

Deutsches BiomasseForschungsZentrum

German Biomass Research Centre



RLP Agrosience

PUSCH AG
ENERGY COMPANY



Thermische Nutzung von Traubentresterpellets in Kleinfeuerungsanlagen < 100 kW

Thomas Zeng
Sandra Lang
Anreas Schneider
Dr. Justus von Sonntag
Tobias Ulbrich
Dr. Volker Lenz

Januar 2012

Ansprechpartner:

**Deutsches BiomasseForschungsZentrum
gemeinnützige GmbH**

Dipl.-Ing (FH) Thomas Zeng
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig

Tel.: +49-341-2434-112
Fax: +49-341-2434-133
E-Mail: info@dbfz.de
Internet: www.dbfz.de

Tel.: +49-341-2434-542
E-Mail: thomas.zeng@dbfz.de

RLP AgroScience GmbH

Dr. Sandra Lang
Institut für Agrarökologie
Breitenweg 71
67435 Neustadt

Tel.: +49-6321-671-429
Fax: +49-6321-671-424
E-Mail: info@agrosience.de
Internet: www.ifa.agrosience.de

Pusch AG

Andreas Schneider
Auf der Weid 1-15
56242 Marienrachdorf

Tel.: +49-2626-92569-0
Fax: +49-2626-92569-29
E-Mail: info@pusch.ag
Internet: www.agrarstick.de

Erstelldatum:

03.01.2012

Inhalt

Inhalt	II
Abkürzungsverzeichnis.....	IV
1 Hintergrund.....	5
2 Ökonomische und logistische Aspekte zur thermischen Nutzung von Traubentresterpellets in Rheinland Pfalz	6
2.1 Rohstoffpotential Traubentrester.....	6
2.1.1 Region Vorderpfalz	6
2.1.2 Grenzregion Mosel	7
2.2 Ökonomische Betrachtung.....	9
2.2.1 Randbedingungen der Tresterpellets Herstellung.....	9
2.2.2 Ökobilanz / Umweltbewertung.....	10
2.2.3 Markt- und Kostenanalyse.....	11
2.2.4 Betriebsmodelle	13
2.3 Zusammenfassung.....	14
3 Verbrennungstechnische Charakterisierung von Traubentresterpellets	15
3.1 Einführung zu brennstofftechnischen Kennwerten	15
3.2 Brennstoffeigenschaften.....	18
4 Abbrandversuche mit Traubentrester-, Miscanthus- und Mischpellets.....	22
4.1 Material und Methoden.....	22
4.2 Beobachtungen bei der Verbrennung in der Kesselanlage.....	24
4.3 Emissionsmessungen.....	25
4.3.1 Gasförmige Emissionen.....	25
4.3.2 Staubemissionen	31
4.3.3 Zusammenfassung	33
5 Konzept zu prüftechnischen Anforderungen zum Nachweis der Einsatzfähigkeit alternativer Brennstoffe des §3 Abs.1, Nr. 13 der 1.BImSchV.....	34
5.1 Zielstellung.....	34
5.2 Rechtliche Rahmenbedingungen.....	34
5.2.1 1.BImSchV	34
5.2.2 Interpretation der Rahmenbedingungen	35
5.3 Bildung von Dioxinen und Furanen	36
5.3.1 Grundlagen der Bildung von Dioxinen und Furanen	36
5.3.2 Bildung von Dioxinen und Furanen in Kleinfeuerungsanlagen	37
5.4 Überlegungen zum Messprogramm	41
5.4.1 Prüfstandsmessung vs. Messung im Betrieb	41
5.4.2 Vergleichsmessungen zwischen Holz und Gruppe 13 Brennstoffe.....	42
5.4.3 Festlegungen zu den Messverfahren.....	42
5.4.4 Vorschlag für ein Messprogramm	45
5.5 Aufwand und Kosten.....	47
5.5.1 Grundlagen	47
5.5.2 Messung nach 1.BImSchV ohne weitere Messung	48

5.5.3	Messung nach Variante 1	48
5.5.4	Messung nach Variante 2	48
5.5.5	Anzahl der notwendigen Messungen.....	49
Abbildungsverzeichnis		50
Tabellenverzeichnis.....		51
Literaturverzeichnis.....		52
Anhang A.1: Brennstoffanalyse		54
Anhang A.2: Emissionsverläufe		56
Anhang A.3: Zusammenfassung der ermittelten Viertelstundenmittelwerte der Emissionsmessung		57

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
bez.	bezogen auf
prEN	Europäische Vornorm
DIN	Deutsches Institut für Normung
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
i.N.	im Normzustand
PCDD/F	Polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane
roh	Rohzustand bzw. Anlieferzustand
wf	wasserfrei

1 Hintergrund

In Deutschland fallen beim Weinanbau beträchtliche Mengen an Reststoffen an, welche für energetische Zwecke genutzt werden könnten. Im Jahr stehen rund 265.000 t Weintreber und 318.000 t Rebschnitt zur Verfügung. Dies entspricht einer Ölequivalent von ca. 135 Millionen Liter und einer CO₂ Einsparung von 354.000 t/a. In ländlichen Regionen könnten diese Reststoffe zu marktfähigen Produkten verarbeitet und somit die Wertschöpfung gesteigert und neue Arbeitsplätze geschaffen werden. Basierend auf diesen politischen und ökonomischen Zielen, hat das Unternehmen RLP AgroScience GmbH neue Verfahren, die eine Verwertung von Reststoffen aus dem Weinbau und dem Gemüseanbau im Sinne einer effizienten Kreislaufwirtschaft ermöglichen, entwickelt. Das europäische Patent EP 1783195B1 (Prozess zur Herstellung von Brennstoff aus Weintreber, insbesondere in Form von Pellets) wird von der RLP AgroScience GmbH gehalten. Hierzu wurde im März 2011 eine Demonstrationsanlage zur Verbrennung von Traubentresterpellets im Leistungsbereich < 100 kW errichtet.

Der Betrieb dieser Anlage erfolgt im Geltungsbereich der Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen (1. BImSchV), die am 22. März 2010 novelliert wurde. Die wichtigsten Änderungen der 1. BImSchV betreffen Biomassefeuerungen. Die Verordnung enthält eine Liste mit den Brennstoffen, die in einer Kleinfeuerungsanlage zulässig sind. Neu in der Brennstoffliste der 1. BImSchV sind nicht als Lebensmittel bestimmtes Getreide und Reststoffe wie Getreidebruchkörner oder Getreidespelzen. Für diese Anlagen gelten allerdings bestimmte Anforderungen: sie müssen auf dem Prüfstand nachweisen, dass sie neu festgelegte Grenzwerte für Dioxine und Furane sowie für Stickoxide einhalten. Neu ist außerdem, dass weitere Biobrennstoffe nach §3 Abs. 1 Nr.13 zugelassen werden können, wenn zusätzlich verschiedene Anforderungen, u.a. Einhaltung von Qualitätsanforderungen für die eingesetzten Brennstoffe und eines Messprogrammes erfüllt sind. Zum Nachweis der Einsatzfähigkeit dieses lokal verfügbaren Brennstoffes sind die Rahmenbedingungen in der Verordnung nicht ausreichend beschrieben und müssen deshalb präzisiert werden. Zudem ist die Einordnung von Reststoffen aus der verarbeitenden Industrie, z.B. Traubentrester nach §3 Abs. 1 Nr.13 oft schwierig, da abfallrechtliche Fragestellungen geklärt werden müssen. Entsprechend werden offene Fragestellungen im Ad-hoc Arbeitskreis „Biogene Brennstoffe in Kleinfeuerungsanlagen“ diskutiert, um Handlungsempfehlungen an die Landesbehörden zu erstellen. Hierfür werden in dieser Studie die Ergebnisse aus Brennstoffanalysen sowie Verbrennungsversuchen mit Traubentrester-, Miscanthus- und Mischpellets dargestellt. Weiterhin werden auch sinnvolle Nutzungskonzepte unter Beachtung logistischer und ökonomischer Aspekte vorgestellt. Am Ende dieser Studie wird ein Konzept für prüftechnische Anforderungen im Rahmen der 1. BImSchV abgeleitet, die als Grundlage für ein Messprogramm im Rahmen des Demonstrationsvorhabens sowie als Arbeitsgrundlage des Ad Hoc Arbeitskreises dienen kann.

2 Ökonomische und logistische Aspekte zur thermischen Nutzung von Traubentresterpellets in Rheinland Pfalz

2.1 Rohstoffpotential Traubentrester

2.1.1 Region Vorderpfalz

Um eine erste Annäherung der theoretischen Rohstoffpotentiale der Region zu erhalten, wurden unter Heranziehung digitaler Geodaten die Agrarflächen des Untersuchungsgebietes analysiert (vgl. Abbildung 1). Da sich die nicht mehr in Rheinland-Pfalz liegenden Flächen (ca. 30% des Untersuchungsgebiets) außerhalb des entscheidenden 20km-Umkreises befinden und das hierzu verwendete digitale Landschaftsmodell (DLM) aus ATKIS (Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem) nur für Rheinland-Pfalz vorliegt, werden die im Untersuchungsgebiet liegenden Agrarflächen von Baden-Württemberg und Hessen nicht mit berücksichtigt. Wie die folgende Abbildung 1 veranschaulicht, sind innerhalb des 20km-Umkreises neben dem anteilmäßig hohen Waldbestand insbesondere große Mengen an weinbaulichen Reststoffen zu erwarten. Denn von den rund 1260 km² Gesamtfläche erstrecken sich die Weingärten nach den Waldflächen mit 570 km² (45%) und Ackerland mit 250 km² (20%) als drittgrößte Landnutzungskategorie auf rund 165 km² (13%) hinter der diverse Untergruppen enthaltenden Kategorie Ackerland.

Tabelle 1: Flächennutzung im Untersuchungsgebiet nach ATKIS Basis DLM 2007

Fläche	50 km Umkreis		20 km Umkreis	
	ha	%	ha	%
Anthropogen	54718	10.5%	14558	11.5%
Wald	215596	41.5%	57194	45.3%
Ackerland	142335	27.4%	24721	19.6%
Wein	38292	7.4%	16674	13.2%
Grünland	54474	10.5%	9575	7.6%
Gehölz	5936	1.1%	1604	1.3%
Obst	1938	0.4%	1051	0.8%
Gartenland	1556	0.3%	449	0.4%
Wasser	4944	1.0%	362	0.3%
Summe	519789¹	100%	126188²	100%

¹ Die erhebliche Differenz des auf ATKIS basierenden Flächeninhaltes des 50 km Umkreises von 519.789 ha zu dem Flächeninhalt eines Kreises mit einem Radius von 50 km (785.400 ha) ergibt sich aus der Nichtberücksichtigung der im Untersuchungsgebiet liegenden Flächen Baden-Württembergs.

² Die Differenz des auf ATKIS basierenden Flächeninhaltes des 20 km Umkreises von 126.188 ha zu dem Flächeninhalt eines Kreises mit einem Radius von 20 km (125.660 ha) liegt in den ATKIS behafteten Ungenauigkeiten begründet.

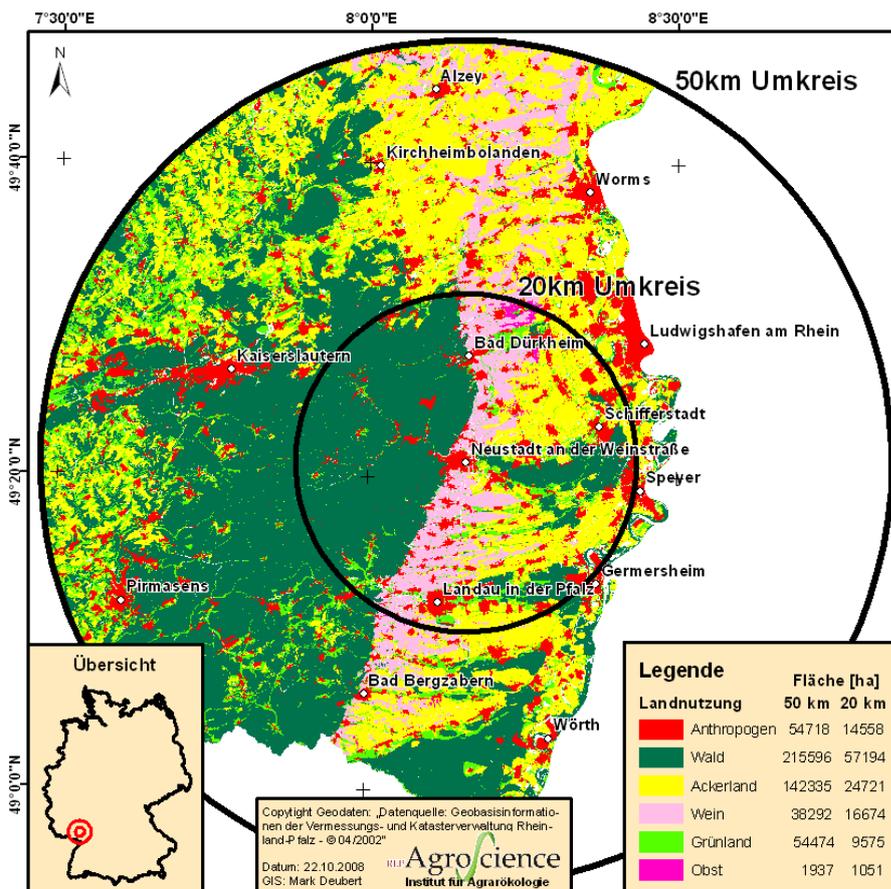


Abbildung 1: Landnutzung im Untersuchungsgebiet nach ATKIS Basis DLM 2007

In der Region Vorderpfalz ergibt sich somit ein Rohstoffpotential an Trester von ca.40.000 Tonnen (20 km) und von ca. 115.000 t im 50 km Radius. Von diesem theoretischen Potential können bedingt durch die kleinteilige Struktur (Familiengeführte Betriebe mit einer Rebfläche < 20 ha) nur ca. 10.000 t genutzt werden, das vorrangig bei den Winzergenossenschaften anfällt. Für diese Ermittlung der Rohstoffpotentiale im Weinbau wurden zwei verschiedene Fragebögen entwickelt um die Bereitschaft einerseits der Winzer und andererseits der Winzergenossenschaften im Bereich Pfalz zur Lieferung ihrer Reststoffe abzufragen /Deubert 2010/.

2.1.2 Grenzregion Mosel

Die Trestermengen an der Mosel und der angrenzenden luxemburgischen Weinregion wurden zur Bestimmung der Mengenpotentiale erhoben. Die luxemburgische Seite wurde hinzugezogen basierend auf dem Gedanken einer grenzüberschreitenden, regionalen Strategie im Umgang mit dieser bisher weitgehend ungenutzten Biomasse. Die Daten dienen als Grundlage für die spätere Umweltbewertung/Ökobilanz ausgewählter Verwertungswege sowie für die Markt- und Kostenanalyse der Tresterpelletsproduktion. Die Daten aus Deutschland betreffen lediglich die luxemburgisch-deutsche Grenzregion, d.h. ein kleiner Teil des Weinlandes Rheinland-Pfalz sowie des Saarlandes und stammen vom statistischen Landesamt Rheinland-Pfalz (2005) und der Landwirtschaftskammer Saarland (2003). Die Daten für Luxemburg wurden den Jahresberichten 2001-2006 des Weinbauinstituts Remich (IVV) entnommen. Hier sind Informationen zu bestockter Rebfläche [ha], im Ertrag befindliche Rebflächen [ha], Hektarerträge [kg], Mostausbeuten [hl] und spezifische Mostausbeuten (d.h. pro Rebsorte) zu entnehmen. Grundlage der folgenden Graphiken ist die bestockte Rebfläche, d.h. ertraglose Jung-

pflanzungen inbegriffen, deren Anteil sich im Durchschnitt um ca. 5% bewegen (IVV, 2001-2006) und bei der Betrachtung der Ergebnisse berücksichtigt werden muss. Der geographische Radius der kalkulierten Trestermengen beläuft sich auf 20 km. So dass der zeitliche und logistische Aufwand für ein regionales Verwertungskonzept im Rahmen bleibt, v.a. hinsichtlich der Transportwege des Tresters.

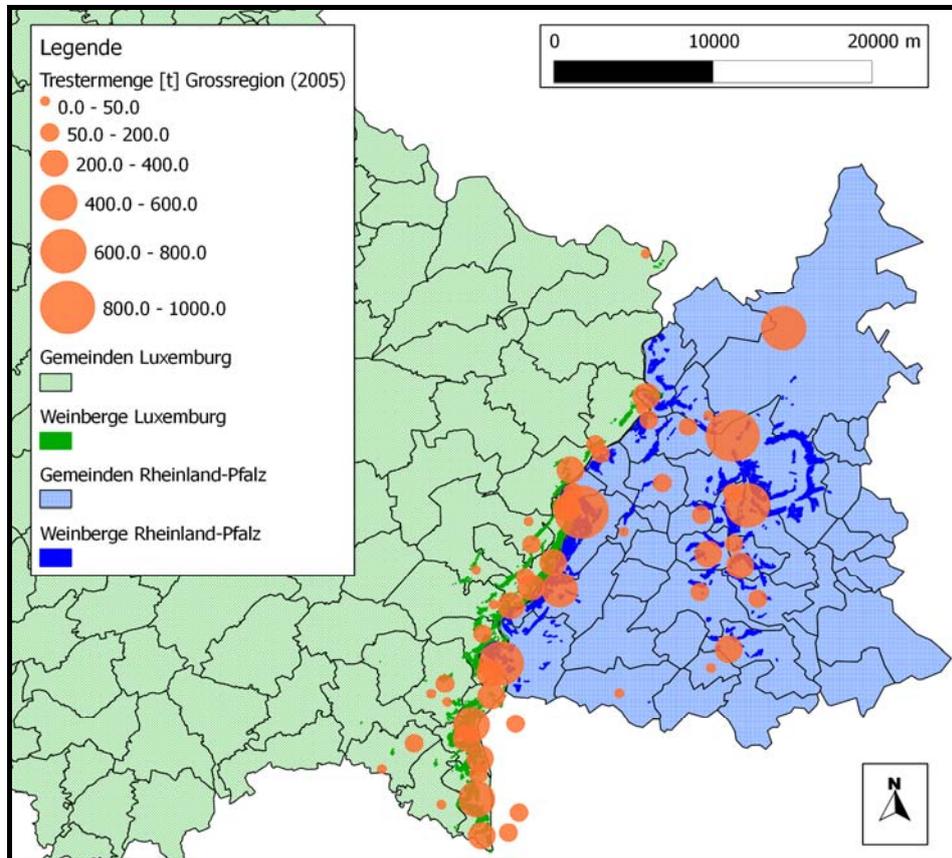


Abbildung 2: Geographische Verteilung der Trestermenge in der Grenzregion

In Tabelle 2 sind die Mengen der betrachteten Regionen aufgelistet. Es wurden drei Regionen einzeln erfasst: (1) Luxemburg, (2) Deutschland Grenzregion Luxemburger Mosel und (3) Deutschland grenznahe Gebiete (bis zu 20 km). Die betrachtete Region hat ein Tresterpotential von 11.600 t was einem Energiepotential von 7 Millionen Litern Heizöl entspricht. Der Anteil Luxemburgs daran beträgt gut 5.000 Tonnen. Die deutsche Seite generiert weitere 6.600 t. Erhebung der Daten im Rahmen des Projektes „MARC“ 2010.

Tabelle 2: Tresterpotential in der Grenzregion Mosel

Region/Verbandsgemeinde	Total [t]
Luxemburg	5000
Rheinland-Pfalz "obere Moselgemeinden"	2450
Saarland	420
Grenzregion Mosel total [t]	7870
VG Konz	2030
VG Saarburg	1000
VG Trier-Land	50
Trier, kreisfrei	630
"Großregion" total [t]	11580

2.2 Ökonomische Betrachtung

2.2.1 Randbedingungen der Tresterpelletsherstellung

Der Produktionsprozess für Pellets aus Traubentrester ist ähnlich dem der Holzpelletsproduktion, dennoch gibt es verfahrenstechnische Unterschiede, die sowohl für die Qualität des Endprodukts als auch für die Wirtschaftlichkeit von Bedeutung sind. Ein erster Unterschied ist, dass der Traubentrester, im Gegensatz zu den meisten konventionellen Pelletrohstoffen, nicht in einer verhältnismäßig gleichmäßigen Quantität über ein Jahr verteilt anfällt, sondern innerhalb der wenigen Wochen in der Weinleseperiode. Diese dauert ca. sechs bis acht Wochen und findet in den Monaten September und Oktober statt. In diesem kurzem Zeitraum fällt die komplette zur Verarbeitung geeignete Biomasse an. Eine weitere Besonderheit ist die stoffliche Beschaffenheit und somit die Haltbarkeit des Materials. Im Gegensatz zu holzartigen Materialien, lässt sich der Traubentrester, aufgrund des hohen Glukosegehalts, in der Regel nicht länger als zwei bis maximal zehn Tage unter aeroben Bedingungen aufbewahren, bevor sich Pilzbefall und aerobe Abbauprozesse einstellen und das Material zur Produktion eines Brennstoffes unbrauchbar machen.

Diese Sachverhalte bringen aufwendige Herausforderungen an die Beschaffungslogistik mit sich. Zum Einen bedeutet dies ein hohes Transportaufkommen, welches eine große Fahrzeugflotte erfordert, allerdings nur in der Weinerntezeit, und zum anderen muss das Material unverzüglich so eingelagert werden, das es über einen längeren Zeitraum aufbewahrt werden kann. Dies hat einen großen saisonalen Bedarf an Fuhrpark, Arbeitskräften und den dafür benötigten liquiden Mitteln zur Folge.

Die Lagerung der Rohstoffe stellt den zweiten Unterschied dar. Holzartige Biomasse beispielsweise kann im Freien oder in offenen Hallen gelagert werden, außerdem ist die Vorratsmenge von kontinuierlich anfallenden Materialien verhältnismäßig gering. Um Trester zu lagern, muss dieser konserviert werden. Eine geeignete und in der Landwirtschaft bewährte Methode hierfür ist die Silierung. Dafür wird das Siliergut stark verdichtet und durch dem Ausschluss von Sauerstoff einer Milchsäurevergärung unterzogen. Aufgrund des saisonalen Aufkommens des Materials, müssen zu diesem Zweck ausreichende Kapazitäten an Fahrtilos oder alternativen Silierpraktiken bereitgestellt werden, in denen das komplette Material für ein Jahr bevorratet und sukzessive dem Produktionsprozess zugeführt werden kann.

Der nächste Schritt bei der Tresterpelletsproduktion, welcher nach der Lagerung den ersten eigentlichen Produktionsschritt darstellt, ist die mechanische Entwässerung des Silierguts. Im Gegensatz zu Rohstoffen, deren Wassergehalt vergleichsweise gering ist, ist dieser Schritt für silierten Traubentrester mit durchschnittlichen H₂O-Gehalten von ca. 67-75 % unbedingt durchzuführen. In einer Entwässerungsschnecke wird das Material auf ca. 50-55 % Wassergehalt dehydriert. Bei dem Produktionsverfahren nimmt, bedingt durch die Entwässerung und durch geringe TS-Verluste, die Gesamtmenge ab, so dass der Output um ca. 70 % geringer ist, als die Inputmenge.

Alle weiteren Produktionsschritte unterscheiden sich im Wesentlichen nicht von denen der Holzpelletsproduktion, allerdings sind aufgrund der rohstoffspezifischen Eigenschaften in allen Produktionsschritten verfahrenstechnische Besonderheiten zu berücksichtigen. Dies fängt an bei der Trocknungstechnik und Temperatur, setzt sich fort über die optimale Zerkleinerung und den H₂O-Gehalt des Materials, bis hin zur Presstechnik und -temperatur. In der nachfolgender Abbildung ist das Produktionsverfahren schrittweise dargestellt:

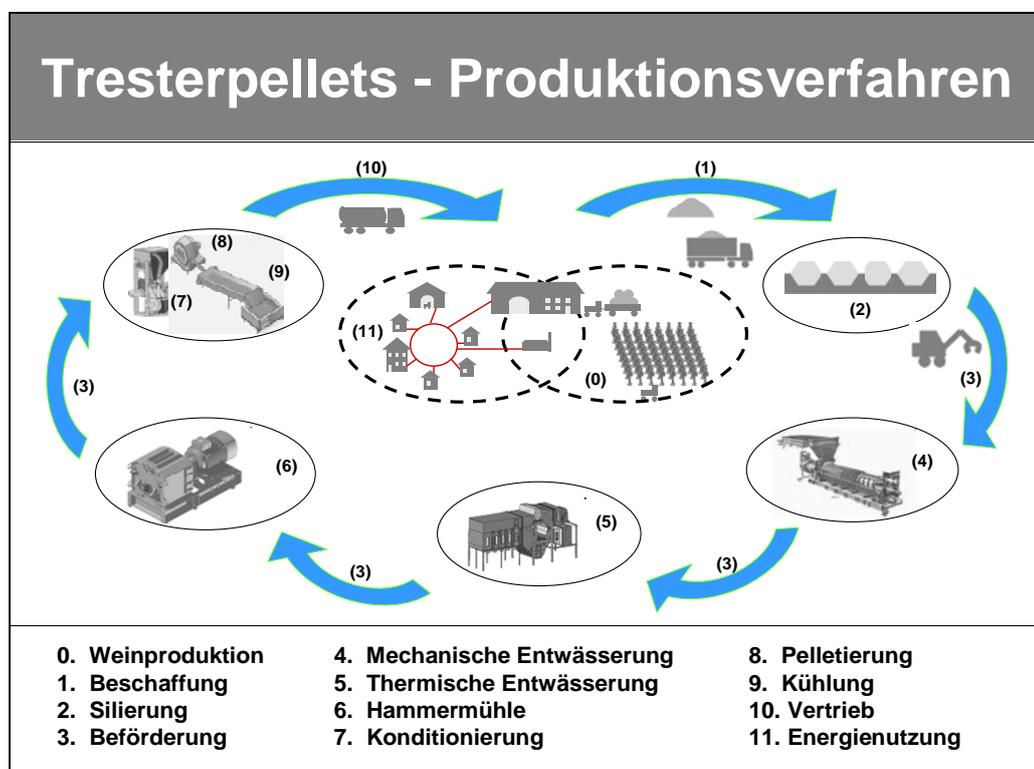


Abbildung 3: Produktionsverfahren für Pellets aus Traubentrester (eigene Darstellung)

2.2.2 Ökobilanz / Umweltbewertung

Um eine Einschätzung zu bekommen, ob ein alternativer Brennstoff aus Traubentrester auch ökologisch sinnvoll ist, wurde eine Ökobilanzierung der Wärmeproduktion aus Tresterpellets durchgeführt. Diese Art der Umweltbewertung zur Wärmegewinnung aus dem alternativen Brennstoff Traubentrester sollte untersuchen, ob es aus umwelttechnischer Sicht sinnvoll ist, Wärme durch Tresterpellets herzustellen oder ob herkömmliche Methoden der Wärmeproduktion, trotz der Nutzung einer Biomasse, vorteilhafter für die Umwelt sind. Das schließt einerseits die aufzuwendende Energie für die Produktion der Tresterpellets selbst ein als auch andererseits die entstehenden Emissionen bei der Nutzung der verglichenen Brennstoffe. Unter Berücksichtigung der entstehenden Nebenprodukte bei der Tresterpelletsproduktion,

d.h. die Nutzung des Presswassers aus der mechanischen Entwässerung zur Biogasproduktion und die Nutzung der Aschen als Düngemittel entstehen ökologische Vorteile für das Szenario der Tresterpelletsproduktion im Vergleich mit den herkömmlichen Brennstoffen Erdgas, Heizöl und Holzhackschnitzel. Diese Vorteile betreffen nicht alle untersuchten Bewertungskategorien, so dass bspw. die Bildung photochemischer Oxidantien und die Feinstaubbildung im Tresterpellets-Szenario weit unter der Umweltperformance von Erdgas oder Heizöl liegt. Die übrigen Kategorien zeigen jedoch überwiegend positive Ergebnisse im Vergleich zu den fossilen Energieträgern wie auch gegenüber den Holzhackschnitzeln. Durch den Einsatz der richtigen Brenntechnik, einer Anpassung der Pelletszusammensetzung und eventuell einer angepassten Filtertechnik kann die Umweltperformance der Wärme- und Energieproduktion durch Tresterpellets weiter gesteigert werden. Die detaillierte Ökobilanzierung wurde im Rahmen der Projektes „MARC“, Synthesebericht /Huck 2011/ erstellt.

2.2.3 Markt- und Kostenanalyse

Nachdem die generelle Eignung von Traubentrester als Ersatzbrennstoff aus Energie relevanter Sicht außer Frage steht, wurde zur Klärung der wirtschaftlichen Machbarkeit der Tresterpelletsherstellung eine Markt- und Kostenanalyse durchgeführt. Die Untersuchung soll feststellen, ob es möglich ist, einen Festbrennstoff aus weinbaulichen Reststoffen unter realen Marktbedingungen rentabel zu produzieren und soll u.a. Antworten auf folgende Fragen liefern:

- Gibt es einen Markt für Pellets aus Traubentrester als Brennstoff in der dezentralen Wärmeversorgung?
- Unter welchen Randbedingungen ist die Pelletsproduktion aus Trester wirtschaftlich sinnvoll?

Die betriebswirtschaftlichen Untersuchungen berücksichtigen die energetischen Ausbeuten des Verwertungsweges, die monetären Energiewerte und v.a. die betrieblichen Randbedingungen wie Betriebsgröße, Lage, Arbeitskapazität, Investitionsvolumen, etc. Die Kostenanalyse wurde für vier Szenarien durchgeführt. Zwei Szenarien wurden mit dem Tresterpotential von 5.000 Tonnen Frischmasse (Szenario T5) berechnet, zwei weitere Szenarien wurden mit dem Potential in der „Großregion“ also mit 12.000 Tonnen Biomasse (Szenario T12) berechnet. Für beide Input-Mengen wurden wiederum zwei Szenarien aufgestellt, die unterschiedliche Trocknungstechniken berücksichtigen. Eine ist eine sehr effiziente Kondensationstrocknung bei der die Feuchtigkeit mit Hochleistungspumpen abtransportiert und die im Kondensat enthaltene Energie zurückgewonnen wird. Dieses System benötigt Strom, was auch in der Kostenanalyse berücksichtigt wird. Die zweite Trocknungstechnik beruht auf einem Biomassensystem, d.h. die zur Trocknung benötigte Wärme wird mit Holzhackschnitzeln mit geringer Energiedichte (Waldrestholz) produziert. Die beiden Trocknungsszenarien werden mit E für elektrisch und B für die Biomassetrocknung bezeichnet. Es wurden also folgende vier Szenarien für die Kostenkalkulation berücksichtigt: T5-E (Inputmenge 5.000 t Frischsubstanz, Trocknung elektrisch; T5-B (Inputmenge 5.000 t Frischsubstanz, Trocknung mit Biomasse); T12-E (Inputmenge 12.000 t Frischsubstanz, Trocknung elektrisch); T12-B (Inputmenge 12.000 t, Trocknung mit Biomasse).

Grundlage der Kostenanalyse sind weiterhin bestimmte Randbedingungen, die bei der Produktion von Tresterpellets gemäß der Natur des Ausgangsmaterials berücksichtigt werden müssen. Zunächst muss man gewahr sein, dass die gesamte Jahresmenge des Pellet-Rohstoffs in nur wenigen Wochen im Herbst entsteht und nicht gleichmäßig über das ganze Jahr verteilt. Des Weiteren kann das Material nicht länger als wenige Tage unter aeroben Bedingungen gelagert werden, bevor sich Pilz- und Schimmelbefall

einstellt und damit für die Brennstoffgewinnung unbrauchbar wird. Diese Umstände sorgen für eine besondere Beschaffungslogistik: Einerseits bedeutet dies ein hohes Transportaufkommen während der Lesezeit und des Weiteren eine unverzügliche Einlagerung des Materials um die Haltbarkeit zu garantieren. Die Lagerung ist wiederum nicht mit holzartigen Biomassen zu vergleichen weil der Trester nicht im Freien oder offenen Hallen gelagert werden kann, sondern mittels Silage konserviert werden muss und dafür ausreichende Kapazitäten vorhanden sein müssen. In der Silage ist der Trester das ganze Jahr ohne nennenswerte Qualitätsverluste lagerbar.

Nachdem die Randbedingungen geklärt sind, wurden die In- und Output-Mengen ermittelt, da sich die Menge des Rohmaterials in jedem Prozessschritt verringert (Reduzierung des Wassergehalts, Feststoffverluste). Die dieser Ermittlung zugrundeliegenden Daten wurden im Projekt gesammelt und sind auch in der Ökobilanz so verwendet worden. Die Abbildung 3 zeigt den Gesamtzyklus der Produktionskette für Tresterpellets.

Die Kostenrechnung beginnt mit (1) der Beschaffung der Biomasse, d.h. vom Ort der Weinproduktion zum Ort der Pelletsherstellung. Pro Tonne zu beförderndes Material wurden 15 € kalkuliert. Schritt (2) ist die Silierung/Lagerung des Materials in Fahrsilos, die aus Wirtschaftlichkeitsgründen vor der Entwässerung stattfindet. Für T5 wurden 7.700 m³ und für T12 18.500 m³ Silokapazität berechnet (1m³ Trester = 0,65 Tonnen). Insgesamt betragen die Investitionskosten für Szenario T5 = 192.307 € und für Szenario T12 = 461.538 €. Schritt (3) sind jeweils die internen Förderwege während der gesamten Prozesskette (Förderbänder) und wird unter dem Punkt „Peripherie“ kalkuliert, worunter u.a. auch die Stromkosten, Lüftung und andere technisch erforderliche Hilfsmittel zusammengefasst werden. Schritt (4) ist die mechanische Entwässerung mittels Schneckenpresse. Die Investitionskosten betragen hier für T5 153.500 € und für T12 351.000 €. (5) ist die thermische Trocknung. Die Investitionen für das Szenario T5-E belaufen sich auf 160.000 €, für T12-E 470.000 €, für T5-B 280.000 € und für T12-B 515.000 €. (6) ist die Zerkleinerung des getrockneten Materials mit einer Hammermühle, (7) die Konditionierung, (8) die Pelletierung und (9) die Kühlung. Diese Posten wurden in der Kalkulation zusammengefasst, da diese im Paket günstiger sind als beim Vergleich von einzelnen Komponenten. Die Investitionen für T5 betragen 150.000 € und für T12 380.000 €. Punkt (10) ist der Vertrieb der Pellets und (11) die Energienutzung.

Bei der Kostenkalkulation wurde davon ausgegangen, dass keine Grundstücke, Gebäude oder Maschinen vorhanden sind. Die gesamte Infrastruktur muss neu beschafft werden. Für die entsprechenden Grundstücke und Gebäude wurde der Flächenbedarf für Fahrsilo und Produktionshalle für T5 auf 4000 m² und für T12 6000 m². Mit einem angenommenen Grundstückspreis von 150€/m² führt das zu Grundstückspreisen von 600.000 € für T5 und 900.000 € für T12.

Zur Ermittlung der Kapitalkosten wurden die Investitionen auf den Betrachtungszeitraum aufgeteilt um sie als jährliche gleich hohe Kosten ansetzen zu können wobei der Zeitraum für bauliche Anlagen bei 20 Jahren liegt, alle anderen Investitionen werden mit 15 Jahren Kreditlaufzeit veranschlagt. Der Zinssatz des Investitionskapitals wurde mit 5 % angesetzt. Ein weiterer Kostenpunkt sind die jährlich anfallenden Kosten für Wartung und Instandsetzung die wie in der Fachliteratur mit 2,4 % der Investitionskosten für technische Anlagen angesetzt wurden, und 1 % für bauliche Anlagen und Infrastruktur. Die Personalkosten wurden mit 25 €/h berücksichtigt und für das Szenario T5 mit 2000 h/a und das Szenario T12 mit 3000 h/a berechnet (50.000 € bzw. 75.000 €).

Daneben gibt es auch Erträge zu berücksichtigen. Bei der Silierung entsteht Sickerwasser was zusammen mit dem Presswasser aus der mechanischen Entwässerung in Biogasanlagen verwertet werden kann. Pro kg Press/Sickerwasser wurden 0,01 € angenommen. Für Szenario T5 ergibt das ein Erlös von rund 20.000 € und für T12 43.000 €.

Die Gesamtinvestitionskosten für ein Tresteraufkommen von 12.000 t/a sind etwa doppelt so hoch wie jene für die Szenarien mit 5.000 t Input (Tabelle 3). Die Produktionskosten bei den T12-Szenarien sind jedoch geringer als jene bei den kleineren Szenarien, was aufgrund der Mengendegressionseffekte zu erwarten war. Weiterhin zeigt sich, dass trotz höherer Investitionskosten, die „Biomasse-Szenarien“ (Trocknung mit Holzhackschnitzeln) insgesamt günstiger sind im Vergleich zu den Szenarien mit der Trocknung basierend auf elektrischer Energie. Die Brennstoffkosten für die vier berechneten Szenarien liegen demnach zwischen 0.0395 € (T12-B) und 0.0458 € (T5-E) pro kWh, was durchaus mit dem durchschnittlichen Preis für Holzpellets frei Haus konkurrieren kann. Insgesamt wurde die Kostenkalkulation mit dem kaufmännischen Vorsichtsprinzip vorgenommen, d.h. Preise bspw. für Rohstoffbeschaffung, Energiekosten, etc. recht hoch angesetzt. Weitere Möglichkeiten zur Kostensenkung bestehen, v.a. im Rahmen eines genossenschaftlichen Betriebsmodells, da hierdurch zahlreiche Synergieeffekte genutzt werden können.

Tabelle 3: Gesamtkosten der Tresterpelletsproduktion: Kapital- und Unterhaltskosten für die vier untersuchten Szenarien (T5-E, T5-B, T12-E, T12-B)

Szenario T5-E:			Szenario T5-B:		
Übersicht gesamte Kosten u. Erträge:			Übersicht gesamte Kosten u. Erträge:		
Investitionskosten:	1.460.334,61	€	Investitionskosten:	1.580.334,61	€
Periodische Kosten:	398.255,47	€/ a	Periodische Kosten:	388.473,01	€/ a
Periodische Erlöse:	60.012,00	€/ a	Periodische Erlöse:	60.012,00	€/ a
Saldo:	338.243,47	€/ a	Saldo:	328.461,01	€/ a
Output Pellets	1.477	t FSp / a	Output Pellets	1.477	t FSp / a
Output kWh (5 kWh/kg)	7.386.671	kWh / a	Output kWh (5 kWh/kg)	7.386.671	kWh / a
Produktionskosten	228,9553	€/ tFSp	Produktionskosten	222,3336	€/ t FSp
Produktionskosten	0,0458	€/ kWh	Produktionskosten	0,0445	€/ kWh

Szenario T12-E:			Szenario T12-B:		
Übersicht gesamte Kosten u. Erträge:			Übersicht gesamte Kosten u. Erträge:		
Investitionskosten:	3.062.539,40	€	Investitionskosten:	3.107.539,40	€
Periodische Kosten:	893.069,38	€/ a	Periodische Kosten:	833.922,68	€/ a
Periodische Erlöse:	82.806,00	€/ a	Periodische Erlöse:	82.806,00	€/ a
Saldo:	810.263,38	€/ a	Saldo:	751.116,68	€/ a
Output Pellets	3.803,00	t FSp / a	Output Pellets	3.803,00	t FSp / a
Output kWh (5 kWh/kg)	19.015.002	kWh / a	Output kWh (5 kWh/kg)	19.015.002	kWh / a
Produktionskosten	213,0590	€/ tFSp	Produktionskosten	197,5063	€/ tFSp
Produktionskosten	0,0426	€/ kWh	Produktionskosten	0,0395	€/ kWh

Es hat sich gezeigt, dass eine ökonomisch sinnvolle Produktion von Tresterpellets möglich ist. Unter der Annahme, dass die Zertifizierung des Brennstoffs und geeigneter Brennkessel erfolgreich abgeschlossen werden kann, stellt diese Art der Verwertung von Trester eine mögliche Alternative dar. Bei einer eventuellen Umsetzung des Vorhabens müssen die genauen Zahlen je nach Betriebsmodell (s.u.) in einer detaillierten Machbarkeitsstudie erhoben werden.

2.2.4 Betriebsmodelle

Grundsätzlich sind zwei Betriebsmodelle für die Brennstoffproduktion aus Traubentrester denkbar. Das ist einerseits ein marktwirtschaftlich orientiertes Unternehmen welches das Rohmaterial auf dem Markt beschafft, die Pellets produziert und anschließend gewinnbringend vertreibt. Bei diesem Modell muss

dann davon ausgegangen werden, dass zusätzlich zu den hier kalkulierten Kosten, weitere Kosten für den Einkauf des Tresters an die Sekundärrohstoffproduzenten entstehen. Weiterhin muss bei diesem Modell sichergestellt sein, dass keine Überschüsse produziert werden was bspw. durch langfristige Vertragspartnerschaften geregelt werden kann (Abnahmeverträge, Energie-Contracting).

Das zweite Betriebsmodell basiert auf einem genossenschaftlichen Prinzip. Dabei schließen sich die Rohstoffproduzenten zusammen und produzieren an einer gemeinsamen Produktionsstätte den Brennstoff der dann von den Genossen selbst genutzt wird. Der dabei entstehende Gewinn basiert auf der Einsparung von Heizkosten aller beteiligten Genossen und dem Verkauf der Überproduktion. Bei diesem Modell kann davon ausgegangen werden, dass sich die in der Kostenkalkulation berücksichtigten Kosten für die Bereitstellungskosten von 15€ pro Tonne für den Trester reduzieren, da die Genossenschaft über eigene Fahrzeuge verfügt und kein Dienstleister beauftragt werden muss. Allerdings müssen bei diesem Modell die individuell entstehenden Kosten für die Umstellung des Heizsystems und die Betriebskosten bei den Genossen berücksichtigt werden. Beide Betriebsmodelle sind ökonomisch realisierbar, wobei das genossenschaftliche Modell aufgrund folgender sozioökonomischer Vorteile eine höhere Effizienz erwarten lässt:

- Gemeinwohlorientiert
- Demokratische Gesellschaftsform
- Regelmäßige Prüfung im Interesse der Mitglieder
- Gute und einfache Finanzierungsmöglichkeiten
- Steuerliche Vorteile
- Kostensenkungspotentiale durch Nutzung bestehender Ressourcen, wie Produktionshalle, Transportfahrzeuge, Fahrsilos, Grundstücke, etc.

2.3 Zusammenfassung

Die wirtschaftliche Durchführbarkeit der Tresterpelletsproduktion wurde in einer Markt- und Kostenanalyse untersucht. Das Kostenmodell orientierte sich an den Erfahrungen bestehender Holzpelletsproduktionsanlagen unter Berücksichtigung der verfahrenstechnischen Besonderheiten für eine Pelletsproduktion aus Traubentrester. Es wurde geklärt unter welchen Randbedingungen die Tresterpelletsproduktion wirtschaftlich sinnvoll sein kann, d.h. ob Tresterpellets in Zukunft, bei entsprechenden gesetzlichen Rahmenbedingungen, mit marktfähigen Preisen in zentralen oder dezentralen Wärmeversorgungskonzepten, als alternativer Brennstoff auf dem Markt angeboten werden können. Es wurden hierfür vier Szenarien zugrundegelegt die einerseits die verfügbaren Trestermengen in Luxemburg und in einer eigens definierten „Großregion“ berücksichtigt (5.000 und 12.000 t Frischmasse) sowie zwei unterschiedliche Trocknungsmethoden (basierend auf elektrischer Energie bzw. auf Holzhackschnitzel).

Erwartungsgemäß hat sich gezeigt, dass je größer die Produktionsmenge desto geringer die Produktionskosten je Tonne Brennstoff. Außerdem zeigte sich das bei der Verwendung eines biogenen Brennstoffs für die Trocknung des Tresters (Holzhackschnitzel) die Produktionskosten geringer ausfallen als bei einer Trocknung basiert auf elektrischer Energie. Alle Szenarien wurden auf Grundlage des kaufmännischen Vorsichtsprinzips kalkuliert. Zum Beispiel wurden die Bezugskosten für den Rohstoff mit 15 € hoch angesetzt, ebenso wie die Preise für Stromkosten und die für die Trocknung eingesetzte Biomasse. Danach konnten für die vier analysierten Szenarien folgende Brennstoff-/Energiekosten berechnet werden:

Produktionskosten je Tonne Pellets:

- Trocknung basierend auf elektrischer Energie:
 - 5.000 t Frischmasse: 229 € (=0,046 € / kWh)
 - 12.000 t Frischmasse: 213 € (=0,043 € / kWh)
- Trocknung basierend auf Biomasse:
 - 5.000 t Frischmasse: 222 € (=0,045 € / kWh)
 - 12.000 t Frischmasse: 198 € (=0,040 € / kWh)

Weitere Kostensenkungspotentiale bestehen in der Ausnutzung vorhandener Infrastrukturen (Grundstücke, Gebäude, Silos, Fahrzeuge, etc.) was vor allem bei einem genossenschaftlichen Betriebsmodell möglich ist. Durch Eigenleistungen der Genossen können weitere Kosten reduziert werden (Brennstoffbeschaffung im regionalen Forst mit Einbindung forstwirtschaftlicher Akteure als Brennstoffkunden z.B., Vertrieb ab Werk, etc.). Auch die Erhöhung der Produktionsmenge durch die Produktion von Mischpellets (Rebholz, Waldrestholz, etc.) kann die Wirtschaftlichkeit erhöhen. Die Nutzung von Abwärme aus einem BHKW sollte unbedingt bei einer Umsetzung in Betracht gezogen werden, wodurch wiederum Einsparpotenziale entstehen können.

Die Markt- und Kostenanalyse zeigt dass die Wirtschaftlichkeit einer Tresterpelletsproduktion durchaus möglich ist. Für eine abschließende Aussage zur wirtschaftlichen Umsetzbarkeit der Brennstoffproduktion auf Basis von Traubentrester sollte eine detaillierte Machbarkeitsstudie in der zu betrachtenden Region durchgeführt werden.

Insgesamt kann gesagt werden dass eine nachhaltige Wärmeproduktion durch die Nutzung von Traubentrester in Form von Pellets wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll umgesetzt werden kann. Die erarbeiteten Ergebnisse lassen in beiden Bereichen noch Verbesserungsmöglichkeiten offen, sodass die bereits guten Ergebnisse bei einer tatsächlichen Umsetzung noch weiter gesteigert werden können. Der nächste Schritt an dieser Stelle ist nun die Ergebnisse allen Akteuren und Interessierten vorzustellen um damit eine Diskussionsgrundlage für den zukünftigen Umgang mit Traubentrester zu bilden.

3 Verbrennungstechnische Charakterisierung von Traubentresterpellets

3.1 Einführung zu brennstofftechnischen Kennwerten

Um eine Bewertung von Brennstoffen vornehmen zu können, sind deren energieträgerspezifischen sowie die chemischen und physikalisch-mechanischen Eigenschaften zu ermitteln. Diese lassen eine Beurteilung der Brennstoffqualität und der Wahrscheinlichkeit des Auftretens feuerungstechnischer Probleme zu, da sie die thermochemischen bzw. nachgelagerten schadstoffbildenden Prozesse beeinflussen. Beispiele für die qualitätsrelevanten Eigenschaften biogener Festbrennstoffe mit ihren jeweiligen Auswirkungen sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Qualitätsrelevante Eigenschaften biogener Festbrennstoffe mit ihren jeweiligen Auswirkungen /Kaltschmitt 2009/

Qualitätsmerkmal	Auswirkung
<i>Energieträgerspezifische Eigenschaften</i>	
Wassergehalt	Heizwert, Lagerfähigkeit, Verluste, Selbstentzündung, Brennstoffgewicht, Verbrennungstemperatur
Heizwert	Anlagenauslegung und -betrieb
Aschegehalt	Auslegung des Entaschungssystems, Partikelemission (Staub), Rückstandsbildung, -verwertung
Ascheerweichungspunkt	Schlackebildung und -ablagerungen, Betriebssicherheit und -kontinuität, Wartungsbedarf
flüchtige Bestandteile	Flammenbildung, Feuerraumkonstruktion, Sekundärluftzugabe
<i>Chemische Eigenschaften</i>	
Stickstoff	NO _x -, HCN- und N ₂ O-Emissionen
Schwefel	SO _x -Emissionen, Hochtemperaturkorrosion
Chlor	Emissionen von HCl und halogenorganischen Verbindungen (z. B. PCDD/F), Bildung von Aerosolen, Hochtemperaturkorrosion
Alkalien	Ascheerweichungsverhalten, Hochtemperaturkorrosion
Schwermetalle	Ascheverwertung, Deponierbarkeit der Aschen, Schwermetallemissionen
<i>Physikalisch-mechanische Eigenschaften</i>	
Schütt- bzw. Lagerdichte	Lager- und Transportaufwendungen, Leistung der Fördererlemente, Vorratsbehältergröße usw.
Rohdichte (Teilchendichte)	Schütt- und Lagerdichte, pneumatische Fördereigenschaften, Brennstoffeigenschaften
Größenverteilung / Feinanteil	Störungen in Fördererlementen, Rieselfähigkeit, Brückenbildungsneigung, Belüftungs- und Trocknungseigenschaften, Staubentwicklung

Im Folgenden wird kurz auf die Ergebnisse der physikalisch-mechanischen, der energieträgerspezifischen und chemischen Untersuchungen der Halmgutpresspellets eingegangen. In Kapitel 2 werden die Ergebnisse des durchgeführten Verbrennungsversuchs dargestellt und bewertet. Die Analysen wurden nach den geltenden europäischen Vorgaben für biogene Festbrennstoffe durchgeführt

Tabelle 5: Eigenschaften der untersuchten Brennstoffpellets im Vergleich zu den Anforderungen nach prEN 14961-6 /prEN 14961 – 6/

Parameter	Maßeinheit	100% TT	70% TT / 30% M	30% TT / 70% M	100% M	prEN 14961-6 Klasse A	prEN 14961-6 Miscanthuspellets
Durchmesser	mm	21	21,3	22,6	20,3	6 - 25 (± 1)	6 - 25 (± 1)
Länge	mm	18,1	24,7	37,2	36,3	3,15 < L < 50	3,15 < L < 50
Schüttdichte	kg/m ³	n.a.	476	486	n.a.	≥ 600	≥ 580
Feinanteil	Ma.-%	27,7	0,4	0,2	0,6	≤ 2,0	≤ 1,0
Aschegehalt, A	Ma.-% (wf)	7,86	6,58	3,92	2,66	5,0	6,0
Wassergehalt, M	Ma.-%	9,78	10,2	7,36	3,23	≤ 12	≤ 10
Flüchtige Bestandteile	Ma.-% (wf)	64,0	67,5	74,7	80,5	-	-
Heizwert, Hu	MJ/kg	20,78	21,00	20,06	17,34	≥ 14,1	*
Kohlenstoff, C	Ma.-% (wf)	53,8	52,3	50,3	48,1	-	-
Wasserstoff, H	Ma.-% (wf)	5,57	5,55	5,63	5,9	-	-
Sauerstoff, O	Ma.-% (wf)	37,43	39,74	42,71	45,69	-	-
Stickstoff, N	Ma.-% (wf)	3,2	2,41	1,36	0,31	< 1,5	< 0,5
Schwefel, S	Ma.-% (wf)	0,16	0,171	0,121	0,04	< 0,2	< 0,05
Chlor, Cl	Ma.-% (wf)	0,004	0,03	0,046	0,045	< 0,2	< 0,08
Phosphor, P	mg/kg (wf)	4800	3700	1500	751	(0,06 ^b)	(0,07 ^a)
Kalium, K	mg/kg (wf)	27800	24900	10800	4710	(0,21 ^b)	(0,72 ^a)
Calcium, Ca	mg/kg (wf)	8270	6800	2430	1360	(0,5 ^b)	(0,16 ^a)
Natrium, Na	mg/kg (wf)	88,9	74,3	83,4	156	(0,01 ^b)	(n.a. ^a)
Magnesium, Mg	mg/kg (wf)	1710	1350	682	545	(0,06 ^b)	(0,06 ^a)
Silizium, Si	mg/kg (wf)	2790	6830	7220	9990	(0,35 ^c)	(n.a. ^a)
Eisen, Fe	mg/kg (wf)	422	712	322	244	-	-
Aluminium, Al	mg/kg (wf)	294	118	120	351	-	-
Magnesium, Mg	mg/kg (wf)	1710	1350	682	545	-	-

* kleinster Wert ist anzugeben, n.a. – nicht analysiert, (*kursiv*): typische Werte für ^a Miscanthus /Leitfaden Bioenergie 2005/, und ^b Mittelwert aus Fichten- und Buchenholz /Kaltschmitt 2009/ sowie ^c nur Wert für Fichtenholz angegeben /Kaltschmitt 2009/, TT – Traubentrester; M - Miscanthus

3.2 Brennstoffeigenschaften

Einen Überblick über die ermittelten Brennstoffeigenschaften der Biomassepellets gibt Tabelle 5. Die Werte wurden anhand der geltenden europäischen Richtlinien für feste Biobrennstoffe analysiert. Um die gemessenen Werte in einen qualitativen Kontext zu stellen, werden auch hier die Anforderungen der prEN 14961-6 für einen Vergleich herangezogen. Die Pellets wurden mit einer hydraulischen Pelletpresse der Fa. PuschAG, Typ PM 6-28 mit einer Leistung von 140 kW und einer Kapazität von 1 t/h hergestellt, siehe Abbildung 4.



Abbildung 4: Pelletieranlage PM 6-28

Die hergestellten Pellets sind in Abbildung 5 dargestellt.



Abbildung 5: Hergestellte Biomassepellets (A: 100% Traubentrester; B: 30% Traubentrester / 70% Miscanthus; C: 70% Traubentrester / 30% Miscanthus; D: 100% Miscanthus)

Physikalisch – mechanische Eigenschaften

Die Schüttdichte – auch Lagerdichte genannt - ist als der Quotient aus der Masse des in einen Behälter eingefüllten Brennstoffes und dem Volumen des Behälters definiert. Die Hohlräume zwischen den Brennstoffteilchen werden demnach nicht vom Volumen abgezogen /Kaltschmitt 2009/, //Leitfaden Bioenergie 2005/. Mit einem Wert $< 500 \text{ kg/m}^3$ besitzen die Mischpellets eine niedrige Schüttdichte, welche die Anforderungen der prEN 14961-6 Klasse A bzw. für Miscanthuspellets nicht einhalten. Die Schüttdichten der Traubentrester- und Miscanthuspellets konnten aus aufgrund geringer Brennstoffmengen und des zeitlich begrenzten Versuchszeitraumes nicht analysiert werden. Der Feinanteil der Pellets ist ein Maß für die mechanische Stabilität der Pellets, die besonders hinsichtlich des Transports und der Lagerung von Bedeutung sind. Aus den in Tabelle 5 dargestellten Werten für den Feinanteil ist

ersichtlich, dass die mechanische Stabilität der Miscanthus- und Mischpellets im Vergleich zu den Anforderungen der prEN 14961-6 gegeben ist. Im Unterschied weisen die Traubentresterpellets mit 27,7 Ma.-% deutlich erhöhte Werte für den Feinanteil auf, siehe Abbildung 6. Da der vorliegende Brennstoff einen Restmenge einer Großcharge ist, sind diese Werte nicht repräsentativ. Der Feinanteil wurde daher vor den Verbrennungsversuchen mittels eines Rundlochsiebtes (Durchmesser: 8 mm) entfernt. Prinzipiell kann eine Verbesserung der physikalisch – mechanischen Brennstoffeigenschaften durch eine Optimierung des Pelletierprozesses, durch erhöhte Holzzugabe oder durch Zugabe von Presshilfsmitteln erfolgen.



Abbildung 6: Traubentresterpellets

Energieträgerspezifische Eigenschaften

Aus Tabelle 5 wird ersichtlich, dass der Aschegehalt mit zunehmendem Anteil an Miscanthus sinkt. Der Aschegehalt der Brennstoffmischung 70 % Traubentrester / 30 % Miscanthus sowie der Traubentresterpellets liegt außerhalb der Anforderungen der prEN 14961-6. Daher ist zu prüfen, ob die Pressung des verwendeten Materials optimierbar ist und ggf. entsprechende Vorbehandlungsmaßnahmen zur Abscheidung von Störstoffen, wie mineralische Verunreinigungen, notwendig sind. Da der Aschegehalt nicht durch brennstofftechnische Optimierungen reduziert werden kann, muss auf eine entsprechende Verwendung eines geeigneten Ascheaustragsystems in der Feuerungsanlage geachtet werden. Der Wassergehalt der untersuchten Biomassepellets beträgt maximal 10,2 Ma.-%. Der Grenzwert der prEN 14961-6 Klasse A wird nur geringfügig überschritten und kann durch eine optimierte Pelletierung bzw. Konditionierung des Ausgangsmaterials eingestellt werden. Traubentrester besitzt mit 64 Ma.-% (wf) einen niedrigeren Anteil an flüchtigen Bestandteilen als Miscanthus mit 80 Ma.-% (wf), was jedoch auf den hohen Aschegehalt der Pellets zurückgeführt werden kann. Der Anteil an flüchtigen Bestandteilen der Brennstoffmischungen ergibt sich entsprechend der jeweiligen Zumischhöhe an Miscanthus bzw. Traubentrester. Der Heizwert von 20,78 MJ/kg (wf) ist im Vergleich zur Miscanthus und verschiedenen Strohsorten ($H_u \sim 17,4$ MJ/kg (wf)) und Holzbrennstoffen ($H_u \geq 18,4$ MJ/kg (wf))

deutlich höher /Kaltschmitt 2009/. Des Weiteren wird der Grenzwert der prEN 14961-6 für die Klasse A eingehalten, womit auch bei einer Brennstoffoptimierung keine Probleme zu erwarten sind.

Chemische Eigenschaften

Bei der chemischen Analyse eines Brennstoffes werden dessen Haupt- sowie bestimmte Spurenelemente ermittelt, die Aussagen zum theoretischen Abbrandverhalten ermöglichen (siehe Tabelle 5). Der Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Sauerstoffgehalt des Materials ist ähnlich hoch wie in halmgutartigen Brennstoffen (vgl. /Kaltschmitt 2009/). Für diese Elemente gibt es keine Grenzwerte, sie dienen der Verbrennungsrechnung und der Durchführung der Staubmessung. Anders verhält es sich bei den Elementen Stickstoff, Schwefel und Chlor. Hier werden die Anforderungen für die Klasse A für Chlor und Schwefel erfüllt. Der Grenzwert für Stickstoff kann aufgrund des hohen Stickstoffgehaltes von Traubentrester nur bis zu einer Zumischung von etwa 30 % eingehalten werden. Die Anforderungen für Miscanthuspellets nach prEN14961-6 können nur für Chlor eingehalten werden. Im Unterschied dazu führt bereits eine Zumischung von 30 % Traubentrester zu einer Überschreitung der geforderten Grenzwerte von 0,5 Ma.-% bzw. 0,05 Ma.-% für Stickstoff und Schwefel. Im Vergleich zu Holz sind diese Werte jedoch als relativ hoch einzustufen (z.B. Buchenholz: N = 0,22 Ma.-% (wf), S = 0,015 Ma.-% (wf), Cl = 0,006 Ma.-% (wf) /Kaltschmitt 2009/). Eine Senkung der Elementgehalte kann auch durch die Zugabe geeigneter Rohstoffe, z.B. Holz erfolgen.

Für die bei der Verbrennung entstehenden Emissionen ist sowohl der verhältnismäßig hohe Stickstoff- als auch Schwefel- und Chlorgehalt negativ zu bewerten, da deren Anteil am Brennstoff neben der eingesetzten Feuerungstechnik direkt mit den Emissionen zusammenhängt. Der Stickstoff geht bei der Verbrennung nahezu vollständig als Stickstoffoxid (NO_x) in die Gasphase über, wobei die Stickstoffoxidbildung i. Allg. mit steigendem Stickstoffgehalt des Brennstoffs zunimmt /Kaltschmitt 2009/. Auch der im Brennstoff enthaltene Schwefel geht mit ca. 40 bis 90 %, abhängig von den jeweils vorherrschenden Verbrennungsbedingungen unter Bildung von SO_2 bzw. SO_3 in die Gasphase über /Van Loo 2008/. Der SO_2 -Grenzwert nach technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) von 280 mg/m^3 (i.N., bez. 13 Vol.-% O_2) konnte bei bisher untersuchten Anlagen unabhängig vom eingesetzten Brennstoff immer eingehalten bzw. unterschritten werden /Launhardt 2000, TA Luft 2002/. Ausgehend von den gemessenen Schwefelgehalten ist mit SO_2 -Emissionen zu rechnen die im Vergleich zu Holzbrennstoffen erhöht ausfallen und auf dem Emissionsniveau einer Strohverbrennung liegen. Chlor als Brennstoffbestandteil ist hauptsächlich für erhöhte Korrosionserscheinungen und Verschmutzungen an Kesselbestandteilen sowie für die HCl-Emissionen verantwortlich. Außerdem erhöht der Chlorgehalt in Verbindung mit unverbrannten Kohlenwasserstoffen das Dioxinbildungspotenzial. Somit ist der relativ niedrige Chlorgehalt des Brennstoffes als positiv zu bewerten, trotzdem können negative Auswirkungen hinsichtlich erhöhter Emissionen an Chlorwasserstoff bei dem untersuchten Brennstoff nicht ausgeschlossen werden /Leitfaden Bioenergie 2005, Vetter 2001/. Gleichzeitig spielen Schwefel und Chlor eine entscheidende Rolle bei der Entstehung partikelgebundener Emissionen in Form von Salzen (Alkalichloride z. B. KCl und Alkalisulfate z.B. K_2SO_4 , etc) /Oberberger 2006/.

Die in Tabelle 5 dargestellten Gehalte an Spurenelementen gehören - außer Silizium - zu den Alkali- bzw. Erdalkalimetallen und besitzen einen großen Einfluss auf das Ascheschmelzverhalten. Besitzt ein Brennstoff einen niedrigen Ascheschmelzpunkt, kann es auf Grund von Verschlackungen zu erheblichen Problemen bei der Verbrennungsführung und dem Ausbrand kommen. Da die prEN 14961 - 6 keine Grenzwerte für Spurenelemente bzw. Alkali-/Erdalkalimetalle vorgibt, sind in Tabelle 5 typische Werte

für Miscanthus und Holz angegeben. Die untersuchten Traubentresterpellets weisen im Vergleich zu Miscanthus deutlich höhere Gehalte an den Spurenelementen K, Ca und Mg auf. Hingegen sind Gehalte an Si und Na in einem deutlich geringeren Umfang vorhanden. Das Ascheschmelzverhalten und die damit verbundene Verschlackungsneigung hängen zum einen von der tatsächlichen Feuerraum- bzw. Glutbetttemperatur und zum anderen von der Zusammensetzung des Brennstoffes ab. Besonders hohe Anteile an den Alkalimetallen Kalium und Natrium führen in Verbindung mit hohen Chlorgehalten oder anderen Salzbildnern, z. B. Sulfaten, aufgrund der Bildung von Salzschnmelzen, sowie beim Vorhandensein so genannter Netzwirkbildner wie Silizium und Aluminium zu niedrigen Ascheschmelztemperaturen /Kaltschmitt 2009/, /Van Loo 2008/, /Stenaari 2009/. Es gibt immer wieder Versuche, das Ascheschmelzverhalten eines Brennstoffes mit der Brennstoffzusammensetzung zu korrelieren /Vetter 2003/, /Paulrud 2001/. Besonders das Verhältnis zwischen den Elementen ist entscheidend für die Feuerraumtemperatur, bei der die Aschen zu schmelzen beginnen. In diesem Zusammenhang ist es schwierig die genau zu erwartende Aschezusammensetzung sowie das genaue Ascheschmelzverhalten an einem bestimmten Punkt der Feuerung aus der Zusammensetzung des Brennstoffes abzuleiten /Hartmann 2004/. Daher kann eine abschließende Bewertung nur durch die Analyse des Ascheerweichungsverhaltens sowie anhand von Abbrandversuchen in einem für die Verbrennung der Pellets vorgesehenem Kessel erfolgen. Weiterhin ist Kalium an Korrosionsvorgängen in den Abgaswärmeübertragern und abgasführenden Bestandteilen der Verbrennungskessel, als auch bei der Bildung partikelgebundener Emissionen in Form von Salzen (KCl, K₂SO₄, etc) beteiligt. Somit sind auch in dieser Hinsicht der sehr geringe Kaliumgehalt vorteilhaft /Kaltschmitt 2009/. Silizium spielt als Netzwirkbildner bei Verschlackungsvorgängen in der Feuerraumasche eine bedeutende Rolle. Als weitere Aschebildner und Schwermetalle analysiert. Eine Übersicht der Gesamtanalyse ist in Anhang A.1 dargestellt.

4 Abbrandversuche mit Traubentrester-, Miscanthus- und Mischpellets

4.1 Material und Methoden

Die Traubentrester- und Miscanthuspellets sowie die Mischpellets (30/70 bzw. 70/30) wurden jeweils von der Pusch AG mittels einer hydraulischen Pelletspresse PM6-28 mit einer Kapazität von 1 t/h pelletiert. Anschließend wurden Verbrennungsversuche an zwei marktgängigen Kesselanlagen durch die Pusch AG und das DBFZ durchgeführt:

Verbrennungsversuche am DBFZ

Die Verbrennungsversuche am DBFZ wurden an einer Kesselanlage mit einer Nennwärmeleistung von 30 kW im Volllastbetrieb unter vergleichbaren Bedingungen durchgeführt. Der Kessel (im Folgenden Kessel A genannt) ist speziell für den Einsatz von aschereichen Brennstoffen sowie Holzpellets und -hackschnitzeln zugelassen und spiegelt den Stand der Technik wieder. Aufgrund der anlagentechnischen Ausführung mit einem doppelmanteligen Edelstahl –Reaktionsrohr, des stehend aufgestellten Edelstahl – Rohr­bündelwärmetauschers mit automatischem Reinigungssystem und den regelungstechnischen Einrichtungen erscheint der Kessel auch für den Einsatz halmgutartiger und anderer biogener Mischbrennstoffe als geeignet. Neben den oben genannten Vorteilen der Kesselausführung verfügt der Kessel über einen automatischen Vorschubrost und eine Luftstufung in Primär- und Sekundärluft. Die Primärluft wird der Brennkammer über den Rost zugeführt. Die Sekundärluft wird dem Verbrennungsgas in der Ausbrandzone tangential zugeführt, um eine gute Durchmischung und einen optimalen Gasausbrand in der Sekundärzone zu erreichen. Aufgrund der Luftstufung ist es möglich, eine im Vergleich zu anderen Kesselanlagen niedrige Temperatur auf dem Rost zu gewährleisten und damit das Auftreten von Ascheverschlackungen zu verringern. Die Abbrandversuche erfolgten im Technikum des DBFZ, in dem die beschriebene Kesselanlage über den Vor- und Rücklauf in das Heizungssystem des Gebäudes eingebunden sind und welches über ein Rückkühlwerk verfügt. Eine installierte Rücklaufanhebung am Kessel und das Rückkühlwerk des Heizungssystems, gewährleisten hier eine Mindestrücklauf­temperatur von 60 °C. Die Abgasführung erfolgt über einen isolierten, vertikalen Abgaskanal, in dem die Messstellen für die Abgasanalyse und Staubmessungen integriert sind. Die vom Kessel an das Heizungsnetz abgegebene Nutzwärme wird von einem Wärmemengenzähler (WMZ) erfasst und dient der Kontrolle des Voll­lastbetriebs des Kessels. Im Einzelnen werden folgende Feuerungs- und Emissionsmessgrößen erfasst, deren Messung im Folgenden kurz erläutert wird.

Die Messung der partikelförmigen Emissionen erfolgt gravimetrisch in Anlehnung an die VDI Richtlinie 2066 Blatt 1: „Staubmessung in strömenden Gasen – gravimetrische Bestimmung der Staubbil­dung /VDI 2066/. Für die Absaugung und Volumenstromermittlung des Teilabgasstromes wird die automatische Isokinetikregelung ITES der Paul Gothe GmbH eingesetzt, siehe Tabelle 6. Der abgesaugte Teilgasstrom durchströmt die Entnahmesonde aus Titan und passiert dabei die Filtereinheit, welche mit einem Planfilter versehen ist. Als Filtermaterial wird Quarzmikrofaserpapier mit einem Durchmesser von 45 mm verwendet, auf dem sich die vom Abgasstrom mitgetragenen Partikel ablagern. Die Entnahmesonde wird während der Probenahme durch eine Heizmanschette konstant auf 160 °C geheizt, um ein Auskondensieren von Abgasbestandteilen zu vermeiden. Bei den Messungen, wurde die in der VDI Richtlinie 2066 Blatt 1 beschriebene Out-Stack-Filtration angewendet. Die in der VDI Richtlinie 2066 Blatt 1 vorgeschriebene Probenahmedauer von 30 min wird bei einigen Versuchen auf 15 min reduziert, da die Filter aufgrund der erhöhten Staublast stark beladen werden und eine isokinetische

Teilvolumenstromentnahme nur über einen verkürzten Zeitraum möglich ist. Die entsprechenden Zeiträume für die Staubprobenahme sind in den jeweiligen Verlaufsdiagrammen der Versuche im Anhang A.2 dargestellt. Für jeden Versuch wurden mindesten drei Staubmessungen nach VDI 2066 durchgeführt.

Tabelle 6: Technische Details der Isokinetikregelung ITES der Fa. Paul Gothe GmbH

Hersteller:	Paul Gothe GmbH
Norm:	gemäß VDI 2066 und EN 13284-1
Anwendung:	automatische isokinetische Probenahme
Volumenstrom:	0,4-4 m ³ /h
Abweichung der Isokinetik	-5 % / +15 %
Filtergrößen	45 mm

Für die kontinuierliche Messung der Abgasmessgrößen wurden drei unterschiedliche Messgeräte verwendet. Alle Geräte saugen das Abgas mittels beheizter Messsonden und Schläuche aus dem Abgaskanal ab und analysieren die entnommenen Gase unverdünnt. Die Messgrößen werden kontinuierlich über die gesamte Versuchsdauer in 10 – Sekunden - Abständen aufgezeichnet. Für die Auswertung erfolgt die Berechnung von Mittelwerten aus Viertelstundenmittelwerten während eines stationären Betriebszustandes. Für die Vorversuche zur Kesseleinstellung wurde das Messgerät EHEIM Visit 02-S der Firma Messtechnik EHEIM GmbH verwendet, um die optimalen Kesselparameter für den jeweils verwendeten Brennstoff einzustellen. Die Optimierung des Kessels erfolgte vorwiegend an den gemessenen Kohlenstoffmonoxid-Konzentrationen und dem Sauerstoffgehalt im Abgas. Für die Messversuche wurde die GASMET CEMS FTIR-Emissionsmessanlage eingesetzt. Diese stationäre Emissionsmessanlage besteht aus einem FTIR-Gasanalysator vom Typ CX-4000 der Firma ANSYCO GmbH, einem Sauerstoffanalysator vom Typ PMA 100-L der Firma M&C TechGroup Germany GmbH, sowie einem beheizten Probennahmesystem und einem PC zur Steuerung und Erfassung der Daten. Der integrierte Sauerstoffanalysator nutzt das physikalische Messprinzip des Paramagnetismus zur Messung des Sauerstoffgehaltes und ist in seinen Messbereichen von 0 - 25 und 0 - 100 Vol.-% O₂ frei parametrierbar. Die Probenahme des CEMS erfolgt mit einer beheizten Entnahmesonde, deren auswechselbarer Filter zur Partikelabscheidung vor jedem Versuch ausgetauscht wird. Alle gasbenetzten Teile der stationären Emissionsmessanlage, von der Entnahmesonde bis zur Messzelle werden mit 180°C beheizt. Die Emissionsmessanlage GASMET CEMS ist durch den TÜV SÜD zertifiziert und darf gemäß 13. und 17. BImSchV zur Analyse von Rauchgasen in Kraftwerken und Müllverbrennungsanlagen eingesetzt werden. Die Messdaten werden über die mitgelieferte CALCMET-Software in 10 – Sekunden - Abständen erfasst. Die Messung der Gesamtkohlenwasserstoffemissionen erfolgt mit einem Flammenionisationsdetektor. Hierfür wird entweder das in der GASMET-Emissionsmessanlage integrierte Gerät oder der FID-2010T der Fa. Testa verwendet.

Verbrennungsversuche bei der Pusch AG

Die Verbrennungsversuche bei der Pusch AG wurden an einer Kesselanlage der Firma PH Energy, Typ PH47 (im Folgenden Kessel B) mit einer Nennwärmeleistung von 47 kW im Volllastbetrieb unter vergleichbaren Bedingungen durchgeführt. Die Kleinf Feuerungsanlage wurde speziell für die Verbrennung nicht-holzartiger Brennstoffe entwickelt und ist mit einer Leistungs- und einer Verbrennungsregelung ausgestattet. Der Brennstoff wird über eine getaktet betriebene Stokerschnecke in

den Brennraum eingebracht und in einem sog. Tunnelbrenner verbrannt. Asche und Schlacke werden durch den nachrückenden Brennstoff in den Aschebehälter befördert. Die entstehenden Abgase werden durch einen Abgaswärmeübertrager geleitet. Bevor die Abgase über das Schornsteinsystem in die Umwelt abgeleitet werden, werden in einem Feinstaubfilter der Firma Schröder, Typ Altop entstandene Feinstäube abgeschieden. Die Messung der Feinstaubkonzentrationen im Abgas erfolgte mittels der Streulichtmethode nach dem Feinstaubfilter. Die gasförmigen Abgasbestandteile wurden durch ein Abgasmessgerät mittels FTIR Methode analysiert. Die Emissionsmessanlage ist durch den TÜV SÜD zertifiziert und darf gemäß 13. und 17. BImSchV zur Analyse von Rauchgasen in Kraftwerken und Müllverbrennungsanlagen eingesetzt werden.

4.2 Beobachtungen bei der Verbrennung in der Kesselanlage

Das Abbrand- und Ascheverhalten der Pellets wurde während des Abbrandversuches visuell erfasst und ausgewertet, wobei als wichtige Kriterien definiert sind:

- Dosierbarkeit des Brennstoffs in den Feuerraum
- Ausbildung der Flammen und des Verbrennungsfortschritts
- Bildung von Asche- bzw. Schlackeagglomeraten

Die Verbrennung der Traubentrester-, Miscanthus- und Mischpellets zeigte weitestgehend ein relativ kontinuierliches und unproblematisches Abbrandverhalten, wobei die Ausbildung der Flamme vom jeweiligen Verschlackungsgrad abhängt. Die Feuerraumaschen wiesen lediglich einen geringen Verschlackungsgrad auf, wobei der Verschlackungsgrad mit zunehmendem Anteil an Miscanthus stieg. Die verstärkte Bildung von Ascheagglomeraten führt zu einer Anhäufung von Asche in der Brennkammer und einer nicht kontinuierlichen Ausbildung des Glutbettes. In Abbildung 7 ist dies besonders deutlich beim Einsatz der Miscanthuspelletcharge in Kessel A zu sehen. Aufgrund der Brennstoffzusammensetzung kommt es jedoch bei allen Brennstoffen zu Ascheverbackungen, die jedoch in beiden Kesseln durch die Ascheaustragssysteme gelöst werden können. Die anfallende Asche und die entstandenen Asche-Schlacke-Agglomerate konnten durch das Entaschungssystem problemlos in den Aschekasten transportiert werden. Behinderungen des Transports des Brennstoffs in den Feuerraum, der eigentlichen Verbrennung und des Ascheaustrags wurden nicht festgestellt. Aufgrund der hohen Aschemenge, insbesondere bei den Traubentresterpellets ist jedoch eine automatische Entaschung des Kessels notwendig, da der Aschekasten nicht für einen so aschereichen Brennstoff ausgelegt ist. Durch eine ungehinderte Brennstoffzufuhr, ausreichende Verbrennungsluftversorgung des Brennstoffs sowie einen notwendigen Ascheaustrag konnte für den Versuchszeitraum eine homogene und störungsfreie Verbrennungsführung gewährleistet werden. Lediglich beim Einsatz der Miscanthuspellets im Kessel A traten, aufgrund der festen und langen Form der Pellets, Brückenbildungen im Übergangsbereich von Brennstoffbehälter zur Brennstoffschnecke auf. Die mit einem Durchmesser von ca. 20 mm und einer Länge bis zu 37 mm für den Feuerraum des Kessels A relativ großen Biomassepellets führten im Vorfeld zu einem größeren Aufwand bei der Einstellung des Kessels. Zudem musste der Kessel mit ENplus Holzpellets gezündet werden, da die vorhandene Zündeinrichtung für den Einsatz der zu untersuchenden Pellets nicht geeignet war. Ebenso konnte ein bis zu 2 h andauernder Anfahrbetrieb beobachtet werden. Im weiteren Verlauf konnten nur für die Miscanthus- und Mischpellets (30 % Miscanthus / 70 % Traubentrester) optimale Kesseleinstellungen für den stationären Vollastbetrieb gefunden werden. Beim Betrieb mit Traubentrester- und Mischpellets (30 % Miscanthus / 70 % Traubentrester) konnte kein

optimales Brennstoff- / Luftverhältnis erreicht werden. Diese Probleme wurden in Kessel B nur beim Einsatz der Traubentresterpellets beobachtet.

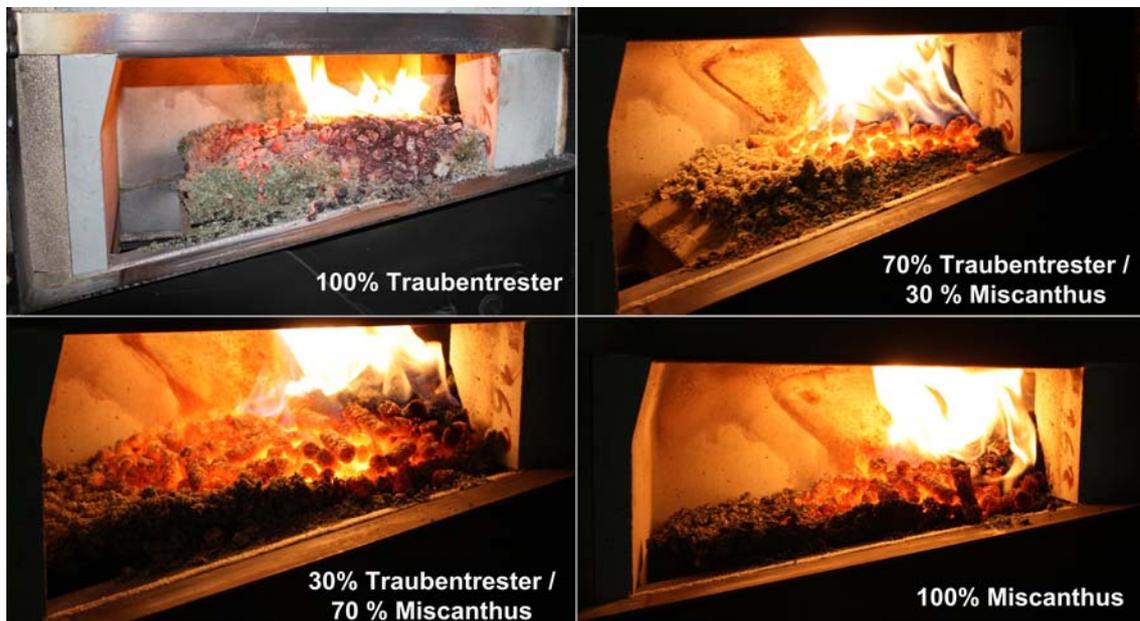


Abbildung 7: Flammenbild und Rostasche während der Verbrennung der Biomassepellets in Kessel A

4.3 Emissionsmessungen

4.3.1 Gasförmige Emissionen

Die Erfassung der Emissionen über den gesamten Versuchszeitraum erfolgt im kontinuierlichen Volllastbetrieb der Kesselanlage. Es wurden gemäß der 1. Bundesimmissionsschutzverordnung (1. BImSchV) Viertelstunden-Mittelwerte gebildet, die im Anhang A.3 zusammengefasst sind. Für die Beurteilung der gemessenen Emissionen sind in Tabelle 7 die Emissionsgrenzwerte für Stroh und strohähnliche Brennstoffe sowie sonstige nachwachsende Rohstoffe gemäß 1. BImSchV sowie nach Nr. 5.4.1.3 der TA Luft dargestellt.

Tabelle 7: Emissionsgrenzwerte für die Verbrennung von Stroh und strohähnlichen Stoffen sowie sonstigen nachwachsenden Rohstoffen nach 1. BImSchV §3 Abs.1 Nr. 8 bzw. 13 und TA Luft Nr. 5.4.1.3 /1. BImSchV 2010/ /TA Luft 2002/

Parameter	Einheit	1. BImSchV		TA Luft	
		Stufe 1 (bis 31.12.2014)	Stufe 2 (nach 31.12.2014)	(Nr. 5.4.1.3)	
		(§ 3, Abs.1, Nr. 8, 13)			
Wirkungsbereich		≥ 4 – < 100 kW _{NWL}		0,1 – < 50 MW _{FWL}	
Bezugssauerstoff	[Vol.-%]	13		11	
Staub	[mg/m ³ (i.N.)]	100	20	< 1 MW _{FWL}	50
				≥ 1 MW _{FWL}	20
Kohlenstoffmonoxid	[mg/m ³ (i.N.)]	1000 (250*)	400 (250*)	250	
Organische Stoffe (Gesamt - C)	[mg/m ³ (i.N.)]	-	-	50	
Stickstoffoxide	[mg/m ³ (i.N.)]	600*	500*	< 1 MW _{FWL}	500
				≥ 1 MW _{FWL}	400
Schwefeloxide	[mg/m ³ (i.N.)]	-	-	350	
Chlorwasserstoff	[mg/m ³ (i.N.)]	-	-	30	
Dioxine/Furane	[ng/m ³ (i.N.)]	0,1*		0,1 (Minimierungsgebot)	

*Anforderungen bei der Typenprüfung von Feuerungsanlagen; FWL: Feuerungswärmeleistung; NWL: Nennwärmeleistung

In Tabelle 8 und Tabelle 9 sind die über den Vollastbetrieb der Feuerungsanlage gemittelten Werte mit den entsprechenden maximalen und minimalen Abweichungen aufgelistet. Eine Bewertung der ermittelten Emissionen wird nachfolgend vorgenommen.

Tabelle 8: Viertelstundenmittelwerte im Vergleich, Kessel A

Brennstoff	CO	Gesamt-C	NO _x	HCl	SO ₂	Staub
	mg/m ³ i.N., bez. auf 13 Vol.-% O ₂					
Traubentresterpellets (TT)	1100	4,0	725	0,9	0,3	1030
Mischpellets (70 % TT / 30 % M)	3242	21	546	0,4	0,9	796
Mischpellets (30 % TT / 70 % M)	117	2,7	438	0,6	0,04	300
Miscanthuspellets (M)	30	1,0	234	11	42	117

Tabelle 9: Viertelstundenmittelwerte im Vergleich, Kessel B

Brennstoff	CO	Gesamt-C	NO _x	HCl	SO ₂	Staub*
	mg/m ³ i.N., bez. auf 13 Vol.-% O ₂					
Traubentresterpellets (TT)	888	11	701	3,0	2,0	337
Mischpellets (70 % TT / 30 % M)	234	5,4	556	1,1	0,0	277
Mischpellets (30 % TT / 70 % M)	133	5,0	416	5,6	16	25
Miscanthuspellets (M)	15	2,0	247	0,5	0,0	6,3

* Staubwert nach Elektrofilter

CO- und Gesamt-C-Emission: Da beide Kessel durch Vorversuche auf Basis der CO-Emissionen auf den jeweiligen Versuchsbrennstoff eingeregelt wurden, bilden die Ergebnisse einen optimierten Versuchsbetrieb ab. Sie geben damit Auskunft über die Qualität der Verbrennung und die Möglichkeit der Einregelbarkeit der Kesselanlage und damit deren Eignung für den Brennstoff. Die entsprechenden Mittelwerte der CO-Messung sind in Abbildung 8 dargestellt.

Die höchsten CO-Emissionen liegen in Kessel A mit 3242 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-%) für die Verbrennung der Mischpellets bestehend aus 70 % Traubentrester und 30 % Miscanthus und in Kessel B mit 888 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-%) beim Einsatz der Traubentresterpellets vor, was wiederum auf die Verschlackungsneigung des Brennstoffes und die erschwerte Einstellung des optimalen Brennstoff-Luftverhältnisses zurückgeführt werden kann. Eine deutliche Verbesserung konnte mit zunehmenden Miscanthusanteil bewirkt werden, da eine bessere Einregelung möglich war und beide Kesselanlagen laut Hersteller prinzipiell auch für den Betrieb mit Miscanthuspellets geeignet sind. Entsprechend kann der aktuell geltende Grenzwert der 1. BImSchV (Stufe 1) für Kohlenstoffmonoxid von 1000 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) beim Einsatz von Miscanthus und Mischpellets bestehend aus 30 % Traubentrester und 70 % Miscanthus in beiden Kesselanlagen eingehalten werden. Auch im Hinblick auf die Verschärfung des Grenzwertes in der Stufe 2 der 1. BImSchV ist beim Einsatz dieser Brennstoffe in geeigneten Kesselanlagen kein Handlungsbedarf zu erkennen. Weiterhin wird der Grenzwert beim Einsatz von Mischpellets bestehend aus 70 % Traubentrester und 30 % Miscanthus deutlich unterschritten.

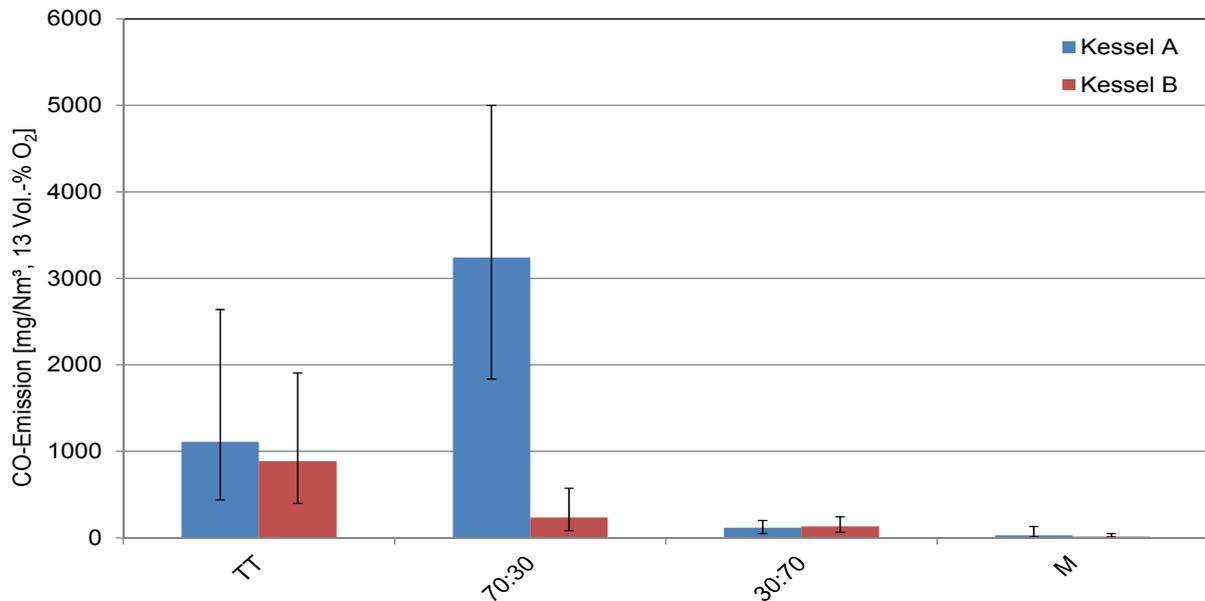


Abbildung 8: Viertelstundenmittelwerte der gasförmigen Emissionen CO

Bei der pyrolytischen Zersetzung von biogenen Festbrennstoffen werden neben Kohlenstoffmonoxid (CO) auch gasförmige Kohlenwasserstoffe freigesetzt, bei deren Oxidation wiederum CO als Zwischenprodukt gebildet wird. Da der oxidative Abbau der Kohlenwasserstoffe wesentlich schneller als die Weiteroxidation des CO abläuft, sind die CO-Emissionen in der Regel eine Größenordnung höher als die Kohlenwasserstoffemissionen. Obwohl hinsichtlich der Umweltrelevanz die Kohlenwasserstoffe bedeutender sind, wird deshalb häufig der relativ einfach und zuverlässig bestimmbare CO-Gehalt der Abgase zur Beurteilung der Ausbrandqualität herangezogen /Kaltschmitt 2009/, /Van Loo 2008/. Aus Abbildung 8 und Abbildung 9 wird deutlich, dass die Freisetzungen an Kohlenwasserstoffen mit sinkender CO-Konzentration stark abnehmen. Unterhalb eines CO-Wertes von 2600 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) für Kessel A und 900 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) für Kessel B sind die Kohlenwasserstoffgehalte bei guten Verbrennungsbedingungen unter 10 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂).

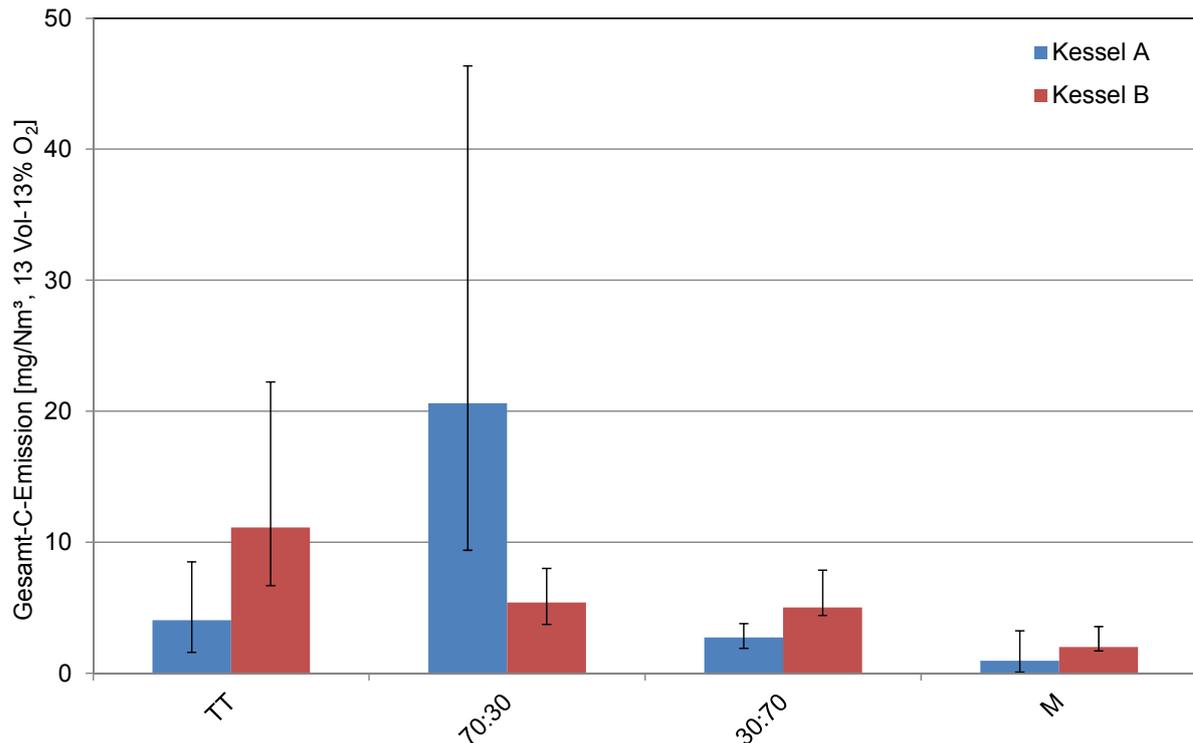


Abbildung 9: Viertelstundenmittelwerte der gasförmigen Emissionen Gesamt-C

NO_x-Emission:

Bei Biomassefeuerungen ist der Stickstoffgehalt des Brennstoffes der wichtigste Parameter für die Stickoxidbildung, die über eine Reihe von Radikalen abläuft /Kaltschmitt 2009/, /Launhardt 2000/, /Oberberger 2006/. Der für die Typenprüfung von Kesselanlagen festgelegte Grenzwert von 600 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) wird beim Einsatz der Traubentresterpellets um mindestens 100 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) überschritten, siehe Abbildung 10. Hier ist der verhältnismäßig hohe Stickstoffgehalt des Brennstoffs maßgebend, da dieser bei der Verbrennung fast vollständig in die Gasphase übergeht und im vorliegenden Fall relativ viel NO_x gebildet werden kann. Es haben jedoch auch die Feuerungsart und die Anlagenleistung einen deutlichen Einfluss auf die Emissionsbildung. /Hartmann 2004/. Daher sollte bei einer Optimierung des Brennstoffes eine Verringerung des Stickstoffgehaltes einbezogen werden. Bereits der Einsatz von 30 % Miscanthus führt zu einer signifikanten Reduzierung der NO_x-Emissionen um mindestens 20 %, so dass der für die Typenprüfung von Kesselanlagen festgelegte Grenzwert von 600 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) eingehalten werden kann. Des Weiteren sollte bei weiterführenden Verbrennungsversuchen eine Optimierung des Kessels hinsichtlich der NO_x-Emissionen untersucht werden, z.B. durch die Optimierung des Sauerstoffgehaltes im Feuerraum, die Ausbrandqualität der Asche sowie die Homogenisierung des Brennstoffbettes. Je nach Verbrennungsführung kann in der Primärzone ein Großteil des Brennstoffstickstoffs unter reduzierten Bedingungen zu elementarem Stickstoff N₂ umgesetzt werden, z.B. durch eine Abgasrezirkulation oder eine optimierte Luft- und Brennstoffstufung /Launhardt 2000/, /Härdtlein 2004/, /Nussbaumer 1997/, /Zhou 2006/. Mit diesen Schritten wäre eine Einhaltung der aktuell und auch zukünftig geltenden Emissionsgrenzwerte ggf. beim Einsatz von Traubentresterpellets möglich.

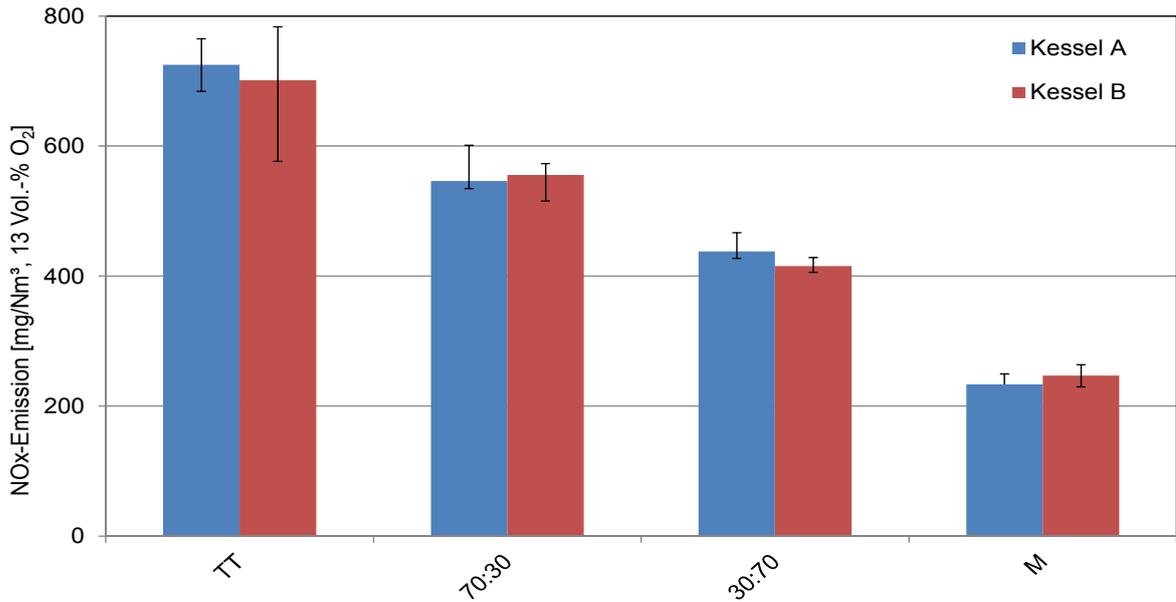


Abbildung 10: Viertelstundenmittelwerte der gasförmigen Emissionen NO_x

Unabhängig vom Verbrennungsprinzip wird der Zusammenhang zwischen Brennstoffstickstoffgehalt und NO_x-Emissionen in der Literatur über logarithmische Funktionen beschrieben, die jedoch kesselabhängig sind /Launhardt 2000/, /Härdtlein 2004/, /Lenz 2008/. Im Unterschied dazu kann im Rahmen der vorliegenden Verbrennungsversuche die Korrelation der Stickstoffgehalte mit den NO_x-Emissionen beider Kesselanlagen durch eine lineare Funktion beschrieben werden, Abbildung 11 bestätigt dies. Die Unterschiede können durch eine erhöhte Feuerraumbelastung sowie variierenden Sauerstoffgehalten im Glutbett bzw. Ausbrandzone hervorgerufen werden /Nussbaumer 1997/ /Zhou 2006/ /Launhardt 2000/.

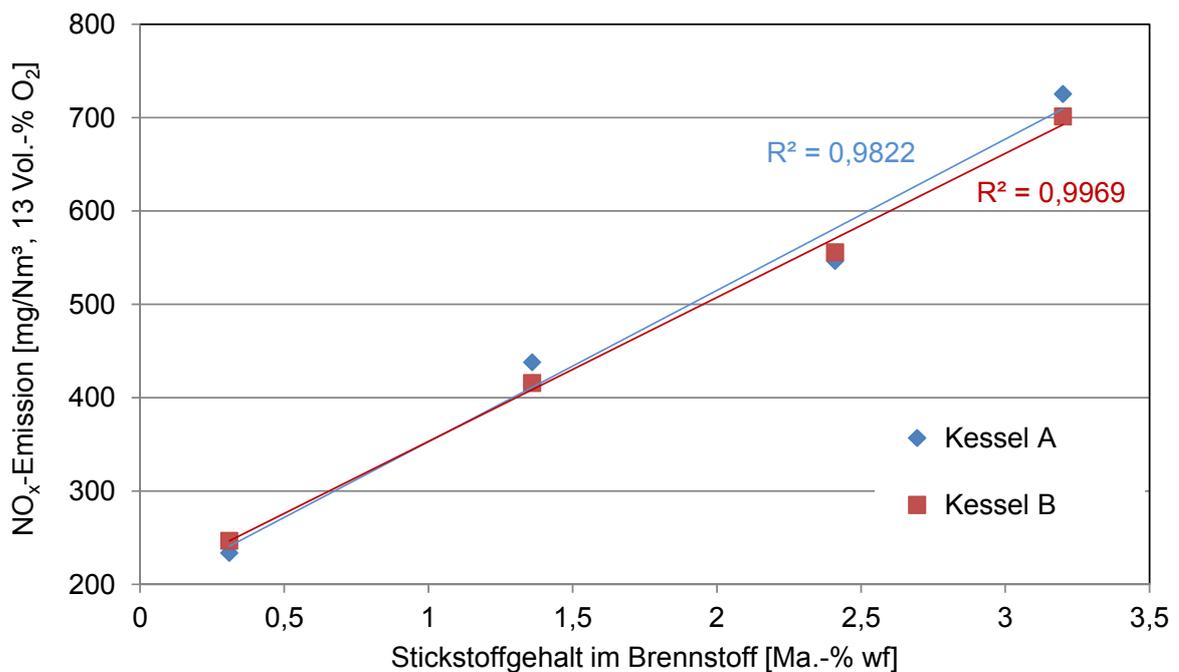


Abbildung 11: NO_x-Emissionen in Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt der untersuchten Brennstoffchargen

SO₂- und HCl – Emissionen: Wesentlich komplexer sind hingegen die Bildungsmechanismen von gasförmigem SO₂ und HCl, die neben dem Schwefel- und Chlorgehalt direkt mit dem Mineralienverhalten im Brennstoff zusammenhängen /Kaltschmitt 2009/, /Oberberger 2006/, /Härdtlein 2004/. Beide Elemente bilden hauptsächlich gasförmige Emissionen (SO₂ und HCl) sowie Alkali- oder Erdalkalichloride bzw. -sulfate, die als Feinstaub emittiert werden oder in der Asche verbleiben. Untersuchungen mit Stroh zeigen z.B. relativ geringe Einbindungsraten von 40 – 55 % des Schwefels in der Asche.

Bezüglich der SO₂- und HCl- Emissionen werden in der 1. BImSchV für den Betrieb mit nicht holzartigen Brennstoffen keine Grenzwerte angegeben. Die maximal auftretenden SO₂-Emissionen von durchschnittlich 42 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) sind im Vergleich zu anderen Messungen /Härdtlein 2004/ als niedrig einzustufen. Die technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) gibt für Stroh oder ähnliche pflanzliche Rohstoffe bei Anlagen mit einer Feuerwärmeleitung von < 1 MW einen Grenzwert von 280 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) an /TA Luft 2002/. Obwohl der Schwefelgehalt im Brennstoff mit steigendem Anteil an Traubentrester steigt, sinken die gemessenen SO₂ Emissionen. Dies kann u.a. auf einen den deutlich höheren Anteil an Ca im Traubentrester zurückgeführt werden, der bei während der Verbrennung zu einer vermehrten Bildung von CaSO₄ in der Feuerraumasche führen kann /Oberberger 2006/ /Härdtlein 2004/. Weiterhin kann das im Abgas vorhandene SO₂ zu einer vermehrten Sulfatisierung von Alkalichloriden führen. Entsprechend wird dadurch eine Senkung der gasförmigen Emissionen an SO₂ sowie die Einbindung von Schwefel in die Partikel getragenen Emissionen begünstigt /Christensen 1998/ /Glarbourg 2007/. Eine Analyse der Feuerraumasche sowie der Partikelemissionen lässt eine detaillierte Aussage zu diesem Zusammenhang zu.

Auch die HCl-Emissionen sind keinem Grenzwert der 1. BImSchV unterworfen. Aufgrund der korrosiven Wirkung von HCl und dessen Einfluss auf die PCDD/F - Bildung sind sie dennoch von Bedeutung für die Biomasseverbrennung /Launhardt 2000/. Die technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) gibt für Stroh oder ähnliche pflanzliche Rohstoffe bei Anlagen mit einer Feuerwärmeleitung von < 1 MW einen Grenzwert der HCl-Emissionen von 24 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) /TA Luft 2002, Kapitel 5.2.4) an. Die zulässige HCl-Konzentration wurde bei allen Versuchen mit maximal 11 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) im Mittel deutlich unterschritten. Bei den vorliegenden Pellets ist aufgrund des Schwefel- und Chlorgehaltes und den damit verbundenen SO₂- bzw. HCl-Emissionen ein nicht vernachlässigbares Korrosionsrisiko zu verzeichnen /Kaltschmitt 2009/, die jedoch aufgrund konstruktiver Maßnahmen prinzipiell in Griff gehalten werden können.

4.3.2 Staubemissionen

Die Ermittlung der Staubemissionen erfolgte kontinuierlich für Kessel B nach dem eingesetzten Feinstaubfilter anhand der Streulichtmethode. Es wurden Viertelstundenmittelwerte gebildet. Für Kessel A wurden die Gesamtstaubemissionen anhand der VDI 2066 bestimmt.

Der aktuell gültige Grenzwert für Staubemissionen nach der 1. BImSchV von 100 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) wird bei der Verbrennung von Miscanthuspellets und Mischpellets (30/70) in Kessel B mit Abscheider eingehalten. Die ermittelten Staubemissionen beim Einsatz von Miscanthuspellets im Kessel A liegen mit 116,57 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) im Mittel knapp über den aktuell gültigen Grenzwert der 1. BImSchV. Der in Stufe 2 der 1. BImSchV verschärfte Grenzwert der Staubemissionen von 20 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) wird bei der Verbrennung von Miscanthuspellets und Mischpellets

(30/70) in Kessel B mit Abscheider eingehalten bzw. knapp überschritten. Besonders auffallend sind die hohen Staubemissionen bei der Verbrennung der Traubentresterpellets in Kessel A von über 1000 mg/m^3 (i.N., 13 Vol.-% O_2). Maßgeblich hierfür die erhöhten Staubemissionen sind der beim Einsatz von Traubentrester enthaltene Anteil an partikelbildenden Elementen, z.B. K und S. Der Gehalt an aerosolbildenden Elementen im Brennstoff gilt bei einer vollständigen Verbrennung als Haupteinflussgröße auf die Gesamtstaubemission /Oberberger 2006/, /Christensen 1998/ /Glarbourg 2007/. Um diesen Zusammenhang zu analysieren, wurden die Staubemissionen der untersuchten Brennstoffe, auf die jeweilige Summe der Gehalte an aerosolbildenden Stoffen (K, Na, S, Cl, Pb, Zn) aufgetragen.

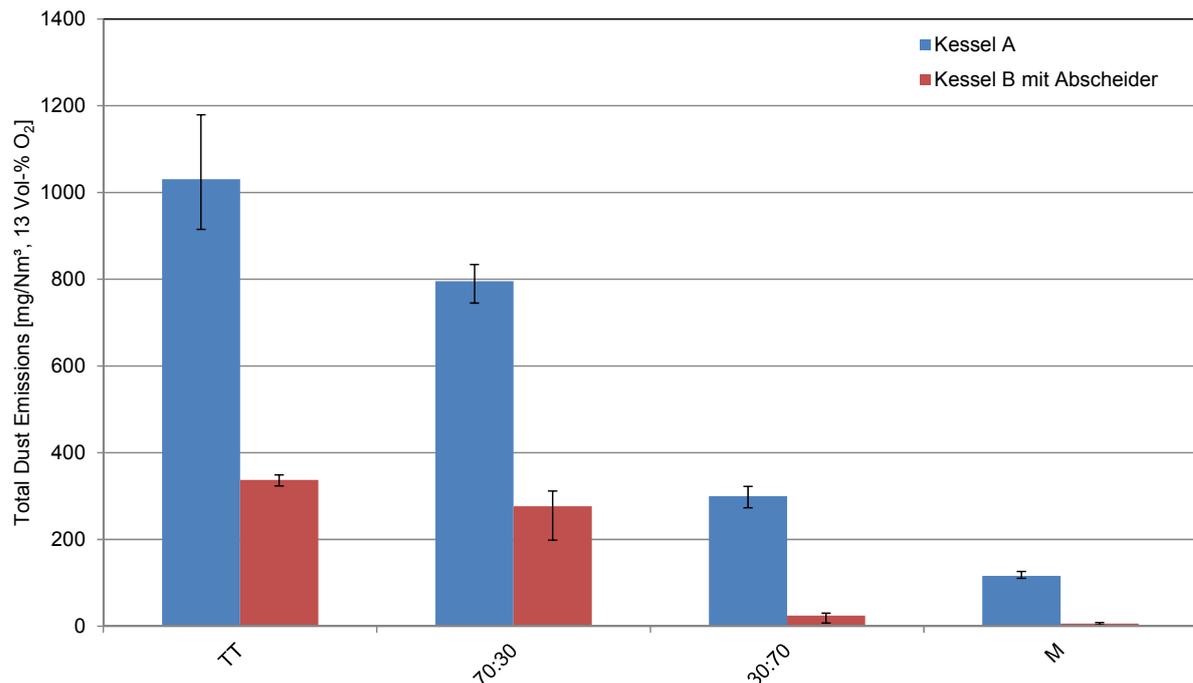


Abbildung 12: Viertelstundenmittelwerte der Gesamtstaubemissionen bei der Verbrennung von Gärrest- und Mischpellets

Anhand von Abbildung 13 ist ein eindeutiger Zusammenhang zu erkennen, der durch das Bestimmtheitsmaß von 0,98 bestätigt wird. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit kann bei einer annähernd vollständigen Verbrennung in beiden Kesselanlagen und einem Einsatz von Brennstoffen mit einem Gesamtgehalt an K, Na, S, Cl, Pb, Zn $< 0,5 \text{ Ma.-% (wf)}$ der derzeit gültige Grenzwert der 1. BImSchV von 100 mg/m^3 (i.N., 13 Vol.-%) für Halmgüter eingehalten werden.

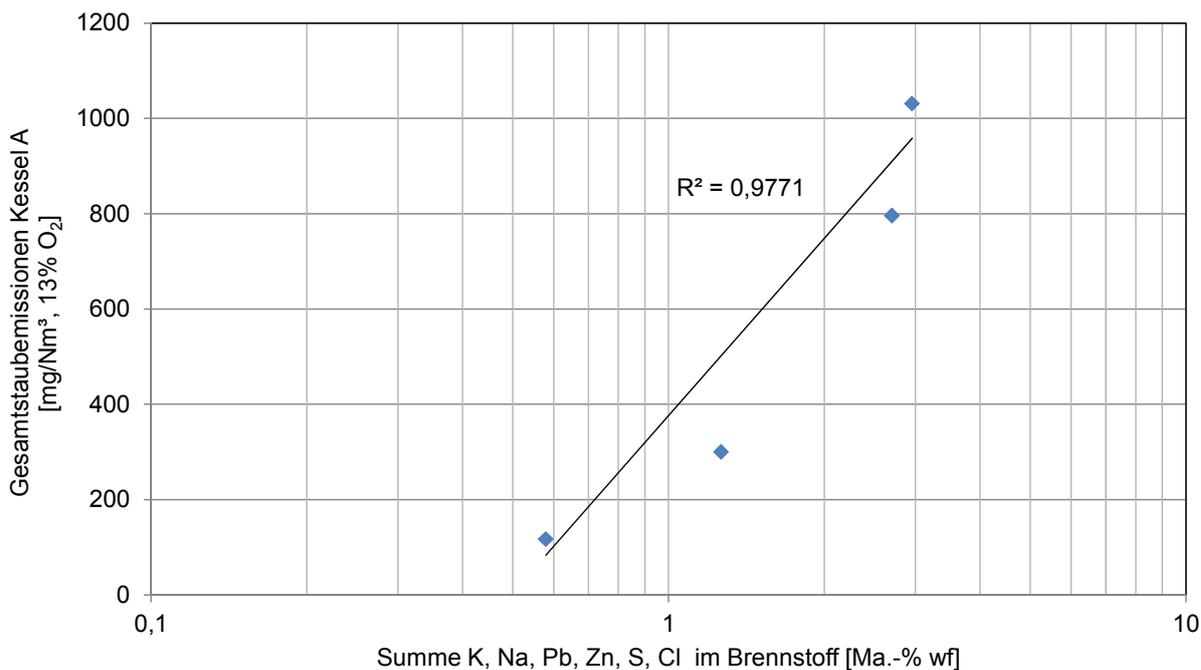


Abbildung 13: Mittelwerte der Staubemissionen in Abhängigkeit von der Summe aerosolbildender Elemente K, Na, Zn, Pb, S, Cl im Brennstoff

Insgesamt lässt sich durch eine Erhöhung des Miscanthusanteils in den Mischpellets der Gehalt staubkritischer Elemente im Brennstoff signifikant senken und somit lassen sich vor allem die Staubemissionen deutlich reduzieren, wobei für die Einhaltung des aktuell gültigen Grenzwertes der Einsatz eines Staubabscheiders notwendig zu sein scheint. Tendenziell liegen die Partikelemissionen aus der Verbrennung von an Miscanthuspellets im Bereich der von anderen Autoren gemessenen Werte /Härdtlein 2004/, /Lenz 2008/, /Weller 2011/ /Weller 2010/, /Kiesewalter 2008/, /Verma 2012/, /Hartmann 2007/, /Zeng 2010/.

4.3.3 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass eine optimale Abstimmung der verwendeten Pelletier- und Feuerungsanlagentechnik mit geeigneten Staubabscheidertechnologien entscheidend für einen betriebssicheren und emissionsarmen Betrieb sind. Bestimmte Brennstoffeigenschaften wie z.B. Aschegehalt und Konzentrationen kritischer Inhaltsstoffe können durch das Mischen von Rohmaterialien positiv beeinflusst werden. Durch die Einhaltung vorgegebener Grenzwerte der europäischen Produktnorm für die Elemente N, S und Cl können erhöhte Emissionen an schädlichen Abgasbestandteilen beim Einsatz geeigneter Feuerungsanlagentechnik vermieden werden. Zudem sollte der Summenwert für K, Na, S, Cl, Pb, Zn möglichst gering sein, um auftretende Staubemissionen möglichst gering zu halten. Eine weitere Reduzierung der Staubemissionen kann durch den Einsatz geeigneter Staubabscheidertechnologien erzielt werden.

5 Konzept zu prüftechnischen Anforderungen zum Nachweis der Einsatzfähigkeit alternativer Brennstoffe des §3 Abs.1, Nr. 13 der 1.BImSchV

5.1 Zielstellung

Seit dem 22. März 2010 gilt die novellierte Fassung der Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen. Die wichtigsten Änderungen der 1.BImSchV betreffen Biomassefeuerungen. Die Verordnung enthält eine Liste mit den Brennstoffen, die in einer Kleinf Feuerungsanlage zulässig sind. Unter den festen Brennstoffen sind neben Braun- und Steinkohleprodukten, naturbelassenes Holz in Form von Holzscheiten, Holzbriketts und Pellets erlaubt. Neu in der Brennstoffliste der 1.BImSchV sind nicht als Lebensmittel bestimmtes Getreide und Reststoffe wie Getreidebruchkörner oder Getreidespelzen. Für diese Anlagen gelten allerdings bestimmte Anforderungen: sie müssen auf dem Prüfstand nachweisen, dass sie neu festgelegte Grenzwerte für Dioxine und Furane sowie für Stickoxide einhalten. Neu ist außerdem, dass weitere Biobrennstoffe nach §3 Abs. 1 Nr.13 zugelassen werden können. In der 1.BImSchV sind viele Regelungen und Vorgaben bzgl. des Einsatzes von Regelbrennstoffen nach §3 Abs. 1 Nr.13 nicht konkretisiert, u.a. Einhaltung von Qualitätsanforderungen für die eingesetzten Brennstoffe und Erfüllung eines Messprogrammes. Zum Nachweis der Einsatzfähigkeit dieses lokal verfügbaren Brennstoffes sind die Rahmenbedingungen in der Verordnung nicht ausreichend beschrieben und müssen deshalb präzisiert werden. Dies führte bisher zu einer starken Verunsicherung am Markt. Entsprechend ist der Einsatz dieser Brennstoffe schwierig. Hierbei stehen folgende Problemfelder im Mittelpunkt:

- Einordnung von Einsatzstoffen unter §3 Abs. 1 Nr.13 als „sonstige nachwachsende Rohstoffe“
- Anforderungen und Konsequenzen beim Einsatz von Brennstoffen mit genormten Qualitätsanforderungen
- Anforderungen und Anwendbarkeit des vorgeschriebenen Messprogramms

5.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

5.2.1 1.BImSchV

Die Voraussetzungen für die Zulassung neuer Brennstoffe sind in der 1.BImSchV festgelegt /1.BImSchV 2010/:

Für den Brennstoff müssen genormte Qualitätsanforderungen vorliegen Emissionsgrenzwerte nach Anlage 4 Nr. 2 unter PRÜFBEDINGUNGEN (Anforderungen bei der Typprüfung)

- Dioxine und Furane 0,1 ng/m³
- Stickstoffoxide 0,6 / 0,5 g/m³
- Kohlenstoffmonoxid 0,25 g/m³

In Anlage 4 Nr. 3 sind Angaben zum Messablauf enthalten. Beim Einsatz des Brennstoffes (Einsatz des Brennstoffes im Betrieb) dürfen keine höheren Emissionen an Dioxinen, Furanen und PAK als bei der Verbrennung von Holz auftreten; dies wird durch ein mindestens einjähriges Prüfprogramm festgestellt.

Beim Einsatz des Brennstoffes (Einsatz des Brennstoffes im Betrieb) müssen die Anforderungen nach §5 Abs. 1 eingehalten werden können. – Messprogramm

- Stufe 1 Staub 100 mg/m³ CO 1 g/m³
- Stufe 2 Staub 20 mg/m³ CO 0,4 g/m³

5.2.2 Interpretation der Rahmenbedingungen

Die Rahmenbedingungen für diese Untersuchungen sind in der Verordnung nicht ausreichend beschrieben und müssen deshalb präzisiert werden. Dabei ergeben sich folgende Möglichkeiten.

Interpretation im Rahmen der 1.BImSchV

Die in den Punkten 2-4 genannten Anforderungen sind in unterschiedlichen Prüfungen festzustellen. Die Anforderungen aus Punkt zwei müssen unter Prüfbedingungen eingehalten werden. In der 1.BImSchV werden im Anhang 4 folgende Hinweise zu den Messungen gegeben /1.BImSchV 2010/:

- Die Ermittlung der Emissionen an Kohlenstoffmonoxid erfolgt bei Nennwärmeleistung als Mittelwert über die Abbrandperiode nach den entsprechenden Normen
- Die Staubmessung erfolgt bei Nennwärmeleistung als Halbstundenmittelwert (Messbeginn drei Minuten nach Brennstoffaufgabe) nach VDI 2066 Blatt 1 oder nach einem gleichwertigen Verfahren.
- Die Stickoxide werden nach DIN EN 14792 mit einer Probenahmedauer von einer halben Stunde bei Nennwärmeleistung bestimmt. Es müssen mindestens drei Bestimmungen durchgeführt werden.
- Dioxine und Furane werden nach DIN EN 1948 mit einem sechsstündigen Probenahme bei Nennwärmeleistung bestimmt. Es müssen mindestens drei Bestimmungen durchgeführt werden.

Die Anforderungen aus den Punkten 3 und 4 müssen im Betrieb ermittelt werden. Die Messung „in Betrieb“ oder „Einsatz des Brennstoffe in Betrieb“ wird in Anlage 2 definiert. Es handelt sich um einen ungestörten Dauerbetrieb bei Nennwärmeleistung (oder max. Leistung) bei einer Kesselwassertemperatur von mindestens 60 °C. Bei handbeschickten Feuerungen beginnt die Messung fünf Minuten nach Auflagen der Größten angegebenen Brennstoffmenge.

Somit werden sowohl Prüfstandsmessungen und Messungen im Betrieb im ungestörten Betrieb bei Nennlast durchgeführt. Im Auslegungskatalog zur 1.BImSchV des LAI (Landesausschuss Immissionsschutz) vom 05.08.2011 wird bezüglich dieser Messungen nur ausgeführt, dass als Vergleichsbrennstoff unbehandeltes Holz verwendet werden soll /LAI 2011/.

Interpretation im Rahmen der 17.BImSchV

Die limitierten Schadstoffe werden ebenfalls im Rahmen der 17.BImSchV für Verbrennungs- und Mitverbrennungsanlagen für Abfälle begrenzt und gemessen. Um einen vollständigen Ausbrand zu gewährleisten, muss die Temperatur nach der letzten Verbrennungsluftzuführung mindestens 850 °C (1100 °C bei hohem Halogengehalt im Abfall) betragen. Die Mindestverweilzeit bei diesen Temperaturen muss auch bei ungünstigen Bedingungen zwei Sekunden betragen. Die Zuständigen Behörden können jedoch in begründeten Fällen auch geringere Temperaturen oder Verweilzeiten festlegen /17. BImSchV/.

Neben kontinuierlichen Messungen werden auch Einzelmessungen nach der Errichtung oder wesentlicher Veränderungen an relevanten Anlagenteilen nach einem definierten Messprogramm verlangt. Die Messungen müssen im Zeitraum von 12 Monaten alle zwei Monate an einem Tag stattfinden. Anschließend sind wiederkehrende Messungen in größeren Abständen vorgesehen /17. BImSchV/. Dieses Messprogramm kann als Vorbild für das in der 1.BImSchV geforderte einjährige Messprogramm verwendet werden.

Interpretation im Rahmen der TA Luft

In der ebenfalls auf dem Bundesimmissionsschutzgesetz basierenden TA Luft werden bezüglich ähnlicher Messungen an Großanlagen folgende Aussagen gemacht:

- Einzelmessungen zu den Emissionen werden im ungünstigsten Zustand (höchste Emissionen bei ungestörtem Betrieb) durchgeführt. An zeitlich konstanten Feuerungen werden mindestens drei Einzelmessungen und in jedem Zustand mit schwankenden Betriebsbedingungen eine weitere Messung durchgeführt. Bei schwankenden Emissionen sind mindestens 6 Messungen notwendig.

Es wird deutlich, dass die TA-Luft bei Emissionsmessungen den aus Sicht der Emissionen ungünstigsten Betriebszustand bewertet.

5.3 Bildung von Dioxinen und Furanen

5.3.1 Grundlagen der Bildung von Dioxinen und Furanen

PCDD/F sind thermisch sehr stabile Verbindungen, die dementsprechend in der Umwelt auch nur sehr langsam abgebaut werden. Aufgrund ihrer komplexen Struktur müssen jedoch eine Reihe von Einzelschritten zu ihrer Synthese aus einfachen Kohlenwasserstoffen durchlaufen werden. Als wesentliche Bildungsmechanismen werden in der Literatur die homogene Gasphasenreaktion über Chlorphenole und die heterogene Katalyse an Metalloxid / Metallchloridkontakten zum Beispiel an Wärmeübertragerflächen oder im Abgas suspendierten Feinstaubteilchen genannt. Im Abgas von Kleinfeuerungsanlagen, die mit biogenen Festbrennstoffen betrieben werden, sollten die für eine effektive Bildung von PCDD/F über die Gasphase notwendigen Konzentrationen nicht erreicht werden. Bleibt als Mechanismus vorrangig die heterogene Katalyse über Wärmeübertragerflächen, im Abgas suspendierte Feinstaubpartikel und an Wänden abgelagerte Feinstaubpartikel. Als relevante Reaktionsräume sind hier alle Bereiche im Temperaturfenster 200 °C bis 400 °C zu betrachten. In aller Regel sind die freien verfügbaren Katalysatorsites der limitierende Faktor. Chlor, Sauerstoff und Kohlenstoff können bei realen Feuerungen als im großen Überschuss vorhanden betrachtet werden. Diese Aussage wird gestützt durch Literaturstudien, wonach an Praxisanlagen bei dem weitaus größten Teil der Anlagen keine Korrelation von Brennstoffchlorgehalt und PCDD/F-Bildung gefunden wurde, bei ca. 10 % der Anlagen eine positive und bei ähnlich vielen Anlagen eine negative Korrelation /Rigo 1998/ /Carroll 2003/.

5.3.2 Bildung von Dioxinen und Furanen in Kleinf Feuerungsanlagen

Aufbau der Feuerung

Brennstoffe der Gruppe 13 werden entsprechend §5 (3) 1.BImSchV fast ausschließlich in Kesselanlagen genutzt werden. Eine mögliche Ausnahme wäre ein Pelletofen. Aus diesem Grund werden Einzelraumfeuerungen nicht weiter betrachtet.

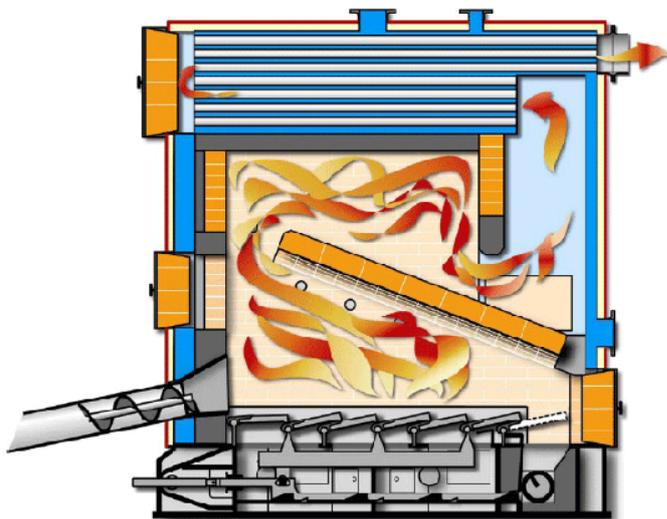


Abbildung 14: Kesselschema (www.binder-gmbh.at)

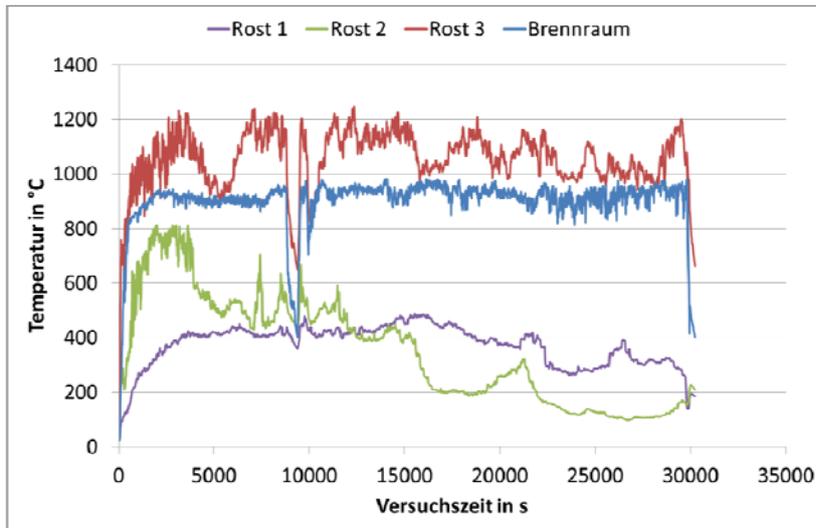
Die Abbildung 14 zeigt den Querschnitt eines Kessels. Der Brennstoff wird durch die Förderschnecke auf das Rost transportiert und verbrennt dort. Die Gase und Flammen werden durch den Brennraum geführt, um einen möglichst vollständigen Ausbrand zu erreichen. Die heißen Abgase werden anschließend durch die Wärmeübertrager geführt, um die Energie an das Kesselwasser abzuführen. Im Folgenden werden die möglichen ablaufenden Prozesse in der Reihenfolge des Strömungsweges dargestellt.

Vorgänge im Brennstoff

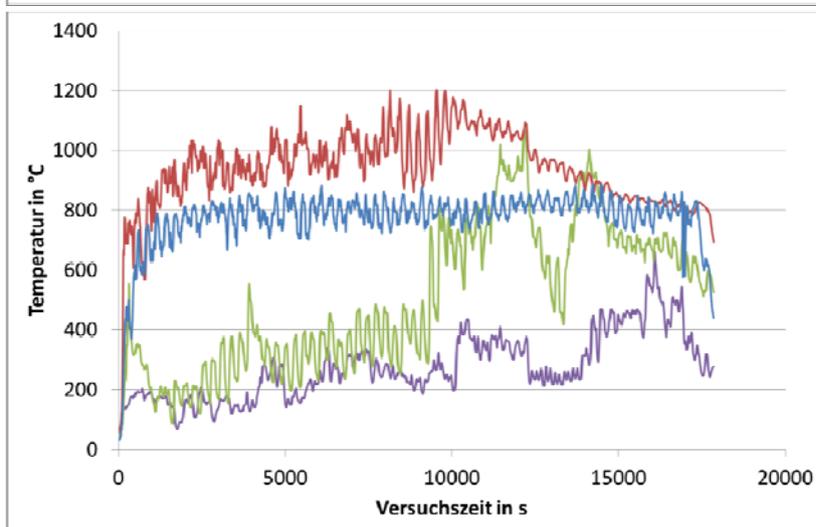
Als Verunreinigungen können Dioxine, Furane und PAK im Brennstoff enthalten sein, sie werden jedoch deutlich unter denen der Abfallverbrennungsanlagen liegen. Eine Neubildung während einer rein mechanischen Brennstoffaufbereitung bei Prozesstemperaturen unterhalb von 200°C kann als vernachlässigbar betrachtet werden.

Vorgänge in der Verbrennungszone

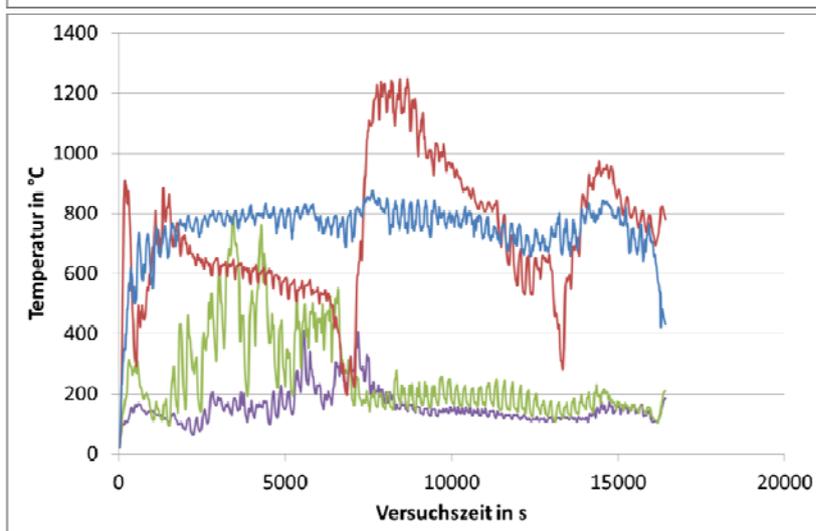
Im Aschebett können in den Randzonen oder bei Schwelbrand bei Temperaturen zwischen 200 °C und 400 °C Dioxine gebildet werden. Die Abbildung 15 zeigt für verschiedene Brennstoffe typische Temperaturen über dem Rost eines modernen Agrarbrennstoffkessels.



Holzpellets



Miscanthus



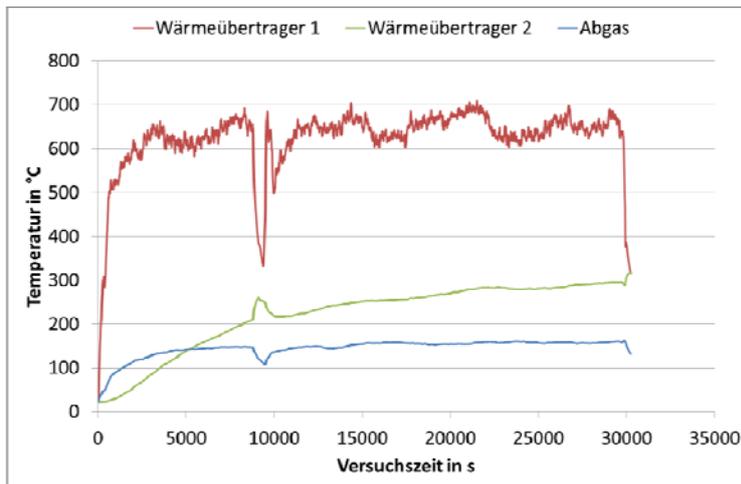
Strohpellets

Abbildung 15: Temperaturen eines Spezialkessels am Rost und im Brennraum bei Volllast /eigene Darstellung/

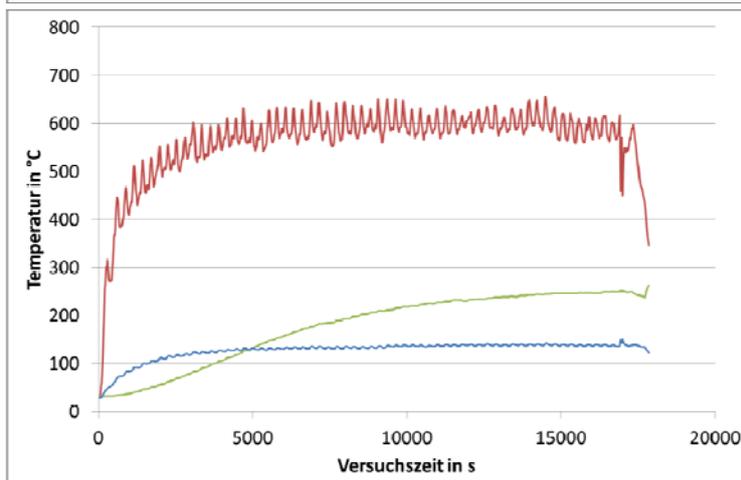
Im Bereich des Rostes herrschen während der Verbrennung Temperaturen, welche die Dioxinbildung ermöglichen. Im nachgeschalteten Brennraum werden bei Temperaturen über 600 °C bei den in Kleinfeuerungsanlagen typischen Luftüberschüssen die Dioxine in der Regel wieder **zerstört** /XXXX/.

Vorgänge in den Wärmeübertragern

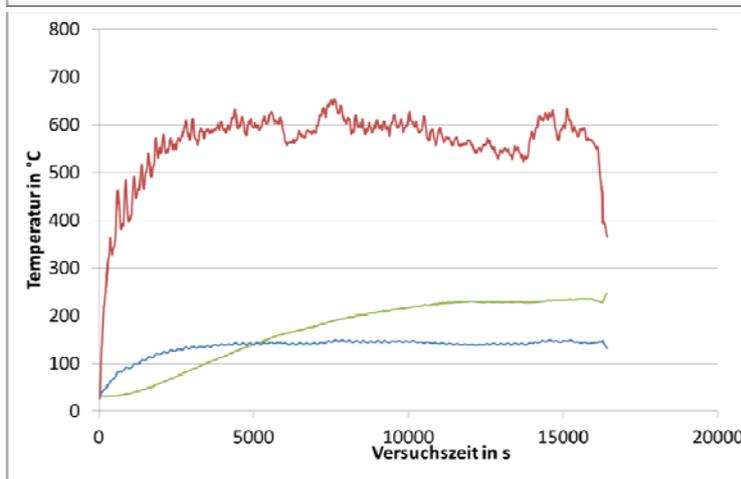
Bei Temperaturen zwischen 300 °C und 600 °C kann bei Anwesenheit von Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Chlor durch Kondensation von Chlorphenolen PCDD/F gebildet werden. Ebenfalls können aufgrund katalytisch unterstützter Reaktionen im Temperaturfenster zwischen 250 °C und 450 °C an Feinstaubpartikeln PCDD/F gebildet werden. Die Abbildung 16 zeigt, dass während der Verbrennung diese Temperaturen in den Wärmeübertragern vorliegen.



Holzpellets



Miscanthus



Strohpellets

Abbildung 16: Temperaturen eines Spezialkessels am Wärmeübertrager bzw. Abgasstutzen bei Volllast /eigene Darstellung/

Vorgänge in der Abgasanlage

Eine Dioxinbildung ist möglich, wenn die Temperaturen über 250 °C liegen. Diese Temperatur ist bei modernen Heizkesseln am Abgasstutzen in der Regel unterschritten. Aufgrund der Bildungsmechanismen kann angenommen werden, dass die Dioxinbildung bei Abgastemperaturen unter 200 °C am Abgasstutzen nur in der Feuerung stattfindet.

Einfluss der Regelung

Die Regelung der Feuerung hat über die Leistungsmodulierung ebenso einen Einfluss auf die Dioxinbildung. Wie aus Abbildung 17 ersichtlich, verändern sich die Temperaturen im Brennraum. Bei Teillastbetrieb werden nur noch Temperaturen erreicht, welche einen Abbau von im Aschebett gebildetem Dioxin nicht sicherstellen können. Weiterhin verlängert sich bei dem betrachteten Kessel die Verweilzeit des Abgases im kritischen Temperaturbereich in den Wärmeübertragern von 1,5 s bei Volllast auf 2 s bei 30 % Kesselleistung.

Reaktorlänge	Kesselleistung		
	30%	70%	100%
2	750	1030	1086
50	740	1023	1084
60	674	930	969
80	406	627	734
85	370	556	612
95	341	522	595
130	250	307	368
154	305	513	588
180	237	432	493
223	192	424	503
284	90	210	270
333	75	146	173

Abbildung 17: Temperaturen in einem Spezialkessels bei Leistungsmodulierung. (rot - Bereich möglicher Dioxinbildung; grün - Bereich des Dioxinabbaus; gelb - Bereich möglichen Dioxinabbaus) /eigene Darstellung/

Zusammenfassung

Die für eine Bildung von PCDD/F und PAK notwendigen Komponenten liegen in fast allen Phasen der Verbrennung von Biomasse vor. Dabei ist es unerheblich, welcher Brennstoff (Holz, Agrarbrennstoffe) zum Einsatz kommt. Im Regelfall reicht der Chlorgehalt Raumluft bei quantitativem Umsatz zu PCDD/F für eine Grenzwertüberschreitung. Vielmehr wird die Dioxinbildung von Randbedingungen wie den Temperaturen in bestimmten Bereichen der Feuerung beeinflusst. Auf diese hat jedoch vorrangig die Eignung der Feuerung für einen bestimmten Brennstoff und Regelungsparameter einen Einfluss. Ganz wesentlich ist die Verfügbarkeit von katalytisch aktiven Oberflächen. Die Bildung bzw. Vergiftung dieser Oberflächen sind eine sehr komplexe Funktion u.a. der Feinstaubzusammensetzung, Feinstaubmorphologie und Korrosion von Kesselflächen. Die Brennstoffzusammensetzung und ihre Aufbereitungsform beeinflusst über oben genannte Einflüsse die PCDD/F-Bildung. Eine reine Betrachtung des Chlorgehalts ist wenig zielführend, der Gehalt an Schwer- und Buntmetallen könnte z.B. viel wichtiger sein.

5.4 Überlegungen zum Messprogramm

5.4.1 Prüfstandsmessung vs. Messung im Betrieb

Die in Kapitel 5.2.1 genannten Anforderungen sind in unterschiedlichen Prüfungen festzustellen. Die Anforderungen aus Punkt zwei müssen unter Prüfbedingungen eingehalten werden. Die Anforderungen aus den Punkten 3 und 4 müssen im Betrieb ermittelt werden.

Die Messung „in Betrieb“ oder „Einsatz des Brennstoffes in Betrieb“ wird in Anlage 2 zur 1.BImSchV³ definiert. Es handelt sich um einen ungestörten Dauerbetrieb bei Nennwärmeleistung (oder max. Leistung) bei einer Kesselwassertemperatur von mindestens 60 °C. Somit schließt „im Betrieb“ auch eine Prüfstandsmessung oder Typenprüfung ein. Prüfstandsmessungen finden unter aufgrund von theoretischen Überlegungen festgelegten Rahmenbedingungen statt. Häufig wird versucht Bedingungen zu schaffen, welche für eine bestimmte Anwendung repräsentativ sowie reproduzierbar sind. Bei Feldmessungen an „realen“ Anlagen werden die Rahmenbedingungen häufig von baulichen Bedingungen oder Umwelteinflüssen bestimmt. Eine Reproduzierbarkeit ist deshalb meist nicht gegeben.

Aufgrund der Interessenlagen repräsentieren die 1.BImSchV Messungen „im Betrieb“ nicht die im Normalbetrieb (Regelbetrieb) auftretenden Emissionen. Der Kunde ist bestrebt, niedrige Emissionswerte zu erreichen, um die Grenzwerte sicher einhalten zu können. Der Gesetzgeber möchte die Vergleichbarkeit der Messergebnisse sicherstellen und legt Rahmenbedingungen fest, welche möglichst von allen betroffenen Anlagen eingehalten bzw. erfüllt werden können. Ausgehend von dieser Lage werden die Feldmessungen häufig unter folgenden Bedingungen durchgeführt (Tabelle 10 und Tabelle 11):

Tabelle 10: Randbedingungen und deren Auswirkungen abgeleitet aus der 1.BImSchV

Parameter	Zielwert	Auswirkung
Leistungsmodulation	ungestörter Dauerbetrieb	Keine An- und Abfahrprozesse Kein Teillastbetrieb ⁴
Kesseltemperatur	min. 60 °C	Keine An- und Abfahrprozesse

Tabelle 11: Randbedingungen und deren Auswirkung abgeleitet aus den Interessen des Betreibers

Parameter	Zielwert	Auswirkung
Anlagenzustand	gereinigt gewartet (repariert)	wenig Aussagen zur Störanfälligkeit
Brennstoff	optimaler Brennstoff	wenig Aussagen zum realen Betrieb
Nutzereinfluss	Betrieb nach Anleitung	wenig Aussagen zum realen Betrieb

Somit werden bei Feldmessungen hauptsächlich die Auswirkungen der baulichen Gegebenheiten und der Anlagenalterung erfasst. Da im vorliegenden Fall die Messung an einer durch den Hersteller empfohlenen Anlage stattfindet, werden voraussichtlich eine neue Feuerung und optimale bauliche Bedingungen vorliegen.

³ 1. BImSchV Anlage 2

⁴ Außer bei Anlagen ohne Pufferspeichers

5.4.2 Vergleichsmessungen zwischen Holz und Gruppe 13 Brennstoffe

Für einen Vergleich der Emissionen müssen Messverfahren und deren Randbedingungen festgelegt, sowie Vergleichswerte definiert werden. Die bisher für die Emissionsmessungen an Kleinfeuerungsanlagen zugrunde gelegten Verfahren und vor allem deren Randbedingungen ergeben Aussagen zu den unter optimalen Bedingungen erreichbaren Emissionen. Die Aussagekraft dieser Kennwert kann durch die Nutzung von z.B. realistischeren Lastgängen verbessert werden. Trotzdem werden die Ergebnisse immer ein Optimum unter den vorgegebenen Rahmenbedingungen darstellen.

Bezüglich der Frage, welche Emissionswerte für einen Vergleich herangezogen werden, macht die 1.BImSchV keine Aussagen. Für die Bereitstellung dieser Vergleichswerte gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, welche jedoch alle deutlich Vor- und Nachteile aufweisen.

Tabelle 12: Mögliche Vergleichswerte

	Vergleich an der gleichen Feuerung	Vergleich mit erhobenen Durchschnittswerten
Vorteile	Verminderung des Messaufwandes (Rüstzeit) konkreter Bezug	In Vorfeld bekannte Vergleichswerte Werte nicht vom Hersteller beeinflussbar
Nachteile	Hersteller kann das „Holzprogramm“ der Feuerung so gestalten, dass die geltenden Grenzwerte eingehalten werden, jedoch keine unnötigen Hürden für die Vergleiche auftreten. => Vergleichswert wird sich dem Grenzwert annähern Der Vergleichswert ist nicht repräsentativ für alle Holzfeuerungen	Umfangreiche Messungen vor der ersten Zulassung notwendig durch technische Weiterentwicklungen müssen die Werte ständig aktualisiert werden

Eine weitere Möglichkeit, welche jedoch nicht dem Wortlaut der 1.BImSchV folgt, ist der Vergleich mit Grenzwerten. Diese stehen für Dioxine, Furane, NO_x und Staub zur Verfügung. Für PAK sind in der 1.BImSchV keine Grenzwerte definiert.

5.4.3 Festlegungen zu den Messverfahren

Dioxine und Furane

Das Standardverfahren wird in DIN EN 1948 beschrieben. Ein Teilstrom des Abgases wird isokinetisch (ggf. als Netzmessung) abgesaugt, herabgekühlt und durch eine Waschflasche mit organischem Lösungsmittel und anschließender Adsorbensstufe mit Planfilter geleitet. Alle das Gas berührenden Teile sind inert (aus Titan oder Glas gefertigt). Die Probenahmezeit für eine Messung beträgt ca. 6 Stunden. Die Vor- und Nachbereitung der Proben muss in einem speziell ausgerüsteten Labor erfolgen und ist langwierig. So müssen z.B. Waschflasche und Planfilter mit einem markierten Standard versetzt werden, um nach der Messung die Qualität berücksichtigen zu können. Am Messort ähneln der Aufbau und die notwendigen Randbedingungen denen der Staubmessung nach VDI 2066-1. Zusätzlich werden mindestens Kühler, Waschflasche und Adsorbensstufe benötigt. Eine ausreichende Versorgung mit Kühlwasser sollte zur Verfügung stehen.



Abbildung 18: Aufbau zur Dioxin- / Furanmessung [Werksbild Paul Gothe GmbH Bochum, www.paulgothe.de]

PAK

Das Standardverfahren beschreibt VDI 3874. Ein Abgasteilstrom wird isokinetisch abgesaugt, auskondensiert und über ein Adsorptionsmittel geleitet. Als Adsorptionsmittel wird XAD-2-Harz verwendet. Analog zur Dioxinmessung müssen alle gasberührten Teile inert sein. Die Probenahmezeit für eine Messung beträgt 30 Minuten.

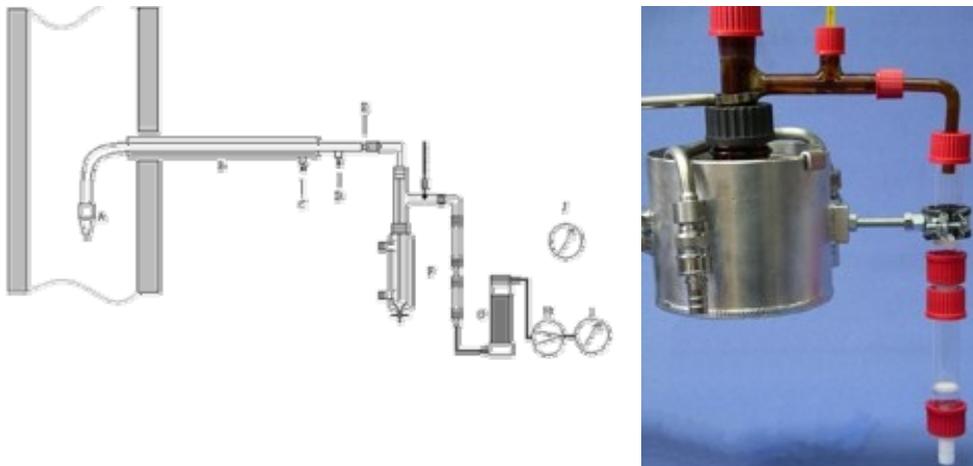


Abbildung 19: Aufbau zur PAK-Messung [Werksbild Paul Gothe GmbH Bochum, www.paulgothe.de]

Auch eine PAK-Messung erfordert eine aufwendige Probennachbereitung im Labor. An der Anlage gleicht der Aufbau in etwas dem der Dioxinmessung nach DIN EN 1948. Ebenso ist ausreichend Kühlwasser notwendig.

Gesamtstaub

Das deutsche Referenzverfahren für gravimetrische Staubmessungen beschreibt VDI 2066-1 welches für geringe Staubkonzentrationen gleich mit der EN 13284-1 ist. Für dieses Verfahren wird ein Teilstrom isokinetisch (ggf. in einer Netzmessung) abgesaugt und über einen Filter geleitet. Die gravimetrische Staubmessung benötigt eine Vor- und Nachbehandlung der Filter im Labor.

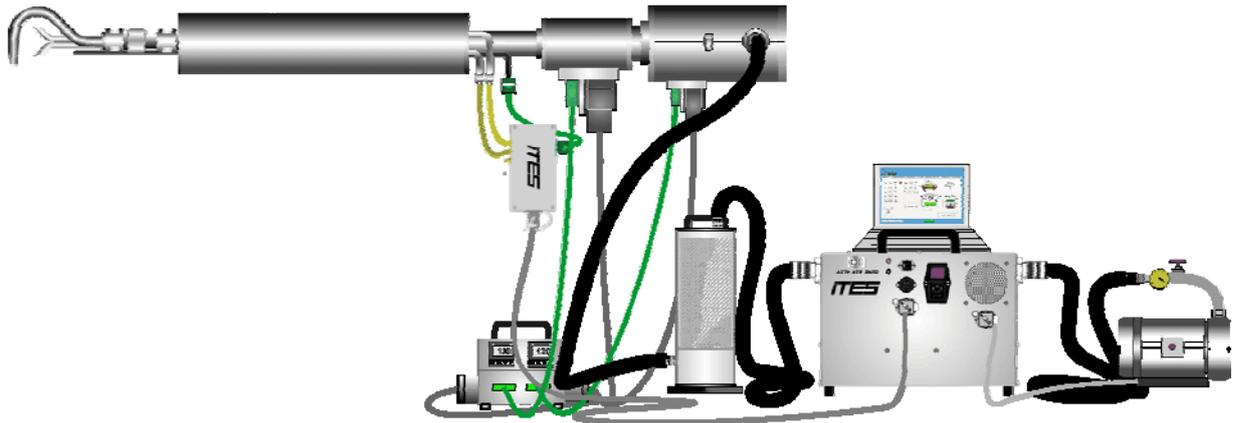


Abbildung 20: Aufbau zur gravimetrischen Gesamtstaubmessung [Werkbild Paul Gothe GmbH Bochum, www.paulgothe.de]

Die VDI 2066-1 definiert eine Reihe von Randbedingungen, welche sinngemäß auch für die PAK- und PCDD/F-Messung gelten /VDI 2006/:

- Möglichst vertikale Abgasleitungsführung
- Strömungsprofil an der Messstelle ohne Drall und Rückströmung
- Winkel zwischen dem Gasstrom und der Mittelachse des Abgaskanals kleiner 15°
- Vorhandensein einer Mindestgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom verwendeten Messverfahren zur Bestimmung des Volumenstroms (für Staudrucksonden ein Differenzdruck größer 5 Pa)
- Verhältnis der höchsten zur niedrigsten örtlichen Gasgeschwindigkeit kleiner 3:1

Diese Bedingungen werden meist erfüllt, wenn vor und nach der Messstelle eine Ein- bzw. Ausströmstrecke in der Länge des fünffachen hydraulischen Durchmessers der Abgasleitung. Für größere Anlagenleistungen wird eine Netzmessung notwendig sein, da der Durchmesser der Abgasleitung nicht kleiner 0,35 m beträgt. Für diesen Fall müssen an der Messstelle zwei Messachsen vorhanden sein. Auf eine Messung in einem rechteckigen Querschnitt sollte verzichtet werden, da dort die Netzmessung aufwendiger ist.

Randbedingungen / Betriebsparameter

Für alle genannten Verfahren werden weitere Randbedingungen benötigt, Je nach eingesetzter Messtechnik werden diese stichprobenhaft oder kontinuierlich eingesetzt. Die Wichtigsten sind:

- Abgastemperatur
- Abgasfeuchte
- Strömungsgeschwindigkeit / Volumenstrom
- statischer Druck
- Luftdruck am Messplatz
- Sauerstoffgehalt im Abgas

Es wird insbesondere bei schwankenden Verbrennungsbedingungen eine kontinuierliche Aufzeichnung empfohlen. Für die Bewertung der Verbrennungsqualität hat sich die Aufzeichnung und Analyse der CO-Gehaltes im Abgas bewährt.

Kombinierbarkeit der Verfahren

Eine simultane Erfassung aller genannten Emissionen bedeutet einen sehr großen apparativen Aufwand und benötigt eine sehr lange Messstrecke, da zwischen den einzelnen Messstellen ausreichende Abstände liegen müssen (im Idealfall jeweils der fünffache hydraulische Durchmesser). Aufgrund der unterschiedlichen Probenahmezeiten kann es bei ungünstiger Anordnung der Messstellen zu einer gegenseitigen Beeinflussung kommen. Weiterhin kann ein Öffnen des Abgaskanals zum Zweck der Entnahme von Messsonden Rückwirkungen auf die Feuerung haben. Wahrscheinlicher ist eine serielle Messung der einzelnen Komponenten, wobei für diesen Fall eine Messstrecke mit einer (bei Netzmessungen zwei) Öffnungen für die Teilstromentnahmesonde sowie weiter Öffnungen zur Bestimmung der Randbestimmungen / Betriebsparameter benötigt wird.

5.4.4 Vorschlag für ein Messprogramm

Auswahl des Prüfbrennstoffes

Auf europäischer Ebene werden derzeit Produktstandards für nicht-holzartige Brennstoffe entwickelt (prEN 14961-6). Die Veröffentlichung der Produktstandards wird voraussichtlich bis Ende 2011 erfolgen. Das Ziel dieser Europäischen Norm besteht in der Bereitstellung von eindeutigen und klaren Klassifizierungsprinzipien für feste Biobrennstoffe und somit eines Arbeitsmittels, das einen effizienten Handel mit Biobrennstoffen und eine einfache Verständigung zwischen Verkäufer und Kunden ermöglicht, sowie eines Arbeitsmittels zur Verständigung mit Geräteherstellern. Diese Norm erleichtert auch genehmigungspflichtige Verfahren und die Berichterstattung. Diese Europäische Norm wurde erstellt, um die Verwendung von nicht-holzartigen Pellets im nicht industriellen Bereich und besonders den Markt in den Haushalten der Endverbraucher und kleineren gewerblichen Heizkesselanlagen zu unterstützen, wo die Empfindlichkeit gegenüber der Brennstoffqualität zu größeren Problemen führen kann. Die Europäische Norm prEN 14961-6 umfasst nur nicht-holzartige Pellets, die aus folgenden Rohmaterialien hergestellt wurden (siehe EN 14961-1, Tabelle 1):

- Halmgutartige Biomasse die von Pflanzen mit einem nicht-holzartigen Stängel stammt, die am Ende der Wachstumssaison absterben. Dazu gehören Getreide- oder Saatgutpflanzen aus der Lebensmittel verarbeitenden Industrie und deren Nebenprodukte, wie z. B. Getreidestroh.
- Biomasse von Früchten;
- Definierte und undefinierte Mischungen von Biomasse, d.h. definierte und undefinierte Mischungen aus den auf der Herkunft beruhenden Hauptgruppen fester Biobrennstoffe holzartige Biomasse, halmgutartige Biomasse und Biomasse von Früchten.

Definierte Mischungen sind absichtlich gemischte Biobrennstoffe, während undefinierte Mischungen unabsichtlich gemischte Biobrennstoffe sind. Die Herkunft der definierten und undefinierten Mischungen ist unter Anwendung von EN 14961-1 zu beschreiben. Für Brennstoffe nach prEN 14961-6 konkrete normative und informative Anforderungen in den Klassen A und B festgelegt.

Anforderungen der prEN 14961-6 können als Grundlage für einen Prüfbrennstoff verwendet werden. Bei der Einführung eines regional verfügbaren Brennstoffes (z.B. auf Landesebene) ist eine genaue Definition geeigneter Prüfbrennstoffe in Zusammenarbeit mit der zuständigen Genehmigungsbehörde unerlässlich. Die Anforderungen der prEN 14961-6 markieren jedoch Obergrenzen für die Brennstoffeigenschaften. Im Rahmen einer Kesselprüfung können Prüfbrennstoffe, deren Brennstoffeigenschaften

deutlich unterhalb der festgelegten Grenzwerte liegen, einen angemessenen Nachweis zur Einhaltung von Emissionsgrenzwerten verhindern. Entsprechend ist beim Einsatz überregionaler Brennstoffe (z.B. auf nationaler Ebene) eine Definition von wenigen repräsentativen Prüfbrennstoffen denkbar, die in einer Positivliste aufgelistet sind.

Vorschlag 1: Umfassende Prüfstandsmessungen mit anschließenden Langzeit-Feldversuch

Dieser Vorschlag zielt nicht auf die unter Prüfbedingungen zu ermittelnden Kennwerte sondern auf einen Vergleich mit anderen Brennstoffen ab. Das Programm kann nur angewendet werden, wenn eine Dioxinbildung nach der Feuerung ausgeschlossen werden kann. Als Indiz hierfür wird eine maximale Abgastemperatur von 200 °C am Abgasstutzen der Feuerung festgelegt.

Das Programm setzt sich aus zwei Phasen zusammen. In einer ersten Phase werden unter festgelegten Randbedingungen die Emissionen an einem Prüfstand bestimmt. Die zweite Phase besteht aus einem Langzeitversuch (Feldversuch) in dem festgestellt wird, ob die Feuerung mit dem zu prüfenden Brennstoff die ermittelten Emissionswerte dauerhaft erreichen wird.

Das Messprogramm läuft in folgenden Schritten ab.

- Festlegung des zugrundeliegenden Lastverlaufes
- Ermittlung der Emissionen von Holz
- Ermittlung der Emissionen des zuzulassenden Brennstoffs
- Überprüfung der Standzeit der Feuerung

Festlegung des zugrundeliegenden Lastverlaufes

Neben dem Einsatz als einzelstehender Kessel ist dem betrachteten Leistungsbereich auch ein Einsatz als Grundlastkessel in einer Mehrkesselanlage denkbar. Um dem Rechnung zu tragen, sollten zwei Lastprofile zur Auswahl stehen.

Ermittlung der Emissionen von Holz

Zu Beginn wird der Kessel ausgehend von einem gewarteten Zustand mit dem festgelegten Lastprofil und dem Holzbrennstoff mindestens 2 Woche betrieben. Anschließend erfolgt die Messung, wobei für jede Messung das komplette Lastprofil oder ein definierter Bereich abgefahren wird. In jedem Fall muss das gesamte Lastprofil zur Bewertung herangezogen werden. Es müssen analog zu den Anforderungen der 1.BImSchV mindestens drei Messungen durchgeführt werden.

Ermittlung der Emissionen des zuzulassenden Brennstoffs

Nach der Reinigung wird der Kessel mit dem festgelegten Lastprofil und dem zuzulassenden Brennstoff für mindestens zwei Wochen betrieben, um einem für den Regelbetrieb repräsentativen Reinigungszustand der Feuerung zu erhalten. Anschließend beginnt die Phase der Messung, wobei auch hier für jede Messung das komplette Lastprofil oder ein definierter Bereich abgefahren wird. Es müssen mindestens drei Messungen durchgeführt werden. Steigt der Dioxingehalt mit der Zeit an, wird der Kessel weiterbetrieben und die Messung zu einem späteren Zeitpunkt wiederholt.

Überprüfung der Standzeit der Feuerung

Werden die Dioxingrenzwerte eingehalten, wird die Feuerung in einem Langzeitversuch mit mindestens 250 Betriebstagen getestet. Der Langzeitversuch erfolgt unter Federführung einer geeigneten unabhängigen Prüf- oder Forschungseinrichtung. Im Zeitraum des Langzeitversuches wird die Anlage mit dem zu prüfenden Brennstoff streng nach Herstellerangaben betrieben. Alle Handlungen an der Feuerung werden protokolliert. Auftretende Ausfälle oder notwendige Eingriffe werden hinsichtlich der Einflussfaktoren der Dioxinbildung und PAK-bildung (insbesondere Abgasströme und Temperaturen im Brennraum, an den Wärmeübertragerflächen und am Abgasstutzen) bewertet. Wurden keine relevanten Störungen festgestellt, oder wird anlagenseitig sichergestellt, dass die Feuerung mit dieser Störung nicht betrieben werden kann, gilt die Prüfung als bestanden.

Vorschlag 2: Prüfstandsmessung mit anschließender Feldmessung in Anlehnung an die 17.BImSchV

Auch dieses Programm kann nur angewendet werden, wenn eine Dioxinbildung nach der Messstelle ausgeschlossen werden kann. Als Indiz hierfür wird eine maximale Abgastemperatur von 200 °C an der Messstelle festgelegt. In der ersten Phase erfolgen die Prüfstandsmessungen entsprechend der geltenden Regelungen. Zusätzlich sind diesem Rahmen auch die Emissionen von Dioxinen, Furanen und Stickstoffoxiden in jeweils drei Messungen zu bestimmen. Während der Prüfstandsmessungen dürfen die Feuerungseinstellungen nicht manuell verändert werden⁵.

In der zweiten Phase erfolgen die Messungen an einer Praxisanlage mit einer Mindestbetriebszeit von 2000 Vollbenutzungsstunden pro Jahr und monovalentem Betrieb. Diese Messungen werden in einem Zeitraum von 12 Monaten in einem Abstand von zwei Monaten durchgeführt. Die erste Messung erfolgt innerhalb der ersten zwei Monate nach Inbetriebnahme der Feuerung mit dem zu prüfenden Brennstoff. Wird die Anlage in den Sommermonaten nicht betrieben, kann auf eine Messung in den Sommermonaten verzichtet werden. Die Messzeitpunkte sind so zu wählen, dass mindestens zwei Volllastzustände und zwei konstante Teillastzustände (Mindestlast) erfasst werden. Ein Takten der Feuerung ist zu verhindern. Während der Messungen der einzelnen Komponenten muss die Feuerung unter gleichen Randbedingungen betrieben werden. Wird bei einer Messung ein Grenzwert überschritten, kann dieser Messwert durch eine Wiederholungsmessung bei denselben Randbedingungen überprüft werden. Wird der Grenzwert während der Wiederholungsmessung nicht überschritten, wird der erste Messwert gestrichen. Zwischen Erst- und Wiederholungsmessung dürfen keine besonderen Maßnahmen (Reinigung o.ä.) an relevanten Anlagenteilen durchgeführt werden.

5.5 Aufwand und Kosten

5.5.1 Grundlagen

Es sollen folgende Varianten untersucht werden:

1. Ermittlung der Emissionen nach 1.BImSchV ohne weitere Messungen
2. Ermittlung der Emissionen nach 1.BImSchV und Messprogramm Variante 1
3. Ermittlung der Emissionen nach 1.BImSchV und Messprogramm Variante 2

⁵ Dadurch soll verhindert werden, dass vor der Messung jeder Komponente die Feuerung auf den jeweiligen Optimalwert eingestellt wird.

Es werden nur die zusätzlichen Kosten, welche über eine herkömmliche Messung hinausgehen betrachtet. Die Kostensätze orientieren sich an den Tarifen der BLT Wieselburg /BLT 2011/.

5.5.2 Messung nach 1.BImSchV ohne weitere Messung

Inbegriffen sind drei Dioxinmessungen und drei PAK-Messungen durch eine zugelassene Messstelle sowie die Kosten für die Nutzung des Versuchsstandes. Die Messung der Konzentrationen der Stickoxide und des Kohlenmonoxids kann parallel zu den anderen Messungen mit meist in der Prüfstelle vorhandenen Geräten durchgeführt werden. Diese Variante ist die billigste, jedoch sind keine Aussagen über die Emissionen nach einer längeren Betriebszeit möglich.

Tabelle 13 Aufstellung zu Variante 1

Titel	Anzahl	Einzelpreis	Gesamtpreis	Zeit
Dioxinmessung	3	1700 €	5100 €	3 d
PAK-Messung	3	800 €	2400 €	1 d
Prüfstandsnutzung	30 h	78 €	2340 €	(5 d)
Bericht	1 d	700 €	700 €	
Summe			10.540 €	5 d

5.5.3 Messung nach Variante 1

Diese Variante stellt einen Kompromiss dar. Die Anzahl der Emissionsmessungen wurde reduziert und durch theoretische Betrachtungen ersetzt. Nicht inbegriffen sind die Vergleichsmessungen für den Brennstoff Holz. Diese würden sich auf ca. 19.000 € belaufen. Die Messung der Konzentrationen der Stickoxide und des Kohlenmonoxids kann parallel zu den anderen Messungen mit meist in der Prüfstelle vorhandenen Geräten durchgeführt werden.

Tabelle 14 Aufstellung zu Variante 2

Titel	Anzahl	Einzelpreis	Gesamtpreis	Zeit
Dioxinmessung	3	1.700 €	5.100 €	3 d
PAK-Messung	3	800 €	2.400 €	1 d
Prüfstandsnutzung	21 d	624 € / d	13.104 €	(21 d)
Bericht	1	700 €	700 €	
Zwischensumme			18.904 €	21 d
Anlagenbetreuung	250 d	31 €	7.750 €	250 d
Wiss. Betreuung	36 d	700 €	5.673 €	
Bericht	5 d	700 €	3.500 €	5 d
Summe			35.827 €	276 d

5.5.4 Messung nach Variante 2

Nicht inbegriffen sind auch hier die Vergleichsmessungen für den Brennstoff Holz. Es wird davon ausgegangen, dass die Messungen an aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt werden und somit keine zusätzlichen Reisekosten anfallen. Die Messung der Konzentrationen der Stickoxide und des Kohlen-

stoffmonoxids kann parallel zu den anderen Messungen mit meist in der Prüfstelle vorhandenen Geräten durchgeführt werden.

Tabelle 15 Aufstellung zu Variante 3

Titel	Anzahl	Einzelpreis	Gesamtpreis	Zeit
Dioxinmessung	3	1700 €	5100 €	3 d
PAK-Messung	3	800 €	2400 €	1 d
Prüfstandsnutzung	30 h	78 €	2340 €	(5 d)
Bericht	1	700 €	700 €	
Zwischensumme			10.540 €	
Dioxinmessung	6	1.700 €	10.200 €	
PAK-Messung	6	800 €	4.800 €	
Staubmessung	6	800 €	4.800 €	
Anlagenbetreuung	250 d	31 €	7.750 €	250 d
Bericht	5 d	700 €	3.500 €	5 d
Summe			41.590 €	276 d

5.5.5 Anzahl der notwendigen Messungen

In der Regel werden Feuerungen als Baureihen geprüft, da ein Feuerungstyp in mehreren Leistungsgrößen angeboten werden soll. Die Norm für Kesselprüfungen, die EN 303-5 legt die Anzahl der Messungen wie folgt fest. Bei Heizkesseln einer Baureihe mit gleichbleibendem konstruktiven Aufbau genügt es, bei einem Verhältnis der Nenn-Wärmeleistung des größten zum kleinsten Heizkessel kleiner oder gleich 2:1, die Prüfungen mit dem kleinsten und dem größten Heizkessel durchzuführen. Ist jedoch innerhalb derselben Baureihe dieses Verhältnis größer als 2:1, so müssen so viele Zwischengrößen geprüft werden, dass dieses Verhältnis nicht überschritten wird.⁶

Hat ein Hersteller in seinem Sortiment Feuerungen gleichen Typs im Leistungsbereich zwischen 50 kW und 100 kW reichen zwei Prüfungen der jeweils Feuerungen mit der größten und kleinsten Nennwärmeleistung aus. Soll eine Feuerung gleichen Typs mit einer Nennwärmeleistung von 40 kW hinzukommen, müssen drei Prüfungen vorgenommen werden. Im Rahmen des Messprogramms wird vorgeschlagen nur ein Kessel einer Baureihe mit gleichbleibendem konstruktiven Aufbau geprüft wird. Für die Messungen soll ein Kessel, der beim Einsatz von Holz die schlechtesten Emissionswerte aufweist, ausgewählt werden.

⁶ EN 303-5 5.1.3 Typprüfungen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Landnutzung im Untersuchungsgebiet nach ATKIS Basis DLM 2007	7
Abbildung 2:	Geographische Verteilung der Trestermenge in der Grenzregion.....	8
Abbildung 3:	Produktionsverfahren für Pellets aus Traubentrester (eigene Darstellung)	10
Abbildung 4:	Pelletieranlage PM 6-28.....	18
Abbildung 5:	Hergestellte Biomassepellets (A: 100% Traubentrester; B: 30% Traubentrester / 70% Miscanthus; C: 70% Traubentrester / 30% Miscanthus; D: 100% Miscanthus).....	18
Abbildung 6:	Traubentresterpellets.....	19
Abbildung 7:	Flammenbild und Rostasche während der Verbrennung der Biomassepellets in Kessel A.....	25
Abbildung 8:	Viertelstundenmittelwerte der gasförmigen Emissionen CO.....	28
Abbildung 9:	Viertelstundenmittelwerte der gasförmigen Emissionen Gesamt-C.....	29
Abbildung 10:	Viertelstundenmittelwerte der gasförmigen Emissionen NO _x	30
Abbildung 11:	NO _x -Emissionen in Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt der untersuchten Brennstoffchargen.....	30
Abbildung 12:	Viertelstundenmittelwerte der Gesamtstaubemissionen bei der Verbrennung von Gärrest- und Mischpellets.....	32
Abbildung 13:	Mittelwerte der Staubemissionen in Abhängigkeit von der Summe aerosolbildender Elemente K, Na, Zn, Pb, S, Cl im Brennstoff.....	33
Abbildung 14:	Kesselschema (www.binder-gmbh.at).....	37
Abbildung 15:	Temperaturen eines Spezialkessels am Rost und im Brennraum bei Vollast /eigene Darstellung/.....	38
Abbildung 16:	Temperaturen eines Spezialkessels am Wärmeübertrager bzw. Abgasstutzen bei Vollast /eigene Darstellung/.....	39
Abbildung 17:	Temperaturen in einem Spezialkessels bei Leistungsmodulierung. (rot - Bereich möglicher Dioxinbildung; grün - Bereich des Dioxinabbaus; gelb - Bereich möglichen Dioxinabbaus) /eigene Darstellung/.....	40
Abbildung 18:	Aufbau zur Dioxin- / Furanmessung [Werksbild Paul Gothe GmbH Bochum, www.paulgothe.de].....	43
Abbildung 19:	Aufbau zur PAK-Messung [Werksbild Paul Gothe GmbH Bochum, www.paulgothe.de].....	43
Abbildung 20:	Aufbau zur gravimetrischen Gesamtstaubmessung [Werksbild Paul Gothe GmbH Bochum, www.paulgothe.de]	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Flächennutzung im Untersuchungsgebiet nach ATKIS Basis DLM 2007	6
Tabelle 2:	Tresterpotential in der Grenzregion Mosel.....	9
Tabelle 3:	Gesamtkosten der Tresterpelletsproduktion: Kapital- und Unterhaltskosten für die vier untersuchten Szenarien (T5-E, T5-B, T12-E, T12-B)	13
Tabelle 4:	Qualitätsrelevante Eigenschaften biogener Festbrennstoffe mit ihren jeweiligen Auswirkungen /Kaltschnitt 2009/.....	16
Tabelle 5:	Eigenschaften der untersuchten Brennstoffpellets im Vergleich zu den Anforderungen nach prEN 14961-6 /prEN 14961 – 6/	17
Tabelle 6:	Technische Details der Isokinetikregelung ITES der Fa. Paul Gothe GmbH.....	23
Tabelle 7:	Emissionsgrenzwerte für die Verbrennung von Stroh und strohähnlichen Stoffen sowie sonstigen nachwachsenden Rohstoffen nach 1. BImSchV §3 Abs.1 Nr. 8 bzw. 13 und TA Luft Nr. 5.4.1.3 /1. BImSchV 2010/ /TA Luft 2002/.....	26
Tabelle 8:	Viertelstundenmittelwerte im Vergleich, Kessel A	26
Tabelle 9:	Viertelstundenmittelwerte im Vergleich, Kessel B	27
Tabelle 10:	Randbedingungen und deren Auswirkungen abgeleitet aus der 1.BImSchV	41
Tabelle 11:	Randbedingungen und deren Auswirkung abgeleitet aus den Interessen des Betreibers	41
Tabelle 12:	Mögliche Vergleichswerte.....	42
Tabelle 13:	Aufstellung zu Variante 1	48
Tabelle 14:	Aufstellung zu Variante 2.....	48
Tabelle 15:	Aufstellung zu Variante 3.....	49

Literaturverzeichnis

- /1. BImSchV 2010/ Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV, 26. Januar 2010
- /17. BImSchV/ Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen - 17. BImSchV – 17. BImSchV, 27.1.2009
- /BLT 2011/ BLT Wieselburg (Hrsg.): Tarife BLT 2011, <http://blt.josephinum.at/index.php?id=1199>, Zugriff: Dezember 2011
- /Carroll 2003/ Carroll, W.: Incinerator Design and Operation: The Robust Approach to PCDD/F Minimisation, http://www.dioxinfacts.org/sources_trends/incinerator.html
- /Christensen 1998/ Christensen K.A., Stenholm M., Livbjerg H.: The formation of submicron aerosol particles, HCl and SO₂ in straw-fired boilers, J. Aerosol Sci, 29, S. 421-444, 1998
- /Deubert 2010/ Deubert M.: GIS-basierte Standortanalyse für Biogasanlagen am Beispiel Vorderpfalz, Johannes –Gutenberg-Universität, Mainz, 2010
- /Glarbourg 2007/ Glarbourg P.: Hidden interactions – Trace species governing combustion and emissions, Proceedings of the Combustion Institute, 31, S. 77-98, 2007
- /Härdtlein 2004/ Härdtlein, M., Eltrop, L., Thrän, D. (Hrsg.), Voraussetzungen zur Standardisierung biogener Festbrennstoffe, Schriftenreihe „nachwachsende Rohstoffe“, Band 23, 2004
- /Hartmann 2007/ Hartmann, H. et al.: „Getreidekörner als Brennstoff für Kleinfeuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte“, Berichte aus dem TFZ 13, Straubing, 2007
- /Huck 2011/ Huck V., Lang S., Senner P.: Projekt MARC –Energetische Nutzung biologisch abbaubarer Stoffe aus der Weinproduktion, Synthesebericht, CRTE, Luxemburg, 2011
- /Launhardt 2000/ Launhardt T., Hartmann, H., Link H., Schmidt V.: Verbrennungsversuche mit naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinfeuerungsanlage – Emissionen und Aschequalität, Schriftenreihe "Materialien", Nr. 156 des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 133 Seiten, 46 Abbildungen, 19 Tabellen, 2000
- /Kaltschmitt 2009/ Kaltschmitt, M., Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren, 2. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2009
- /Kiesewalter 2008/ Kiesewalter, S., Röhricht, Chr.: Biomasseanbau und -verwertung als Energieträger / Humusstoff von Flächen mit unterschiedlichem Schwermetallbelastungsgrad und Grünlandgebieten, Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 30/2008, Dresden, 2008
- /LAI 2011/ Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (Hrsg.): Auslegungsfragen zur Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen, www.lai-immissionsschutz.de, Stand: 05.08.2011.
- /Leitfaden Bioenergie 2005/ Leitfaden Bioenergie – Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), 2005
- /Lenz 2008/ Lenz, V.; Vetter, A.; Hering, T.; Scheffelowitz; Peisker, D.; Hartmann, H. et al., Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen für Getreide- und Stroh brennstoffe. FNR Endbericht. Hrsg. v. DBFZ gemeinnützige GmbH. Leipzig, 2008
- /Nussbaumer 1997/ Nussbaumer, T.; Primär- und Sekundärmaßnahmen zur NO_x-Minderung bei Biomasse-feuerungen; In: VDI-Tagung "Thermische Biomassenutzung" Salzburg 23./24.4.1997; S. 141 – 165; Hrsg. VDI Verlag GmbH; 1997
- /Oberberger 2006/ Oberberger, I., Brunner, T., Bärnthaler, G.: Chemical properties of solid biofuels – significance and impact, Biomass and Bioenergy, 30, S. 973-982, 2006

- /Paulrud 2001/ Paulrud, S.; Nilsson, C.; Öhman, M.: Reed canary-grass ash composition and its melting behavior during combustion, *Fuel*, 80, S. 1391 – 1398, 2001.
- /prEN 14961-6/ Schluss-Entwurf FprEN 14961-6, Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und –klassen, Teil 6: Nicht-holzartige Pellets für nichtindustrielle Verwendung
- /Rigo 1998/ Rigo, G.; Chandler, J.: Is there a strong dioxine:chlorine link in commercial scale systems?, *Chemosphere*, Vol. 37, S. 9 – 12, 1998
- /Stenaari 2009/ Steenari, B.-M.; Lundberg, A.; Pettersson, H.; Wilewska-Bien, M.; Andersson, D.: Investigation of Ash Sintering during Combustion of Agricultural Residues and the Effect of Additives, *Energy & Fuels*, 23, S. 5655 – 5662, 2009.
- /TA Luft 2002/ Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft, TA Luft), 24. Juli 2002
- /Van Loo 2008/ Van Loo S., Koppejan J.: *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*, Earthscan, London, 2008
- /VDI 2006/ VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 (2006): Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). Staubmessungen in strömenden Gasen ; gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung. Berlin: Beuth (VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, 4)
- /Verma 2012/ Verma, V.K.; Bram, S.; Delattin, F.; Laha, P.; Vandendael, I.; Hubin, A.; De Ruyck, J.: Agro-pellets for domestic heating boilers: Standard laboratory and real life performance, *Applied Energy*, 90, S. 17 – 23, 2012
- /Vetter 2001/ Vetter, A.: Qualitätsanforderungen an halmgutartige Bioenergieträger hinsichtlich der energetischen Verwertung; Gülzower Fachgespräche Band 17, 2001, S. 36-49
- /Vetter 2003/ Vetter, A.; Hering, T.: Stand der Technik und Erfahrungen bei der Verbrennung von Stroh und Getreide; Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2003, Jena.
- /Weller 2010/ Weller, N., Zeng, T. Lenz, V., Combustion behavior of straw pellets and its potential optimisation by fuel improvement, Proc. of the 18th European Biomass Conference & Exhibition, Lyon, France, 2010
- /Weller 2011/ Weller, N., Zeng, T., Lenz, V., Combustion of Miscanthus Pellets in the Presence of Different Additives - Effects on Combustion Behaviour, Ash Sintering and Emissions, (poster presentation), Proc. of the 19th European Biomass Conference & Exhibition, Berlin, Germany, 2011
- /Zeng 2010/ Zeng T.: Einsatz von Additiven bei der Verbrennung von Miscanthuspellets in einer Kleinf Feuerungsanlage < 100 kWNWL – Untersuchung des Abbrand- und Emissionsverhaltens, Proceedings of the 4th Rostocker Bioenergieforum, 2010.
- /Zhou 2006/ Zhou, H., Jensen, A.D., Glarbourg, P., Kavaliauskas, A.: Formation and reduction of nitric oxide in fixed-bed combustion of straw, *Fuel* 85 S. 705-716, 2006

Anhang A.1: Brennstoffanalyse

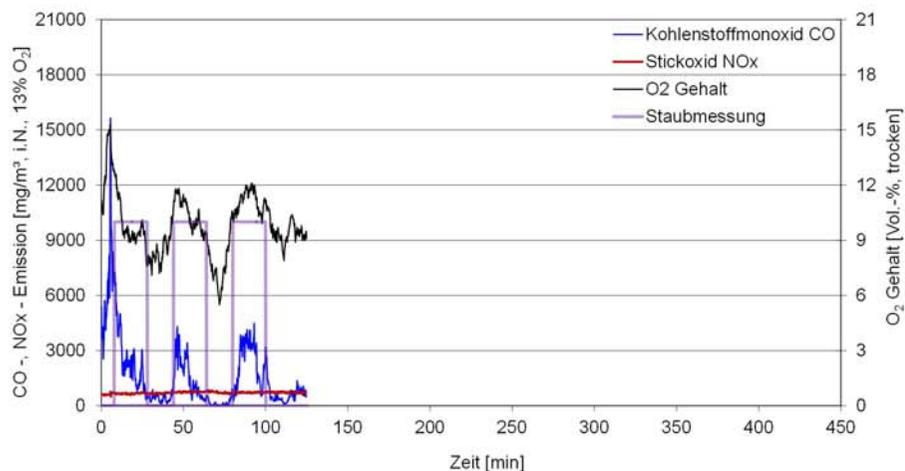
Parameter	Maßeinheit	100% TT	70% TT / 30% M	30% TT / 70% M	100% M	prEN 14961-6 Klasse A	prEN 14961-6 Miscanthuspellets
Durchmesser	mm	21	21,3	22,6	20,3	6 - 25 (± 1)	6 - 25 (± 1)
Länge	mm	18,1	24,7	37,2	36,3	3,15 < L < 50	3,15 < L < 50
Schüttdichte	kg/m ³	n.a.	476	486	n.a.	≥ 600	≥ 580
Feinanteil	Ma.-%	27,7	0,4	0,2	0,6	$\leq 2,0$	$\leq 1,0$
Aschegehalt, A	Ma.-% (wf)	7,86	6,58	3,92	2,66	5,0	6,0
Wassergehalt, M	Ma.-%	9,78	10,2	7,36	3,23	≤ 12	≤ 10
Flüchtige Bestandteile	Ma.-% (wf)	64,0	67,5	74,7	80,5	-	-
Heizwert, Hu	MJ/kg	20,78	21,00	20,06	17,34	$\geq 14,1$	*
Kohlenstoff, C	Ma.-% (wf)	53,8	52,3	50,3	48,1	-	-
Wasserstoff, H	Ma.-% (wf)	5,57	5,55	5,63	5,9	-	-
Sauerstoff, O	Ma.-% (wf)	37,43	39,74	42,71	45,69	-	-
Stickstoff, N	Ma.-% (wf)	3,2	2,41	1,36	0,31	< 1,5	< 0,5
Schwefel, S	Ma.-% (wf)	0,16	0,171	0,121	0,04	< 0,2	< 0,05
Chlor, Cl	Ma.-% (wf)	0,004	0,03	0,046	0,045	< 0,2	< 0,08
Phosphor, P	mg/kg (wf)	4800	3700	1500	751	(0,06 ^b)	(0,07 ^a)
Kalium, K	mg/kg (wf)	27800	24900	10800	4710	(0,21 ^b)	(0,72 ^a)
Calcium, Ca	mg/kg (wf)	8270	6800	2430	1360	(0,5 ^b)	(0,16 ^a)
Natrium, Na	mg/kg (wf)	88,9	74,3	83,4	156	(0,01 ^b)	(n.a. ^a)
Magnesium, Mg	mg/kg (wf)	1710	1350	682	545	(0,06 ^b)	(0,06 ^a)
Silizium, Si	mg/kg (wf)	2790	6830	7220	9990	(0,35 ^c)	(n.a. ^a)
Eisen, Fe	mg/kg (wf)	422	712	322	244	-	-
Aluminium, Al	mg/kg (wf)	294	118	120	351	-	-
Magnesium, Mg	mg/kg (wf)	1710	1350	682	545	-	-

Parameter	Maßeinheit	100% TT	70% TT / 30% M	30% TT / 70% M	100% M	prEN 14961-6 Klasse A	prEN 14961-6 Miscanthuspellets
Arsen, As	mg/kg (wf)	0,15	< 0,007	< 0,007	0,06	≤ 1	≤ 1
Cadmium, Cd	mg/kg (wf)	< 0,04	0,048	0,072	0,138	≤ 0,5	≤ 0,5
Chrom, Cr	mg/kg (wf)	2,65	6,28	10,2	6,57	≤ 50	≤ 50
Kupfer, Cu	mg/kg (wf)	26	20,3	8,42	6,62	≤ 20	≤ 20
Blei, Pb	mg/kg (wf)	1,79	3,42	2,81	3,52	≤ 10	≤ 10
Quecksilber, Hg	mg/kg (wf)	0,007	< 0,0072	< 0,0072	< 0,0072	≤ 0,1	≤ 0,1
Nickel, Ni	mg/kg (wf)	0,942	2,97	4,81	3	≤ 10	≤ 10
Zink, Zn	mg/kg (wf)	36,5	48,2	86,2	73,7	≤ 100	≤ 100

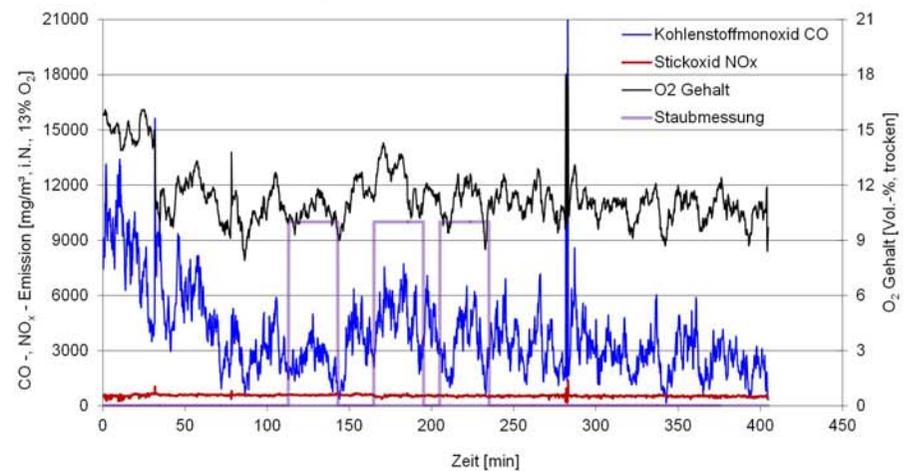
* kleinster Wert ist anzugeben, n.a. – nicht analysiert, (*kursiv*): typische Werte für ^a Miscanthus /Leitfaden Bioenergie 2005/, und ^b Mittelwert aus Fichten- und Buchenholz /Kaltschmitt 2009/ sowie ^c nur Wert für Fichtenholz angegeben /Kaltschmitt 2009/, TT – Traubentrester; M - Miscanthus

Anhang A.2: Emissionsverläufe

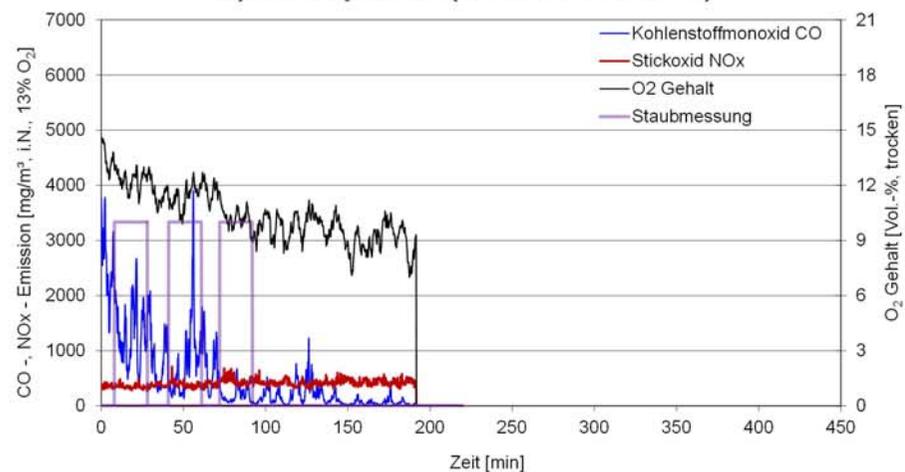
a) Traubentresterpellets



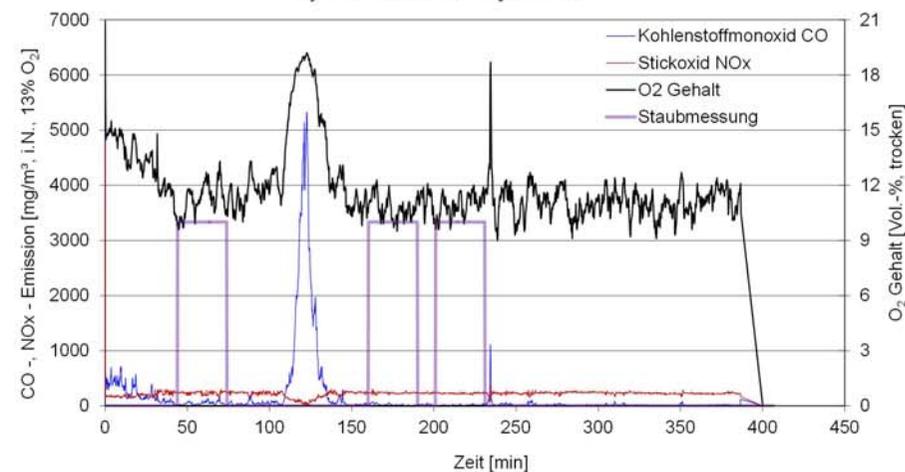
b) Mischpellets (70 % TT / 30 % M)



c) Mischpellets (30 % TT / 70 % M)



d) Miscanthuspellets



Anhang A.3: Zusammenfassung der ermittelten Viertelstundenmittelwerte der Emissionsmessung

Traubentresterpellets										
Lfd. Nr.	Kessel A					Kessel B mit Feinstaubabscheider				
	CO	NO _x	SO ₂	HCl	Staub	CO	NO _x	SO ₂	HCl	Staub
	mg/m ³ (i.N., 13 Vol.-%O ₂)									
1	448,28	674,35	0,09	0,67	1178,85	1205,26	576,23	7,97	6,61	337,97
2	1873,94	736,31	0,42	0,96	914,72	617,37	608,88	0,00	2,33	323,72
3	466,76	765,07	0,04	0,72	997,64	397,01	665,45	0,00	1,83	346,40
4	794,87	705,84	0,22	1,06	-	645,36	684,47	0,00	1,55	342,77
5	2638,22	723,95	0,35	1,17	-	794,34	686,33	0,00	1,64	328,97
6	438,91	745,10	0,47	0,75	-	685,79	755,66	0,00	1,56	324,58
7	-	-	-	-	-	783,69	783,44	0,00	1,63	342,68
8	-	-	-	-	-	958,80	778,56	0,85	2,27	336,82
9	-	-	-	-	-	1907,00	770,43	8,76	7,54	349,05
MW	1110,16	725,10	0,27	0,89	1030,40	888,29	701,05	1,95	3,00	337,00
Max	2638,22	765,07	0,47	1,17	1178,85	1907,00	783,44	8,76	7,54	349,05
Min	438,91	674,35	0,04	0,67	914,72	397,01	576,23	0,00	1,55	323,72

Mischpellets (70% Traubentrester / 30% Miscanthus)										
Lfd. Nr.	Kessel A					Kessel B mit Feinstaubabscheider				
	CO	NO _x	SO ₂	HCl	Staub	CO	NO _x	SO ₂	HCl	Staub
	mg/m ³ (i.N., 13 Vol.-%O ₂)									
1	2777,17	581,89	1,45	0,49	834,09	574,97	515,55	0,00	1,10	198,29
2	2748,65	563,69	0,90	0,35	744,87	182,33	566,63	0,00	1,09	294,98
3	2966,64	586,78	1,09	0,38	807,79	84,87	567,14	0,00	1,05	311,78
4	2868,65	580,61	0,65	0,32	-	93,47	572,92	0,00	1,15	301,09
5	1836,06	595,85	0,91	0,33	-	-	-	-	-	-
6	3887,55	601,05	0,24	0,20	-	-	-	-	-	-
7	4749,19	535,20	0,26	0,54	-	-	-	-	-	-
8	4998,57	550,70	1,61	0,44	-	-	-	-	-	-
9	3944,97	546,71	1,70	0,40	-	-	-	-	-	-
10	3367,91	533,31	1,11	0,51	-	-	-	-	-	-
11	3485,91	534,77	1,27	0,37	-	-	-	-	-	-
12	3988,50	524,67	0,50	0,40	-	-	-	-	-	-
13	3439,69	529,47	1,47	0,56	-	-	-	-	-	-
14	2686,04	546,10	0,48	0,49	-	-	-	-	-	-
15	4306,81	529,13	1,27	0,59	-	-	-	-	-	-
16	2905,37	517,35	0,81	0,43	-	-	-	-	-	-
17	2412,15	527,41	0,73	0,50	-	-	-	-	-	-
18	2641,50	541,16	0,92	0,39	-	-	-	-	-	-
19	2922,44	505,14	0,69	0,38	-	-	-	-	-	-
20	2416,66	527,23	0,40	0,40	-	-	-	-	-	-
21	2727,65	512,94	0,70	0,41	-	-	-	-	-	-
MW	3241,81	546,25	0,91	0,42	795,59	233,91	555,56	0,00	1,10	276,54
Max	4998,57	601,05	1,70	0,59	834,09	574,97	572,92	0,00	1,15	311,78
Min	1836,06	505,14	0,24	0,20	744,87	84,87	515,55	0,00	1,05	198,29

Mischpellets (30% Traubentrester / 70% Miscanthus)										
Lfd. Nr.	Kessel A					Kessel B mit Feinstaubabscheider				
	CO	NO _x	SO ₂	HCl	Staub	CO	NO _x	SO ₂	HCl	Staub
	mg/m ³ (i.N., 13 Vol.-%O ₂)									
1	200,14	466,61	0,12	0,84	303,67	205,78	412,64	58,18	2,00	7,79
2	167,66	427,89	0,04	0,65	273,04	129,62	428,52	17,20	2,35	22,07
3	129,50	426,40	0,05	0,54	322,78	242,71	417,16	5,83	3,84	30,44
4	146,14	429,42	0,00	0,50	-	109,01	414,56	8,24	4,90	28,97
5	51,98	450,68	0,04	0,59	-	106,53	405,77	5,17	5,70	29,26
6	75,08	428,46	0,05	0,50	-	63,54	418,85	7,45	6,42	27,39
7	49,62	436,20	0,01	0,59	-	73,69	411,45	7,71	6,82	26,15
MW	117,16	437,95	0,04	0,60	299,83	132,98	415,56	15,68	4,58	24,58
Max	200,14	466,61	0,12	0,84	322,78	242,71	428,52	58,18	6,82	30,44
Min	49,62	426,40	0,00	0,50	273,04	63,54	405,77	5,17	2,00	7,79

Miscanthuspellets										
Lfd. Nr.	Kessel A					Kessel B mit Feinstaubabscheider				
	CO	NO _x	SO ₂	HCl	Staub	CO	NO _x	SO ₂	HCl	Staub
	mg/m ³ (i.N., 13 Vol.-%O ₂)									
1	130,60	222,85	40,11	10,36	126,35	49,68	241,18	0,00	0,55	3,09
2	37,98	238,04	45,93	8,08	112,55	12,59	250,81	0,00	0,29	4,76
3	63,13	227,76	43,72	8,02	110,81	11,84	252,57	0,00	0,19	8,54
4	33,43	246,36	44,19	8,00	-	10,35	229,57	0,00	0,53	8,30
5	59,06	229,79	42,05	8,97	-	9,95	239,05	0,00	0,40	8,26
6	24,67	246,31	43,51	11,94	-	9,55	247,28	0,00	0,49	7,52
7	32,71	239,28	45,50	12,49	-	9,48	249,48	0,00	0,48	5,02
8	12,63	232,93	45,67	10,20	-	10,63	263,55	0,00	0,45	5,97
9	18,10	234,24	39,38	12,62	-	10,30	247,08	0,00	0,50	5,14
10	13,93	226,84	41,97	13,92	-	-	-	-	-	-
11	27,84	226,35	45,38	9,46	-	-	-	-	-	-
12	8,68	249,38	44,30	12,94	-	-	-	-	-	-
13	17,90	240,25	41,05	10,73	-	-	-	-	-	-
14	19,92	235,71	43,56	10,59	-	-	-	-	-	-
15	8,28	231,40	40,82	11,88	-	-	-	-	-	-
16	14,56	223,26	35,99	13,60	-	-	-	-	-	-
17	9,19	224,27	34,95	14,89	-	-	-	-	-	-
18	13,23	228,82	40,25	13,81	-	-	-	-	-	-
MW	30,32	233,55	42,13	11,25	116,57	14,93	246,73	0,00	0,43	6,29
Max	130,60	249,38	45,93	14,89	126,35	49,68	263,55	0,00	0,55	8,54
Min	8,28	222,85	34,95	8,00	110,81	9,48	229,57	0,00	0,19	3,09