

Deutsches BiomasseForschungsZentrum

German Biomass Research Centre



EnviTec Biogas



PUSCH AG
ENERGY COMPANY



Beurteilung der thermischen Nutzung von Biomassepellets aus Gärresten

Thomas Zeng
Daniel Büchner
Jens Bischoff
Andreas Schneider

Deutsches BiomasseForschungsZentrum gGmbH (DBFZ)

Torgauer Straße 116
04347 Leipzig

Tel.: +49 341 2434 - 112
Fax: +49 341 2434 - 133

www.dbfz.de
info@dbfz.de

Ansprechpartner:

**Deutsches BiomasseForschungsZentrum
gemeinnützige GmbH**

Thomas Zeng
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig

Tel.: +49-341-2434-542
Fax: +49-341-2434-133
E-Mail: thomas.zeng@dbfz.de
Internet: www.dbfz.de

Envitec Biogas AG

Jens bischoff
Boschstraße 2
48369 Saerbeck

Tel.: +49 (0) 25 74 - 88 88 875
Fax: +49 (0) 25 74 - 88 88 800
E-Mail: +49 (0) 172 44 85 859
Internet: www.envitec-biogas.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

Aufsichtsrat:
Bernt Farcke, BMELV, Vorsitzender
Berthold Goeke, BMU
Anita Domschke, SMUL
Johannes Wien, BMVBS
Karl Wollin, BMBF

Geschäftsführung:
Prof. Dr.-Ing. Frank Scholwin (wiss.)
Daniel Mayer (admin.)

Sitz und Gerichtsstand: Leipzig
Amtsgericht Leipzig HRB 23991
Steuernummer: 232/124/01072
USt.-IdNr.: DE 259357620
Deutsche Kreditbank AG
Kto.-Nr.: 1001210689
BLZ: 120 300 00



Inhalt

Inhalt.....	II
Abkürzungsverzeichnis.....	IV
1 Verbrennungstechnische Charakterisierung von Gärrestpellets	5
1.1 Einführung zu brennstofftechnischen Kennwerten	5
1.2 Energieträgerspezifische Eigenschaften	6
1.3 Chemische Eigenschaften	6
2 Abbrandversuch mit Gärrest- und Mischpellets	9
2.1 Beobachtungen bei der Verbrennung in der Kesselanlage.....	9
2.2 Emissionsmessungen	10
2.2.1 Gasförmige Emissionen	10
2.2.2 Staubemissionen.....	14
2.2.3 Analyse der Feuerraumasche	15
3 Marktrecherche zu geeigneten Verbrennungs- und Abscheidertechnologien	19
3.1 Verbrennungstechnologien.....	19
3.1.1 Hauptproblemfelder bei der Verbrennung von alternativen und gemischten Biomassepellets	19
3.1.2 Geeignete Verbrennungskonzepte	20
Ausführung Anlagentechnik:	21
Regelungstechnik.....	23
3.1.3 Maßnahmen zur Verbrennungsoptimierung.....	24
3.2 Abscheidertechnologien	25
3.2.1 Systematik der Staubabscheider	25
3.2.2 Bewertung von Staubabscheidern	29
3.2.3 Abscheider für Biomassekleinfeuerungsanlagen.....	30
3.2.4 Entwicklungen für Feuerungsleistungen < 50 kW	30
3.2.5 Entwicklungen für Feuerungsleistungen > 100 kW	30
3.2.6 Entwicklungsstand.....	31
Elektrostatische Abscheider	31
Katalysatoren	31
Nassabscheider / Wäscher	31
3.2.7 Marktverfügbarkeit.....	32
4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	35
4.1 Annahmen für die Biogasanlage	35
4.2 Referenzszenarien	35
4.3 Alternativszenarien	36
4.4 Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	37
4.5 Bewertung.....	38
Abbildungsverzeichnis.....	40
Tabellenverzeichnis.....	41
Literaturverzeichnis.....	42

Anhang	45
A.1 Brennstoffanalyse.....	45
A.2 Zusammenfassung der ermittelten Viertelstundenmittelwerte der Emissionsmessung...	46
A.3 Anlagensteckbriefe	47

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
bez.	bezogen auf
BGA	Biogasanlage
DIN	Deutsches Institut für Normung
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
i.N.	im Normzustand
ÖNORM	Norm des österreichischen Normungsinstituts
PCDD/F	Polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane
NWL	Nennwärmeleistung
roh	Rohzustand bzw. Anlieferzustand
wf	wasserfrei

1 Verbrennungstechnische Charakterisierung von Gärrestpellets

1.1 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 1 aufgelistet.

Tabelle 1: 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, Staubeentwicklung

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.

1.2 Energieträgerspezifische Eigenschaften

Einen Überblick über die ermittelten energiespezifischen Eigenschaften der Halmgutpresspellets gibt Tabelle 2. Um die gemessenen Werte in einen qualitativen Kontext zu stellen, werden auch hier die Anforderungen der EN 14961-6 für oben genannte Stoffe für einen Vergleich dargestellt, siehe Tabelle 2.

Tabelle 2: Energieträgerspezifische Eigenschaften der Gärrestpellets im Vergleich zu den Anforderungen nach EN 14961-6 /EN 14961 – 6/

Parameter	Maßeinheit	Gärrestpellets	EN 14961-6 Klasse A - Pellets aus nicht- holzartiger Biomasse	EN 14961-6 Miscanthuspellets
Aschegehalt, A	Ma.-% (wf)	11,3	≤ 5,0	≤ 6,0
Wassergehalt, M	Ma.-%	11,3	≤ 12	≤ 10
Flüchtige Bestandteile	Ma.-% (wf)	70,1	-	-
Heizwert, Hu	MJ/kg	17,59 (wf)	≥ 14,1	*

* kleinster Wert ist anzugeben

Der Aschegehalt liegt außerhalb der Anforderungen der genannten Norm. 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 Halmgutpresspellets von 11,3 Ma.-% überschreitet den Grenzwert der Klasse A nur geringfügig und kann durch eine optimierte Pelletierung bzw. Konditionierung des Ausgangsmaterials eingestellt werden.

Das untersuchte Material besitzt mit 70,1 Ma.-% (wf) einen leicht niedrigeren Anteil an flüchtigen Bestandteilen als andere biogene Festbrennstoffen, wie z. B. Stroh (ca. 77 Ma.-% (wf)) oder Holzbrennstoffen (> 80 Ma.-% (wf)), was jedoch auf den hohen Aschegehalt der Pellets zurückgeführt werden kann. Auch der Heizwert von 17,59 MJ/kg (wf) ist im Vergleich mit verschiedenen Strohsorten (Hu ~ 17,4 MJ/kg (wf)) und Holzbrennstoffen (Hu ≥ 18,4 MJ/kg (wf)) ungefähr gleich groß /Kaltschmitt 2009/. Des Weiteren wird der Grenzwert der prEN 14961-6 für die Klasse A trotz des leicht erhöhten Wasserehaltes eingehalten, womit auch bei einer Brennstoffoptimierung keine Probleme zu erwarten sind.

1.3 Chemische Eigenschaften

Bei der chemischen Analyse eines Brennstoffes werden dessen Haupt- sowie bestimmte Spurenelemente ermittelt, die Aussagen zum theoretischen Abbrandverhalten ermöglichen (siehe Tabelle 3 und Tabelle 4). 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 nicht erfüllt. Allerdings liegen die ermittelten Werte nur geringfügig über die geforderte Grenzwerten. Dagegen werden die strenger formulierten Grenzwerte

für Miscanthus deutlich überschritten. Die Stickstoff- und Schwefelgehalte überschreiten den geforderten Grenzwert von 0,5 Ma.-% bzw. 0,05 Ma.-%. Diese Elementgehalte sind teilweise mit denen halmgutartiger Brennstoffe vergleichbar (z.B. Weizenstroh: N = 0,48 Ma.-% (wf), S = 0,082 Ma.-% (wf), Cl = 0,19 Ma.-% (wf) /Kaltschmitt 2009/), wobei der Stickstoffgehalt durch Verwendung der Ganzpflanzen deutlich höher und aufgrund des Pressvorgangs der Chlorgehalt sehr niedrig ist. 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.

Tabelle 3: Gehalt an Hauptelementen der Gärrestpellets im Vergleich zu den Anforderungen nach EN 14961-6 /EN 14961 - 6/

Parameter	Maßeinheit	Gärrestpellets	EN 14961-6 Klasse A - Pellets aus nicht- holzartiger Biomasse	EN 14961-6 Miscanthuspellets
Kohlenstoff, C	Ma.-% (wf)	46,6	-	-
Wasserstoff, H	Ma.-% (wf)	5,5	-	-
Sauerstoff, O	Ma.-% (wf)	46,2	-	-
Stickstoff, N	Ma.-% (wf)	1,7	≤ 1,5	≤ 0,5
Schwefel, S	Ma.-% (wf)	0,355	≤ 0,2	≤ 0,05
Chlor, Cl	Ma.-% (wf)	0,341	≤ 0,2	≤ 0,08

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/.

Tabelle 4: Gehalte an Spurenelementen der Gärrestpellets

Parameter	Maßeinheit	Gärrestpellets	Miscanthus ^a	Holz ^b
Phosphor, P	Ma.-% (wf)	0,925	0,07	0,06
Kalium, K	Ma.-% (wf)	1,59	0,72	0,21
Calcium, Ca	Ma.-% (wf)	1,08	0,16	0,5
Natrium, Na	Ma.-% (wf)	0,099	k. A.	0,01
Magnesium, Mg	Ma.-% (wf)	0,629	0,06	0,06
Silizium, Si	Ma.-% (wf)	1,25	k. A.	0,35 ^c

^a aus /Leitfaden Bioenergie 2005/, ^b Mittelwert aus Fichten- und Buchenholz /Kaltschmitt 2009/, ^c nur Wert für Fichtenholz angegeben

Die in Tabelle 4 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 EN 14961 - 6 keine Grenzwerte für Spurenelemente bzw. Alkali-/Erdalkalimetalle vorgibt, sind in Tabelle 4 typische Werte für Miscanthus und Holz angegeben.

Die untersuchten Gärrestpellets weisen im Vergleich zu Miscanthus- oder Holzbrennstoffen bis zu einer Zehnerpotenz höhere Gehalte an Spurenelementen auf. Dabei bewirken die Elemente Kalium und Natrium eine Verringerung und die Elemente Calcium und Magnesium eine Erhöhung des Ascheschmelzpunktes /Vetter 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 Netzwerkbildner bei Verschlackungsvorgängen in der Feuerraumasche eine bedeutende Rolle. Mit Blick auf einen relativ hohen Anteil von etwa 1,25 Ma.-% (wf) kann nicht ausgeschlossen werden, dass es in der Asche der Gärrestpellets zur Bildung von Verschlackungen kommen kann.

Da Phosphor einer der weltweit knappsten Rohstoffe und gleichzeitig für das Pflanzenwachstum essentiell ist, muss ein hoher P-Gehalt im Brennstoffen bei fehlender Nutzung der Verbrennungsaschen als Düngemittel kritisch gesehen werden, was bei den vorliegenden Pellets jedoch nicht der Fall ist. Als weitere Aschebildner wurden Aluminium, Eisen und Mangan analysiert. Eine Übersicht der Gesamtanalyse ist in Anhang A.1 dargestellt.

2 Abbrandversuch mit Gärrest- und Mischpellets

Die Gärrestpellets sowie eine Mischung aus 50% Gärrest und 50% Holzhackschnitzeln wurden jeweils von der Pusch AG pelletiert. Anschließend wurden Verbrennungsversuche in einer markt-gängigen Kesselanlage mit einer Nennwärmeleistung von 47 kW im Vollastbetrieb unter vergleichbaren Bedingungen durchgeführt. Die Kleinf Feuerungsanlage wurde speziell für die Verbrennung nicht-holzartiger Brennstoffe entwickelt und ist mit einem Tunnelbrenner sowie einer Leistungs- und einer Verbrennungsregelung ausgestattet.

2.1 Beobachtungen bei der Verbrennung in der Kesselanlage

Das Abbrand- und Ascheverhalten der Pellets wurde während des Abbrandversuchs 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 Gärrest- und Mischpellets zeigte weitestgehend ein unproblematisches Abbrandverhalten. Die Feuerraumaschen wiesen lediglich einen geringen Verschlackungsgrad auf. 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 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. Dies zog einen ausgeprägt gleichmäßigen Abbrandverlauf mit einem konstanten Emissionsniveau nach sich, siehe Abbildung 1 und 2. Die auftretenden Schwankungen sind auf den Brennstoffeintrag und die damit verbundene Asche- bzw. Glutbettbewegung zurückzuführen. Manuelle Eingriffe in den Verbrennungsprozess waren nicht erforderlich. Der Peak zu Versuchsbeginn und -ende lässt sich auf den Kesselstart bzw. -ende zurückführen.

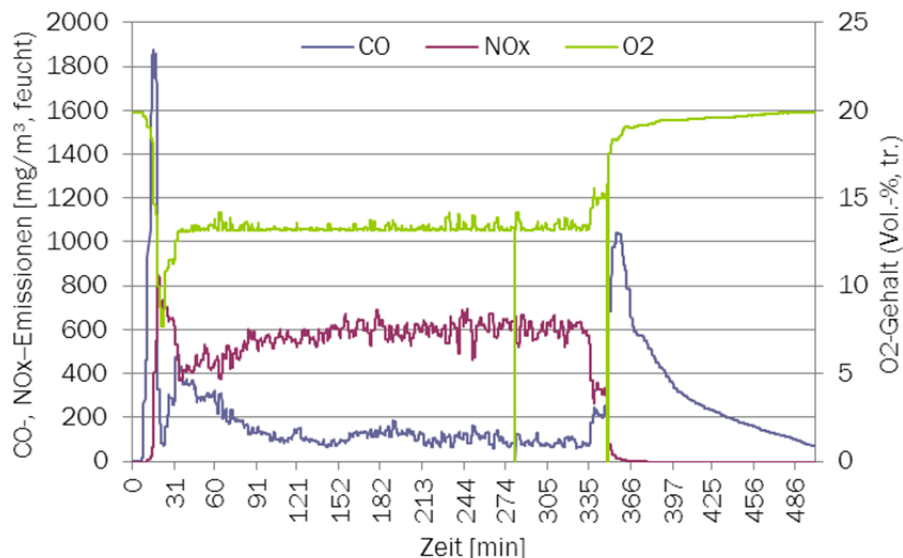


Abbildung 1: Verlauf der CO- und NO_x-Emissionen und des Sauerstoffgehalts im Abgas bei der Verbrennung von Gärrestpellets

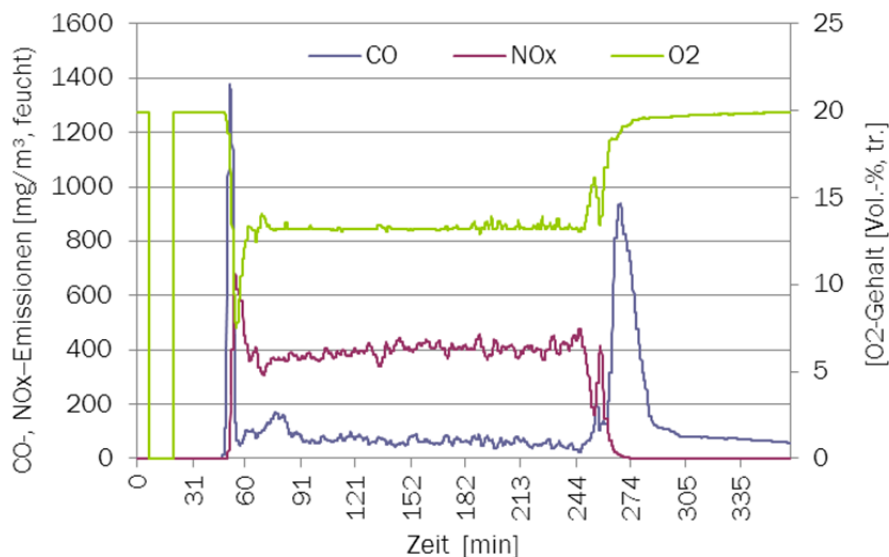


Abbildung 2: Verlauf der CO- und NO_x-Emissionen und des Sauerstoffgehalts im Abgas bei der Verbrennung von Mischpellets

2.2 Emissionsmessungen

2.2.1 Gasförmige Emissionen

Die Erfassung der Emissionen über den gesamten Versuchszeitraum erfolgt im kontinuierlichen Volllastbetrieb der Kesselanlage in Abständen von fünf Sekunden. 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. 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. Es wurden gemäß der 1. Bundesimmissionschutzverordnung (1. BImSchV) Viertelstunden-

Mittelwerte gebildet, die im Anhang A.2 zusammengefasst sind. Für die Beurteilung der gemessenen Emissionen sind in Tabelle 5 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 5: 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)		
		(§ 3, Abs.1, Nr. 8, 13)		(Nr. 5.4.1.3)	
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 6 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 6: Viertelstundenmittelwerte im Vergleich

Brennstoff	CO		Gesamt-C		NO _x		HCl		SO ₂		Staub	
	mg/m ³ i.N., bez. auf 13 Vol.-% O ₂											
Gärrest-pellets	12 4	+ 101 - 35	5	+ 3 - 1	65 1	+ 39 - 120	73	+ 29 - 39	40 9	+ 17 - 51	54	+ 28 - 19
Mischpellets	70	+ 14 - 22	3	+ 1 - 1	44 3	+ 29 - 30	23	+ 5 - 13	19 9	+ 13 - 19	18	+ 31 - 67
Vergleichs- brennstoff 1 ¹⁾	275		-		334		-		-		100 (40*)	
Vergleichs brennstoff 2 ²⁾	104		-		398		-		-		106 (43*)	

* Staubwert nach Elektrofilter
¹⁾ Kratzeisen M et al. Applicability of biogas digestate as solid fuel. Fuel (2010), doi:10.1016/j.fuel.2010.02.008, Feuerraumasche aus Feuerungsanlage Ökotherm Compact CO (eingesetzter Brennstoff: Gärreste aus Biogasanlage mit Input von 50% Maissilage, 40% Grassilage, 10% Kartoffeln)
²⁾ Kratzeisen M et al. Applicability of biogas digestate as solid fuel. Fuel (2010), doi:10.1016/j.fuel.2010.02.008, Feuerraumasche aus Feuerungsanlage Ökotherm Compact CO (eingesetzter Brennstoff: Gärreste aus Biogasanlage mit Input von 81% Maissilage, 9% Grassilage, 7% Geflügelgülle, 3% Maiskolben)

CO-Emission: Aus Abbildung 3 geht hervor, dass die CO-Emissionen bei der Verbrennung im Durchschnitt bei niedrigem Niveau von maximal 124 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) lagen. Der maximale Wert lag bei rund 225 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂). Die Zumischung von 50% Holzhackschnitzeln bewirkte ein etwas gleichmäßigeres Abbrandverhalten im Vergleich zur Verbrennung von Pellets aus 100% Gärresten. Damit wird der aktuell geltende Grenzwert der 1. BImSchV (Stufe 1) für Kohlenstoffmonoxid von 1000 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) eingehalten. Auch im Hinblick auf die Verschärfung des Grenzwertes in der Stufe 2 der 1. BImSchV ist beim Einsatz geeigneter Kesselanlagen kein Handlungsbedarf zu erkennen.

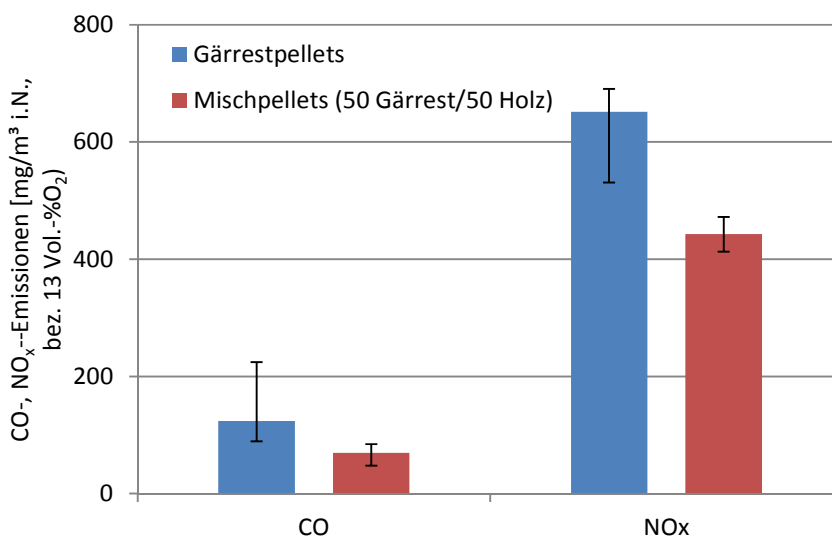


Abbildung 3: Viertelstundenmittelwerte der gasförmigen Emissionen CO und NO_x bei der Verbrennung von Gärrest- und Mischpellets

NO_x-Emission: Der für die Typenprüfung von Kesselanlagen festgelegte Grenzwert von 600 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) wird um 51 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) überschritten. 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. Des Weiteren sollte bei weiterführenden Verbrennungsversuchen eine Optimierung des Kessels hinsichtlich der NO_x-Emissionen untersucht werden. Mit diesen Schritten wäre eine Einhaltung der aktuell und auch zukünftig geltenden Emissionsgrenzwerte ggf. möglich. Beim Einsatz im Geltungsbereich der TA Luft dürfte hingegen etwas schwieriger sein, da gültige Grenzwert mit 400 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) festgelegt ist. Eine Einhaltung des Grenzwertes kann brennstoffseitig durch eine Zumischung von Holz oder anlagenseitig durch eine optimierte Betriebsführung bzw. den Einsatz einer Abgasrückführung erreicht werden.

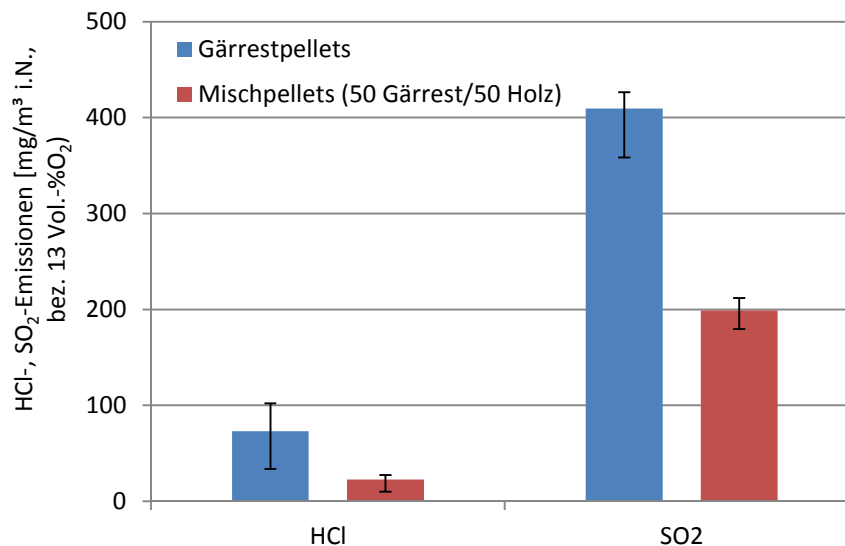


Abbildung 4: Viertelstundenmittelwerte der gasförmigen Emissionen HCl und SO₂ bei der Verbrennung von Gärrest- und Mischpellets

SO₂- und HCl - Emissionen: Bezüglich der SO₂- und HCl- Emissionen werden in der 1. BImSchV für den Betrieb mit nicht holzartigen Brennstoffen keine Grenzwerte angegeben. Die auftretenden SO₂-Emissionen beim Einsatz von Gärrestpellets von durchschnittlich 409 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) sind im Vergleich zu anderen Messungen /Härdtlein 2004/ als deutlich erhöht einzustufen. Die technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) gibt für Stroh oder ähnliche pflanzliche Rohstoffe bei Anlagen mit einer Feuerwärmeleistung von < 1 MW einen Grenzwert von 280 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) an /TA Luft 2002/. Die Zumischung von Holz kann zu einer signifikanten Absenkung des Gesamtschwefelgehaltes im Brennstoff führen. Im vorliegenden Fall zeigt sich, dass die Zumischung von 50% Holzhackschnitzel eine Halbierung der SO₂-Emissionen bewirkt hat. 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. Die technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) gibt für Stroh oder ähnliche pflanzliche Rohstoffe bei Anlagen mit einer Feuerwärmeleistung 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 wird mit 73 bzw. 23 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) über- bzw. leicht unterschritten, jedoch besteht auch hier durch eine Brennstoffentwicklung Optimierungspotenzial.

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.

2.2.2 Staubemissionen

Die Ermittlung der Staubemissionen erfolgte kontinuierlich anhand der Streulichtmethode. Es wurden Viertelstundenmittelwerte gebildet.

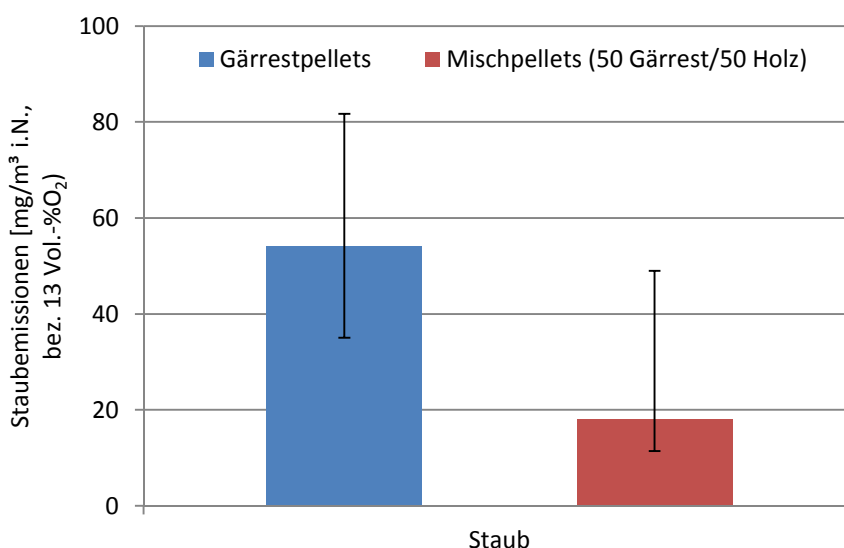


Abbildung 5: Viertelstundenmittelwerte der Gesamtstaubemissionen bei der Verbrennung von Gärrest- und Mischpellets

Der aktuell gültige Grenzwert für Staubemissionen nach der 1. BImSchV von 100 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) wird bei der Verbrennung der Gärrest- und Mischpellets eingehalten. Im Mittel wurden 54 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) bei der Verbrennung der Gärrestpellets bzw. 18 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂) bei der Verbrennung der Mischpellets Staub emittiert. Die höchste Wert der drei Messungen der Staubemission lag bei 18 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂). Der in Stufe 2 der 1. BImSchV verschärfte Grenzwert der Staubemissionen von 20 mg/m³ bzw. der Grenzwert der TA Luft von 40 mg/m³ (i.N., 13 Vol.-% O₂). wird nur von den Mischpellets eingehalten. Allerdings kann eine Optimierung der HCl- und SO₂-Emissionen durch primäre Maßnahmen, z.B. den Einsatz von Additiven wie Kaolin, nur im Zusammenspiel mit den Staubemissionen erfolgen In vorangegangenen Forschungsarbeiten wurde nachgewiesen, dass Kaolin das Alkalimetall Kalium in Form von Kalium-Aluminium-Silikaten in die Feuerraumasche einbinden kann. /Rönnbäck 2008, Bäfver 2009/ Das gebildete anorganische System führt zu einer deutlichen Erhöhung der Ascheschmelztemperatur. Weiterhin wurde durch die Einbindung von Kalium in die Feuerraumasche eine gleichzeitige Reduzierung der partikelförmigen Emissionen nachgewiesen. Zudem wurden abhängig von den Betriebs- bzw. Reaktionsbedingungen (Gas- und Brennguttemperatur, den Taupunkt, die Verweilzeit sowie die chemische Zusammensetzung des Brennguts) eine Einbindung des im Brennstoff enthaltenen Chlors und Schwefels in die Feuerraumasche nachgewiesen, welche in niedrigeren Emissionen an gasförmigen HCl und SO₂

resultiert. Aufgrund der geringen Verfügbarkeit dieser gasförmigen Bestandteile (HCl, SO₂), sind ebenfalls Auswirkungen auf die partikelgebundenen Emissionen möglich, da Alkalimetalle durch eine geringere Verfügbarkeit von HCl und SO₂ immobilisiert werden können. /Wolf 2005, Obernberger 2006, Christensen 1998/ Anlagenseitig kann der Einsatz von Staubabscheidern zu einer deutlichen Minderung der Gesamtaubemissionen führen. Mögliche Technologien sind in Kapitel 3.2 aufgelistet.

2.2.3 Analyse der Feuerraumasche

Bei Inverkehrbringung der Grobaschen nach der Düngemittelverordnung (DüMV) ist auf die Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte bestimmter Schwermetallgehalte zu achten. Aschefraktionen können in Feuerungsanlagen an folgenden Orten anfallen:

- Feuerraumasche: Im Verbrennungsteil der Feuerungsanlage, d.h. auf oder unter dem Rost bzw. in der Brennstoffmulde anfallende Fraktion. Der größte Teil der bei der Verbrennung anfallenden Aschen (ca. 60 bis 90 %) verbleibt im Feuerraum.
- Zyklonasche: In den Rauchgasen mitgeführte Asche, die im Zyklon anfällt.
- Filterasche: Im Elektro- oder Gewebefilter bzw. in Rauchgaskondensationsanlagen als Kondensatschlamm abgeschiedene Aschefraktion. Bei Feuerungsanlagen ohne filternde Abscheider verbleibt diese als Reststaub im Rauchgas.

Die im Wärmeübertragerbereich der Feuerungsanlage anfallende Kesselasche wird häufig gemeinsam mit der Feuerraumasche erfasst. Sofern eine separate Entnahme der Kesselasche erfolgt, ist diese wie Zyklonasche zu handhaben. Die stoffliche Zusammensetzung der einzelnen Aschefraktionen wird durch brennstoffabhängige und anlagentechnische Größen bestimmt. Brennstoffabhängige Größen sind z.B. Pflanzenart, Standort (Bodenbeschaffenheit) bzw. auch Wetter und Verschmutzung während der Nutzungshase. Anlagentechnische Einflussgrößen sind der Ausbrand der Aschen, die Feuerraumtemperatur sowie die Art der Abgasreinigung. Weiterhin ist der Eintrag von Stoffen aus Ofen- und Kesselmaterialien durch Korrosionsvorgänge möglich. Nach den Grundsätzen der Kreislaufwirtschaft in § 5 Abs. 2 KrW-/AbfG hat die Verwertung von Abfällen Vorrang vor deren Beseitigung. Dem entsprechend ist eine der Art und Beschaffenheit des Abfalls entsprechende hochwertige Verwertung anzustreben. Die an verschiedenen Orten der Anlage anfallenden und im Allgemeinen unterschiedlich belasteten Aschefraktionen sollten möglichst getrennt erfasst werden. Gemeinsam anfallende Mischfraktionen aus Feuerraum- und Zyklonaschen unterliegen einer Einzelfallprüfung in Abhängigkeit vom beabsichtigten Entsorgungsweg und sind im Zweifelsfall wie Zyklonaschen zu handhaben. Eine Vermischung von in der Feuerungsanlage getrennt anfallenden Aschefraktionen ist unzulässig, sofern dadurch ihre Verwertbarkeit eingeschränkt oder verhindert wird. Die Verwertung hat ordnungsgemäß und schadlos zu erfolgen (§ 5 Abs. 3 KrW-/AbfG). Eine schadlose Verwertung liegt vor, wenn insbesondere keine Schadstoffanreicherung im Wertstoffkreislauf erfolgt. Eine stoffliche Verwertung liegt vor, wenn nach einer wirtschaftlichen Betrachtungsweise der Hauptzweck der Maßnahme in der Nutzung des Abfalls und nicht in der Beseitigung des Schadstoffpotenzials liegt (§ 4 Abs. 3 KrW-/AbfG). Bei der Ausbringung von Aschen auf landwirtschaftliche Flächen oder im Wald ist eine stoffliche Verwertung folglich nur dann anzunehmen, wenn der Nährstoffgehalt der Aschen einen vorhandenen Nährstoffbedarf deckt und eine Schadstoffanreicherung im Boden nicht zu befürchten ist. Ansonsten ist das Ausbringen der Aschen als Beseitigungsmaßnahme einzustufen /KrW-/AbfG 2007/. Bei immissionschutzrechtlich genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen obliegt es der

Genehmigungsehörde (Kreisverwaltungsbehörde oder Bezirksregierung), im Bescheid Anforderungen an die Verwertung bzw. Beseitigung der Aschen festzulegen, die im laufenden Betrieb der Anlage überwacht werden. Eine Rechtsverordnung nach § 8 Abs. 1 und 2 KrW-/AbfG, in der Anforderungen zur Sicherung einer ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung im Bereich der landwirtschaftlichen Düngung festgelegt werden, ist die Düngemittelverordnung (DüMV) /KrW-/AbfG 2007/ /DüMV 2008/. Holzaschen dürfen nur dann als Düngemittel in Verkehr gebracht werden, wenn sie einem nach DüMV zu-gelassenen Düngemitteltyp entsprechen und vorschriftsmäßig gekennzeichnet sind. Mit der Neufassung vom 18. Dezember 2008 werden in der DüMV nur noch die Begriffe „Brennraumaschen“ und „Aschen aus der letzten filternden Einheit im Rauchgasweg“ verwendet. In Tabelle 7 werden diese Begriffe der DüMV den allgemeinen Bezeichnungen für die verschiedenen Aschefraktionen gegenübergestellt.

Tabelle 7: Überführung der allgemeinen Bezeichnungen der Aschefraktionen nach ihrem Anfallort in die Begriffe der DüMV /Lfl 2009/ /DüMV 2008/

Allgemeine Bezeichnungen der Feuerraumasche	Begriffe nach DüMV	
Feuerraumasche (Grobasche, Rostasche)	Brennraumasche	
	Fall A: Abgasreinigung besteht nur aus Zyklon ohne nachgeschaltetem Elektro- oder Gewebefilter	Fall B: Abgasreinigung mit Elektro- oder Gewebefilter
Zyklonasche (Flugasche)	„Asche aus der letzten filternden Einheit im Rauchgasweg“	-
Filterasche (Feinstflugasche)	Fällt nicht an	„Asche aus der letzten filternden Einheit im Rauchgasweg“

Die Verwendung von Aschen aus der letzten filternden Einheit im Rauchgasweg und von Kondensatfilterschlämmen ist nicht zulässig (Anlage 2 Tab. 7.3, Z. 7.3.16 DüMV). Zyklonaschen sind folglich im Fall B grundsätzlich als Düngemittel verwertbar, im Fall von A nicht /Lfl 2009/.

Zur Erreichung möglichst hochwertiger Düngemittel sollten Aschen, die an verschiedenen Orten der Anlage anfallen und im Allgemeinen unterschiedlich belastet sind, nicht vermischt werden. Im Einzelnen sind in der DüMV folgende Ausführungen enthalten /Lfl 2009/:

- Verwendung von ausschließlich Aschen als Düngemittel: Brennraumaschen aus der Verbrennung von naturbelassenen pflanzlichen Ausgangsstoffen können als Kalkdünger oder Kaliumdünger in Verkehr gebracht werden.
- Verwendung als Zuschlagstoff: Brennraumasche von unbehandelten Pflanzenteilen kann zu maximal 30 % dem Düngemitteltyp „Kohlensaurer Kalk“ zugegeben werden. Aschen aus der Verbrennung pflanzlicher Stoffe können auch mineralischen Mehrnährstoffdünger (PK-Düngern, NPK-Düngern) oder einem organisch-mineralischen Düngemittel zugegeben werden (keine Mengenbegrenzung). Dies trifft auf die Aschen aus der Verbrennung von Gärresten zu.
- Mindestnährstoffgehalte: Die jeweils für den Düngemitteltyp festgelegten Mindestnährstoffgehalte sind einzuhalten.

- Höchstgehalte für Kupfer und Zink bei Düngemitteln mit Spurennährstoffen: Bei einem Düngemittel mit Spurennährstoffen z.B. Kupfer, Zink sind die tatsächlichen Gehalte in der Kennzeichnung anzugeben. Für Kupfer und Zink gibt es auch Höchstgehalte (Abschnitt 4.1.1 DüMV).
- Grenzwerte: Es dürfen nur solche Aschen verwendet werden, die die Grenzwerte für Schwermetalle und weitere Schadstoffe nach Anlage 2 Tab. 1.4 Sp. 4 DüMV nicht überschreiten. Bei Brennraumaschen aus der ausschließlichen Verbrennung von unbehandeltem Holz dürfen die Grenzwerte um bis zu 50 % überschritten werden, wenn für diese Düngemittel im Rahmen der Hinweise zur sachgerechten Anwendung auf eine ausschließliche Verwendbarkeit auf forstlichen Standorten hin-gewiesen wird (§ 3 Abs. 2 Nr. 2 DüMV) (Tabelle 4).
- Unvermeidbare Fremdstoffe, Steine: Bei organisch-mineralischen Düngern (PK-Düngern, NPK-Düngern, P- bzw. K-Düngern) dürfen unvermeidbare Fremdstoffe einen Anteil von 0,5 % an der Trockenmasse, Steine über 10 mm Siebdurchgang einen Anteil von 5 % an der Trockenmasse nicht überschreiten.

Anhand der in Tabelle 8 aufgelisteten Analyseergebnisse zur Feuerraumasche aus der Verbrennung von Gärrestpellets wird ersichtlich, dass die Grenzwerte der Düngemittelverordnung mit Ausnahme von Thallium deutlich unterschritten werden. Die Werte Chrom (VI) und Quecksilber liegen unterhalb der Nachweisrenze des eingesetzten Messgerätes. Die Feuerraumasche beim Einsatz von 50% Holzhackchnitzeln und 50% Gärresten Verbrennungsversuch mit konnte nicht untersucht werden. Aufgrund der tendenziell höheren Schwermetallbelastung von Rohmaterialien mit längeren Umtriebszeiten und einer damit verbundenen erhöhten Schadstoffakkumulationen, kann jedoch auch mit höheren Schwermetallkonzentrationen in der Feuerraumasche gerechnet werden. /Obernberger 1997/ Eine Analyse der Nährstoffgehalte, z.B. N, P, K wird weiterhin empfohlen.

Tabelle 8: Kennzeichnungsschwellen und Grenzwerte für Schadstoffe in Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln /DüMV 2008/

Schadstoff	Kennzeichnung ab [mg/kg wf]	Toleranz in % jeweils bis zu	Grenzwert [mg/kg TM]	Grenzwert für Feuerraumaschen für forstliche Standorte [mg/kg TM]	Analysewerte Feuerraumasche [mg/kg wf]	Vergleichswerte 1 ³⁾ [mg/kg wf]	Vergleichswerte 2 ⁴⁾ [mg/kg wf]
Arsen (As)	20	50	40	60	5,73	0,8	1,1
Blei (Pb)	100	50	150	225	0,744	< 1	2,3
Cadmium (Cd)	1,0	50	1,5	2,25	0,398	< 0,5	< 0,5
Chrom ges. (Cr)	300	50	-	-	92,5	76	184
Chrom VI	1,2	50	2	-	< 0,097	n.a.	n.a.
Nickel (Ni)	40	50	80	120	41,9	36	285
Quecksilber (Hg)	0,5	50	1,0	1,5	< 0,0072	< 0,1	< 0,1
Thallium (Tl)	0,5	50	1,0	1,5	1,2	< 0,5	< 0,5
Perfluorierte Tenside (PFT) ²⁾	0,05	-	0,1	0,15	n.a.	n.a.	n.a.

¹⁾ bei Überschreitung der Grenzwerte gelten Übergangsvorschriften nach §9 Abs.2 bis 21.12.2013

²⁾ PFT ist in Biomasseaschen nicht zu erwarten.

³⁾ Kratzeisen M et al. Applicability of biogas digestate as solid fuel. Fuel (2010), doi:10.1016/j.fuel.2010.02.008, Feuerraumasche aus Feuerungsanlage Ökotherm Compact CO (eingesetzter Brennstoff: Gärreste aus Biogasanlage mit Input von 50% Maissilage, 40% Grassilage, 10% Kartoffeln)

⁴⁾ Kratzeisen M et al. Applicability of biogas digestate as solid fuel. Fuel (2010), doi:10.1016/j.fuel.2010.02.008, Feuerraumasche aus Feuerungsanlage Ökotherm Compact CO (eingesetzter Brennstoff: Gärreste aus Biogasanlage mit Input von 81% Maissilage, 9% Grassilage, 7% Geflügelgülle, 3% Maiskolben)

n.n. nicht nachweisbar

n.a. nicht analysiert

3 Marktrecherche zu geeigneten Verbrennungs- und Abscheidertechnologien

3.1 Verbrennungstechnologien

3.1.1 Hauptproblemfelder bei der Verbrennung von alternativen und gemischten Biomassepellets

Die Realisierung eines hohen Anlagenwirkungsgrades, einer emissionsarmen Verbrennung sowie einer hohen Anlagenverfügbarkeit ist besonders auf die teilweise problematische Zusammensetzung von Stroh und den damit einhergehenden Auswirkungen bei der Verbrennung zurückzuführen. Die thermische Verwertung von Strohpellets ist ein komplexer Prozess, bei dem sich die Teilprozesse der Umwandlung sowie die Rahmenbedingungen des Prozesses zum Teil gegenseitig beeinflussen. In diesem Zusammenhang wurden besonders die brennstoffbedingten Problemfelder bei der thermochemischen Umwandlung betrachtet. Die Rechercheergebnisse zeigen ein deutliches Optimierungspotenzial speziell der brennstofftechnischen Eigenschaften beim Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen. Daher wurden die folgenden brennstoffbedingten Problemfelder bei der thermochemischen Umwandlung festgelegt und deren Entstehungsmechanismen sowie mögliche Minderungsmaßnahmen bei der Verbrennung untersucht:

- Partikelemissionen (Feinstaub)
- Stickstoffoxid- und Chlorwasserstoffemissionen
- Verschlackungen im Brennraum

Partikelemissionen (Gesamtstaub) Der Begriff Feinstaub bzw. Feinstpartikel beschreibt eine komplexe Mischung aus festen und/oder flüssigen, in die Luft ausgestoßenen, organischen und anorganischen Schadstoffen. Sie variieren nach Größe, Zusammensetzung und Herkunft und werden anhand der Partikelgröße bzw. des aerodynamischen Durchmessers beschrieben. Die Hauptbestandteile von Feinstäuben aus der Biomasseverbrennung sind in Abhängigkeit vom Brennstoff und der Qualität der Verbrennung /Oberberger 1997/:

- schwerflüchtige, mineralische Aschebestandteile (z. B. CaO , Al_2O_3 , SiO_2),
- Ascheverbindungen, die durch Verdampfung und Kondensation oder Neubildung in der Feuerung entstehen (z. B. KCl , K_2SO_4 , Nitrate) sowie
- Aerosole aus der unvollständigen Verbrennung, wobei zwischen den C-haltigen festen oder flüssigen Zersetzungsprodukten sowie den C-haltigen kondensierten Syntheseprodukten unterschieden wird.

Als primäre Gegenmaßnahmen zur Minderung der kritischen Elemente im Brennstoff sind insbesondere pflanzenbauliche Maßnahmen und Auswaschungseffekte bei einer verlängerten Schwadliegezeit möglich. Zusätzlich kann der Einsatz von Additiven oder Zuschlagstoffen eine Reduktion der Partikelemissionen bewirken. Im Unterschied dazu ist die Minderung der Staubemissionen durch die Verbrennungsführung jedoch nur bedingt beeinflussbar. Daher sollten sekundäre Maßnahmen durch die Schaffung von Sedimentationszonen im Kessel sowie durch den Einsatz von Elektro- oder Gewebefiltern ergriffen werden /Kaltschmitt 2009/, /Heidenreich 2003/. Dabei stellen die vergleichsweise hohen Kosten für Anschaffung und der Betrieb noch immer das größte Hindernis beim Einsatz im kleinen und mittleren Anlagenbereich dar.

Stickstoffoxidemissionen (NO_x) Die wichtigsten Parameter für die Stickoxidbildung sind dabei der Stickstoffgehalt des Brennstoffes, der Sauerstoffgehalt im Feuerraum und die Ausbrandqualität der Asche sowie die Homogenisierung des Brennstoffbettes /Nussbaumer 1997/. Je nach Verbrennungsführung kann im Glutbett ein Großteil des Brennstoffstickstoffs unter reduzierten Bedingungen zu N₂ umgesetzt werden. Dies kann durch eine Abgasrezirkulation, eine Luft- oder eine Brennstoffstufung erreicht werden /Nussbaumer 1997. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen bei der Strohverbrennung wurde durch Messungen von Zhou et al. bestätigt /Zhou 2006/.

Chlorwasserstoffemissionen (HCl) Die HCl-Emissionen bei Strohfeuerungen sind auf den vergleichsweise hohen Chlorgehalt des Strohs zurückzuführen (vgl. Tabelle 1). Der hohe Chlorgehalt im Abgas bewirkt maßgeblich die verstärkten Korrosionsprobleme bei der Strohverbrennung, weshalb die Chlorwasserstoffemissionen bei Strohfeuerungen von hoher Relevanz sind. Dabei werden etwa 60 % des im Brennstoff gebundenen Chlors freigesetzt, während der verbleibende Teil in die Asche eingebunden wird /Kaltschmitt 2009/. Das freigesetzte Chlor wird anschließend in Verbindung mit Wasserstoff als HCl oder in Verbindung mit Alkalien z. B. als KCl in die Gasphase freigesetzt. Zur Reduzierung der HCl-Emissionen sind unterschiedliche Maßnahmen möglich, z. B. durch die Zugabe mineralischer Additive /Oberberger 1997/.

Verschlackungen der Feuerraumasche Die niedrige Ascheerweichungstemperatur von halmgutartigen Brennstoffen (vgl. Tabelle 1) führt bei Strohfeuerungen häufig zu starken Verschlackungen, die durch das Schmelzen und das anschließende Verfestigen der Asche entstehen. Dabei hängen das Ascheschmelzverhalten und die damit verbundene Verschlackungsneigung 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 Netzwerkbildner wie Silizium und Aluminium zu niedrigen Ascheschmelztemperaturen /Vetter 2003/. Zur Vermeidung von Anbackungen und Verschlackungen ist eine Kühlung des Glutbettes möglich. Durch wassergekühlte Roste, luft- oder wassergekühlte Feuerraumwände oder eine Abgasrezirkulation wird die Temperaturentwicklung im Glutbett begrenzt und Verschlackungen entgegengewirkt. Zum anderen ist es möglich, Additive (z. B. Kaolin und Dolomite) in den Feuerraum zuzugeben, wodurch die ascheerweichenden Elemente (z. B. Kalium) eingebunden werden und eine Erhöhung des Ascheerweichungspunktes erreicht wird. Dabei sind jedoch neben dem erhöhten Ascheanfall auch der Mehraufwand für die Einbringung des Additivs sowie die Kosten des Additivs zu berücksichtigen /Stenaari 1998/.

3.1.2 Geeignete Verbrennungskonzepte

Neben dem Einsatz geeigneter Festbrennstoffe wird die Verbrennung durch die eingesetzte Anlagentechnik entscheidend mit beeinflusst. Für eine möglichst schadstoffarme und effiziente Erzeugung von Wärme und Strom muss die Feuerungstechnik auf den einzusetzenden Brennstoff und die notwendige Feuerungswärmeleistung abgestimmt werden. Die bei der Marktanalyse ermittelten Kesselanlagen zur Verbrennung nicht holzartiger Brennstoffe werden im Anhang A3 in Form von Steckbriefen zusammengefasst. Die Recherche stellt aufgrund der Übersichtlichkeit nur einen Ausschnitt der am Markt verfügbaren Kesselanlagen dar, um die grundlegenden

Ausführungsformen widerzuspiegeln und erhebt daher nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Die Klassifikation und Bewertung der Kessel erfolgte anhand der nachfolgend aufgelisteten Kriterien:

- Anlagentechnik (Feuerungsprinzip, Brennstoff- und Verbrennungsluftzufuhr, Ausführung Wärmeübertrager und Zündeinrichtung)
- Regelungstechnik (Leistungs- und Verbrennungsregelung)
- Maßnahmen zur Verbrennungsoptimierung (Korrosion, Verschlackungen der Feuerraumasche sowie Staub- und Stickoxidemissionen)
- Zusammenfassung bisheriger Emissionsmessungen verschiedener Forschungsvorhaben

Dem entsprechend weisen die Kessel unterschiedliche anlagen- und regelungstechnische Konzepte auf.

Ausführung Anlagentechnik:

Feuerungsprinzip Die untersuchten Anlagen sind mit Rost-, Unterschub- oder Mulden- bzw. Tunnelbrennersystemen ausgestattet, wobei neue Modelle, die speziell für die Verbrennung nicht holzartiger Brennstoffe ausgelegt sind, bevorzugt mit Rostsystemen ausgestattet werden. Dabei ist der Rost als Schub-, Wander-, Kettenumlauf- oder Doppelschieberost entweder beweglich oder starr ausgeführt. Im Vergleich zu typischen Unterschubsystemen zur Verbrennung von Holzpellets werden Unterschubfeuerungen zur Verbrennung nicht holzartiger Brennstoffe mit speziellen Einrichtungen ausgestattet (Rühr- oder Abstreifsysteme), die einen möglichst störungsfreien Betrieb bei erhöhten Verschlackungsgraden der Feuerraumasche gewährleisten sollen. Mulden- bzw. Tunnelbrenner sind bevorzugt in älteren Kesselmodellen zu finden. Dem jeweiligen Feuerungssystem kann jedoch kein bevorzugter Einsatz eines bestimmten Brennstoffes zugeordnet werden. Dabei beziehen sich die Brennstoffspezifikationen auf die Herstellerangaben, die keine eindeutigen Rückschlüsse auf die tatsächliche Qualität der Verbrennung nicht holzartiger Brennstoffe zulassen. Zudem sind die untersuchten Kesselanlagen nicht für den Einsatz der meisten angegebenen Brennstoffe zugelassen und bedürfen einer Ausnahmegenehmigung. Im Unterschied dazu bieten einige österreichische Hersteller, u. a. auf Grundlage der Qualitätsnorm ÖNORM C 4000, spezielle Kesselanlagen zur Verbrennung von Miscanthuspresslingen an.

Brennstoffzufuhr / Zündung Die Zufuhr der Brennstoffe in den Feuerraum erfolgt ausschliesslich automatisch über sogenannte Stokerschnecken, wobei die Rückbrandsicherung entweder durch Zellradschleusen bzw. Rückschlagklappen und / oder Löscheinrichtungen erfolgt. Die Zündung des Brennstoffes erfolgt in älteren Modellen durch manuelles Schüren. Im Unterschied dazu wird der Brennstoff in neuen Modellen fast ausschließlich automatisch mittels Heißluftgebläse gezündet.

Verbrennungsluftzufuhr Die anschließend zur Verbrennung notwendige Verbrennungsluft wird bei allen untersuchten Anlagen gestuft als Primär- und Sekundärluft in den Feuerraum eingebracht. Dabei weisen die Anlagen deutliche herstellerspezifische Unterschiede in der anlagentechnischen Realisierung zur Aufteilung der Verbrennungsluftströme auf. Prinzipiell wird die Primär- und Sekundärluft über folgende Einrichtungen in den Feuerraum eingebracht:

- Ein drehzahlgeregeltes Verbrennungsluftgebläse jeweils für Primär- und Sekundärluft
- Ein drehzahlgeregeltes Verbrennungsluftgebläse mit einer automatisch geregelten Verbrennungsluftklappe jeweils für Primär- und Sekundärluft
- Ein drehzahlgeregeltes Verbrennungsluftgebläse für Primär- und Sekundärluft

- Ein drehzahlgeregeltes Verbrennungsluftgebläse mit jeweils einer manuell regelbaren Verbrennungsluftklappe für Primär- und Sekundärluft

Besonders ältere Modelle weisen durch ihre anlagentechnische Ausstattung, z. B. mit nur einem drehzahlgeregeltem Verbrennungsluftgebläse, weniger umfangreiche Möglichkeiten zur getrennten Regelung der Primär- und Sekundärluft auf. Im Unterschied dazu bieten neue Modelle z. B. mit zwei drehzahlgeregelten Verbrennungsluftgebläsen ausreichende Möglichkeiten für eine gezielte Anpassung der Verbrennungsluft in Abhängigkeit von den Anforderungen des Verbrennungsprozesses.

Brennkammer Um eine schadstoffarme Verbrennung zu gewährleisten, muss ein möglichst vollständiger Ausbrand der freigesetzten gasförmigen Schadstoffe erfolgen. Hierfür sind hersteller-spezifisch unterschiedliche konstruktive Ausführungsformen für die Brennkammer am Markt verfügbar. Grundsätzlich kann bei den untersuchten Anlagen zwischen einer vertikalen und horizontalen Aufstellung der Brennkammer unterschieden werden, wobei Unterschubfeuerungen eine vertikale Aufstellung und Mulden- bzw. Tunnelbrenner meist eine horizontale Aufstellung aufweisen. Bei den Rostfeuerungen sind jeweils beide Ausführungsformen möglich. Die Brennkammer und die nach geschalteten Rauchgaszüge sind thermisch und korrosiv hoch belastete Anlagenbestandteile, die eine entsprechende konstruktive und werkstoffseitige Auslegung erfordern. Die Minderung der thermischen Belastung von Werkstoffen kann durch eine Wasserkühlung an der äußeren Mantelfläche erfolgen. Brennkammern die als Reaktionsrohre ausgeführt sind, können ausgetauscht werden. Im Unterschied dazu erlauben andere Ausführungsformen keinen direkten Austausch der Brennkammer. Im Allgemeinen kommen für die Brennkammern folgende Werkstoffe zum Einsatz:

- hitze- und zunderbeständige Edelmehle, z. B. 1.4571 oder 1.4404
- Gusswerkstoffe und unlegierte Stähle mit starkwandiger Ausführung (6 bis 8 mm)
- Schamottsteine

Wärmeübertrager Die bei der Verbrennung entstehende Wärme wird bei allen untersuchten Anlagen über einen integrierten Wärmeübertrager an das Heizwasserkreislaufsystem abgegeben. Eine Klassifizierung der Wärmeübertrager kann anhand folgender Kriterien erfolgen:

- horizontale oder vertikale Aufstellung
- Reinigung manuell oder automatisch (mechanisch, pneumatisch)
- verwendete Werkstoffe (Edelstahl oder starkwandig ausgeführter, unlegierter Stahl)

Die Wärmeübertrager werden ausschließlich als Rohrbündelwärmeübertrager ausgeführt, die entweder horizontal oder vertikal aufgestellt werden. Dabei wird die vertikale Aufstellung der Wärmeübertrager insbesondere bei neuen Modellen verbreitet eingesetzt. Laut Herstellerangaben kann durch die Umlenkung der Rauchgase in die vertikalen Wärmeübertragerröhren eine Vorabscheidung grober Flugaschepartikel in einer vorgeschalteten Ascheabsetzkammer erfolgen. Bei einer automatischen Abreinigung der rauchgasseitigen Wärmeübertragerflächen kann die anfallende Aschefracht mittels Schwerkraft direkt in den Aschekasten transportiert werden. Die

Reinigung der Wärmeübertrager erfolgt bei neuen Modellen ausschließlich automatisch durch mechanische Reinigungseinrichtungen wie z. B.: Wirbulatoren (Turbulatoren) und vereinzelt pneumatisch mittels Druckluft. Im mittleren Anlagenleistungsbereich kann die Reinigung durch Rückführung eines Abgasteilstromes in den Wärmeübertragern erfolgen. Ältere Modelle müssen in der Regel manuell während der Stillstandszeiten der Kesselanlage gereinigt werden. Neben der automatischen Reinigung der rauchgasseitigen Wärmeübertragerflächen bietet die geeignete Werkstoffwahl einen wirkungsvollen Schutz gegen Korrosion. Hierbei sind zwei Ausführungsvarianten möglich. Zum einen werden einige neue Modelle mit Wärmeübertragern aus Edelstahl ausgeführt und zum anderen kommen starkwandig ausgeführte Wärmeübertrager (Wanddicke 4,5 bis 6 mm) aus unlegiertem Stahl zum Einsatz. Neben der sich an den rauchgasseitigen Wärmeübertragerflächen ablagernden Flugasche fällt der mengenmäßig größte Teil der Asche bei der Verbrennung im Feuerraum an. Je nach Brennstoff und Feuerraumtemperatur kann die Asche einen hohen Verschlackungsgrad aufweisen, wodurch erhöhte Anforderungen an das Entschlackungssystem der Feuerungsanlage gestellt werden. Ältere Modelle besitzen im Wesentlichen einen halbautomatischen Ascheaustrag, d. h. die Asche wird durch den nachgeförderten Brennstoff in einen Aschekasten innerhalb des Feuerraumes ausgetragen. Zusätzliche Einrichtungen zur Austragung größerer Ascheagglomerate bzw. Verschlackungen sind nur bei einem kleinen Anteil der untersuchten Anlagen vorgesehen. Lediglich die Muldenfeuerung Compact C der Firma Ökotherm und die Feuerung der Firma Heizomat, Typ RHK AK sind mit speziellen Ascheaustragsystemen (Ascheschieber bzw. Kettenumlaufrost) ausgestattet. Neue Modelle weisen meist eine Ascheaustragschnecke auf, um die Asche automatisch in einen externen Aschebehälter zu transportieren. Ab einem Leistungsbereich von 100 kW kann der Ascheaustrag auch durch einen Kratzkettenförderer erfolgen. Neben den mechanischen Entschlackungssystemen können auch pneumatische Austragsysteme eingesetzt werden, wobei ggf. eine Vorzerkleinerung der Asche durch ein Aschezermahlssystem notwendig wird.

Regelungstechnik

Die Verbrennung nicht holzartiger Festbrennstoffe erfordert aufgrund erhöhter schadstoffbildender Elemente und der erhöhten Verschlackungsneigung der Feuerraumasche besondere Anforderungen an die Regelung des Verbrennungsprozesses. In Abhängigkeit der anlagentechnischen Ausstattung sind unterschiedliche Regelungskonzepte und -möglichkeiten am Markt verfügbar. Grundsätzlich kann zwischen der Verbrennungs- und Leistungsregelung unterschieden werden, wobei alle untersuchten Anlagen mit einer Leistungsregelung ausgestattet sind und einen Teillastbetrieb bis zu 30 % der Nennwärmeleistung ermöglichen. Bei älteren Modellen erfolgt die Leistungsregelung oftmals in zwei oder drei Stufen in Abhängigkeit von einer festgelegten Kesseltemperatur. Im Unterschied dazu ermöglichen neue Modelle eine stufenlose Leistungsregelung und sind standardmäßig mit einer Verbrennungsregelung ausgestattet, wodurch eine möglichst schadstoffarme Verbrennung ermöglicht werden kann. Die Regelmöglichkeit und -genauigkeit hängt im Wesentlichen von der Programmierung der Steuerung und der Abstimmung auf die anlagentechnischen Einrichtungen des Kessels ab. In Tabelle 9 sind mögliche Stell- und Regelgrößen der Verbrennungs- und Leistungsregelung aufgelistet, wobei weiterführende Angaben zu den Regelkonzepten aufgrund der vorhandenen Datenbasis nicht ermittelt werden können. Weitere Regel- und Steuereinrichtungen zielen auf eine verbesserte Kontrolle des

Verbrennungsprozesses ab oder erhöhen die Systemintegrität des Kesselsystems. Zur verbesserten Kontrolle des Verbrennungsprozesses können eine Feuerraumtemperatur-, Aschetemperatur- und Glutbetthöhenüberwachung zum Einsatz kommen. Eine Unterdrucküberwachung bzw. -regelung des Feuerraumes kann stabile Verbrennungsbedingungen und konstante Zugbedingungen des Schornsteins sicherstellen. Hierfür kommen zusätzlich Saugzuggebläse zum Einsatz, die entweder drehzahl geregelt oder mit einer Regelklappe ausgestattet werden. Um die Kessel in verschiedene (bestehende) Systeme zu integrieren werden standardmäßig Heizkreis-, Pufferspeicher- bzw. Kaskadenregelsysteme vorgesehen, die eine flexible Kopplung mit weiteren Kesseln, mit Pufferspeichern oder weiteren Systemen wie beispielsweise solarthermischen Anlagen ermöglichen.

Tabelle 9: Regel- und Stellgrößen der untersuchten Kesselanlagen

Verbrennungsregelung	
Regelgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Lambda, O₂-Gehalt • Abgastemperatur • Abgastemperatur und Lambda
Stellgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Verbrennungsluftgebläse • Sekundärluftmenge
Leistungsregelung	
Regelgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Kesseltemperatur • Kesseltemperatur (gestuft) • Kesselwasser- und Abgastemperatur
Stellgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Brennstoffmenge • Brennstoff- und Luftmenge • Brennstoff- und Primärluftmenge

3.1.3 Maßnahmen zur Verbrennungsoptimierung

Zusammenfassend werden die Kesselanlagen gezielt auf die Hauptproblemfelder und Minderungsstrategien untersucht. Im Rahmen des Projektes sind insbesondere Maßnahmen zur Minderung von Staub- und Stickoxidemissionen sowie von Korrosionserscheinungen und Verschlackungen von Bedeutung. Besonders mit kleiner werdenden Anlagenleistungen sind diese Maßnahmen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten oft schwer zu realisieren.

Stickoxidemissionen Zur Minderung von Stickoxidemissionen wird bei allen untersuchten Anlagen die Verbrennungsluft gestuft als Primär- und Sekundärluft in den Feuerraum eingebracht. Weitere Möglichkeiten zur Stickoxidminderung können durch eine Abgasrückführung oder durch eine in drei Zonen gestufte Luftzuführung (Primär- Sekundär- und Tertiärluft) umgesetzt werden, wobei diese Maßnahmen erst ab einem Leistungsbereich von etwa 100 kW zum Einsatz kommen. Die Wirksamkeit zur Minderung der Stickoxidemissionen hängt anlagenseitig vor allem vom Sauerstoffgehalt im Abgas während des Anlagenbetriebes ab /Hartmann 2007/.

Staubemissionen Die Reduzierung von Staubemissionen wird insbesondere durch konstruktive Maßnahmen und dem Einsatz sekundärer Abscheider erzielt. Laut Angaben mehrerer Hersteller kann eine Abscheidung von Flugaschepartikeln mittels Fliehkraft in einer Ascheabsetzkammer erfolgen. Da sich der Großteil der Staubpartikel aus der Verbrennung nicht holzartiger Festbrenn-

stoffe jedoch aus Fraktionen kleiner 2,5 µm zusammensetzt /Kiesewalter 2008/, ist eine wirksame Minderung der Staubemissionen durch diesen Abscheidemechanismus nicht zu erwarten. Sekundäre Abscheider sind derzeit Bestandteil verschiedener Forschungsvorhaben, wobei bisher nur wenige anlagentechnische Lösungen im Leistungssegment < 100 kW am Markt verfügbar sind. Aufgrund niedrigerer spezifischer Investitionen können in einem Leistungsbereich > 100 kW Staubabscheider bereits zum Einsatz kommen, wobei die Abscheideleistung insbesondere von der Partikelgrößenverteilung und von der eingesetzten Abscheidetechnik abhängt. Hierbei kommen vor allem Gewebe-, Metall- und Elektrofilter sowie Zyklonabscheider und Abgaskondensationsanlagen zum Einsatz.

Korrosion Die Minderung von Korrosionsschäden an den rauchgasseitigen Wärmeübertragerflächen kann im Wesentlichen durch eine geeignete Wahl von Werkstoffen (z. B. Edelstahl 1.4571 oder starkwandig ausgeführter unlegierter Stahl), regelmäßigen automatisierten Reinigungsintervallen und der Vorgabe von Mindestrücklauftemperaturen (mindestens 55 bis 60 °C) realisiert werden. Zudem sind Brennkammern, die als vertikal aufgestellte Reaktionsrohre ausgeführt sind, im Falle von Korrosionsschäden leicht austauschbar.

Verschlackungen Verschlackungserscheinungen der Feuerraumasche während der Verbrennung können zu erheblichen Störungen beim Anlagenbetrieb führen. Um einerseits die Verschlackung der Asche zu vermeiden und andererseits einen möglichst störungsfreien Betrieb der Anlagen mit entstandenen Ascheagglomeraten zu gewährleisten, können verschiedene Maßnahmen zur Temperaturkontrolle bzw. -begrenzung des Feuerraumes und Glutbettes realisiert werden. Hierzu zählen luft- oder wassergekühlte Rost- und Retortensysteme sowie die Überwachung bzw. Regelung der Feuerraumtemperatur (z.B. durch Abgasrezirkulation). Um den Ascheschmelzpunkt der Brennstoffe zu erhöhen, werden vereinzelt Systeme zur automatischen Zudosierung von Additiven in den Feuerraum (z. B. Branntkalk) eingesetzt. Anfallende Ascheagglomerate im Bereich des Glutbettes werden durch mechanische Einrichtungen in Bewegung gehalten und in den Aschebehälter abtransportiert. Beispiele hierfür sind Ascheschieber in Muldenfeuerungen, bewegte Rostelemente bei Rostfeuerungen oder Rührelemente bei Unterschubfeuerungen. Dennoch können diese Einrichtungen im Falle eines hohen Verschlackungsgrades der Feuerraumasche einen störungsfreien Anlagenbetrieb nicht immer sicher gewährleisten.

3.2 Abscheidertechnologien

3.2.1 Systematik der Staubabscheider

Für industrielle Anlagen gehören Sekundärmaßnahmen zur Abscheidung partikelförmiger Verunreinigungen in Prozess- und Abgasen seit Jahrzehnten zum Stand der Technik. Systeme zur Abscheidung von partikelförmigen Bestandteilen aus Gasströmen können nach vier Wirkmechanismen unterschieden werden, deren Vor- und Nachteile in Tabelle 10 beschrieben sind.

Tabelle 10: Vor- und Nachteile verschiedener Abscheidetechnologien

Abscheide-technologie	Vorteile	Nachteile
Elektrostatischer Abscheider	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Abscheidegrad, insbesondere von kleinen Partikeln • bei trockenen und feuchten Abscheidebedingungen einsetzbar • geringer Druckverlust • keine bewegten Teile 	<ul style="list-style-type: none"> • Versorgung mit Elektroenergie notwendig • Einsatz von hohe Spannungen erfordert Schutzmaßnahmen • Entfernung der an der Abscheideelektrode angesammelten Partikel
Filter	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Abscheidegrad, insbesondere von kleinen Partikeln 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Druckverlust • Nur bei trockenen Abscheidebedingungen einsetzbar • Nur in einem begrenzten Temperaturbereich einsetzbar • Hoher technischer Aufwand für automatische Reinigung erforderlich
Abgas-kondensations-anlage	<ul style="list-style-type: none"> • Können ggf. in die Feuerung integriert werden • bei trockenen und feuchten Abscheidebedingungen einsetzbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz nur wenn Heizkreissystem und Abwasseranschluss vorhanden sind • Abscheidegrad ist abhängig von der Kondensationsrate • Entsorgung und Umweltwirkungen der anfallenden Kondensatschlämme
Katalytischer Abscheider	<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Konstruktion • Abscheidung von Partikeln und gasförmigen Abgasbestandteilen (z.B. PAK) • Geringe spezifische Investitionen 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringer Abscheidegrad • Kein automatischer Betrieb möglich • Hohe Abgastemperaturen notwendig, die einen niedrigen thermischen Wirkungsgrad nach sich ziehen

Massenkraftabscheider umfassen alle mechanischen Abscheider, bei denen die Trennung von Gasstrom und Partikel durch Schwer-, Trägheits- oder Zentrifugalkräfte erfolgt (Abbildung 6). Diese Abscheiderart ist vorrangig für größere Partikel geeignet und ist für Kleinfeuerungsanlagen als alleiniger Abscheider nicht geeignet.

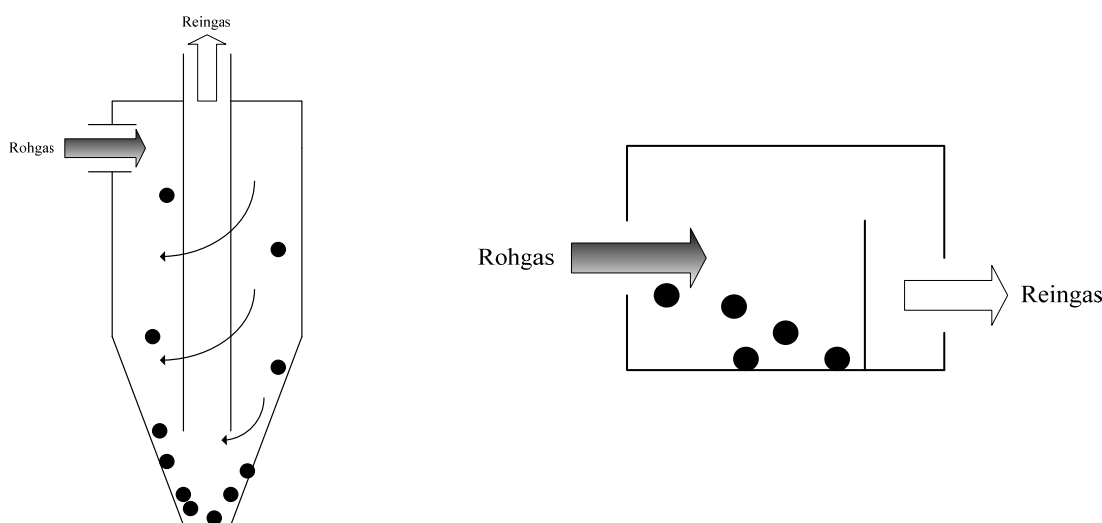


Abbildung 6: Massekraftabscheider (links Zyklon; rechts Schwerkraftabscheider)

Elektrostatische Abscheider erreichen die Abtrennung der Partikel durch Aufladung unter Einwirkung eines elektrischen Feldes mit hoher Gleichspannung und der anschließenden Abscheidung der geladenen Partikel auf einer leitende Niederschlagsfläche mit abweichender Ladung /Ebeling 1999/. Neben dem klassischen elektrostatischen Abscheider (Abbildung 7) wurde insbesondere für Kleinfeuerungsanlage auf Basis des Penney-Prinzipies ein neuer Abscheidertyp entwickelt (Abbildung 8). Beim klassischen elektrostatischen Abscheider liegen Aufladezone und Abscheidezone parallel.

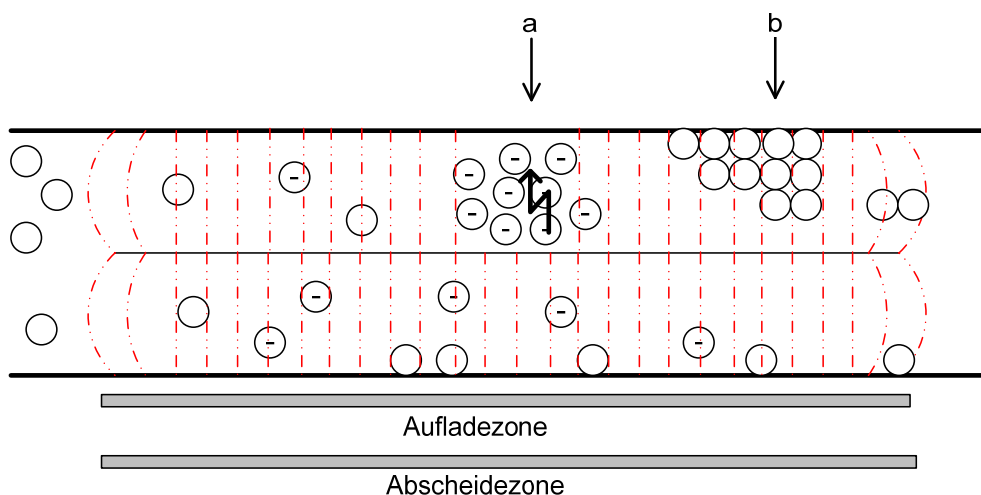


Abbildung 7: Klassischer elektrostatischer Abscheider

Betriebsstörungen treten meist aus folgenden Gründen auf. Zwischen Sprühelektrode und Abscheideelektrode befinden sich so viele Ladungsträger (hohe Raumladung), dass eine erneute Ionisation oder Bildung leitfähiger Brücken im Abgas stattfindet. Durch das Herabsetzen des Widerstandes des Abgases im elektrischen Feld kommt es zu Spannungüberschlägen, welche die Aufladung der Partikel unterbricht (Beispiel a). Bei unzureichender Abreinigung und schlecht leitfähigen Stäuben kann sich auf der Oberfläche der Abscheideelektrode eine isolierende Staubschicht bilden. Dadurch wird das elektrische Feld verringert und es kann innerhalb der Staubschicht zu Spannungüberschlägen kommen (Rücksprühen), welche schon abgeschiedene Stäube wieder in den Abgasstrom zurückwerfen (Beispiel b).

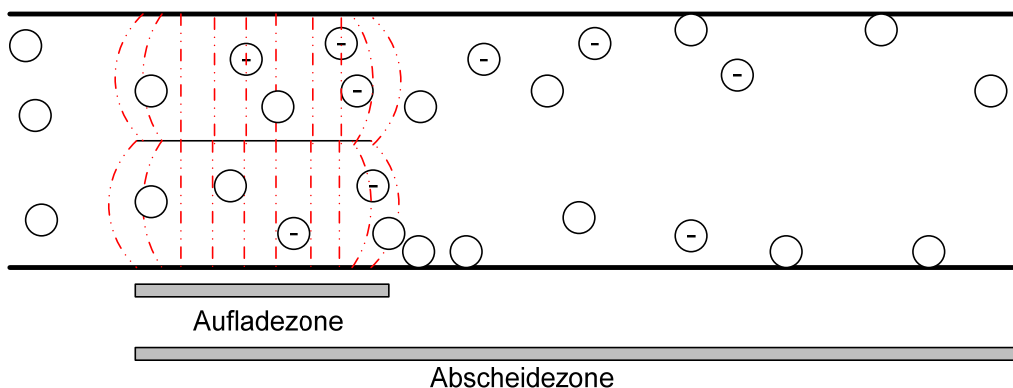


Abbildung 8: Neuartiger elektrostatischer Abscheider

Beim Penney-Prinzip sind Aufladzone und Abscheidezone getrennt und können mit unterschiedlich starken elektrostatischen Feldern und Polaritäten beaufschlagt werden. Bei den neu entwickelten Abscheidern wird auf das zusätzliche Aufbau eines elektrischen Feldes in der Abscheidezone verzichtet. Durch das kürzen der Aufladzone können jedoch die Partikel bei zu geringen Verweilzeiten in der Aufladzone nicht vollständig geladen werden und passieren den Abscheider. Durch das fehlende Feld in der Abscheidezone ist die Wanderungsgeschwindigkeit der Partikel in Richtung Abscheideelektrode gering.

Filternde Abscheider bestehen für Anwendungen in heißen Gasströmen aus hitzebeständigen Metall- oder speziellen Stoffgeweben oder aus Schüttungen oder Sinterkörpern hitzebeständiger Materialien. Die Partikelabscheidung bei filternden Abscheidern beruht auf verschiedenen Mechanismen (Abbildung 9). Für die größeren Staubpartikel mit einem mittleren Durchmesser $> 1 \mu\text{m}$ ist der maßgeblich verantwortliche Abscheidemechanismus der Trägheitseffekt. Vor allem bei hohen Anströmgeschwindigkeiten folgen diese Partikel nicht den Stromlinien des Gases, sondern gelangen infolge ihrer Trägheit an die Oberfläche der Faser an der die Partikel aufgrund von Haftkräften gebunden werden können. Zusätzlich erfolgt eine Abscheidung von Partikeln durch den Sperrereffekt. Hierbei folgen die Partikel der Stromlinienbahn des Gases trägheitslos und treten allein aufgrund ihrer geometrischen Form mit der Faser in Berührung. Bei feineren Partikeln mit einem mittleren Teilchendurchmesser $< 1 \mu\text{m}$ erfolgt der Kontakt zwischen Faser und Partikel hauptsächlich durch die Brownschen Molekularbewegung. Eine zusätzliche Abscheidung, vor allem feiner Partikel, erfolgt aufgrund elektrostatischer Kräfte, die durch einen gezielt aufgebracht oder indirekt entstandenen Ladungsunterschied zwischen Partikel und Faser entstehen.

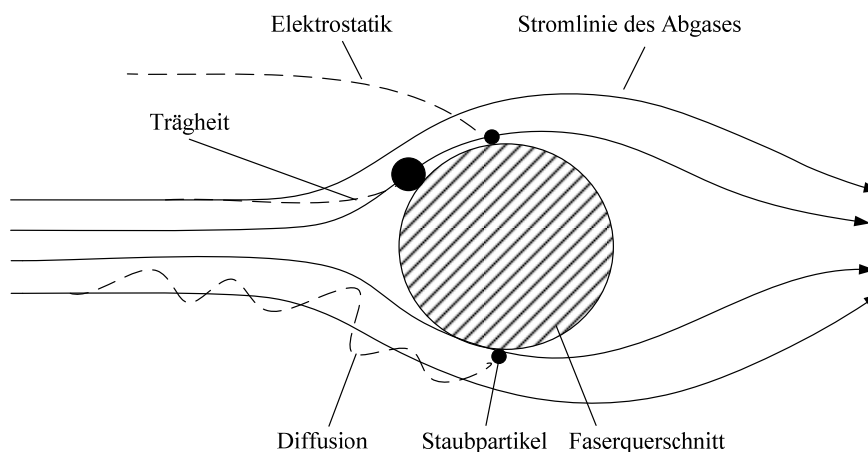


Abbildung 9: Prinzipien der filternden Abscheidung

Nassabscheider beruhen auf dem Prinzip, die im Abgasstrom verteilten Partikel mit einer Waschflüssigkeit in Kontakt zu bringen, um die Partikel darin zu binden und teilweise zu lösen. Das auf diese Weise entstehende Partikel-Flüssigkeitsgemisch wird vom Gasstrom getrennt und abgeschieden. Anschließend erfolgt eine Aufbereitung der beladenen Waschflüssigkeit. In vielen Fällen müssen nachgeschaltete Tropfenabscheider die Waschflüssigkeit aus dem Abgasstrom entfernen. In Abhängigkeit der eingesetzten Waschflüssigkeit können auch gasförmige Emissionen vermindert werden. Eine Sonderform sind Abgaskondensationsanlagen, bei denen durch eine Taupunktunterschreitung Kondensat im Abgas gebildet wird, wobei als Kondensationskeime die

vorhandenen Partikel genutzt werden. Die so vergrößerten Partikel lassen sich anschließend durch Massenkräfte abscheiden.

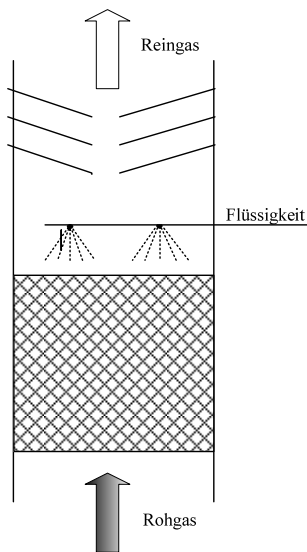


Abbildung 10: Abgaswäscher

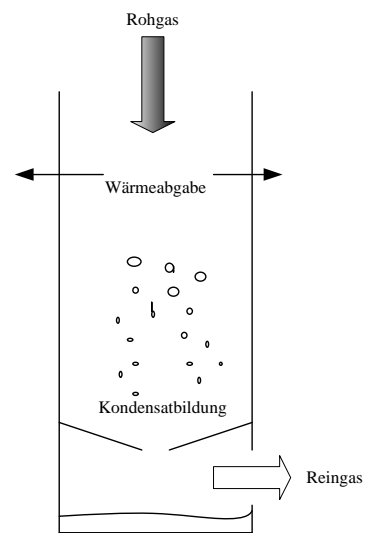


Abbildung 11: Abgaskondensator

Kombinationsverfahren. Erfolgversprechend sind auch Kombinationen mehrerer Verfahren. So können beispielsweise Massenkraftabscheider als Vorabscheider eingesetzt werden, um die nachfolgende Reinigungsstufe zu entlasten.

Katalysatoren bilden eine eigene Gruppe der Abgasnachbehandlungsverfahren. Im Gegensatz zu den Staubabscheidern, die Feststoffe aus dem Gasstrom entfernen, zielen Katalysatoren auf die Umsetzung von gasförmigen Abgasbestandteilen ab. Viele Katalysatoren wirken darüber hinaus wie filternde Abscheider, deren Abreinigung von brennbaren Stäuben bei ausreichend hohen Temperaturen katalytisch unterstützt wird. Ihr Einfluss auf gasförmige Emissionen, welche zu einem späteren Zeitpunkt auch zum Partikelwachstum beitragen könnten, bleibt bei dieser Betrachtung unberücksichtigt. Da in der Literatur auch hinsichtlich der reinen Partikelabscheidung eine Unterscheidung zwischen filternden Abscheider und Katalysator üblich ist, soll diese auch in dieser Veröffentlichung Anwendung finden.

3.2.2 Bewertung von Staubabscheidern

Für die Bewertung von Staubabscheidern existiert weder auf nationaler noch auf europäischer Ebene ein abgestimmtes Verfahren. In der Schweiz wird eine Bewertung aufgrund der Partikelanzahl im Roh- und Reingas vorgenommen /Griffin 2008/, welches jedoch nicht unumstritten ist /Ulbricht 2011/. In Abhängigkeit von den Staubeigenschaften können der gravimetrisch Abscheidegrad und der anzahlbezogene Abscheidegrad erheblich voneinander abweichen /Lauer 2010/. Für die messtechnische Bewertung wird in Deutschland derzeit eine DIN-Norm vorbereitet.

Da ohne Kenntnis des Messverfahrens, des Messaufbaus und der Randbedingungen (Abgasvolumenstrom, Staubzusammensetzung, Staubbeladung des Rohgases u.a.) eine Interpretation des Abscheidegrades nicht möglich ist, wird im Rahmen dieser Veröffentlichung auf die Angabe dieses

Zahlenwertes verzichtet. Wenn verbale Aussagen zum Abscheidegrad gemacht werden, beziehen sich diese auf die Interpretation des Autors der zugrundeliegenden Quelle.

3.2.3 Abscheider für Biomassekleinfeuerungsanlagen

Bis Ende der 1990er Jahre spielten Staubabscheider für Kleinfeuerungsanlagen mit einer Feuerungsleistung unter 1 MW keine Rolle. Entstaubungstechnik wurde fast ausschließlich in der Industrie- und Kraftwerkstechnik sowie im Handwerk (Staubabscheider in der Holzverarbeitung) eingesetzt. Im Zuge der Diskussion um die Gefahren von Feinstaub und dessen Minderungspotenzial in den 2000er Jahren gerieten auch Kleinfeuerungsanlagen im Allgemeinen und Biomassefeuerungen im Besonderen in den Fokus der Öffentlichkeit. Im Zuge dieser zum Teil sehr kontrovers geführten Diskussionen wurde im März 2010 die 1. Verordnung zum Bundesimmissionschutzgesetz (1. BImSchV) novelliert und bezüglich der Staubemissionsgrenzwerte deutlich verschärft /1. BImSchV 2010/.

Bereits im Zuge der Diskussionen zu den Grenzwerten wurden verschiedene Ansätze für Maßnahmen zur Emissionsminderung erarbeitet. Dabei zeichneten sich zwei unterschiedliche Wege ab. Der von vielen Feuerungsherstellern favorisierte Weg war die Optimierung der Feuerung durch eine Weiterentwicklung der Brennraumgeometrie, der Luftzuführung und Regelung. /Oser 2004/. Eine andere Möglichkeit ist das Abscheiden der Partikel nach der Feuerung. Hierbei wurde meist auf Erfahrungen im Großanlagenbereich zurückgegriffen bzw. diese übernommen. Systematische Untersuchungen zu Abscheidern an Biomassekleinfeuerungsanlagen und darauf aufbauende Entwicklungen sind selten. Im Folgenden soll der Stand der Staubabscheider für Biomassekleinfeuerungen (schwerpunktmäßig bis 50 kW Feuerungsleistung) dargestellt und die Entwicklungen skizziert werden. Dabei werden auch die Produkte aufgenommen, welche in früheren Veröffentlichungen als Möglichkeit zur Emissionsminderung aufgeführt wurden, jedoch vom Hersteller nicht für diesen Zweck vorgesehen sind. Diese werden gesondert gekennzeichnet.

3.2.4 Entwicklungen für Feuerungsleistungen < 50 kW

Der Kleinanlagenbereich erstreckt sich zwischen < 4 und > 500 kW Feuerungsleistung über einen weiten Bereich. Im unteren Bereich sind Feuerungen für den Privathaushalt (Kaminöfen, Heizkessel) angesiedelt, während im oberen Bereich Feuerungen für Gewerbeimmobilien und öffentliche Einrichtungen zu finden sind. Zwar eignen sich Staubabscheider meist für einen größeren Leistungsbereich, jedoch kann mit einer Bauart nicht der gesamte Bereich sinnvoll abgedeckt werden. Aus diesem Grund zielen einige Entwicklungen auf den Privathaushalt mit Feuerungsleistungen weit unter 50 kW und Einzelraumfeuerungen ab, während andere den Markt um 100 kW Feuerungsleistung erschließen möchten. Im Übergangsbereich können mehrere parallel betriebene Abscheider für kleine Feuerungsleistungen oder die kleinsten Baugrößen der Baureihen größerer Abscheider eingesetzt werden. Grundlage dieser Veröffentlichungen bilden Berichte öffentlicher Forschungsprojekte, Veröffentlichungen über Abscheideruntersuchungen und Firmenangaben. Bei Systemen, bei denen nur Firmenangaben vorhanden sind, können in der Regel die wenigsten konkreten Informationen gegeben werden.

3.2.5 Entwicklungen für Feuerungsleistungen > 100 kW

In dieser Leistungsklasse sind erste Abscheider der etablierten Hersteller für Staubabscheidertechnik verfügbar. Meist wurden die Entwicklungsschritte nicht öffentlich gefördert und somit nicht nachvollziehbar publiziert. Für einige Abscheider sind Baugrößen sowohl unter 50

kW wie auch über 100 kW verfügbar. Diese Abscheider werden bei den Kleinanlagen beschrieben und sind hier nicht extra aufgeführt.

3.2.6 Entwicklungsstand

Für eine breite Markteinführung ist eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung notwendig, da ansonsten der Einbau des Abscheiders einer Einzelgenehmigung durch die Bauaufsicht bedarf. Erst seit 2010 sind die behördeninternen Grundlagen für die Zulassung von Staubabscheidern geschaffen, so dass sich die Zulassung der meisten Abscheider verzögert hat. In den vergangenen Jahren wurden einige herstellerunabhängige Untersuchungen an Staubabscheidern für Kleinfeuerungsanlagen durchgeführt /Vulca-Tech 2011/ /Ulbricht 2010/ /Kiener 2010/ /Holzenergie-Emmental 2007/. Die wichtigsten Ergebnisse sind im Folgenden aufgelistet.

Elektrostatische Abscheider

Den geringsten Eingriff in das Gebäude stellt meist der Einbau des Abscheiders auf dem Schornsteinkopf dar. Dafür muss der Abscheider jedoch bezüglich Wartung und Reinigungsmöglichkeit ausgelegt sein. Eine Installation im Wohnraum ist teilweise mit größeren Eingriffen verbunden. Weiterhin ist die Akzeptanz der Abscheider im Wohnraum gering. Insbesondere Lüftergeräusche und im Störfall Überschläge führen zu Lärmbelästigungen. Der nachträgliche Einbau eines Abscheiders in den Abgasweg kann in Einzelfällen zu Zugproblemen führen. Besonders bei Abscheidern mit eigenem Gebläse muss der Zug an der Feuerung kontrolliert werden. Ggf. müssen die Gebläse aufeinander abgestimmt werden /Kiener 2010/. Die Messungen an Holzfeuerungen zeigen akzeptable Abscheidegrade. Beim Einsatz von Agrarbrennstoffen sinken die Abscheidegrade vielfach deutlich ab /Ulbricht 2010/ /Ulbricht 2011-2/. Während der Untersuchungen konnten folgende Betriebsstörungen beobachtet werden. Diese führten zwar zur Funktionsbeeinträchtigung bzw. zum Ausfall des Abscheiders, eine Gefahr für Personen oder Sachwerte bestand jedoch nicht /Schleicher 2010/ /Schleicher 2011/ /Ulbricht 2010/ /Kiener 2010/:

- Verschmutzungen der Isolatoren und Elektroden
- Elektronikstörungen
- Spannungsüberschläge
- Ausfall der Spülluft
- Elektrodenbruch

Alle Untersuchungen sehen hinsichtlich der Standzeiten und Abreinigung noch Optimierungsbedarf.

Katalysatoren

An einer Vergleichsmessung teilgenommen hat bisher nur ein Katalysator /Schleicher 2010/ /Schleicher 2011/. Ergebnisse sind nicht bekannt. Vergleiche und Feldmessungen unterschiedlicher marktnaher Katalysatoren an realen Feuerungen wurden bisher nicht veröffentlicht.

Nassabscheider / Wäscher

Ein Vergleich unterschiedlicher Nassabscheider für Kleinfeuerungsanlagen ist nicht bekannt. In den bekannten Untersuchungen wurde meist ein Nassabscheider mit anderen Staubabscheidern

verglichen /Lenz 2010/ /Ulbricht 2011-2/. Dabei wurden im Vergleich zu elektrostatischen Abscheidern deutlich geringere Abscheidegrade erreicht. Die um ca. 10 % höhere Wärmeausbeute durch die Brennwertnutzung bleibt bei diesen Betrachtungen unberücksichtigt. Technische Probleme im Betrieb traten nicht auf. Betriebserfahrungen aus Feldmessungen liegen nicht vor.

3.2.7 Marktverfügbarkeit

Alle Bauprodukte benötigen eine behördliche Zulassung /MBO 2008/. Bauordnungsrechtlich besteht eine Feuerungsanlage aus einer Feuerstätte und einer Abgasanlage. Alle Einbauten in Abgasanlagen, wie z.B. Klappen und Staubabscheider, unterliegen somit den bauordnungsrechtlichen Vorschriften für Feuerungsanlagen und müssen für die Verwendung zugelassen sein. In Deutschland ist das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) für die Zulassungserteilung zuständig. Liegen für ein Produkt konkrete Anforderungen und Prüfvorgaben vor, werden diese als geregelte Bauprodukte bezeichnet. Hierzu zählen beispielsweise Raumheizer nach DIN EN 13240 und Heizkessel nach DIN EN 303. Ist ein Staubabscheider integraler Bestandteil dieser Feuerung, werden Feuerung und Abscheider gemeinsam nach den geltenden Regeln geprüft. Der Staubabscheider darf anschließend nur mit der zugehörigen Feuerung verwendet werden. Da für separate Staubabscheider bisher keine verbindlichen Prüfvorschriften festgelegt wurden, handelt es sich um nichtgeregelte Bauprodukte, welche eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung benötigen. Der Umfang der Prüfung wird im Einzelfall durch das DIBt festgelegt. Nach dem Geräte- und Produktsicherheitsgesetz dürfen bei bestimmungsgemäßem Betrieb und bei vorhersehbaren Fehl- anwendungen keine Gefahren für die Sicherheit und Gesundheit von Personen und Sachwerten auftreten. In die Prüfung eines Abscheiders als Bestandteil der Feuerungsanlage werden deshalb Brandsicherheit, Sicherheit gegen das Auftreten bzw. Austreten gesundheitsgefährdender Stoffe, mechanische Festigkeit und elektrische Sicherheit einbezogen. Dabei erfolgt beispielsweise eine Prüfung bezüglich der Rußbrandbeständigkeit, wobei der Abscheider Temperaturen von 500 °C bzw. 1000 °C ausgesetzt wird. Nach dieser Belastung müssen die Schutzfunktionen z.B. gegen den Austritt von Abgasen oder die elektrische Sicherheit noch gewährleistet sein. Als Voraussetzung für die Zulassung muss der Abscheider einem gravimetrisch bestimmten Mindestabscheidegrad von 30 % aufweisen. Eine Zusammenfassung von marktverfügbaren Abscheidertechnologien und bisherigen technischen Entwicklungen kann aus Tabelle 11 entnommen werden.

Tabelle 11: Übersicht zu marktverfügbaren Abscheidetechnologien und bisherigen technischen Entwicklungen

Abscheideprinzip	Produkt	Einsatzbereich [kW]	Einsatzgebiet	Hersteller	Marktverfügbarkeit	Preis	Lizenz	Abscheidegrad / Reingaskonzentration	Webseite
Elektrostatisch	AL-Top	< 100	Kessel	Schröder Abgastechnik	x	9,800 € incl. 1 maintenance		< 82 %	www.schraeder.com
Elektrostatisch	CAROLA	< 100	Kessel	Karlsruhe Institute of Technology	-				www.kit.edu
Elektrostatisch	CLEAN AIR / R ESP	< 100	Kessel	Applied Plasma Physics	x				www.app.no
Elektrostatisch	-	< 100	Kessel	Schiedel AG					www.schiedel.de
Elektrostatisch	-	< 100	Kessel	ILK Dresden					www.ilkdresden.de
Elektrostatisch	Feinstaubkiller	< 100	Kessel	TH Alternativ-Energie GmbH	x			< 70 %	www.feinstaubkiller.com
Elektrostatisch	Mini-E-Filter	< 100	Kessel	G&M E-Filter	x	14,900 CHF		> 90 %	www.gmefilter.ch
Elektrostatisch	-	< 100	Kessel	A.P. Bioenergietechnik	x (in Vorbereitung)				www.oeko-therm.net
Filternd	-	> 100	Kessel	A.P. Bioenergietechnik	x				www.oeko-therm.net
Elektrostatisch	OekoTube (FUTUTERefinerie)	< 100	Kessel	OekoSolve (Schröder Abgastechnik)	x	1,590 €	Z-7.4-3451	> 95 %	www.oekotube.ch
Elektrostatisch	RuFF-Kat	< 100	Kessel	RuFF-Kat GmbH	x			< 95 %	www.ruff-kat.de
Elektrostatisch	SFF	< 100	Kessel	Spanner Re ²	x			75 % - 95 %	www.holz-kraft.de
Elektrostatisch	TRION Turmfilter	< 150	Kessel	INAIR Umwelttechnik	x				www.inair.ch
Elektrostatisch	Zumikron	< 100	Kessel	Rüegg Cheminée AG (Kutzner & Weber)	x		Z-7.4-3442	< 90 %	www.ruegg-cheminee.com www.kutzner-weber.de
Elektrostatisch	-	100 - 1000	Kessel	R&R	x				
Elektrostatisch	APSenergy TowerFilter	50 - 3300	Kessel	Advanced Particle Filters	x				www.apf.ag
Elektrostatisch	APSenergy RotaryFilter	50 - 2000	Kessel	Advanced Particle Filters	x				www.apf.ag

Tabelle 11: Übersicht zu marktverfügbaren Abscheidetechnologien und bisherigen technischen Entwicklungen (fortgesetzt)

Abscheideprinzip	Produkt	Einsatzbereich [kW]	Einsatzgebiet	Hersteller	Marktverfügbarkeit	Preis	Lizenz	Abscheidegrad / Reingaskonzentration	Webseite
Wäscher	Bomat	40 - 2200	Kessel	Bomat Heiztechnik GmbH	x				www.bomat.de
Wäscher	REITHER	> 100	Kessel	VVS Umwelttechnik	x				www.vss-ut.de/
Wäscher	-	< 100	Kessel	TU Dresden					www.tu-dresden.de
Wäscher	Ökocarbonizer	22 - 400	Kessel	Bschor GmbH	x		Z-43.31-200 Z-43.31-202	< 80 %	www.carbonizer.de
Massenkraft	Bioflamm®	> 50	Kessel	WVT - Wirtschaftliche Verbrennungs-Technik GmbH	x				www.bioflamm.de
Filternd	Bioflamm®	100 - 2000	Kessel	WVT - Wirtschaftliche Verbrennungs-Technik GmbH	x				www.bioflamm.de
Filternd	-	> 100	Kessel	KÖB Holzheizsysteme	x				www.kob.cc
-	Bioflamm®	30 - 400	Kessel	WVT - Wirtschaftliche Verbrennungs-Technik GmbH	x			< 150 mg/m ³	www.bioflamm.de
Elektrostatisch	Airbox	< 100	Kessel	Spartherm Feuerungstechnik	x			> 60 %	www.spartherm.de
Filternd	Alpha	< 100	Kessel	Herding AG	x			< 20 mg/m ³	www.herding.ch
Filternd	Schütttschichtfilter	< 100	Kessel	ATZ Entwicklungszentrum					www.atz.de
Filternd	High flux	< 100	Kessel	Fraunhofer UMSICHT					www.umsicht.fraunhofer.de
Filternd	KERA Top	< 100	Kessel	Schräder Abgastechnik					www.schraeder.com
Filternd	Offener Lamellenfilter	< 100	Kessel	Kliewe					www.kliewe.de

4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Neben einer technischen spielt die wirtschaftliche Machbarkeit eine zentrale Rolle. Bisher sind detaillierte Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit bei der Herstellung und energetischen Nutzung von Gärrestpellets kaum öffentlich verfügbar. Daher werden nachfolgend integrierte Konzepte zur Herstellung und energetischen Nutzung von Gärrestpellets dargestellt.

4.1 Annahmen für die Biogasanlage

Die Basis der untersuchten Varianten bildet eine in Eigenregie betriebene Biogasanlage mit einer elektrischen Nennleistung von 500 kW_{el} und einem Gärrestlager mit Gärresttrocknung. Aufgrund der geringen Größe der eigenen Flächen kommt es beim Betrieb der BGA zu einem Nährstoffüberschuss. Deshalb können nur angenommene 35 % der anfallenden Gärreste als Düngemittel genutzt werden (Abbildung 12). Für die übrige Menge soll ein Nutzungskonzept erstellt werden. Sämtliche Gärreste werden dabei direkt an der BGA mechanisch auf einen Wassergehalt von 70 % separiert.

Bei dem verwendeten BHKW handelt es sich um ein marktübliches Modell mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 35 % und einem thermischen Wirkungsgrad von 40 %. Die Nutzungsdauer des BHKW wird mit 10 und die der Biogasanlage wird mit 20 Jahren angenommen. Betrieben wird die BGA mit 60 % Maissilage für 30 €/t Frischmasse und 40 % Gülle für 3 €/t Frischmasse. Das BHKW erzeugt in 8.000 jährlichen Vollbenutzungsstunden insgesamt 4.000 MWh Strom. Die anfallende Nutzwärme wird zu 35 % für die Beheizung der Fermenter eingesetzt, wobei die Fermenterbeheizung bis 25 % im Rahmen der EEG-Vergütung als Wärmenutzung gemäß Positivliste anerkannt wird. Die nicht für die Fermenterbeheizung genutzte Wärme wird bereits zu 80 % entsprechend der Vorgaben des EEG 2012 genutzt. Entsprechend sind die Vorgaben des EEG 2012 nach einem Mindest-KWK-Anteil von 60 % eingehalten.

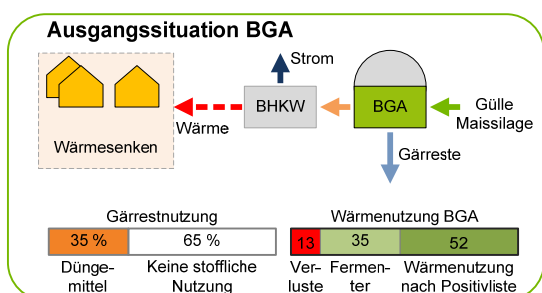


Abbildung 12: Ausgangssituation der BGA

4.2 Referenzszenarien

Beim ersten Referenzszenario **Variante 1a** (Abbildung 13) werden die Wärmeabnehmer (Industriekunden) über eine bestehende Nahwärmeleitung mit der aus der BGA ausgekoppelten Nutzwärme zu einem Preis von 0,05 €/kWh versorgt. Für die Abdeckung der Spitzenlast und die Gewährleistung der Wärmeversorgung ist ein zusätzlicher Ölkessel mit einer Nennleistung von 200 kW vorhanden.

Der BGA in Referenzszenario **Variante 2a** (Abbildung 13) fehlt die Möglichkeit, die anfallende Nutzwärme an vorhandene Wärmekunden abzugeben. Potenzielle gewerbliche Wärmeabnehmer können über ein vom Betreiber der BGA zu errichtendes Nahwärmenetz mit einer Länge von 1.000 m mit Wärme zu einem Preis von 0,05 €/kWh versorgt werden.

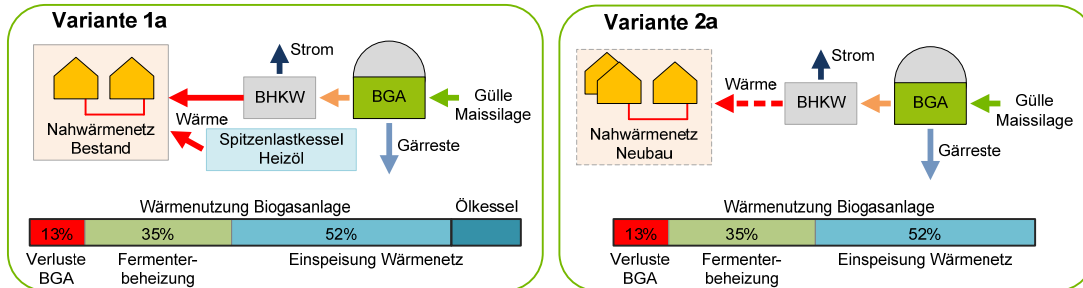


Abbildung 13: Schema der beiden untersuchten Referenzszenarien

4.3 Alternativszenarien

Im Alternativszenario **Variante 1b** (Abbildung 14) soll der Ölkessel für die Deckung der Spitzenlast im Nahwärmenetz durch einen entsprechenden Gärrestpelletkessel eingespart werden. Dazu werden die nicht als Düngemittel genutzten Gärreste zu einem Preis von 10 €/t an einen Pelletierer (Variante 2b) abgegeben und die benötigten Pellets anschließend vom Pelletierer wieder eingekauft.

Im zweiten Alternativszenario **Variante 2b** (Abbildung 14) ist die Errichtung eines Nahwärmenetzes wie in Variante 2a aufgrund der Abnehmerstruktur nicht möglich bzw. nicht gewünscht. Dafür wird die Errichtung einer Pelletieranlage zur energetischen Nutzung der verfügbaren Gärreste angestrebt.

Aufgrund der räumlichen Nähe zwischen den einzelnen Biogasanlagen der beiden untersuchten Varianten 1 und 2 können neben den an der zweiten BGA anfallenden Gärresten auch die der ersten BGA und weiterer BGA pelletiert werden. Die Gärreste der verschiedenen Anlagen werden bereits getrocknet angeliefert (siehe Einleitung Abschnitt 4). Nach der Trocknung der Gärreste aus den einzelnen BGA auf einen Wassergehalt von 15 % an der Pelletieranlage bleibt eine pelletierbare Inputmenge von ca. 660 t/a und BGA. Die Pelletieranlage verfügt über eine Kapazität von 1.000 kg/h und kann im Einschichtbetrieb in der 5-Tage-Woche mit 40 Wochenstunden pro Jahr etwa 2.000 Tonnen Pellets herstellen. Für eine vollständige Auslastung der Pelletieranlage werden die Gärreste von 3 baugleichen BGA benötigt wenn die Pellets zu einem Preis von 120 €/t verkauft werden sollen.

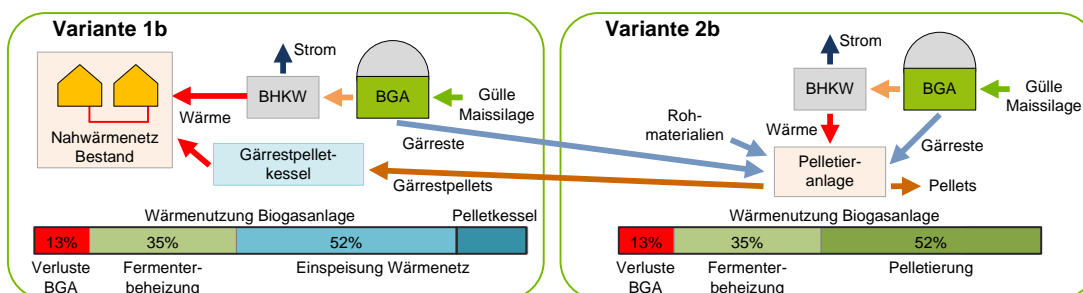


Abbildung 14: Schema der beiden untersuchten Alternativszenarien

4.4 Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die Wirtschaftlichkeit wurde anhand der Annuitätenmethode gemäß der VDI 2067 ermittelt.

Die **kapitalgebundenen Kosten** (Tabelle 12 und Tabelle 13) ergeben sich aus der erforderlichen Investition für die gesamte Anlage und umfassen zusätzlich die jährlichen Instandsetzungskosten für die Wiederherstellung eines funktionsfähigen Zustandes (Reparatur). Die Ermittlung beider Kosten erfolgt anhand der Nutzungsdauer und der Instandsetzungssätze (in % des Investitionsbetrages) der einzelnen Anlagenkomponenten und des aus dem Eigenkapitalanteil, dem Fremdkapitalzinssatzes sowie des aus der Zinserwartung resultierenden Kapitalzinssatzes und der Inflation.

Tabelle 12: Investitionen der untersuchten Varianten

	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2a	Variante 2b
BGA mit BHKW	2.050.000 €	2.050.000 €	2.050.000 €	2.050.000 €
Nahwärmenetz	0 €	0 €	271.500 €	0 €
Spitzenlastkessel	72.450 €	220.200 €	0 €	0 €
Pelletierung inkl. Trocknung	0 €	0 €	0 €	450.000 €
Gesamtinvestitionssumme	2.122.450 €	2.270.200 €	2.321.500 €	2.500.000 €

Tabelle 13: Annuität der kapitalgebundenen Kosten der untersuchten Varianten

	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2a	Variante 2b
BGA mit BHKW	208.895 €/a	208.895 €/a	208.895 €/a	208.895 €/a
Nahwärmenetz	0 €/a	0 €/a	16.966 €/a	0 €/a
Spitzenlastkessel	7.469 €/a	25.287 €/a	0 €/a	0 €/a
Pelletierung inkl. Trocknung	0 €/a	0 €/a	0 €/a	66.000 €/a
Annuität der kapitalgebundenen Kosten	216.364 €/a	234.182 €/a	225.861 €/a	274.895 €/a

Zu den **verbrauchsgebundenen Kosten** (Tabelle 14) zählen die Kosten für sämtliche Stoffe, die für den Betrieb der Anlage benötigt werden oder beim Betrieb anfallen. Dominiert werden die verbrauchsgebundenen Kosten von den Kosten für die Rohmaterialien. Sie umfassen außerdem die für den Betrieb der technischen Anlagen benötigte elektrische Hilfsenergie, Kosten für sonstige Betriebsstoffe und gegebenenfalls für den Umgang mit Reststoffen.

Tabelle 14: Annuität der verbrauchsgebundene Kosten der untersuchten Varianten

	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2a	Variante 2b
BGA mit BHKW	502.929 €/a	502.929 €/a	502.929 €/a	502.929 €/a
Nahwärmenetz ¹	0 €/a	0 €/a	0 €/a	0 €/a
Spitzenlastkessel	72.019 €/a	42.810 €/a	0 €/a	0 €/a
Pelletierung inkl. Trocknung	0 €/a	0 €/a	0 €/a	103.986 €/a
Annuität der verbrauchsgeb. Kosten	574.948 €/a	545.739 €/a	502.929 €/a	606.915 €/a

Unter die **betriebsgebundenen Kosten** (Tabelle 15) fallen nach VDI 2067 die Personalkosten für das Bedienen der Anlage sowie die Kosten für Wartungen und Inspektionen. Kosten die sich nicht dem eigentlichen Anlagenbetrieb zuordnen lassen, werden unter **sonstigen Kosten** erfasst. Hier werden

¹ Diese Position beinhaltet nur die Kosten für die elektrische Hilfsenergie zum Betrieb des Netzes.

beispielsweise Verwaltungskosten, Steuern und Gewinne, Buchführungskosten und Versicherungskosten erfasst.

Tabelle 15: Annuität der betriebsgebundenen und sonstigen Kosten der untersuchten Varianten

	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2a	Variante 2b
BGA mit BHKW	137.895 €/a	137.895 €/a	137.895 €/a	137.895 €/a
Nahwärmenetz	0 €/a	0 €/a	27.837 €/a	0 €/a
Spitzenlastkessel	1.300 €/a	8.344 €/a	0 €/a	0 €/a
Pelletierung inkl. Trocknung	0 €/a	0 €/a	0 €/a	15.223 €/a
Annuität der betriebsgebundenen Kosten	139.195 €/a	146.239 €/a	165.731 €/a	153.118 €/a

Einnahmen bzw. Erlöse (Tabelle 16) können nach VDI 2067 grundsätzlich ebenfalls in den oben genannten vier Kategorien entstehen. In den untersuchten Varianten entstehen Erlöse durch die Stromvergütung nach dem EEG 2012, durch den Verkauf von Wärme, bei den Varianten 1b und 2b durch den Verkauf von Gärresten und durch den Verkauf der produzierten Gärrestpellets an Dritte. Der Wärmeverkaufspreis wird bei den übrigen Varianten mit 0,10 €/kWh angenommen.

Tabelle 16: Annuität der Erlöse der untersuchten Varianten

	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2a	Variante 2b
Stromvergütung nach EEG 2012	768.000 €/a	768.000 €/a	768.000 €/a	768.000 €/a
Wärmeverkaufserlöse	152.848 €/a	152.848 €/a	103.080 €/a	0 €/a
Gärrestverkauf	0 €/a	8.983 €/a	0 €/a	8.983 €/a
Pelletverkauf	0 €/a	0 €/a	0 €/a	327.885 €/a
Annuität der Erlöse	920.848 €/a	929.832 €/a	871.080 €/a	1.104.868 €/a

Die **Annuität der Jahresgesamtzahlungen** (Tabelle 17) ist die Differenz aus der Einzahlungsannuität und der einzelnen Auszahlungsannuitäten. Da bei allen untersuchten Varianten durch den Verkauf von Wärme, Strom, Gärresten und ggf. Pellets ein Gewinn erwirtschaftet werden soll, ist diejenige Variante zu bevorzugen, die die größere positive Gesamtannuität aufweist.

Tabelle 17: Annuität der Jahresgesamtzahlungen der untersuchten Varianten

	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2a	Variante 2b
Annuität der Auszahlungen	930.506 €/a	926.160 €/a	894.521 €/a	1.034.928 €/a
Annuität der Einzahlungen	920.848 €/a	929.832 €/a	871.080 €/a	1.104.868 €/a
Annuität der Jahresgesamtzahlungen	-9.658 €/a	3.672 €/a	-23.441 €/a	69.940 €/a

4.5 Bewertung

Als wesentliche Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit haben sich folgende Parameter herausgestellt:

- Auslastung Pelletieranlage vs. Anzahl vorhandener Biogasanlagen
- Schlüssiges Konzept für eine möglichst vollständige und verlustarme Nutzung der vorhandenen Wärme sowie dem erzielbaren Wärmeverkaufspreis
- Trocknungskosten (Wassergehaltsreduzierung ca. 65%)

- Investition und Förderung für Feuerungsanlage
- Einnahmen aus dem EEG (abhängig von Leistung BGA, Einsatzstoffe)
- Erzielbarer Preis für Gärrestpellets (als Obergrenze kann der regional erzielbare Preis für Holzhackschnitzel dienen)

Daher ist für jeden Standort eine individuelle Betrachtung der Wirtschaftlichkeit unabdingbar! Bezüglich der einzelnen Szenarien können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden.

Vergleich V1a-V1b:

- deutlicher ökologischer und ökonomischer Vorteil bei der Nutzung von Gärrestpellets
- aufgrund niedriger Wärmeverkaufspreise bei Industriekunden äußerst geringe Gewinnmarge

Vergleich V2a-V2b:

- Neubau eines Wärmenetzes ist nicht wirtschaftlich
- Pelletierung ist deutlich vorteilhaft

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Verlauf der CO- und NO _x -Emissionen und des Sauerstoffgehalts im Abgas bei der Verbrennung von Gärrestpellets.....	10
Abbildung 2:	Verlauf der CO- und NO _x -Emissionen und des Sauerstoffgehalts im Abgas bei der Verbrennung von Mischpellets	10
Abbildung 3:	Viertelstundenmittelwerte der gasförmigen Emissionen CO und NO _x bei der Verbrennung von Gärrest- und Mischpellets	12
Abbildung 4:	Viertelstundenmittelwerte der gasförmigen Emissionen HCl und SO ₂ bei der Verbrennung von Gärrest- und Mischpellets	13
Abbildung 5:	Viertelstundenmittelwerte der Gesamtstaubemissionen bei der Verbrennung von Gärrest- und Mischpellets	14
Abbildung 6:	Massekraftabscheider (links Zyklon; rechts Schwerkraftabscheider)	26
Abbildung 7:	Klassischer elektrostatischer Abscheider	27
Abbildung 8:	Neuartiger elektrostatischer Abscheider	27
Abbildung 9:	Prinzipien der filternden Abscheidung	28
Abbildung 10:	Abgaswäscher	29
Abbildung 11:	Abgaskondensator	29
Abbildung 12:	Ausgangssituation der BGA.....	35
Abbildung 13:	Schema der beiden untersuchten Referenzszenarien	36
Abbildung 14:	Schema der beiden untersuchten Alternativszenarien	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Qualitätsrelevante Eigenschaften biogener Festbrennstoffe mit ihren jeweiligen Auswirkungen /Kaltschmitt 2009/	5
Tabelle 2:	Energieträgerspezifische Eigenschaften der Gärrestpellets im Vergleich zu den Anforderungen nach EN 14961-6 /EN 14961 – 6/	6
Tabelle 3:	Gehalt an Hauptelementen der Gärrestpellets im Vergleich zu den Anforderungen nach EN 14961-6 /EN 14961 – 6/	7
Tabelle 4:	Gehalte an Spurenelementen der Gärrestpellets	8
Tabelle 5:	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/	11
Tabelle 6:	Viertelstundenmittelwerte im Vergleich	12
Tabelle 7:	Überführung der allgemeinen Bezeichnungen der Aschefraktionen nach ihrem Anfallort in die Begriffe der DüMV /LfL 2009/ /DüMV 2008/	16
Tabelle 8:	Kennzeichnungsschwellen und Grenzwerte für Schadstoffe in Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln /DüMV 2008/ ...	18
Tabelle 9:	Regel- und Stellgrößen der untersuchten Kesselanlagen	24
Tabelle 10:	Vor- und Nachteile verschiedener Abscheidetechnologien	26
Tabelle 11:	Übersicht zu marktverfügbaren Abscheidetechnologien und bisherigen technischen Entwicklungen	33
Tabelle 12:	Investitionen der untersuchten Varianten	37
Tabelle 13:	Annuität der kapitalgebundenen Kosten der untersuchten Varianten.....	37
Tabelle 14:	Annuität der verbrauchsgebundene Kosten der untersuchten Varianten.....	37
Tabelle 15:	Annuität der betriebsgebundenen und sonstigen Kosten der untersuchten Varianten.....	38
Tabelle 16:	Annuität der Erlöse der untersuchten Varianten.....	38
Tabelle 17:	Annuität der Jahresgesamtzahlungen der untersuchten Varianten	38

Literaturverzeichnis

- /1. BImSchV 2010/ Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV, 26. Januar 2010
- /Bäfver 2009/ Bäfver L.S., Rönnbäck M., Leckner B., Claesson F., Tullin C.: Particle emission from combustion of oat grain and its potential reduction by addition of limestone or kaolin, *Fuel Processing Technology*, 90, S. 353-359, 2009
- /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
- /DüMV 2008/ Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung – DüMV) vom 16. Dezember 2008 (BGBl. I Nr. 60, S. 2524)
- /Ebeling 1999/ Ebeling N.: Abluft und Abgas – Reinigung und Überwachung; WILEY-VCH, Weinheim, 1999
- /EN 14961-6/ EN 14961-6, Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und –klassen, Teil 6: Nicht-holzartige Pellets für nichtindustrielle Verwendung, April 2012
- /Glarbourg 2007/ Glarbourg P.: Hidden interactions – Trace species governing combustion and emissions, *Proceedings of the Combustion Institute*, 31, S. 77-98, 2007
- /Griffin 2008/ Griffin, T.; Burtscher, H.: Evaluation von Messverfahren zur Messung der Wirksamkeit von Partikelabscheidern bei kleinen Holzfeuerungen – Schlussbericht, Fachhochschule Nordwestschweiz; Bundesamt für Umwelt, Bundesamt für Energie, Bern, 2008, <http://www.fhnw.ch/technik/iast/7/73/partikelabscheider>
- /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
- /Heidenreich 2003/ Heidenreich R., List, M.: Emissionen und Emissionsminderungsmaßnahmen bei der thermischen Nutzung von Stroh in Kesseln kleiner Leistung, 9. Internationale Fachtagung „Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe“, TU BA Freiberg 2003
- /Holzenergie-Emmental 2007/ Holzenergie Emmental: Feinstaub Partikelabscheider für kleine Holzfeuerungen - Das Emmental als Testregion – Schlussbericht, 2007; http://www.holzenergie-emmental.ch/pdf/schlussbericht_partikelabscheider.pdf
- /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
- /Kersten 2004/ Kersten, J., Nef, E. und Rohde, H.-R. Mischfutter Herstellung: Rohware, Prozess, Technologie. 2. Auflage. Clenze : Agrimedia GmbH & Co.KG, 2004
- /Kiener 2010/ Kiener, S.; Turowski, P.; Hartmann, H.; Schmoeckel, G.: Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel; Eigenverlag, Straubing, 2010, TFZ-Bericht Nr. 23 , ISSN:1614-1008
- /Kiesewalter 2008/ Kiesewalter, S., Röhrich, Chr.: Biomasseanbau und –verwertung als Energie-

- träger / Humusstoff von Flächen mit unterschiedlichem Schwermetallbelastungsgrad und Grünlandgebieten, Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 30/2008, Dresden, 2008
- /KrW-/AbfG 2007/ Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Ab-fällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG) vom 27. September 1994 (BGBl. I S. 2705), zuletzt geändert durch Art. 2 Gesetz vom 19. Juli 2007 (BGBl. I S. 1462)
- /Lauber 2010/ Lauber A., Nussbaumer Th.: Charakterisierung der Partikelarten aus der Holzverbrennung und Eigenschaften in Elektroabscheidern; in Nussbaumer, Th (Hrsg.); 11. Holzenergiesymposium 17. September 2010 ETH Zürich; 2010
- /Leitfaden Bioenergie 2005/ Leitfaden Bioenergie – Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), 2005
- /Lenz 2010/ Lenz, V. et al.: Bewertung und Minderung von Feinstaubemissionen aus häuslichen Holzfeuerungsanlagen; Eigenverlag, Leipzig, 2010, DBFZ Report Nr. 1
- /LfL 2009/ Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.): Verwertung und Beseitigung von Holzaschen Merkblatt, 2009, www.lfu.bayern.de/abfall/doc/merkblatt_holzaschen.pdf
- /MBO 2008/ Musterbauordnung – MBO – in der Fassung vom November 2002 zuletzt geändert durch den Beschluss der Bauministerkonferenz vom Oktober 2008 einschl. Änderung von § 20 Satz 1 gem. Beschluss der FK Bauaufsicht vom Mai 2009
- /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
- /Obernberger 1997/ Obernberger, I., Brunner T., Bärnthaler, G.: Aktuelle Erkenntnisse im Bereich der Feinstaubemissionen bei der Pelletsfeuerungen, in Tagungsband zum 5. Industrieforum Holzenergie, Stuttgart, Deutscher Energie-Pellet-Verband e.V. und Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V., 2005
- /Obernberger 2005/ Obernberger I.: Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente
- /Obernberger 2006/ Obernberger, I., Brunner, T., Bärnthaler, G.: Chemical properties of solid biofuels – significance and impact, Biomass and Bioenergy, 30, S. 973-982, 2006
- /Obernberger 2009/ Obernberger, I., Thek, G.: Herstellung und energetische Nutzung von Pellets - Produktionsprozess, Eigenschaften, Feuerungstechnik, Ökologie und Wirtschaftlichkeit, Schriftenreihe Thermische Biomassenutzung Band 5, 2009
- /Oser 2004/ Oser, M.; Nussbaumer, Th.: Low-Particle-Pelletfeuerung im Leistungsbereich von 100 bis 500 kW, Verenum, Zürich 2004, ISBN 3-908705-09-6
- /Rönnbäck 2008/ Rönnbäck, M., Johansson, L., Claesson, F., Johansson, M., Tullin, C.: Emissions from small-scale combustion of energy grain and use of additives to reduce particle emissions, Proc. of the 16th European Biomass Conference & Exhibition, Valencia, Spain, 2008
- /Schleicher 2010/ Schleicher O.: Erprobung von Technologien zur Rauchgasreinigung an Kamin- und Holzkesseltechnologien; Fachgespräch Partikelabscheider in häuslichen Feuerungen, Leipzig 2010
- /Schleicher 2011/ Schleicher, O.: Evaluation of small-scale precipitators in Denmark – results of lab- / field tests; Central European Biomass Conference , Graz, 2011
- /Stenaari 1998/ Steenari, B.-M.; Lindqvist, O.; High-temperature reactions of straw ash and anti-sintering additives Kaolin and Dolomite; In: Biomass & Bioenergy (14) S. 67-76, 1998

- /TA Luft 2002/ Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft, TA Luft), 24. Juli 2002
- /Ulbricht 2010/ Ulbricht, T.: Erfahrungen aus dem Monitoring von Feinstaubabscheidern für Kleinf Feuerungsanlagen; Fachgespräch Partikelabscheider in häuslichen Feuerungen, Leipzig 2010
- /Ulbricht 2011/ Ulbricht T., von Sonntag J.: Procedures and Limits regarding the determination of the separation efficiency of particle precipitators for small scale biomass furnaces; 19th European Biomass Conference and Exhibition, Berlin, 2011
- /Ulbricht 2011-2/ Ulbricht T.: Partikelabscheider für Biomassekleinf Feuerungen; HLH Bd. 62 (2011) Nr. 8
- /Van Loo 2008/ Van Loo S., Koppejan J.: The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing, Earthscan, London, 2008
- /VDI2067/ VDI2067: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen Energieaufwand der Nutzenübergabe Raumluftechnik, Mai 2003
- /Vetter 2001/ Vetter, A.: Qualitätsanforderungen an halmgutartige Bioenergieträger hinsichtlich der energetischen Verwertung; Gülzower Fachgespräche Band 17, 2001, S. 36-49
- /Vulca-Tech 2011/ Vulca-Tech: Homepage, (Zugegriffen am 29.08.2011 auf <http://www.vulca-tec.de>)
- /Wolf 2005/ Wolf K.J., Smeda A., Müller M., Hilpert K.: Investigations on the Influence of Additives for SO₂ Reduction during High Alkaline Biomass Combustion, Energy Fuel, 19, S. 820-824, 2005
- /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	Analysewert
Trockenmasse	Ma.-%	88,7
Wassergehalt	Ma.-%	11,3
Aschegehalt (550°C)	Ma.-% wf	11,3
Flüchtige Bestandteile	Ma.-% wf	70,1
Kohlenstoff	Ma.-% wf	46,6
Wasserstoff	Ma.-% wf	5,5
Stickstoff	Ma.-% wf	1,7
Sauerstoff	Ma.-% wf	46,2
Schwefel gesamt	Ma.-% wf	0,36
Chlor gesamt	Ma.-% wf	0,34
Unterer Heizwert	MJ/kg wf	17,59
Aluminium	mg/kg wf	437
Calcium	mg/kg wf	10.800
Eisen	mg/kg wf	1.490
Magnesium	mg/kg wf	6.290
Phosphor	mg/kg wf	9.250
Kalium	mg/kg wf	15.900
Silicium	mg/kg wf	12.500
Natrium	mg/kg wf	994
Mangan	mg/kg wf	247
Titan	mg/kg wf	21,4
Arsen	mg/kg wf	n.n.
Quecksilber	mg/kg wf	0,092
Zink	mg/kg wf	89,3
Chrom	mg/kg wf	4,62
Cadmium	mg/kg wf	0,131
Nickel	mg/kg wf	1,48

* wf wasserfreier Zustand; n.n. nicht nachweisbar

A.2 Zusammenfassung der ermittelten Viertelstundenmittelwerte der Emissionsmessung

Gärrestpellets					
Lfd. Nr.	CO	NO _x	SO ₂	HCl	Staub
	mg/m ³ (i.N., 13 Vol.-%O ₂)				
1	224,51	530,86	358,54	33,72	64,94
2	162,52	609,54	379,74	40,45	59,67
3	124,32	616,36	404,82	48,11	60,53
4	123,03	615,38	418,09	55,09	66,93
5	103,06	619,72	420,26	57,98	81,69
6	89,34	657,76	426,21	61,39	70,34
7	128,85	678,34	419,74	65,87	55,19
8	143,86	682,50	404,12	69,99	69,78
9	155,85	646,16	406,03	73,86	53,32
10	130,18	660,97	417,05	77,71	51,50
11	101,19	659,16	413,21	79,84	49,26
12	122,84	683,74	413,73	83,55	43,53
13	131,57	675,70	406,81	85,78	47,05
14	111,96	690,14	412,48	89,75	45,26
15	97,83	679,15	415,31	93,69	38,80
16	93,81	665,06	409,30	97,23	40,22
17	92,39	674,65	426,42	100,07	35,04
18	92,87	678,32	416,06	102,33	39,88
Max	224,51	690,14	426,42	102,33	81,69
Min	89,34	530,86	358,54	33,72	35,04
MW	123,89	651,31	409,33	73,13	54,05
Mischpellets					
Lfd. Nr.	CO	NO _x	SO ₂	HCl	Staub
	mg/m ³ (i.N., 13 Vol.-%O ₂)				
1	81,13	412,71	183,49	10,15	13,33
2	76,00	417,52	179,65	14,48	13,32
3	84,25	432,00	196,30	18,23	12,36
4	68,01	428,75	200,84	21,88	11,40
5	72,25	454,50	211,85	24,86	15,11
6	69,84	450,71	199,07	26,23	16,27
7	73,68	455,49	198,30	26,12	48,98
8	68,99	452,92	207,28	27,16	15,71
9	67,39	443,30	199,97	26,86	17,29
10	58,31	451,68	202,77	27,24	17,29
11	47,60	471,94	209,50	27,58	18,16
Max	84,25	471,94	211,85	27,58	48,98
Min	47,60	412,71	179,65	10,15	11,40
MW	69,77	442,86	199,00	22,80	18,11

A.3 Anlagensteckbriefe

- Binder, TSRF
- Ferro, FBR
- Heizomat, RHK AK
- Ökotherm, Compact
- P&H, PH
- Reka, HKRST FSK

Binder		
Hersteller	BINDER Mitterdorferstraße 58572 Bärnbach - Austria www.binder-gmbh.at	
Modell	TSRF	
Leistungsbereich	185-500 kW _N	

Ausführung Anlagentechnik

Feuerungsprinzip	<ul style="list-style-type: none"> • Schubrostfeuerung
Brennstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Holz-, Torf- oder Agro-Pellets (WG max. 25 %, AG > 1 %) • granulierter Brennstoff (bis G100)
Brennstoffzufuhr	<ul style="list-style-type: none"> • automatisch mittels Stokerschnecke
Verbrennungsluftzufuhr	<ul style="list-style-type: none"> • 2 drehzahlgeregelte Verbrennungsluftgebläse
Zündung	<ul style="list-style-type: none"> • k. A.
Brennkammer	<ul style="list-style-type: none"> • schamotierte Brennkammer mit 3 Zonen System
Wärmeübertrager - Bauart - Aufstellung - Reinigung - Werkstoff	<ul style="list-style-type: none"> • Rohrbündelwärmeübertrager • liegende Aufstellung • Hochgeschwindigkeits-Umluftsystem (automatische, intervallgesteuerte Reinigung durch Rückführung Abgasteilstrom) • Zyklon • Rohre mit 4,5 mm Wandstärke, Kesselstahl
Entaschung	<ul style="list-style-type: none"> • Ascheschieber • Ascheschnecke für Abtransport in separate Aschetonne / Aschetonne mit 60 bis 1 250 Liter (Sonderausführung bis 3 m³)

Ausführung Regelungstechnik

Verbrennungsregelung - Regelgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Lambda
Verbrennungsregelung - Stellgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Brennstoff- und / oder Luftzufuhr angeglichen
Leistungsregelung - Regelgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • vorhanden, aber keine Spezifikation
Leistungsregelung - Stellgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • vorhanden, aber keine Spezifikation
Feueraumtemperaturerfassung	<ul style="list-style-type: none"> • ja (bei Low NO_x Ausführung)
Glutbetthöhenerfassung	<ul style="list-style-type: none"> • nein
Unterdruckregelung/Saugzug	<ul style="list-style-type: none"> • Druckregelung / Saugzuggebläse
Sonstige Regel- und Steuereinrichtungen	<ul style="list-style-type: none"> • Puffermanagement

Maßnahmen zur Verbrennungsoptimierung

Stickoxidemissionen (NO _x)	<ul style="list-style-type: none"> • Luftstufung • Rauchgasrezirkulation (abhängig von Leistungsbereich)
Gesamtstaubemissionen	<ul style="list-style-type: none"> • Mono- und Multizyklone Elektrofilter oder Gewebefilter (abhängig vom Leistungsbereich)
Korrosion	<ul style="list-style-type: none"> • Schamottierung Feuerraum • Umluft Wärmeübertragerreinigung
Verschlackungen im Feuerraum	<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturkontrolle im Feuerraum durch Rauchgasrezirkulation • Luftgekühlter, beweglicher Rost (Roste und Retorte aus hitze- / zunderbeständigem Chromgussstahl)

Emissionsmessungen bei Volllast

Lfd. Nr.	Quelle		Brennstoff:					Feuerungsanlage		
1	/1/		Hackschnitzel, Holzspäne, Holzpellets, Spanplatten*					SRF S 80-175		
<i>Emissionen (13 Vol. - % O₂)</i>										
Lfd. Nr.	η _{Kessel} %	O ₂ Vol. - %	CO	C _x H _y	Staub	NO _x	SO ₂	HCl	PAK	PCDD/F
			mg/Nm ³						µg/Nm ³	pg TE/Nm ³
1	91		28		3	171*				

Erfahrungen bei der Verbrennung biogener Festbrennstoffe

- keine Angaben verfügbar

Referenzen

- /1/ Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.): Marktübersicht Hackschnitzel-Heizungen, 1. Auflage, Gülzow, 2007
- /2/ Binder GmbH (Hrsg.): Broschüre „Wärme aus Biomasse“, Bärnbach / Österreich, 2008
- /3/ Binder GmbH: www.binder-gmbh.at, 29.01.2009

Ferro		
Hersteller	FERRO Wärmetechnik GmbH, Am Kieferschlag 1 91126 Schwabach www.ferro-waermetechnik.de	
Modell	FBR	
Leistungsbereich	15-1000 kW _N	

Ausführung Anlagentechnik

Feuerungsprinzip	<ul style="list-style-type: none"> Wander- /Stufenrostsystem
Brennstoffe	<ul style="list-style-type: none"> Holz - und Strohpellet (6 oder 8 mm) Hackgut P16, 45 / M30 Energiegetreidekörner, Kerne, Schalen,
Brennstoffzufuhr	<ul style="list-style-type: none"> automatisch mittels Stokerschnecke
Verbrennungsluftzufuhr	<ul style="list-style-type: none"> 2 drehzahlregelte Verbrennungsluftgebläse (ab FBR 40)
Zündung	<ul style="list-style-type: none"> Heißluftgebläse
Brennkammer	<ul style="list-style-type: none"> Wassergekühlte Brennkammer Korrosionsgefährdete Bauteile aus Guss, Schamotte oder Edelstahl (6 mm bzw. > 100kW 8mm dick)
Wärmeübertrager	<ul style="list-style-type: none"> Rohrbündelwärmeübertrager liegende Aufstellung manuell (Druckluftreinigung optional) Nachschaltheizflächenrohre starkwandig ausgeführt
- Bauart	
- Aufstellung	
- Reinigung	
- Werkstoff	<ul style="list-style-type: none"> Nachschaltheizflächenrohre starkwandig ausgeführt
Entaschung	<ul style="list-style-type: none"> Automatisch mittels Ascheschnecke Kratzaustragung ab 100kW Austragung in Tonne (200L)

Ausführung Regelungstechnik

Verbrennungsregelung - Regelgrößen	<ul style="list-style-type: none"> Abgastemperatur
Verbrennungsregelung - Stellgrößen	<ul style="list-style-type: none"> Luftgebläse
Leistungsregelung - Regelgrößen	<ul style="list-style-type: none"> Kesseltemperatur
Leistungsregelung - Stellgrößen	<ul style="list-style-type: none"> Brennstoffmenge
Feueraumtemperaturerfassung	<ul style="list-style-type: none"> nein
Glutbetthöhenerfassung	<ul style="list-style-type: none"> nein
Unterdruckregelung/Saugzug	<ul style="list-style-type: none"> nein / Saugzug (Regelung anhand der Kesselleistung)
Sonstige Regel- und Steuereinrichtungen	<ul style="list-style-type: none"> Pufferspeichermanagement, Kaskadenmanagement

Maßnahmen zur Verbrennungsoptimierung

Stickoxidemissionen (NO _x)	<ul style="list-style-type: none"> • Luftstufung • Leistung > 100kW Aufteilung in Primär-, Sekundär-, Tertiärluft
Gesamtstaubemissionen	<ul style="list-style-type: none"> • Abgaskondensationsanlage
Korrosion	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmeübertrager starkwandig ausgeführt • Rücklauftemperatur mindestens 60 °C (Rücklaufanhebung)
Verschlackungen im Feuerraum	<ul style="list-style-type: none"> • wassergekühlte Brennkammer • luftgekühltes Rostsystem • Zugabe von Branntkalk ab Leistung von 100 kW

Emissionsmessungen bei Volllast

Lfd. Nr.	Quelle	Brennstoff:	Feuerungsanlage
1	[1]	Weizenstrohpellets	FBR 90
2	[1]	Roggenstrohpellets	FBR 90
3	[1]	Heupellets	FBR 90
4	[1]	Miscanthuspellets	FBR 90

Emissionen (13 Vol. - % O₂)

Lfd. Nr.	η _{Kessel} %	O ₂ Vol. - %	CO	C _x H _y	Staub	NO _x	SO ₂	HCl	PAK	PCDD/F
			mg/Nm ³						µg/Nm ³	pg TE/Nm ³
1	90,3	-	179	2,6	555	255	128	8,2	-	-
2	87,9	-	10	1,2	52	267	134	7,7	-	-
3	90,5	-	29	2,0	269	375	339	7,5	-	-
4	91,8	-	127	1,7	244	140	106	6,2	-	-

Erfahrungen bei der Verbrennung

- Kessel wurde aufgrund verminderter Kesselleistung beim Einsatz von Strohpellets mit einer modifizierten Sekundärluftzufuhr nachgerüstet
- Versuche mit SekundärWärmeübertrager durchgeführt
- Versuche mit Biomat FBR 90 bei 20 % abgesenkter Kesselleistung durchgeführt, da Brennraum auf Holzpellets ausgelegt ist, und Strohpellets aufgrund des höheren Anteils an flüchtigen Bestandteilen dementsprechend ein größeres Feuerraumvolumen benötigen

Gesamtstaubemissionen

- Roggenstrohpellets halten Grenzwert 1. BImSchV im Durchschnitt ein
- Einsatz eines SekundärWärmeübertrager bewirkt keine signifikante Absenkung der Staubemissionen
- Emissionsarmer Betrieb nur mit entsprechender Filtertechnik oder geeigneten Brennstoffen gewährleistet
- 95 % der Staubpartikel der untersuchten Brennstoffe gehören zur Feinstfraktion < 2,5 µm, mit Ausnahme Roggenstroh (89 %)
- Geringe Abweichungen zwisch Brennstoffen in der Größe der Feianteile

Stickoxidemissionen

- Logarithmischer Zusammenhang zwischen Brennstoffstickstoffgehalt und Stickoxidemissionen [1]

Korrosion

- Niedriges Niveau der HCl-Emissionen wahrscheinlich durch den Einsatz des SekundärWärmeübertragers hervorgerufen

Verschlackungen

- Hohe Brennraumtemperaturen führen zu Erweichung der Asche
- Keine Beeinträchtigung des Kesselbetriebs, da durch breiten Rost ein dünnes Schlackebett ausgebildet und Abtransport möglich
- Schwankungen bei Ausbrandqualität und Emissionen möglich, aber auf niedrigem Niveau (Glühverluste zwischen 0,3 – 9,6 %, abhängig vom eingesetzten Brennstoff)

Referenzen

- /1/ Kiesewalter, Röhricht: 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
- /2/ Ferro Wärmetechnik GmbH (Hrsg.): Broschüre Ferro Biomat FBR 15 – 90 kW, Schwabach
- /3/ Ferro Wärmetechnik GmbH (Hrsg.): Broschüre Ferro Biomat FBR 140 – 1000 kW, Schwabach
- /4/ Ferro Wärmetechnik GmbH: www.ferro-waermetechnik.de, 29.01.2009

Heizomat		
Hersteller	Heizomat GmbH Maicha 21 D-91710 Gunzenhausen www.heizomat.de	
Modell	RHK AK	
Leistungsbereich	36-850 kW _N	

Ausführung Anlagentechnik

Feuerungsprinzip	<ul style="list-style-type: none"> • Rostfeuerung (luftgekühlter Kettenumlaufrost)
Brennstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Holzhackschnitzel
Brennstoffzufuhr	<ul style="list-style-type: none"> • automatisch mittels Stokerschnecke über Zellradschleuse
Verbrennungsluftzufuhr	<ul style="list-style-type: none"> • 2 drehzahlgeregelte Verbrennungsluftgebläse • 2 manuell einstellbare Verbrennungsluftklappen
Zündung	<ul style="list-style-type: none"> • automatisch mit Glühbolzen
Brennkammer	<ul style="list-style-type: none"> • Zyklonbrennkammer mit gegenläufiger Turbinenluftzuführung • hochfeuerfeste Feuerbeton-Formteile • horizontale Aufstellung
Wärmeübertrager	<ul style="list-style-type: none"> • Rohrbündelwärmeübertrager • liegende Aufstellung • automatisch mittels Wirbulatoren • St 37.2 (starkwandig ausgeführt)
- Bauart	
- Aufstellung	
- Reinigung	
- Werkstoff	<ul style="list-style-type: none"> • St 37.2 (starkwandig ausgeführt)
Entaschung	<ul style="list-style-type: none"> • Mit hitzebeständigem Kettenförderer • 45, 270, oder 900 l Aschebehälter

Ausführung Regelungstechnik

Verbrennungsregelung - Regelgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Abgastemperatur, Lambda
Verbrennungsregelung - Stellgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Sekundärluftmenge
Leistungsregelung - Regelgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Kesselwasser- und Abgastemperatur
Leistungsregelung - Stellgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Brennstoff- und Primärluftmenge
Feuerraumtemperaturerfassung	<ul style="list-style-type: none"> • nein
Glutbetthöhenerfassung	<ul style="list-style-type: none"> • nein
Unterdruckregelung/Saugzug	<ul style="list-style-type: none"> • Unterdruckwächter (bei 0 Pa) / k.A.
Sonstige Regel- und Steuereinrichtungen	<ul style="list-style-type: none"> • k.A.

Maßnahmen zur Verbrennungsoptimierung

Stickoxidemissionen (NO _x)	<ul style="list-style-type: none"> • Luftstufung
Gesamtstaubemissionen	<ul style="list-style-type: none"> • Wirbulatoren
Korrosion	<ul style="list-style-type: none"> • starkwandige Ausführung Wärmeübertrager mit St 37.2 • Wirbulatoren • Mindestrücklauftemperatur 55 °C
Verschlackungen im Feuerraum	<ul style="list-style-type: none"> • Entaschung mittels hitzebeständigen Kettenförderer • luftgekühlter Schrägrost

Emissionsmessungen bei Vollast Prüfen!!!

Lfd. Nr.	Quelle	Brennstoff:	Feuerungsanlage
1	/1/	Holzhackschnitzel	RHK AK 50
2	/3/	Holzhackschnitzel	RHK AK 50
3	/2/	Gersteganzpflanzenpellets	RHK AK 50
4	/1/	Weizenkörner	RHK AK 50
5	/1/	Weizenkörner mit 2 % Kalk (CaO)	RHK AK 50
6	/1/	Weizenkleie	RHK AK 50
7	/1/	Gerstenkörner	RHK AK 50
8	/2/	Triticalekörner	RHK AK 50
9	/3/	70% Holzhackschnitzel / 30% Getreide ¹⁾	RHK AK 50
10	/2/	35% Holzhackschnitzel / 65% Getreide ¹⁾	RHK AK 50
11	/2/	Rapspresskuchen	RHK AK 50

Emissionen (13 Vol. – % O₂)

Lfd. Nr.	η _{Kessel} %	O ₂ Vol. – %	CO	C _x H _y	Staub	NO _x	SO ₂	HCl	PAH	PCDD/F
			mg/Nm ³						mg/Nm ³	ng TE/Nm ³
1	-	-	214	1	61	171	-	-	-	-
2	-	-	114	< 2,1	34	76	25	0,9	0,05	0,02
3	84,2	-	24	-	642	567	-	-	-	-
4	-	-	40	10	138	507	-	-	-	-
5	-	-	188	12	34	577	-	-	-	-
6	-	-	211	-	153	563	-	-	-	-
7	-	-	101	68	400	492	-	-	-	-
8	83,2	-	12	-	230	541	-	-	-	-
9	-	-	60	-	56	164	54	2,4	0,02	0,02
10	-	-	32	-	74	219	90	5,0	0,03	0,02
11	83,0	-	20	-	136	645	-	-	-	-

¹⁾ Getreide Mischung aus 85% Roggen und 15% Triticale

Erfahrungen bei der Verbrennung biogener Festbrennstoffe

- Feuerungsanlage ist für den Einsatz von Holzhackschnitzeln ausgelegt und zugelassen. Nicht holzartige Brennstoffe sind ergänzend in Versuchsreihen getestet worden

Gesamtstaubemissionen

- Staubemissionen von der Art und der Zusammensetzung der Asche abhängig
- Halmgutartige Brennstoffe haben Feinstaubanteil von 70-90 %, während Holzhackschnitzel Feinstaubanteil von ca. 35 % aufweisen
- Einsatz sekundärer Staubabscheider empfohlen
- Brennstoffmischung mit Holzhackschnitzel: mit zunehmenden Anteil an Getreidekörnern steigen Staubemissionen an
- Zugabe von Zuschlagstoff 2 % CaCO₃ mindert Staubemissionen um 27 %

Stickoxidemissionen

- Logarithmischer Zusammenhang zwischen Brennstoffstickstoffgehalt und Stickoxidemissionen [1]
- NO_x-Emissionen weiterhin abhängig von λ im Feuerraum

Korrosion


- Erhöhtes technisches Risiko beim Einsatz von nicht-holzartigen Brennstoffen
- Einsatz von Zuschlagstoffen zur Bindung von Alkalien empfohlen (z. B. Kaolin)
- Niedrige HCl-Emissionen bei ungedüngten Feldkulturen (Verzicht auf chlorhaltige Dünger)
- Brennstoffmischung mit Holzhackschnitzel: mit zunehmenden Anteil an Getreidekörnern steigen HCl-Emissionen an

Verschlackungen

- Erhöhtes technisches Risiko beim Einsatz von nicht-holzartigen Brennstoffen
- erhöhte Glühverluste in Feuerraumaschen von Halmgut- und Kornbrennstoffen
- Einsatz von Zuschlagstoffen (z. B. Dolomitkalk) empfohlen
- Einsatz von Brennstoffmischungen empfohlen
- Derzeit keine Technik zur gleichmäßigen Dosierung von Zuschlagstoffen in den Feuerraum am Markt verfügbar
- Glührückstände zwischen 37 – 84 % (abhängig vom eingesetzten Brennstoff)

Referenzen

- /1/ Hartmann, H. Roßmann, P., Turowski, P., Ellner-Schuberth, F., Hopf, N., Bimüller, A., Getreidekörner als Brennstoff für Kleinf Feuerungen: Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte, Berichte aus dem TFZ 13, Straubing, 2007
- /2/ Härdtlein, M., Eltrop, L., Thrän, D. (Hrsg.), Voraussetzungen zur Standardisierung biogener Festbrennstoffe, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Band 23, 2004
- /3/ Stöcklein: Messprogramm zur Begleitung des vorübergehenden Getreideeinsatzes in Feuerungsanlagen, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, München, 2003
- /4/ Heizomat GmbH (Hrsg.): Broschüre Feuerungsanlagen, Gunzenhausen
- /5/ BLT Wieselburg (Hrsg.): Prüfbericht Hackgutfeuerung RHK AK 50, Wieselburg, 2005
- /6/ TÜV Süd (Hrsg.): Bericht über die Prüfung eines Heizkessels nach DIN EN 303-5 – Prüfbericht C: Prüfung der heiztechnischen Anforderungen, München, 2005
- /7/ Heizomat GmbH: www.heizomat.de, 28.01.2009

Ökotherm		
Hersteller	A.P. Bioenergietechnik GmbH Träglhof 2 D-92242 Hirschau www.oeko-therm.net	
Modell	Compact	
Leistungsbereich	49-800 kW _N	

Ausführung Anlagentechnik

Feuerungsprinzip	<ul style="list-style-type: none"> • Brennmulde mit Schubboden
Brennstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Stroh-, Heupellets, Raps, Rapskuchen, PressRückstände, Getreidekörner, Miscanthus, Holzpellets, Holzhackschnitzel, Gärreste, Pferdemist
Brennstoffzufuhr	<ul style="list-style-type: none"> • automatisch mittels Stokerschnecke
Verbrennungsluftzufuhr	<ul style="list-style-type: none"> • 2 drehzahlgeregelte Verbrennungsluftgebläse
Zündung	<ul style="list-style-type: none"> • automatisch mit Heißluftgebläse
Brennkammer	<ul style="list-style-type: none"> • schamottierter Feuerraum aus Druckbehälterstahl P265GH (HII) und Edelstahl • horizontale Aufstellung
Wärmeübertrager	<ul style="list-style-type: none"> • RohrbündelWärmeübertrager • liegende Aufstellung • manuell • k. A.
- Bauart	
- Aufstellung	
- Reinigung	
- Werkstoff	<ul style="list-style-type: none"> • k. A.
Entaschung	<ul style="list-style-type: none"> • automatisch mittels Ascheschieber in Aschebehälter

Ausführung Regelungstechnik

Verbrennungsregelung - Regelgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Abgastemperatur, Lambda
Verbrennungsregelung - Stellgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Luftmenge (linke Seitenwand)
Leistungsregelung - Regelgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Kesselwassertemperatur
Leistungsregelung - Stellgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Luftmenge (rechte Seitenwand), Brennstoffmenge
Feuerraumtemperaturerfassung	<ul style="list-style-type: none"> • nein
Glutbetthöhenerfassung	<ul style="list-style-type: none"> • nein
Unterdruckregelung/Saugzug	<ul style="list-style-type: none"> • Drucküberwachung / Saugzuggebläse
Sonstige Regel- und Steuereinrichtungen	<ul style="list-style-type: none"> • Aschetemperaturfühler

Maßnahmen zur Verbrennungsoptimierung

Stickoxidemissionen (NO _x)	<ul style="list-style-type: none"> • Luftstufung
Gesamtstaubemissionen	<ul style="list-style-type: none"> • Plattenelektrofilter für Anlagen bis 150kW
Korrosion	<ul style="list-style-type: none"> • Edelstahlausführung und Schamottierung Feuerraum
Verschlackungen im Feuerraum	<ul style="list-style-type: none"> • wassergekühlte Brennmulde • Ascheschieber

Emissionsmessungen bei Vollast

Lfd. Nr.	Quelle	Brennstoff:	Feuerungsanlage
1	/2/	Holzpellets	Compact C0
2	/1/	Weizenstrohpellets	Compact C0
3	/3/	Weizenstrohpellets	Compact C0
4	/3/	Weizenstrohpellets + 3 % Melasse	Compact C0
5	/3/	Weizenstrohpellets + 2 % Kalkmehl	Compact C0
6	/3/	Weizenstrohpellets + 4 % Kalkmehl, 3 % Melasse	Compact C0
7	/3/	Weizenstrohpellets + 6 % Kalkmehl, 3 % Melasse	Compact C0
8	/1/	Triticale Ganzpflanzenpellets	Compact C0
9	/1/	Rapspresskuchenpellets	Compact C0
10	/1/	Landschaftspflegeheupellets	Compact C0
11	/2/	50 % Roggen / 50 % Holzpellets	Compact C0
12	/2/	100% Roggen	Compact C0
13	/4/	Rohrglanzgras (Briketts)	Compact C2

Emissionen lt. Quelle (13 Vol. - % O₂)

Lfd. Nr.	η _{Kessel}	O ₂	CO	C _x H _y	Staub	NO _x	SO ₂	HCl	PAK	PCDD/F
	%	Vol. - %	mg/Nm ³						µg/Nm ³	pg TE/Nm ³
1	-	-	273	7	11	148	-	22	-	-
2		-	206	4,7	171	335	-	58	56	813
3	72,4	-	274,7	2,6	64,6	279,4	57,8	57,8	-	-
4	76,0	-	108,8	1,5	109,1	299,5	73,2	5,0	-	-
5	68,5	-	147,5	4,1	101,6	323,9	10,5	4,0	-	-
6	71,2	-	666,4	13,5	180,9	258,8	42,5	4,3	-	-
7	77,6	-	220,3	36,7	100,1	243,6	80,9	3,7	-	-
8		-	56	2	172	448		49	2	56
9		-	468	7,5	225	663		11	77	245
10		-	221	2	218	446		119	47	572
11	-	-	370	79	106	463	-	65	-	-
12	-	-	318	-	248	621	-	64	-	-
13	87	9,2	78	-	147 ¹⁾	117	-	-	-	-

1) bez. Auf 13 Vol. -% O₂ i. N.

Erfahrungen bei der Verbrennung biogener Festbrennstoffe

Gesamtstaubemissionen

- Grenzwert 1. BImSchV wird von Strohpellets (auch mit Zuschlagstoffen) im Durchschnitt eingehalten
- Reduzierung um 50 mg/Nm³ durch Entstaubung des Strohfaserstoffes
- Zumischung von 4 % Feinkalk ermöglicht gute Festigkeitseigenschaften [3]
- Emissionsspitzen durch Ascheschieber mit erhöhter Taktfrequenz [1] [4]
- Einsatz von Multizyklon kann Gesamtstaubemissionen auf unter 100 mg/Nm³ reduzieren [4]

Stickoxidemissionen

- Logarithmischer Zusammenhang zwischen Brennstoffstickstoffgehalt und Stickoxidemissionen [1], wobei von [3] kein Zusammenhang gemessen wurde

Korrosion


- k. A.

Verschlackungen

- Hohe Glühverluste in Feuerraumaschen von 27 – 53 % (Weizenstroh) [2]
- Glühverluste in Feuerraumaschen von 1,4 – 8,2 % (Rohrglanzgras) [4]
- Erhöhte Einbindung von Chlor und Schwefel durch Einsatz von Kalk konnte nicht festgestellt werden [3]
- Zumischung bis 3 % Dolomitkalk führt zu Erhöhung von Sinter- und Erweichungstemperatur; Beimischung ab 4 % Dolomitkalk führt zu Erhöhung Schmelz- und Fließpunkt [3]
- Hohe Verschlackungsneigung von Weizenstrohpellets und Rohrglanzgras
- Zusammenhang zwischen Si:K Verhältnis, d. h. Brennstoffe mit niedrigem Verhältniss ca. < 6-9 zeigen Verschlackungen auf [4]

Referenzen

- /1/ Launhardt, T., Hartmann, H., Link, H., Schmid, V., Verbrennungsversuche mit naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinf Feuerungsanlage – Emissionen und Aschequalität, Bayerisches StMLU (Hrsg.), Reihe Materialien Nr. 156, 2000
- /2/ Stöcklein: Messprogramm zur Begleitung des vorübergehenden Getreideeinsatzes in Feuerungsanlagen, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, München, 2003
- /3/ Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.): Entwicklung einer wirtschaftlichen zur energetischen Nutzung von halmgut- und holzartiger Biomasse im Freistaat Sachsen, Dresden, 2002
- /4/ Paulrud, S., Nilsson, C., Briquetting and Combustion of spring-harvested reed canary-grass: effect of fuel composition, In: Biomass and Bioenergy, Volume 20, pp. 25-35, 2001
- /5/ A.P. Bioenergietechnik (Hrsg.): Broschüre Compact Biomasseheizanlage, Hirschau
- /6/ A.P. Bioenergietechnik GmbH, www.oeko-therm.net, 27.01.2009

P&H		
Hersteller	P&H Energy Rævevej 22 7800 Skive – Denmark www.ph-energy.dk	
Modell	PH 150 – 600 Industrie Anlagen	
Leistungsbereich	150 - 600kW _{NWL}	

Ausführung Anlagentechnik

Feuerungsprinzip	<ul style="list-style-type: none"> • Tunnelbrenner
Brennstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Holzpellets, Hackschnitzel, Sägemehl • Getreide, Nussschalen, Muschelschalen
Brennstoffzufuhr	<ul style="list-style-type: none"> • automatisch mittels Stokerschnecke
Verbrennungsluftzufuhr	<ul style="list-style-type: none"> • 2 drehzahlgeregelte Gebläse für Primär- und Sekundärluft
Zündung	<ul style="list-style-type: none"> • Automatisch mittels Heißluftgebläse
Brennkammer	<ul style="list-style-type: none"> • Kanalbrenner mit feuerfester Auskleidung (Dicke: 20mm)
Wärmeübertrager	<ul style="list-style-type: none"> • Rohrbündelwärmeübertrager
- Bauart	<ul style="list-style-type: none"> • Stehende Aufstellung
- Aufstellung	<ul style="list-style-type: none"> • Manuell
- Reinigung	<ul style="list-style-type: none"> • k. A.
- Werkstoff	
Entaschung	<ul style="list-style-type: none"> • halbautomatisch (Asche wird in Aschekasten geschoben) • manuelle Entnahme aus Feuerraum

Ausführung Regelungstechnik

Verbrennungsregelung - Regelgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Lambda
Verbrennungsregelung - Stellgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • k. A.
Leistungsregelung - Regelgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Kesseltemperatur
Leistungsregelung - Stellgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • k. A.
Feuerraumtemperaturerfassung	<ul style="list-style-type: none"> • nein
Glutbetthöhenerfassung	<ul style="list-style-type: none"> • nein
Unterdruckregelung/Saugzug	<ul style="list-style-type: none"> • k. A. / Saugzug vorhanden
Sonstige Regel- und Steuereinrichtungen	<ul style="list-style-type: none"> • k. A.

Maßnahmen zur Verbrennungsoptimierung

Stickoxidemissionen (NO _x)	• Luftstufung
Gesamtstaubemissionen	• integrierte Abscheidung vor Wärmeübertrager
Korrosion	• k. A.
Verschlackungen im Feuerraum	• k. A.

Emissionsmessungen bei Vollast

Lfd. Nr.	Quelle	Brennstoff:	Feuerungsanlage
1	/1/	Holzpellets	PH-97
2	/1/	Energiekorn	PH-97
3	/2/	Energiekorn	PH-47

Emissionen lt. Quelle (13 Vol. - % O₂)

Lfd. Nr.	η _{Kessel} %	O ₂ Vol. - %	CO	C _x H _y	Staub	NO _x	SO ₂	HCl	PAK µg/Nm ³	PCDD/F pg TE/Nm ³
					mg/Nm ³					
1	93,1	-	6,8	0	32	221	-	-	-	-
2	90,4	-	14,8	9	218	174	-	-	-	-
3	79,8	-	118	7	382	668	-	-	-	-

Erfahrungen bei der Verbrennung biogener Festbrennstoffe

- k. A.
- Energiekorn ist kein Regelbrennstoff

Referenzen

- /1/ Danish Technological Institute (Hrsg.): Prüfbericht analog
Prüfung von Heizkesseln gemäß DS/EN 303-5 - Fabrikat: PH 97, 2005, Aarhus
- /2/ TÜV BAYERN SZA (Hrsg.): Prüfbericht analog ÖNORM EN 303-5 - Fabrikat: PH 47, 2003, Wien
- /3/ P&H Energy: www.ph-energy.dk, 27.01.2009

Reka		
Hersteller	Maskinfabriken REKA A/S. Vestvej 7 9600 Aars - Denmark www.biokompakt.com	
Modell	HKRST FSK	
Leistungsbereich	20-60 kW _N	

Ausführung Anlagentechnik

Feuerungsprinzip	<ul style="list-style-type: none"> • Schub- bzw. Treppenrost
Brennstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Späne, Hackschnitzel, Getreide, Pellets,
Brennstoffzufuhr	<ul style="list-style-type: none"> • automatisch mittels Stokerschnecke
Verbrennungsluftzufuhr	<ul style="list-style-type: none"> • 1 modulierendes Gebläse • Manuell verstellbare Luftklappen für Primär- und Sekundärluft
Zündung	<ul style="list-style-type: none"> • manuell
Brennkammer	<ul style="list-style-type: none"> • schamottierter, wassergekühlter Feuerraum
Wärmeübertrager	<ul style="list-style-type: none"> • Rohrbündelwärmeübertrager
- Bauart	<ul style="list-style-type: none"> • liegende Aufstellung
- Aufstellung	<ul style="list-style-type: none"> • manuell
- Reinigung	<ul style="list-style-type: none"> • k. A.
- Werkstoff	
Entaschung	<ul style="list-style-type: none"> • halbautomatisch (Asche wird in Aschekasten geschoben) • Austragung in Sammelbehälter optional

Ausführung Regelungstechnik

Verbrennungsregelung - Regelgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Lambda
Verbrennungsregelung - Stellgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Brennstoffmenge
Leistungsregelung - Regelgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Kesseltemperatur (3stufig)
Leistungsregelung - Stellgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Brennstoff- und Luftmassenstrom
Feuerraumtemperaturerfassung	<ul style="list-style-type: none"> • nein
Glutbetthöhenerfassung	<ul style="list-style-type: none"> • nein
Unterdruckregelung/Saugzug	<ul style="list-style-type: none"> • nein / Saugzug mit manuell verstellbarer Regelklappe
Sonstige Regel- und Steuereinrichtungen	<ul style="list-style-type: none"> • k. A.

Maßnahmen zur Verbrennungsoptimierung

Stickoxidemissionen (NO _x)	<ul style="list-style-type: none"> • Luftregelung
Gesamtstaubemissionen	<ul style="list-style-type: none"> • k. A.
Korrosion	<ul style="list-style-type: none"> • Kesselrücklauftemperatur mindestens 60 °C • Optionale pneumatische Reinigung Wärmeübertrager
Verschlackungen im Feuerraum	<ul style="list-style-type: none"> • Luftgekühltes, bewegliches Rostsystem

Emissionsmessungen bei Volllast

Lfd. Nr.	Quelle	Brennstoff:	Feuerungsanlage
1	/1/	Weizenstrohpellets (8mm)	HKRST FSK 20
2	/2/	Weizenstrohpellets	HKRST FSK 30
3	/1/	70/30 Hackschnitzel / Weizenstrohpellets (8mm)	HKRST FSK 20
4	/1/	50/50 Hackschnitzel / Weizenstrohpellets (8mm)	HKRST FSK 20
5	/2/	50/50 Hackschnitzel / Weizenstrohpellets (8mm)	HKRST FSK 30
6	/2/	50/50 Rapspresskuchen / Weizenstrohpellets	HKRST FSK 30
7	/4/	Weizenstrohpellet (12mm) + 1% Al ₂ (OH) ₃	HKRST FSK 30
8	/4/	Weizenstrohpellet (12mm) + 2% Kaolinite	HKRST FSK 30
9	/4/	Weizenstrohpellet (12 mm) + 1% CaO + 3% Melasse	HKRST FSK 30
10	/1/	Weizenkörner	HKRST FSK 20
11	/3/	Roggenkörner	HKRST FSK 30
12	/2/	Rapspresskuchen	HKRST FSK 30
13	/2/	Miscanthuspellets	HKRST FSK 30
14	/3/	Strohpellets	HKRST FSK 30

Emissionen lt. Quelle (13 Vol. – % O₂)

Lfd Nr.	η _{Kessel}	O ₂	CO	C _x H _y	Staub	NO _x	SO ₂	HCl	PAK	PCDD/F
	%	Vol. – %	mg/Nm ³						µg/Nm ³	pg TE/Nm ³
1	-	-	144	-	224	688	213	-	-	-
2	81,3	-	199	1,1	231	251	223	67	-	-
3	-	-	149	-	58	750	51	-	-	-
4	-	-	110	-	49	566	106	-	-	-
5	90,0	-	190	2,2	233	292	289	45	-	-
6	84,7	-	114	1,8	372	642	493	34,9	-	-
7	-	10	2355	-	-	343	219	-	-	-
8	-	10	1276	-	-	363	278	-	-	-
9	-	10	123	-	679	372	197	-	-	-
10	-	-	1195	-	120	1088	449	-	-	-
11	-	-	1726	-	290	289	-	-	-	-
12	82,1	-	68	3,8	171	390	1169	33,8	-	-
13	82,6	-	64	3,3	230	299	113	47,6	-	-
14	-	-	2167	-	200	234	-	-	-	-

Erfahrungen bei der Verbrennung biogener Festbrennstoffe

Gesamtstaubemissionen

- Getreidekörner halten Grenzwert 1. BImSchV im Durchschnitt ein
- Strohpellets liegen deutlich über Grenzwert 1. BImSchV ($> 200 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$), Einsatz sekundärer Abscheider notwendig
- Mischung von Körnern mit Hackschnitzeln bewirkt Reduzierung Staubemissionen
- 96-98 % der Staubpartikel durchschnittlich $< 2,5 \mu\text{m}$
- Versuche mit 12mm Pellets führen zu schlechter Pelletqualität und zu erhöhter Verschmutzung im Kessel

Stickoxidemissionen

- v. a. abhängig vom Brennstoffstickstoffgehalt
- Einhaltung Grenzwert TA Luft bei Stickstoffgehalt $< 0,3 \%$ (wf)
- Körner weisen höchsten Stickoxidemissionen auf
- Mischung mit Holzhackschnitzel reduziert Stickoxidemissionen (Verdünnungseffekt)

Korrosion

- Hohe Chloremissionen korrelieren mit Chlorgehalt im Brennstoff
- Halmgutpellets weisen höchsten HCl-Emissionen auf

Verschlackungen

- Hohe Verschlackungsneigung von Weizenstrohpellets
- 3-5 % Zuschlagstoffe (CaO , AlOH_3 , CaCO_3) mindern / verhindern Verschlackungen
- Glühverluste 9-10 % in der Asche verschiedener biogener Festbrennstoffe ermittelt
- Problemloser Betrieb trotz Verschlackungserscheinungen mit Rapspresskuchenpellets, Heupellets mit 5 % Talkum, Miscanthus und Mischung 50/50 Rapspresskuchen und Weizenstroh möglich

Referenzen

- /1/ Vetter, Hering, Peisker: Energetische Verwertung von Getreide und Halmgutpellets, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft 2006, Jena
- /2/ Kiesewalter, Röhricht: 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
- /3/ Rationalisierungs-Kuratorium für Landwirtschaft (Hrsg.): Heizen mit Getreide 2, 2005, Rendsburg
- /4/ Nikolaisen et al: Quality Characteristics of Biofuel Pellets, Danish Technological Institute 2002, Aarhus
- /5/ Maskinfabrikken REKA A/S (Hrsg.): Betriebsanleitung Kesseltyp HKRST/V-FSK 20/30/60, 2001, Aars
- /6/ Maskinfabrikken REKA A/S: www.reka.com, 27.01.20