoffe vorzugsweise aus Plantagenholz von Kurzumtriebsplantagen bestehen sollen.

Verbrennungsversuche zur Identifizierung der mit der Verbrennung der Mischpellets entstehenden Emissionen sowie der Verschlackungsneigung.

Für die Pelletherstellung sind die wesentlichen Optimierungsziele:

- Optimales Stoffgemisch:

  Das Stoffgemisch soll dahingehend optimiert werden, dass bei möglichst geringem Energieaufwand Pellets mit bestmöglichen Eigenschaften erzeugt werden. Mögliche Additive sollen im ersten Schritt die physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Pellets verbessern.

- Optimale Pelletierung:

  Die Pelletierung soll mit möglichst geringem technischem und energetischem Aufwand qualitativ homogene Pellets erzeugen, welche den normgemäßen Anforderungen gerecht werden.

Nachdem die physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Miscanthus-Mischpellets unter Berücksichtigung der Optimierung der gesamten Produktionskette in der ersten Projektphase reproduzierbar definiert bzw. ermittelt wurden, werden in den Verbrennungsversuchen die Eigenschaften hinsichtlich der Emissionen (CO, NO_X, Staub) und den brennstoffspezifischen Einflussgrößen, insbesondere dem Ascheschmelzverhalten, untersucht. Dabei geht die Ermittlung der brennstoffspezifischen Kessel-Parameter und die optimale Brennstoffmischung (hier auch: Additive), den Versuchsreihen zur Erfassung der Emissionswerte vor. Die Entstehung von Schlacke im Kessel- bzw. Brennraum gilt es zu vermeiden. Das Vorhaben, einen normgerechten, sicheren

und marktreifen Brennstoff (Misch-Pellet) aus Miscanthus zu erzeugen, ist das maßgebende Ziel.

Um den notwendigen Anteil an Additiven zur Optimierung des Ascheschmelzverhaltens zu ermitteln, wird der Additivanteil in den Pellets soweit erhöht, dass während der Verbrennung keine Schlacke mehr entsteht. Die zunächst resultierende Brennstoffmischung ist durch einen relativ hohen Additivanteil und ein schlackefreies Verbrennungsverhalten gekennzeichnet. Der daraus resultierende Anstieg des Aschegehalts wird billigend in Kauf genommen als unausweichlicher Kompromiss zwischen Normbrennstoff und einem praxistauglichen Miscanthus-Mischpellet. Im Anschluss wird die Additivzugabe soweit wie möglich reduziert und die Kesseleinstellungen werden optimiert. Ziel ist eine schlackefreie Verbrennung mit maximalem Wirkungsgrad bei minimaler Additivbeigabe.

2 Grundlagen

2.1 Pelletierung

Die Pelletierung ist in der Regel in folgende Prozessschritte unterteilt: Zerkleinerung, Konditionierung, Pressung und Kühlung.

2.1.1 Zerkleinerung

Zerkleinern bezeichnet allgemein die Verringerung der Partikelgröße fester Stoffe mit der Absicht, die Eigenschaften des Materials für die folgende Weiterverarbeitung oder Anwendung in gewünschter Weise zu verändern. Weltweit werden etwa 4 % der erzeugten elektrischen Energie für Zerkleinerungsprozesse aufgewendet, wodurch die besondere volkswirtschaftliche Bedeutung deutlich wird. Die einschlägige Literatur unterscheidet die Zerkleinerungsprozesse im Hinblick auf ihr Prozessziel. Diese werden in der folgenden Übersicht dargestellt (Spieß, 1997):

- Das Anstreben bestimmter Korngrößen- oder Kornformverteilungen
- Die Erhöhung der Dichte
- Die Vergrößerung der spezifischen Oberfläche
- Dem Aufschließen heterogener Stoffe eines Haufwerkes
- Strukturänderungen und chemische Reaktion

Beanspruchungsarten

Die nach Rumpf (Rumpf, Hans zitiert in Mechanische Verfahrenstechnik 2, 1997) begründete Systematik unterscheidet zwischen vier verschiedenen Beanspruchungsarten die nachfolgend kurz beschrieben und in Abbildung 1 dargestellt werden:

I. Beanspruchung zwischen mindestens zwei Zerkleinerungswerkzeugen

   Hierbei werden die Partikel zwischen mindestens zwei Werkzeugen einer reinen Druckbelastung oder einer kombinierten Druck-Schub-Belastung ausgesetzt. Bei der Gutbett-Beanspruchung wirkt die Belastung sowohl durch Nachbarpartikel, als auch durch Wand und Werkzeug. Weiterhin sind die Schneid-, Schlag- und Scherbeanspruchung hier einzuordnen.

II. Beanspruchung an einem Zerkleinerungswerkzeug

   Die Zerkleinerungsleistung wird entweder durch Stoß des Partikels gegen eine feste Wand oder gegen ein rotierendes Werkzeug erreicht. Dritte Variante ist der gegenseitige Partikelstoß. Kennzeichnend ist, dass die Beanspruchungsgeschwindigkeiten bei Grobzerkleinerung über 20 m/s, bei Feinzerkleinerung über 200 m/s liegen.

III. Beanspruchung durch das umgebende Medium

Das Partikel wird hierbei unsymmetrischen Druck- und Zugbelastungen ausgesetzt wie sie in turbulenten Scherströmungen auftreten. Eine weitere Belastung können Druckwellen infolge von Druckstößen oder Kavitation sein.

IV. Beanspruchung durch nichtmechanische Energiezufuhr

Bei dieser Variante müssen hohe innere Spannungen hervorgerufen werden, die durch Verformung erzeugt werden. Dies kann beispielsweise durch Zufuhr oder Induzierung thermischer Energie, aber auch durch Sprengung mittels chemischer Sprengstoffe erfolgen.

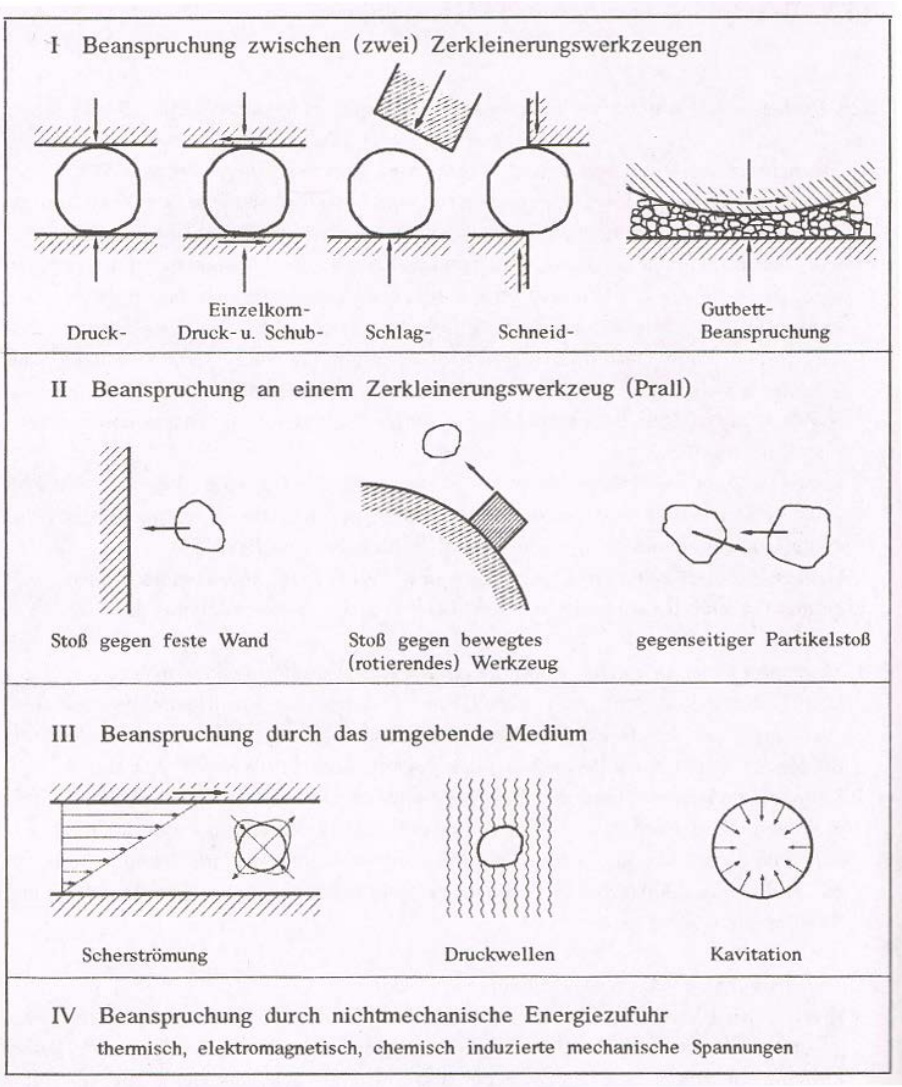


Abbildung 1: Beanspruchungsarten nach Rumpf [19]

2.1.2 Konditionierung

Bei der Konditionierung handelt es sich um die Aufbereitung von Pressgut. Die Oberfläche der Fasern wird mit Feuchtigkeit versehen, so steigert sich die Gleitfähigkeit im Presskanal der Matrize während der Pressung. Weiterhin kann bei der Konditionierung der Wassergehalt des Pressguts auf den Sollwert justiert werden. Da diese Befeuchtung meistens mit Wasserdampf durchgeführt wird, beeinflussen die drei Parameter Dampffeuchte, Dampftemperatur und Einwirkzeit demnach die Konditionierung. Die Konditionierung beeinflusst den Verdichtungsvorgang und somit die Pelletqualität entscheidend, so dass die richtige Parameterwahl von großer Wichtigkeit ist. Bei zu niedrigem Wassergehalt steigt der Widerstand und somit die Kräfte innerhalb der Matrize. Die Folge ist ein Verstopfen der Matrize und daraus folgt ein Abbruch des Pressvorgangs. Zu hohe Feuchtigkeitskonzentrationen wirken sich negativ auf die Festigkeit der Pellets aus, welche dann aufquellen und eine geringe Festigkeit aufweisen.

Prinzipiell unterscheidet man zwischen zwei Methoden, der Langzeit- und der Kurzzeitkonditionierung.

- **Langzeitkonditionierung**

  Bei der Langzeitkonditionierung verweilt das Pressgut mindestens zehn Minuten im Konditioneur, wobei es intensiv durchmischt wird. Bei dieser Methode dringt die Flüssigkeit bzw. der Dampf bis ins Innere des Pressguts vor. Gewöhnlich wird das Pressgut nach der Langzeitkonditionierung nochmals unmittelbar vor dem Pressvorgang durch die übliche Kurzzeitkonditionierung befeuchtet. [4]

- **Kurzzeitkonditionierung**

  Die Kurzzeitkonditionierung findet unmittelbar vor der Verdichtung des Pressguts statt. Das Material wird in der Förderschnecke konditioniert, welche das Pressgut in die Presse befördert. Der Vorgang dauert weniger als eine Minute. Die Oberfläche des zu verdichtenden Materials wird unter Zugabe von Dampf oder Flüssigkeit befeuchtet. [4]

2.1.3 Pressung

Die Pressung ist der Hauptverarbeitungsschritt der Pelletierung. Bei diesem Vorgang wird das vorbehandelte Pressgut zu Pellets gepresst, somit bildet die Presse das Kernstück einer Pelletieranlage.

Bei den hier angewendeten Pressen handelt es sich um Kollergangpressen. Es gibt derzeit zwei unterschiedliche Pressenbauarten, Pressen mit horizontal angeordneter Scheibenmatrize und Pressen mit vertikal angeordneter Ringmatrize. Beide Pressentypen bestehen im Wesentlichen aus Antriebsmotor, Matrize und Kollern. Die Anzahl der Koller variiert je nach Größe der Pressen zwischen zwei und fünf Kollern.

In beiden Fällen verteilt sich das Pressgut gleichmäßig auf der Matrize und wird durch den steigenden Druck, welcher beim Überrollen der Koller entsteht, in den Presskanal geschoben. Der Temperaturanstieg, den das Material unter dem hohen Druck und durch die Reibung im Presskanal erfährt, lässt Wasser und Lignin aus den Zellen treten. Der Flüssigkeitsverlust beträgt dabei lediglich etwa ein bis zwei Prozentpunkte des Wassergehalts. Die für den Prozess wichtigen Komponenten sind Stärke und Lignin, beide sind verantwortlich für die Verbindung zwischen den Fasern. Lignin wirkt wie ein Klebstoff, welcher die Fasern unter dem gegebenen Druck miteinander verklebt. Der Erweichungspunkt von Lignin ist vom Wassergehalt des Rohstoffs abhängig: mit steigendem Wassergehalt sinkt der Erweichungspunkt. Bei einem Wassergehalt von 30 % (w/w) liegt der Erweichungspunkt bei 80 bis 90 °C für trockenes Holz [2]. Am Ende des Presskanals entsteht so ein Materialstrang, der durch Messer auf die gewünschte Länge geschnitten wird oder von selbst abbricht. Koller und Matrize haben die größte Beanspruchung und sind somit Verschleißteile. Generell haben die Koller eine höhere Festigkeit als die Matrize, sodass lediglich diese verschleißt und ausgetauscht wird.

Die richtige Einstellung der Pressen ist, neben der Konditionierung, entscheidend für die Pelletqualität. Die Matrize ist auf das Pressgut abzustimmen, da jedes Material unterschiedliche eigene Bindekräfte besitzt. Die Matrizen unterscheiden sich in Lochdurchmesser, Matrizenstärke, Presskanallänge und Lochanzahl. Das Verhältnis zwischen Lochdurchmesser und Presskanallänge wird als Pressverhältnis bezeichnet. Je kleiner der Lochdurchmesser ist, desto größer ist die benötigte Kraft beim Pressvorgang. Ähnliches gilt für die Presskanallänge, je länger der Presskanal ist, desto größer sind die Kräfte. Mit steigenden Kräften steigt der Verdichtungsgrad und somit die Pellethärte, aber auch die Beanspruchung der Matrize, woraus eine Begrenzung für die Lochanzahl resultiert. Generell wird die größtmögliche Lochanzahl angestrebt, um eine möglichst große offene Lochfläche zu erreichen und somit den Durchsatz zu steigern. Neben der Matrize, welche durch das Pressverhältnis Einfluss auf die Pellethärte und mit der Lochanzahl Einfluss auf den Durchsatz hat, beeinflussen der Arbeitsspalt zwischen Koller und Matrize und die Materialbeschickung die Pelletqualität. Die Materialbeschickung muss kontinuierlich erfolgen und die Menge muss ausreichen, um die Durchsatzfähigkeit der Matrize voll auszulasten. Nur so kann in jedem Presskanal der benötigte Druck aufgebaut werden. Der Arbeitsspalt zwischen Koller und Matrize soll so gering wie möglich sein. Allerdings wirkt sich ein zu geringer Arbeitsspalt negativ auf den Materialabrieb von Koller und Matrize aus. Bei modernen Pressen lässt sich der Arbeitsspalt hydraulisch einstellen und kann somit während des Betriebs an die Gegebenheiten angepasst werden. [1][2][3]

2.1.4 Kühlung

Die frisch gepressten Pellets können durch die Reibungswärme im Presskanal Temperaturen über 80 °C aufweisen [2] und sind dadurch relativ brüchig. Die Kühlung am Ende der Pelletierung sichert daher die Formbeständigkeit der Pellets. Weiterhin wird der Wassergehalt reduziert.

Die produzierten Pellets werden im Anschluss von Staub befreit, der dem Produktionsprozess wieder zugeführt wird. So erzielt man ein Endprodukt mit sehr geringen Feinanteilen, welche ansonsten zu größeren Staubemissionen bei der Verbrennung führen würden.

Durch die Pelletierung wird eine Homogenisierung der physikalisch-mechanischen Eigenschaften des Brennmaterials erreicht. Die Mindestanforderungen dieser Eigenschaften werden in Deutschland durch die DIN EN 14961-2 gesichert.

Vorteile der Pelletierung:

- hohe volumetrische Energiedichte
- gute Fließ- und Dosiereigenschaften
- Feuchtereduktion durch den Verdichtungsvorgang
- hohe Lagerbeständigkeit (kein biologischer Abbau)

Nachteil der Pelletierung:

- Energieaufwand, liegt bei ca. 4 bis 6 % (w/w) der Brennstoffenergie von Buchenholz ($H_{U(wf)}$ = 18,4 MJ/kg) [1]

2.2 Verbrennung biogener Festbrennstoffe

Die Verbrennung biogener Festbrennstoffe ist ein thermo-chemischer Umwandlungsprozess. Am Ende dieses Prozesses entstehen nutzbare Wärmeenergie sowie gasförmige Produkte (Abgase) und nicht verbrennbare Rückstände (Asche).

Wichtige Faktoren für eine kontrollierte Verbrennung sind der Wassergehalt, der Heizwert und die Luftüberschusszahl. Diese Faktoren üben einen direkten Einfluss auf die Verbrennungstemperatur aus und sind wie folgt definiert.

Der **Wassergehalt (w)** beschreibt das in der feuchten Biomasse vorhandene Wasser. Errechnet wird der Wassergehalt nach Gleichung 1. Hierbei ergibt sich die feuchte Biomasse aus der Summe der trockenen Biomasse (m_B) und der Masse des enthaltenen Wassers (m_W).

$$w = \frac{m_W}{(m_B + m_W)} \ [\%] \qquad \text{Gl. 1}$$

Die benötigte Verdampfungsenthalpie stellt einen Energieverlust dar. Ein zu hoher Wassergehalt führt zu niedrigen Verbrennungstemperaturen und zur Erhöhung des Abgasvolumens. Dadurch wird die Verweilzeit im Brennraum verkürzt und eine Durchmischung mit der Sekundärluft erschwert.

Der **Heizwert (H_U)** gibt die Energiemenge an, die durch eine vollständige Oxidation freigesetzt wird, abzüglich der Verdampfungsenthalpie. Somit wird bei der Berechnung vom Heizwert vorausgesetzt, dass die im Wasserdampf abgeführte Wärme, auch als Latentwärme bezeichnet, nicht wieder verfügbar gemacht wird.

Die Latentwärme des Wassers bezogen auf 25 °C beträgt 2,443 Megajoule pro Kilogramm. Generelle Angaben zum Heizwert für eine Brennstoffart, beziehen sich auf die wasserfreie Masse und sind mit dem Index (wf) versehen. Die Umrechnung des $H_{U(wf)}$ auf einen Heizwert, bezogen auf einen bestimmten Wassergehalt ($H_{U(w)}$), erfolgt nach Gleichung 2.

$$H_{U(w)} = \frac{H_{U(wf)} * (100 - w) - 2{,}44 * w}{100} \left[\frac{MJ}{kg}\right] \quad \text{Gl. 2}$$

Die **Luftüberschusszahl (λ)** beschreibt den Grad des Luftüberschusses der Verbrennung und wird nach Gleichung 3 definiert. Hierbei ist $V_{Luft,ges}$ die insgesamt zugeführte Luftmenge und $V_{Luft,min}$ die für die vollständige Oxidation stöchiometrisch minimal erforderliche Luftmenge.

$$\lambda = \frac{V_{Luft,ges}}{V_{Luft,min}} \quad \text{Gl. 3}$$

Eine vollständige Oxidation ist theoretisch nur dann möglich, wenn der Verbrennung ausreichend Sauerstoff zur Verfügung steht. Jeder Brennstoff benötigt aufgrund seiner stofflichen Zusammensetzung eine spezifische minimal erforderliche Luftmenge für eine vollständige Oxidation. Findet die Verbrennung unter Sauerstoffmangel statt, kommt es zu einer unvollständigen Oxidation, wodurch Emissionen von unverbrannten Brennstoffteilen und radikalen Gasen (Zwischenprodukte der Oxidation) über das Abgas frei werden. Das wirkt sich negativ auf die Umwelt und auf die Effizienz der Verbrennung aus. In der Praxis findet bei Luftüberschuss keine vollständige Oxidation statt, da eine optimale Vermischung von Brennstoff und Sauerstoff nicht möglich ist. Der Luftüberschuss führt zusätzlich zu einer Absenkung der Verbrennungstemperatur und erhöht die über das Abgas abgeführte Energie, was sich ebenfalls negativ auf den Wirkungsgrad auswirkt.

Der Wirkungsgrad der Verbrennung wird als **feuerungstechnischer Wirkungsgrad (η_f)** bezeichnet. Dieser bezieht sich auf die thermischen und die chemischen Abgasverluste und berechnet sich nach Gleichung 4. Die thermischen Verluste (q_{therm}) lassen sich durch die Abgastemperatur ermitteln, die chemischen Verluste (q_{chem}) sind durch die Konzentrationen von CO, O_2 und CO_2, sowie eventuell weiterer unverbrannter Abgaskomponenten zu ermitteln [7].

$$\eta_f = 1 - q_{therm} - q_{chem} \quad \text{Gl. 4}$$

Als **Kesselwirkungsgrad (η_K)** wird das Verhältnis zwischen der nutzbaren Wärmeenergie ($\dot{Q}_{ab}$), welche an das Wärmeträgermedium abgegeben wird, und der zugeführten Wärmeenergie ($\dot{Q}_{zu}$), die im Brennstoff enthalten ist, bezeichnet (siehe Gleichung 5).

$$\eta_k = \frac{\dot{Q}_{ab}}{\dot{Q}_{zu}} \qquad \text{Gl. 5}$$

Der Kesselwirkungsgrad ist grundsätzlich auf die Nennleistung des Kessels bezogen und wird somit im Beharrungszustand bei Dauerbetrieb der Feuerung bestimmt. Er berücksichtigt neben den Abgasverlusten zusätzlich die Strahlungsverluste, die als fühlbare Wärme an den Heizraum abgegeben werden, sowie Rostverluste, die durch unverbrannte Rückstände in der Asche entstehen. Somit ist der feuerungstechnischer Wirkungsgrad im Kesselwirkungsgrad mit einbezogen. [13]

2.2.1 Emissionen

Bei der Verbrennung biogener Festbrennstoffe entstehen thermische Energie und Emissionen in Form von Asche und Abgas als Endprodukte. Entscheidend für die Zusammensetzung der Emissionen sind der Ablauf der Verbrennung und die Brennstoffzusammensetzung (siehe *Abbildung 2*).

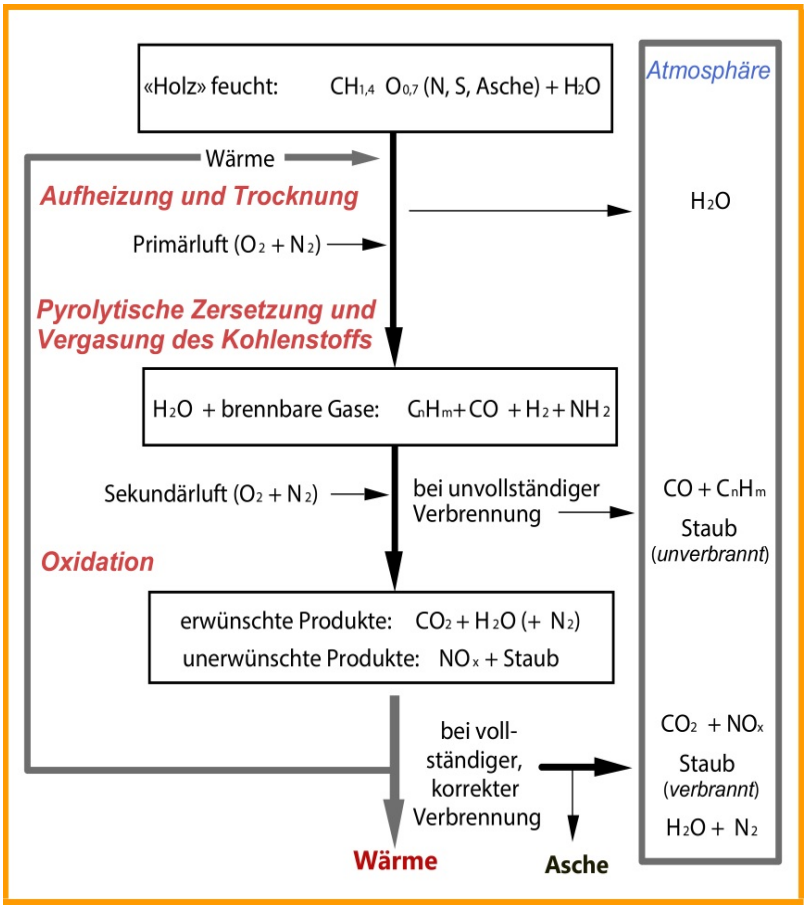


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Verbrennung am Beispiel Holz [13]

- **Asche**

Die Asche bilden nicht brennbare mineralische Rückstände der Biomasse, vorwiegend Kalzium, Magnesium, Kalium, Phosphor und Natrium. Auch Spurenelemente wie Arsen, Cadmium, Chrom, Kupfer, Quecksilber, Blei und Zink finden sich vor allem in der Asche wieder, sowie 40 bis 90 % des ursprünglichen Schwefelgehalts und 40 bis 95 % des ursprünglichen Chlorgehalts.

Jeder Brennstoff hat einen spezifischen **Aschegehalt (AGT)**, der eine Abschätzung über die anfallende Menge der Asche zulässt und nach Gleichung 6 berechnet wird. Dabei sind m_{zu} die Brennstoffmasse, welche der Verbrennung zugeführt wird und m_{ab} die Aschemasse nach vollständiger Verbrennung.

$$\boldsymbol{AGT = \frac{(m_{zu} - m_{ab})}{m_{zu}} * 100\,[m - \%]} \qquad \text{Gl. 6}$$

Bei vollständiger Oxidation kann die Asche als Dünger verwertet werden, sofern die Belastung durch Spurenelemente, vor allem durch Schwermetalle, nicht zu hoch ist. Bei unvollständiger Oxidation oder beim Auftreten von Schlacke entfällt eine Weiterverwertung, stattdessen ist eine sachgerechte Entsorgung notwendig.

In Folge der bei der Verbrennung stattfindenden hohen Temperaturen kann die Asche schmelzen. Dieses Phänomen muss bei der Auslegung der Verbrennungsanlage betrachtet werden. Der Erweichungspunkt der Asche ist abhängig von der Brennstoffzusammensetzung, bei Holz liegt er zwischen 1300 und 1400 °C, bei den meisten halmgutartigen Brennstoffen liegt dieser Punkt bei etwa 1000 °C und bei Körnern bei etwa 700 °C. Einfluss auf den Erweichungspunkt hat der Gehalt an Kalium, Kalzium und Magnesium; der Kalziumgehalt erhöht den Erweichungspunkt während der Kalium- und Magnesiumgehalt ihn senken. Eine Erhöhung des Erweichungspunktes ist durch Verwendung von Zuschlagstoffen wie Kaolin oder Branntkalk möglich. Sobald der Erweichungspunkt bei der Verbrennung erreicht wird, beginnt die Asche zu schmelzen und es kommt zu Versinterungen. Wird der Fließpunkt überschritten, bildet sich Schlacke. [7].

- **Abgas**

Das Abgas setzt sich aus luftgetragenen Verbrennungsprodukten zusammen. Die Konzentrationen dieser Verbrennungsprodukte im Abgas variiert, je nachdem wie vollständig die Oxidation stattfindet. Generell befinden sich im Abgas Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Stickstoff, Stickoxide, Schwefeloxid, Chlorwasserstoff, Wasserdampf und Staub. Unerwünschte Abgaskomponenten müssen mittels Filtern entfernt werden, dabei benötigen die jeweiligen Komponenten spezielle Filterverfahren.

Sauerstoff (O_2): Der durch Luftüberschuss auftretende Sauerstoff ist ein Maß für den Wirkungsgrad der Verbrennung; je höher die Konzentration ist, desto

niedriger ist der Wirkungsgrad. Weiterhin dient der O_2 - Gehalt als Berechnungsgröße für die Verbrennungsparameter.

Kohlendioxid (CO_2): Dieses Gas ist ein Resultat der vollständigen Oxidation, was bedeutet, dass es an der Luft keine weiteren Reaktionen hervorruft. Generell tragen die Filtereigenschaften von CO_2 zum Treibhauseffekt bei, Konzentrationen über 15 Vol-% führen beim Menschen zur Bewusstlosigkeit [8].

Kohlenmonoxid (CO): Kohlenmonoxid entsteht bei einer unvollständigen Oxidation und wird daher auch als Indikator für die Güte der Verbrennung genutzt. Je höher die CO – Konzentration ist, desto schlechter ist die Verbrennung. CO ist ein Zwischenprodukt und somit reaktiv. An der Luft reagiert es mit O_2 zu CO_2. Konzentrationen von 700 ppm sind für Menschen innerhalb weniger Stunden tödlich [8].

Kohlenwasserstoffe (C_nH_m): Die Kohlenwasserstoffe gelangen durch unvollständige Oxidation ins Abgas. Es sind brennbare Endprodukte, die sich in der Atmosphäre anreichern. Sie bilden ein hohes Umwelt- und Gesundheitsrisiko. Beispiele für Kohlenwasserstoffe sind Methan (CH_4), Butan (C_4H_{10}) und Benzol (C_6H_6).

Stickstoff (N_2): Dieses Gas wird über die Brennluft zugeführt und stellt einen Verlustwärmeträger dar. Teile des in der Verbrennungsluft enthaltenen N_2 reagieren allerdings zu Stickstoffoxiden bei Temperaturen > 1300°C.

Stickstoffoxide (NO_x): Die Gruppe der Stickstoffoxide wird aus Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2) gebildet. Diese Gase entstehen hauptsächlich durch den im Brennstoff enthaltenen Stickstoffgehalt (N) sowie bei hohen Temperaturen aus dem Luftstickstoff. In Kombination mit dem O_2 aus der Verbrennungsluft reagiert N vorerst zu NO, dieses Zwischenprodukt oxidiert meist schon im Abgaskanal, spätestens in der Atmosphäre, zu NO_2. Beide Stickstoffoxide sind giftig, NO_2 trägt unter Sonnenstrahlung zur Ozonbildung bei.

Schwefeloxid (SO_2): Dieses Gas entsteht durch den im Brennstoff gebundenen Schwefelgehalt (S), welcher sich nicht in die Asche einbindet. Bei SO_2 handelt es sich um ein giftiges Gas, welches in Verbindung mit Wasser bzw. im Kondensat zu schwefliger Säure (H_2SO_3) und Schwefelsäure (H_2SO_4) reagiert.

Chlorwasserstoff (HCl)/Dioxin: HCl bildet sich durch den Chlorgehalt (Cl) im Brennstoff, welcher nicht in der Asche gebunden wird, und dem bei der Verbrennung vorhandenen Wasserstoff. Dieses Gas ist in Verbindung mit Feuchtigkeit hoch korrosiv. Im Zusammenhang mit einer unvollständigen Verbrennung können aus Chlor in Anwesenheit von Sauerstoff und Metalle, insbesondere Kupfer, hochgiftige Dioxine entstehen.

Als Dioxine bezeichnet man im allgemeinen Sprachgebrauch eine Gruppe von chlorierten organischen Verbindungen, deren Grundstruktur aus zweien über zwei Sauerstoffatome verbundene Benzolringen besteht. Dioxine gehören zu den langlebigen organischen Schadstoffen. Sie reichern sich in der Umwelt insbesondere in Böden an. Dioxine und Furane entstehen als Nebenprodukte

bei einer Vielzahl von thermischen Prozessen. Es gibt keinerlei technische Verwendung von Dioxinen. Allgemein bezeichnet der Begriff Dioxine die Gruppe der polychlorierten Dibenzodioxine (PCDD), zu denen häufig auch noch die polychlorierten Dibenzofurane (PCDF) gezählt werden.

Die PCDD bestehen in ihrer Grundstruktur aus zweien über zwei Sauerstoffatome verbundene Benzolringe und sind damit chemisch gesehen Ether, wohingegen die Dibenzofurane nur ein Sauerstoffatom enthalten und somit – rein chemisch betrachtet – keinen Dioxin-Ring besitzen. Bei der Verbrennung von organischen (kohlenstoffhaltigen) Verbindungen in Gegenwart von organischen oder anorganischen Halogen-Verbindungen (speziell Chlor oder Brom) können sie sich in einem bestimmten Temperaturbereich (Dioxin- Fenster: ca. 300–600 °C) bilden. Dioxine sind unterschiedlich giftig. Ihre Giftigkeit hängt von der Anzahl und der Stellung der Chloratome ab. Ob Dioxine beim Menschen Krebs auslösen können, ist nicht abschließend erforscht. Zwar gibt es hierfür Hinweise aus verschiedenen Studien mit exponierten Arbeitern, aber für eine statistisch abgesicherte Aussage sind die Fallzahlen der einzelnen Studien zu klein. Bei Ratten lösen einige Dioxine Krebs aus.

Wasserdampf (H_2O): Der im Brennstoff enthaltene Wasserstoffgehalt (H) reagiert mit O_2 zu H_2O. Das so entstandene Wasser wird mit dem Wasser aus Brennstoff und Verbrennungsluft als Wasserdampf ausgetragen. Die darin enthaltene Energie geht ohne Abgaskondensation als Verlustwärme verloren.

Staub: Es gibt zwei unterschiedliche Formen von Staub im Abgas. Staub aus einer unvollständigen Oxidation und Staub aus einer vollständigen Oxidation. Ersterer ist wesentlich umweltschädlicher und wird als Ruß bezeichnet. Hierbei handelt es sich um fast reinen elementaren Kohlenstoff (C). Staub aus einer vollständigen Oxidation besteht aus luftgetragenen Aschepartikeln, hierbei kann der Staub sämtliche in der Asche enthaltenen Stoffe beinhalten. Die gesundheitsschädliche Wirkung von Staub und Ruß liegt an der Anlagerung giftiger Stoffe an den Partikeln [7][8].

2.2.2 Anlagentechnik

Der derzeitige Stand der Anlagentechnik bietet den höchsten Standard, den es jemals in der Geschichte der Biomasse-Verbrennung gab. Die Anlagen zeichnen sich durch sehr hohe Kesselwirkungsgrade und sehr geringe Emissionswerte aus. Der grundlegende Aufbau setzt sich aus Feuerraum, Brennstoffzufuhr und Brennstoffverteilung, Brennluftzufuhr, Wärmeübertragung und Emissionsabführung zusammen. Bei der Wärmeübertragung wird bei Kesseln die thermische Energie über einen Wärmetauscher an einen Wasserkreislauf übertragen. Hier besteht der Unterschied zu Öfen, welche die Wärme über Konvektion in den Raum strahlen. Diese Konvektionswärme gilt es bei Kesseln so gering wie möglich zu halten, da es sich um Verluste handelt. Die heutigen Kessel verfügen über einen Volllast- und einen Teillastbetrieb. So kann die

Wärme bedarfsgerecht verfügbar gemacht werden. Wird keine Wärme benötigt, schalten die Kessel ganz ab und starten bei Bedarf automatisch.

Um möglichst hohe Wirkungsgrade und eine schadstoffarme Verbrennung zu erreichen, ist bei modernen Kesseln die Zufuhr der Primär- und der Sekundärluft jeweils mit einem separaten Gebläse geregelt. Die **Primärluft** zur Steuerung der endothermen Prozesse hat Werte von **$\lambda < 1$** (ca. 0,8). So kann die Geschwindigkeit der Pyrolyse und der Vergasung in der Leistung geregelt werden und die nötige Verweilzeit verkürzt werden. Die Primärluft wird in der Regel im Glutbett zugeführt, daher wird die Primärluft auch für die Oxidation der Vergasungsrückstände benötigt. Die **Sekundärluft** wird, zur Oxidation der brennbaren Gase, gezielt oberhalb vom Glutbett in den Brennraum eingebracht. Es wird mit Sauerstoffüberschuss gearbeitet, also mit Werten **$\lambda > 1$** (ca. 1,2 bis 1,5). Die schadstoffärmere Verbrennung ergibt sich zum einen aus der vollständigen Oxidation, zum anderen wird beispielsweise durch diese gestufte Luftzufuhr die NO_x - Bildung reduziert. Der Grund liegt darin, dass man auf diese Art und Weise sehr hohe Temperaturen von über 1300°C vermeiden kann. Bei diesen Temperaturen reagiert der luftgebundene N_2 zu NO_x.

2.3 Additive

Als Additive werden Hilfs- oder Zusatzstoffe bezeichnet, die in geringen Mengen einem Material zugeführt werden, um dessen Eigenschaften zu beeinflussen. Sie können sowohl erwünschte Eigenschaften eines Ausgangsmaterials verstärken, als auch unerwünschte Eigenschaften unterdrücken bzw. reduzieren. Im Zusammenhang mit Brennstoffen werden diese eingesetzt, um die Qualität des Energieträgers zu verbessern. So werden z. B. im Bereich der Pelletproduktion Additive verwendet, um das Binde-, Verbrennungs-, Emissions- und Ascheschmelzverhalten positiv zu beeinflussen, aber auch um eine effizientere Herstellung zu ermöglichen. Die für die Pelletierung ausschlaggebenden Additive können in organische und anorganische unterteilt werden. [13]

Die **organischen Additive** beeinflussen vorranging die physikalischen Eigenschaften des Brennstoffs bei der Pelletierung positiv. Die **anorganischen Additive** dienen der Veränderung der verbrennungstechnischen Eigenschaften. Es kommen calcium-, silizium- und aluminiumhaltige Stoffe zum Einsatz, welche einen hohen Ascheschmelzpunkt aufweisen. Durch die Vermischung der Aschekomponenten und den daraus resultierenden neuen Verbindungen während der Verbrennung wird das Ascheschmelzverhalten des Brennstoffs positiv beeinflusst. Da die chemischen Additive mineralischer Herkunft sind, beeinflussen sie den Aschegehalt des Brennstoffs negativ. Es werden nachfolgend drei gängige Additive vorgestellt. [13]

- **Kaolin**

Kaolin ist eine Sammelbezeichnung für ein Gemisch meist eisenfreier Tongesteine mit dem Mineral Kaolinit. Für Kaolin gibt es noch weitere gängige Bezeichnungen wie Porzellanton, weiße Tonerde oder Aluminiumsilikat. Dieses Mineral findet oft in der Papier- und Porzellanindustrie seine Verwendung. Wegen seiner Plastizität ist Kaolin als Füllstoff, als Streckmittel und Pigment einsetzbar. Als vorteilhaft erweist sich, dass Kaolin in einem breiten pH-Bereich chemisch stabil bleibt. Da Kaolin ein natürlich vorkommendes Mineral ist, wird es als umweltverträglich und nicht wassergefährdend eingestuft. [13]

- **Calciumhydroxid**

Calciumhydroxid wird auch als gelöschter Kalk, Portlandit oder auch in wässriger Form als Kalkwasser bezeichnet. Es ist ein weißes Pulver, das sich nur schlecht in Wasser löst. Hergestellt wird Calciumhydroxid aus Calciumoxid und Wasser unter starker Wärmeentwicklung. Dieser Vorgang wird als „Kalklöschen" bezeichnet. Es wird bei der Rauchgasentschwefelung, als Bindemittel, Düngemittel, und als Gegenmittel bei Schwefelsäurevergiftungen eingesetzt. Wegen seiner reizenden Eigenschaften sind verstärkte Vorsichtsmaßnahmen, insbesondere bezüglich der Augen und Atemwege notwendig. [13]

- **Calciumcarbonat**

Calciumcarbonat ist in der Natur weit verbreitet und wird im Sprachgebrauch als Kalk oder Kreide bezeichnet. Es ist wasserunlöslich und hitzebeständig. Meistens wird es aus natürlich vorkommenden Quellen bezogen, anschließend gereinigt und gemahlen. Alternativ kann Calciumcarbonat auf dem Wege der chemischen Synthese durch Einleiten von Kohlenstoffdioxid in Kalkwasser hergestellt werden und wird dann als synthetisches Calciumcarbonat bezeichnet. Es findet eine vielfältige Verwendung, angefangen von der Lebensmittelindustrie über die Baustoffindustrie bis hin zur Stahlindustrie. Calciumcarbonat ist nicht als gefährlich einzustufen und ist sowohl für den Menschen als auch für die Umwelt gut verträglich. [13]

Tabelle 1: Schmelzpunkte ausgewählter Additive [14]

Additiv	chemische Bezeichnung	Schmelzpunkt der Verbindung	Schmelzpunkte der Mineralien
Kaolin	$Al_2Si_2H_4O_9$	bei 1450°C	Al bei 660°C Si bei 1414°C
Calciumhydroxid	$Ca(OH)_2$	bei 550°C	Ca bei 842°C
Calciumcarbonat	$CaCO_3$	825-899°C (Zersetzung)	

Die Additivzugabe ist bei Brennstoffen nach DIN EN 14961-2, Eigenschaftsklasse A2 limitiert auf 2 % (w/w) (wasserfrei), Art und Menge sind

anzugeben. Nach DIN EN 14961-6 ist eine unlimitierte Additivzugabe möglich, wenn dessen Art und Menge angegeben werden.

2.4 Gesetzliche Vorschriften

- **Anforderungen der DIN EN 14961-2**

Die DIN EN 14961-2 beschreibt die Qualitätsanforderungen an Holzpellets für Feuerungsanlagen. Diese Norm sieht drei unterschiedliche Qualitätsstufen vor: A1, A2 und B. Die Tabelle 2 zeigt die angeforderten Eigenschaften.

Tabelle 2. Spezifikationen von Holzpellets nach DIN EN 14961 – 2 [6]

	Eigenschaftsklasse/ Bestimmungsverfahren	**Einheit**	**A1**	**A2**	**B**
Normativ	Herkunft und Quelle		1.1.3 Stammholz 1.2.1 Chemisch unbehandelte Holzrückstände	1.1.1 Vollbäume ohne Wurzeln 1.1.3 Stammholz 1.1.4 Waldrestholz 1.1.6 Rinde 1.2.1 Chemisch unbehandelte Holzrückstände	1.1 Wald- und Plantagenholz sowie anderes erntefrisches Holz 1.2 Industrie-Restholz 1.3 Gebrauchtholz
	Durchmesser *D*[a] und Länge *L*[b], EN XXX Siehe Bild 1	mm	D06, 6 ± 1; 3,15 ≤ *L* ≤ 40 D08, 8 ± 1 3,15 ≤ *L* ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 ≤ *L* ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 ≤ *L* ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 ≤ *L* ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 ≤ *L* ≤ 40
	Wassergehalt, *M*, EN 14774-1, EN 14774 2	im Anlieferungs-zustand, m-% Bezugsbasis Feuchtmasse	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10
	Aschegehalt, *A*, EN 14775	m-% wasserfrei	A0.7 ≤ 0,7	A1.5 ≤ 1,5	A3.0 ≤ 3,0
	Mechanische Festigkeit, *DU*, EN 15210-1	im Anlieferungs-zustand, m-%	DU97.5 ≥ 97,5	DU97.5 ≥ 97,5	DU96.5 ≥ 96,5
	Feingut am Werkstor beim Transport von Schüttgut (zum Zeitpunkt der Verladung) und in kleinen (bis zu 20 kg) und großen Säcken (zum Zeitpunkt des Abpackens oder bei der Lieferung an den Endverbraucher), *F*, FprEN 15149-1	m-% im Anlieferungs-zustand	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0
	Additive[c]	m-% wasserfrei	≤ 2 m-% Art und Menge sind anzugeben	≤ 2 m-% Art und Menge sind anzugeben	≤ 2 m-% Art und Menge sind anzugeben
	Heizwert, *Q*, EN 14918	im Anlieferungs-zustand, MJ/kg oder kWh/kg	Q16.5, 16,5 ≤ *Q* ≤ 19 oder Q4.6, 4,6 ≤ *Q* ≤ 5,3	Q16.3, 16,3 ≤ *Q* ≤ 19 oder Q4.5, 4,5 ≤ *Q* ≤ 5,3	Q16.0, 16,0 ≤ *Q* ≤ 19 oder Q4.4, 4,4 ≤ *Q* ≤ 5,3
	Schüttdichte, *BD*, EN 15103	kg/m^3	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600
	Stickstoff, N, FprEN 15104	m-% wasserfrei	N0.3 ≤ 0,3	N0.5 ≤ 0,5	N1.0 ≤ 1,0
	Schwefel , S, FprEN 15289	m-% wasserfrei	S0.03 ≤ 0,03	S0.03 ≤ 0,03	S0.04 ≤ 0,04
	Chlor, Cl, FprEN 15289	m-% wasserfrei	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.03 ≤ 0,03
	Arsen, As, FprEN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 1	≤ 1	≤ 1
	Cadmium, Cd, FprEN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
	Chrom, Cr, FprEN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Kupfer, Cu, FprEN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Blei, Pb, FprEN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Quecksilber, Hg, FprEN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
	Nickel, Ni, FprEN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Zink, Zn, FprEN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 100	≤ 100	≤ 100
	Informativ: Asche-Schmelzverhalten[d], prEN 15370	°C	Sollte angegeben werden	Sollte angegeben werden	Sollte angegeben werden

[a] Anzugebende ausgewählte Größe der Pellets.
[b] Die Menge von Pellets, die länger als 40 mm sind, kann 1 % (Massenanteil) betragen. Die maximale Länge muss < 45 mm sein.
[c] Art (z. B. Stärke, Maismehl, Kartoffelmehl, pflanzliches Öl).
[d] Sämtliche charakteristischen Temperaturen (Temperatur am Beginn der Schrumpfung (SST), Erweichungstemperatur (DT), Halbkugeltemperatur (HT) und Fließtemperatur (FT)) in oxidierten Zuständen sollten angegeben werden.

- **Anforderungen der 1. BImSchV („Kleinfeuerungsanlagen“)**

Die Anforderungen der 1. Bundes-Immissions-Schutz-Verordnung dienen der Reinhaltung der Luft. Sie ist gesetzlich verordnet und unterliegt strengen Vorgaben. So wird die Einhaltung der Grenzwerte in Bezug auf den Ausstoß von Staub, welcher auch Feinstaub beinhaltet, und den Ausstoß von radikalen und giftigen Gasen kontrolliert.

Die Schadstoffemissionen sind begrenzt durch das Bundes-Immisionsschutzgesetz (BImSchG). Kleine und mittlere Anlagen, die nicht genehmigungspflichtig sind, werden durch die erste Bundes-Immissionsschutzverordung (1. BImSchV) geregelt. Die Novelle der Verordnung trat am 22. März 2010 in Kraft. Neben den Emissionsgrenzwerten regelt die 1. BImSchV auch die Bedingungen, unter welchen die Anlagen aufgestellt und betrieben werden dürfen.

Die Festlegung von Emissionsgrenzwerten erfolgt in zwei Stufen: die 1. Stufe gilt seit Inkrafttreten der Novelle und die 2. Stufe ab 2015. Bereits installierte Anlagen haben Auslauffristen abhängig vom Jahr der Typenprüfung. In der Tabelle 3 werden sowohl die zwei Stufen der Verordnung als auch die geltenden Grenzwerte dargestellt. Betrachtet werden nur Grenzwerte für Brennstoffe der Kategorie Nr. 5a, Nr. 8 und Nr. 13 (siehe Unten), gemäß § 3 Abs. 1 der BImSchV.

Tabelle 3. Emissionsgrenzwerte der 1. BImSchV (Bezug 0_2 = 13%) [9]

	Brennstoff Kategorie Nr.	Leistung* (Kilowatt)	Staub (g/m^3)	CO (g/m^3)
Stufe 1	4 bis 5	≥ 4 ≤ 500	0,10	1,0
	5a	≥ 4 ≤ 500	0,06	0,8
	8 und 13	≥ 4 < 100	0,10	1,0
Stufe 2	1 bis 5a	≥4	0,02	0,4
	8 und 13	≥ 4 < 100	0,02	0,4

Durch die Novelle wurden die Emissionsgrenzwerte deutlich verschärft, was auf den Stand der Technik zurückzuführen ist. Somit steigen vor allem die Anforderungen an Feuerungsanlagen mit geringer Leistung.

Brennstoffkategorien gemäß § 3 Abs. 1 der BImSchV

Brennstoff Nr. 4: „naturbelassenes stückiges Holz einschließlich anhaftender Rinde, insbesondere in Form von Scheitholz und Hackschnitzeln, sowie Reisig und Zapfen.“ [9]

Brennstoff Nr. 5: „naturbelassenes nicht stückiges Holz, insbesondere in Form von Sägemehl, Spänen und Schleifstaub, sowie Rinde.“ [9]

Brennstoff Nr. 5a: „Presslinge aus naturbelassenem Holz in Form von Holzbriketts nach DIN 51731, Ausgabe Oktober 1996, oder in Form von Holzpellets nach den brennstofftechnischen Anforderungen des DINplus-Zertifizierungsprogramms „Holzpellets zur Verwendung in Kleinfeuerstätten

nach DIN 51731-HP 5“, Ausgabe August 2007, sowie andere Holzbriketts oder Holzpellets aus naturbelassenem Holz mit gleichwertiger Qualität.“ [9]

Brennstoff Nr. 8: „Stroh und ähnliche pflanzliche Stoffe, nicht als Lebensmittel bestimmtes Getreide wie Getreidekörner und Getreidebruchkörner, Getreideganzpflanzen, Getreideausputz, Getreidespelzen und Getreidehalmreste sowie Pellets aus den vorgenannten Brennstoffen.“ [9]

Brennstoff Nr. 13: „sonstige nachwachsende Rohstoffe, soweit diese die Anforderungen nach Absatz 5 einhalten.“ [9]

- **Anforderungen der TA-Luft**

Die TA-Luft reglementiert die Emissionen für Verbrennungsanlagen ≥ 1 MW, sofern Holz verbrannt wird. Bei Stroh und ähnlichen pflanzlichen Stoffen gelten die Grenzwerte der TA-Luft schon für Anlagen ≥ 100 kW. In der folgenden Abbildung werden die Grenzwerte dargestellt.

			Emissionsgrenzwerte						
	Feuerungs-wärme-leistung	Sauer-stoff-bezugs-wert	Staub	CO	NO_x [a]	Ges.-C	HCl	SO_2	Dioxin/ Furane
	MW	%	mg/Nm³						ng/Nm³
Naturbelassenes Holz	1-< 2,5 2,5-< 5 5-< 50	11	100 50 20	150 [b]	250	10	-	-	-
Holz, gestrichen, lackiert, beschichtet, Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten sowie deren Reste ohne halogenorganische Beschichtungen und Holzschutzmittel	1-< 2,5 2,5-< 5 5-< 50	11	50 50 20	150 [b]	400 [c]	10	-	-	-
Stroh oder ähnliche pflanzliche Stoffe [d]	0,1-< 1 1-< 50	11	50 20	250	500 400	50	30	350	0,1

a. angegeben als Stickstoffdioxid (NO_2)
b. bis 2,5 MW Feuerungswärmeleistung gilt der Emissionswert nur bei Betrieb mit Nennlast
c. für Altanlagen gilt ein Grenzwert von 500
d. z. B. Getreidepflanzen, Gräser, Miscanthus

Abbildung 3: Emissionsgrenzwerte der TA-Luft

3 Versuchsaufbau

In diesem Abschnitt werden die für die Zerkleinerung und Pelletierung eingesetzten Anlagen, die eingesetzte Messtechnik sowie die für die Verbrennungsversuche eingesetzten Feuerungsanlagen beschrieben.

3.1 Zerkleinerungsmechanismen

- **Zerfaserung**

Die Trockenzerfaserung ist eine Vorrichtung zur Zerkleinerung von stengel-, halm- und/oder blattartigen, nachwachsenden Rohstoffen. Das Konzept wurde von Schilling, Gaese und Rickert an der Fachhochschule Köln entwickelt und ist patentrechtlich geschützt. [22]

Das Wirkprinzip der Zerfaserung wird anhand der Abbildung 4 deutlich. Die gegenläufig axial an der Trägerleiste(2.4) bzw. an der Siebtrommel(2.2) des Stators(2) und an der Trägerleiste(5.2) des Rotors(5) angeordneten Schneidewerkzeuge(7,8,10,11) erzeugen bei Rotation eine tangentiale Zerkleinerungswirkung. Dabei wird das zentral auf Höhe der Rotorachse zugeführte Material radial durch den entstehenden Luftstrom und die Schwerkraft nach außen befördert. Durch das Vorbeilaufen der Faserpartikel an den Schneidewerkzeugen entstehen Schubspannungen in Richtung der Fasern unterstützt durch dazu senkrechte Zugspannungen. Nach Erreichen der durch die Lochgröße der Siebtrommel vorgegebenen Partikelgröße wird das Material durch den Luftstrom aus der Anlage befördert.

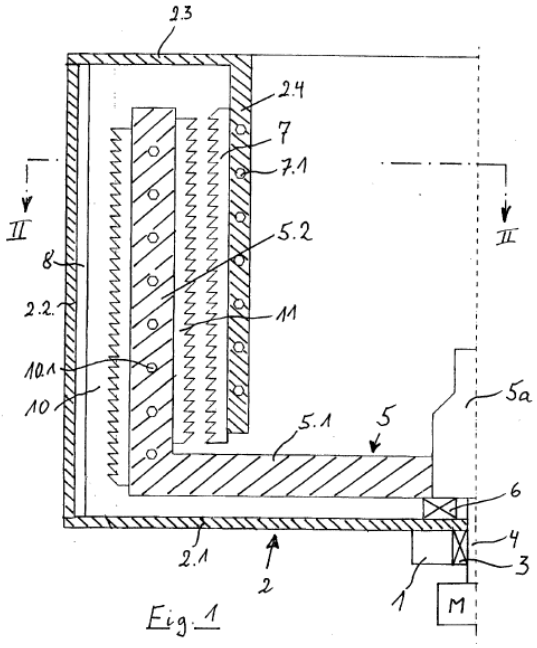


Abbildung 4: Schemazeichnung Zerfaserung [22]

Die für diese Arbeit verwendete Anlage ist der dritte Prototyp und wurde von der Firma TM Technik für den Bergischen Abfallverband (BAV) im Rahmen des

„:metabolon Projektes“ gebaut. Die Abbildung 5 bildet die Zerfaserungsanlage ab, deren technische Daten in der Tabelle 4 wiedergegeben werden.

Abbildung 5: Zerfaserungsanlage [20]

Tabelle 4: Technische Daten der Zerfaserungsanlage [23]

Parameter	Wert
Hersteller	TM Technik
Typ	33-390
Rotordurchmesser/ -breite [mm]	730/510
Messeranzahl/ -art Rotor	5 x 450 mm x 6 Zähne/Zoll
Messeranzahl/ -art Stator	12 x 500 mm x 8 Zähne/Zoll
Antriebsmotor [kW/min^{-1}]	15/1500
Übersetzungsverhältnis	2,22
Umfangsgeschwindigkeit [m/s]	25,83

- **Kollermühle**

Die Kollermühle ist ein Mahlwerk zum Zerkleinern oder Mischen. Historische Nutzungen des Kollermahlgangs sind Öl- oder Papiermühlen. In diesen Bereichen wurde die Technik zwischenzeitlich allerdings größtenteils durch andere Zerkleinerungs-, Press- oder Mahlverfahren ersetzt. Die Firma Amandus Kahl hat jedoch im Jahre 2008 basierend auf dem Konzept des Kollergangs die zur Pelletierung eingesetzte Flachmatrizenpresse zu einer Lochmatrizen-Kollermühle weiterentwickelt [24].

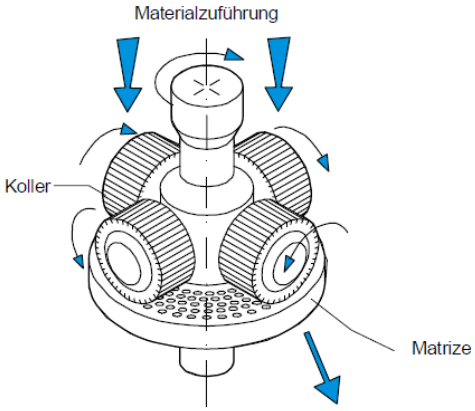


Abbildung 6: Kollergang [7]

Um eine Pelletpresse als Kollermühle zu verwenden, muss eine Matrize deren Verhältnis von Lochdurchmesser zu Presskanallänge unterhalb von 1:2 liegt eingesetzt werden, um eine Agglomeration der Partikel zu verhindern. Weiterhin muss der Presskanal nach unten hin konisch zulaufen, wie in Abbildung 7 links dargestellt ist. Bei der Zerkleinerung in der Kollermühle werden die von oben in den Kollergang eingebrachten Materialpartikel durch die entstehenden Druck- und Schub- sowie Gutbett-Beanspruchung zwischen Koller und Matrize zermahlen und fallen anschließend durch die Matrizenlöcher. [20]

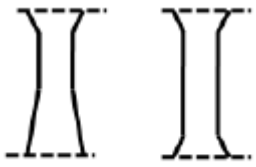


Abbildung 7: Vergleich der Presskanalgeometrie der Kollermühle (links) und der Pelletpresse (rechts) [21]

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wird eine Flachmatrizenpresse der Firma Amandus Kahl vom Typ 33-390 verwendet. Diese Anlage verfügt über eine hydraulische Kollerkopfverstellung, mit Hilfe derer die stufenlose Einstellung des Abstands zwischen den beiden Koller und der Matrize möglich ist. Dadurch eignet sie sich auch besonders gut zur

Verwendung als Kollermühle. In Abbildung 8 ist die verwende Kollermühle abgebildet.

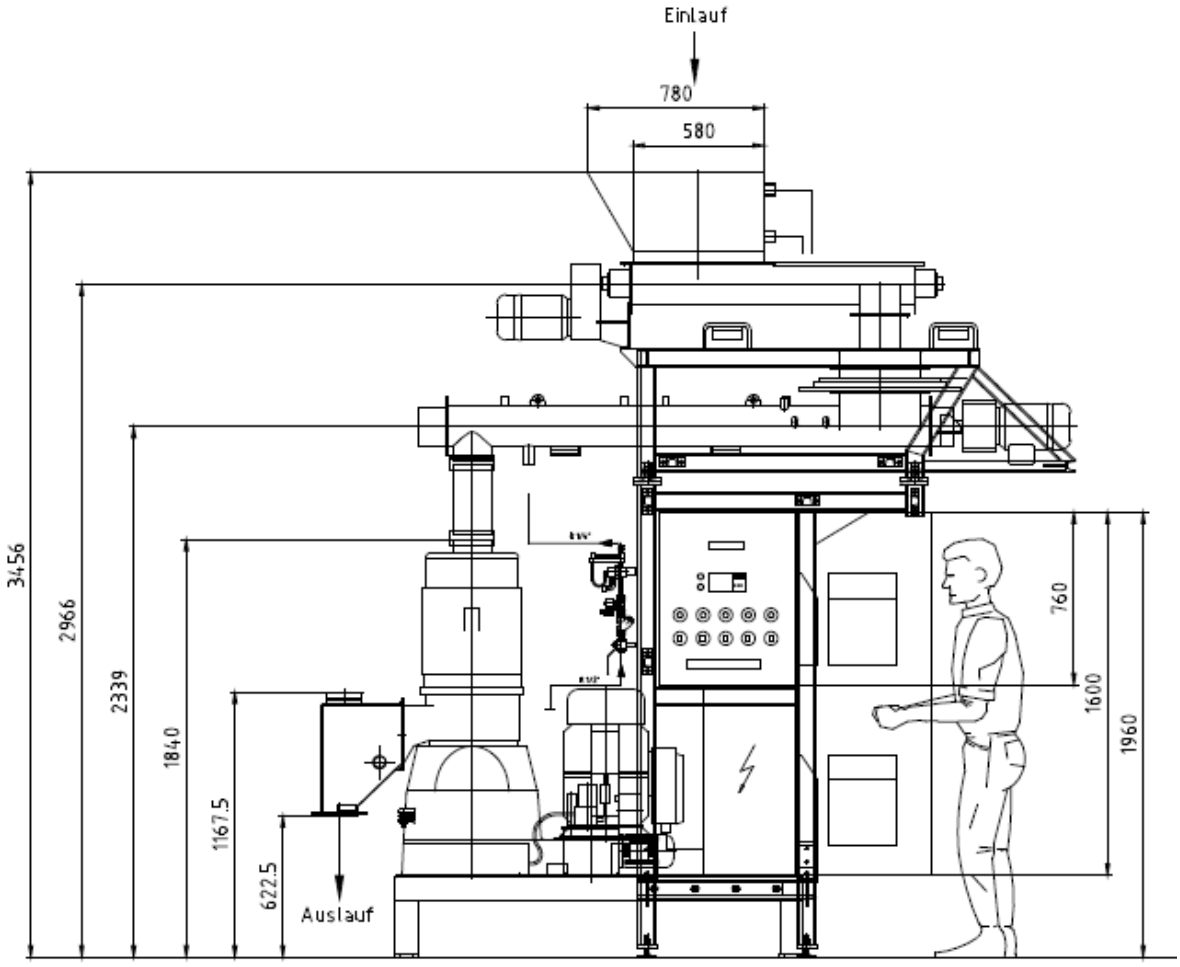


Abbildung 8: Schemazeichnung der Kollermühle [25]

Tabelle 5: Technische Daten der Kollermühle [4]

Parameter	Wert
Hersteller	Amandus Kahl GmbH & Co. KG
Typ	33-390
Kollerdurchmesser/ -breite [mm]	230/77
Kolleranzahl	2
Antriebsmotor [kW/min^{-1}]	30/1500
Kollergeschwindigkeit [m/s]	2,2
Matrizendurchmesser/ -fläche [mm/cm^2]	390/617

- **Nachzerkleinerungsanlage**

Als dritter Zerkleinerungsmechanismus kam die Nachzerkleinerungsanlage MPZ 600 der Firma mütek Systemtechnik zum Einsatz. Laut Hersteller eignet sich die Anlage zum Zerkleinern von Holzspänen und halmgutartigen vorzerkleinerten Biomassen und Reststoffen. Die maximale Zuführgröße beträgt G30 was nach ÖNORM M 7133 einer Durchschnittsgröße der Hauptfraktion von 30 mm^2 entspricht.

Das Wirkprinzip ist ähnlich dem der Hammermühle mit dem Unterschied, dass die Schlagwirkung durch feststehende Hämmer erreicht wird. Ausgeführt ist die Nachzerkleinerungsanlage (NZA) als Einwellenzerkleinerer mit auf der Rotorwelle liegendem Schneidewerk. Das durch den Zuführtrichter in die Anlage eingebrachte Material fällt unmittelbar auf den Schneidewerkskamm und wird durch die hohe Rotationsgeschwindigkeit von diesem zerschlagen. Die Partikel werden durch den Stoß bzw. Prall gegen das Werkzeug zerteilt. Unterhalb des Schneidewerks ist um das Material aus der Anlage auszubringen ein Sieb eingelassen, dessen Lochgröße je nach gewünschter Korngröße variierbar ist. Die Abbildung 9 bildet das Schneidwerk der NZA ab. [20]

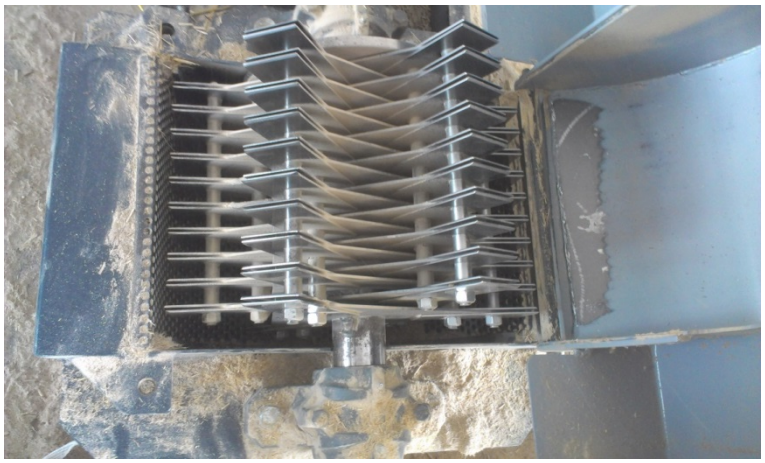


Abbildung 9: Messerkamm der Nachzerkleinungsanlage [20]

Tabelle 6: Technische Daten der Nachzerkleinerungsanlage (mütek Systemtechnik - Hartmut Müller GmbH, 2013)

Parameter	Wert
Hersteller	mütek Systemtechnik GmbH
Typ	MPZ 600
Messerkammdurchmesser/ -breite [mm]	500/400
Flügelanzahl	6
Antriebsmotor [kW/min^{-1}]	30/1500
Umfangsgeschwindigkeit [m/s]	39,27

3.2 Konditionierung

Bei der Konditionierung handelt es sich um eine Kurzzeitkonditionierung, welche direkt hinter der Zuführschnecke angebracht ist. Die Vorrichtung für die Konditionierung setzt sich aus zwei Teilen zusammen, der Wasserzufuhr und der Zerstäubung. Die Wasserzufuhr geschieht über eine Micropumpe der Firma *Peristaltic* Typ *PD 5001*. Der eingestellte Massenstrom H_2O wird einer Zerstäubung zugeführt, welche mittels Spritzpistole realisiert ist. Mit Hilfe von Druckluft wird das zugeführte Wasser zerstäubt.

Weiterhin kann das Material während des Mischens konditioniert werden, hierbei wird es mit einem Zerstäuber manuell mit einer definierten Menge Wasser benetzt (siehe Kapitel 4.2).

3.3 Pelletierpressen

Es werden im Laufe des Projekts zwei Pelletierpressen verwendet. Die Parameter der Presse der Firma *Kahl* Typ *Laborpresse 14-175* sind in Tabelle 8 aufgeführt. Für diese Presse sind die in Tabelle 7 aufgelisteten Matrizen vorhanden. Die Parameter der zweiten Presse, Firma *Kahl* Typ *33-390*, sind in Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 7: Matrizen für Kahl Laborpresse 14-175

	Presskanaldurchmesser	Presskanallänge
#1	8 mm	27 mm
#2	6 mm	22 mm
#3	6 mm	27 mm
#4	6 mm	32 mm

Tabelle 8: Parameter der Kahl Laborpresse 14-175 [5]

Parameter	Wert
Matrizendurchmesser [mm]	175
Kollerdurchmesser/-breite [mm]	130/29
Kolleranzahl	2
Antriebsmotor [kW/min^{-1}]	3
Kollergeschwindigkeit [m/s]	0,5 bis 0,8
Matrizenlochfläche [cm^2]	106
Maschinengewicht (inkl. Motor) [kg]	260

Über die Steuerung der Maschine lassen sich die Kollerdrehzahl und die Drehzahl der Dosierschnecke einstellen. Auf einem Display kann die eingestellte Kollerdrehzahl und die Leistungsaufnahme der Presse abgelesen werden.

Tabelle 9: Technische Daten der Pelletierpresse Kahl 33-390

Parameter	Wert
Matrizendurchmesser [mm]	390
Kollerdurchmesser/-breite [mm]	230/77
Kolleranzahl	2
Antriebsmotor [kW]	30
Matrizenlochfläche [cm^2]	617
Maschinengewicht [kg]	1150
Durchsatz [kg/h]	100 - 700

Zusätzlich verfügt die Presse über eine Konditionierschnecke für die Kurzzeitkonditionierung, welche der Dosierschnecke nachgeschaltet ist. Die Kennwerte der verfügbaren Matrizen sind Tabelle 10 aufgelistet. Das Pressverhältnis beschreibt das Verhältnis von Presskanaldurchmesser zur Presskanallänge. Der Einlaufkonus ist bei allen Matrizen 60°.

Tabelle 10: Matrizen für Pelletierpresse Kahl 33-390

	Presskanaldurchmesser [mm]	Presskanallänge [mm]	Pressverhältnis
Matrize #1	6	24	1:4
Matrize #2	6	30	1:5
Matrize #3	6	36	1:6
Matrize #4	6	6	1:1
Matrize #5	8	8	1:1

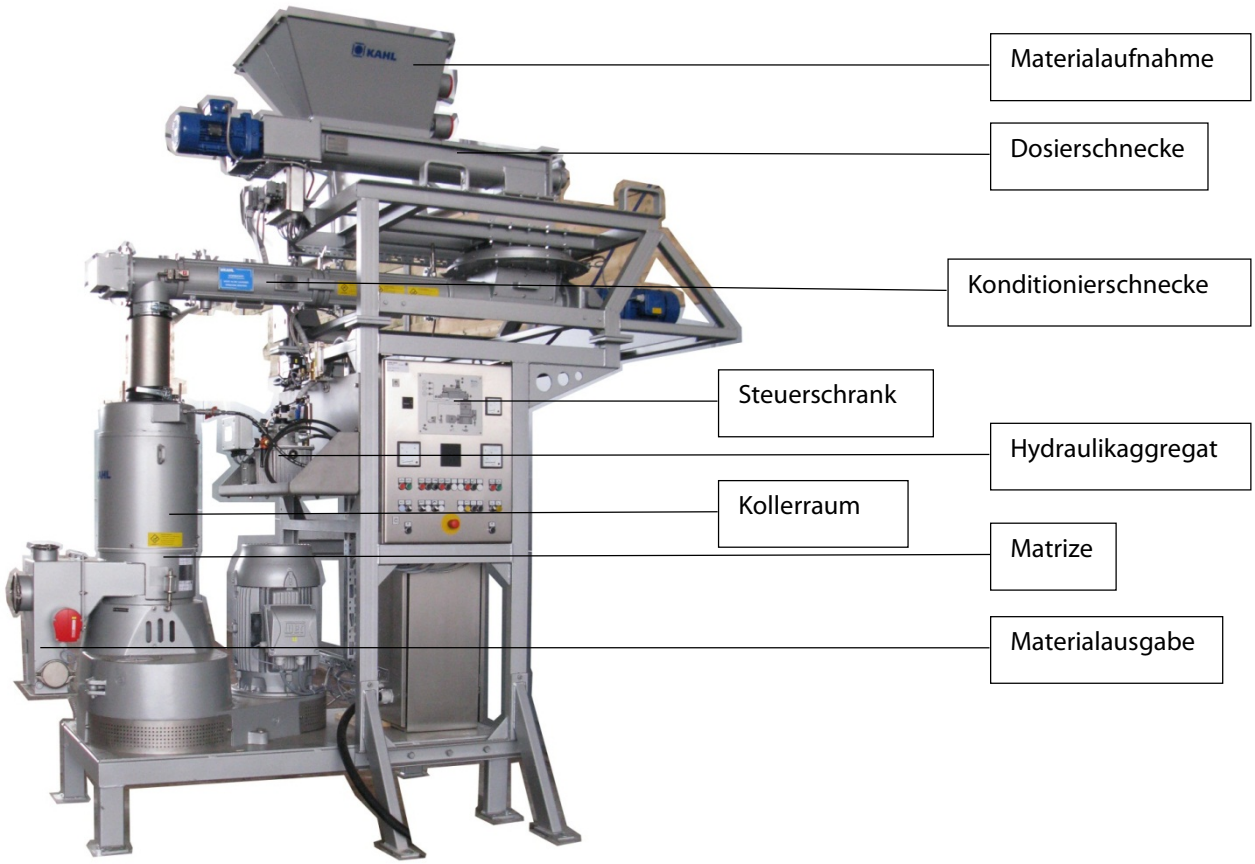


Abbildung 10: Pelletpresse Kahl 33-390

3.4 Verbrennungsanlagen

3.4.1 Twin-Heat (Versuchsaufbau 1)

Der Aufbau der Verbrennungsanlage ist in Abbildung 11 dargestellt. Die Anlagen und Geräte der Verbrennungsanlage werden im Folgenden einzeln aufgeführt.

Die in der Feuerungsanlage durch Verbrennung des Brennstoffes generierte Wärme wird in Form von Heizwasser mit hoher Temperatur bis zum Wärmetauscher (Wärmeverbraucher) transportiert. Beim Wärmetauscher wird die Wärme durch Luftkühler an die Umgebungsluft übertragen, wobei eine Absenkung der Wassertemperatur stattfindet. Das abgekühlte Wasser wird durch eine Kreislaufpumpe zurück in die Feuerungsanlage gepumpt, wo es wieder erhitzt werden kann.

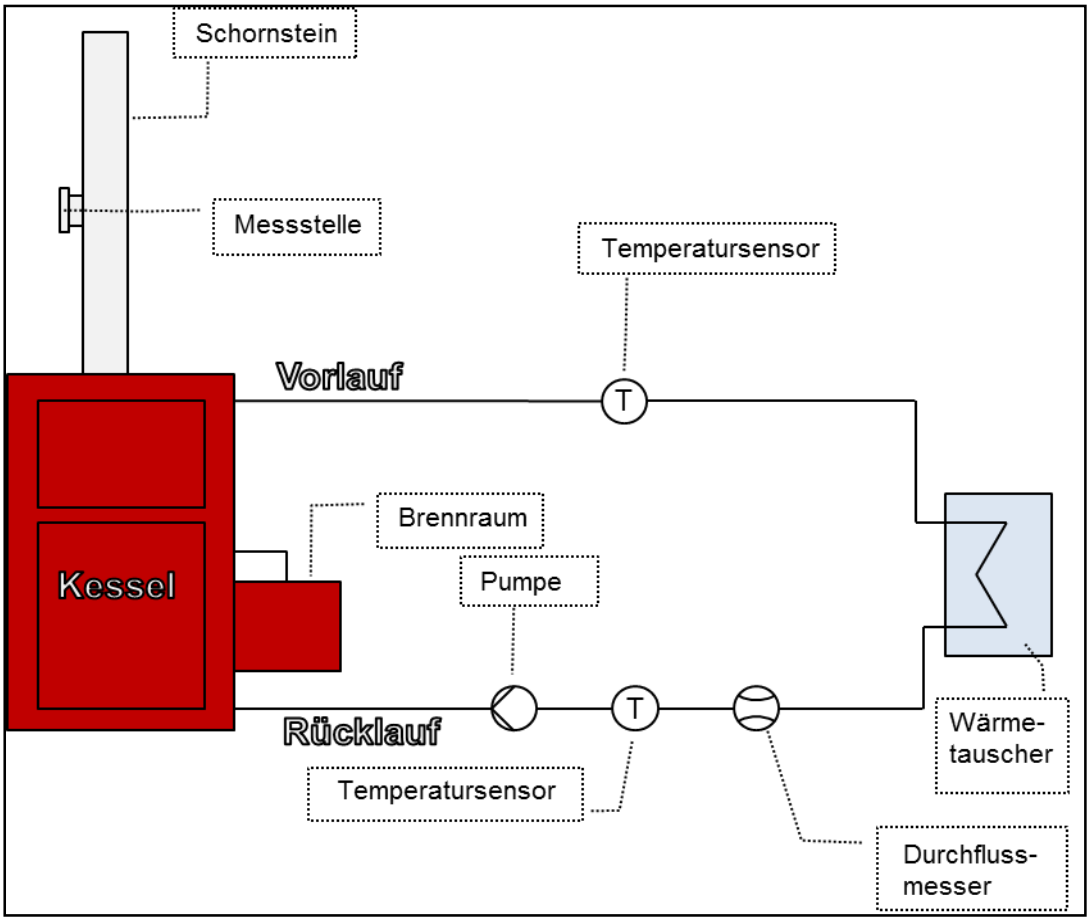


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Verbrennungsanlage

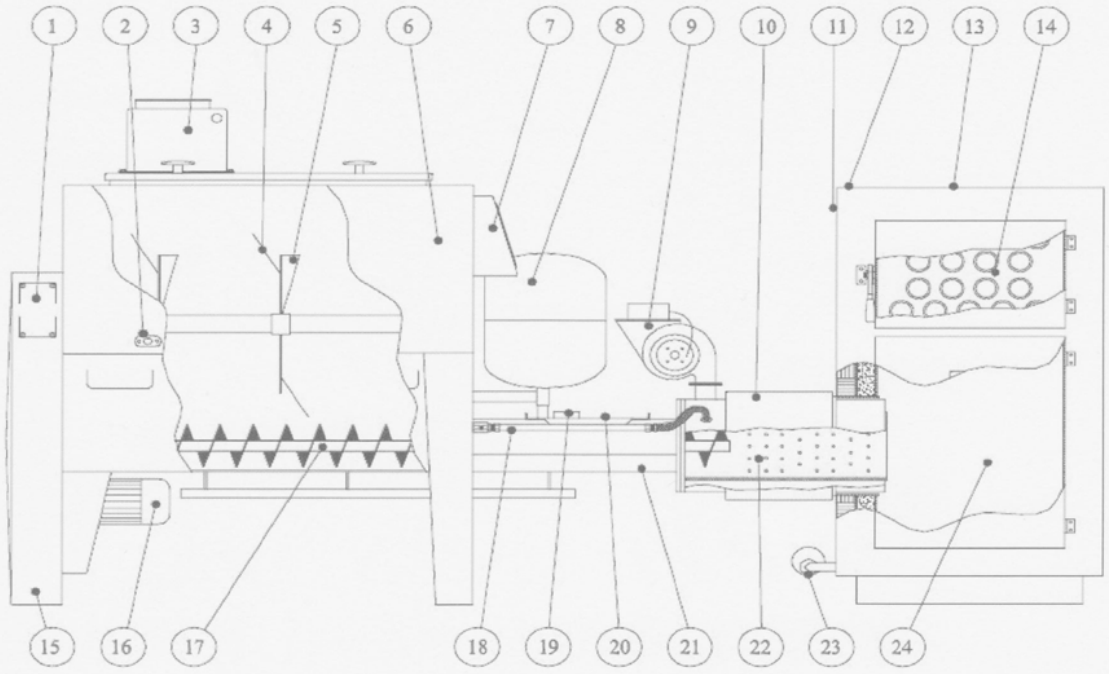
Feuerungsanlage: Bei der Feuerungsanlage handelt es sich um eine Stokeranlage Typ M20i der Firma TwinHeat (DK). Die maximale Leistung des Kessels liegt bei 28 kW bei der Verbrennung von Holzpellets mit einem Wassergehalt von ca. 7%. Laut Hersteller können Holzpellets, Getreide und Hackschnitzel ($w \leq 25$ %) als Brennstoff genutzt werden. Es handelt sich um eine Quereinschubfeuerung, bei der Brennstoff mit einer Förderschnecke in den Brennring des Brenners befördert wird.

Die Feuerungsanlage verfügt über eine kombinierte Leistungs- und Verbrennungsregelung mit Lambda-Sonde. Die Vorlauftemperatur kann zwischen 60°C und 85°C eingestellt werden. Der Betriebszustand und die von der Feuerungsanlage aufgenommenen Messwerte (Vorlauftemperatur und Abgassauerstoff) lassen sich auf einer Digitalanzeige im Bedienfeld des Kessels ablesen. Hier lassen sich auch die Betriebseinstellungen ändern. Die Anlage kann sich, abhängig von Wärmeverbrauch, an die Kesselleistung (von 20 bis 100%) anpassen. Das Gebläse ist so eingestellt, dass bei niedriger Kesselleistung die Luftmenge zyklisch gedrosselt wird. Bei Leistungen unter 20% geht die Feuerung in „Pause“, wobei das Gebläse jede 10 Minuten startet, damit die Glutmasse nicht erlischt.

Der Aschenkasten ist von Hand zu reinigen. Die Asche wird durch den nachrückenden Brennstoff in den Aschenkasten gedrückt. In Abbildung 12 ist der schematische Aufbau des Kessels dargestellt und eine Erklärung der Bauteile aufgeführt.

Tabelle 11 zeigt einige Kennwerte für den Betrieb mit Holzpellets, Getreide und Holzhackschnitzel [10].

Über die Steuereinheit lassen sich der gewünschte Sauerstoffüberschuss im Abgas, die Schneckenlaufzeit und die Schneckenpause einstellen. Diese Möglichkeiten dienen zur Anpassung der Kesseleinstellungen an spezielle Brennstoffe. Die Schneckenlaufzeit bestimmt, wie viel Brennstoff pro Takt in den Brennraum befördert wird. Sie Schneckenpause bestimmt den Abstand zwischen den Takten.



1. Fotozelle, als Sensor für Füllhöhe (nur bei externer Zufuhr)
2. Sensor für automatische Beschickung (nur bei externer Zufuhr)
3. RSE für automatische Beschickung (nur bei externer Zufuhr)
4. Rührwerksflügel
5. Rührwerk
6. Brennstoffvorratsbehälter
7. Steuerung
8. Drucktank der Sprinkleranlage
9. Primär-/Sekundärluftventilator
10. Brenner
11. Übertemperaturthermostat
12. Bypassklappe zur Regulierung der Abgastemperatur
13. Lambdasonde (Restsauerstoffregelung im Rauchgas)
14. Röhrenwärmetauscher
15. Verkleidung Kettenantrieb Einschubschnecke und Rührwerk
16. Getriebemotor für Einschubschnecke und Rührwerk
17. Einschubschnecke
18. Druckausgleichsschlauch (Druckausgleich zwischen Behälter und Brenner)
19. Sprinkleranlage (95 °C Auslösetemperatur)
20. Sprinklerplatte
21. Schneckenkanal
22. Brennring im Brenner
23. Zirkulationspumpe für die Wasserkühlung des Brenners
24. Kessel (Feuerungsanlage für nicht-flüssige Brennstoffe)

Abbildung 12: Übersichtszeichnung TwinHeat M20i [10]

Tabelle 11: Kennwerte vom TwinHeat M20i [10]

Kennwert	Holzpellets	Getreide
Nennleistung [kW]	28	22
Minimale Leistung [kW]	7,9	5,1
Rauchgastemperatur bei Nennleistung [°C]	178	151
Rauchgastemperatur bei min. Leistung [°C]	87	77
Rauchgasvolumen bei Nennleistung [m³/h]	82	77
Brennstoffverbrauch bei Nennleistung [kg/h]	6,59	6,25
Wirkungsgrad bei Nennleistung [%]	88	88
Wirkungsgrad bei min. Leistung [%]	89	82

Lufterhitzer: Die Anlage verfügt als Wärmetauscher über zwei Lufterhitzer, die die in der Feuerungsanlage erzeugte Wärme über einen Wärmeübertrager mit einem Ventilator an die Luft abgeben. Die Lufterhitzer sind vom Typ *TIP 5000* der Firma *Kampmann*. Der Ventilator wird mit einem 2-Stufen Drehstrommotor betrieben, welcher manuell eingestellt wird. In Tabelle 12 werden die Kennwerte der Lufterhitzer dargestellt.

Pumpen: Die Anlage verfügt über zwei Pumpen. Die Pumpe für den Vorlauf ist von der Firma *Wilo* vom Typ *Star RS 25/6*, die Pumpe für den Bypass ist von der Firma *Grundfos* vom Typ *UPS 25-40*. Die Pumpen verfügen über drei Betriebszustände, die von Hand eingestellt werden können.

Tabelle 12: Kennwerte der Kampmann Tip 5000 Lufterhitzer

Kennwert	Lufterhitzer I		Lufterhitzer II	
	Teillast	*Volllast*	*Teillast*	*Volllast*
Nennspannung [V]		400 3~ 50Hz		
Drehzahl [1/min]	1150	1380	520	860
Nennstrom [A]	0,3	0,51	0,42	0,8
Nennleistung [W]	210	290	190	380
Max. Ansaugtemperatur am Motor [°C]	40		40	
Luftvolumenstrom [m³/h]	2150	2950	3500	5050
Nennwärmeleistung [kW]	28,6	35,7	32,8	41,8
Max. Betriebsdruck [bar]	10	10	16	16
Max. Betriebstemperatur [°C]	100	100	120	120

Verbrennungstemperaturerfassung: Der Heizkessel TwinHEAT M20i, welcher auch für die vorangegangenen Versuche genutzt wurde, ist seit dem März 2013 mit einer Temperaturerfassung versehen. Diese ermöglicht die Temperaturmessung im Brennrohr – prinzipiell also die Messung der Verbrennungstemperatur. Es wird an zwei Messpunkten mit zwei unterschiedlichen Thermoelementen gemessen. Die Eigenschaften der Thermoelemente sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 13: Eigenschaften der Thermoelemente

Typ	Thermoelementpaarung	max. Hitzebeständigkeit [°C]
Messpunkt 1 Thermoelement Typ S	Platin-Rhodium/Platin	1500
Messpunkt 2 Thermoelement Typ K	Nickel-Chrom/Nickel	1200

Vorteil des Thermoelements Typ S ist die hohe Hitzebeständigkeit, Vorteil des Thermoelements Typ K ist, dass der Fühler aufgrund des Materials biegsam ist. Die Thermoelemente werden durch eine Öffnung in der Kesseltür installiert. Die Konstruktion ist so ausgeführt, dass an dieser Stelle keine weitere Luft in den Verbrennungsvorgang gelangt. Die folgenden Darstellungen zeigen die Position der Thermoelemente.

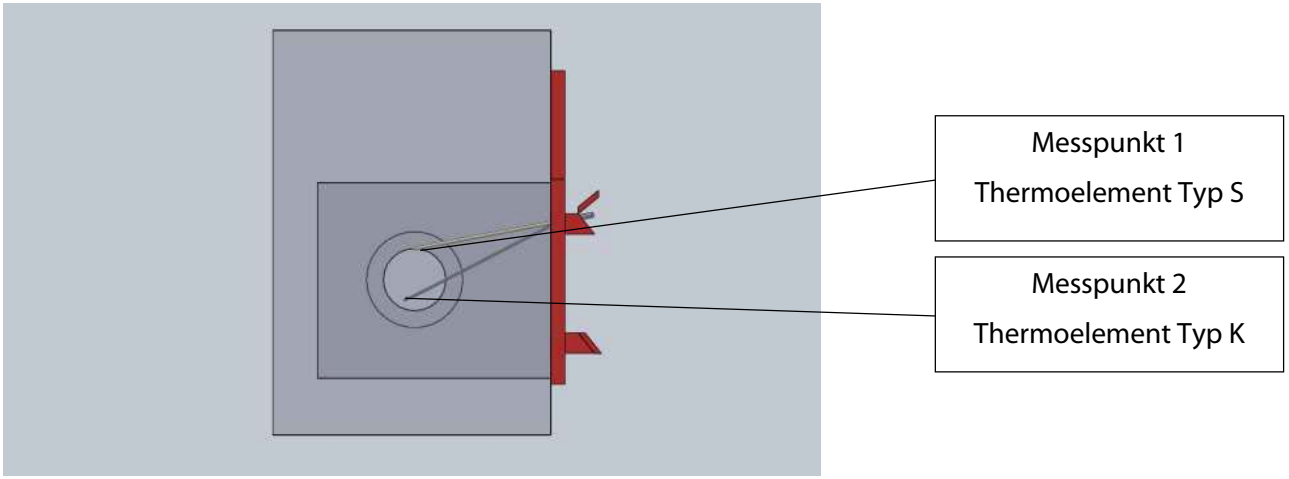


Abbildung 13: Position der Thermoelemente, Ansicht: Links [15]

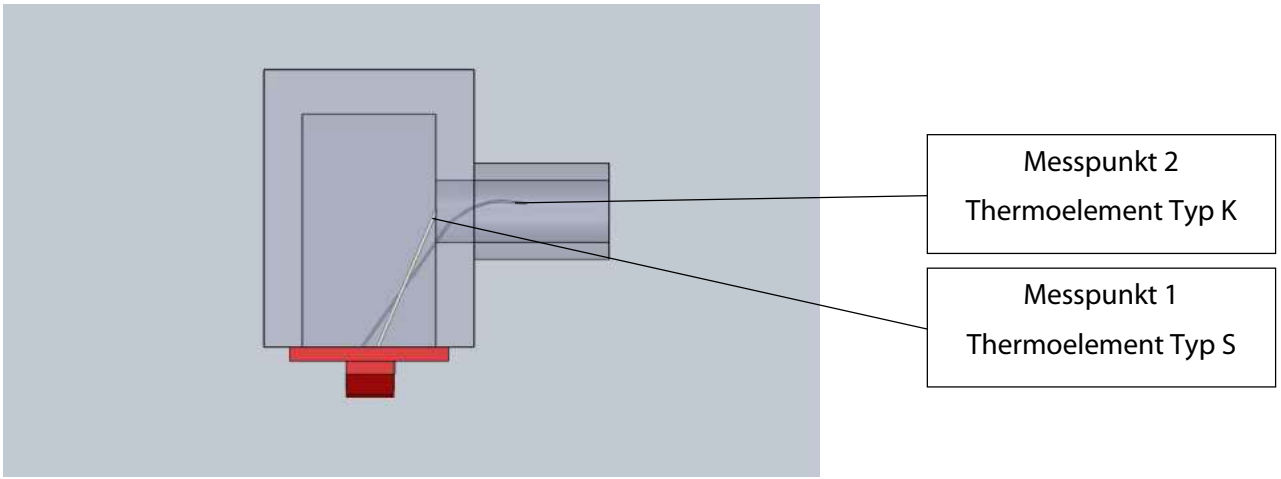


Abbildung 14: Position der Thermoelemente, Ansicht: Draufsicht [15]

Konzept zur Überwachung der Brennstoffzufuhr: Die zur Verfügung stehende Feuerungsanlage hat keine Vorrichtung zur Erfassung der zugeführten Brennstoffmenge, was die Bestimmung des Wirkungsgrades erheblich erschwert. Aus diesem Grund wurde eine Methode entwickelt und ab der zweiten Versuchsreihe angewandt, die es ermöglicht, die Einbringung des Brennstoffes in den Brennraum zu überwachen. Vorausgesetzt, dass vor der Verbrennung für jeden Brennstofftyp die Menge des Brennstoffes, die die Feuerungsanlage während einer Schneckenumdrehung in den Brennraum fördert, ermittelt wird. Diese Brennstoffmenge kann durch den Mittelwert aus einer Messreihe bestimmt werden.

Dafür wurde ein mechanischer Zähler (Stückzähler) am Vorratsbehälter der Anlage befestigt, der durch das Betätigen des Hebels die Umdrehungen der Förderschnecke zählt (siehe Abb. 27). Die Betätigung des Hebels geschieht durch die Drehbewegung einer Fahne, die mit der Welle der Förderschnecke starr verbunden ist. Mit Hilfe einer 360°- Skala, die hinter dem angetriebenen Zahnrad angebracht ist, kann die Strecke, die die Förderschnecke während eines Stoker Taktes zurücklegt, in Grad abgelesen werden. [13]

Ungenauigkeiten hängen vor allem mit Schwankungen der geförderten Brennstoffmenge pro Umdrehung zusammen, sowie mit der korrekten Ermittlung der spezifischen Fördermenge eines jeweiligen Brennstoffs. Weiterhin führen Inhomogenitäten in der Größenverteilung des Brennstoffs zu weiteren Fehlern.

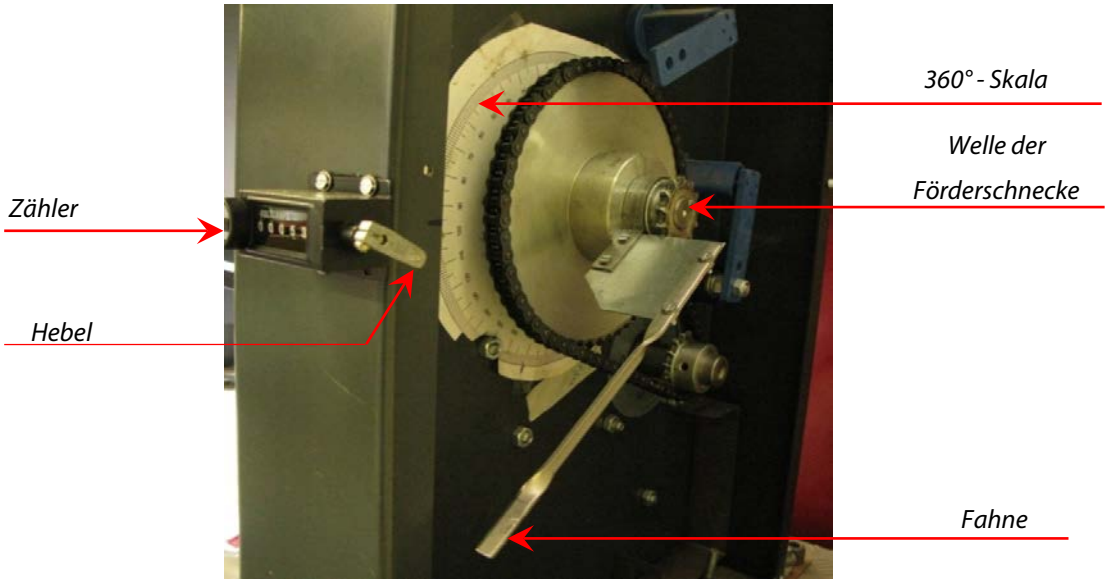


Abbildung 15: Methode zur Überwachung der Brennstoffzufuhr[13]

3.4.2 HDG Compact 50 (Versuchsaufbau 2)

Die wichtigsten Kenndaten auf einen Blick

Leistungsbereich 50kW

Brennstoffe Hackschnitzel, Pellets, Späne

Einsatzbereich Landwirtschaft, holzverarbeitende Betriebe, private Haushalte

Technik

Luftgekühlter Kipprost, Verbrennungs- und Leistungsregelung über Lambda-Sonde und Brennraumtemperaturfühler, automatische Entaschung in Aschebehälter, automatische Abreinigung der Wärmetauscherflächen, Zellenradschleuse zur Rückbrandsicherung

Abbildung 16: HDG Compact 50

Nutzen

konstante Leistung auch bei unterschiedlichem Brennmaterial, automatisches Zünden durch Heißluftgebläse, hoher Bedienkomfort durch automatische Abreinigung und Entaschung, geringer Wartungsaufwand durch wartungsfreie Lager, niedrigste Emissionswerte durch ausgefeilte Regelung, höchste Betriebssicherheit, Kesselwirkungsgrad von bis zu 92%.

Schnitt durch die HDG Compact 50

(1) Automatische Abreinigung und Entaschung (optional)

(2) Lambda – Sonde

(3) Zellradschleuse

(4) Kipprost

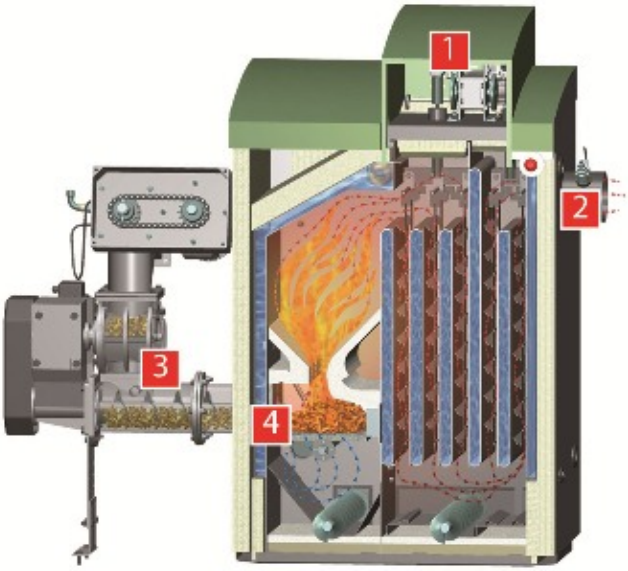


Abbildung 17: HDG Compact 50 - Schnittansicht

Beschreibung

Die HDG Compact 50 ist ein automatisches Holzheizsystem zur Verbrennung von Hackschnitzeln, Pellets und Spänen. Die kompakten und leistungsfähigen Heizungsanlagen

eignen sich besonders für die Land- und Forstwirtschaft, Gewerbebetriebe, Mehrfamilienhäuser und Privathaushalte. Der Rohstoff Holz kommt über die Zellenradschleuse mit Stokerschnecke in die Verbrennungskammer der Anlage. Direkt auf dem Verbrennungsrost gelandet, wird der Brennstoff automatisch via Heißluftgebläse gezündet. Die Brennstoffversorgung des Heizkessels erfolgt laufend und nach Bedarf. Selbst bei unterschiedlichem oder versehentlich in den Kessel gelangtem, nicht brennbarem Heizmaterial bleibt der Brennraum sauber. Mit der Kipprost-Technik fallen die Verbrennungsrückstände mühelos in den darunter liegenden Aschenbehälter und können von dort aus entsorgt werden. So bleiben der Wirkungsgrad konstant und die Emissionen gering.

3.4.3 KÖB Vitoligno 300-P (Versuchsaufbau 3)

Schnittansicht

(1) Vitotronic Regelung

(2) Automatische Wärmetauscherreinigung

(3) Variopass: Anpassung der Heizfläche an den Wärmebedarf

(4) Interne Rücklauftemperaturanhebung

(5) Hochwirksame Wärmedämmung

(6) Anschlussflansch für Einschubschnecke

(7) Brennkammer aus hochhitzebeständiger Keramik

(8) Lamellenrost aus Edelstahl

(9) Große, integrierte Aschelade

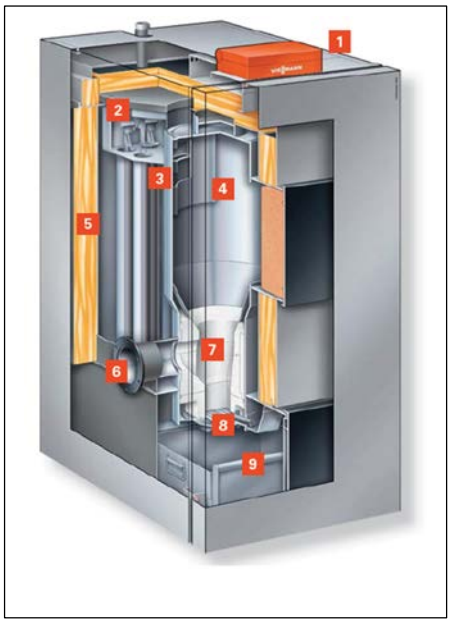


Abbildung 18: KÖB Vitoligno 300-P

Besonderheiten

- Vollautomatischer Pelletkessel.
- Wirkungsgrad: bis zu 95 %.
- Automatische Brennraumentaschung durch Lamellenrost aus Edelstahl für hohe Betriebssicherheit und lange Reinigungsintervalle.
- Einschubeinheit aus Zellradschleuse und Einschubschnecke für exakte, sparsame Brennstoffdosierung und 100-prozentige Rückbrandsicherheit.
- Beste Energieausnutzung in jedem Leistungsbereich durch selbstständige Anpassung der Dreizug-Heizfläche an den Wärmebedarf mit patentiertem Variopass-Prinzip.

- Automatische und energiesparende Zündung mit keramischem Heizelement.
- Digitale Regelung mit menügeführter Klartextanzeige und automatischer Funktionsüberwachung sowie Solar- und Pufferladeregelung.
- Umfangreiches Zubehör für Pelletzufuhr und Pelletlagerung.

Beschreibung

Der Holzpelletkessel Vitoligno 300-P mit seinem großen Modulationsbereich von 1:3 bietet ein breites Einsatzspektrum – vom Niedrigenergiehaus bis hin zu Objekten mit größerem Wärmebedarf. Dank seiner zweifachen Verbrennungsregelung mit Lambdasonde und Temperatursensor hat der von Viessmann entwickelte Pelletkessel einen hohen Wirkungsgrad und geringe Staub- und CO-Emissionen. Den dauerhaft hohen Wirkungsgrad garantiert die automatische Heizflächenreinigung. In Kombination mit der Brennraumentaschung durch den motorisch angetriebenen Lamellenrost bietet der Pelletkessel einen hohen Heizkomfort und reduziert den Wartungs- und Reinigungsaufwand auf ein Minimum. Durch die Anpassung der Heizfläche an den Wärmebedarf (Variopass-Prinzip) wird der effiziente Betrieb des Vitoligno 300-P auch im Teillastbereich sichergestellt. Die Menüführung mit mehrzeiliger Klartextanzeige der digitalen Regelung ermöglicht die einfache und intuitive Bedienung aller feuerungs- und anlagentechnischen Komponenten. Zwei Heizkreise mit Mischer oder ein Heizkreis mit Mischer und Solarfunktion, sowie ein Speicher-Wassererwärmer und ein Heizwasser-Pufferspeicher lassen sich ebenfalls regeln.

3.5 Messtechnik

Bei den Verbrennungsversuchen wurde folgende Parameter gemessen: Abgaskonzentrationen (CO, NO), Staubkonzentrationen und Wärmemenge. Der Aufbau der Messtechnik an der Feuerungsanlage ist in Abbildung 19 schematisch dargestellt. Die eingesetzten Messgeräte werden im Folgenden einzeln aufgeführt.

Wärmemenge: Zur Ermittlung der Wärmemenge wird ein Wärmemengenzähler der Firma *WDV/Molliné* eingesetzt; dafür wird Temperatur und Durchfluss des im Wärmetauscher zirkulierenden Wassers gemessen. Im Rücklauf sind ein Durchflussmesser und ein Temperatursensor eingebaut, ein weiterer Temperatursensor ist im Vorlauf installiert. Das Rechenwerk des Messgerätes errechnet mit diesen Werten die kumulierte Wärmemenge seit Inbetriebnahme des Wärmemengenzählers, die aktuelle Heizleistung und die Temperaturdifferenz von Vor- und Rücklauf. Weiterhin können die momentane Durchflussmenge, die kumulierte Volumenmenge seit Inbetriebnahme, die

Vor- und die Rücklauftemperatur angezeigt werden. Die Daten des Wärmemengenzählers werden mit Hilfe eines optischen Auslesegeräts der Firma SensoStar über eine serielle Schnittstelle auf einen Computer übertragen.

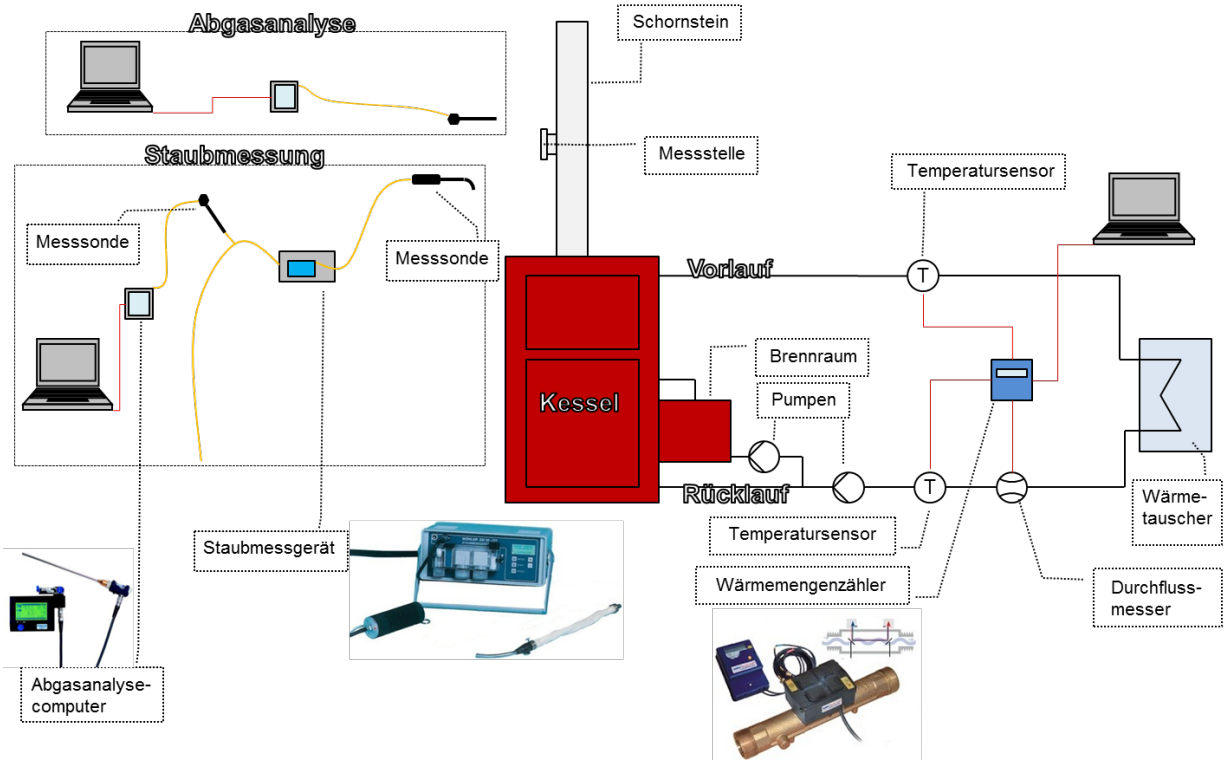


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Messtechnik [17]

Abgasanalyse: Zur Messung der Abgaskonzentrationen wird der Analysencomputer A97 der Firma Wöhler eingesetzt; hierbei handelt es sich um ein Abgasanalysegerät mit integrierter Gasaufbereitung. Auf Basis der gemessenen Werte gibt das Gerät zusätzlich berechnete Werte aus. Teilweise basieren diese berechneten Werte auf voreingestellten, spezifischen Brennstoffkennwerten. Es werden nur brennstoffunabhängige Messgrößen weiter verarbeitet. Die gemessenen und berechneten Werte können über eine Infrarotschnittstelle an einen Rechner übertragen werden. Mit dem A97 lässt sich auch der Kernstrom der Abgasströmung ermitteln. Tabelle 14 zeigt, welche Kennwerte gemessen und welche berechnet werden. Weiterhin werden das Messprinzip und der Messbereich der Messgrößen aufgeführt [11].

Tabelle 14: Ausgabewerte des Wöhler A97– Analysencomputer [11]

Kennwert	gemessen	berechnet	Messprinzip	Messbereich
O2 – Konzentration [Vol%]	X		elektrochem. Sensor	0 bis 21
CO – Konzentration [Vol-ppm]	X		elektrochem. Sensor	0 bis 16.000
NO – Konzentration [Vol-ppm]	X		elektrochem. Sensor	0 bis 2.000
Schornsteindifferenz-druck [Pa]	X		Halbleitermembran	0 bis ± 4.000
Abgastemperatur [°C]	X		Thermoelement	0 bis 800
Verbrennungsluft-temperatur [°C]	X		Halbleiterwiderstand	-20 bis 99,9
Abgasverlust* [%]		X		
Wirkungsgrad* [%]		X		
CO2 – Gehalt* [%]		X		
Taupunkt [°C]		X		
Lambda		X		

*) Brennstoffspezifische Berechnung

Staubmessung:

- Wöhler SM 96

Bei diesem Staubmessgerät handelt es sich um ein Out-Stack-Filtergerät. Eine definierte Abgasmenge von ca. 135 Nm^3 wird von dem Gerät mit einer Abgassonde abgesaugt. Dieses Abgas durchwandert den auf 70°C beheizten Sondenkopf mit dem darin befindlichen Filter. Der Staub wird im Filter aufgefangen. Vor dem Eintritt des Abgases in das Gerät wird der vorhandene Wasserdampf in einer Kondensatfalle abgeschieden. Im Gerät wird der Volumenstrom gemessen, das bemessene Abgas wird daraufhin wieder aus dem Gerät gepumpt. An dieser Stelle kann optional eine Abgasanalyse erfolgen. Am Ende der 15 minütigen Messperiode wird das exakte Volumen des abgesaugten Abgases auf dem Display angezeigt [12].

- Wöhler SM 500

Bei diesem Staubmessgerät handelt es sich um ein Out-Stack-Filtergerät. Eine definierte Abgasmenge von ca. 66,7 Nm^3 wird von dem Gerät mit einer Abgassonde abgesaugt. Der Staub wird mit einer Filterhülse aufgefangen, welche sich im Gerät auf einem Wägemodul befindet. Die Staubkonzentration wird im Gerät direkt ermittelt. Neben der Staubkonzentration wird ebenfalls die Konzentration an O_2 und CO ermittelt. Es wird nach der Messung die Konzentration an Staub in mg/Nm^3 bezogen auf 13 Vol-% O_2 ausgegeben. Das Gerät kann eine Genauigkeit von 20 mg/Nm^3 einhalten.

Flammenisonisationsdetektor: Der Flammenisonisationsdetektor (FID) ist ein Gerät der Firma *SK Elektronik*, Typ *Thermo FID PT84*. Mit Hilfe des FID werden flüchtige Kohlenwasserstoffe im Abgas bestimmt. Im Anhang befindet sich ein Dokument mit technischen Details zu dem Gerät.

4 Methodik

4.1 Zerkleinerung

Das Fichtenholz wird bereits zerkleinert angeliefert. Der Miscanthus wird gehäckselt angeliefert und folgend in den drei Zerkleinerungsmaschinen (siehe 3.1) auf die gewünschte Größe nachzerkleinert. Die Ergebnisse werden auf die Fasergrößenverteilung und Faserbeschaffenheit untersucht.

4.2 Mischen

Die Mischchargen, welche beim Versuchsaufbau 1 (siehe 3.4.1) verbrannt werden, werden mit Hilfe eines Betonmischers durchgeführt. Dieser kann nicht kontinuierlich betrieben werden, daher findet das Mischen im Batchbetrieb statt. Hierbei wird besonders die Reproduzierbarkeit der Mischung in den Vordergrund gestellt, um eine gleichbleibende Mischung zu ermöglichen. Die Trommel hat ein Fassungsvermögen von 125 Litern, in der Praxis bedeutet dies Mischungen von 12 Kilogramm Substrat. Der Ablauf des Mischens wird nachfolgend erklärt.

Zuerst werden 6 Kilogramm Miscanthusspäne dem Mischer beigefügt. Als nächster Schritt wird die gewünschte Menge des Additivs beigegeben, entsprechend einer Masse von 12 Kilogramm Pelletiergut. Daraufhin werden die beiden Komponenten im Betonmischer miteinander, ohne Beigabe von Wasser, vermischt. Nach ca. fünf Minuten wird der Mischer angehalten und die trocken gemischte Substanz mit dem fein vernebelten Wasser besprüht, wobei der Mischer durch einen manuellen Antrieb langsam in Rotation gebracht wird. Dadurch kann eine größere Fläche des Materials gleichmäßig mit Wasser versehen werden. Die Masse des eingesetzten Wassers ist abhängig vom gewünschten Wassergehalt des Pelletierguts und dem Wassergehalt der Ausgangssubstrate. Nachfolgend wird die angefeuchtete Masse ca. fünf Minuten lang vermischt. Das zugeführte Wasser dient auch zur Gewährleistung, dass das beigemischte Additiv an den Miscanthusspänen haften bleibt und somit die Adsorption der Additivpartikel gelingt. Es wurde dabei besonders viel Wert darauf gelegt, dass die Adsorption von Additiv am Miscanthus stattfinden kann, da gerade dieser zur Schlackebildung während der Verbrennung neigt. Abschließend werden 6 Kilogramm Fichtenspäne dazugegeben und für weitere fünf Minuten mit dem im Mischer bereits vorhandenen Gemisch aus Additiv und Miscanthusspänen vermischt.

Die Mischchargen, welche beim Versuchsaufbau 2 (siehe 3.4.2) verbrannt werden, werden in einem Futtermischwagen eins Lohnunternehmers gemischt. Hierfür wird ein Futtermischwagen der Firma *Stautmann*, Typ *Double 2100 K* verwendet, welcher über eine Zapfwelle von einem Schlepper angetrieben wird. Der Mischwagen wird über einen weiteren Schlepper befüllt, welcher mit einer Schaufel versehen ist. Die Einwaage der Holz- bzw. Miscanthusspäne

geschieht über die Waage, welche am Futtermischwagen installiert ist. Diese hat eine Genauigkeit von 5 kg. Das Additiv wird mit Eimern mit 10 l Fassungsvermögen während der Befüllung beigegeben. Dabei wird darauf geachtet, das Additiv möglichst weiträumig auf der Materialoberfläche im Futtermischwagen zu verteilen. Das Additiv wird auf einer Waage mit einer Genauigkeit von 2 g abgewogen.

4.3 Pelletierung

Das methodische Vorgehen ist dahingehend ausgelegt, dass zunächst ein geeigneter Betriebspunkt für die Pelletierung ermittelt wird. Dieser muss dokumentiert werden, so dass er reproduzierbar eingestellt werden kann. Im Weiteren wird das Pressgut auf die Materialeigenschaften, welche für die Pelletierung relevant sind, untersucht. Auch in diesem Fall muss die Mischung des Pressguts reproduzierbar sein. Darauf folgt die qualitative Beurteilung der produzierten Pellets. Hierbei erfolgt eine weitest mögliche Orientierung an den entsprechenden Anforderungen und Vorgehensweisen der DIN-Normen. Da die Zielsetzung im ersten Schritt die physikalischen Eigenschaften berücksichtigt, werden die Pellets der einzelnen Versuchschargen auf diese Eigenschaften untersucht und daraufhin eine Beurteilung der Ergebnisse getroffen. Aus diesen Ergebnissen leiten sich die Änderungen bezüglich des Betriebspunkts und der Mischung des Pressguts für die Folgeversuche ab.

Relevante Größen für den Betriebspunkt der Pelletierung:

- Massenstrom der Materialzugabe
- Massenstrom der Wasserzugabe (Konditionierung)
- Kollerdrehzahl
- Kollerspalt (Abstand zwischen Koller und Matrize)
- Matrizentemperatur

Relevante Größen für die Bewertung der Materialeigenschaften:

- Fasergrößenverteilung bei unterschiedlichen Zerkleinerungsverfahren
- Wassergehalt
- Aschegehalt

Relevante Größen für die Bewertung der Pelleteigenschaften:

- Wassergehalt
- Mechanische Festigkeit (Abrieb)
- Schüttdichte
- Feinanteil

- Aschegehalt
- Heizwert

4.4 Verbrennung

In den Verbrennungsversuchen sollen die Eigenschaften der Miscanthus-Mischpellets hinsichtlich ihrer Emissionen (CO, NO, Staub) und den brennstoffspezifischen Einflussgrößen auf das Abbrandverhalten, insbesondere das Ascheschmelzverhalten, untersucht werden. Dabei geht die Ermittlung der brennstoffspezifischen Kesseleinstellungen und die optimale Brennstoffmischung (Stichwort: Additive) den Versuchsreihen zur Erfassung der Emissionswerte vor. Die Entstehung von Schlacke im Kessel- bzw. Brennraum gilt es zu vermeiden. Das Vorhaben, einen normgerechten, sicheren und marktreifen Brennstoff (Misch-Pellet) aus Miscanthus zu erzeugen, ist das maßgebende Ziel.

Im Rahmen der ersten Verbrennungsversuche soll Nutzwärme und Emissionen ermittelt werden, die bei der Verbrennung der Pellets unter Volllastbedingungen entstanden sind. Dabei soll die Schlackenbildung betrachtet werden. Dafür werden im Laufe der Verbrennung der Pellets die Abgaskonzentrationen gemessen sowie die Staubkonzentration und die Wärmemenge ermittelt. Zur Ermittlung der Wärmemenge wird der Wärmemengenzähler alle fünf Minuten ausgelesen. Diese Daten werden neben den Daten der zugeführten Energie zur Berechnung des Wirkungsgrades genutzt. Die zugeführte Energie wird mit dem unter 3.4.1 aufgeführten Konzept zur Überwachung der Brennstoffzufuhr ermittelt. Dazu wird der Zählerstand in regelmäßigen Abständen notiert. Darüber hinaus wird die eingesetzte Brennstoffmenge zu Versuchsbeginn gewogen und die nach Versuchsende verbliebene Brennstoffmenge ebenfalls. Die Abgasmessungen werden über einen Zeitraum von 15 Minuten durchgeführt, ebenso wie die Staubmessungen. Während der Staubmessung ist das Abgasmessgerät in Reihe hinter das Staubmessgerät geschaltet (siehe Abbildung 19), somit kann die Sauerstoffmenge im Abgas ermittelt werden. Dies ist notwendig, um die Messwerte auf einen Bezugssauerstoffgehalt von 13 Vol-% umzurechnen. Die Abgasmesswerte werden alle fünf Sekunden an einen Rechner übermittelt. Aus den Messwerten werden Minutenmittelwerte gemittelt, welche dann auf den Bezugssauerstoff umgerechnet werden. Pro Verbrennungsversuch werden mindestens drei Staubmessungen und drei Abgasmessungen gemacht.

Zu Versuchsende wird die Asche gewogen und mittels Kalorimeter auf ihren Restenergiegehalt untersucht. Weiterhin wird die Beschaffenheit der Asche hinsichtlich Versinterungen optisch geprüft.

5 Versuchsdurchführung

5.1 Zerkleinerung

Die Zerkleinerung vom Miscanthus findet an den in Kapiel 3.1 aufgeführten Maschinen statt. Exemplarische Ergebnisse werden folgend aufgeführt.

Tabelle 15: Materialkennwerte des zerkleinerten Materials

Zerkleinerungsmechanismus	Wassergehalt w [% (w/w)]	Schüttdichte ρ_{Sch} [kg/m³]
Kollermühle	10,20	123,65
NZA	10,58	252,81
Zerfaserung	10,50	132,00

Weiterhin erfolgt für die drei Proben eine Partikelgrößenanalyse, deren prozentuale Ergebnisdaten im Diagramm der Abbildung 20 gegenübergestellt sind. Die Anteile sind in Massenprozent dargestellt.

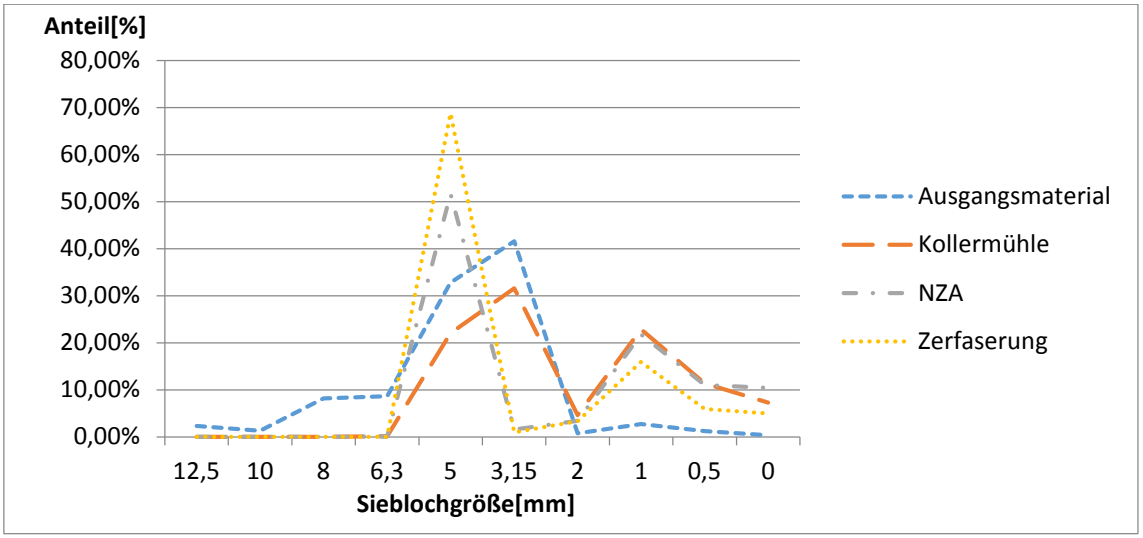


Abbildung 20: Partikelgrößenverteilung des zerkleinerten Materials, Anteile in Massenprozent [20]

Die Kurve der Partikelgrößenverteilung des Ausgangsmaterials ist als Referenzwert ebenfalls aufgetragen. Zur Veranschaulichung werden außerdem unter dem Mikroskop Ablichtungen von Partikeln einer repräsentativen Probe der einzelnen Zerkleinerungsmechanismen erstellt, welche in Abbildung 21 dargestellt sind.

Auffällig ist, dass die Verteilungskurve des in der Kollermühle zerkleinerten Materials einen sehr ähnlichen Verlauf im Vergleich zur Kurve des Ausgangsmaterials aufweist. Dies lässt sich auf die Gutbett-Beanspruchung zurückführen, welche bei diesem Verfahren die größte Zerkleinerungsarbeit leistet. Da die Partikel hierbei besonders durch die innere Reibung sowie durch die Reibung zwischen den Partikeln beansprucht werden, stellt sich diese dem Ausgangsmaterial ähnliche Verteilung ein. Kennzeichnend für das Material ist weiterhin eine relativ breite Streuung der Partikelfraktionen, wobei die

Hauptfraktion von 3,15 mm mit 31,58 % (w/w) einen wesentlich geringeren Anteil aufweist als bei den Vergleichsproben. Auch die folgenden Fraktionen zeugen mit 22,90 % (w/w) bei 1 mm und 22,09 % (w/w) bei 5 mm sowie 11,35 % (w/w) von der Dispersität des Materials. Die mikroskopischen Betrachtungen des Materials in *Abbildung 21* in Bild 1.1 und 1.2 machen deutlich, dass die Fasern durch die Kollermühle besonders gut aufgespalten wurden, was sich positiv auf die Bildung formschlüssiger Verbindungen auswirkt.

Das in der NZA zerkleinerte Material weist mit 51,64 % (w/w) der Hauptfraktion von 5 mm sowie 21,81 % (w/w) der ersten Nebenfraktion bei 1 mm Siebgröße ein homogeneres Bild auf. Allerdings belegen die Bilder 2.1 und 2.2 der *Abbildung 21* den hohen Anteil feiner Partikel von 11,03 % (w/w) bei 0,5 mm und 10,43 % (w/w) des Feinanteils <0,5 mm. Dies bewirkt auch die vergleichsweise hohe Schüttdichte von 252,81 kg/m^3.

Die Verteilungskurve des zerfaserten Materials zeigt mit einem Anteil der Hauptfraktion bei 5 mm von 68,81 % (w/w) und einem Anteil von 15,93 % (w/w) der ersten Nebenfraktion bei 1 mm die kleinste Spreizung der Partikelgrößen und weist somit die größte Homogenität auf. Allerdings illustrieren die in Abbildung 21 auf den Bildern 3.1 und 3.2 ersichtlichen Partikel eine geringe Aufspleißung des Materials, vermutlich bedingt durch den längs zur Faser wirkenden Mechanismus. [20]

Abbildung 21: Mikroskopische Aufnahmen des zerkleinerten Materials [20]

Legende:

1.x Partikel zerkleinert in der Kollermühle

2.x Partikel zerkleinert in der NZA

3.x Partikel zerkleinert in der Zerfaserung

5.2 Pelletierung

Der Massenstrom des Pressguts ist so eingestellt, dass die Matrize ständig bedeckt ist und somit ein guter Durchsatz erreicht wird. Die Wasserzugabe wurde auf 0 g/min reduziert, da durch die Mischung von unterschiedlichen Materialfeuchten der Wassergehalt des Pressguts optimal eingestellt wurde. Dieser Wassergehalt liegt bei 15 % (w/w). Die Kollerdrehzahl ist mir 110 1/min optimal, es treten hier wenige Lastspitzen auf bei einem guten Durchsatz. Wegen der geringen Leistung der Presse ist der Kollerspalt sehr gering, so werden die Lastspitzen minimal gehalten. Die Matrizentemperatur ist ab 100°C optimal, hier beginnt das Wasser zu kochen, so wird das in den Zellen gebundene Lignin aus der Zelle diffundiert und es trägt zur Versiegelung der Pellets bei. Dies ist an einer glasigen Oberfläche der Pellets zu erkennen. Die durchschnittliche Pressenleistung bei diesem Betriebspunkt liegt bei ca. 1,75 kW ± 0,3 kW. Der Durchsatz wird auf ca. 20 kg/h eingeschätzt.

Ein Pellet aus 100 % Miscanthus erfüllt die angestrebten physikalischen Eigenschaften nicht. Daher werden zu Beginn des Projekts folgende Mischungen untersucht:

Tabelle 16: Untersuchte Mischungsverhältnisse in Vorversuchen

		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Miscanthus (w/w)]	[%	50	50	25	50	50	66	80	66	60
Paulownia (w/w)]	[%	50		25			33	20		40
Pappel (w/w)]	[%		50	25					33	
Weide (w/w)]	[%			25						
Reynoutria (w/w)]	[%				50					
Robinie (w/w)]	[%					50				

Weiterhin wurden als Additive Trester und Stärke untersucht, es wurden 1 % (w/w) und 3 % (w/w) dem Pressgut zugefügt.

Nach dem Verlassen der Presse kühlen die Pellets auf einen Lochblech ab.

Bei der Pelletierung lassen sich nach der Pelletanalyse folgende Ergebnisse festhalten:

- Bestes Mischungsverhältnis: M9 – 60 % (w/w) Miscanthus, 40 % (w/w) Paulownia
- Bei einem Wassergehalt von 15 % (w/w) des Pressguts wurden die besten Pellets produziert.
- Die im Vorversuch erzeugten Pellets halten bis auf den Aschegehalt alle physikalischen Eigenschaften ein, welche die Norm vorgibt.

- Als Additiv eignet sich sowohl Trester als auch Stärke zur Steigerung der mechanischen Festigkeit.
- Es genügt die Beigabe von 1 % (w/w) des Additivs.
- Stärke als Additiv wirkt sich nicht negativ auf den Aschegehalt aus, da diese zu 100 % aus organischen Stoffen besteht.

Für die weiteren Verbrennungsversuche werden weitere Pellet-Mischungen optimiert und untersucht. Hierzu werden folgende Zusammensetzungen der Pellets verwendet. Dies ist im unteren Abbild tabellarisch aufgelistet.

Tabelle 17: Zusammensetzung der Pelletmischungen, Versuchsreihe 1

Versuch Nr.	Zusammensetzung [% (w/w)]				
	Miscanthus	Paulownia	Fichte	Trester	Kaolin
1	59,5	39,5	-	1	-
2	49,5	-	49,5	1	-
3	49,5	-	49,5	1	-

Die Reduktion des Miscanthusanteils ist auf die Ergebnisse der Verbrennungsversuche zurückzuführen.

Die Pelletierung an der Kahl 33-390 hat ergeben, dass eine Matrizentemperatur von 92 °C nicht überschritten wird. Aufgrund der Priorität der in diesem Arbeitspaket beinhalteten Verbrennungsversuche konnte diese Tatsache nicht weiter betrachtet werden.

Für die Pelletierung an der Presse 33-390 wird die Matrize mit dem Bohrungsdurchmesser von 6 mm und einer Presskanallänge von 24 mm, also mit einem Pressverhältnis 1:4 eingesetzt. An der Laborpresse werden die Versuche mit der Matrize mit einem Bohrungsdurchmesser von 6 mm und einer Presskanallänge von 27 mm, also mit einem Pressverhältnis 1:4,5 durchgeführt.

Weitere Einzelheiten zur Pelletierung in diesem Projekt sind dem Abschlussbericht vom Teilprojekt 1 der Universität Bonn zu entnehmen.

5.3 Verbrennung

Die Versuchsdurchführung der Verbrennung ist in sieben Versuchsreihen gegliedert. Am Ende jeder Versuchsreihe wird eine Diskussion in Form einer Ergebnisreflektion durchgeführt.

5.3.1 Versuchchsreihe 1

Die erste Versuchsreihe findet am TwinHeat M20i statt (siehe 3.4.1). Ziel der ersten Versuchsreihe ist, die Kesseleinstellungen soweit zu optimieren, dass der Kessel auf Nennleistung betrieben wird und die Temperaturen im Feuerraum unterhalb der Ascheerweichungstemperatur des Brennstoffs gehalten werden.

Es werden vier Versuche durchgeführt, mit den in Tabelle 18 aufgeführten Brennstoffmischungen. Es wird Fichte als Ersatz für Paulownia gewählt, da diese in großen Mengen verfügbar ist und die verbrennungstechnischen Eigenschaften hinsichtlich Ascheerweichungspunkt, Aschegehalt und Heizwert bessere Werte aufweist. Die ermittelten Brennstoffeigenschaften der verwendeten Pellets sind in Tabelle 19 aufgeführt.

Tabelle 18: Brennstoffzusammensetzungen, Versuchsreihe 1

Versuch Nr.	Zusammensetzung [% (w/w)]				
	Miscantus	Paulownia	Fichte	Trester	Kaolin
1	59,5	39,5	-	1	-
2	49,5	-	49,5	1	-
3	49,5	-	49,5	1	-
4	49,25	-	49,25	1	0,5

Wie der *Abbildung* 22 zu entnehmen ist, liegt die Ascheerweichungstemperatur des Brennstoffs mit 0,5 % (w/w) Kaolin oberhalb des Grenzwerts von ENplusA2 Pellets (1100 °C), und zwar bei ca. 1270 °C. Die in *Abbildung* 22 dargestellten Ergebnisse basieren auf normgerechten Untersuchungen der Universität Bonn mittels Ascheschmelzbank. Daraus resultiert die Wahl des Brennstoffgemischs, welches im vierten Versuch eingesetzt wird.

Tabelle 19: Brennstoffkennwerte, Versuchsreihe 1

Brennstoffart	*Wassergehalt [% (w/w)]*	*Aschegehalt [% (w/w)]*	*Heizwert [kWh/kg]*
Mischpellets (Miscanthus, Paulownia, Trester)	6,27	2,05	4,72
Mischpellets (Miscanthus, Fichte, Trester)	6,62	1,44	4,75
Mischpellets (Miscanthus, Fichte, Trester, Kaolin)	6,65	1,88	4,78

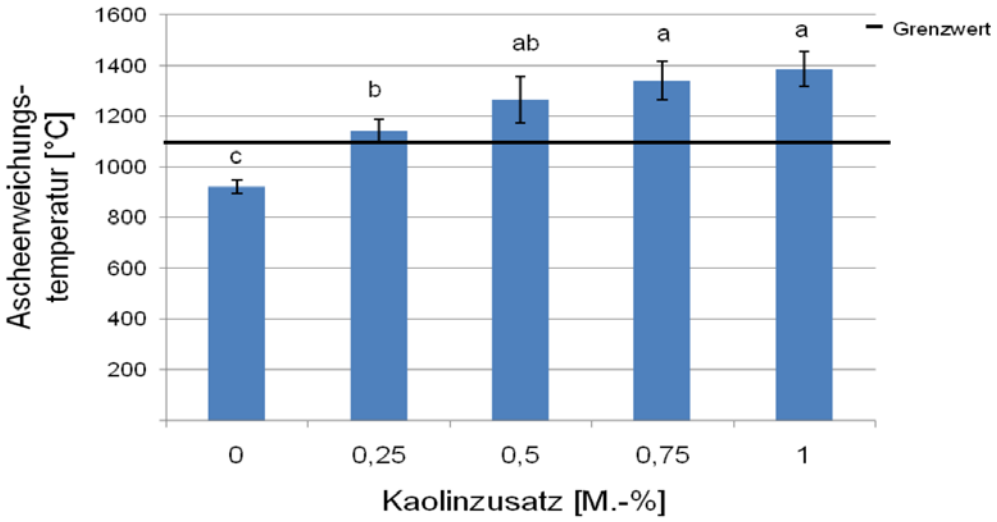


Abbildung 22: Mittelwerte der Ascheerweichungstemperaturen von verschiedenen Miscanthus-Paulownia- Gemischformen mit unterschiedlich hohen Kaolinzugabemengen in Relation zu dem Grenzwert von ENplusA2 Pellets. Signifikanz der Ascheerweichungstemperaturen geprüft mit Tukey-Test; a - c (p≤0,05), n=3 [21]

In Abbildung 23 sind die Werte der Emissions- und Leistungsmessung aufgeführt. Die Kesseleinstellungen der jeweiligen Versuche sind der Beschriftung der einzelnen Versuche zu entnehmen.

Die Abgasemissionen bezüglich CO und NO_x verhalten sich ab dem zweiten Versuch sehr stabil mit niedrigen Werten. Der Grenzwert der 1. BImschV. (400 mg/m³ bei 13 Vol-% O_2)wird deutlich unterschritten, der Grenzwert für die Staubemissionen (20 mg/m³ bei 13 Vol.% O_2) wird durchschnittlich eingehalten. Die Änderungen der Brennstoffzufuhr im zweiten Versuch haben die Leistung des Kessels zwar um 2 kW gesenkt, aber mit durchschnittlich 30,2 kW sind Reduktion der Schneckenlaufzeit sowie Verlängerung der Schneckenpause nicht ausreichend gewählt, um die Leistung auf Nennleistung zu drosseln. Im dritten Versuch ist erstmals der gewollte Sauerstoffüberschuss um 1 Vol-% erhöht, um die hohen Temperaturen im Feuerraum zu senken. Die Schneckenlaufzeit ist wieder etwas erhöht, um die mit dem erhöhten Sauerstoffüberschuss verbundenen Verluste zu kompensieren. Der Einfluss auf die Kesselleistung ist allerdings zu gering, die Kesselleistung ist mit

durchschnittlich 30 kW oberhalb des Sollwerts. Die Leistungsschwankungen haben abgenommen, der Leistungsverlauf ist konstanter. Eine weitere Anpassung der Einstellgrößen der Brennstoffzufuhr wird im vierten Versuch vorgenommen, bei gleichbleibendem Sauerstoffüberschuss. Die Verlängerung der Schneckenpausen führt zu einer Leistungsreduktion, welche zur Einhaltung der Nennleistung von 29 kW führt.

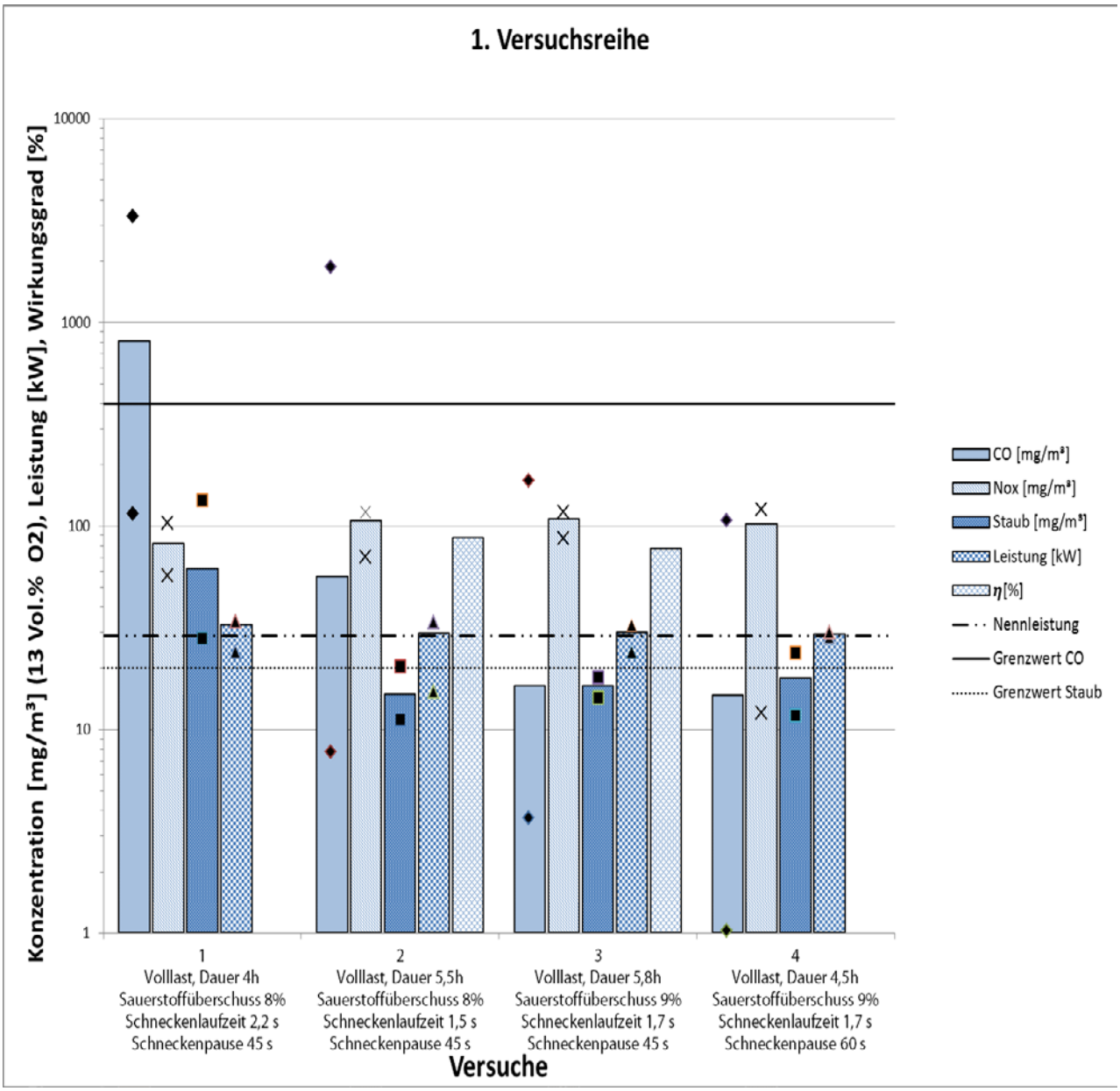


Abbildung 23:1. Versuchsreihe; Vergleich der Emissionsmessungen, Leistung und Wirkungsgrad; Minimal- und Maximalwerte punktförmig dargestellt; logarithmische Darstellung der Y-Achse; Grenzwerte der 1. BImSchV.

- **Ergebnisreflexion**

Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe können als zielführend hinsichtlich einer stabilen Nennleistung bewertet werden. Während in den ersten 3 Versuchen noch starke Schwankungen der Min./Max.werte zu verzeichnen sind, wird im vierten Versuch die Nennleistung schließlich stabil gehalten. Somit

haben die Veränderung der Brennstoffzufuhr und die Erhöhung des gewollten Sauerstoffüberschusses die Zielvorgabe, den Kessel bei Nennleistung zu betreiben, erreicht.

Die Temperaturabsenkung im Feuerraum durch einen erhöhten Luftvolumenstrom hat sich nicht merkbar auf die Feuerraumtemperatur ausgewirkt. Die Beimischung von 0,5 % (w/w) Kaolin hat während der Verbrennung im Kessel keine merkbare Änderung des Ascheerweichungspunkts erbracht. Alle Versuche kamen auf Grund von Verschlackung des Brennrohrs zum Erliegen, da die Schlacke soweit verdichtet vorlag, dass sie nicht mehr vom nachrückenden Brennstoff aus dem Brennrohr geschoben wird (vgl. Abbildung 24). Somit sind die Temperaturen im Feuerraum zu hoch bzw. der Ascheerweichungspunkt des Brennstoffs liegt zu nieder.

Die Kesseleinstellungen werden für die nächste Versuchsreihe beibehalten und sind in Tabelle 20 abzulesen. Von einer weiteren Erhöhung des gewollten Sauerstoffüberschusses wird abgesehen, da hierdurch der Wirkungsgrad weiter sinken wird. Daher ist in der nächsten Versuchsreihe eine Untersuchung zweier Additive vorgesehen.

Tabelle 20: Kesseleinstellungen, Werkseinstellungen und manuell angepasste Parameter

	Werkseinstellungen*	manuell eingestellte Parameter
Sollwert O2 [Vol-%]	8	9
Schneckenlaufzeit [s]	2,2	1,7
Schneckenpause [s]	45	60

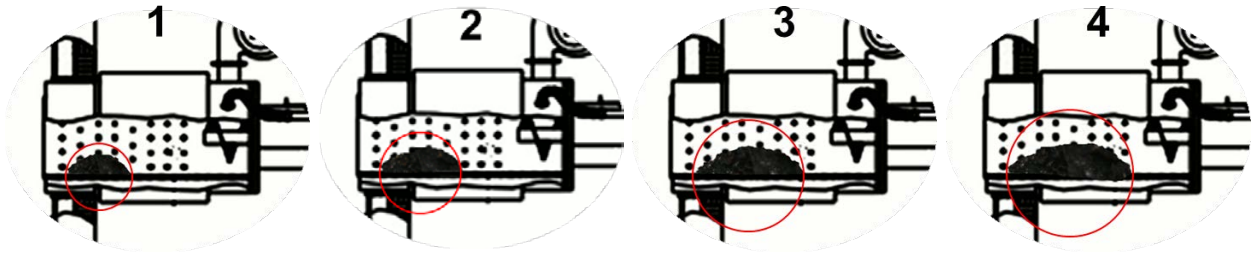


Abbildung 24: Schematische Darstellung des Ablaufs der Verschlackung vom Brennrohr [17]

5.3.2 Versuchsreihe 2

Die zweite Versuchsreihe findet, wie die erste, am TwinHeat M20i statt (siehe 3.4.1). Ziel dieser Versuchsreihe ist es, zwei Additive auf ihre jeweilige Eignung zu untersuchen. Die Versuche finden mit gleichbleibenden Kesseleinstellungen statt (vgl. Tabelle 20), um eine Vergleichbarkeit zu garantieren.

Es werden drei Verbrennungsversuche durchgeführt, in denen die Additive Calciumhydroxid und Kaolin verglichen werden. Als Referenz wird eine Verbrennung mit Pellets, die frei von Additiven sind, durchgeführt. Der Additivanteil wird mit 2 % (w/w) hoch angesetzt, um sichtbare Unterschiede zu den Verbrennungen der ersten Versuchsreihe zu erzielen. Die Zusammensetzung der Pellets ist in Tabelle 21 aufgeführt. Die verbrennungstechnisch relevanten Brennstoffeigenschaften sind Tabelle 22 zu entnehmen. Auf die Beigabe von Trester wird verzichtet, um Wechselwirkungen zwischen den Additiven auszuschließen und um eine daraus eventuell resultierende Inhomogenität im Brennstoffgemisch zu minimieren.

Tabelle 21: Brennstoffzusammensetzung, Versuchsreihe 2

Versuch Nr.	Zusammensetzung [% (w/w)]			
	Miscantus	Fichte	Kaolin	Calciumhydroxid
1	49	49	2	
2	49	49		2
3	50	50		

Die Spezifikationen der Additive sind dem Anhang 2 und Anhang 3 zu entnehmen. Bei den Additiven handelt es sich um Pharmaware mit hohem Reinheitsgrad.

Tabelle 22: Brennstoffkennwerte, Versuchsreihe 2

Brennstoffart	*Wassergehalt* *[% (w/w)]*	*Aschegehalt* *[% (w/w)]*	*Heizwert* *[kWh/kg]*
Mischpellets (2% Kaolin)	7,02	2,79	4,69
Mischpellets (2% Calciumhydroxid)	5,28	3,82	4,74
Mischpellets (Additivfrei)	5,02	1,33	4,94

Auffällig ist der erhöhte Aschegehalt der Pellets mit Additivbeigabe. Dieser Anstieg ist darauf zurückzuführen, dass es mineralische Additive sind. Der Aschegehalt der Pellets mit Kaolinanteil liegt leicht unter dem der Pellets mit Calciumhydroxid. Dies liegt am Glühverlust von 15 Vol. % des Kaolins (vgl. Anhang 3).

Folgend werden in Abbildung 25 die Ergebnisse zusammengefasst, die Beurteilung der Verschlackung ist als Bemerkung unterhalb der Versuchsnummer aufgeführt.

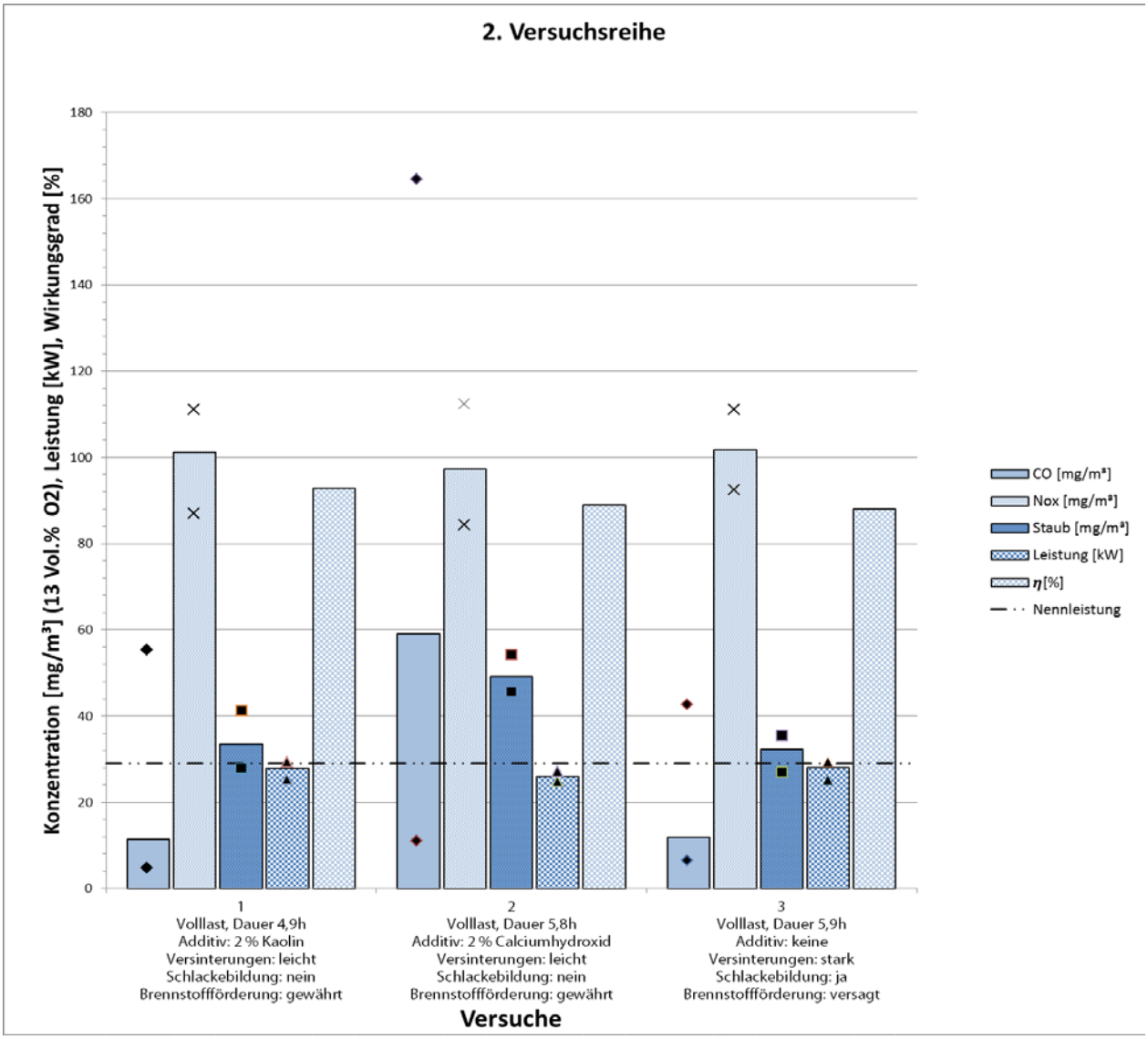


Abbildung 25: 2. Versuchsreihe; Vergleich der Emissionsmessungen, Leistung und Wirkungsgrad; Minimal- und Maximalwerte punktförmig dargestellt;

Hinsichtlich der Emissionswerte werden die Grenzwerte von CO bei allen Verbrennungen eingehalten. Allerdings sind bei den CO-Emissionen im zweiten Versuch Schwankungen bis 160 mg/m³ zu verzeichnen (vgl. Anhang 6), die Mittelwerte sind ca. 40 mg/m³ höher als die Mittelwerte der Versuche 1 und 3. Auch die Staubemissionen sind im Versuch 2 mit ca. 50 mg/m³ um 20 mg/m³ höher gegenüber den Vergleichsversuchen. Die Leistung ist mit 26 kW im Versuch 2 etwas unterhalb der Nennleistung. Die Versuche 1 und 3 zeigen sehr ähnliche Emissionswerte auf und die Nennleistung wird gut eingehalten. Die Wirkungsgrade der drei Versuche weisen die gleiche Tendenz auf. Der Brennstoff mit Kaolin erzielt nahezu den gleichen Wirkungsgrad wie der der Referenzpellets, der Brennstoff mit Calciumhydroxid liegt etwas unterhalb.

Bei allen Versuchen liegt die Feuerraumtemperatur oberhalb des Ascheerweichungspunkts der Brennstoffe. Jedoch weisen die Brennstoffe mit Additivanteil ein anderes Verschlackungsverhalten auf als der Referenzbrennstoff. Die Asche des Brennstoffs mit Kaolinanteil weist leichte Versinterungen auf, welche sich nicht zu Schlacke verdichtet haben und sich durch eine poröse Struktur auszeichnen. Der Aschekern, welcher sich durch die Versinterungen bildet, wird problemlos vom nachrückenden Brennstoff aus dem Feuerraum geschoben (siehe Abbildung 29). Der Ascherückstand des Brennstoffs mit Calciumhydroxidanteil zeigt eine ähnliche Struktur. Es bildet sich ein poröser Kern, welcher vom nachrückenden Brennstoff aus den Feuerraum geschoben wird (siehe Abbildung 29). Im Unterschied zur Asche des ersten Versuchs ist die Asche des zweiten Versuchs weniger versintert und löst sich bei Berührung zu großen Anteilen zu Pulver auf. Die Asche ist frei von Schlacke. Es sind vereinzelte blau-grüne Verfärbungen in der der Asche und Verfärbungen im Röhrenwärmetauscher des Kessels festzustellen. Hier ist ein weißer pulvriger Belag zu verzeichnen (siehe Abbildung 29). Die Asche des Referenzbrennstoffs bildet einen kompakten Kern im Brennrohr, welcher soweit versintert ist, dass Schlacke entsteht (siehe Abbildung 29). Dieser Schlackekern wird nicht vom nachrückenden Brennstoff aus dem Feuerraum geschoben, dadurch verlagert sich die Verbrennung im Brennrohr nach hinten Richtung Pelletspeicher (vgl. Abbildung 24). Dies führt zu einem Abschalten des Kessels.

- **Ergebnisreflexion**

Die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe zeigen bei den Brennstoffen mit Additivbeigabe eine deutliche Änderung im Verschlackungsverhalten. Zielführend haben die Versuche gezeigt, dass eine Verbrennung mit den Mischpellets möglich ist. Die Verbrennungen haben weiterhin gezeigt, dass sich beim Additiv Calciumhydroxid die Emissionen von CO und Staub erhöhen. Bei Kaolin sind die Emissionen nahezu identisch zu denen des Referenzbrennstoffs. Trotz der leichten Versinterungen bei den additivierten Mischpellets haben sich über den Versuchszeitraum von ca. sechs Stunden keine negativen Auswirkungen abgezeichnet, die eine längerfristige Verbrennung verhindert hätten. Die Schwankungen der CO-Emissionen und die Ablagerunen im Röhrenwärmetauscher bei der zweiten Verbrennung lassen das Additiv Calciumhydroxid gegenüber Kaolin als weniger geeignet erscheinen.

Es gilt, die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe in einer weiteren Versuchsreihe zu verifizieren. Weiterhin wird eine Änderung der Additivmengen vorgesehen. Zur Beurteilung der Ergebnisse soll zusätzlich eine Messung der Feuerraumtemperatur stattfinden. Somit könnten die Ergebnisse der Ascheerweichungstemperaturen aus dem Laborversuch auf der Ascheschmelzbank mit den Ascheschmelzverhalten im Kessel abgeglichen werden.

Abbildung 29: Asche des ersten Versuchs, Versuchsreihe 2, [13]

Abbildung 29: Asche des zweiten Versuchs, Versuchsreihe 2, [13]

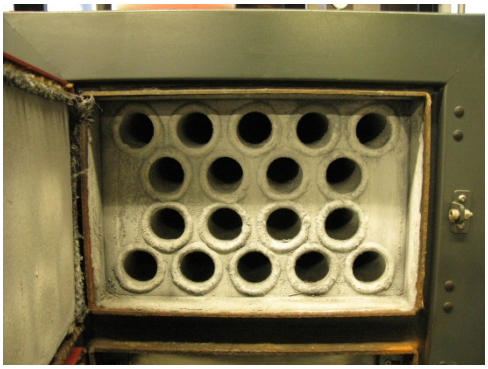


Abbildung 29: Rückstände im Wärmetauscher nach zweiten Versuch, Versuchsreihe 2, [13]

Abbildung 29: Asche des dritten Versuchs, Versuchsreihe 2, [13]

5.3.3 Versuchsreihe 3

Es wird im Folgenden das Ergebnis der zweiten Versuchsreihe verifiziert und die Beimischungsmenge variiert, der Versuchsaufbau bleibt unverändert (siehe 3.4.1). Ziel ist es das geeignete Additiv sowie die optimale Beimischungsmenge zu bestimmen. Unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit war das gesetzte Ziel, die zugesetzte Menge auf das notwendige Maß zu beschränken, um Kosten einzusparen. Zusätzlich werden Temperaturmessungen im Brennraum durchgeführt. Der Messaufbau ist in Kapitel 3.4.1 aufgeführt.

Die Brennstoffzusammensetzungen der fünf durchgeführten Versuche sind in Tabelle 23 aufgeführt. Bereits nach dem vierten Versuch können, auf Basis der Datengrundlage, weitere Versuche mit dem Additiv Calciumhydroxid eingestellt werden.

Tabelle 23: Brennstoffzusammensetzung, Versuchsreihe 3

Versuch Nr.	Zusammensetzung [% (w/w)]			
	Miscanthus	Fichte	Kaolin	Calciumhydroxid
1	49	49	2	
2	49	49		2
3	49,5	49,5	1	
4	49,5	49,5		1
5	49,25	49,25	1,5	

Es werden weiterhin die Additive verwendet, welche bereits in der Versuchsreihe 2 beigemischt wurden. Somit ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse ermöglicht.

Die Brennstoffkennwerte in Tabelle 24 zeigen keine weiteren Auffälligkeiten. Der Zusammenhang zwischen Aschegehalt und Additivanteil werden deutlich dargestellt.

Tabelle 24: Brennstoffkennwerte, Versuchsreihe 3

Brennstoffart	*Wassergehalt* *[% (w/w)]*	*Aschegehalt* *[% (w/w)]*	*Heizwert* *[kWh/kg]*
Mischpellets (2% Kaolin)	5,36	3,18	4,76
Mischpellets (2% Calciumhydroxid)	7,41	3,99	4,68
Mischpellets (1% Kaolin)	5,74	2,23	4,81
Mischpellets (1% Calciumhydroxid)	7,35	2,65	4,71
Mischpellets (1,5% Kaolin)	9,4	2,82	4,57

Die Darstellung der Ergebnisse im folgenden Diagramm zeigt im fünften Versuch zusätzlich die Mittelwerte der gemessenen unverbrannten Kohlenwasserstoffe. die Beurteilung der Verschlackung ist schriftlich unterhalb der Versuchsnummer aufgeführt.

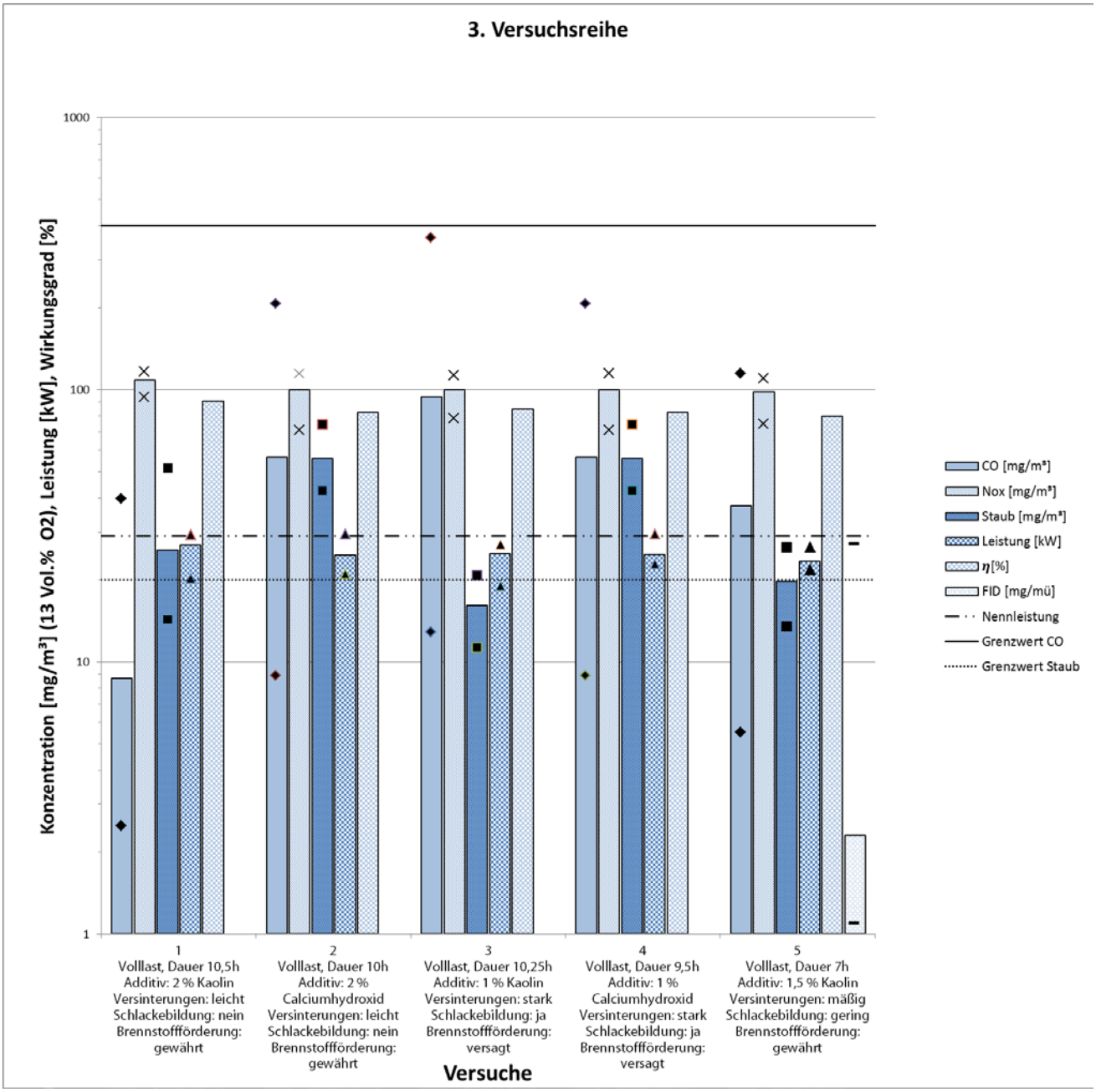


Abbildung 30: 3. Versuchsreihe; Vergleich der Emissionsmessungen, Leistung und Wirkungsgrad; Minimal- und Maximalwerte punktförmig dargestellt; logarithmische Darstellung der Y-Achse; Grenzwerte der 1. BImSchV.

Im Vergleich der Mischpellets mit Kaolin zu den Mischpellets mit Calciumhydroxid ist deutlich, dass Mischpellets mit Kaolin geringere Staubemissionen aufweisen. Ebenso sind die Schwankungen der CO-Emissionen geringer, dies lässt auf eine stabilere Verbrennung rückfolgern. Auch die aus Versuchsreihe 2 beobachteten weißen Ablagerungen sind nach den Verbrennungen der Mischpellets mit Calciumhydroxid im Kessel zu beobachten. Im dritten und vierten Versuch kam es aufgrund zu hoher

Schlackebildung zu einem Versuchsabbruch. Der nachrückende Brennstoff konnte die versinterte Asche nicht mehr aus dem Brennraumschieben. In beiden Versuchen steigen die CO-Emissionen am Versuchsende deutlich an (vgl. Anhang 7). Der fünfte Versuch ist störungsfrei verlaufen, die entstandenen Versinterungen sind porös (vgl. Abbildung 31) und lassen sich problemfrei von nachrückendem Brennstoff aus der Brennkammer schieben. Sowohl die CO-Emissionen als auch die Staubemissionen fallen gering aus. Die Menge an unverbrannten Kohlenstoffen fällt mit durchschnittlich 2,3 mg org. C/m^3 gering aus. Die niedrige Leistung der Versuche 3, 4 und 5 und der damit verbundene geringe Wirkungsgrad sind auf die Kesseleinstellungen zurückzuführen. Von einer Anpassung wird im Sinne einer Vergleichbarkeit abgesehen.

Abbildung 31: Ascherückstand des fünften Versuchs, Versuchsreihe 3

Das Ergebnis der Temperaturmessung ist in Tabelle 25 aufgeführt. Die Messungen mit dem Thermoelement Typ K sind vorzeitig beendet worden, da die Temperaturen im Brennrohr über der Temperaturbeständigkeit von 1200 °C liegen.

Tabelle 25: Brennraumtemperatur, Mittelwerte Messpunkt 1, Grenzwert Messpunkt 2

Messpunkt	Temperatur [°C]
Messpunkt 1 - Thermoelement Typ S	978
Messpunkt 2 - Thermoelement Typ K	> 1200

- **Ergebnisreflexion**

Die starken Schwankungen der CO-Emissionen, die erhöhten Staubemissionen und die Ablagerungen im Kessel bei den Mischpellets mit Calciumhydroxid lassen Calciumhydroxid im Vergleich zu Kaolin als Additiv ungeeigneter erscheinen. Der Einfluss auf das Ascheschmelzverhalten ist bei den durchgeführten Versuchen nahezu gleich. Somit wird nach dem vierten

Versuch Kaolin als das geeignete Additiv gewählt. Dieses hat weiterhin die Vorteile, dass es unbedenklich ist für Gesundheit und Umwelt und dass es in unreinerer Form wesentlich preisgünstiger angeboten wird, verglichen zu Additiven, welche von Pharmaanbietern bezogen werden müssen. Dies begünstigt die ökonomische Konkurrenzfähigkeit von Mischpellets zu konventionellen Pellets.

Auf Basis der Ergebnisse des fünften Versuchs wird der optimale Anteil an Kaolin mit 1,5 % (w/w) für die weiteren Versuche festgelegt. Eine feinere Anpassung ist in einer weiteren Versuchsreihe durchzuführen. Der Einsatz vom kostengünstigeren, unreineren Kaolin macht dies aufgrund der abweichenden Eigenschaften ohnehin notwendig.

Weiterhin ist auf Basis der Temperaturmessung festzuhalten, dass im Feuerraum des Kessels Temperaturen >1200 °C gemessen wurden. Dieses relativ hohe Temperaturniveau lässt darauf schließen, dass ein Brennstoff, welcher in diesem Kessel nur geringfügig versintert, auch in anderen Kesseln einsetzbar wäre, da in üblichen Kesseln Temperaturen von 1200 °C im Brennraum nicht überschritten werden sollten.

Bei der Betrachtung der Versuchsergebnisse stellt sich die Frage, inwieweit die im Labor ermittelten Ascheerweichungstemperaturen übertragbar sind auf das Ascheerweichungsverhalten während des Betriebs im Kessel. Der im Labor bestimmte Ascheerweichungspunkt von Mischpellets mit 1 % (w/w) Kaolin liegt bei ca. 1390 °C (vgl. Abbildung 22). Im Praxisversuch kam es bei diesem Mischungsverhältnis zu starken Versinterungen, der Brennraum wurde mit Schlacke zugesetzt. Die Unterschiede zwischen dem Ascheerweichungsverhalten im Labor und dem im Praxisversuch werden in diesem Projekt nicht näher untersucht, sind aber für weitere Forschung von Interesse.

Mit den Ergebnissen des fünften Versuchs ist das Ziel der dritten Versuchsreihe erreicht. Es gilt nun, diese Ergebnisse zu verifizieren und einen Vergleichsversuch mit einem kostengünstigeren Kaolin mit ausreichendem Reinheitsgrad durchzuführen.

5.3.4 Versuchsreihe 4

Es werden die Ergebnisse des letzten Versuchs der dritten Versuchsreihe verifiziert, die Versuche finden am Versuchsaufbau 1 statt (siehe 3.4.1). Abschließend wird ein Vergleichsversuch mit einem kostengünstigeren Kaolin durchgeführt. Es ist zu untersuchen, ob aus den geringeren Reinheitsgraden eine höhere Beimischmenge resultiert.

Wie in Tabelle 26 ersichtlich, ist die Brennstoffzusammensetzung in allen drei Versuchen identisch. Es handelt sich bei den Versuchen 1 und 2 um die gleiche Brennstoffcharge, in Versuch 3 handelt es sich um die gleichen Mischungsverhältnisse, als Additiv wird Kaolin M20 eingesetzt. Die Spezifikationen von Kaolin M20 sind Anhang 4 zu entnehmen, die Brennstoffkennwerte der beiden Brennstoffchargen sind Tabelle 27 zu entnehmen.

Tabelle 26: Brennstoffzusammensetzung, Versuchsreihe 4

Versuch Nr.	Zusammensetzung [% (w/w)]		
	Miscanthus	Fichte	Kaolin
1	49,25	49,25	1,5
2	49,25	49,25	1,5
3	49,25	49,25	1,5

Tabelle 27: Brennstoffkennwerte, Versuchsreihe 4

Brennstoffart	*Wassergehalt* *[% (w/w)]*	*Aschegehalt* *[% (w/w)]*	*Heizwert* *[kWh/kg]*
Mischpellets (1,5 % Kaolin)	7,76	2,9	4,66
Mischpellets (1,5 % Kaolin M20)	7,56	3,08	4,61

Der minimal erhöhte Aschegehalt der Mischpellets mit Kaolin M20 liegt am geringeren Reinheitsgrad von Kaolin M20 gegenüber dem Kaolin für pharmazeutische Zwecke. Das Kaolin M20 hat einen Glühverlust von 3,2 % (w/w) im Gegensatz zu 15 % (w/w) beim reinen Kaolin.

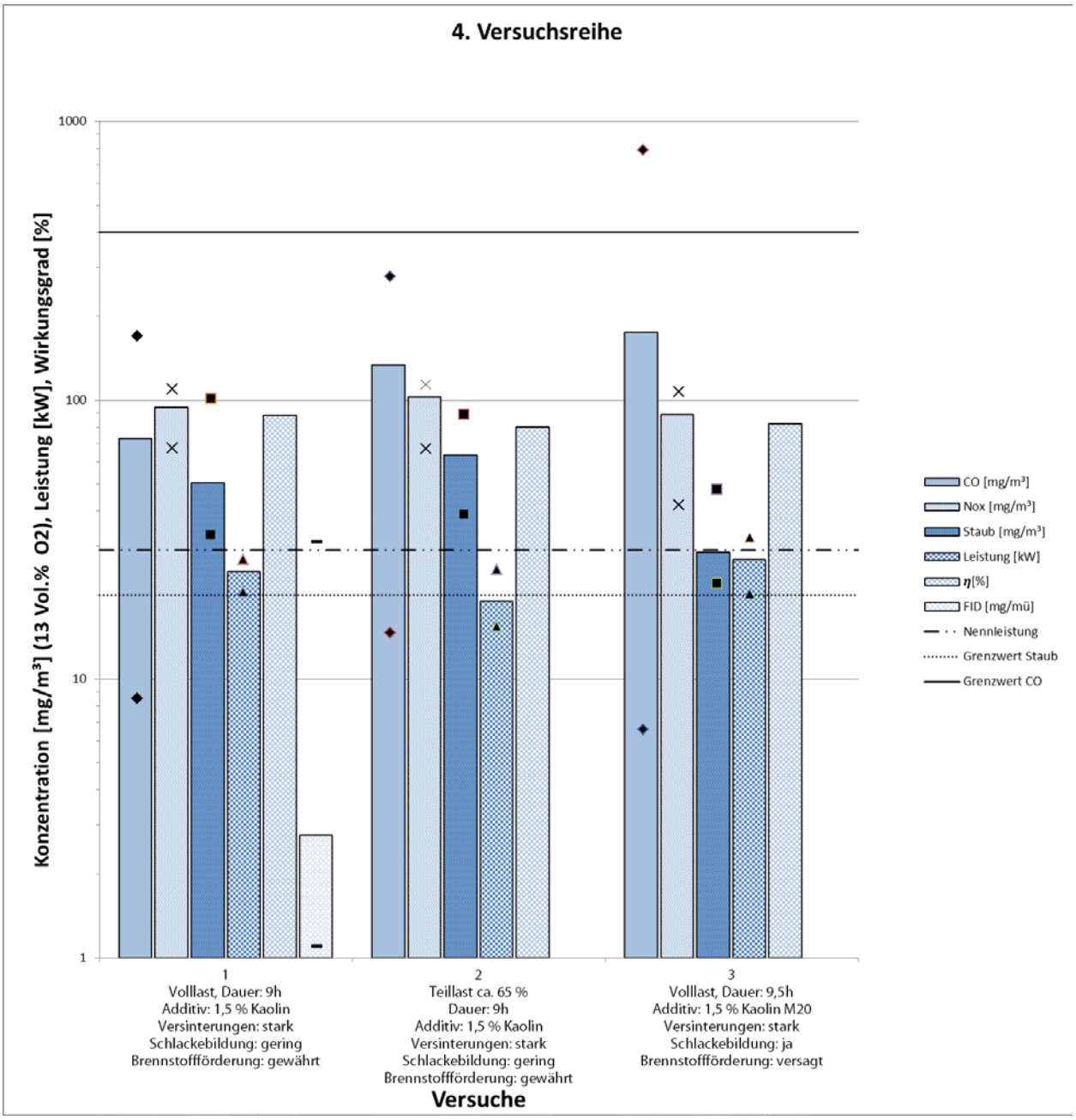


Abbildung 32: 4. Versuchsreihe; Vergleich der Emissionsmessungen, Leistung und Wirkungsgrad; Minimal- und Maximalwerte punktförmig dargestellt; logarithmische Darstellung der Y-Achse; Grenzwerte der 1. BImSchV.

Der Vergleich (siehe Abbildung 32) der durchgeführten Verbrennungen zeigt die gemessenen Emissionen, die Leistung und den berechneten Wirkungsgrad. Die Kesseleinstellungen sind im zweiten Versuch geändert, um das Teillastverhalten zu untersuchen. Die Schneckenlaufzeit ist auf 1,2 Sekunden verkürzt. Im dritten Versuch sind die Kesseleinstellungen geändert, um eine höhere Kesselleistung zu erzielen. Die Schneckenlaufzeit ist auf 2 Sekunden eingestellt und die Schneckenpause auf 45 Sekunden verkürzt.

Der erste Versuch, welcher die Ergebnisse des letzten Versuchs der dritten Versuchsreihe verifizieren sollte, zeigt eine durchschnittliche Konzentration von 72 mg/m³ CO und ca. 52 mg/m³ Staub. Damit liegen die Werte über denen der Vergleichsverbrennung, auch die Maximalwerte sind deutlich höher. Die

unverbrannten Kohlenstoffe sind mit durchschnittlich 2,75 mg org. C/m³ ähnlich gering wie die des Vergleichsversuchs. Die Versinterungen der Asche sind stärker als im fünften Versuch der dritten Versuchsreihe (siehe Abbildung 35). Beim zweiten Versuch handelt es sich um einen Teillastversuch. Auffällig sind die höheren Emissionen von CO, NOx und Staub. Die CO-Emissionen zeigen starke Schwankungen (vgl. Anhang 8). Der dritte Versuch zeigt durchschnittlich deutlich erhöhte CO-Konzentrationen, welche den starken Schwankungen während des Versuchs verschuldet sind (vgl. Anhang 8). Die Staubemissionen fallen mit durchschnittlich 28 mg/m³ geringer aus als die des ersten Versuchs. Die Leistung wird durch die geänderte Kesseleinstellung um durchschnittlich 2 kW angehoben. Bei diesem Versuch sind starke Versinterungen zu verzeichnen (siehe Abbildung 35), die teilweise, wie in Abbildung 35 dargestellt, bis zur Schlackebildung vorangeschritten sind.

Abbildung 35: Asche des ersten Versuchs, Versuchsreihe 4

Abbildung 35: Asche des dritten Versuchs, Versuchsreihe 4

Abbildung 35: Schlacke, 3. Versuche, Versuchsreihe 4

- **Ergebnisreflexion**

Die erzielten Ergebnisse vorangegangenen Versuchsreihe konnten trotz gleicher Kesseleinstellungen nicht verifiziert werden. Es sind höhere Emissionswerte zu verzeichnen und es kommt zu einer stärkeren Versinterung als im ursprünglichen Versuch. Ursache hierfür könnte eine schlechte Durchmischung und damit verbunden eine inhomogene Verteilung des Kaolins sein. Da für eine weitere Abstimmung des Kaolingehalts das Kaolin M20 verwendet wird, werden keine weiteren Wiederholungen des Versuchs mit

gleicher Brennstoffmischung durchgeführt. Der Teillastversuch zeigt erhöhte Emissionen, was für Biomassekessel im Teillastbereich üblich ist. Die Emissionen sind hinsichtlich der CO-Konzentrationen noch innerhalb der Grenzwerte der 1. BImSchV., die Staubkonzentrationen liegen mit durchschnittlich 63 mg/m³ darüber. Die dritte Verbrennung ist in ihrem Verlauf sehr inhomogen, was an den starken Schwankungen der CO-Konzentrationen zu erkennen ist. Die starken Versinterungen bis hin zur Schlackebildung zeigen, dass die Additivmenge bei Kaolin M20 anzuheben ist. Dies ist auf den geringeren Reinheitsgrad zurück zu führen. Eine Anhebung der der Additivmenge wird in der nächsten Versuchsreihe, dem Langzeitversuch, vorgesehen.

5.3.5 Versuchsreihe 5 / Langzeitversuch

Ziel des Langzeitversuchs ist es, die Eignung des Brennstoffs über eine längere Zeit nachzuweisen. Während des Langzeitversuchs ist die Messung der Dioxine und Furane vorgesehen. Der Versuch findet am HDG-Kessel statt (vgl. 3.4.2). Der Brennstoff wird chargenweise mit der Pelletierpresse Kahl 33-390 hergestellt (vgl. 3.3), die Brennstoffmischungen werden mittels Futtermischwagen generiert (vgl. 4.2). Für die Messungen der Staubemissionen wird das Wöhler SM 500 (vgl. 3.5) verwendet.

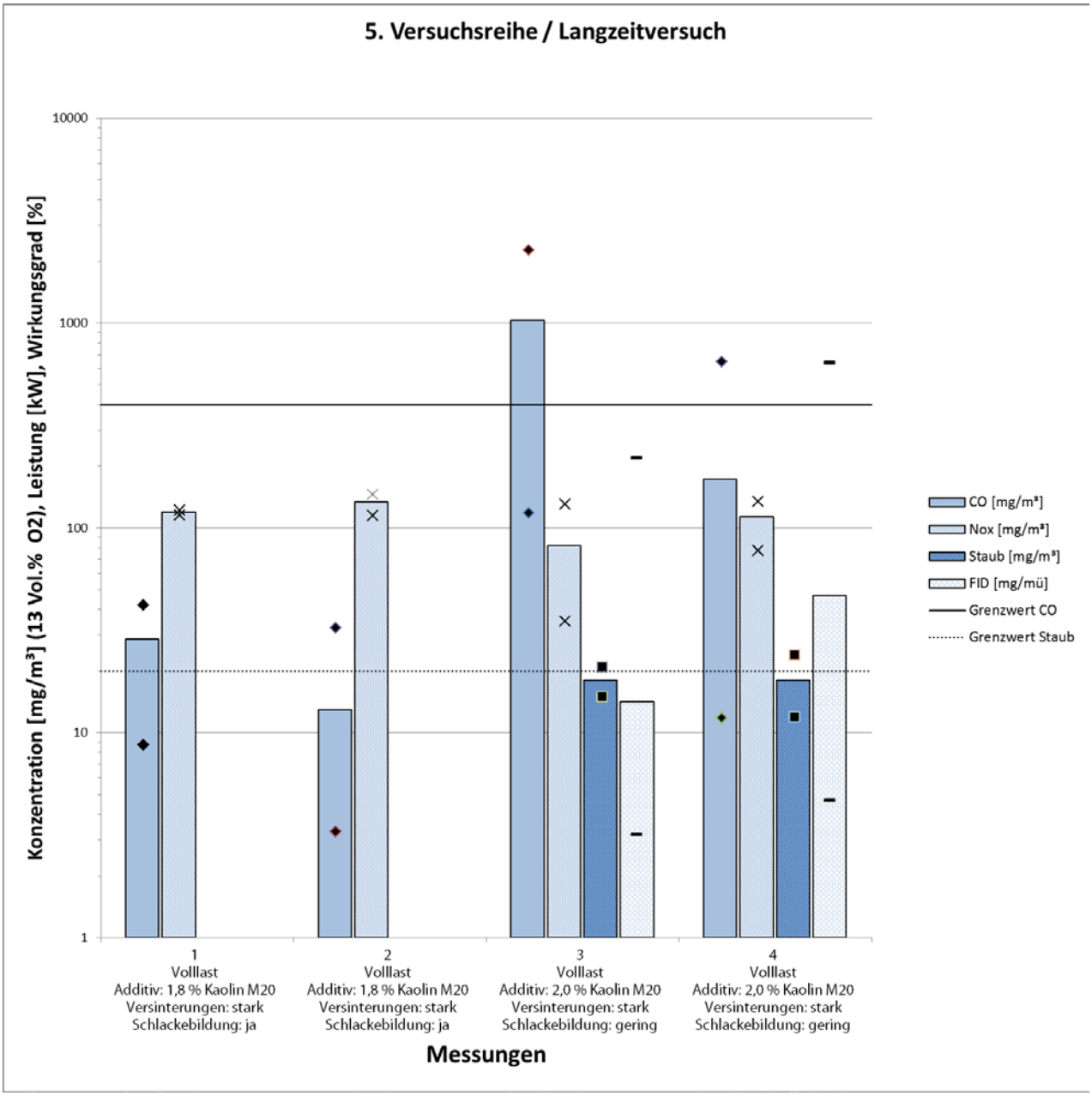


Abbildung 36: 5. Versuchsreihe; Vergleich der Emissionsmessungen, Leistung und Wirkungsgrad; Minimal- und Maximalwerte punktförmig dargestellt; logarithmische Darstellung der Y-Achse; Grenzwerte der 1. BImSchV.

Die vier Messungen in Abbildung 36 beinhalten keine Leistungsmessung, da der installierte Wärmemengenzähler die abgeführte Energie nur mit einer

Genauigkeit von 0,1 MW anzeigt. Die genierte Energie ist dem chronologischen Bericht (siehe 5.3.5.1) zu entnehmen.

Die dritte und vierte Messung weisen hohe CO-Emissionen auf, mit starken Schwankungen. Auch die unverbrannten Kohlenstoffe liegen mit durchschnittlich 14 bzw. 46 mg org. C/m³ deutlich über den Messwerten der vorangegangenen Versuchsreihen. Die Schwankungen sind ebenfalls höher. Die Staubmesswerte sind gering und liegen innerhalb der Grenzwerte. Abgesehen von der dritten Messung liegen alle CO-Konzentrationen unterhalb des Grenzwerts. Weitere Einzelheiten sind im Unterpunkt 5.3.5.1aufgeführt.

Eine weitere Messungreihe wurde während des Langzeitsversuchs nach EN 303-5 durch akkreditiertes Messinstitut §26 Fa. *Eurofins* durchgeführt. Die Anforderungen der 1. BImSchV an die Typprüfungen von Anlagen mit den in § 3 Abs. 1 Nummer 8 und 13 genannten Brennstoffen beinhalten Grenzwerte für CO, NO_X und PCDD/F. Bei automatisch beschickten Feuerungsanlagen fordert die EN 303-5 Mittelungszeiten Messungen über eine Versuchsdauer von mindestens sechs Stunden. Für Dioxine und Furane wurden konform zur Typprüfung 6 Stundenwerte ausgewiesen. Einhaltung der Anforderungen aus der Typprüfung nach 1. BImSchV.

Die Messungen der Dioxine und Furane beinhalten auch eine Messung von CO, CO_2, NO_x, SO_x, Staub und unverbrannten Kohlenwasserstoffen (Ges.-C.). Der Messbericht ist dem **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu entnehmen. Die Ergebnisse der Messungen hinsichtlich der Einhaltung der Grenzwerte der 1. BImSchV. bzw. der TA-Luft (vgl. Abbildung 3) – sofern nicht in der 1. BImSchV. vorhanden – werden folgend aufgeführt:

Kohlenmonoxid (CO): Bei den Messungen nach §26 konnten die Vorgaben nach 1. Bimsch V auch nach Einführung der 2.Stufe ab 2015 teilweise eingehalten werden; Teilweise deshalb, weil es beim Kippvorgang des Rostes betriebsbedingte Unregelmäßigkeiten beim Verbrennungsvorgang gab. Diese führten dann zu einem sehr hohen, kurzzeitigem Anstieg der Abgaswerte.

Stickstoffmonoxid (NO): Bei den Messungen nach §26 konnten die vorgeschriebenen Grenzwerte nach 1. BImSchV. eingehalten werden.

Staubemission: Die Grenzwerte für Staub liegen nach 1. BImSchV zurzeit bei 100 mg/m³. Dieser Grenzwert konnte eingehalten werden. Ab 31.12.2014 liegen die Grenzwerte bei 20mg/m³. Diese Werte werden bei dem Versuchskessel ohne geeignete Maßnahmen (Filter) so nicht erreicht. Es ist aber davon auszugehen, dass bei optimaler Einstellung der Kesselparameter die Grenzwerte eingehalten werden können.

Kohlenwasserstoffe (C_nH_m): Bei den Messungen nach §26 konnten die vorgeschriebenen Grenzwerte nach TA Luft eingehalten werden.

Dioxin- und Furan- Emissionen (PCDD u. PCDF): Bei den Messungen nach §26 konnten die vorgeschriebenen Grenzwerte nicht eingehalten werden. Wie oben schon beschrieben ergeben sich durch die Rostkippungen möglicherweise sehr ungünstige Abbrandkonstellationen. Ob diese ursächlich

für die Überschreitung der Werte sind ist spekulativ, liegt aber aus unserer Sicht im Bereich der möglichen Ursachen.

Schwefeloxide (SO_x): Hierbei handelt es sich um ein farbloses, stechend riechendes, wasserlösliches Gas, das Mensch und Umwelt beeinträchtigt. In der Atmosphäre aus Schwefeldioxid entstehende Sulfatpartikel tragen zudem zur Belastung mit Feinstaub (PM10) bei. Bei den Messungen nach §26 wurden die Abgaswerte nach TA Luft eingehalten.

In Tabelle 28 sind die Messwerte der Firma Eurofins aufgeführt.

Tabelle 28: Messwerte der Messreihe zur Ermittlung der Dioxin- und Furan-Emissionen, Typprüfung (1. BImSchV), nach § 26 durch zertifiziertes Messinstitut Fa. Eurofins

Emissionskomponente	Grenzwert	Dimension	Messwert Ø 3 Tage	Bemerkungen
Kohlenmonoxid	400/250	mg/m^3	268	
Stickstoffoxid		mg/m^3		
Anl. erricht. ab 22.03.10	600	mg/m^3	165	
Anl. erricht. ab 31.12.14	500	mg/m^3		
PCDD/F	0,1	ng/m^3	0,229	
SOx		mg/m^3	25,9	
Staub ab 31.12.14	20	mg/m^3	27 *	*
Ges.-C		mg/m^3	28,7	
Kohlendioxid		mg/m^3	8,6	
Messungen bei Betrieb der Anlage im Langzeitversuch				
Kohlenmonoxid				
Anl. erricht. ab 22.03.10	1	g/m^3		
Anl. erricht. ab 31.12.14	0,4	g/m^3		
Gesamtstaub				
Anl. erricht. ab 22.03.10	0,1	g/m^3		
Anl. erricht. ab 31.12.14	0,02	g/m^3		
Stichstoffoxid	0,6/0,5	g/m^3		

Es sei zu den Messwerten der Tabelle zu beachten, dass bei den Kippvorgängen im Kessel hohe Emissionsspitzen erreicht werden, welche in die Mittelwerte eingeflossen sind.

5.3.5.1 Langzeitversuch – chronologischer Bericht

Für den Langzeitversuch wurde ein neuer Kessel der Firma HDG Bavaria in einer Werkhalle installiert, um den Kessel im Dauerversuch über 800h zu betreiben und zu beurteilen.

Nach ca. 60 h Versuchsvorbereitung und Installation eines Wärmemengenzählers wurde der Langzeitversuch begonnen.

Bei den ersten Abbrandversuchen wurde festgestellt, dass der Brennraum schnell verschlackte. Auf Anraten der Fa. HDG wurde der Kipprost des Kessels duch ein Kipprost mit stufenförmigen Absätzen ersetzt. Dieser Rost wird bei HDG für problematischere Brennstoffe eingesetzt. Es konnte eine Verbesserung erzielt werden, eine gänzliche Verhinderung der Verschlackung aber nicht erreicht werden.

Da der Kessel dennoch in Störbetrieb ging wurde die Taktzahl des Kippvorgangs erst auf 3h dann auf 2h reduziert.

Bedingt durch die wesentlich höhere Anzahl dieser Unterbrechung der konstanten Verbrennung trat möglicherweise eine höhere Anzahl von Emissionsspitzen auf.

Durch die höhere Taktrate der Kippungen wurde eine ausgeprägte Sclackeausbildung vermieden bzw. teilweise verhindert. Das sich ausbildende „Schlackebrett“ wurde durch die Kippungen zerstört bzw. die Schlacke wurde in kleinere Anteile zerlegt. Diese Schlackeklümpchen (Ø20mm- Ø60mm) konnten dann durch den Ascheaustrag gefördert werden. Durch die Ascheschnecke wurden diese Ascheklumpen nochmals zerkleinert da sie nicht sehr formstabil waren.

Leider stellte sich dann aber doch im Turnus von etwa 2- 4 Tagen eine Betriebsstörung ein, durch zu groß gebliebene Acheklumpen. Diese verhinderten eine vollständige Drehung (90 °) des Rostes, so dass dieser bei Ansammlung von klumpigem Material im Austragsystem blockiert wurde.

Da wir keine geeigneten Maßnahmen gefunden haben um diese Betriebsstörungen zu verhindern, wurde der Langzeitversuch nach insgesamt 620h ausgesetzt.

Aus unserer Sicht ist es dennoch sinnvoll weitere Versuche durchzuführen, da die Ergebnisse durch geeignete Maßnahmen (Brennstoffqualität-Homogenität, weitergehende Kesseleinstellungen, konstruktive Anpassungen, stärkere Stellmotoren etc.) mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit verbessert werden können.

Insgesamt wurden bezogen auf ca. 520h 5200 kg Brennstoff eingesetzt und dabei ca. 21,4MWh an Wärme generiert. Bei einem Heizwert von 4,6 kWh/kg konnte somit ein Wirkungsgrad von ca. 89% erreicht werden, gefordert laut BimSchV wird ein η von 90%.

Der Aschegehalt der Langzeitmessung lag bei ca. 2 % (w/w), damit konnte die Vorgabe nach EN 14961- 2 eingehalten werden.

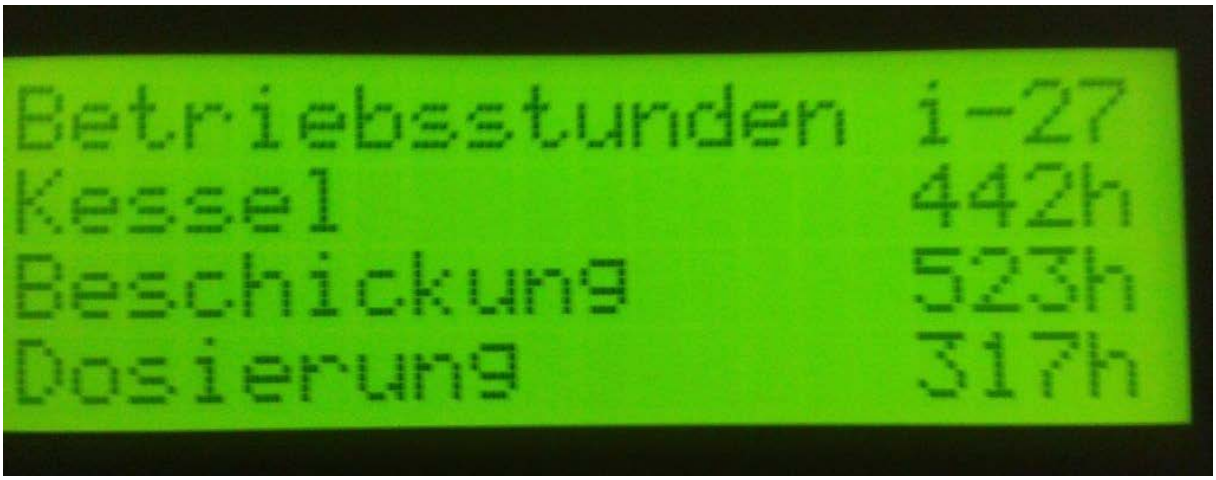


Abbildung 37: Betriebsstunden Anzeige, Langzeitversuch

- **Ergebnisreflexion**

Die Schwankungen der Messwerte können zum einen ihren Ursprung in der Kesseltechnik haben, zum anderen kann dies an einer mangelnden Durchmischung des Brennstoffs liegen. Durch das Mischen im Futtermischwagen können Unterschiede in der Stoffzusammensetzung nicht ausgeschlossen werden. Die Tatsache, dass bei dem verfügbaren Kessel in einem Rhythmus von zwei Stunden ein Kippen des Rostes einsetzt, führt ebenfalls zu einem instationären Betriebsverhalten. Es wurde weitestgehend darauf geachtet, die Messungen nur bei einem stabilen Betrieb durchzuführen. Im Messbericht (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) sind die Kippzeiten des Rostes anhand des Anstiegs der CO-Konzentrationen sichtbar. Es sind deutliche Spitzen zu sehen, die außerhalb des Messbereichs liegen. Das Ziel, einen störungsfreien Betrieb über mehrere hundert Stunden zu erreichen, konnte nicht eingehalten werden. Die Versuche lassen darauf schließen, dass eine äußerst homogene Durchmischung des Substrats von großer Bedeutung ist.

5.3.6 Versuchsreiche 6

Die sechste Versuchsreihe wird bei der Firma KÖB am Kessel Vitoligno 300-P (vgl. 3.4.3) durchgeführt. Es werden vier unterschiedliche Brennstoffgemische untersucht. Das verwendete Kaolin ist vom Typ Kaolin M20.

Die Ergebnisse sind im **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** nachzulesen.

- **Ergebnisreflexion**

Die Verschlackung des Brennraums und die damit verbundenen überhöhten Abgaswerte zeigen, dass der Additivanteil bei der Verwendung vom Kaolin M20 erhöht werden muss. Weiterhin wird deutlich, dass die Kesseltechnik bei der Verbrennung von Mischpellets angepasst werden muss. Die Abweichungen der Brennstoffeigenschaften führen dazu, dass bei Standardeinstellungen für Normbrennstoff (Holzpellets) nicht die Nennleistung erreicht wird. Die Staubemissionen überschreiten bei allen vier Versuchen den Grenzwert von 20 mg/m^3. Weiterhin ist der Staubgehalt der Brennstoffe ohne Additivanteil geringer gegenüber dem gleichen Brennstoff mit Additivanteil. Die Brennstoffe mit Fichtenholz haben einen deutlich geringeren Staubanteil als die Brennstoffe mit Paulownia. Eine Anpassung der Kesseleinstellungen und eine weitere Erhöhung des Additivanteils werden von der Firma KÖB als sinnvolle nächste Schritte empfohlen. Bedingt durch relativ geringe Brennstoffchargen konnten die Kesseleinstellungen bei der Fa. Vissmann/ KÖB nur nach Erfahrungswerten angepasst, aber nicht optimiert werden. Wie auch beim Kessel HDG 50 kam es zu Blockaden des beweglichen Rostes und damit zu einem Betriebsausfall.

6 Diskussion

6.1 Zerkleinerung

Der Datenbestand der Zerkleinerungsversuche zu Projektende zeigt, dass die Zerkleinerungsergebnisse bei der Kollermühle am besten ausfallen, bezüglich der Faserbeschaffenheit. Hier werden die Fasern aufgerieben und haben somit eine fransige Kantenstruktur. Dies vergrößert die Oberfläche, Additive können sich während des Mischvorgangs leichter mit dem Material verbinden und es wirkt sich positiv auf die Verbindungseigenschaften im Presskanal der Pelletierpresse aus.

Die Faserbeschaffenheit des Miscanthus, welcher in der Zerfaserung bzw. der Nachzerkleinerungsanlage zerkleinert wurde, zeigt glatte Bruchkanten. Dies ist auf die schlagende Beanspruchung bei der Zerkleinerung zurückzuführen. Da Miscanthus einen hohen Siliziumanteil hat, ist es ein sehr hartes Substrat. Eine schlagende Beanspruchung lässt das spröde Material glatt entlang der Faser reißen.

Der Durchsatz ist bei der Zerfaserung und bei der Nachzerkleinerungsanlage ähnlich und deutlich höher als bei der Kollermühle.

Der Energieeintrag wurde ebenfalls aufgenommen. Hier ist die Datengrundlage allerdings noch zu gering, um eine Aussage zu treffen.

Es werden weitere Versuche zu diesem Thema angestrebt.

6.2 Mischen

Das Mischen der Substanzen für Mischpellets ist sehr komplex. Die beiden Hauptfraktionen haben eine Fasergrößenverteilung < 8 mm und einen Wassergehalt < 20 % (w/w). Somit wirkt keine Komponente bindend. Das Additiv hat einen Wassergehalt ≤ 1 % (w/w), eine Partikelgrößenverteilung < 1 mm und eine Schüttdichte von 2,7 t/m³ - verglichen zu der Schüttdichte von 100 – 160 t/m³ der Hauptfraktionen. Ein homogenes Gemisch zu erzeugen ist somit sehr Anspruchsvoll. Weiterhin ist der Grad der Entmischung durch einen anschließenden Transport nicht weiter untersucht.

Beim Vorbereiten der Mischung für die Pellets mit Calciumhydroxid war auffällig, dass sich die trockene Calciumhydroxid-Miscanthus-Mischung durch das vernebelte Wasser gelb verfärbte, was auf eine chemische Reaktion von Calciumhydroxid mit Wasser schließen lässt.

Die Mischungen im Futtermischwagen werden als unzuverlässig eingestuft, da die Mischtechnik nicht für die erwähnte Problematik ausgelegt ist. Es konnte beobachtet werden, dass der Grad der Durchmischung stark Zonenabhängig war.

Es sind weitere Versuche notwendig, sowie eine qualitative Analyse der Mischungen auf Homogenität.

6.3 Pelletierung

Wie aus dem Abschussbericht von Teilprojekt 1 der Universität Bonn hervorgeht, ist es möglich ein normgerechtes Pellet zu pressen. Problematisch wird der Standort der Presse Kahl 33-390 eingeschätzt. Diese Presse steht in einer Halle mit offenen Stirnseiten. Dadurch machen sich Witterungsunterschiede stark bemerkbar. Es ist zu beobachten, dass die Außentemperatur starken Einfluss auf die Matrizentemperatur ausübt. Bei den Versuchen war es bei sinkenden Außentemperaturen nicht möglich, eine Matrizentemperatur von 90 °C zu überschreiten. Bei Außentemperaturen von ca. 4 °C konnte eine Matrizentemperatur von 75 °C nicht überschritten werden. Diese Einschränkung hat sich auf die Qualität der Pellets ausgewirkt.

6.4 Verbrennung

Die Diskussion der Verbrennung ist den Ergebnisreflektionen der einzelnen Versuchsreihen zu entnehmen. Es ist festzuhalten, dass eine schlakefreie Verbrennung im Versuchsaufbau 1 möglich ist. Da in diesem Kessel sehr hohe Temperaturen gemessen wurden, ist davon auszugehen, dass das Ergebnis auf andere Kesseltechnik übertragbar ist. Weiterhin ist festzuhalten, dass die Pelletqualität des Brennstoffs der fünften und sechsten Versuchsreihe stark variiert hat. Daraus können Emissionsspitzen resultieren. Die Anmischung der Chargen wurde mit Hilfe des Futtermischwagens realisiert. Daher ist die Homogenität des Brennstoffs nicht gewährleistet – die Verschlackung im Versuchsaufbau 2 und im Versuchsaufbau 3 kann aus diesem inhomogenen Brennstoff resultieren.

Weitere Versuche mit homogenen, qualitativ hochwertig gepressten Brennstoff werden als nötig befunden. Es sollte bei diesen Versuchen der Wassergehalt des Brennstoffs variiert werden, es konnte innerhalb dieses Projekts nicht weiter erforscht werden, wie sich dieser auf den Ascheerweichungspunkt im Kessel auswirkt.

Festzuhalten bleibt ebenfalls eine Diskrepanz zwischen Ascheerweichungspunkt, welcher auf der Ascheschmelzbank im Labor ermittelt wird, und dem Sinterverhalten des gleichen Stoffgemischs im Kessel. Dies ist möglicherweise auf regionale Temperaturspitzen im Glutbett zurückzuführen, welche bei einer Temperaturmessung im Feuerraum nicht erfasst werden. Es gilt zu verifizieren, ob dieses Phänomen mit der Luftführung im Feuerraum zusammenhängt oder ob dies einen systemischen Fehler zur Ursachen hat.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wurde gemäß der Zielsetzung ein Miscanthus-Mischpellet entwickelt, welches sich prinzipiell in einer Kleinfeuerungsanlage störungsfrei verbrennen lässt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse verdeutlichen weiteren Forschungsbedarf.

Die Zerkleinerung von Miscanthus mittels einer Kollermühle liefert gute Ergebnisse. Diese Ergebnisse sind im Weiteren auf den Energieeintrag während der Zerkleinerung und bei der Pelletierung zu untersuchen. Erste Ergebnisse zeigen, dass die Kollermühle hier die geeignetste Zerkleinerungsmaschine darstellt.

Die Mischung der Substrate und die Beimischung des Additivs stellen eine große Herausforderung dar. Ein homogenes Gemisch, welches sich bis zum Presskanal der Pelletierpresse nicht entmischt, ist eine wichtige Aufgabe für die weitere Forschung. Die Belastbarkeit der Ergebnisse der Verbrennungsversuche verbessert sich dadurch deutlich. Das manuelle Mischen kleiner Chargen mit Hilfe eines Betonmischers hat sich als sehr verlässlich erwiesen. Bei dieser Methode wird Wasser während des Mischprozesses zugefügt, welches der Konditionierung des Materials sowie auch als Bindemittel für das Additiv an den Miscanthusspänen dient.

Die Pelletierung von kleinen Chargen mittels einer Laborpresse stellt sich als problemlos dar. Es lässt sich eine gleichbleibend gute Pelletqualität erzeugen. Der Betriebspunkt der Laborpresse lässt sich jedoch nicht auf die Pelletierung an der Presse Kahl 33-390 übertragen. Die Einstellung eines stabilen Betriebspunkts stellt sich hier komplexer dar. Der der Außentemperatur unterliegende Aufstellungsort der Presse sowie ein teilweise inhomogenes Presssubstrat sind mögliche Gründe dafür.

Die Verbrennungsversuche lieferten keine eindeutigen Ergebnisse. Der Erkenntnisstand nach der Auswertung der bisherigen Versuche zeigt, dass es generell machbar ist, ein Mischpellet mit einem Miscanthusanteil von 50 % (w/w) in einer Kleinfeuerungsanlage zu verbrennen. Dafür müssen die Kesselparameter entsprechend angepasst werden. Nach dem bisherigen Wissenstand müssen diese für den jeweiligen Kessel experimentell ermittelt werden. Die Staub- und CO-Emissionen liegen bei den Versuchen mit Brennstoff, welcher in seinen mechanischen Eigenschaften der Norm entsprach, innerhalb der zulässigen Grenzwerte. Bei geeigneten Kesselbauarten konnten gute Ergebnisse erzielt werden, die Verbrennung wurde von den Versinterungen, welche im geringen Maße entstanden, nicht gestört. Ein Vergleichsversuch mit einer anderen Kesselbauart konnte diese Ergebnisse nicht bestätigen. Auf Grund der lediglich in geringem Umfang verfügbaren Brennstoffmenge konnte der Kessel nicht entsprechend auf den Brennstoff eingestellt werden. Der Langzeitversuch lieferte bezüglich der beobachteten Schlackebildung unbeständige Ergebnisse, was an der suboptimalen Brennstoffqualität (Entmischungsvorgänge) und der

spezifischen Kesseltechnik liegen kann. Auch hier sind jedoch zufriedenstellende Emissionswerte gemessen worden.

Bei den durchgeführten Untersuchungen erscheint Fichte als bessere Mischkomponente verglichen mit Paulownia. Im Weiteren sind Untersuchungen hinsichtlich der notwendigen Additivmenge, der Durchführung einer reproduzierbaren homogenen Mischung und Pressung zu normgerechten Pellets hinsichtlich homogener mechanischer Eigenschaften als sinnvoll zu erachten.
Die gründlichen Vorarbeiten waren notwendige Schritte, um eindeutige Aussagen hinsichtlich der geeigneten Additivmenge zu treffen. Die richtige Beimischung ist bei den Kesseltests in Kurzzeitversuchen gelungen. Die riesigen Brennstoffmengen, welche für den Langzeitversuch notwendig waren, konnten innerhalb der vorhandenen maschinellen Möglichkeiten die notwendigen Mischkriterien nicht erfüllen.

Die Messungen bezüglich der Dioxine und Furane konnten lediglich zu einem einzigen Zeitpunkt durchgeführt werden und stellen eine weitere Herausforderung dar, da sie die Grenzwerte leicht überschritten. Es gilt zu erforschen, ob ein optimaler Brennstoff, nahezu frei von Feinanteilen mit feinabgestimmten Additivanteil, zu besseren Ergebnissen führt.

Das Projekt hat gezeigt, dass für endgültige und eindeutige Aussagen weitere Versuche notwendig sind, um die gewonnenen Ergebnisse zu verifizieren und zu vertiefen.

Quellenverzeichnis

[1] HARTMANN, H., et al.: *Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen*. FNR (Hrsg.), Stadtdruckerei Weidner Rostock, 2. Aufl., 2007

[2] OBERNBERGER, I., THEK, G.: *Herstellung und energetische Nutzung von Pellets*. Medienfabrik Graz GmbH, 1. Aufl., 2009

[3] Kahl (Hrsg): *Pelletpressen*. http://www.akahl.de/index.php.?hid=33, 1326-Pelletpressen-7d.pdf, download am 10.09.2009

[4] SCHÄFER, T.: *Inbetriebnahme der Instituteingenen Pelletpresse*. Diplomarbeit, Institut LTRE der FH – Köln (Hrsg.), Eigenverlag, 2007

[5] Kahl (Hrsg): *Flachmatrizenpressen, Typenübersicht*. http://www.akahl.de/index.php.?hid=33, 1326-Pelletpressen-7d.pdf, download am 10.09.2009

[6] DIN EN 14961 – 2: *Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 2: Holzpellets für nichtindustrielle Verwendung*; Deutsche Fassung FprEN 14961-2: 2010

[7] KALTSCHMITT, M., HARTMANN, H., HOFBAUER, H.: *Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Springer Verlag. 2. Aufl., 2009.

[8] Testo AG (Hrsg.): Industrielle Abgasanalyse. o.J.

[9] BMU (Hrsg.): 1. BImschV, Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen vom 26. Januar 2010.

[10] TWINHEAT (Hrsg): Bedienungsanleitung Twinheat M20i /M40i / M80i., 2006.

[11] Wöhler GmbH (Hrsg.): Analysecomputer A 97PRO. Bedienungsanleitung, 2003.

[12] Wöhler GmbH (Hrsg): Staubmessgerät SM 96. Bedienungsanleitung, 2003.

[13] Hellmann, A.: *Strategien zur Verhinderung der Brennraumverschlackung in einem Biomassekessel durch eine optimierte Pelletzusammensetzung und Kesselbetriebsweise*. Diplomarbeit, Institut LTRE der FH – Köln (Hrsg.), Eigenverlag, 2012

[14] HAEFNER, D.: *Arbeitsbuch qualitative anorganische Analyse,* GOVI-Verlag Pharmazeutischer Verlag GmbH, Eschborn, 2. Auflage 2003

[15] Haase, S. und Wieland, J.: *Installation von Sensoren zur Temperaturmessung im Feuerungsraum einer Biomassefeuerung*. Projektarbeit, Institut LTRE der FH – Köln (Hrsg.), Eigenverlag, 2012

[16] store.aldingerco.com

[17] STEINBÜCHEL, R.: *Präsentation Verbundprojekt C4*. Tagung, Haus Düsse. Januar 2012

[18] Spieß, M.: *Mechanische Verfahrenstechnik 2*. Springer-Verlag, 1997

[19] Rumpf, H.; zitiert in Mechanische Verfahrenstechnik 2. Spieß, M. Springer Verlag, 1997

[20] Gersthahn, D.: *Einfluss der Zerkleinerungstechniken und Konditionierung auf die Pelletqualität von Miscanthus*. Bachelorarbeit, Institut LTRE der FH – Köln (Hrsg.), Eigenverlag, 2013

[21] Wenghoefer, Volker. Abschlussbericht zum Verbundprojekt C4-Kompakt Teilprojekt 1. Bonn : Universität Bonn, 2013

[22] Schilling, E., Gaese, D. und Rickert, J.. Vorrichtung zur Zerfaserung von stengel-, halm- und/oder blattartigen, nachwachsenden Rohstoffen. DE 100 42 195 A 1 Deutschland, 28. August 2000.

[23] Meyer, Torsten. Geschäftsführer der TM Technik. Auskunft per Email. 09.09.2013.

[24] Amandus Kahl GmbH & Co. KG. Kahl Presse - Holzpelletieranlagen. [Online]

[25] Amandus Kahl GmbH & Co. KG. Kahl Presse – Betriebsanleitung Pelletieranlage, 2012

Sonstige Quellen

PUDE (2012): mündliche Auskunft

ZENG (2012): Newsletter 02 – Januar 2012; MixBioPells Projekt
http://www.mixbiopells.eu/fileadmin/user_upload/WP6/Newsletter/Newsletter_2/Newsletter_02_DE.pdf; Zugriff 01.12.2013

Anhang

Anhang 1: FID – Technische Daten

MESS- M&A ANALYSENTECHNIK GMBH LEVERKUSEN

Thermo-FID PT84/LT

Flammenionisationsdetektor – Portabel

Technische Daten

Modelle	PT84/LT
	PT84 mit Flaschenhalter
Gewicht PT/LT	11 kg
Gewicht PT mit Flaschenhalter (ohne Flaschen)	16 kg
Abmessungen PT/LT	B = 483 mm H = 155 mm T = 380 mm
Abmessungen PT mit Flaschenanschluss	B = 483 mm H = 290 mm T = 380 mm
Messwertanzeige	wählbar
	ppm
	mg/m³
	g/m³
	Vol%
	%UEG
Linearität	< 4% über Messbereich
Messwertausgang	0(4)mA bis 20mA; Bürde 600Ω nicht galvanisch getrennt
Umgebungstemperatur PT/63	-5℃ bis 40℃
Umgebungstemperatur PT63/LT	+5℃ bis 40℃
Luftfeuchtigkeit	< 90% rel. Feuchte, + 20℃
	< 50% rel. Feuchte, + 40℃
Geografische Höhe	0 bis 1500 m über NN
Schutzart (DIN40050)	IP20

Das Thermo-FID PT84 ist ein fertig montierter Analysator im tragbaren 2/3 19" Gehäuse. Optional kann ein Flaschenhalter und Druckminderer für Wasserstoff und Spangas hinzugefügt werden Brennluft und Nullgas gehen standardmäßig über den Katalysator. Die Messgasförderung läuft über die interne Membranpumpe.(Leckageüberwachung; Abgasüberwachung; Überwachung von Anlagen; Methanfreie Messungen)

Allgemeine Anwendung

Der Thermo-FID wird in den unterschiedlichsten Bereichen von Industrie, Umweltschutz sowie Forschung und Entwicklung eingesetzt. Seine Anwendungsmöglichkeiten reichen von der UEG-Überwachung über die Emissions- und Immissionskontrolle bis in die Abgasanalytik der Chemie und der Motorenentwicklung. Auch zur Prozessoptimierung und bei der Überwachung von MAK- und TRK-Werten wird der Thermo-FID eingesetzt.

Technische Ausführung

Die Elektronik des Thermo-FID ermöglicht die Ausführung zahlreicher Zusatzfunktionen. Die integrierte CPU erlaubt eine menügeführte Bedienung sowie eine vollautomatische Selbstüberwachung und Fehlerdiagnose. Auf der alphanumerischen Anzeige erscheinen alle Bedienhinweise und Zusatzmeldungen im Klartext. Der prozessorgesteuerte, dynamische Verstärker wertet die extrem kleinen Ströme des FID-Detektors immer im optimalen Bereich aus.
Die verstärkten Signale werden direkt am Detektor digitalisiert und in digitaler Form der CPU zur Auswertung übergeben. Dadurch ist eine Verfälschung des kleinen Stromwertes durch schlecht abgeschirmte oder zu lange Signalwege nicht mehr möglich.

Zulassungen	17. BImSchV / TA Luft (936/806016) QAL 1 (DIN EN 14181 und DIN EN ISO 14956) MCerts (Sira MC 050062/00)	
Unterdrucksystem	Membranpumpe	
Messbereich	2 mg org.C/m³ bis 100.000 mg org.C/m³	
Nachweisgrenze	< 0,05 mg org.C/m³	
Einstellzeit (T90)	< 0,5 s bei Messwert > 20 mg org.C/m³ < 5,0 s bei Messwert < 20 mg org.C/m³	
Messgas (selbst ansaugend)	ca. 25 l/h bei 1013 hPa	
Messgasdruck	800 mBar bis 1200 mBar	
Detektortemperatur	T2: 110 °C bis 170 °C T3: 130 °C bis 165 °C T4: 95 °C bis 100 °C	
Zusatzheizung (PT100)	T2: 0 °C bis 260 °C T3: 0 °C bis 180 °C T4: 0 °C bis 110 °C	
Katalysatortemperatur	400 °C	
Instrumentenluft	Umgebungsluft über Membranpumpe	
Brenngas	Wasserstoff 0,7 Bar bis 1,0 Bar / < 80 ml/min Qualität 5.0	
Brennluft	Über internen Katalysator	
Kalibriergas	2,0 Bar bis 2,5 Bar / < 130 Nl/h Konzentration 60 % bis 80 % vom Messbereich bezogen auf C3H8	
Nullpunktgas	Über internen Katalysator	
Nennspannung	115 V ± 10 % oder 230 V ± 10 %; 48 Hz bis 62 Hz; < 250 W	
Zusatzheizung (Sonde, externer Katalysator)	115 V ± 10 % oder 230 V ± 10 %; 48 Hz bis 62 Hz; < 1000 W	
Modelle	PT63 mit Flaschenanschluss	PT/LT
Flaschenanschluss	DIN 477	DIN 477
Brenngas	Typ 1	Typ 1
Kalibriergas	Typ 14	Typ 14
Flaschengröße	1l	1 l

Anhang 2: Spezifikationen zu Calciumhydroxid

AppliChem Panreac
ITW Companies

Spezifikation

Calciumhydroxid reinst **A3527**

Löslichkeit (20°C)	1,7 g/L (H_2O)
Formel	CaH_2O_2
M	74,10 g/mol
CAS-Nr.:	1305-62-0
HS-Nr.:	28259019
EG-Nr.:	215-137-3
Lagerung:	RT
LGK:	10 - 13
Entsorgung:	14
R:	41
S:	22-24-26-39
	reizend
WGK:	1
Spezifikation	
Gehalt (acidimetr.)	min. 95 %
HCl-unlösliche Anteile	max. 0,5 %
Schwermetalle (als Pb)	max. 0,002 %
Carbonat	max. 5 %
Mg und Alkalisalze	max. 4 %

Anhang 3: Spezifikationen zu Kaolin (Pharmaware)

Chemische und physikalische Daten	
Löslichkeit in Wasser	(20 °C) unlöslich
Dichte	2.6 g/cm^3 (20 °C)
Bulk density	470 kg/m^3
pH-Wert	6 - 7 (50 g/l, H_2O, 20 °C) (Anschlämmung)

Spezifikation

1.04440.2500 Kaolin gepulvert

	Spezifikation	
Identität	entspricht	
In Salzsäure lösliche Anteile	≤ 1.0	%
Aussehen der Substanz (Farbe)	entspricht	
Aussehen der Substanz (Beschreibung)	entspricht	
Carbonat	entspricht	
Eisen	entspricht	
Pb (Blei)	≤ 0.001	%
Glühverlust (600 °C)	≤ 15.0	%

Anhang 4: Spezifikation zu Kaolin M20

THEODOR STEPHAN KG

Theodor Stephan KG GmbH & Co. KG · 57299 Burbach

Labor-Nr. 12248	Kaolin M 20	Monat/Jahr 05/2012

Chemische Analyse:

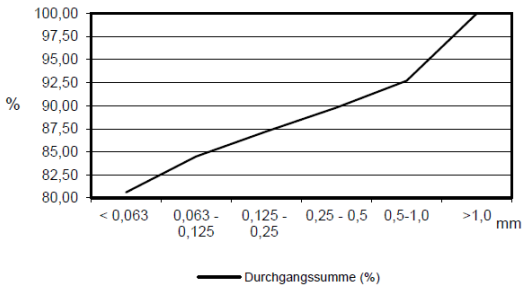
Bestandteil	geglüht %
SiO_2	73,6
Al_2O_3	18,8
TiO_2	0,9
Fe_2O_3	1,2
CaO	0,1
MgO	0,9
K_2O	4,2
Na_2O	0,1
Glühverlust	3,2
C-Gesamt	0,1
S	0,0

Mineralanalyse:

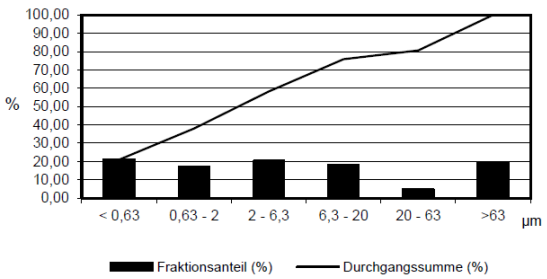
Mineralgruppe	in Gew % ca.	Bestimmtes Mineral
Kaolinitgruppe	30,0	Kaolinit (+Fireclay)
Glimmerartige Minerale	35,0	Illit
Montmoringruppe	Spuren	Smektit + Mixed-layer
SiO_2-Minerale	32,0	Quarz
Feldspatgruppe	2,0	Kalifeldspat (Mikroklin)
sonstige Minerale	1,0	Fe-Ti-Minerale

Feuchte:	max. 1% (DIN)	**Ph-Wert:**	6-7 (DIN)
Dichte:	2,7-2,8 g/cm^3 (DIN)	**Spezifische Oberfläche:**	12.000 cm^2/g (BLAINE)
Klopfvolumen:	140-170 ml/100g (DIN)	**Ölzahl:**	47 ml/100g
Schüttvolumen:	180-230ml/ 100g (DIN)	**Weissgrad:**	78

Siebanalyse:



Sedimentationsanalyse:



Siebanalyse (Siebe nach DIN 4188):

in mm	< 0,063	0,063 - 0,125	0,125 - 0,25	0,25 - 0,5	0,5-1,0	>1,0
Fraktionsanteil (%)	80,60	3,90	2,70	2,60	2,90	7,30
Durchgangssumme (%)	80,60	84,50	87,20	89,80	92,70	100,00

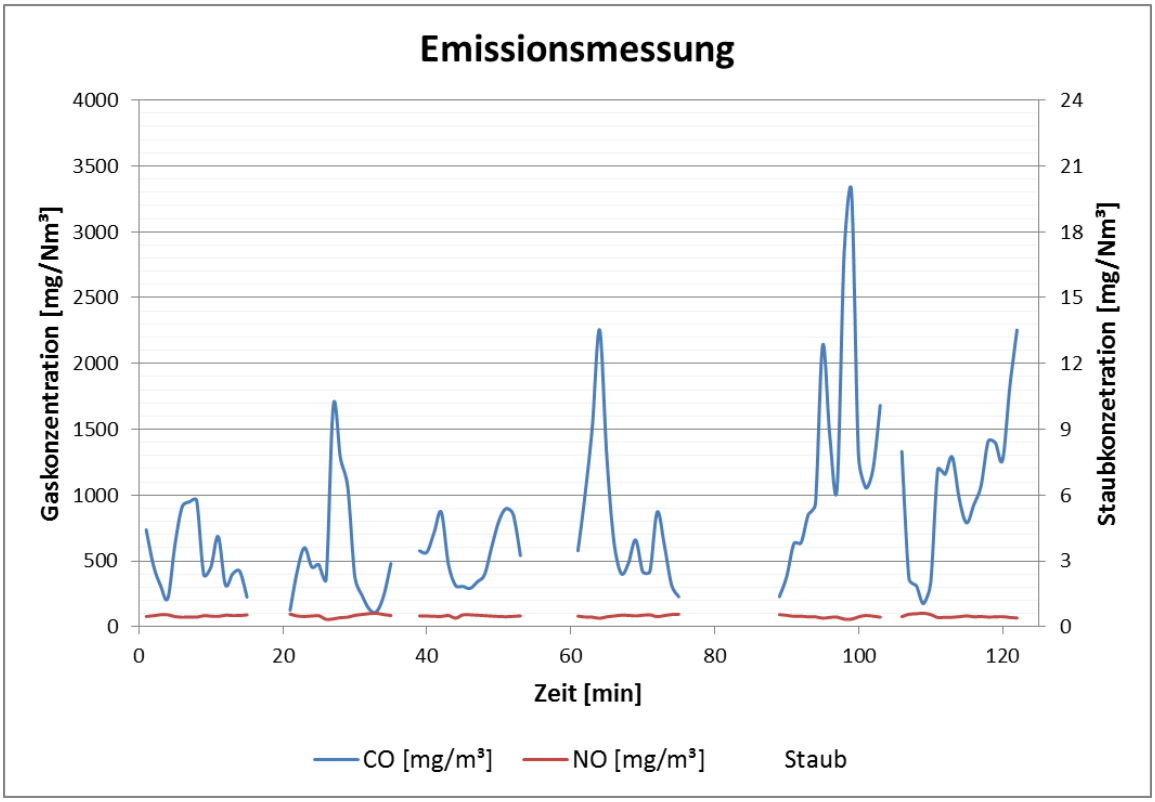
Sedimentationsanalyse:

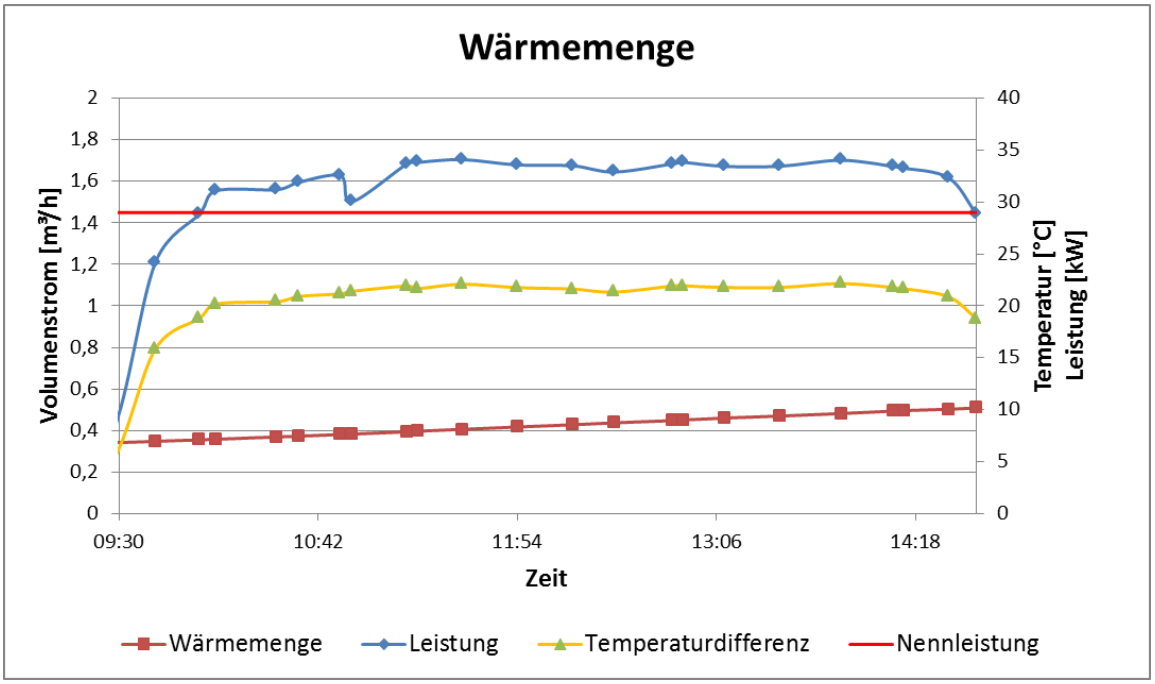
in µm	< 0,63	0,63 - 2	2 - 6,3	6,3 - 20	20 - 63	>63
Fraktionsanteil (%)	21,00	16,90	20,20	17,70	4,80	19,40
Durchgangssumme (%)	21,00	37,90	58,10	75,80	80,60	100,00

* Diese technische Auskunft hat nur informativen Charakter. Alle Verkäufe erfolgen nach Muster und zu unseren Verkaufsbedingungen.

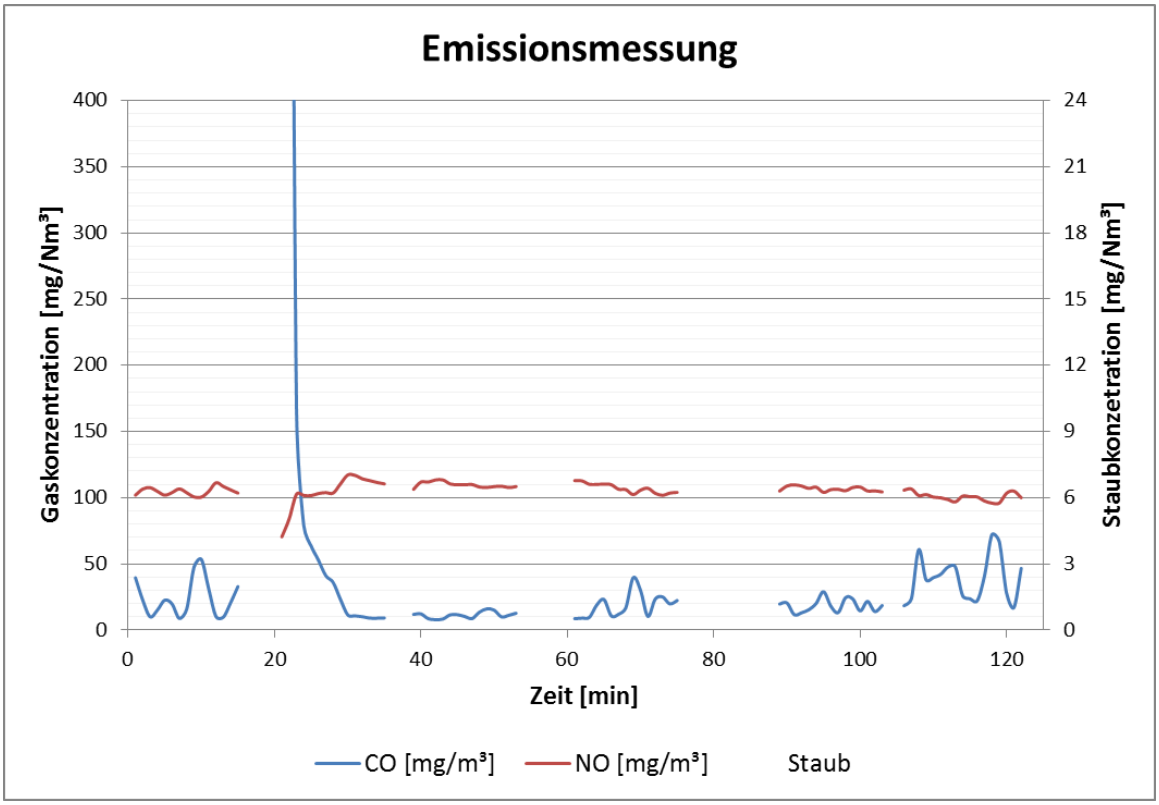
Anhang 5: Verbrennungsversuche – Versuchsreihe 1

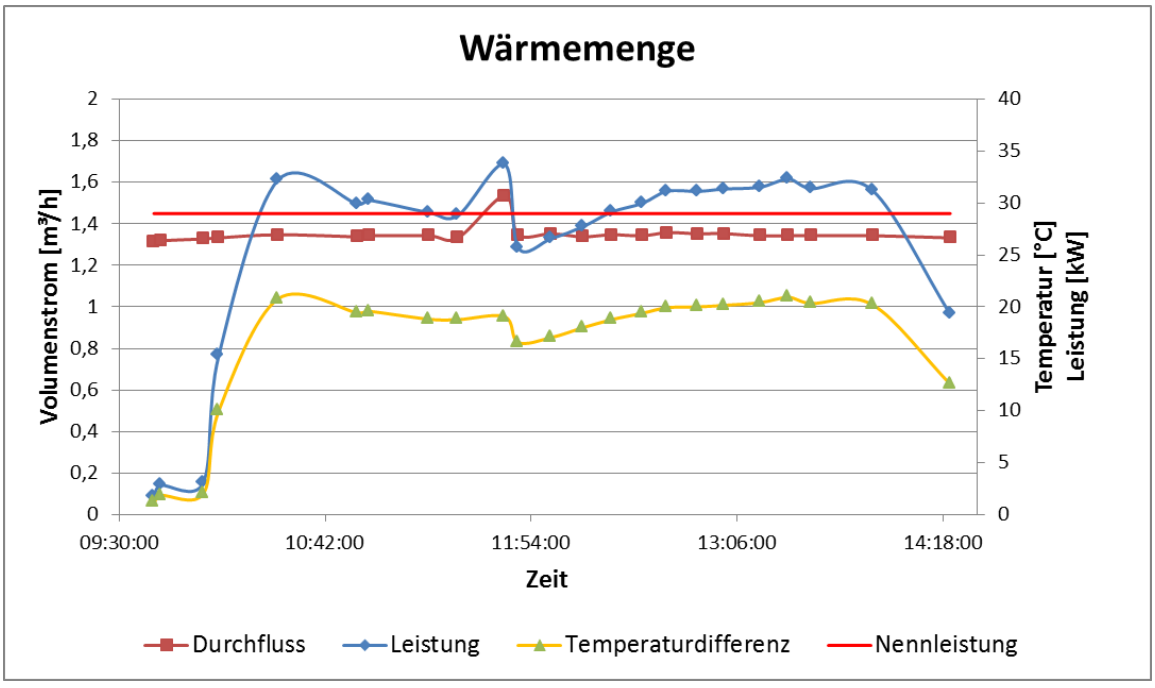
Versuchsreihe1, Versuch 1



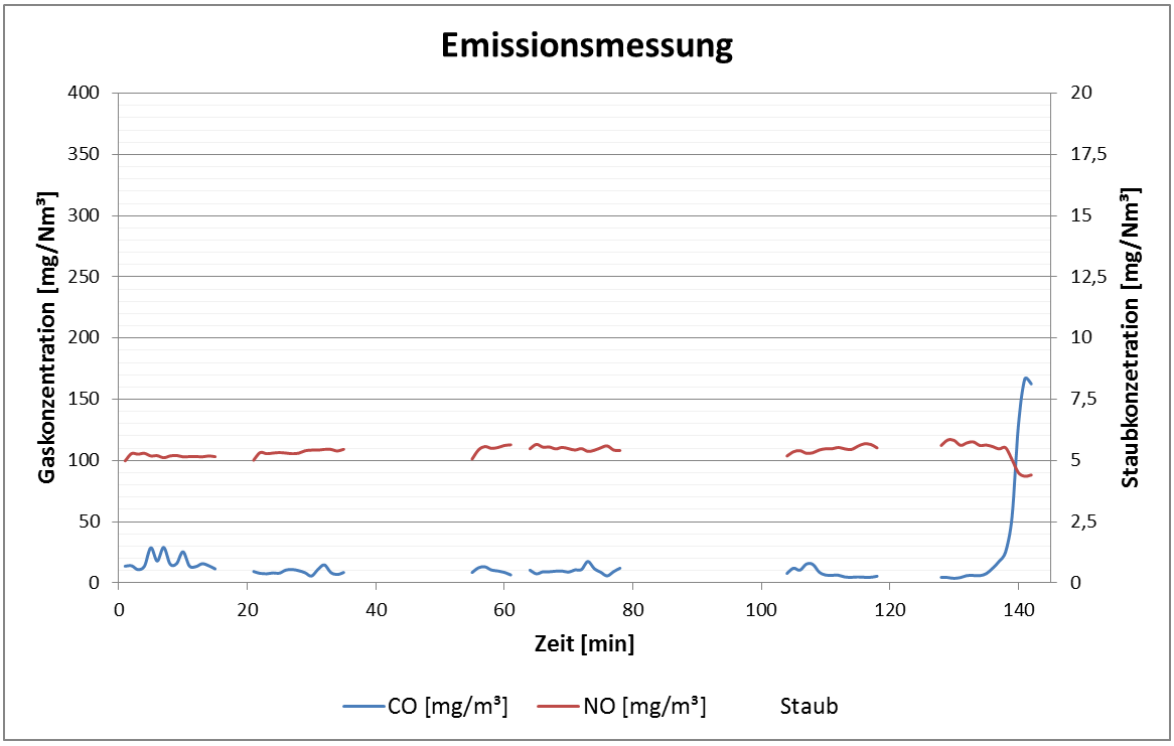


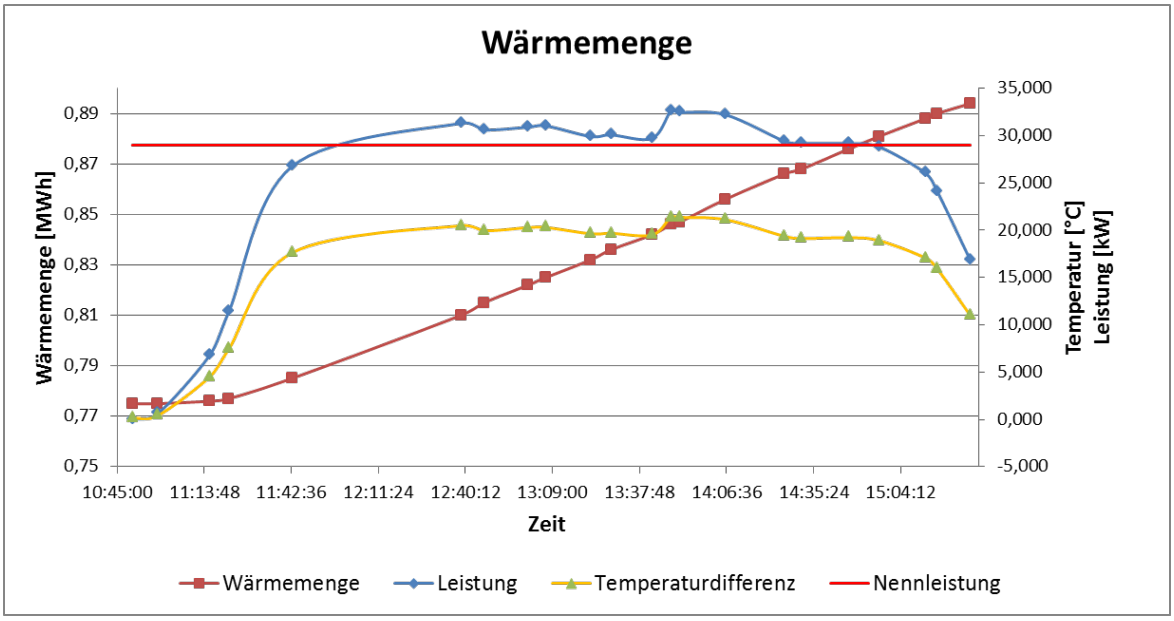
Versuchsreihe1, Versuch 2



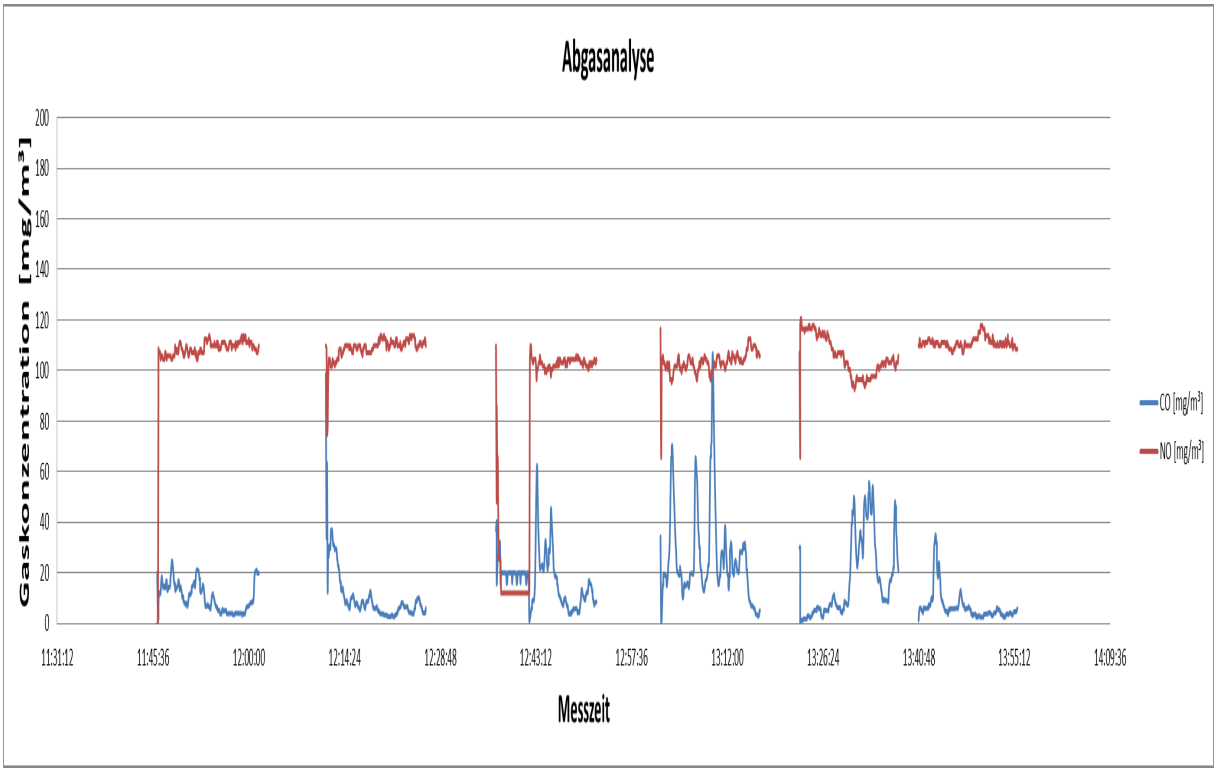


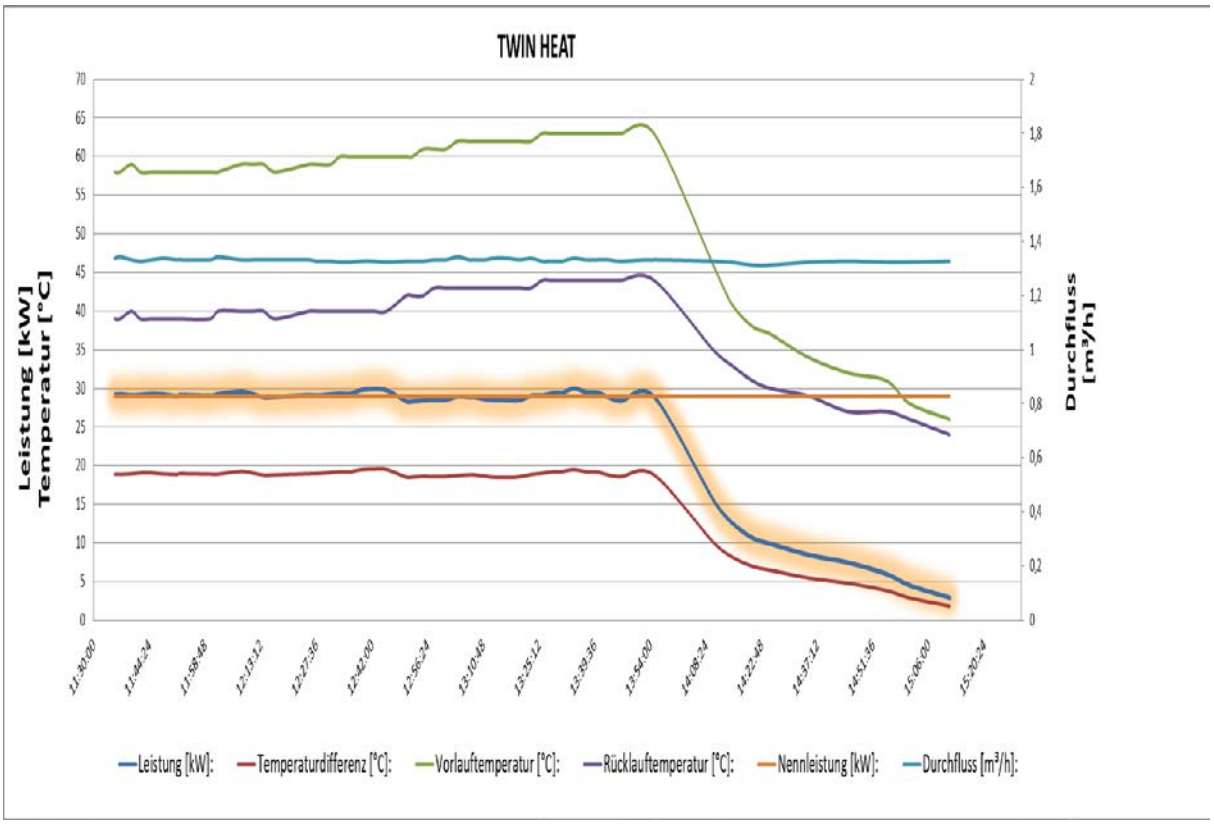
Versuchsreihe1, Versuch 3





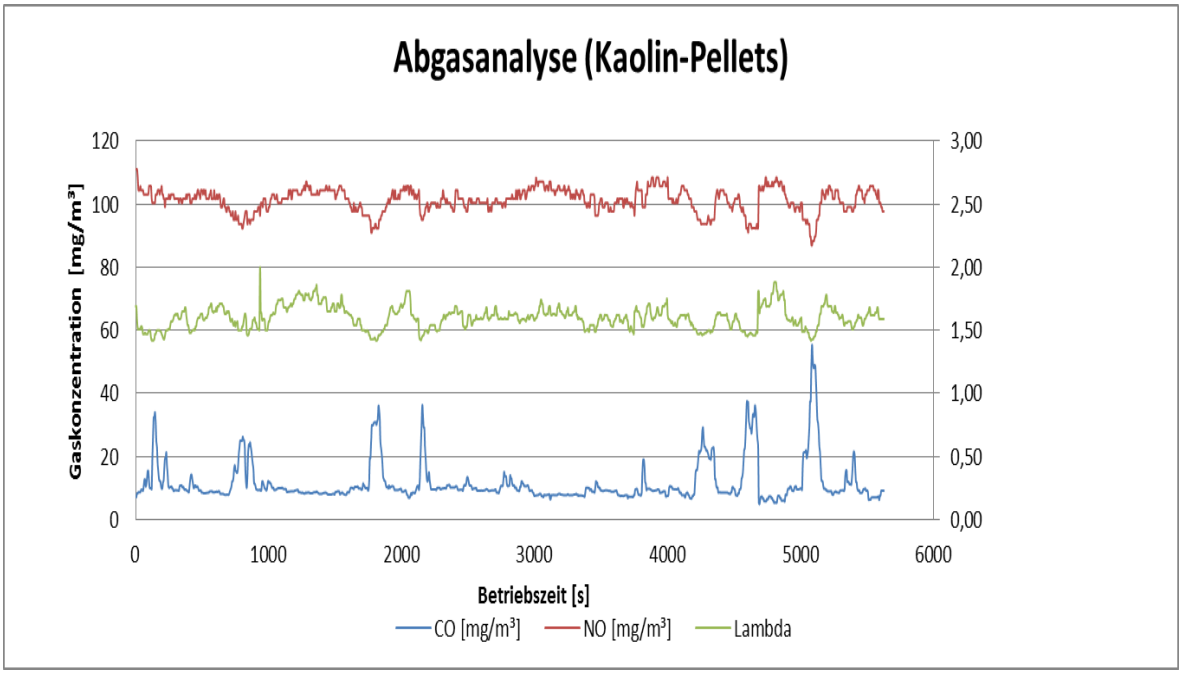
Versuchsreihe1, Versuch 4

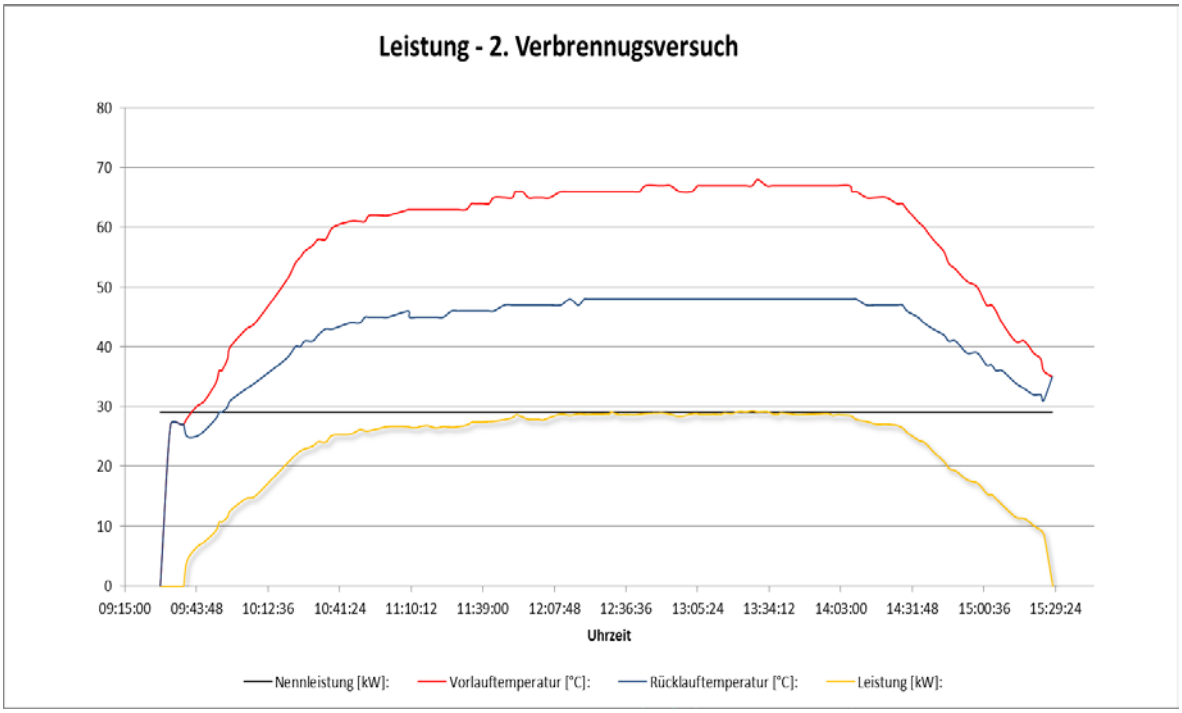




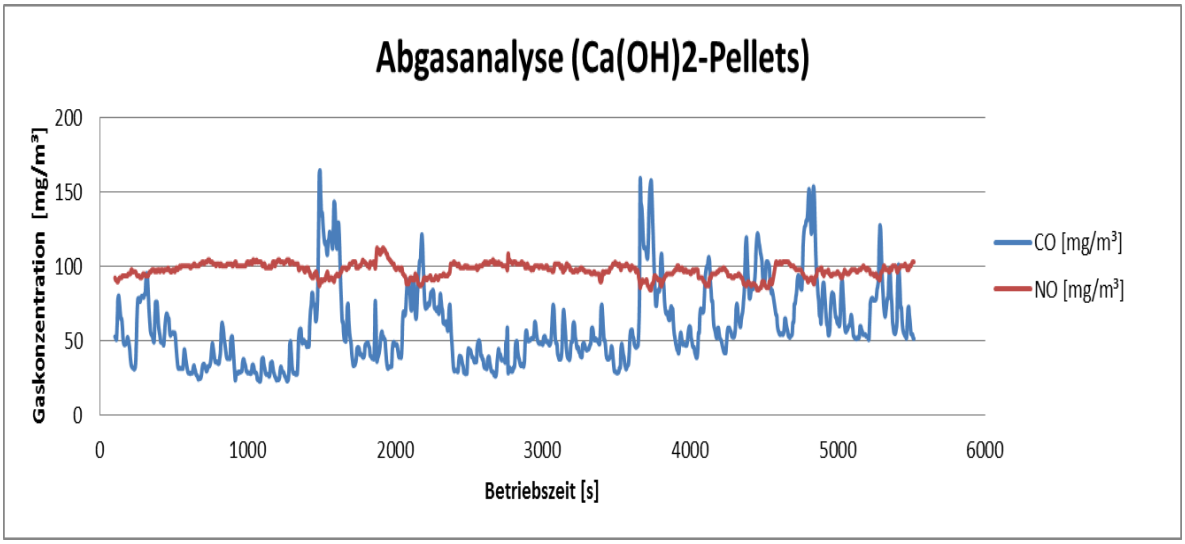
Anhang 6: Verbrennungsversuche – Versuchsreihe 2

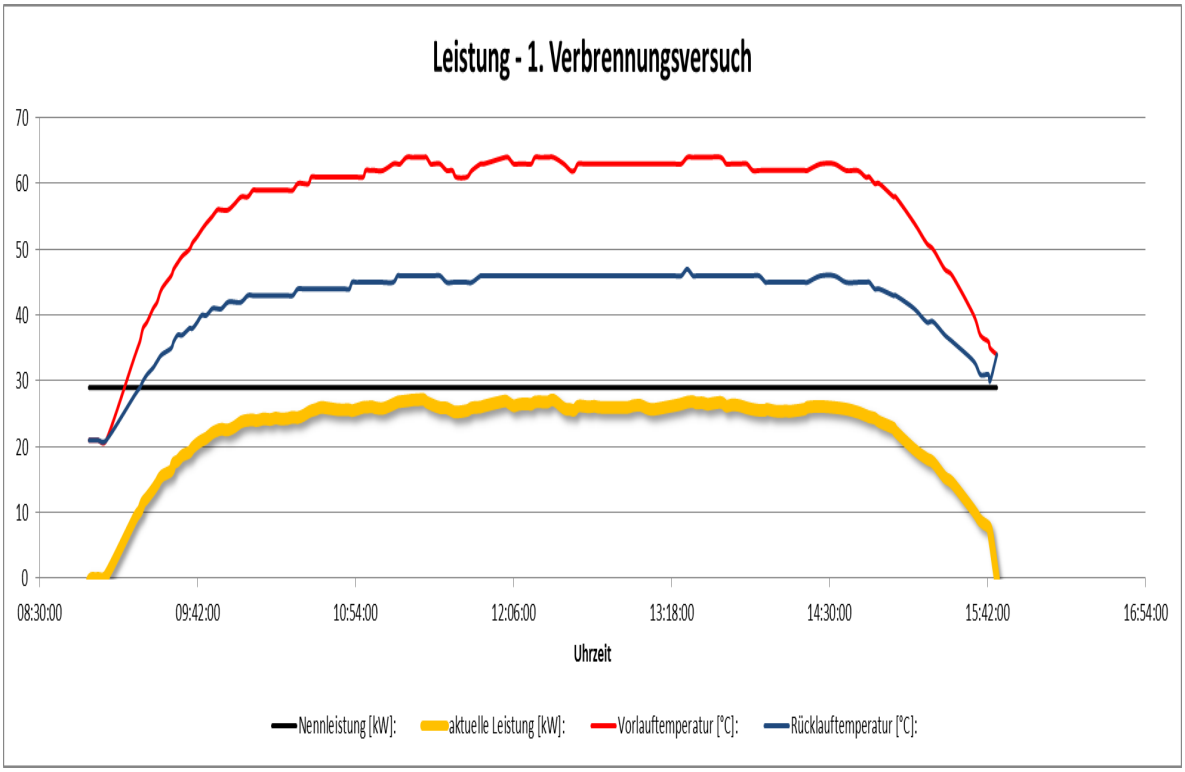
Versuchsreihe 2, Versuch 1



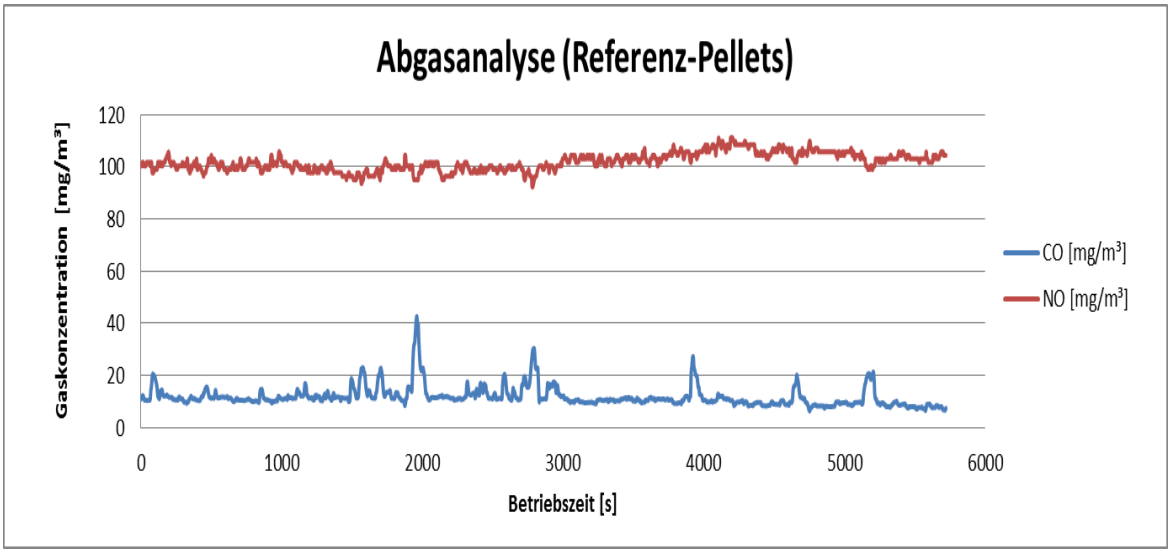


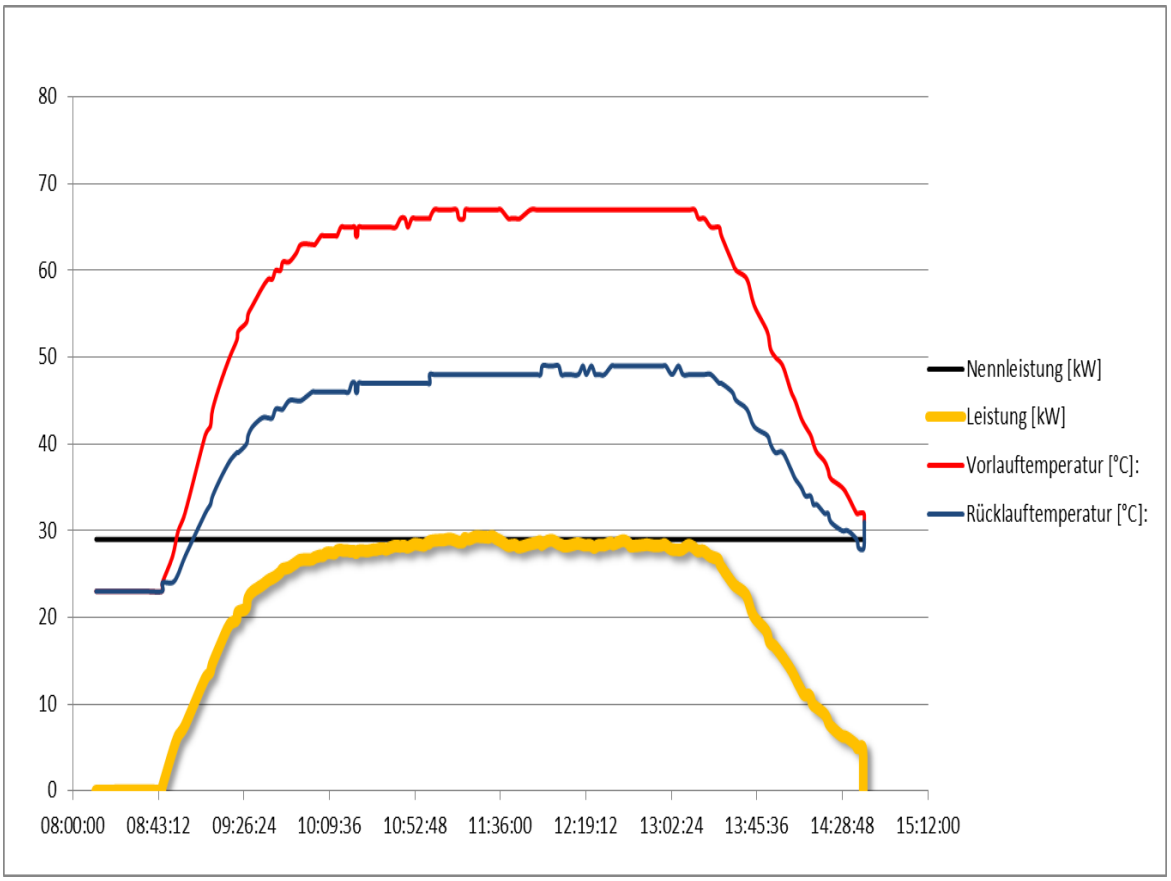
Versuchsreihe 2, Versuch 2





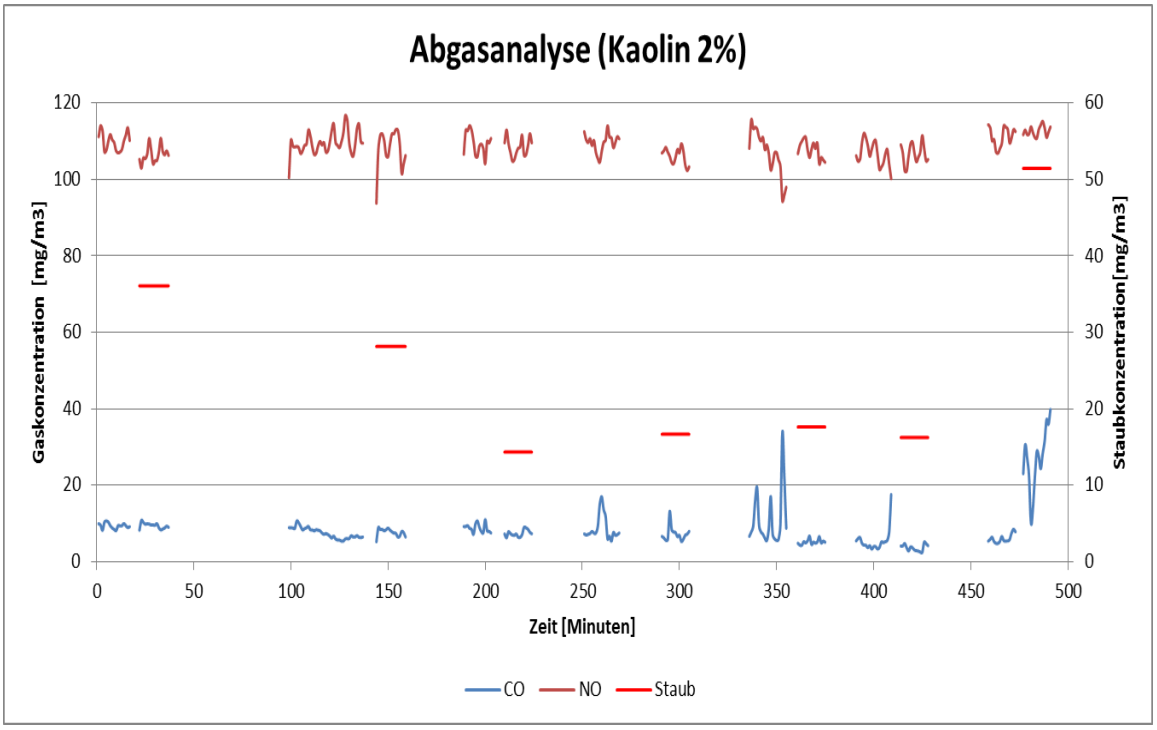
Versuchsreihe 2, Versuch 3

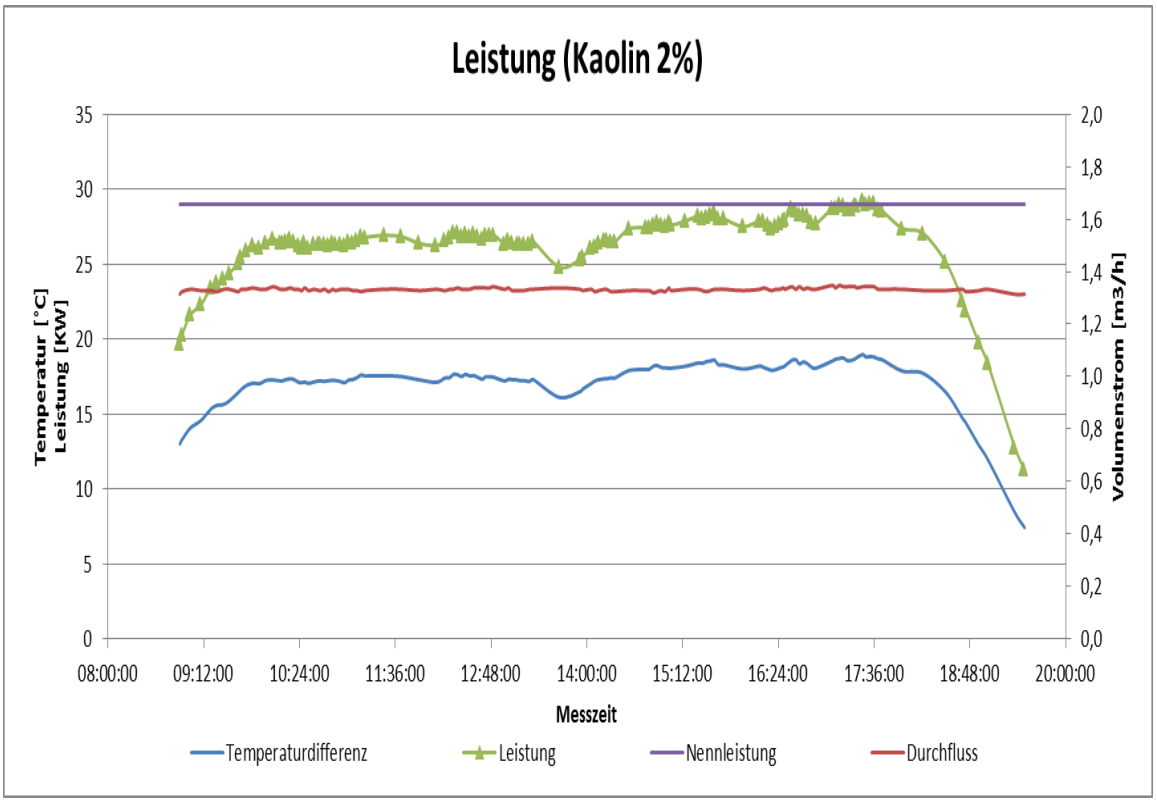




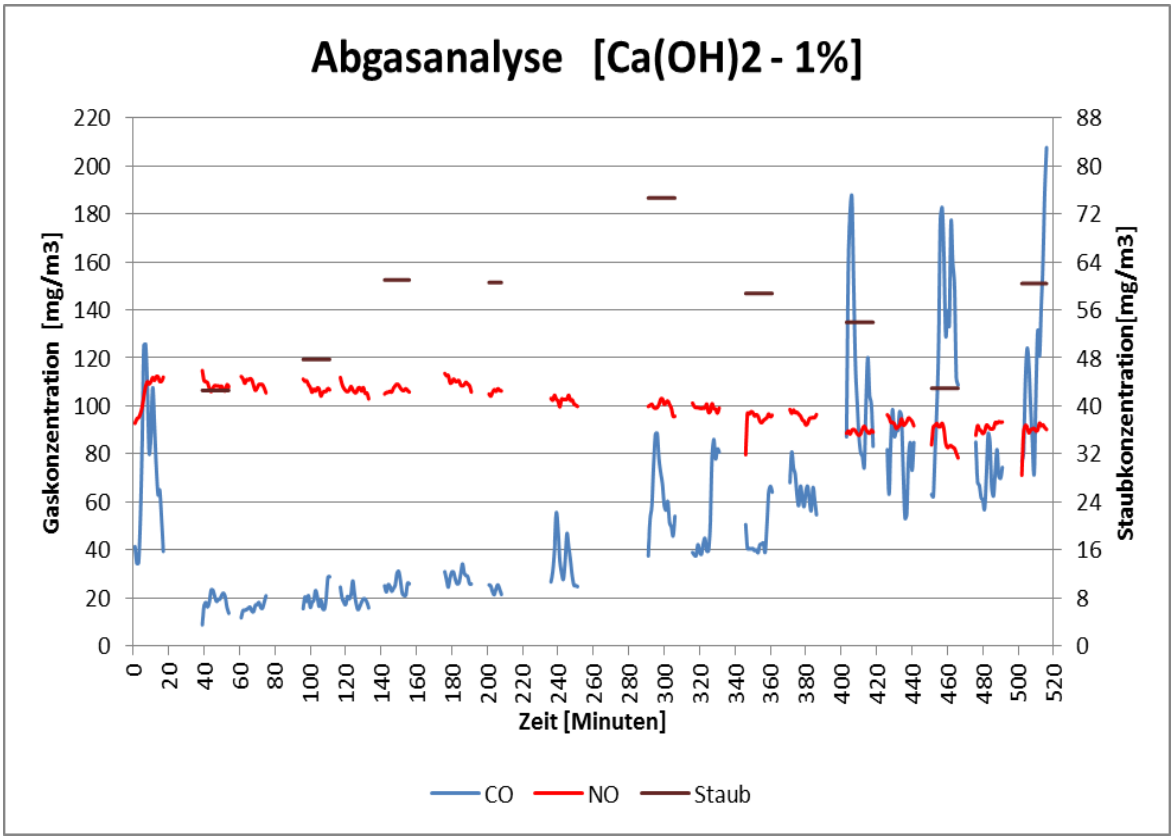
Anhang 7: Verbrennungsversuche – Versuchsreihe 3

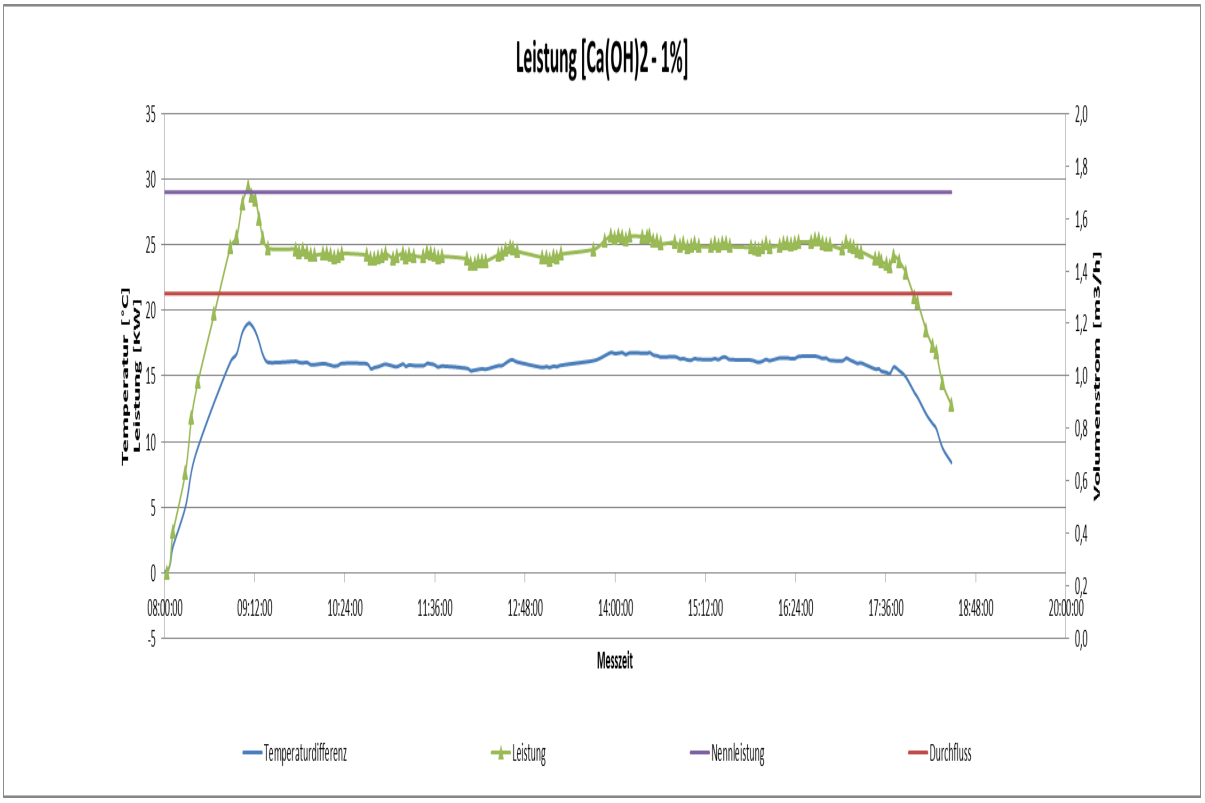
Versuchsreihe 3, Versuch 1



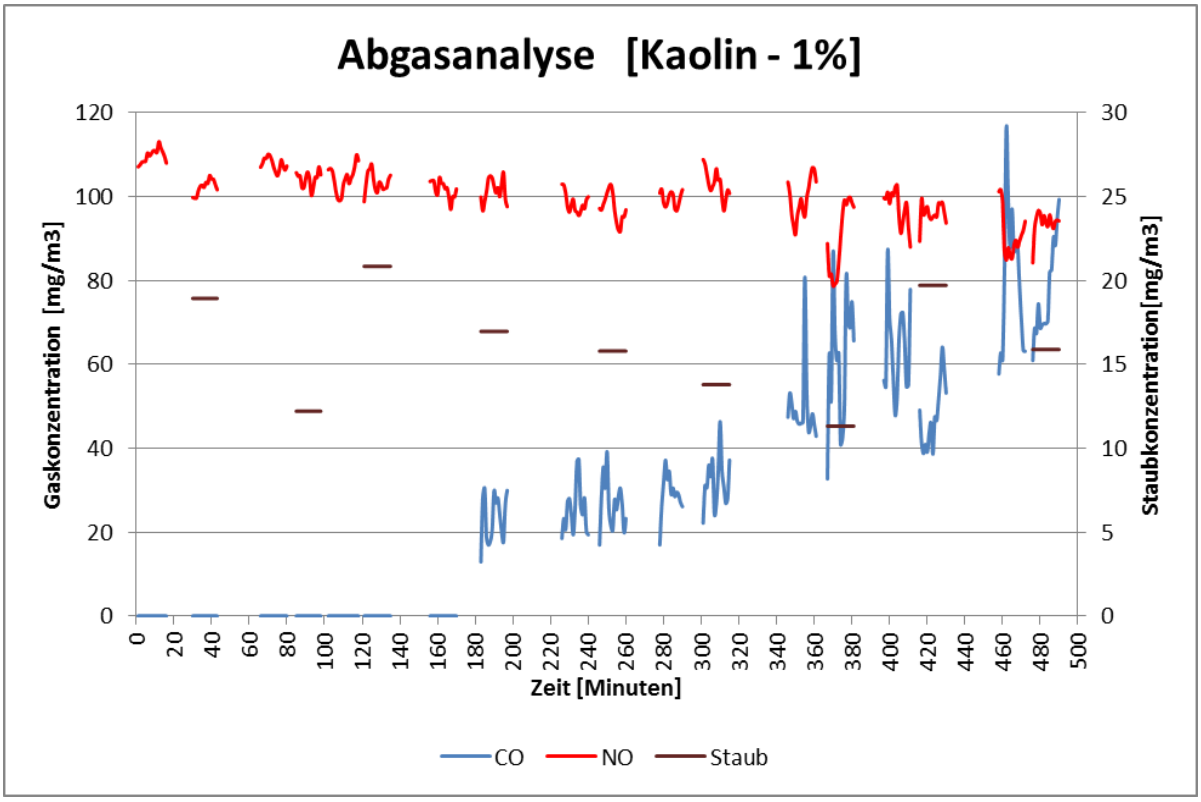


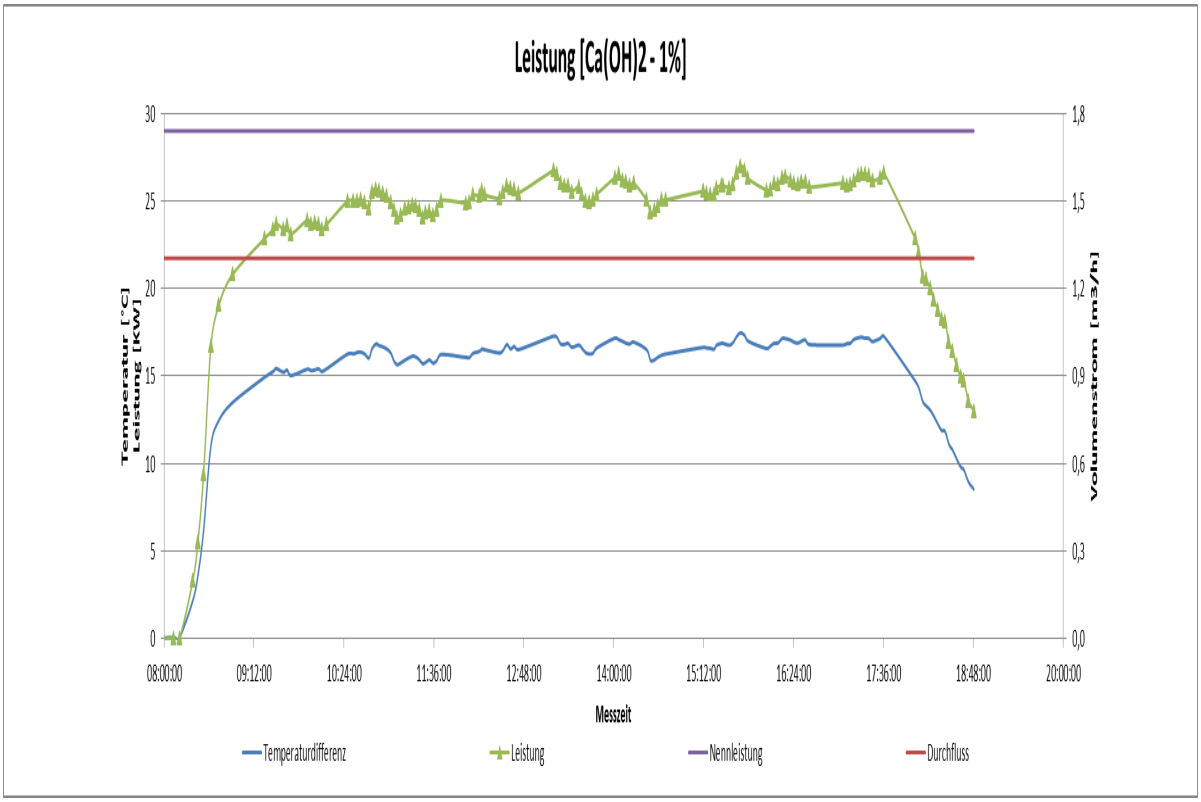
Versuchsreihe 3, Versuch 2



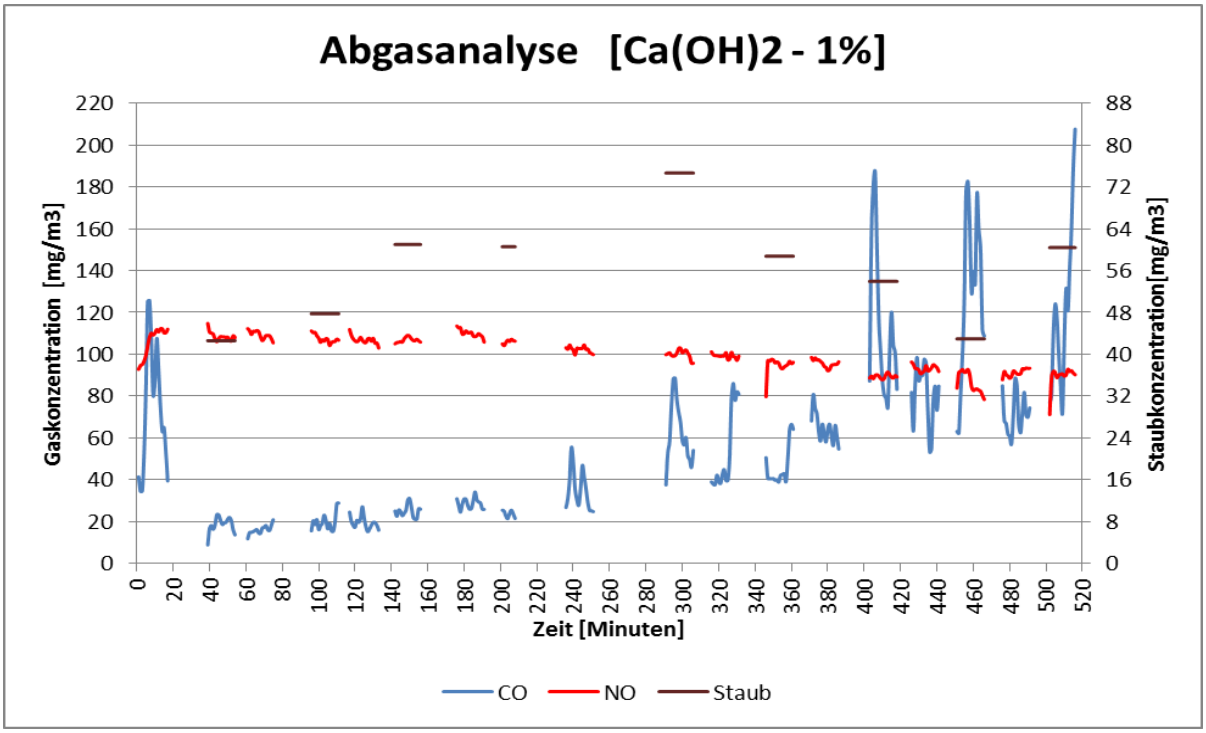


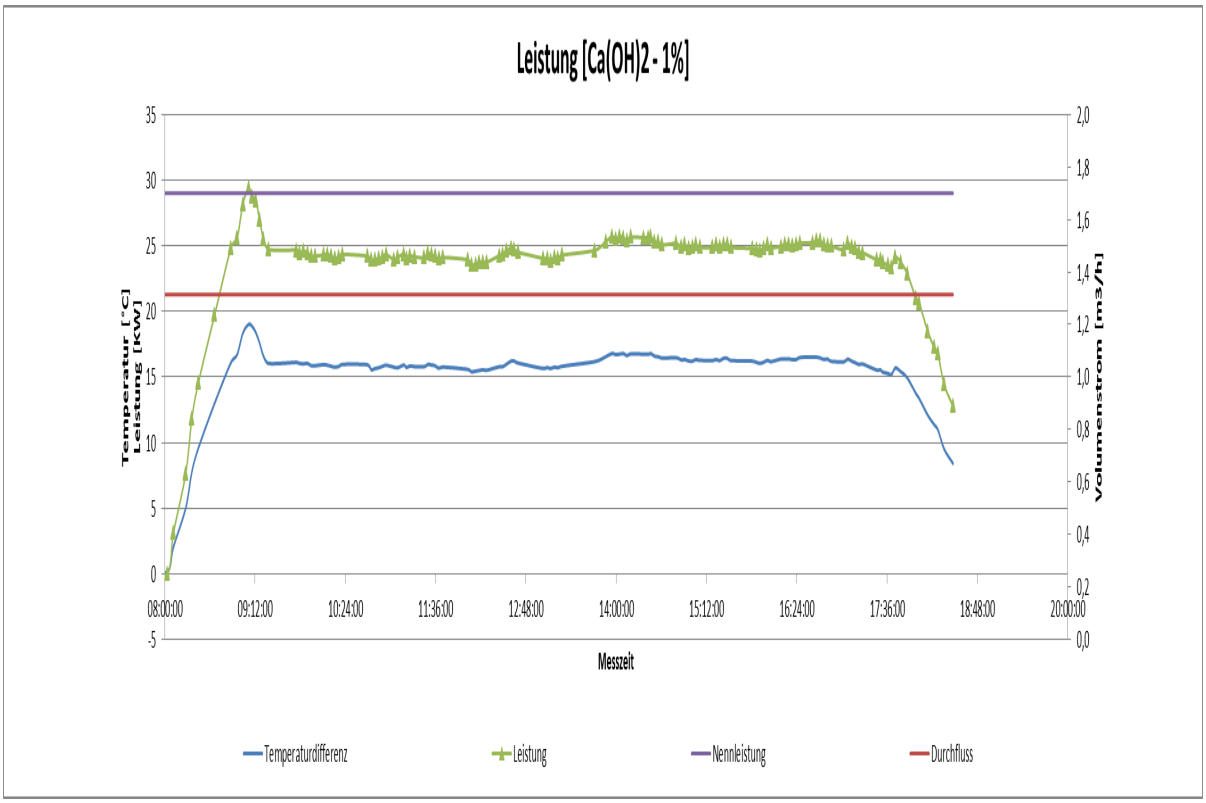
Versuchsreihe 3, Versuch 3



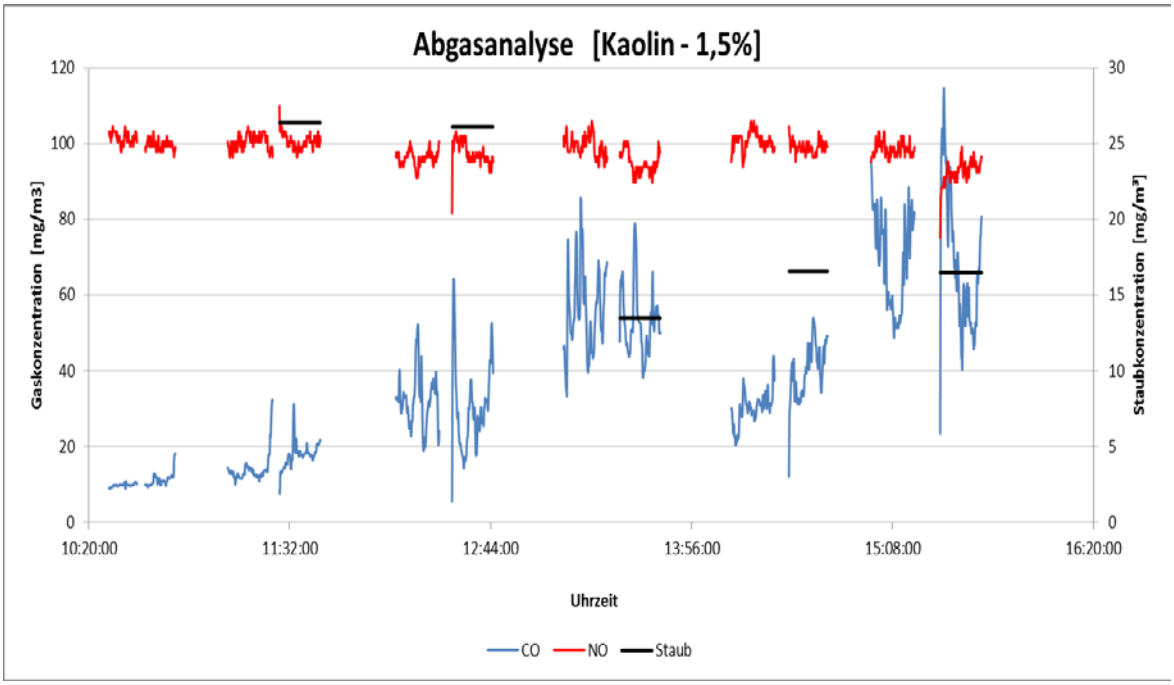


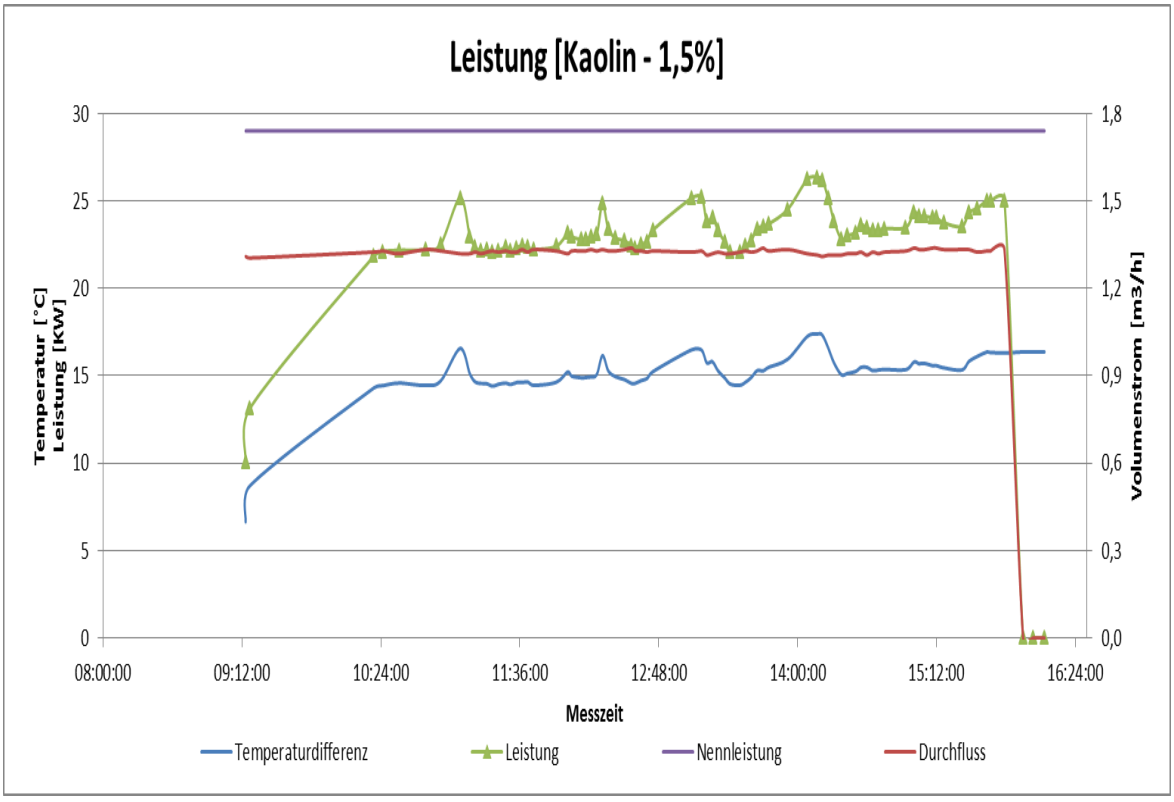
Versuchsreihe 3, Versuch 4





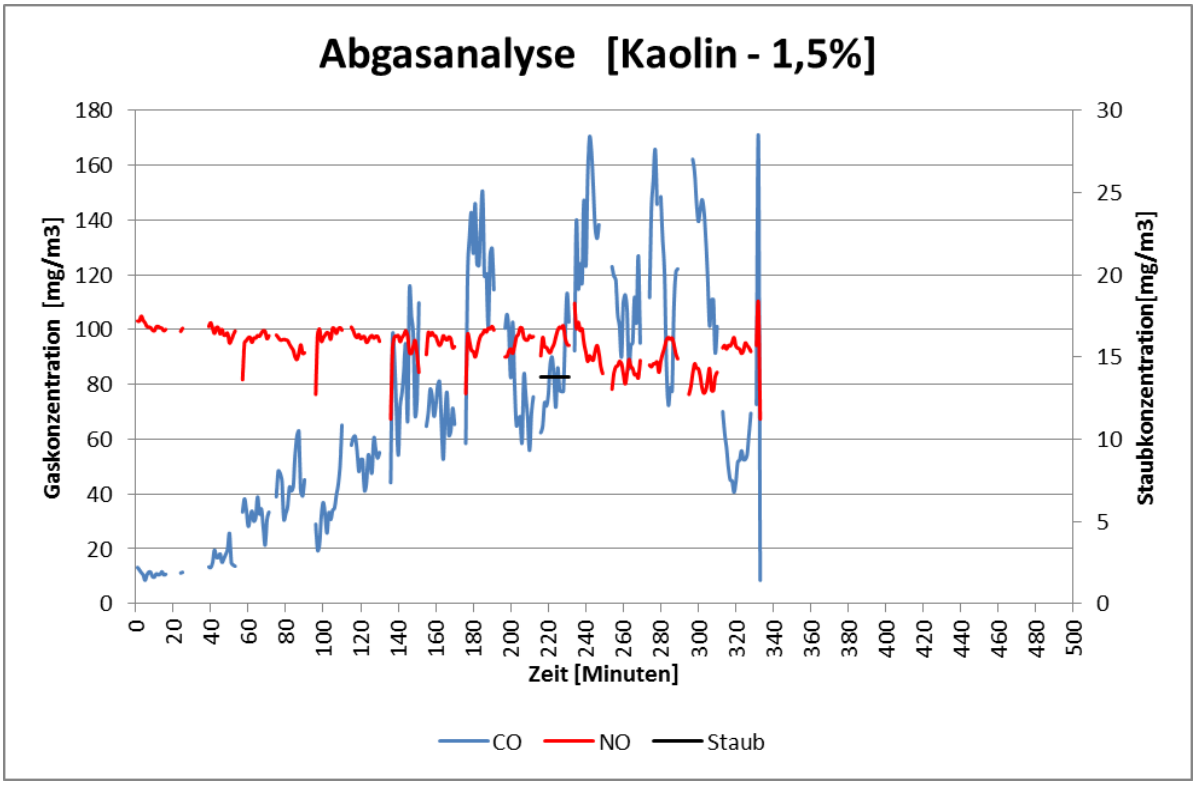
Versuchsreihe 3, Versuch 5

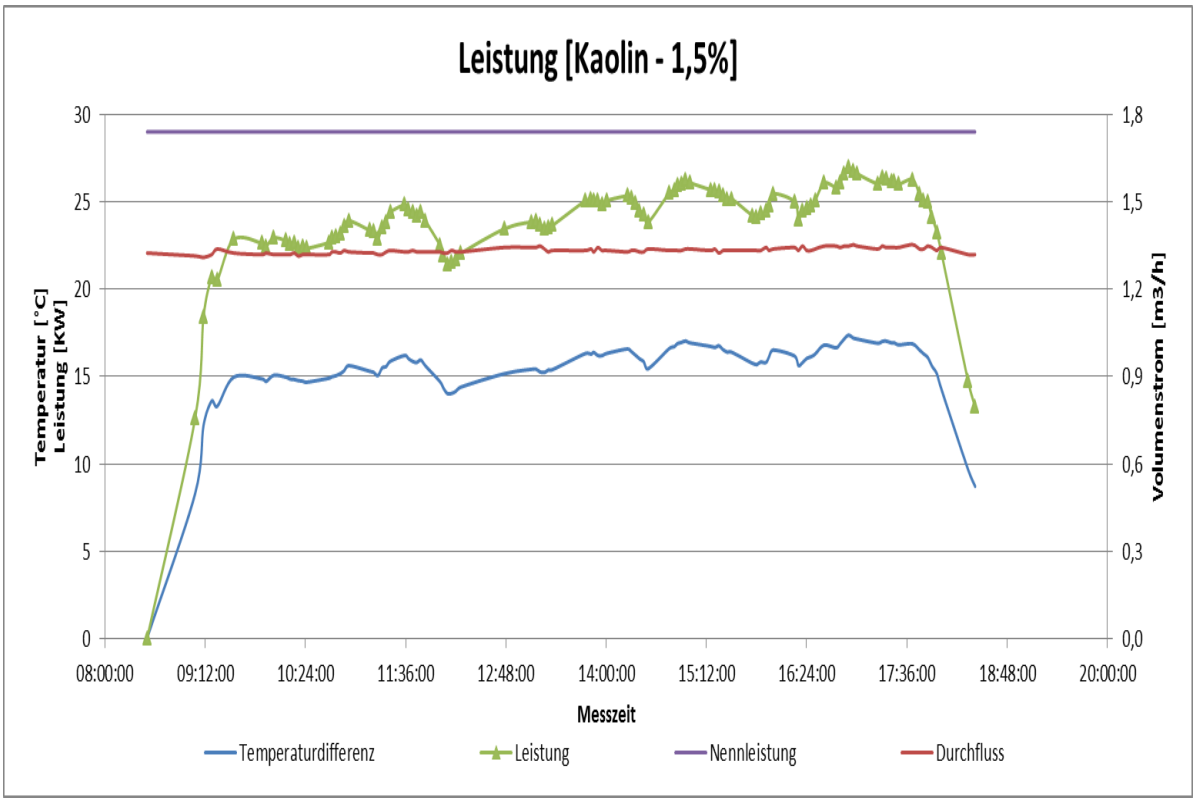




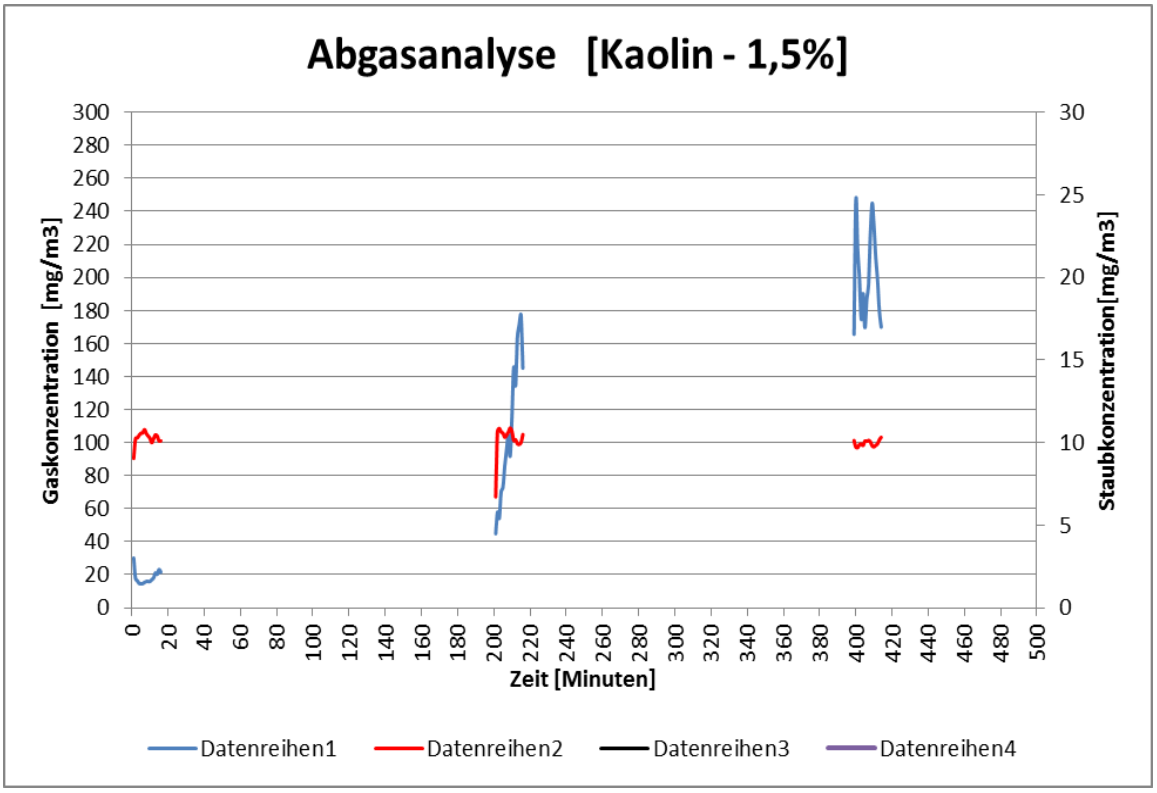
Anhang 8: Verbrennungsversuche – Versuchsreihe 4

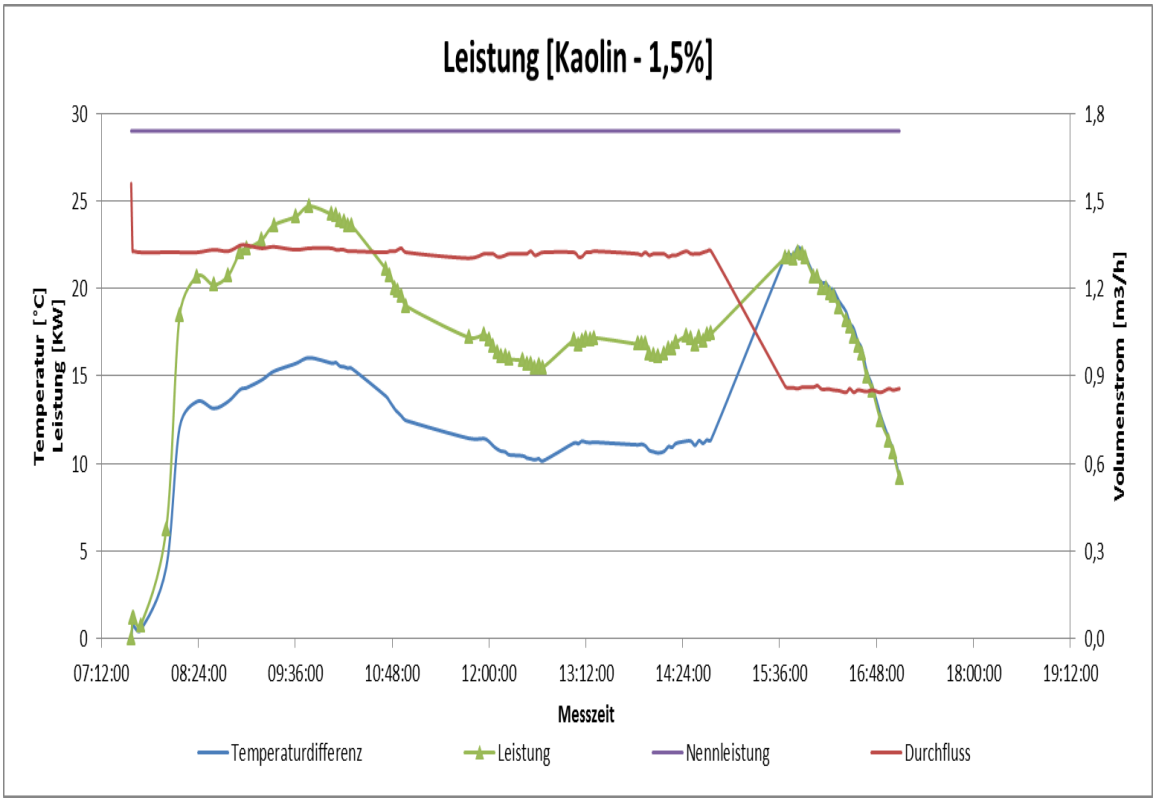
Versuchsreihe 4, Versuch 1



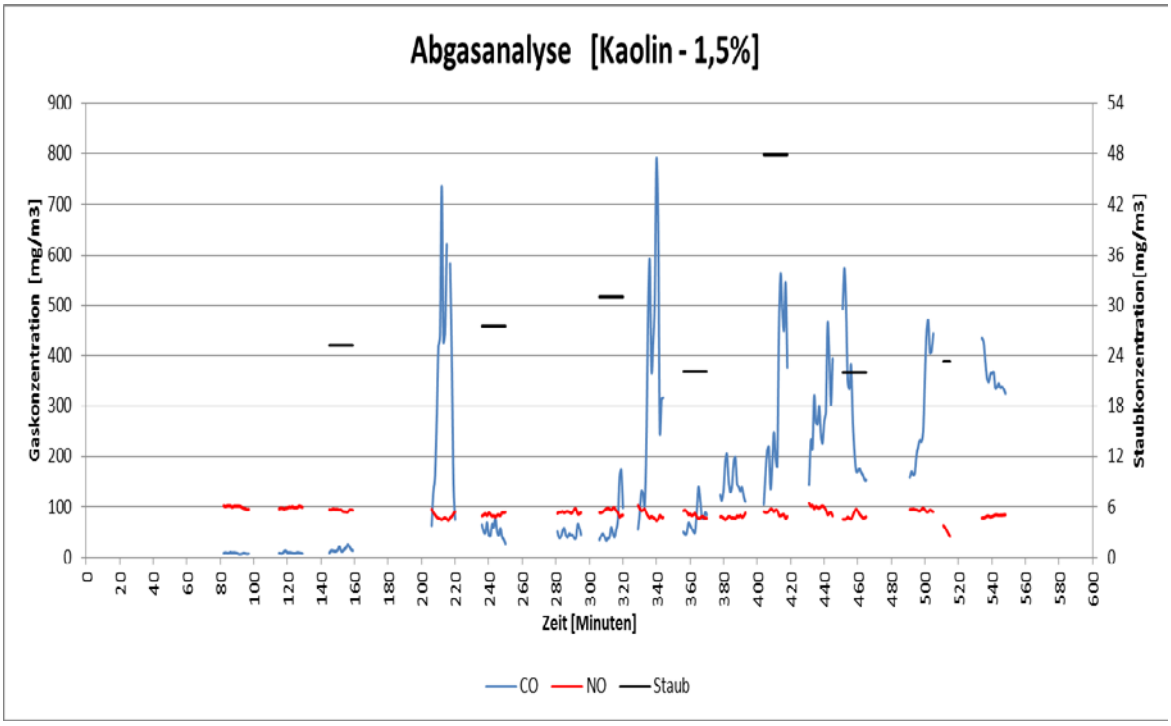


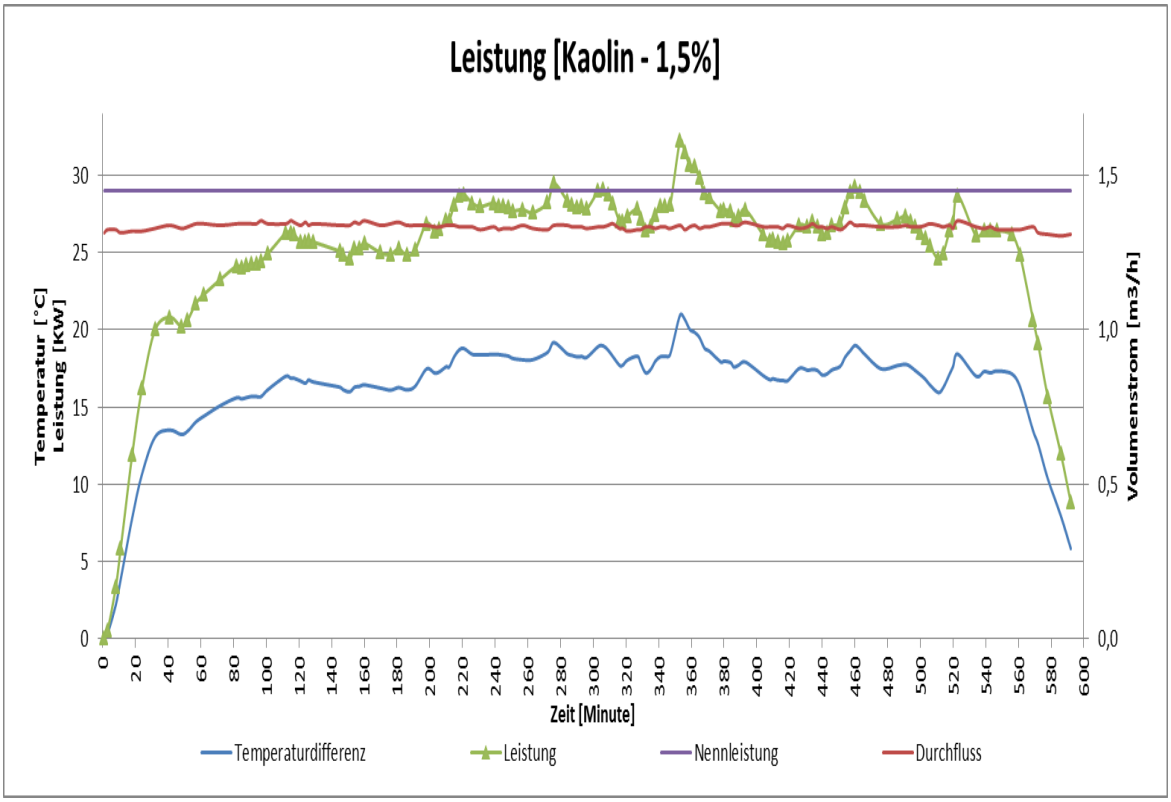
Versuchsreihe 4, Versuch 2





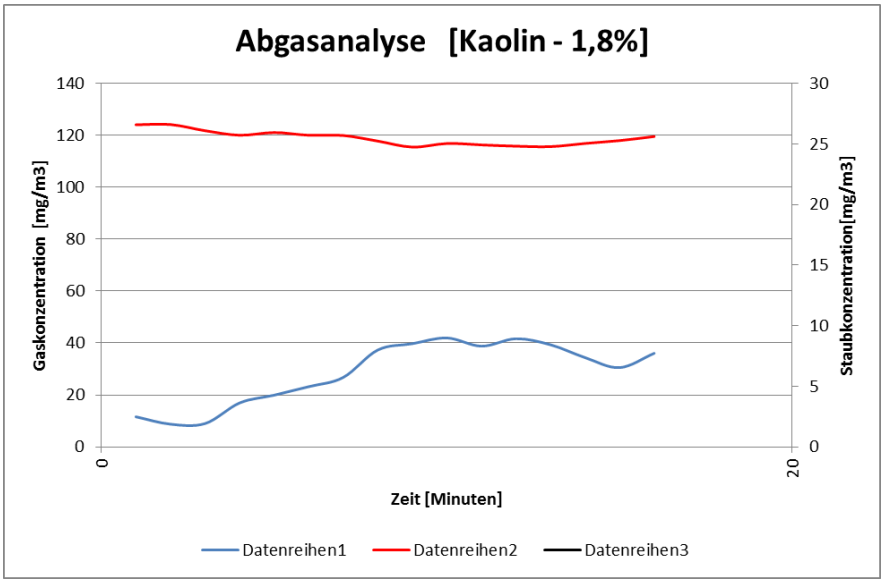
Versuchsreihe 4, Versuch 3



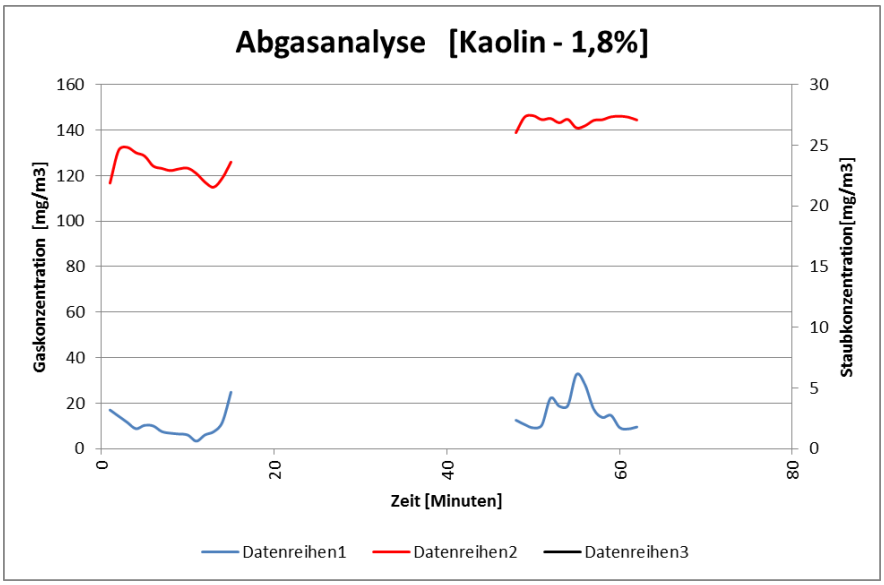


Anhang 9: Verbrennungsversuche – Versuchsreihe 5

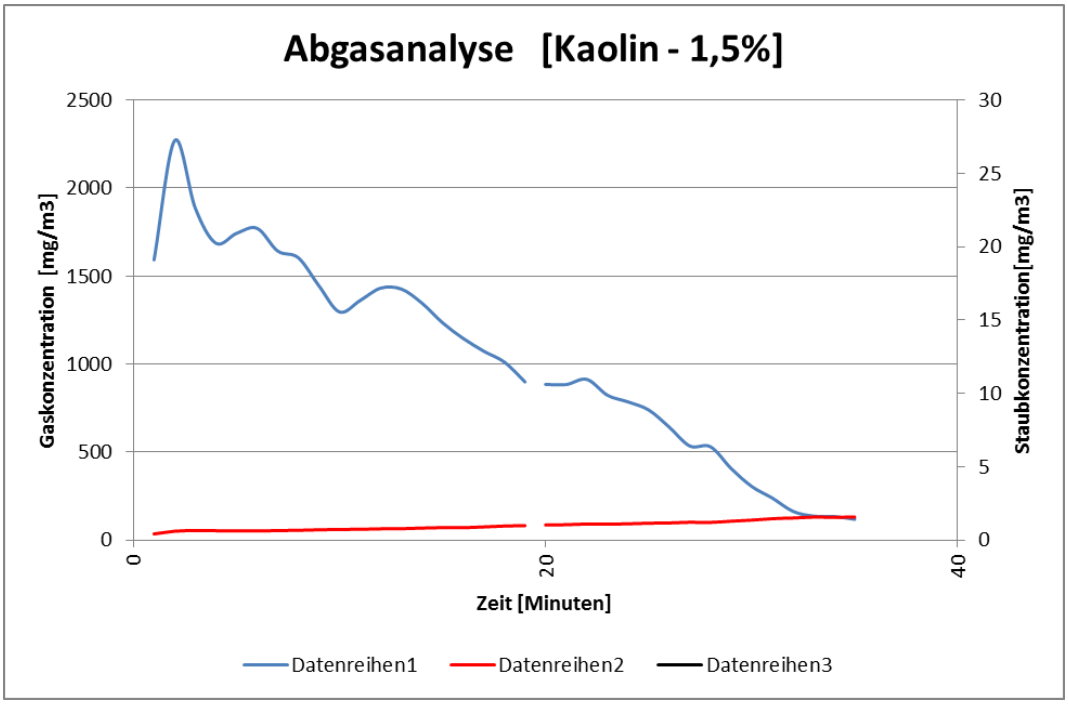
Versuchsreihe 5, Versuch 1



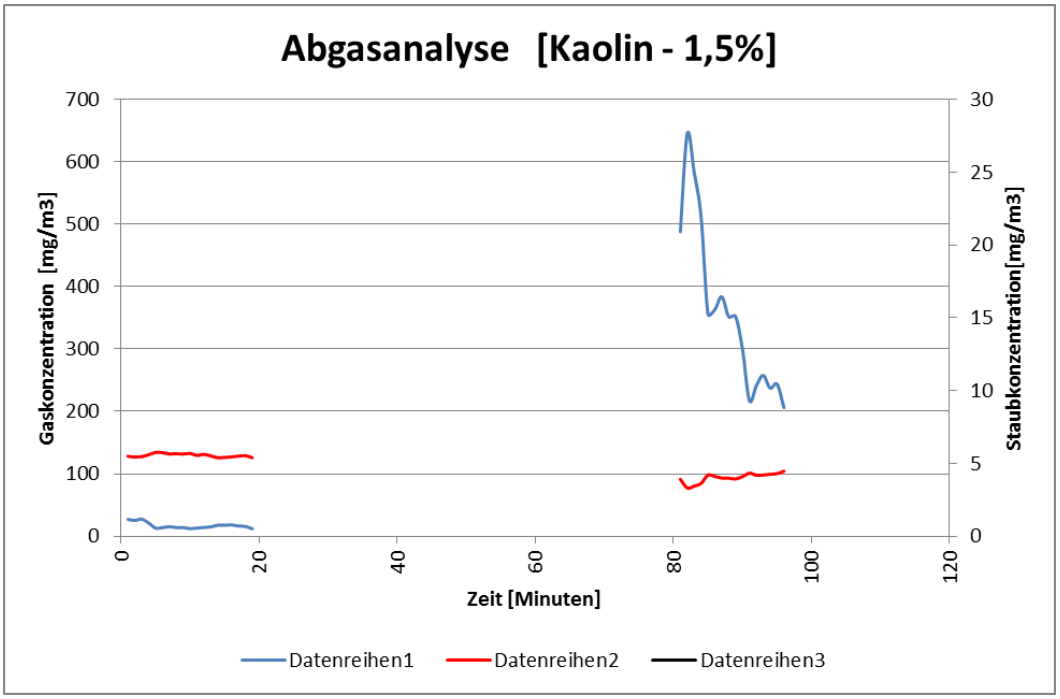
Versuchsreihe 5, Versuch 1



Versuchsreihe 5, Versuch 3



Versuchsreihe 5, Versuch 4



Prüfbericht

16538-001 P01

Auftraggeber: FH Köln LTRE
Betzdorfer Straße 2

Standort: Heideweg 3
53604 Bad Honnef
48153 Münster

Prüfgegenstand: **Art**
Abgasproben eines Pelletheizkessel

Prüfziel: Probenahme und Analyse des Abgases eines Pelletheizkessels auf polychlorierte Dibenzofurane und Dibenzodioxine (PCDF/D) bzw. Staub, SOx, CO, CO_2, NO_x, O_2 und Ges.-C.

Probenahme: Die Probenahmen erfolgten vom 24. – 26.09.2013

Prüfverfahren:
- Bestimmung von PCDF/D gem. DIN EN 1948-1 bis -3 durch isokinetische Absaugung des Abgases über eine gekühlte Sonde, Abscheidung des Kondensats, Abscheidung von Partikeln an einem Quarzwollefilter und einem Glasfaserplanfilter und abschließende Adsorption von dampf- und gasförmigen bzw. filtergängigen PCDF/D an XAD-2-Harz.
- Bestimmung von Gesamtstaub gem. DIN EN 13284-1 durch isokinetische Absaugung des Abgases über einen beheizten Quarzfaserfilter (MK 360, Munktel).
- Bestimmung von SOx gemäß DIN EN 14791; Absorption in H_2O_2-Lösung; Bestimmung mittels Ionenchromatographie
- Bestimmung von Gesamt-C mittels FID gemäß DIN EN 12628
- Bestimmung des Sauerstoffgehaltes im Abgas gemäß DIN EN 14789
- Bestimmung von CO gemäß DIN EN 15058
- Bestimmung NOx gemäß DIN EN 14792

Prüfergebnisse: siehe Tabellen 01 – 16 und Abbildungen 01 - 09

Bemerkung: Die CO-Konzentration überschritt bei den Spitzenwerten mehrfach den Messbereich des Analysators.

Münster, den 16.10.2013

_____

T. Tangermann

Hinweis: Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Prüfgegenstände. Auszugsweise darf der Prüfbericht nur mit schriftlicher Genehmigung der GfA GmbH vervielfältigt werden.

Tabelle 1: Probenahmeübersicht, Messzeitraum 24. – 26.09.2013

Matrix	Datum	Probenahme-zeit	Proben-Nr.	Probenahme-volumen Nm³(a)	Nf-Faktor normiert auf 11 Vol.-% $O_{2\,(b)}$	Nf-Faktor normiert auf 13 Vol.-% $O_{2\,(b)}$	PCDF/D	Staub	SOx	CO,O_2 CO_2, NOx, Ges.-C.[c]
Reingas	24.09.2013	11:20 - 17:20	**13G16935.1**	11,702 m³	1,163	0,930	X			X
	25.09.2013	9:15 - 15:15	**13G19635.2**	11,700 m³	1,058	0,847	X			X
	26.09.2013	8:35 - 14:35	**13G19635.3**	11,460 m³	1,053	0,842	X			X
Reingas	24.09.2013	12:20 - 12:50	**1301410005**	0,997 m³	1,100	0,880		X		X
	25.09.2013	13:15 - 13:45	**1301410006**	0,951 m³	1,135	0,908		X		X
	26.09.2013	11:04 - 11:34	**1301410007**	0,960 m³	1,117	0,894		X		X
	26.09.2013	13:00 - 13:30	**1301410017**	1,104 m³	1,024	0,819		X		X
Reingas	24.09.2013	11:20 - 11:50	**1301410009**	0,040 m³	1,115	0,892			X	X
	24.09.2013	12:20 - 12:50	**1301410010**	0,091 m³	1,100	0,880			X	X
	24.09.2013	12:50 - 13:20	**1301410011**	0,072 m³	1,131	0,905			X	X
	25.09.2013	9:20 - 9:50	**1301410012**	0,057 m³	0,885	0,708			X	X
	25.09.2013	9:50 - 10:20	**1301410013**	0,089 m³	0,838	0,671			X	X
	25.09.2013	10:20 - 10:50	**1301410014**	0,062 m³	0,962	0,769			X	X
	26.09.2013	8:40 - 9:10	**1301410015**	0,062 m³	0,844	0,675			X	X
	26.09.2013	11:35 - 12:05	**1301410016**	0,055 m³	0,966	0,773			X	X

[a] Bezug: 0 °C, 1013 hPa, trocken

[b] Faktor zur Umrechnung auf den Bezugssauerstoffgehalt

[c] z.T. kontinuierlich registriertende Messung parallel zu den übrigen Probenahmen

PCDF/D

Tabelle 2 Massenkonzentration und Massenstrom an PCDF/D, ausgedrückt als ITE-Werte nach NATO/CCMS
Bezug [ng/m3]: 0 °C, 1.013 hPa, trocken, normiert auf 11 Vol.-% O_2

Anlage Messstelle	FH Köln Reingas					
Messtag	Messung Nr.	Uhrzeit von - bis	O_2-Gehalt Vol.-%	PCDF/D-Gehalt I-TEQ (NATO/CCMS inkl. BG bei akt. O_2 ng/m³	bei 11 % O_2 ng/m³	PCDF/D Massenstrom µg/h
24.09.2013	13G19635.1	11:20 - 17:20	12,4	0,223	0,259	0,02
25.09.2013	13G19635.2	9:15 - 15:15	11,6	0,272	0,288	0,02
26.09.2013	13G19635.3	8:35 - 14:35	11,5	0,298	0,313	0,03
Minimum				**0,223**	**0,259**	**0,020**
Maximum				**0,298**	**0,313**	**0,027**
Mittelwert				**0,264**	**0,287**	**0,024**

Tabelle 3 Massenkonzentration und Massenstrom an PCDF/D, ausgedrückt als ITE-Werte nach NATO/CCMS
Bezug [ng/m3]: 0 °C, 1.013 hPa, trocken, normiert auf 13 Vol.-% O_2

Anlage Messstelle	FH Köln Reingas					
Messtag	Messung Nr.	Uhrzeit von - bis	O_2-Gehalt Vol.-%	PCDF/D-Gehalt I-TEQ (NATO/CCMS inkl. BG bei akt. O_2 ng/m³	bei 13 % O_2 ng/m³	PCDF/D Massenstrom µg/h
24.09.2013	13G19635.1	11:20 - 17:20	12,4	0,223	0,207	0,02
25.09.2013	13G19635.2	9:15 - 15:15	11,6	0,272	0,230	0,02
26.09.2013	13G19635.3	8:35 - 14:35	11,5	0,298	0,251	0,03
Minimum				**0,223**	**0,207**	**0,020**
Maximum				**0,298**	**0,251**	**0,027**
Mittelwert				**0,264**	**0,229**	**0,024**

Staub

Tabelle 4 Massenkonzentration und Massenstrom an Staub;
Bezug [mg/m³]: 0 °C, 1.013 hPa, trocken, normiert auf 11 Vol.-% O_2

Anlage	FH Köln					
Messstelle	Reingas					
Messtag	Messung Nr.	Uhrzeit von - bis	O_2-Gehalt Vol.-%	Staub-Gehalt bei akt. O_2 mg/m³	Staub-Gehalt bei 11 % O_2 mg/m³	Staub Massenstrom g/h
24.09.2013	1301410005	12:20 - 12:50	11,9	3,0	3,3	0,3
25.09.2013	1301410006	13:15 - 13:45	12,2	47,0	53,3	4,2
26.09.2013	1301410007	11:04 - 11:34	12,1	43,3	48,4	4,0
26.09.2013	1301410017	13:00 - 13:30	11,2	29,6	30,3	2,7
Minimum				**3,0**	**3,3**	**0,3**
Maximum				**47,0**	**53,3**	**4,2**
Mittelwert				**30,7**	**33,8**	**2,8**

Tabelle 5 Massenkonzentration und Massenstrom an Staub;
Bezug [mg/m³]: 0 °C, 1.013 hPa, trocken, normiert auf 13 Vol.-% O_2

Anlage	FH Köln					
Messstelle	Reingas					
Messtag	Messung Nr.	Uhrzeit von - bis	O_2-Gehalt Vol.-%	Staub-Gehalt bei akt. O_2 mg/m³	Staub-Gehalt bei 13 % O_2 mg/m³	Staub Massenstrom g/h
24.09.2013	1301410005	12:20 - 12:50	11,9	3,0	2,6	0,3
25.09.2013	1301410006	13:15 - 13:45	12,2	47,0	42,6	4,2
26.09.2013	1301410007	11:04 - 11:34	12,1	43,3	38,7	4,0
26.09.2013	1301410017	13:00 - 13:30	11,2	29,6	24,2	2,7
Minimum				**3,0**	**2,6**	**0,3**
Maximum				**47,0**	**42,6**	**4,2**
Mittelwert				**30,7**	**27,0**	**2,8**

Schwefeloxide

Tabelle 6 Massenkonzentration und Massenstrom an SOx;
Bezug [mg/m³]: 0 °C, 1.013 hPa, trocken, normiert auf 11 Vol.-% O_2

Anlage	FH Köln					
Messstelle	Reingas					
Messtag	Messung Nr.	Uhrzeit von - bis	O_2-Gehalt Vol.-%	SOx-Gehalt bei akt. O_2 mg/m³	SOx-Gehalt bei 11 % O_2 mg/m³	SOx Massenstrom g/h
24.09.2013	1301410009	11:20 - 11:50	12,0	18,3	20,4	1,66
24.09.2013	1301410010	12:20 - 12:50	11,9	22,0	24,2	2,00
24.09.2013	1301410011	12:50 - 13:20	12,2	24,2	27,4	2,20
25.09.2013	1301410012	9:20 - 9:50	9,7	37,6	33,3	3,39
25.09.2013	1301410013	9:50 - 10:20	9,1	50,0	41,9	4,51
25.09.2013	1301410014	10:20 - 10:50	10,6	53,7	51,7	4,84
26.09.2013	1301410015	8:40 - 9:10	9,2	42,7	36,0	3,94
26.09.2013	1301410016	11:35 - 12:05	10,7	25,4	24,5	2,34
Minimum				**18,3**	**20,4**	**1,66**
Maximum				**53,7**	**51,7**	**4,84**
Mittelwert				**34,2**	**32,4**	**3,11**

Tabelle 7 Massenkonzentration und Massenstrom an SOx;
Bezug [mg/m³]: 0 °C, 1.013 hPa, trocken, normiert auf 13 Vol.-% O_2

Anlage	FH Köln					
Messstelle	Reingas					
Messtag	Messung Nr.	Uhrzeit von - bis	O_2-Gehalt Vol.-%	SOx-Gehalt bei akt. O_2 mg/m³	SOx-Gehalt bei 13 % O_2 mg/m³	SOx Massenstrom g/h
24.09.2013	1301410009	11:20 - 11:50	12,0	18,3	16,3	1,66
24.09.2013	1301410010	12:20 - 12:50	11,9	22,0	19,4	2,00
24.09.2013	1301410011	12:50 - 13:20	12,2	24,2	21,9	2,20
25.09.2013	1301410012	9:20 - 9:50	9,7	37,6	26,6	3,39
25.09.2013	1301410013	9:50 - 10:20	9,1	50,0	33,6	4,51
25.09.2013	1301410014	10:20 - 10:50	10,6	53,7	41,3	4,84
26.09.2013	1301410015	8:40 - 9:10	9,2	42,7	28,8	3,94
26.09.2013	1301410016	11:35 - 12:05	10,7	25,4	19,6	2,34
Minimum				**18,3**	**16,3**	**1,66**
Maximum				**53,7**	**41,3**	**4,84**
Mittelwert				**34,2**	**25,9**	**3,11**

CO-, CO_2-, NOx-,O_2 und Ges.-C-Konzentrationen sowie Normierungsfaktoren

Tabelle 8 CO-, CO_2-, NOx-, O_2 und Ges.-C -Konzentration während der Probenahmen am 24.09.2013
Bezug [mg/m^3]: 0 °C, 1.013 hPa, trocken, normiert auf 11 Vol.-% O_2

FH Köln Pelletofen in Bad Honnef 24.09.2013 Sauerstoffbezug 11%										
Datum	Uhrzeit		CO	CO2	NOx	O2	Ges. - C	T	Normierungsfaktor (x Vol. - % O2 nach	Luftdruck
	Beginn	Ende	(mg/m³)	(Vol. - %)	(mg/m³)	(Vol. - %)	(mg/m³)	(°C)	11 Vol. - % O2	(hPa)
24.09.13	11:20	11:50	91	8,0	215	12,0	5	136	1,115	989
24.09.13	11:50	12:20	972	5,0	143	15,1	258	71	1,696	989
24.09.13	12:20	12:50	136	8,1	214	11,9	6	146	1,100	989
24.09.13	12:50	13:20	69	7,9	225	12,2	2	130	1,131	989
24.09.13	13:20	13:50	33	8,9	216	11,0	2	124	1,000	989
24.09.13	13:50	14:20	50	8,6	204	11,3	< 2	134	1,031	989
24.09.13	14:20	14:50	831	5,4	152	14,8	74	93	1,615	989
24.09.13	14:50	15:20	122	7,8	234	12,3	< 2	136	1,144	989
24.09.13	15:20	15:50	23	9,1	218	10,7	< 2	125	0,968	989
24.09.13	15:50	16:20	36	8,8	211	11,1	< 2	121	1,007	989
24.09.13	16:20	16:50	178	7,2	195	12,8	21	123	1,225	989
24.09.13	16:50	17:20	512	6,3	182	13,7	107	125	1,369	989
24.09.13	11:20	17:20	254	7,6	201	12,4	40	122	1,200	989

Bezüge:
- Einheit mg/m³: 0°C, 1013 hPa, trocken, normiert auf 11 Vol. - % O2
- Stickstoffoxide: Summe aus NO und NO2, berechnet als NO2
- Einheit Vol. - %: trockenes Abgas

Hinweis: Die CO-Konzentrationen weisen Minderbefunde auf, da teilweise in Spitzen der Messbereich des Analysators überschritten war.

Tabelle 9 CO-, CO_2-, NOx-, O_2 und Ges.-C -Konzentration während der Probenahmen am 24.09.2013
Bezug [mg/m^3]: 0 °C, 1.013 hPa, trocken, normiert auf 13 Vol.-% O_2

FH Köln Pelletofen in Bad Honnef 24.09.2013 Sauerstoffbezug 13%										
Datum	Uhrzeit		CO	CO2	NOx	O2	Ges. - C	T	Normierungsfaktor (x Vol. - % O2 nach	Luftdruck
	Beginn	Ende	(mg/m³)	(Vol. - %)	(mg/m³)	(Vol. - %)	(mg/m³)	(°C)	13 Vol. - % O2	(hPa)
24.09.13	11:20	11:50	73	8,0	172	12,0	4	136	0,892	989
24.09.13	11:50	12:20	778	5,0	114	15,1	207	71	1,357	989
24.09.13	12:20	12:50	109	8,1	172	11,9	4	146	0,880	989
24.09.13	12:50	13:20	55	7,9	180	12,2	2	130	0,905	989
24.09.13	13:20	13:50	26	8,9	173	11,0	< 2	124	0,800	989
24.09.13	13:50	14:20	40	8,6	163	11,3	< 2	134	0,824	989
24.09.13	14:20	14:50	665	5,4	122	14,8	59	93	1,292	989
24.09.13	14:50	15:20	98	7,8	187	12,3	< 2	136	0,916	989
24.09.13	15:20	15:50	19	9,1	175	10,7	< 2	125	0,775	989
24.09.13	15:50	16:20	29	8,8	169	11,1	< 2	121	0,806	989
24.09.13	16:20	16:50	143	7,2	156	12,8	17	123	0,980	989
24.09.13	16:50	17:20	409	6,3	146	13,7	85	125	1,095	989
24.09.13	11:20	17:20	204	7,6	161	12,4	32	122	0,960	989

Bezüge:
- Einheit mg/m³: 0°C, 1013 hPa, trocken, normiert auf 13 Vol. - % O2
- Stickstoffoxide: Summe aus NO und NO2, berechnet als NO2
- Einheit Vol. - %: trockenes Abgas

Hinweis: Die CO-Konzentrationen weisen Minderbefunde auf, da teilweise in Spitzen der Messbereich des Analysators überschritten war.

Tabelle 10 CO-, CO_2-, NOx-, O_2 und Ges.-C -Konzentration während der Probenahmen am 25.09.2013
Bezug [mg/m^3]: 0 °C, 1.013 hPa, trocken, normiert auf 11 Vol.-% O_2

FH Köln Pelletofen in Bad Honnef am 25.09.2013 Sauerstoffbezug 11%										
Datum	Uhrzeit		CO	CO2	NOx	O2	Ges.-C	T	Normierungsfaktor (x Vol.-% O2 nach	Luftdruck
	Beginn	Ende	(mg/m³)	(Vol.-%)	(mg/m³)	(Vol.-%)	(mg/m³)	(°C)	11 Vol.-% O2	(hPa)
25.09.13	09:15	09:45	31	11,0	235	9,7	4	123	0,884	983
25.09.13	09:45	10:15	11	11,6	219	9,0	2	126	0,834	983
25.09.13	10:15	10:45	13	10,1	216	10,5	< 2	123	0,953	983
25.09.13	10:45	11:15	154	8,7	198	11,9	11	129	1,101	983
25.09.13	11:15	11:45	1008	6,9	186	13,7	185	121	1,364	983
25.09.13	11:45	12:15	89	9,1	212	11,5	6	133	1,056	983
25.09.13	12:15	12:45	60	9,0	217	11,7	< 2	130	1,078	983
25.09.13	12:45	13:15	23	9,7	224	10,9	< 2	133	0,991	983
25.09.13	13:15	13:45	369	8,3	188	12,2	109	127	1,136	983
25.09.13	13:45	14:15	699	7,2	203	13,5	60	131	1,326	983
25.09.13	14:15	14:45	131	7,9	219	12,7	2	139	1,210	983
25.09.13	14:45	15:15	35	9,3	232	11,3	< 2	137	1,033	983
25.09.13	9:15	15:15	218	9,1	212	11,6	32	129	1,080	983

Bezüge:
- Einheit mg/m³: 0°C, 1013 hPa, trocken, normiert auf 11 Vol.-% O2
- Stickstoffoxide: Summe aus NO und NO2, berechnet als NO2
- Einheit Vol.-%: trockenes Abgas

Hinweis: Die CO-Konzentrationen weisen Minderbefunde auf, da teilweise in Spitzen der Messbereich des Analysators überschritten war.

Tabelle 11 CO-, CO_2-, NOx-, O_2 und Ges.-C -Konzentration während der Probenahmen am 25.09.2013
Bezug [mg/m^3]: 0 °C, 1.013 hPa, trocken, normiert auf 13 Vol.-% O_2

FH Köln Pelletofen in Bad Honnef am 25.09.2013 Sauerstoffbezug 13%										
Datum	Uhrzeit		CO	CO2	NOx	O2	Ges.-C	T	Normierungsfaktor (x Vol.-% O2 nach	Luftdruck
	Beginn	Ende	(mg/m³)	(Vol.-%)	(mg/m³)	(Vol.-%)	(mg/m³)	(°C)	13 Vol.-% O2	(hPa)
25.09.13	09:15	09:45	25	11,0	188	9,7	3	123	0,707	983
25.09.13	09:45	10:15	9	11,6	175	9,0	< 2	126	0,667	983
25.09.13	10:15	10:45	10	10,1	173	10,5	< 2	123	0,763	983
25.09.13	10:45	11:15	123	8,7	158	11,9	9	129	0,881	983
25.09.13	11:15	11:45	806	6,9	149	13,7	148	121	1,091	983
25.09.13	11:45	12:15	71	9,1	169	11,5	5	133	0,845	983
25.09.13	12:15	12:45	48	9,0	174	11,7	< 2	130	0,862	983
25.09.13	12:45	13:15	18	9,7	179	10,9	< 2	133	0,793	983
25.09.13	13:15	13:45	295	8,3	150	12,2	87	127	0,908	983
25.09.13	13:45	14:15	559	7,2	162	13,5	48	131	1,061	983
25.09.13	14:15	14:45	105	7,9	175	12,7	2	139	0,968	983
25.09.13	14:45	15:15	28	9,3	186	11,3	< 2	137	0,827	983
25.09.13	9:15	15:15	175	9,1	170	11,6	25	129	0,864	983

Bezüge:
- Einheit mg/m³: 0°C, 1013 hPa, trocken, normiert auf 13 Vol.-% O2
- Stickstoffoxide: Summe aus NO und NO2, berechnet als NO2
- Einheit Vol.-%: trockenes Abgas

Hinweis: Die CO-Konzentrationen weisen Minderbefunde auf, da teilweise in Spitzen der Messbereich des Analysators überschritten war.

Tabelle 12 CO-, CO_2-, NOx-, O_2 und Ges.-C -Konzentration während der Probenahmen am 26.09.2013
Bezug [mg/m^3]: 0 °C, 1.013 hPa, trocken, normiert auf 11 Vol.-% O_2

FH Köln Pelletkessel in Bad Honnef am 26.09.2013 Sauerstoffbezugswert 11%										
Datum	Uhrzeit		CO	CO2	NOx	O2	Ges. - C	T	Normierungsfaktor (x Vol. - % O2 nach	Luftdruck
	Beginn	Ende	(mg/m³)	(Vol. - %)	(mg/m³)	(Vol. - %)	(mg/m³)	(°C)	11 Vol. - % O2	(hPa)
26.09.13	08:35	09:05	24	11,5	210	9,0	< 2	130	0,834	982
26.09.13	09:05	09:35	30	9,4	214	11,1	2	127	1,009	982
26.09.13	09:35	10:05	19	9,8	210	10,7	< 2	137	0,968	982
26.09.13	10:05	10:35	2189	6,1	155	14,4	210	122	1,521	982
26.09.13	10:35	11:06	116	9,0	211	11,6	3	148	1,064	982
26.09.13	11:06	11:36	58	8,6	219	12,0	2	147	1,112	982
26.09.13	11:36	12:06	22	10,0	222	10,6	2	131	0,961	982
26.09.13	12:06	12:36	42	9,0	210	11,6	< 2	133	1,062	982
26.09.13	12:36	13:06	3683	7,5	171	13,0	197	124	1,247	982
26.09.13	13:06	13:36	93	9,0	206	11,6	3	135	1,060	982
26.09.13	13:36	14:06	67	8,6	214	12,0	2	136	1,107	982
26.09.13	14:06	14:35	25	10,0	216	10,6	< 2	153	0,959	982
26.09.13	8:35	14:35	531	9,0	205	11,5	36	135	1,075	982

Bezüge:
- Einheit mg/m³: 0°C, 1013 hPa, trocken, normiert auf 11 Vol. - % O2
- Stickstoffoxide: Summe aus NO und NO2, berechnet als NO2
- Einheit Vol. - %: trockenes Abgas

Hinweis: Die CO-Konzentrationen weisen Minderbefunde auf, da teilweise in Spitzen der Messbereich des Analysators überschritten war.

Tabelle 13 CO-, CO_2-, NOx-, O_2 und Ges.-C -Konzentration während der Probenahmen am 26.09.2013
Bezug [mg/m^3]: 0 °C, 1.013 hPa, trocken, normiert auf 13 Vol.-% O_2

FH Köln Pelletofen in Bad Honnef am 26.09.2013 Sauerstoffbezugswert 13%										
Datum	Uhrzeit		CO	CO2	NOx	O2	Ges. - C	T	Normierungsfaktor (x Vol. - % O2 nach	Luftdruck
	Beginn	Ende	(mg/m³)	(Vol. - %)	(mg/m³)	(Vol. - %)	(mg/m³)	(°C)	13 Vol. - % O2	(hPa)
26.09.13	08:35	09:05	19	11,5	168	9,0	< 2	130	0,667	982
26.09.13	09:05	09:35	24	9,4	171	11,1	2	127	0,807	982
26.09.13	09:35	10:05	15	9,8	168	10,7	< 2	137	0,774	982
26.09.13	10:05	10:35	1751	6,1	124	14,4	168	122	1,217	982
26.09.13	10:35	11:06	93	9,0	169	11,6	3	148	0,851	982
26.09.13	11:06	11:36	46	8,6	175	12,0	2	147	0,890	982
26.09.13	11:36	12:06	18	10,0	178	10,6	2	131	0,769	982
26.09.13	12:06	12:36	33	9,0	168	11,6	< 2	133	0,849	982
26.09.13	12:36	13:06	2947	7,5	137	13,0	158	124	0,997	982
26.09.13	13:06	13:36	74	9,0	165	11,6	2	135	0,848	982
26.09.13	13:36	14:06	53	8,6	171	12,0	2	136	0,886	982
26.09.13	14:06	14:35	20	10,0	173	10,6	< 2	153	0,767	982
26.09.13	8:35	14:35	425	9,0	164	11,5	29	135	0,860	982

Bezüge:
- Einheit mg/m³: 0°C, 1013 hPa, trocken, normiert auf 13 Vol. - % O2
- Stickstoffoxide: Summe aus NO und NO2, berechnet als NO2
- Einheit Vol. - %: trockenes Abgas

Hinweis: Die CO-Konzentrationen weisen Minderbefunde auf, da teilweise in Spitzen der Messbereich des Analysators überschritten war.

Mess- und Rechenwerte

Tabelle 14: Abgasrandbedingungen Reingas

Betreiber: FH Köln LTRE Betzdorfer Straße 2 **Standort:** Heideweg 3 53604 Bad Honnef 48153 Münster **Messstelle**: Reingas **Abgasrandbedingungen**				
Datum	d/m/a	24.09.2013	25.09.2013	26.09.2013
Kanaldurchmesser	m	0,18	0,18	0,18
Kanalfläche	m^2	0,025	0,025	0,025
Luftdruck	hPa	989	983	982
stat. Druck	hPa	989	983	982
dyn. Druck	Pa	1	1	1
Abgastemperatur	°C	124	121	129
Abgasdichte Betrieb	kg/m^3	0,92	0,901	0,889
Abgasfeuchte	g/m^3	7	14	12
Abgasgeschwindigkeit	m/s	1,49	1,49	1,55
Volumenstrom, Betrieb, feucht	m^3/h	136	136	142
Volumenstrom, Norm, trocken	m^3/h	91	90	92

Anlage 1: Detaillierte Ergebnisse

Tabelle 15: PCDF/D-Konzentrationen

Bezug [mg/m³]: 0 °C, 1.013 hPa, trocken, normiert auf 11 Vol.-% O_2

Probennummer	13G19635.1		13G19635.2		13G19635.3	
Original Bezeichnung	1. PN D/F		2. PN D/F		3. PN D/F	
Probevolumen	11,702 m³		11,700 m³		11,460 m³	
Umrechungsfaktor	1,163		1,058		1,053	
PCDF						
Summe TetraCDF	6,43	ng/m³	7,91	ng/m³	8,49	ng/m³
Summe PentaCDF	1,68	ng/m³	1,67	ng/m³	1,82	ng/m³
Summe HexaCDF	0,386	ng/m³	0,360	ng/m³	0,416	ng/m³
Summe HeptaCDF	0,0841	ng/m³	0,0780	ng/m³	0,130	ng/m³
OctaCDF	0,0111	ng/m³	0,0108	ng/m³	0,186	ng/m³
Summe Tetra- bis OctaCDF	8,59	ng/m³	10,0	ng/m³	11,0	ng/m³
2,3,7,8-TetraCDF	0,426	ng/m³	0,549	ng/m³	0,566	ng/m³
1,2,3,7,8-PentaCDF	0,130	ng/m³	0,135	ng/m³	0,143	ng/m³
2,3,4,7,8-PentaCDF	0,165	ng/m³	0,168	ng/m³	0,182	ng/m³
1,2,3,4,7,8-HexaCDF	0,0485	ng/m³	0,0456	ng/m³	0,0600	ng/m³
1,2,3,6,7,8-HexaCDF	0,0521	ng/m³	0,0487	ng/m³	0,0566	ng/m³
1,2,3,7,8,9-HexaCDF	< 0,019	ng/m³	< 0,018	ng/m³	< 0,0212	ng/m³
2,3,4,6,7,8-HexaCDF	0,0480	ng/m³	0,0429	ng/m³	0,0479	ng/m³
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDF	0,0551	ng/m³	0,0518	ng/m³	0,0834	ng/m³
1,2,3,4,7,8,9-HeptaCDF	0,0102	ng/m³	0,0092	ng/m³	0,0173	ng/m³
PCDD						
Summe TetraCDD	2,62	ng/m³	2,71	ng/m³	3,40	ng/m³
Summe PentaCDD	1,47	ng/m³	1,36	ng/m³	1,75	ng/m³
Summe HexaCDD	0,927	ng/m³	0,801	ng/m³	1,08	ng/m³
Summe HeptaCDD	0,315	ng/m³	0,297	ng/m³	0,390	ng/m³
OctaCDD	0,143	ng/m³	0,138	ng/m³	0,181	ng/m³
Summe Tetra- bis OctaCDD	5,48	ng/m³	5,30	ng/m³	6,81	ng/m³
2,3,7,8-TetraCDD	0,060	ng/m³	0,0769	ng/m³	0,0804	ng/m³
1,2,3,7,8-PentaCDD	0,0777	ng/m³	0,0757	ng/m³	0,0884	ng/m³
1,2,3,4,7,8-HexaCDD	0,0282	ng/m³	0,0250	ng/m³	0,0328	ng/m³
1,2,3,6,7,8-HexaCDD	0,0410	ng/m³	0,0359	ng/m³	0,0461	ng/m³
1,2,3,7,8,9-HexaCDD	0,0300	ng/m³	0,0315	ng/m³	0,0394	ng/m³
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDD	0,17	ng/m³	0,157	ng/m³	0,216	ng/m³
Summe Tetra- bis OctaCDD/F	14,1	ng/m³	15,4	ng/m³	17,8	ng/m³
I-TEQ (NATO/CCMS) exkl. BG	0,257	ng/m³	0,286	ng/m³	0,311	ng/m³
I-TEQ (NATO/CCMS) inkl. BG	0,259	ng/m³	0,288	ng/m³	0,313	ng/m³
Wiederfindungsraten						
13C12-1,2,3,7,8-PentaCDF	89	%	85	%	81	%
13C12-1,2,3,7,8,9-HexaCDF	106	%	110	%	104	%
13C12-1,2,3,4,7,8,9-HeptaCDF	85	%	96	%	93	%

alle Werte ssind auf max. drei signifikante Stellen gerundet

< : Konzentration unter der angegebenen Bestimmungsgrenze

ND: Nicht bestimmt, da keines der entsprechenden Kongenere oberhalb der BG lag

Tabelle 16: PCDF/D-Konzentrationen

Bezug [mg/m³]: 0 °C, 1.013 hPa, trocken, normiert auf 13 Vol.-% O_2

Probennummer	**13G19635.1**	**13G19635.2**	**13G19635.3**
Original Bezeichnung	**1. PN D/F**	**2. PN D/F**	**3. PN D/F**
Probevolumen	**11,702 m³**	**11,700 m³**	**11,460 m³**
Umrechungsfaktor	**0,930**	**0,847**	**0,842**
PCDF			
Summe TetraCDF	5,14 ng/m³	6,33 ng/m³	6,79 ng/m³
Summe PentaCDF	1,34 ng/m³	1,34 ng/m³	1,45 ng/m³
Summe HexaCDF	0,308 ng/m³	0,288 ng/m³	0,333 ng/m³
Summe HeptaCDF	0,0673 ng/m³	0,0624 ng/m³	0,104 ng/m³
OctaCDF	0,0089 ng/m³	0,0086 ng/m³	0,149 ng/m³
Summe Tetra- bis OctaCDF	6,87 ng/m³	8,03 ng/m³	8,82 ng/m³
2,3,7,8-TetraCDF	0,341 ng/m³	0,439 ng/m³	0,453 ng/m³
1,2,3,7,8-PentaCDF	0,104 ng/m³	0,108 ng/m³	0,115 ng/m³
2,3,4,7,8-PentaCDF	0,132 ng/m³	0,135 ng/m³	0,145 ng/m³
1,2,3,4,7,8-HexaCDF	0,0388 ng/m³	0,0365 ng/m³	0,0480 ng/m³
1,2,3,6,7,8-HexaCDF	0,0417 ng/m³	0,0389 ng/m³	0,0453 ng/m³
1,2,3,7,8,9-HexaCDF	< 0,015 ng/m³	< 0,015 ng/m³	< 0,0170 ng/m³
2,3,4,6,7,8-HexaCDF	0,0384 ng/m³	0,0343 ng/m³	0,0384 ng/m³
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDF	0,0440 ng/m³	0,0415 ng/m³	0,0667 ng/m³
1,2,3,4,7,8,9-HeptaCDF	0,0082 ng/m³	0,0074 ng/m³	0,0138 ng/m³
PCDD			
Summe TetraCDD	2,10 ng/m³	2,17 ng/m³	2,72 ng/m³
Summe PentaCDD	1,18 ng/m³	1,09 ng/m³	1,40 ng/m³
Summe HexaCDD	0,742 ng/m³	0,641 ng/m³	0,867 ng/m³
Summe HeptaCDD	0,252 ng/m³	0,237 ng/m³	0,312 ng/m³
OctaCDD	0,114 ng/m³	0,111 ng/m³	0,145 ng/m³
Summe Tetra- bis OctaCDD	4,38 ng/m³	4,24 ng/m³	5,45 ng/m³
2,3,7,8-TetraCDD	0,0480 ng/m³	0,0615 ng/m³	0,0643 ng/m³
1,2,3,7,8-PentaCDD	0,0622 ng/m³	0,0606 ng/m³	0,0707 ng/m³
1,2,3,4,7,8-HexaCDD	0,0226 ng/m³	0,0200 ng/m³	0,0262 ng/m³
1,2,3,6,7,8-HexaCDD	0,0328 ng/m³	0,0287 ng/m³	0,0369 ng/m³
1,2,3,7,8,9-HexaCDD	0,0240 ng/m³	0,0252 ng/m³	0,0315 ng/m³
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDD	0,134 ng/m³	0,126 ng/m³	0,173 ng/m³
Summe Tetra- bis OctaCDD/F	11,3 ng/m³	12,3 ng/m³	14,3 ng/m³
I-TEQ (NATO/CCMS) exkl. BG	0,206 ng/m³	0,229 ng/m³	0,249 ng/m³
I-TEQ (NATO/CCMS) inkl. BG	0,207 ng/m³	0,230 ng/m³	0,251 ng/m³
Wiederfindungsraten			
13C12-1,2,3,7,8-PentaCDF	89 %	85 %	81 %
13C12-1,2,3,7,8,9-HexaCDF	106 %	110 %	104 %
13C12-1,2,3,4,7,8,9-HeptaCDF	85 %	96 %	93 %

alle Werte ssind auf max. drei signifikante Stellen gerundet

< : Konzentration unter der angegebenen Bestimmungsgrenze

ND: Nicht bestimmt, da keines der entsprechenden Kongenere oberhalb der BG lag

Toxizitätsäquivalent-Faktoren (TEF)

2378-TetraCDD-Toxizitätsäquivalent-Faktoren (TEF) nach einem Vorschlag der WHO, Berlin, und der NATO/CCMS

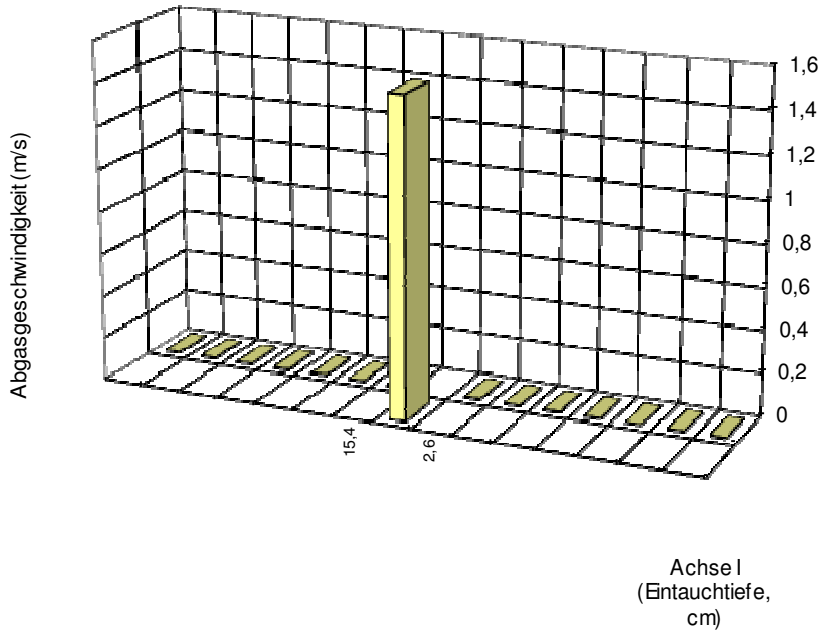
PCDF/D	Strukturformel	NATO/CCMS 1988	WHO 1997
2378-TetraCDD		1,0	1,0
12378-PentaCDD		0,5	1,0
123478-HexaCDD		0,1	0,1
123678-HexaCDD		0,1	0,1
123789-HexaCDD		0,1	0,1
1234678-HeptaCDD		0,01	0,01
OctaCDD		0,001	0,0001
2378-TetraCDF		0,1	0,1
12378-PentaCDF		0,05	0,05
23478-PentaCDF		0,5	0,5
123478-HexaCDF		0,1	0,1
123678-HexaCDF		0,1	0,1
123789-HexaCDF		0,1	0,1
234678-HexaCDF		0,1	0,1
1234678-HeptaCDF		0,01	0,01
1234789-HeptaCDF		0,01	0,01
OctaCDF		0,001	0,0001

Der TE-Wert einer Probe errechnet sich, indem die jeweilige Konzentration mit dem zugehörigen TEF multipliziert und die Produkte addiert werden.

Abb. 01: Geschwindigkeitsprofil und Abgasrandbedingungen im Reingas am 24.09.2013

Abgasgeschwindigkeitsprofil
Reingas

24.09.2013	Achse I
Eintauchtiefe (cm)	m/s
9	1,5



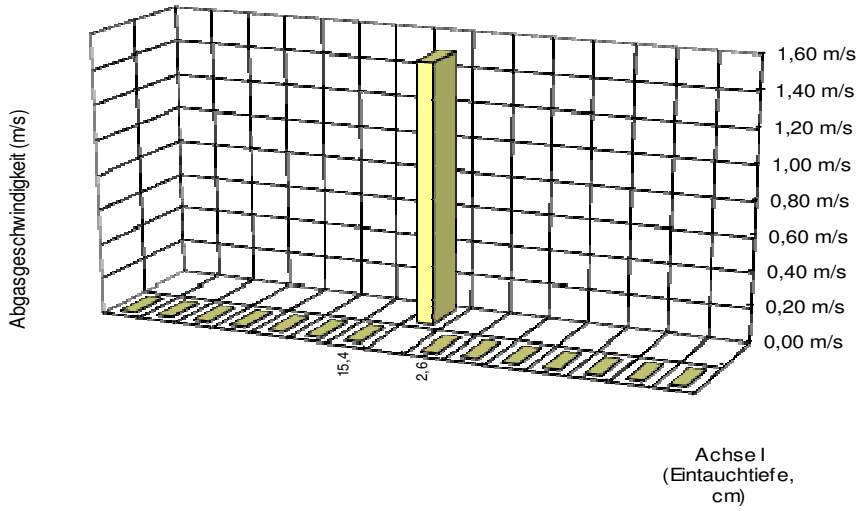
Abgasrandbedingungen:

Kanaldurchmesser	0,18	m
Abgastemperatur	124	°C
Abgasfeuchte	0,007	kg/m³
Kanaldruck	989	hPa
Mittlere Abgasgeschwindigkeit	1,5	m/s
Abgasvolumenstrom (Betrieb)	136	m³/h
Abgasvolumenstrom (norm, tr.)	**91**	**m³/h**

Abb. 02: Geschwindigkeitsprofil und Abgasrandbedingungen im Reingas am 25.09.2013

Abgasgeschwindigkeitsprofil
Reingas

25.09.2013	Achse I
Eintauchtiefe (cm)	m/s
9	1,5



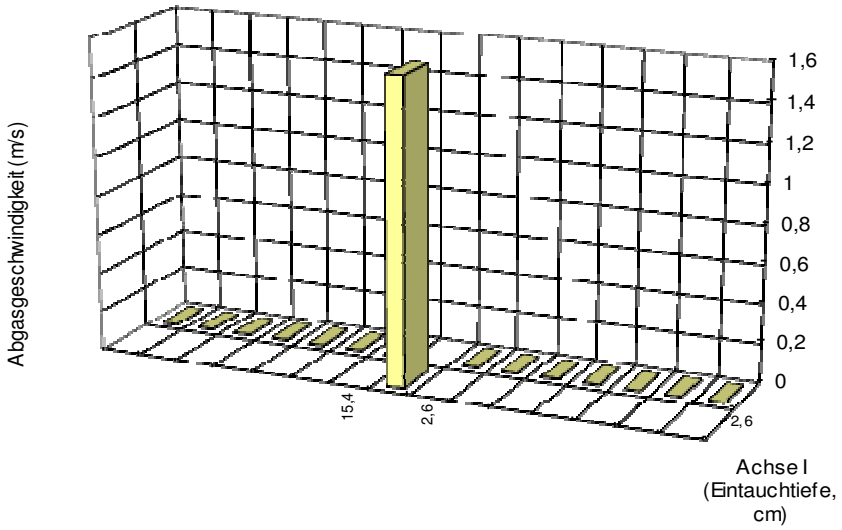
Abgasrandbedingungen:

Kanaldurchmesser	0,18	m
Abgastemperatur	121	°C
Abgasfeuchte	0,014	kg/m³
Kanaldruck	983	hPa
Mittlere Abgasgeschwindigkeit	1,5	m/s
Abgasvolumenstrom (Betrieb)	136	m^3/h
Abgasvolumenstrom (norm, tr.)	**90**	**m^3/h**

Abb. 03: Geschwindigkeitsprofil und Abgasrandbedingungen im Reingas am 26.09.2013

Abgasgeschwindigkeitsprofil
Reingas

26.09.2013	Achse I
Eintauchtiefe (cm)	m/s
9	1,6



Abgasrandbedingungen:

Kanaldurchmesser	0,18	m
Abgastemperatur	129	°C
Abgasfeuchte	0,012	kg/m³
Kanaldruck	982	hPa
Mittlere Abgasgeschwindigkeit	1,6	m/s
Abgasvolumenstrom (Betrieb)	142	m³/h
Abgasvolumenstrom (norm, tr.)	**92**	**m³/h**

Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der kontinuierlich gemessener Daten am 24.09.2013
Bezug (mg/m³): 0°C, 1013 hPa, trocken, normiert auf 11 Vol.-% O_2

Hinweis: Die CO-Konzentration lag in den Spitzen oberhalb des Messbereichs des Analysators

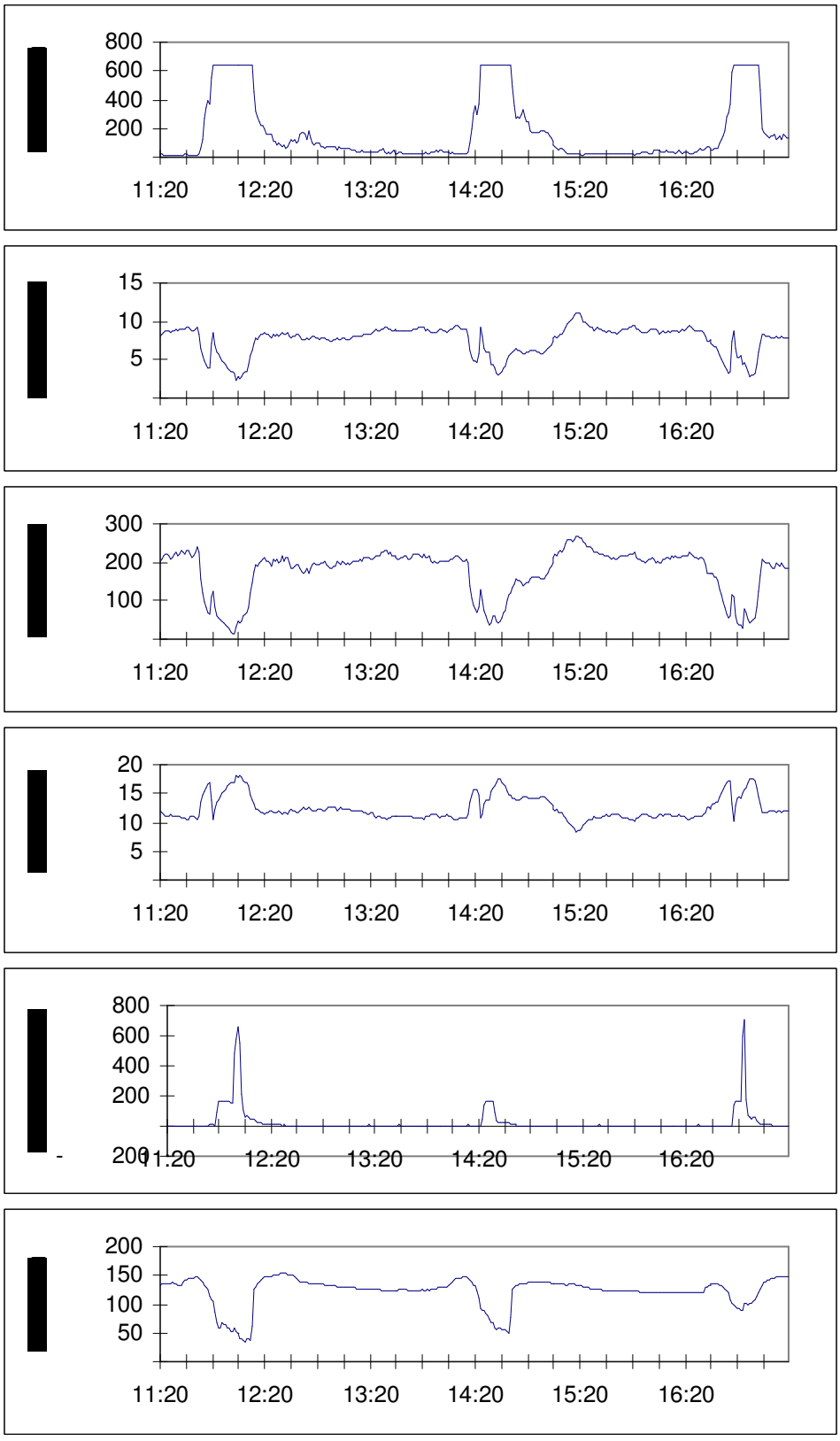


Abb. 5: Zeitlicher Verlauf der kontinuierlich gemessener Daten am 24.09.2013
Bezug (mg/m³): 0°C, 1013 hPa, trocken, normiert auf 13 Vol.-% O_2

Hinweis: Die CO-Konzentration lag in den Spitzen oberhalb des Messbereichs des Analysators

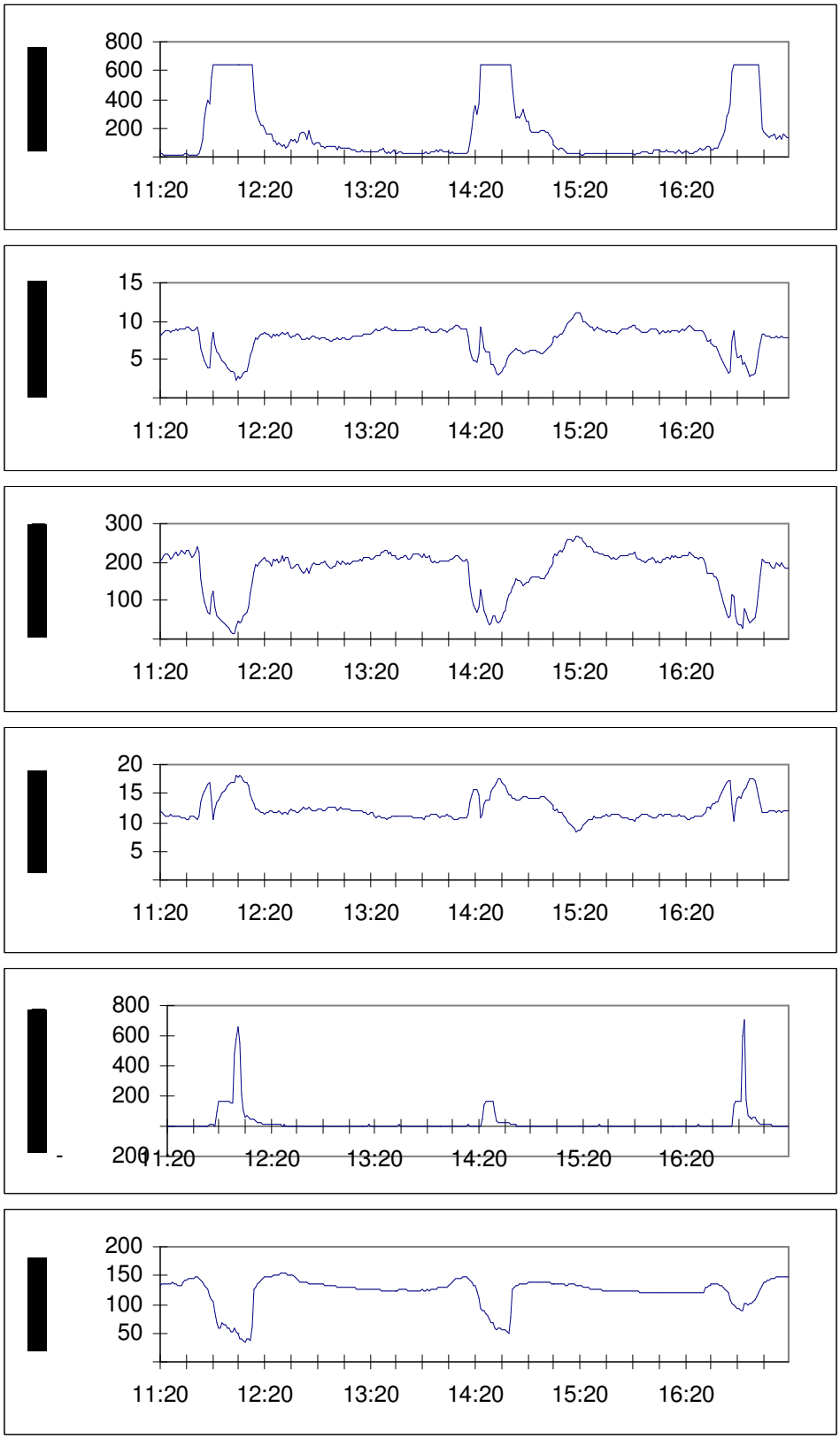


Abb. 6: Zeitlicher Verlauf der kontinuierlich gemessener Daten am 25.09.2013
Bezug (mg/m³): 0°C, 1013 hPa, trocken, normiert auf 11 Vol.-% O_2

Hinweis: Die CO-Konzentration lag in den Spitzen oberhalb des Messbereichs des Analysators

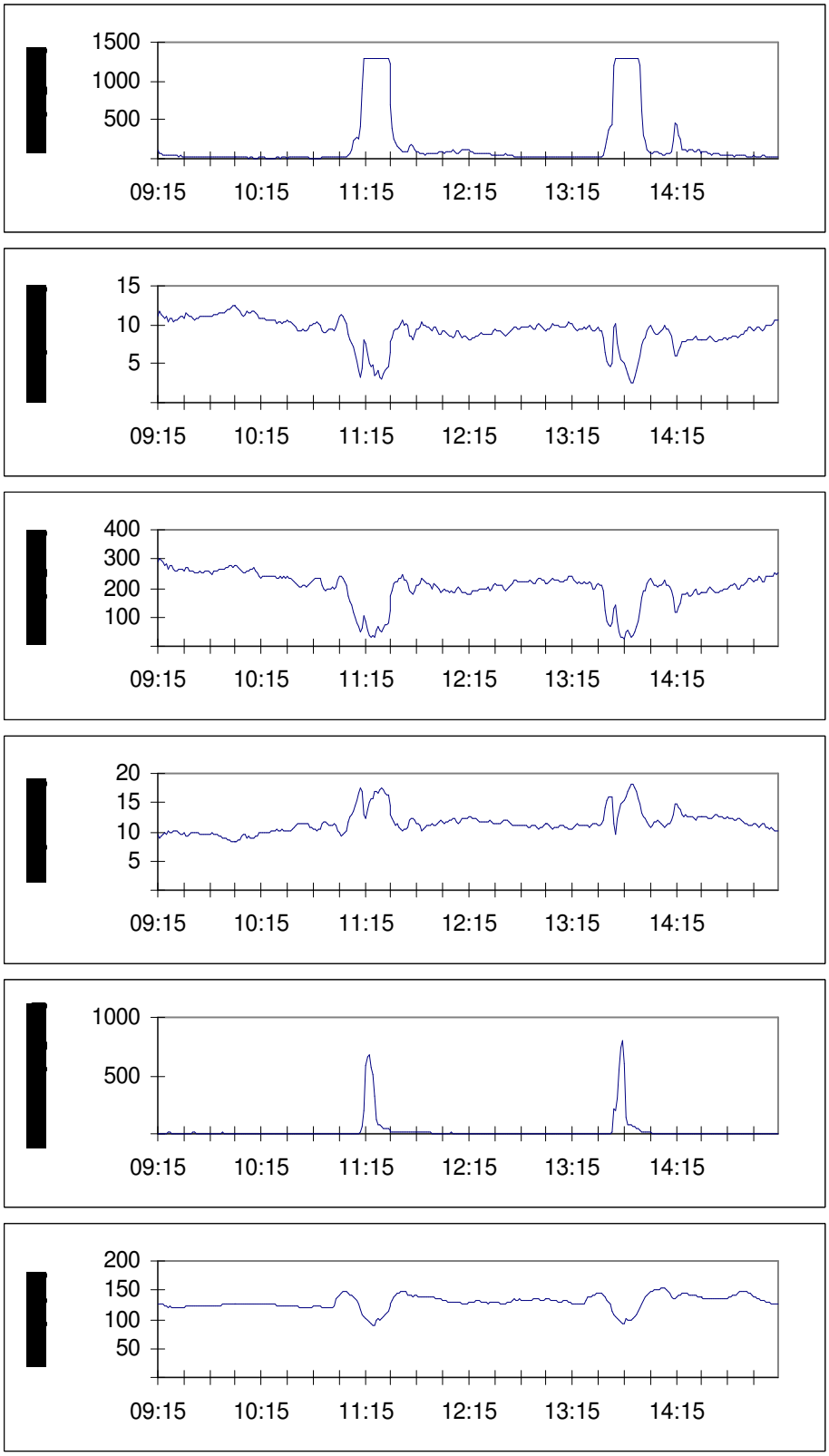


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf der kontinuierlich gemessener Daten am 25.09.2013
Bezug (mg/m³): 0°C, 1013 hPa, trocken, normiert auf 13 Vol.-% O_2

Hinweis: Die CO-Konzentration lag in den Spitzen oberhalb des Messbereichs des Analysators

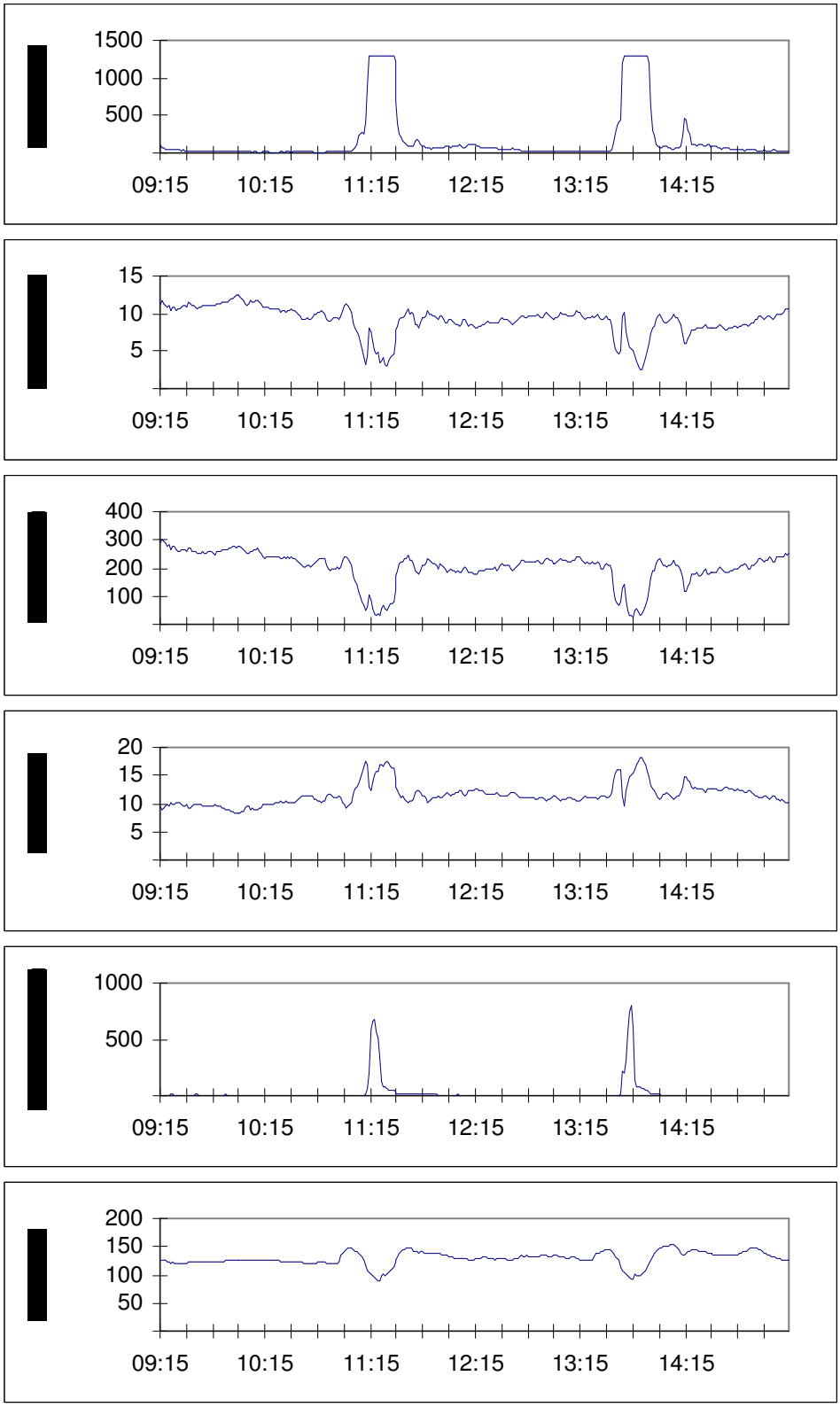


Abb. 8: Zeitlicher Verlauf der kontinuierlich gemessener Daten am 26.09.2013 Bezug (mg/m³): 0°C, 1013 hPa, trocken, normiert auf 11 Vol.-% O_2

Hinweis: Die CO-Konzentration lag in den Spitzen oberhalb des Messbereichs des Analysators

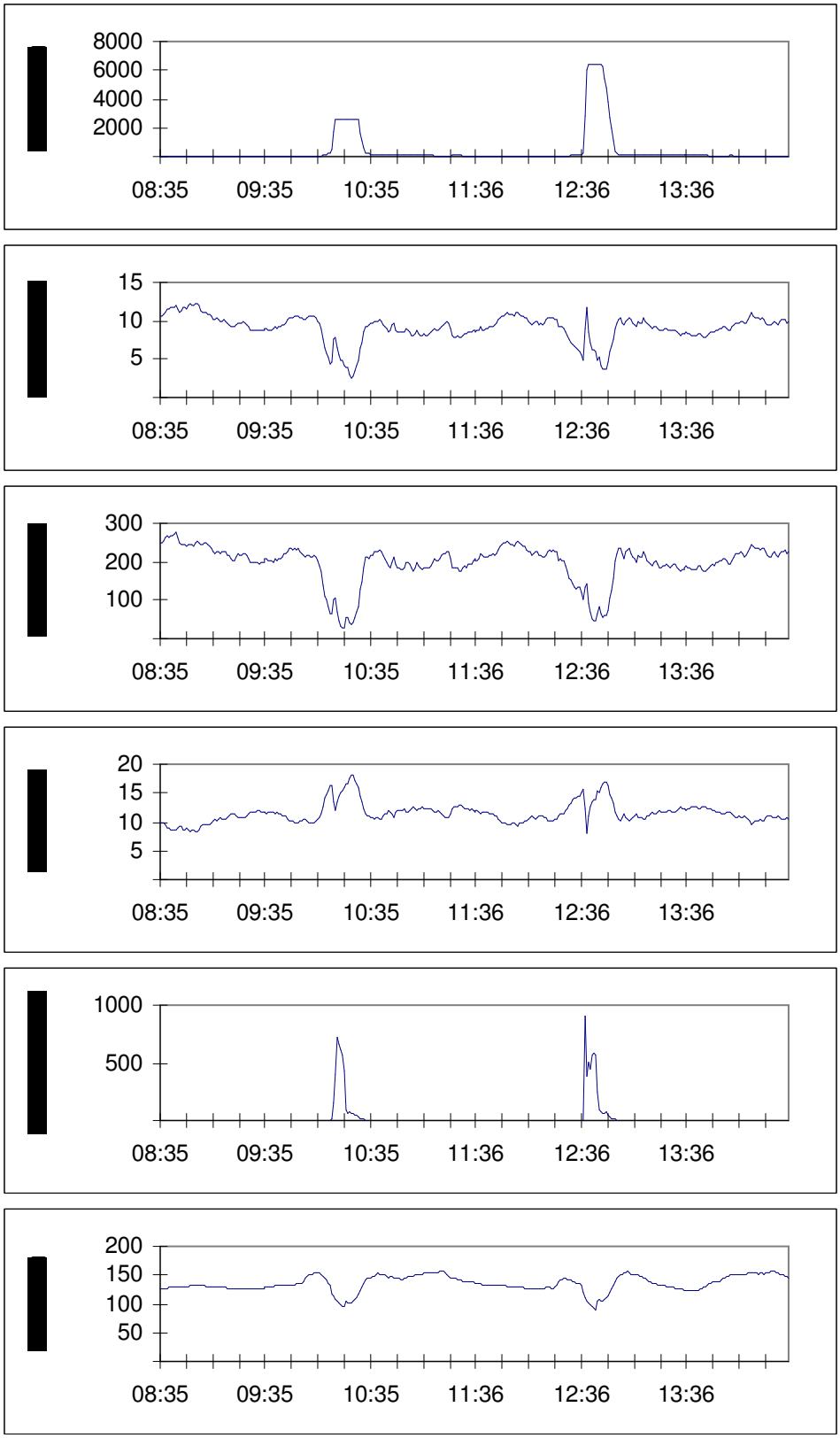
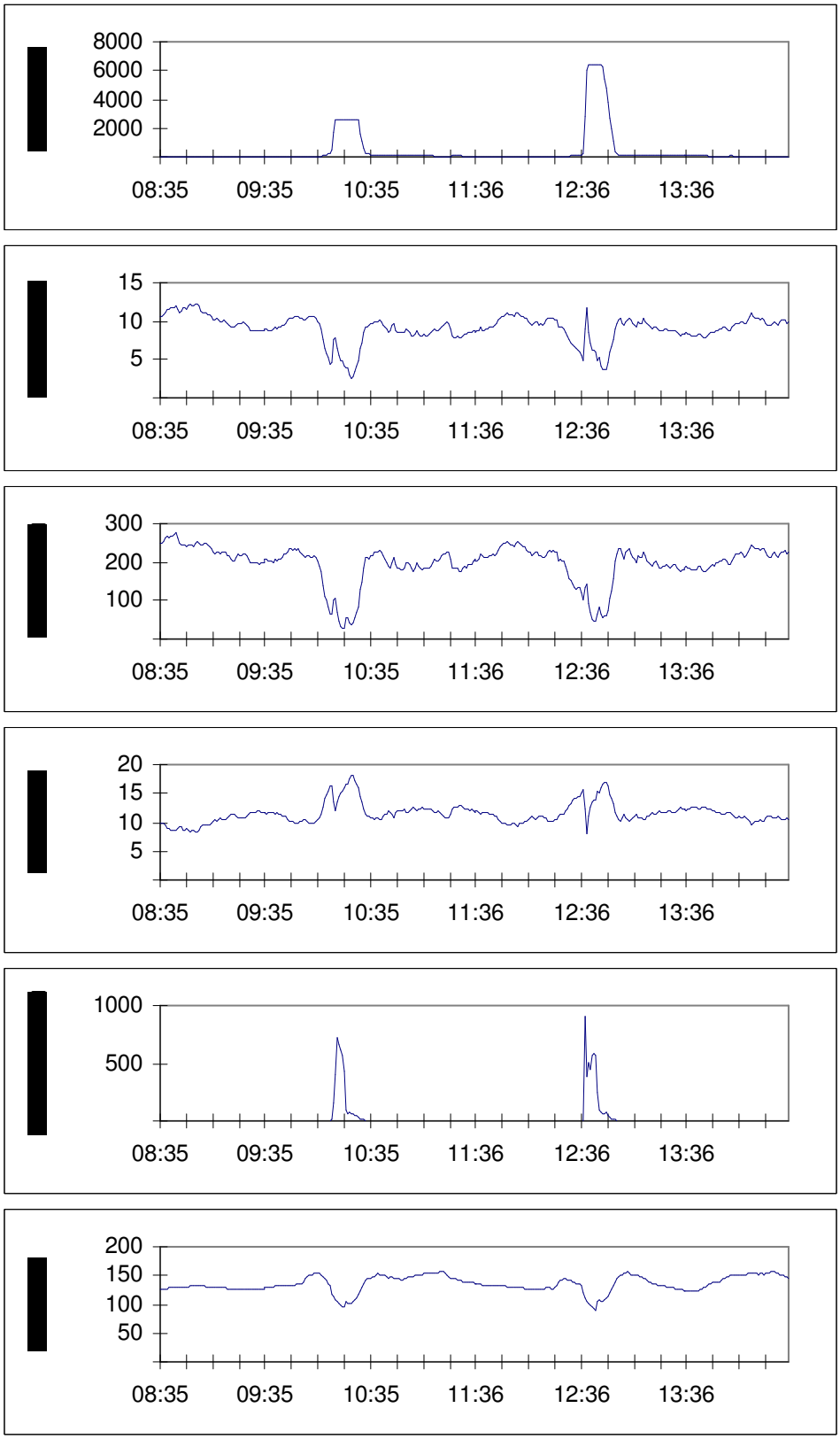


Abb. 9: Zeitlicher Verlauf der kontinuierlich gemessener Daten am 26.09.2013
Bezug (mg/m³): 0°C, 1013 hPa, trocken, normiert auf 13 Vol.-% O_2

Hinweis: Die CO-Konzentration lag in den Spitzen oberhalb des Messbereichs des Analysators



Anhang 1: Mess- und Analysenverfahren und Geräte

1 Mess- und Analysenverfahren, Geräte

1.1 Abgasrandbedingungen

1.1.1 Strömungsgeschwindigkeit

Messeinrichtung/Ermittlungsmethode:	Die Strömungsgeschwindigkeit wurde mit einem Flügelradannemometer der Firma Höntzsch INSTRUMENTS bestimmt.
kontinuierliche Ermittlung:	ja
Messbereich:	0 – 40 m/s
Letzte Überprüfung/Kalibrierung:	06/2012

1.1.2 Statischer Druck im Abgaskamin

Messeinrichtung:	Der statische Druck im Messquerschnitt wurde mit einem Pitot-Staurohr der Fa. Gothe in Verbindung mit einem Barometer der Fa. Greisinger, Typ GDH 12 AN unter Berücksichtigung der entsprechenden Anschlüsse gemessen.
Letzte Überprüfung/Kalibrierung:	07/2012

1.1.3 Luftdruck in Höhe der Probenahmestelle

Barometer:	Der Luftdruck wurde mit einem Präzisionsdosenbarometer gemessen Zur Kontrolle wird dieses Präzisionsdosenbarometer regelmäßig mit einem DKD-kalibrierten Exemplar überprüft
Letzte Überprüfung/Kalibrierung:	03/2012

1.1.4 Abgastemperatur

siehe 4.1.1

1.1.5 Wasserdampfanteil im Abgas (Abgasfeuchte)

Messeinrichtung/Ermittlungsmethode: Die Abgasfeuchte wurde durch Adsorption mittels Silicagel mit nachfolgender gravimetrischer Bestimmung ermittelt. Waage MC 1/LC 4800P, Fa. Sartorius, Pumpe, Gasner Fa. Gothe

Letzte Überprüfung/Kalibrierung: 09/2012

1.1.6 Abgasdichte

Ermittlungsmethode: Berechnet unter Berücksichtigung der Abgasanteile an Sauerstoff, Kohlendioxid, Luftstickstoff (mit 0,933 % Ar), Wasserdampfanteil im Abgas sowie der Abgastemperatur und Druckverhältnisse im Kanal

1.1.7 Abgasverdünnung

entfällt

1.2 Kontinuierliche Messverfahren

Während der gesamten Abgasprobenahmen wurde zur Ermittlung der Abgaszusammensetzung und zur Beurteilung der Anlagenbetriebsweise kontinuierlich die Konzentration an Sauerstoff (O_2), Stzickoxiden (NOx), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Gesamtkohlenstoff (Ges.-C) gemessen.

Messkomponente	Analysator/ Hersteller	Messverfahren VDI-Richtlinie	Messbereich	Prüfgaskonzentration Stabilitätsgarantie bis	Eignungsgeprüft
Stickstoffoxide (NO_x)	PG 250 Horiba	Chemilumineszenz	0 - 250 ppm	160 ppm 07/2015	ja
Sauerstoff (O_2)	PG 250 Horiba	Paramagnetismus	0 - 25 Vol.-%	20,95 Vol.-% Außenluft	ja
Kohlenstoffmonoxid (CO)	PG 250 Horiba	NDIR	0 – 500 ppm 0 – 1000 ppm 0 – 2000 ppm	397 ppm 07/1015	ja
Kohlenstoffdioxid (CO_2)	PG 250 Horiba	NDIR	0 – 20 Vol.-%	16,1 Vol.-% 07/2015	ja
Gesamtkohlenstoff (Ges.-C)	3006 Sick Maihak	FID	0 – 100 ppm 0 – 1000 ppm	79,90 ppm	ja

1.2.1.5 Messplatzaufbau

Entnahmesonde:

beheizt auf:	200 °C
max. Eintauchtiefe:	0,09 m

Staubfilter

beheizt auf:	200 °C

Probengasleitung vor Gasaufbereitung

Länge:	5 m

Probengasleitung nach Gasaufbereitung:

Länge:	2 m
Werkstoffe der gasführenden Teile:	Titan, Edelstahl, Teflon
Messgasaufbereitung:	Messgasaufbereitung der Fa. Gröger & Obst, Gasausgangstaupunkt ca. -10°C. Der FID erhält sein Messgas direkt unter Umgehung der Messgasaufbereitung.

1.2.1.7 90 %-Einstellzeit des gesamten Messaufbaus:

Die 90%- Einstellzeit betrug ca. 35 Sekunden, sie wurde durch Prüfgaseinleitung in den beheizen Verbindungsschlauch zwischen Entnahmesonde und Messgasaufbereitung einmalig vor Beginn der Probenahmen ermittelt.

1.2.1.8 Erfassung / Registrierung der Messwerte

Messwerterfassungssystem:	Die Registrierung der Messdaten erfolgte kontinuierlich über eine elektronische Messdatenerfassung. Dabei kam das Messdatenerfassungsprogramm Memocomp der Fa. Breitfuss zum Einsatz.
Schreiber:	entfällt (elektronische Erfassung)

1.2.1.9 Maßnahmen zur Qualitätssicherung

Die Dichtigkeit der gesamten Probenahmeeinrichtung wurde bei der Ermittlung der 90 %-Einstellzeit geprüft.

1.3 Diskontinuierliche Messverfahren

1.3.1 Gas- und dampfförmige Emissionen

1.3.1.1 Messobjekt

Bestimmung von Schwefeloxiden (Summe SO_2 und SO_3, berechnet als SO_2)

1.3.1.2 Messverfahren

DIN EN 14791;
Absorption in H_2O_2 – Lösung; Bestimmung mittels Ionenchromatographie

1.3.1.3 Messplatzaufbau

Entnahmesonde:	Gasentnahmesonde, Fabrikat Paul Gothe
Material:	Titan, Glas, Quarz
beheizt auf:	180 °C
maximale Eintauchtiefe:	0,09 m
Partikelfilter:	Glaskartusche mit Schlitzbodenplatte
Typ:	Glaskartusche mit Planfilter und Quarzwatte bestückt
Material:	Planfilter (MK 360, Fa. Munktell); Quarzwatte
beheizt auf:	180 °C
Ab-/Adsorptionseinrichtungen:	Zwei Frittenwaschflaschen
Sorptionsmittel:	0,3% H_2O_2 Lsg
Sorptionsmittelmenge	Je Frittenwaschflasche 70 ml H_2O_2 Lsg
Absaugeinrichtung:	Absaugeinrichtung der Fa. Gothe mit gasdichter Pumpe, Trockenturm, Durchflussmesser und Gasuhr
Abstand zwischen Ansaugöffnung der Entnahmesonde und Sorptionsmittel bzw. Abscheideelement:	ca. 1,8 m
Probentransfer:	Der Zeitraum zwischen Probenahme und Analyse betrug max. 14 Tage

1.3.1.4 Analytische Bestimmung

Analysenverfahren:	Die Schwefeloxide aus dem Abgas werden durch Wasserstoffperoxid zu Sulfat-Ionen oxidiert. Die Messung der Sulfatkonzentration erfolgt ionenchromatographisch.
Aufarbeitung des Probenmaterials:	nicht erforderlich
Analysengeräte:	Ionenchromatograph Metrohm 761 Compact IC
Spez. Kenndaten / Angaben:	Säule: Metrosep A Supp 4 250/4.0mm“ Bestell-Nr.: 6.1006.430 (oder äquivalente)
Standards:	Sulfatstandardlösung der z.B. der Firma Merk, Referenzmaterial QCI-51 Lot: 013743
Beteiligung eines Fremdlabors:	nein

1.3.1.5 Verfahrenskenngrößen

Bestimmungsgrenze: 2,75 mg/m³

1.3.1.6 Maßnahmen zur Qualitätssicherung

Es wird je Messkampagne eine Blindwertbestimmung vorgenommen.

Vor der Messung wird die Dichtheit des Systems durch Anlegen von 100 hPa Unterdruck geprüft.

Bei den Waschflaschenprobennahmen wurde die Absorptionseffizienz in der 1. Waschflasche geprüft.

1.3.2 Partikelförmige Emissionen

1.3.2.1 Messobjekt

- Gesamtstaub

1.3.2.2 Messverfahren

Staubgehaltsbestimmung gemäß DIN EN 13284-1.

1.3.2.3 Messplatzaufbau

Rückhaltesystem für partikelförmige Stoffe

Filtergerät: Planfiltergehäuse, Fa. Gothe

Anordnung: innenliegend im Kanal

Entnahmesonde / Absaugrohr: Gasentnahmesonde

- Wirkdurchmesser: 26 mm
- beheizt auf: 200 °C
- Material: Titan

Abscheidemedium:	Quarzfaserfilter Munktell MK360
Filterdurchmesser:	45 mm
Abscheidegrad:	99,998 % (MK 360/Herstellerangabe)
Absaugeinrichtung:	Trockenturm der Fa. Gothe, Pumpe der Fa. Engmann (Typ VTE8), Gasuhr der Fa. Kromschröder AG und Absaugeinheit der Fa. Gothe

1.3.2.4 Behandlung des Abscheidemediums und der Ablagerungen

Transport und Lagerung:	Auf Filterhaltern in Petrischalen

Trocknungstemperatur und Trocknungszeit des Abscheidemediums:

- vor Beaufschlagung:	180 °C; mind. 1 h
- nach Beaufschlagung:	160 °C; mind. 1 h

Rückgewinnung von Ablagerungen vor dem Filter: nein

Begründung:	innenliegendes Filtergehäuse
Behandlung der Spüllösungen:	entfällt
Bestimmung von Gesamtleerproben:	ja

Wägung:

klimatisierter Wägeraum:	ja
Waage:	Sartorius Genius, Typ ME235P
Ablesegenauigkeit:	0,01 mg

1.3.2.5 Aufbereitung und Auswertung der Messfilter und der Absorptionslösungen

entfällt

1.3.2.6 Verfahrenskenngrößen

Gemäß DIN EN 13284-1, DIN EN 14385 und DIN EN 13211

1.3.2.7 Maßnahmen zur Qualitätssicherung

Vor Beginn jeder Messung wurde ein Dichtigkeitstest durchgeführt und im Protokoll vermerkt.

Während der Probenahmen wurde die Einhaltung der Isokinetischen Bedingungen bei jeder Ablesung geprüft und im Protokoll dokumentiert.

1.3.3 Besondere hochtoxische Abgasinhaltsstoffe (PCDD/PCDF u. ä.)

1.3.3.1 Messobjekt

Es wurden die partikel-, dampf- und gasförmigen (filtergängigen) Emissionen an

· polychlorierten Dibenzofuranen und Dibenzo(p)dioxinen (PCDF/D)

bestimmt.

1.3.3.2 Messverfahren

Die Probenahme der PCDF/D etc. im Abgas erfolgte gemäß DIN EN 1948-1 nach der sog. "Gekühltes Absaugrohr-Methode".

1.3.3.3 Messplatzaufbau:

Die PCDF/D-Probenahmeapparatur erlaubt die isokinetische Ansaugung der Abgasstäube gemäß DIN EN 13284. Die Apparatur wurde in ihrer ursprünglichen Konfiguration von der GfA in Zusammenarbeit mit der Landesanstalt für Immissionsschutz, Essen, im LIS-Bericht 109 vorgestellt (Probenahme von polychlorierten Dibenzofuranen (PCDF) und polychlorierten Dibenzodioxinen (PCDD) in Abgasen mit einem Adsorptionsverfahren) und in der hier eingesetzten Form entsprechend den Mindestanforderungen der DIN EN 1948-1 modifiziert. Im Einzelnen besteht die Apparatur aus folgenden Teilen:

• Sonde: Ansaugdüse, Krümmer aus Titan, wassergekühltes Absaugrohr mit Inserts aus Duranglas versehen,

• Kondensatkolben,

• Adsorberstrecke: Glaskartusche mit Schlitzbodenplatte, Planfilter (GF10HY, Schleicher & Schüll) und mit Quarzwatte gestopft;
nachfolgend mit XAD-2 gefüllte Glaskartusche mit D0-Fritte,

• korrosionsgeschützte, regelbare Pumpe,

• Trockenturm mit Blaugel,

• korrosionsgeschützte Gasuhr.

Vor der Probenahme wurde die Quarzwatte in der Glaskartusche mit folgenden PCDF/D gespiked (Probenahmestandard):

$^{13}C_{12}$-12378-PentaCDF	400 pg
$^{13}C_{12}$-123789-HexaCDF	400 pg
$^{13}C_{12}$-1234789-HeptaCDF	800 pg

1.3.3.4 Probenahme und Nachbehandlung:

Vor der Messung wurde die Apparatur auf Dichtigkeit geprüft. Dazu wurde die komplette Messeinrichtung nach verschließen der Sondenspitze auf den maximal zulässigen Unterdruck gebracht und dann die Leckrate bei laufender Absaugeinrichtung ermittelt.

Der Probenvolumenstrom während der Messungen liegt bei 1 – 2 m³/h.

Nach der Probenahme wurde die Sonde aus dem Kanal genommen, der Dichtigkeitstest wiederholt und die Probe verpackt. Alle Teile der Apparatur sind so gestaltet, dass die Einzelteile lediglich getrennt und mit Verschlusskappen versehen werden müssen, ein Abfüllen entfällt. Das Glasinsert wird optisch geprüft und bei sichtbaren Verunreinigungen zerschnitten und mit zur Probe gegeben.

Ein Austausch dotierter Teile ist während der Probenahme nicht erfolgt. Die Proben wurden lichtgeschützt bei Raumtemperatur gelagert und innerhalb von 2 – 4 Tagen zur Analyse ins Labor transportiert.

1.3.3.5 Analytische Bestimmung:

Beteiligung eines Fremdlabors:	die Proben wurden im eigenen Labor analysiert

Die Abgasproben wurden für die Analytik wie folgt aufgearbeitet:

Probenahmesonde (nur bei sichtbaren Ablagerungen):

• Entnahme und Zerschneiden von Glasinserts,

• Spülen der Glasinsertstücke mit Aceton und Toluol,

• Spüllösungen eingeengt, mit Toluol wieder aufgenommen;

Kondensat:

• Flüssig/flüssig-Extraktion mit Toluol (3fach),

• über Natriumsulfat getrocknet, eingegengt, mit Toluol wieder aufgenommen

Filter:

• Überführung der Quarzwatte und des Planfilters in die XAD-Kartusche,

• Zugabe der folgenden PCDF/D als Extraktionsstandards:

PCDD

$^{13}C_{12}$-2378-TetraCDD	400 pg
$^{13}C_{12}$-12378-PentaCDD	400 pg
$^{13}C_{12}$-123478-HexaCDD	400 pg
$^{13}C_{12}$-123678-HexaCDD	400 pg
$^{13}C_{12}$-1234678-HeptaCDD	800 pg
$^{13}C_{12}$-12346789-OctaCDD	800 pg

PCDF

$^{13}C_{12}$-2378-TetraCDF	400 pg
$^{13}C_{12}$-23478-PentaCDF	400 pg
$^{13}C_{12}$-123478-HexaCDF	400 pg
$^{13}C_{12}$-123678-HexaCDF	400 pg
$^{13}C_{12}$-234678-HexaCDF	400 pg
$^{13}C_{12}$-1234678-HeptaCDF	800 pg
$^{13}C_{12}$-12346789-OctaCDF	800 pg

XAD-2-Kartusche:

• Extraktion zusammen mit der Quarzwatte und dem Planfilter im Soxhlet mit Toluol (20 h)

• eingeengt, mit Toluol wieder aufgenommen.

Die zwei bzw. ggfs. drei verschiedenen Toluolextrakte wurden vereinigt.

Analyse der PCDF/D

Ein Anteil von 50 % der vereinigten Toluolextrakte wurde mehrfach säulenchromatographisch gereinigt und vor der HRGC/HRMS-Analyse mit jeweils 400 pg $^{13}C_{12}$-1234-TetraCDD und $^{13}C_{12}$-123749-HexaCDD (Spritzenstandards) versetzt, um die Wiederfindungsraten der vorher eingesetzten ^{13}C-markierten PCDF/D-Standards bestimmen zu können. Die verbleibenden Anteile der vereinigten Toluolextrakte wurden für weitere Untersuchungen verwendet bzw. für evtl. Kontrollanalysen zurückgestellt.

Zur Analyse wurde der Gaschromatograph HP 5890, gekoppelt mit dem VG AutoSpec eingesetzt.

1.3.3.6 Verfahrenskenngrößen:

gemäß DIN EN 1948

1.3.3.7 Maßnahmen zur Qualitätssicherung:

Vor Beginn jeder Messung wurde ein Dichtigkeitstest durchgeführt und im Protokoll vermerkt.

Während der Probenahmen wurde die Einhaltung der isokinetischen Bedingungen bei jeder Ablesung geprüft und im Protokoll dokumentiert.

1.3.4 Geruchsemissionen

entfällt

Brennstoffversuch mit Mischpellets am VL300-P

9. Dezember

2013

Aufgabe: Prüfung der Tauglichkeit von Mischpellets am Pelletkessel Vitoligno 300-P.
Ziel:: Ermittlung des Kesselverhaltens bei Verbrennung von Mischpellets:

300P_24 kW

1. Projektstammdaten:

Dateiname	***Prüfbericht:***	*VL 300P_24 kW_Mischpellets*	
	Prüfauftrag:	*131209_Prüfbericht_VL300P_Mischpellets.docx*	
Spezifikation	***Produkt:*** *Vitoligno 300-P 24kW*	*Software:* *7509224*	*Version/Datum:* *Releasstand*
	ID-N (Seriennummer):	*Codierstecker:* *7838770*	*Gebläse:* *7536130*
	Baugruppe: *z.B: Düsen 7836451*	*Rost:* *7597808 (Releasestand)*	*Stein:* *Serien-/Releasestand: 5876360, 7594939, 7594943, 5889349*
	Bauteil: *z.B: Düsenunterteil 5502119*	*Lambdasonde:* *9645567 NGK-Sonde*	*Luftklappen:* *7595307*
	Beschreibung Prüfling: Serienkessel ohne Prallblech		
Ressourcen	***Auftragsnummer SAP:*** 5350011035 ***Starttermin [KW]:***	*Kostenstelle:* *z.B:* ***Endtermin [KW]:***	*Förderungsnummer:* *z.B:* ***Zulässige Prüfdauer [h]:***

Bericht	***Berichtsleger***	*Sail*	***Datum*** *10.12.2013*	***Unterschrift***
	Prüfstandsleitung	*ShlM*	***Datum***	***Unterschrift***

2. Abnahme des Prüfauftrages:

Abnahme	***Abnahme durch Auftraggeber:*** *Ja ( ) / Nein ( )*	***Datum***	***Unterschrift***
	Begründung wenn Nein (Korrektur- oder Kürzungswünsche des Auftraggebers):		

3. Ausgangssituation

3.1 Ausgangssituation:

In einem vertraglich vereinbarten Arbeitsprojekt mit der FH Köln soll die Tauglichkeit von Mischpellets am Pelletkessel Vitoligno 300-P geprüft werden. Als Versuchskessel wird der Vitoligno 300-P 24kW von der Serienüberprüfung (Kesselrelease) verwendet. Es werden insgesamt 4 Big Packs mit Brennstoff angeliefert.
4 Mischpellettypen:

Typ 1:	*50% Fichte + 50% Miscanthus*	*Nr. 4*	*106 kg*
Typ 2:	*49,25% Fichte + 49,25% Miscanthus + 1,5% Kaolin*	*Nr. 1*	*106 kg*
Typ 3:	*50% Miscanthus + 50% Paulownia*	*Nr. 2*	*79 kg*
Typ 4:	*49,25% Miscanthus + 49,25% Paulownia + 1,5% Kaolin*	*Nr. 3*	*79 kg*

3.2 Vorgegebene Zielstellung:

Ermittlung des Kesselverhaltens bei Verbrennung von Mischpellets. Parameteranpassung

3.3 Outcome Soll:

-Aufzeichnung von Messwerte wie CO, O_2, Leistung, Abgastemperatur, Flammtemperatur, Auslesen der Daten aus der Vitotronic, Staubwerte, verbrannte Pelletmenge (Typ 1-4)
-Ermittlung des Gewichts der vorderen und hinteren Aschelade am Ende des Versuches (Typ 1-4)
-Fotodokumentation der Ascheladen, Rost, Brennkammer, Rauchgasrohre (Typ 1-4)
-Auflistung geänderter Parameter im Vergleich zu den Standardparameter (Typ 1-4)
-Stellungnahme zu Kesselverhalten (spez. Brennverhalten), Flug- und Rostasche, Unterschied der Art und Verteilung der Asche zu normalem Brennstoff, Zustand der Brennkammer, Ascheaufbau in der Brennkammer, Unterschiede zu den einzelnen Brennstoffen (Typ 1-4)
-Mögliche Handlungsempfehlung für Planungsanleitung und TD

4. Vorgehensweise

4.1 Durchgeführte Aktivitäten

Fotodokumentation der Sinterschlache auf dem Rost bei jedem Versuchsbrennstoff.
Kessel gereinigt und Ascheladen entleert.
Ca. 9-10 Betriebsstunden im Vollastbetrieb Pro Versuchsbrennstoff.
Staubmessung bei jedem Versuchsbrennstoff
Auswertung der Messdaten bei dem Versuchsbrennstoff.

4.2 Messmittel

1-Emissionsmessung mit Abgasanalysator
2-Staubmessung mit Wöhlermessgerät
3-Leistungsmessung mit PT100 und Messstrecke Nr. 1
4-Abgastemperatur mit Thermoelement TypK

4.3 Versuchsablauf

1- Reihenfolge der Brennstoffe: Typ 1-4
2- Parameteranpassung zur Optimierung von CO, O2, Leistung
3- Versuch wird in Volllast durchgeführt
4- Kessel in stationären Zustand bringen
5- Verbrennungsverhalten beobachten
6- (1x) durchführen
7- Fotodokumentation der Asche,
8- Ascheladen reinigen
9- Brennstofftyp wechseln
10- Versuchsablauf (Pkt.2-8) für Brennstofftyp 2-4 wiederholen
11-

4.4 Abweichungen gegenüber Prüfauftrag

Im Versuchsaufbau
Ja ☐ Nein x
Im Versuchsablauf
Ja ☐* Nein

Begründung bei Abweichungen: *-keine Entnahme der Flugascheprobe .*
- Keine Gewichtsermittlung von den Ascheladen.

Ressourcen
Ja ☐ Nein x

4.5 **Versuchsaufbau:**

Zur Untersuchung der Tauglichkeit von Mischpellets kommt ein Holzpelletkessel Vitoligno 300-P mit 24kW Nennwärmeleistung zum Einsatz. Dieser ist mit einem Lamellenrost sowie einer Verbrennungsregelung mittels Lambdasonde und Flammsensor ausgestattet.
Die Untersuchung des Verbrennungs- und Emissionsverhaltens der Mischpellets wird mit dem in Abb. 1. dargestellten Versuchsaufbau realisiert.

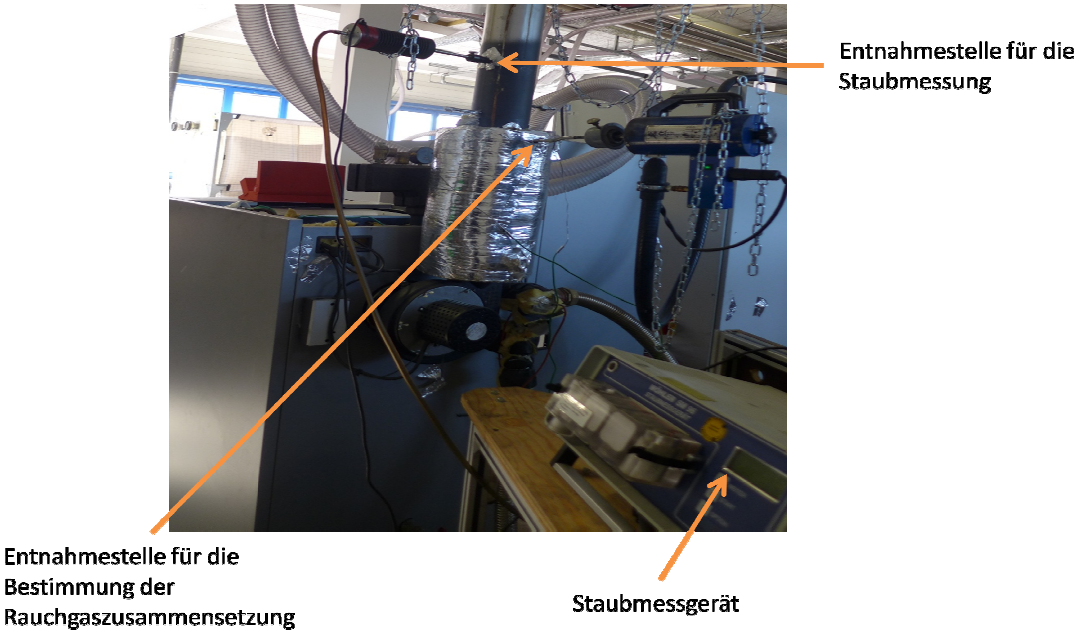


Abb1:Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Untersuchung des Emissionsverhaltens der Mischpellets mit Abgasanalytik und Staubmessung.

4.5 Parameteranpassung

Parameter	Einheit	Standard	geändert
Einschub mit Schneckenfördere bei 100% Leistung	***[%]***	***68***	***80***
Primärluftklappenstellung bei 100% Leistung	***[%]***	***15***	***30***
O2-Sollwert bei 100% Leistung	***[%]***	***6,5***	***8***
Rauchgasgebläsedrehzahl bei 100% Leistung	***[U/min]***	***2200***	***1900***
Flammtemperatur Soll 100% Leistung	***[℃]***	***550***	***650***

5. Ergebnisse

5.1-Versuchsbrennstoff Typ 1:
Im ersten Versuch wurde Pellets aus einer Mischung aus 50 % Fichte und 50 % Miscanthus verwendet. Nach ca.10 Betriebsstunden und 60kg Brennstoffverbrauch zeigt sich auf dem Rost eine geschlossene Sinterdecke, wie auf dem Bild1 unten zu sehen.
Bei der Rostentschlackung hat der Rost vollständig blockiert, und lässt sich aufgrund der Härte den entstandenen Materials nur mit Krafteinsatz reinigen. Die vom Rost entfernte Schlacke sieht man auf dem Bild2.

Bild 1: Darstellung von Sinterschlacke auf dem Rost

Bild 2: Darstellung von Aschesinterstücken

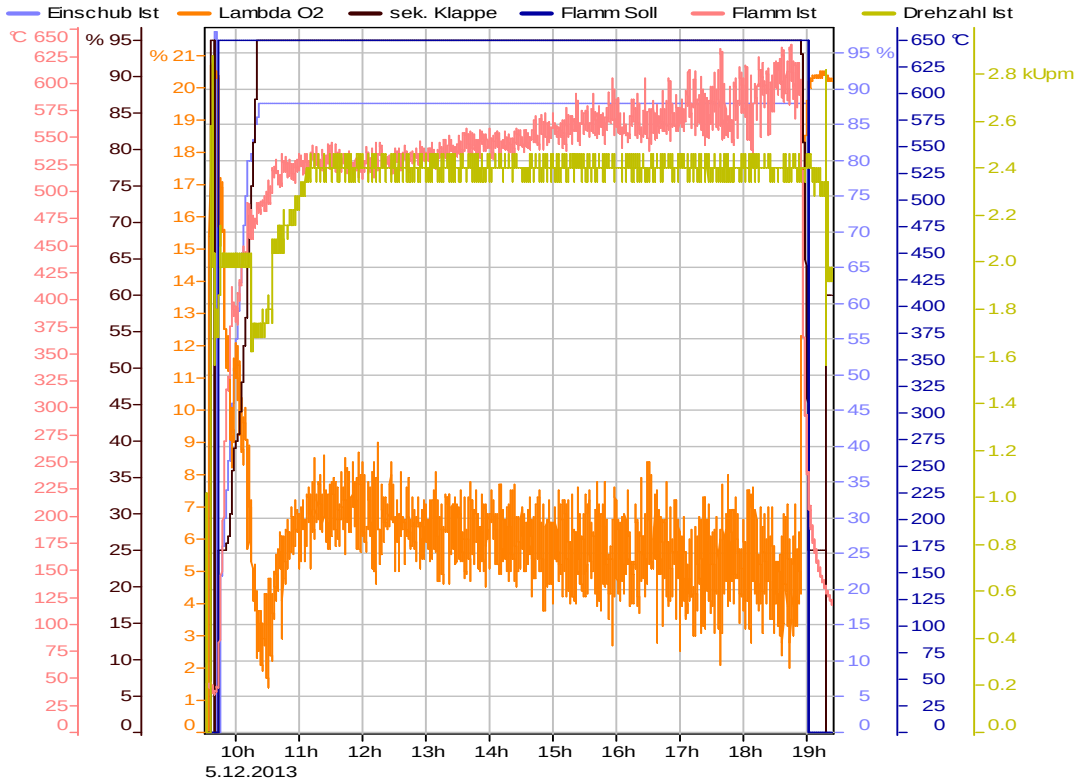


Diagramm 1: Zeitliche Messverläufe des Reglungsverhaltens über einen Abbrand in Volllast.

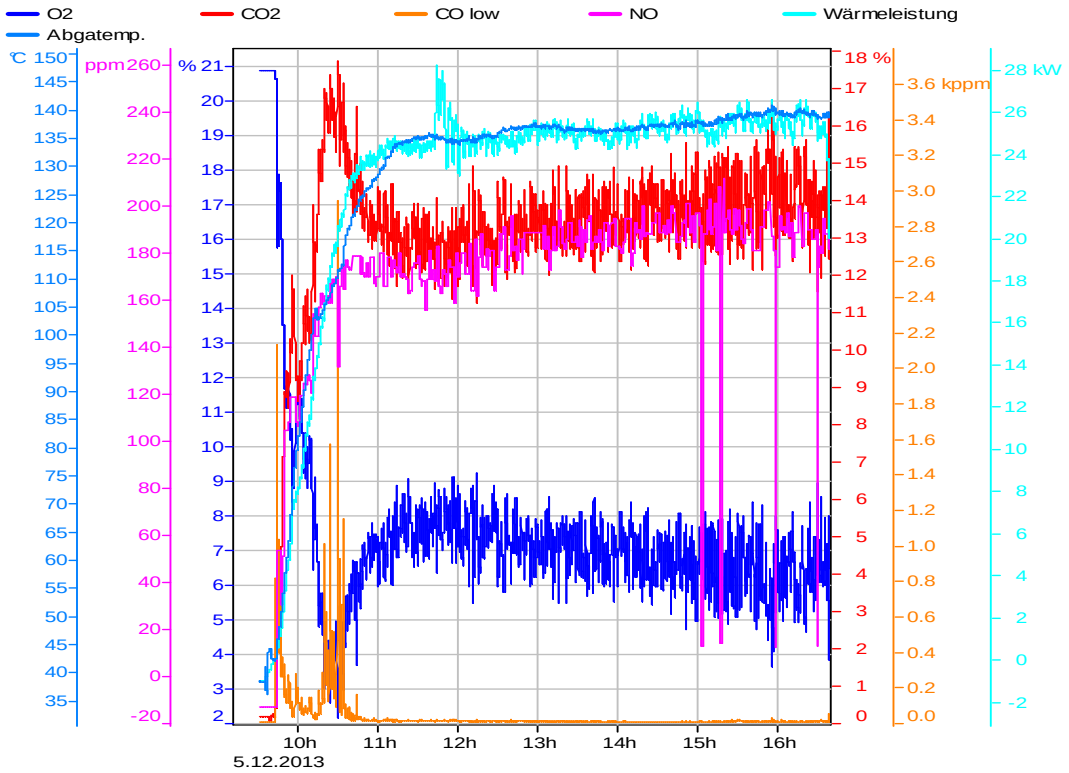


Diagramm 2: Zeitliche Messverläufe des Emmisionsverhaltens über einen Abbrand in Volllast.

5.3-Versuchsbrennstoff Typ 2:
Im zweiten Versuch wurde Pellets aus einer Mischung aus 49,25 % Fichte, 49,25 % Miscanthus und 1,5 % Kaolin verwendet. Durch den Zusatz von Kaolin wurde die Schmelztemperatur erhöht. Nach ca.9 Betriebsstunden und 54 kg Brennstoffverbrauch zeigt sich auf dem Rost wiederum eine geschlossene Sinterdecke, die bis zu den Sekundärluftdüsen anwächst, wie auf dem Bild 3 links zu sehen.
Bei der Rostreinigung blockierte der Rost vollständig, und lässt sich aufgrund der Härte den entstandenen Materials nur mit Krafteinsatz reinigen. Die vom Rost entfernte Schlacke sieht man auf dem Bild 4 rechts.

Bild 3:Darstellung von Sinterschlacke auf dem Rost.

Bild 4: Darstellung von Aschesinterstücken

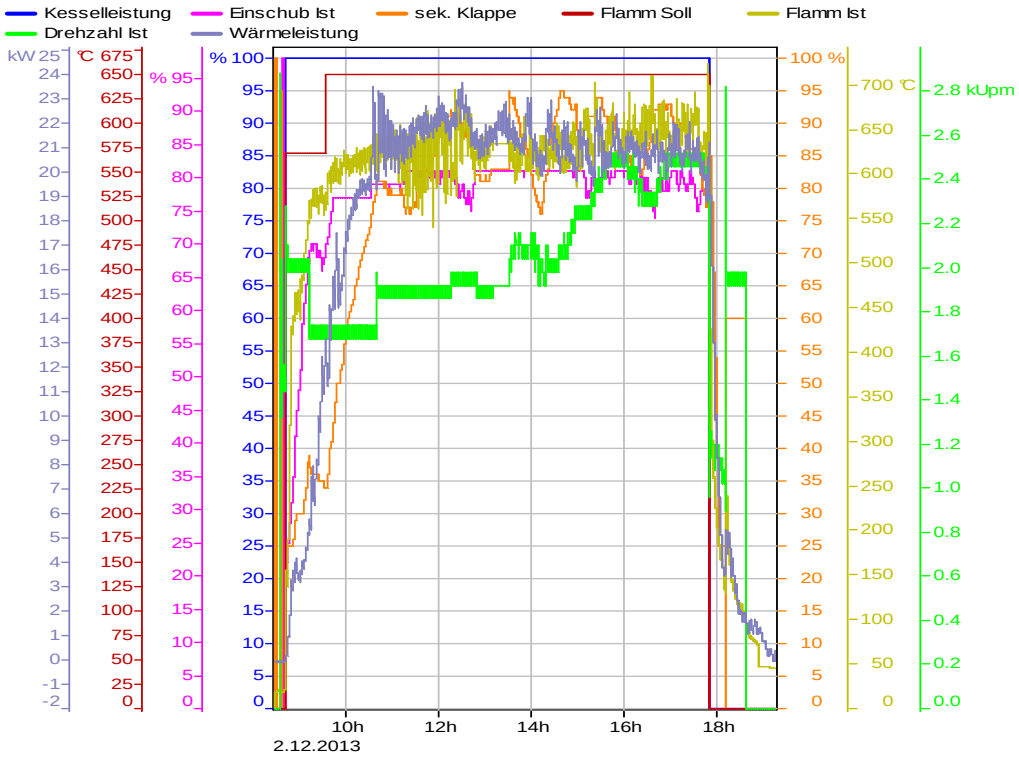


Diagramm 3: Zeitliche Messverläufe des Reglungsverhaltens über einen Abbrand in Volllast.

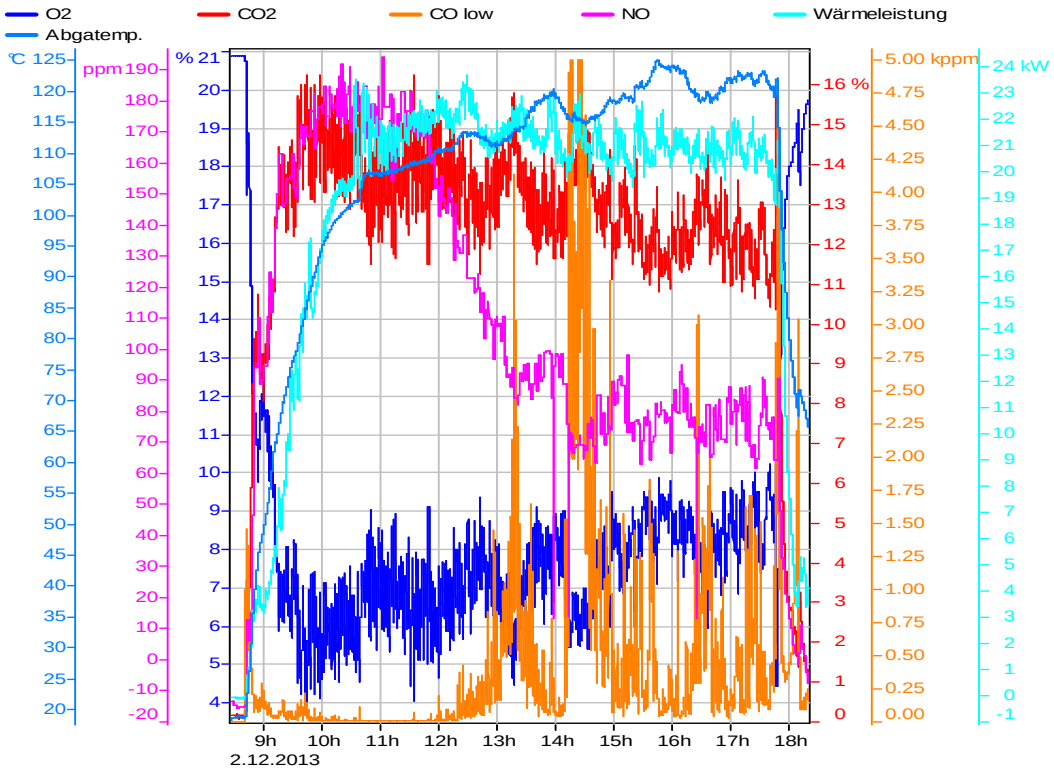


Diagramm 4: Zeitliche Messverläufe des Emmisionsverhaltens über einen Abbrand in Volllast.

5.3-Versuchsbrennstoff Typ 3:

Im dritten Versuch wurde Pellets aus einer Mischung aus 50 % Miscanthus und 50 % Paulownia verwendet. Nach ca.9 Betriebsstunden und 53 kg Brennstoffverbrauch zeigt sich auf dem Rost eine geschlossene Sinterdecke, wie auf dem Bild 5 unten zu sehen ist.

Bei der Rostentschlackung wurde der Rost vollständig blockiert, und lässt sich aufgrund der Härte den entstandenen Materials nur mit Krafteinsatz reinigen. Die vom Rost entfernte Schlacke sieht man auf dem Bild 6.

Bild 5: Darstellung von Ascheschlacke auf dem Rost.

Bild 6: Darstellung von Aschesinterstücken

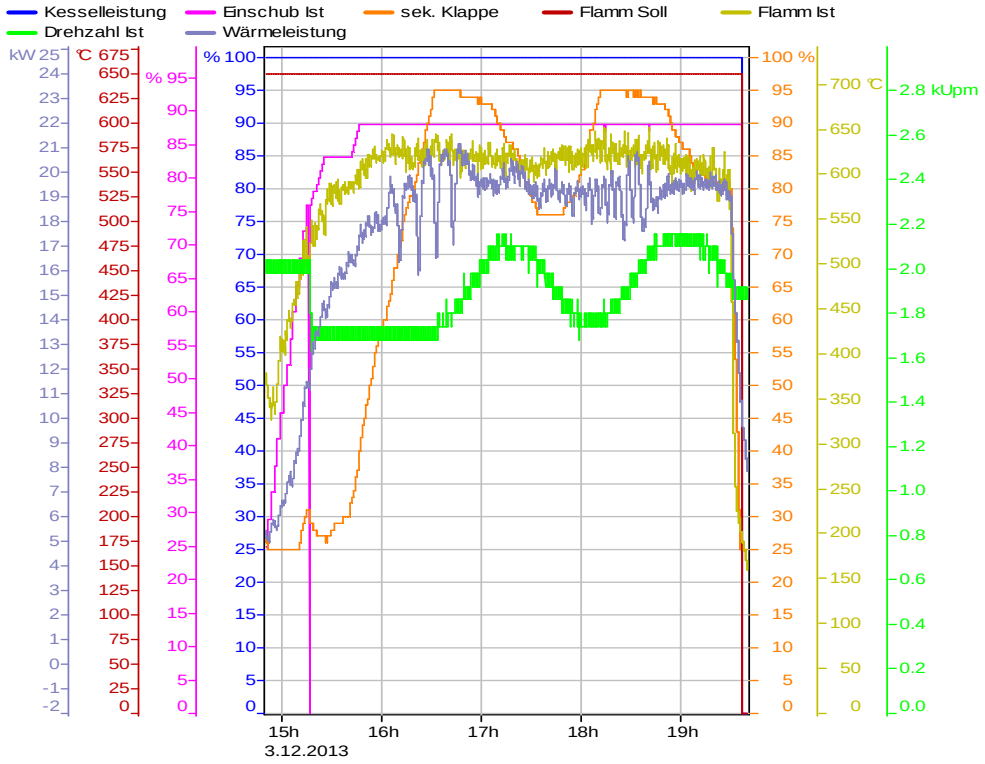


Diagramm 5: Zeitliche Messverläufe des Reglungsverhaltens über einen Abbrand in Volllast.

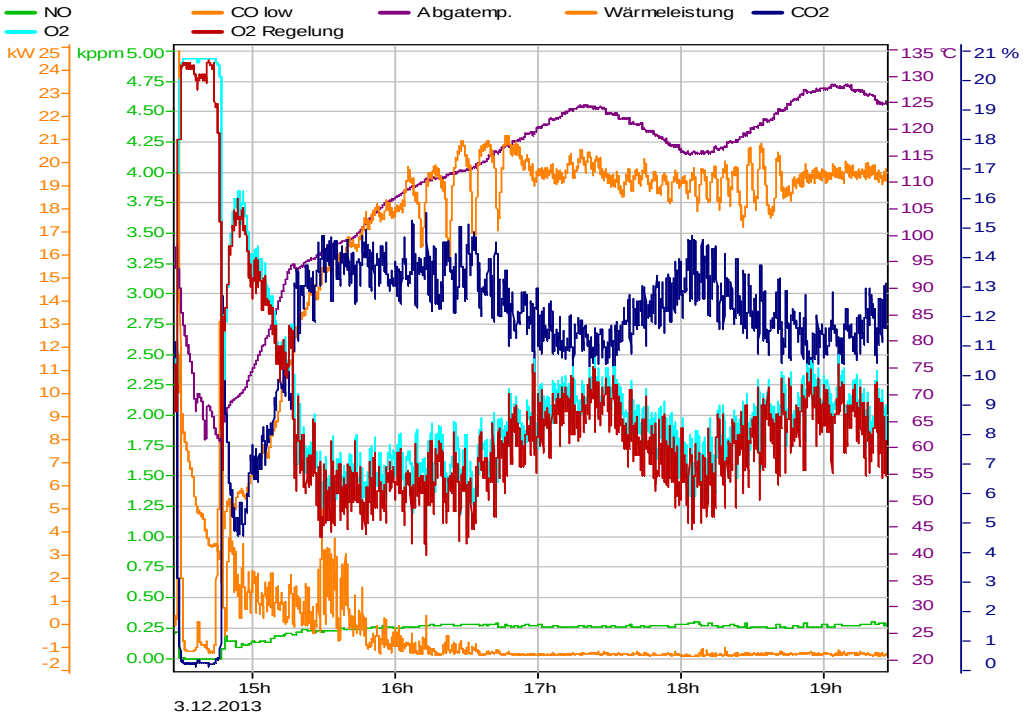


Diagramm 6: Zeitliche Messverläufe des Emmisionsverhaltens über einen Abbrand in Volllast.

5.4-Versuchsbrennstoff Typ 4:
Im letzten Versuch wurde Pellets aus einer Mischung aus 49,25 % Fichte, 49,25 % Miscanthus und 1,5 % Kaolin verwendet. Durch den Zusatz von Kaolin wurde die Ascheschmelztemperatur erhöht. Nach ca.8 Betriebsstunden und 40kg Brennstoffverbrauch zeigt sich auf dem Rost ebenfalls eine geschlossene Sinterdecke, wie auf dem Bild 7 links zu sehen ist.
Der Rost blockierte vollständig, und lässt sich aufgrund der Härte den entstandenen Materials nur mit Krafteinsatz reinigen. Die vom Rost entfernte Schlacke sieht man auf dem Bild 8 rechts

Bild7: Darstellung von Ascheschlacke auf dem Rost

Bild 8: Darstellung von Aschesinterstücken

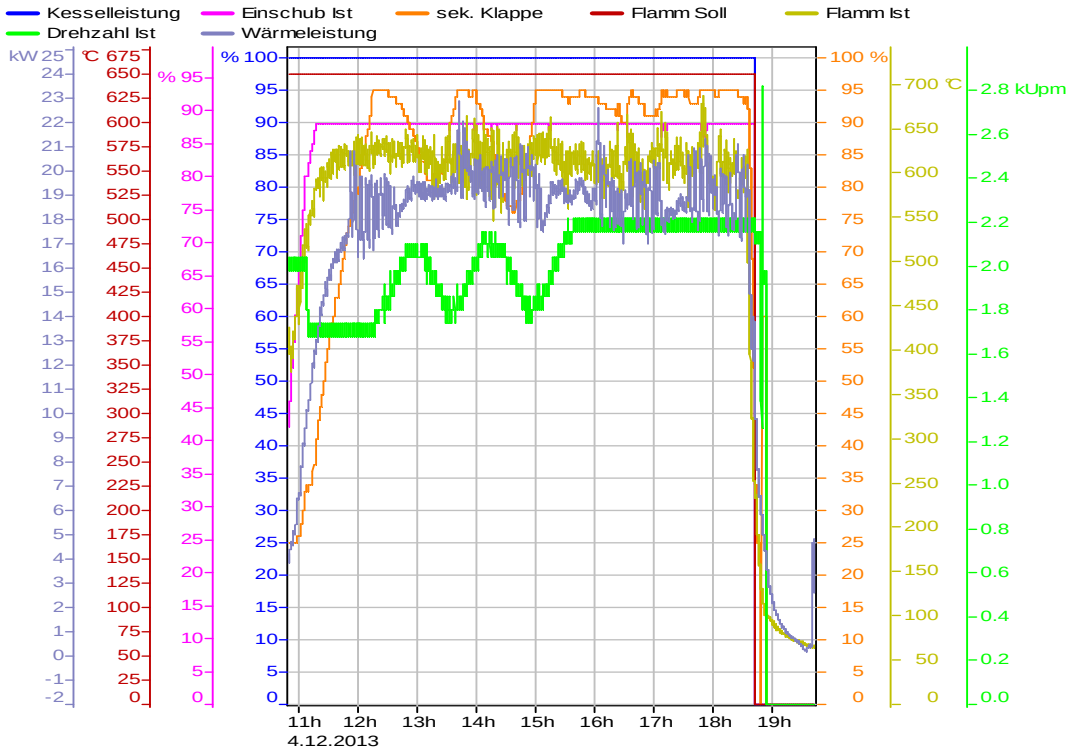


Diagramm 7: Zeitliche Messverläufe des Reglungsverhaltens über einen Abbrand in Volllast.

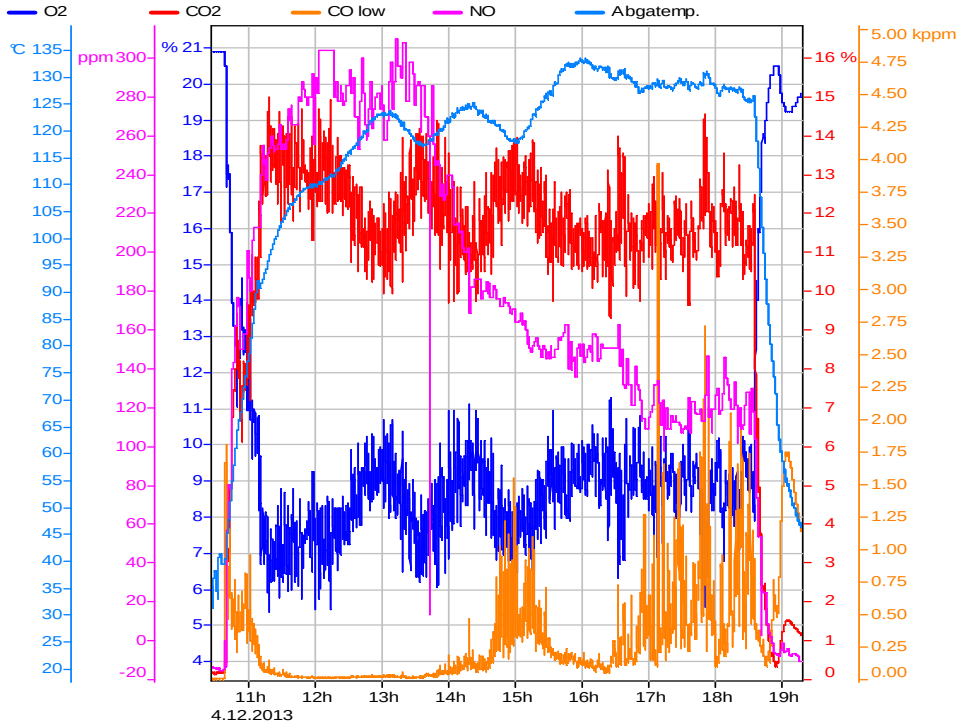


Diagramm 8: Zeitliche Messverläufe des Emmisionsverhaltens über einen Abbrand in Volllast.

Wie man aus den Aufzeichnungen (Diagramm 4 und 8)eindeutig sieht, ist die Schwankung der Verbrennung auf die Störung des Verbrennungsprozesses durch Bildung von Aschesinter auf dem Rost zurückzuführen. Dadurch wird die Vermischung von Brennstoff und Primärluft auf dem Rost gestört, sodass es zu einem undefinierten Verbrennungszustand auf dem Rost kommt und damit ein höherer Druckverlust im Glutstock entsteht. Dies könnte zu einer Verschiebung der Luftmengen zwischen Primär-und Sekundärluft führen. In den Aufzeichnungen ist zu beobachten, dass die Sekundärluftklappe im Laufe der Zeit kontinuierlich öffnet und dabei trotzdem das Kohlenmonoxid steigt. Bei Erreichen der Maximalen-Öffnung der Sekundär Luftklappe wird die Gebläsedrehzahl erhöht. Darüber hinaus zeigen die Versuchsbrennstoffe eine geringere Schüttdichte und hat zur Folge, dass der Kessel nur 58% bis 76 % seiner Nennwärmeleistug erreicht.

5.6: ***Verbrennungsgüte bei Nennlast nach Parameteroptimierung:***

Bei den Prüfungen vom 02.12. bis 06.12.2013 konnte am VL300P - 24kW bezüglich Emissionen und Feuerung folgendes festgestellt werden:

Parameter		Prüfergebnisse	Grenzwerte	
		Vitoligno 300-P 24 kW Volllast	BimSchV (2.Stufe)	UZ 37
		mg/Nm^3 bei 13%O2	mg/Nm^3 bei 13%O2	mg/Nm^3 bei 13%O2
CO	*Versuchsbrennstoff Typ 1*	9	200	93
	Versuchsbrennstoff Typ 2	428	200	93
	Versuchsbrennstoff Typ 3	35	200	93
	Versuchsbrennstoff Typ 4	254	200	93
NO	*Versuchsbrennstoff Typ 1*	222	k.A	155
	Versuchsbrennstoff Typ 2	132	k.A	155
	Versuchsbrennstoff Typ 3	359	k.A	155
	Versuchsbrennstoff Typ 4	248	k.A	155
Staub	*Versuchsbrennstoff Typ 1*	41	20	23
	Versuchsbrennstoff Typ 2	57	20	23
	Versuchsbrennstoff Typ 3	93	20	23
	Versuchsbrennstoff Typ 4	118	20	23

-Für den Staubgehalt werden höhere Werte bei allen getesteten Brennstoffe erreicht, die die in der BlmSchV(Stufe2) und ZU 37 angegebenen Grenzwerte von 20 mg/Nm3 (13% O2) bzw. 23 mg/Nm3 (13%) deutlich überschreiten. Eine mögliche Ursache für den höheren Staubgehalt im Rauchgas sind die Aerosolbildenden Elemente wie K, Cl, S, Ca, Na und Si.
-Mit Kaolinzugabe zu dem Mischpellets steigt der Staubgehalt im Vergleich zum selben Mischpellets ohne Kaolinzugabe.
-Der Staubgehalt aus Mischung –Fichte und Miscanthus liegt niedriger als der aus Mischung-Miscanthus und Paulownia.
-Die CO-Konzentration bei den Brennstoffe (Typ 2 und 4) liegt deutlich über den in der BlmSchV(Stufe 2) und UZ 37 angegebenen Grenzwerte, welche aufgrund der großen Schwankung der Konzentrationen auf einen unregelmäßigen Abbrand infolge der Aschesinterbildung zurückzuführen ist.
-Die NO-Konzentration überschreitet auch die angegebene Grenzwerten der BlmSchV(Stufe2) und UZ 37, ist aber brennstoffabhängig.

5.1 Vorschlag, Empfehlungen

-Um das Entstehen der Sinterschlacke zu verhindern, sollte der Versuch mit erhöhtem Kaolinanteil wiederholt werden.
-Andere Mischungsverhältnisse sollen getestet werden (zb.70% Fichte und 30% Miscanthus).
-Um die Bildung der Aschesinter auf dem Rost zu verhindern, muss die Temperatur im Entgasungsbereich unter der Ascheschmelztemperatur gehalten werden,

-Die Versuchsbrennstoffe sowie auch deren Rost-und Flugasche sollten analysiert werden..

6. Fazit

-Die Ergebnisse der Verbrennungsversuche zeigen, dass der verwendete Pelletskessel ohne Anpassungen der Anlageteile (Rost, Einschubschnecke….) mit den geprüften Mischpellets (Pellets aus Fichte und Miscanthus und Pellets aus Mischungen von Miscanthus und Paulownia) nicht dauerhaft im Automatischen Betrieb, ohne manuelle Eingriffe und entsprechende Aufwand und Leistungseinbuße betrieben werden kann.
-Die Versuchsbrennstoffe haben eine geringere Schüttdichte und somit einen verminderten Energieertrag im Feuerraum zur Folge, dass der Kessel mit den getesteten Pellets nur 58% bis 76 % seiner Nennwärmeleistung erreicht.
-Die Bildung der Aschesinterstücke auf dem Rost beeinflussen zum einen den Abbrandprozess negativ und führen zum anderen zur Rostblockade.
-Die Brennstoffdosierung in dem Brennkammer erfolgt mittels Förderschnecke und ist auf die volumenbezogene Energiedichte von Holzpellets ausgelegt. Da die eingesetzten Mischpellets über eine geringere Schütt- und damit auch Energiedichte verfügen, wird eine entsprechend geringere Energiemenge in den Feuerraum gefördert, so dass der Pelletskessel mit den Versuchsbrennstoffen nicht im Volllastbereich arbeiteten kann.
-Die CO-Konzentration im Rauchgas liegt deutlich über den in der BImSchV(2.Stufe)und uZ 37 angegebenen Grenzwerte, was aufgrund der großen Schwankungsbreite der Konzentrationen auf einen unregelmäßigen Abbrand infolge der Aschesinterbildung zurückzuführen ist.
-Die Werte für den Staubgehalt im Rauchgas überschreiten deutlich die Grenzwerte der BImSchV (Stufe 2) und UZ 37 .

7. Verweise

7.1 Ablageort:

Der Bericht ist unter
J:\Koeb\Forschung\Prüfstand\Brennstoffe\Miscanthus\Koop.Bonn.u.FH sowie auch im Ecliso unter w35_Prüfstand_Aufträge_Brennstoffversuch_Mischpellets gespeichert

Bilder:

Abb.2 : Darstellung der getesteten Brennstoffe mit jeweils deren entstandenen Sinterschlacken auf dem Rost..