



**Verwertung biogener Abfälle zur Erzeugung stofflicher, thermischer und elektrischer Energieträger und deren Nutzung**

**Förderung durch den kommunalen Innovationsfonds des Landes Baden-Württemberg und den Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz der badenova AG & Co. KG**

**- Abschlussbericht -**

Gefördert durch:



**Baden-Württemberg**

Gefördert durch den  
Innovationsfonds  
Klima- und Wasserschutz

**badenova**  
*Energie. Tag für Tag*



<b>Projekttitle</b>	Verwertung biogener Abfälle zur Erzeugung stofflicher, thermischer und elektrischer Energieträger und deren Nutzung
<b>Projektnummer Land BaWü</b>	Kap 1006 Tit. 88384 RJ 20113/2014 Aktenzeichen 23-223/10
<b>Projektnummer badenova</b>	2014-06
<b>Antragsteller</b>	Abfallwirtschaft und Stadtreinigung Freiburg GmbH
<b>Projektkoordinator</b>	Ingenieurbüro Roth & Partner GmbH, Karlsruhe Niederlassung Freiburg
<b>Projektpartner</b>	Micropower Technology GmbH PYREG GmbH Ithaka-Institut Universität Hohenheim WS Wärmeprozessestechnik Ökoinstitut Langenbruck
<b>Projektstandort</b>	Deponie Eichelbuck, Stadt Freiburg
<b>Geplante Laufzeit</b>	36 Monate. 01.06.2014 – 31.05.2017
<b>Tatsächliche Laufzeit</b>	78 Monate. 01.06.2014 – 31.12.2020
<b>Zuschuss Land BaWü</b>	494.000 EUR
<b>Zuschuss badenova</b>	250.000 EUR

Gefördert durch:

- 2 -



## INHALTSVERZEICHNIS

1	Kurzbeschreibung des Vorhabens .....	- 7 -
2	Fördermittelbereitstellung.....	- 8 -
3	Ausgangslage.....	- 8 -
3.1	Grünabfallnutzung .....	- 9 -
3.2	Pflanzenkohleproduktion .....	- 9 -
3.3	Pflanzenkohleeinsatz.....	- 9 -
3.4	Einsatz von Heißgasturbinen.....	- 10 -
4	Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens .....	- 13 -
4.1	Arbeitsziel Grünabfallnutzung.....	- 13 -
4.2	Arbeitsziel Pflanzenkohleproduktion.....	- 14 -
4.3	Arbeitsziel Pflanzenkohleeinsatz .....	- 14 -
4.4	Arbeitsziel Mikro-Holz-BHKW .....	- 15 -
4.5	Arbeitsziel Heißluftturbine.....	- 15 -
5	Beteiligte am Vorhaben.....	- 16 -
6	Arbeitspakete .....	- 17 -
7	Planung und Ablauf des Projektes .....	- 18 -
7.1	Zeit- und Meilensteinplanung .....	- 18 -
7.2	Erläuterungen zu den Änderungen in der Zeit- und Meilensteinplanung .....	- 19 -
8	Detaillierte Projektbeschreibung .....	- 20 -
8.1	Bestandssituation .....	- 20 -
8.2	Detail- und Genehmigungsplanung des Vorhabens (AP 1) .....	- 22 -
8.3	Mikro-Holz-BHKW.....	- 23 -
8.3.1	Engineering (AP 2).....	- 23 -
8.3.1.1	Mikrogasturbine .....	- 23 -
8.3.1.2	Wärmebilanzen.....	- 23 -
8.3.1.3	Thermoöl- und Heißwasserleistung.....	- 24 -
8.3.2	Ausführungsplanung und Anlagenrealisierung (AP 3) .....	- 24 -
8.3.2.1	Regelkonzept.....	- 25 -
8.3.2.2	Verbrennung .....	- 25 -
8.3.2.3	Hochtemperatur-Wärmetauscher (HT-WT) .....	- 26 -
8.3.2.4	Druckluftvorwärmer (WT-2) .....	- 26 -
8.3.2.5	Auslegung Wärmetauscher .....	- 26 -
8.3.2.6	Mikrogasturbine .....	- 26 -
8.3.2.7	Brennstoffeintrag .....	- 26 -
8.3.2.8	Wärmezuführung .....	- 26 -
8.3.2.9	Änderungen gegenüber der Werkplanung .....	- 27 -

Gefördert durch:

- 3 -





8.3.3	Anlagendauerbetrieb mit Optimierungen und Auswertungen (AP 3).....	- 28 -
8.3.4	Aufgetretene Probleme .....	- 28 -
8.3.5	Technische Erfolge .....	- 28 -
8.3.5.1	Mikro-Holz-BHKW.....	- 28 -
8.3.5.2	Mikrogasturbine .....	- 28 -
8.3.5.3	Hochtemperaturwärmetauscher .....	- 29 -
8.3.6	Ausblick.....	- 29 -
8.4	Grünschnittaufbereitung und Kompostierung.....	- 30 -
8.4.1	Ausführungsplanung und Anlagenrealisierung (AP 4).....	- 30 -
8.4.1.1	Grünabfallanlieferung, Zerkleinerung und Absiebung .....	- 30 -
8.4.1.2	Kompostierung.....	- 31 -
8.4.1.3	Trocknung.....	- 32 -
8.4.2	Technische Erfolge .....	- 33 -
8.5	Pflanzenkohleanlage .....	- 33 -
8.5.1	Ausführungsplanung und Anlagenrealisierung (AP 5).....	- 33 -
8.5.2	Anlagendauerbetrieb mit Optimierungen und Auswertungen (AP 5).....	- 35 -
8.5.3	Aufgetretene Probleme .....	- 36 -
8.5.4	Technische Erfolge .....	- 36 -
8.5.5	Ausblick.....	- 37 -
8.6	Wissenschaftliche Untersuchung von Einsatzgebieten der Pflanzenkohle im Gärsubstrat u. Kompost (AP 6) .....	- 37 -
8.6.1	Einsatz im Gärsubstrat.....	- 38 -
8.6.1.1	Ergebnis.....	- 38 -
8.6.1.2	Ausblick .....	- 38 -
8.6.2	Einsatz als Konditionierungsmittel im Kompostierungsprozess.....	- 39 -
8.6.2.1	Ergebnis.....	- 40 -
8.6.2.2	Aufgetretene Probleme.....	- 41 -
8.6.2.3	Technische Erfolge .....	- 42 -
8.6.2.4	Ausblick .....	- 42 -
8.6.3	Einsatz zur Geruchsreduzierung.....	- 43 -
8.6.3.1	Gärsubstrat .....	- 43 -
8.6.3.2	Kompost:.....	- 44 -
8.6.3.3	Ergebnis.....	- 44 -
9	Bilanzierung des Vorhabens und Wirtschaftlichkeitsanalyse (AP 7) .....	- 44 -
9.1	Gegenüberstellung der Vorhabensziele/Ergebnisse .....	- 45 -
9.2	Kostenbetrachtung.....	- 46 -
9.2.1	Gründe der Kostendifferenz .....	- 47 -

Gefördert durch:

- 4 -



Baden-Württemberg

Gefördert durch den  
Innovationsfonds  
Klima- und Wasserschutz

**badenova**  
Energie. Tag für Tag



9.3	Rentabilität der errichteten Anlagen .....	- 47 -
9.3.1	Mikro-Holz-BHKW .....	- 47 -
9.3.2	Pflanzenkohleanlage .....	- 47 -
10	Öffentlichkeitsarbeit (AP 10) .....	- 50 -

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Übersicht Fördermittelbereitstellung .....	- 8 -
Tabelle 2:	Lösungen in Vorhaben .....	- 13 -
Tabelle 3:	Projektbeteiligte .....	- 16 -
Tabelle 4:	Zeit und Meilensteinplanung .....	- 18 -
Tabelle 5:	Zusammenstellung der bestehenden u. im Vorhaben integrierten Anlagen .....	- 21 -
Tabelle 6:	Emissionsgrenzwerte Karbonisierungsanlage .....	- 35 -
Tabelle 7:	Ergebnisse Geruchsmessungen Gärsubstrat (Quelle: iMA) .....	- 43 -
Tabelle 8:	Ergebnisse Geruchsmessungen Kompost (Quelle: iMA) .....	- 44 -
Tabelle 9:	Gegenüberstellung Vorhabensziele/Ergebnisse .....	- 45 -
Tabelle 10:	Kostenübersicht .....	- 46 -
Tabelle 11:	aktuelle jährliche Kosten Pflanzenkohleanlage .....	- 47 -
Tabelle 12:	aktuelle Erlöse PYREG-Anlage .....	- 48 -

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Vorhabensübersicht .....	- 8 -
Abbildung 2:	Aufrissbild des Mikro-Holz-BHKW .....	- 25 -
Abbildung 3:	Sekundärfeuerung mit Heißluftturbine .....	- 27 -
Abbildung 4:	Verfahrensschema PYREG (Quelle: Biomasse Broschüre der PYREG GmbH) .....	- 33 -
Abbildung 5:	Ausschnitt DüMV Anlage 2 Tabelle 7 .....	- 43 -
Abbildung 6:	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung PYREG-Anlage mit Wärmenutzung .....	- 48 -
Abbildung 7:	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung PYREG-Anlage ohne Nutzung .....	- 49 -

Gefördert durch:

- 5 -



## FOTOVERZEICHNIS

Foto 1: Grünabfallaufbereitung auf dem Deponieplateau .....	- 30 -
Foto 2: Sieb und Häcksler auf dem Deponieplateau .....	- 30 -
Foto 3: Mieten mit Belüftungsrohren .....	- 31 -
Foto 4: Membranabdeckfahrgerät, mit Membran abgedeckte Mieten .....	- 31 -
Foto 5: Heizzentrale mit Heißluftanschlüssen zum Trocknungscontainer .....	- 32 -
Foto 6: Pflanzenkohleanlage Deponie Eichelbuck (links Schubbodencontainer, rechts Kohleaustrag).....	- 34 -
Foto 7: Automatische Absackstation Pyreg-Anlage .....	- 36 -
Foto 8: Einmischen der Pflanzenkohle in Substrat (Quelle: Dr. Hagemann, Ithaka) ...	- 40 -
Foto 9: Bewässerung beim Aufsetzen der Miete (Quelle: Dr. Hagemann, Ithaka) .....	- 40 -
Foto 10: Bewässerung direkt am Sieb.....	- 40 -
Foto 11: Nass-Trocken-Schichtung nach Bewässerung ohne anschließende Mischung.....	- 41 -

## ANLAGEN

- Anlage 1** Lageplan Endgestaltung mit Darstellung der Vorhabensbestandteile
- Anlage 2** Immissionsschutzrechtliche Genehmigung
- Anlage 3** Wärmebilanzen
- Anlage 4** Anlagenschema und R&I-Schemata Mikro-Holz-BHKW
- Anlage 5** Prüfzeugnis Fertigkompost
- Anlage 6** Verbrennungsverhalten Mikro-Holz-BHKW
- Anlage 7** Zertifikat Pflanzenkohle
- Anlage 8** Bericht Einsatz Pflanzenkohle in Vergärung
- Anlage 9** Probenahmeprotokoll Kompost
- Anlage 10** Gutachten Anlagenmodifikation Mikro-Holz-BHKW
- Anlage 11** Bericht Einsatz Pflanzenkohle in Kompostierung

Gefördert durch:

- 6 -



## 1 Kurzbeschreibung des Vorhabens

Auf der Deponie Eichelbuck wird die Stilllegungsmaßnahme gemäß aktuellem Planungsstand Ende 2022 abgeschlossen sein.

Danach soll eine energetische Nachnutzung auf dem Deponiegelände, unter Einbeziehung der Synergien, mit den bereits auf der Deponie vorhandenen und für die Deponienachsorge weiter erforderlichen Einrichtungen betrieben werden. Ein Übersichtslageplan der geplanten Endgestaltung mit Kennzeichnung der im Vorhaben errichteten Anlagen ist dem Bericht in Anlage 1 beigefügt.

Ziel dieser energetischen Nachnutzung ist ein weitgehend geschlossener Energiekreislauf (Wärme und elektrische Energie) durch die Nutzung regenerativer Energieträger aus Abfallströmen in Aufbereitungstechniken für Grünabfälle.

Dabei sollen die Energieträger der Deponie (Deponiegas), die Verbraucher der Nachsorge (Entgasungsanlage, Sickerwasseranlage) und die Speiseresteanlage in diese energetische Nachnutzung eingebunden werden.

Im Rahmen des Gesamtnachnutzungskonzeptes für die Deponie Eichelbuck wurden bisher die folgenden Anlagen- und Betriebsänderungen zur Grünschnittnutzung durchgeführt:

- Aufbereitung des Grünschnitts aus der kommunalen Sammlung durch Vortrennung an der Anfallstelle sowie die Zerkleinerung und Siebung in holzige Fraktionen und krautige Anteile.
- Kompostierung der krautigen Anteile in einer Mietenkompostierung mit Zwangsbelüftung und Membranabdeckung.
- Einsatz des holzigen Anteils der Grünschnittaufbereitung in einer thermischen Anlage zur Erzeugung von Pflanzenkohle.
- Nutzung der Abwärme aus der Pflanzenkohleanlage zur Trocknung der Grobfraktion (Hackschnittel) aus der Grünschnittaufbereitung in einem Satzrockner.
- Verkauf der Pflanzenkohle an die Landwirtschaft zur Bodenverbesserung sowie zur Veredelung von Substrat für die Baumpflanzung.

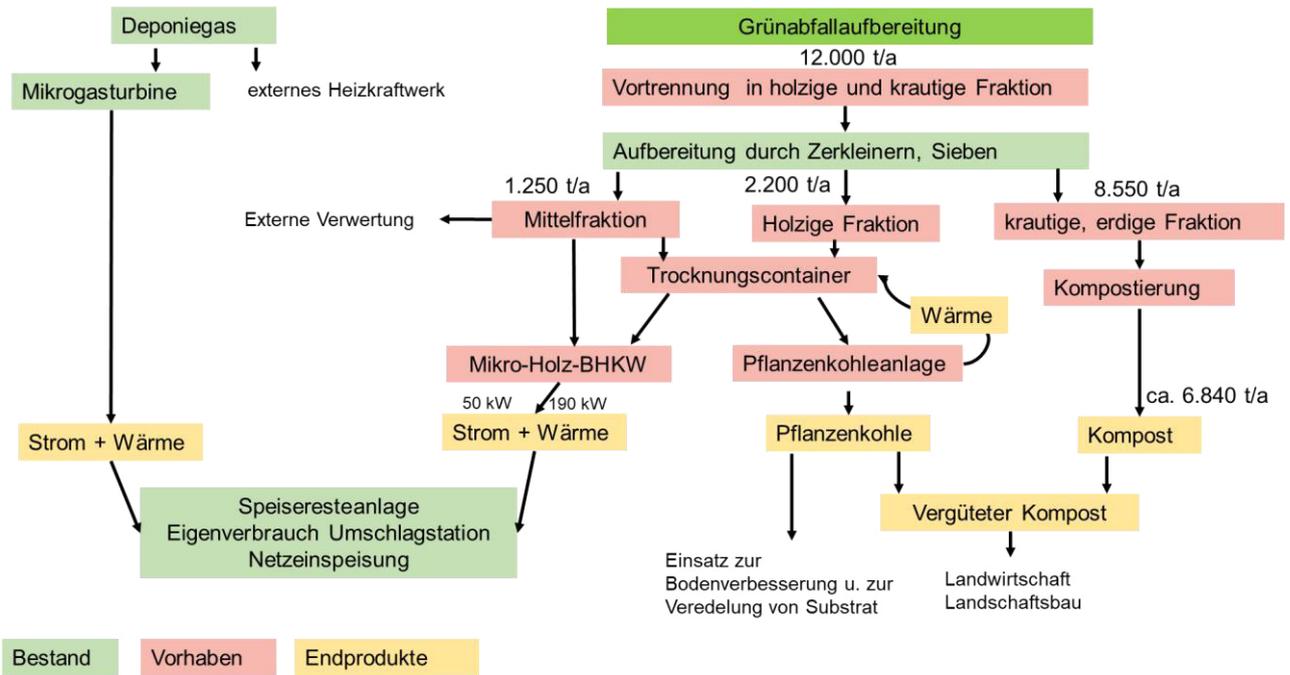
Zukünftig sollen noch folgende weitere Anlagen- und Betriebsänderungen erfolgen:

- Einsatz des holzigen Anteils der Grünschnittaufbereitung in einem Mikro-Holz-BHKW mit abgeschlossener Heißluftturbine.
- Nutzung der Abwärme des Mikro-Holz-BHKW zur Speiserestehygenisierung.
- Erzeugung von Eigenstrom durch die Heißluftturbine.
- Weitere betriebsinterne Nutzung der Abwärme der PYREG-Anlage z.B. zur Trocknung von Altkleidern oder Warmwasserbereitstellung bzw. Heizung des Betriebsgebäudes.
- Einsatz der Pflanzenkohle zur Konditionierung des Kompostes.

Mit diesen einzelnen und ineinandergreifenden Verfahrensschritten der Grünschnittnutzung wird eine optimale Nutzung der stofflichen und energetischen Inhalte des Grünschnitts erreicht.

Gefördert durch:

- 7 -

**Vorhabensübersicht**

**Abbildung 1:** Vorhabensübersicht

## 2 Fördermittelbereitstellung

Die Kostengruppen des Projekts wurden wie folgt bezuschusst:

**Tabelle 1: Übersicht Fördermittelbereitstellung**

Leistung	Kosten (netto)	innovativer Anteil	Zuschuss Land BaWü	Zuschuss Badenova
Hackschnitzelanlage mit EFGT*	608.000 EUR	438.500 EUR	304.000 EUR	86.000 EUR
Hackschnitzeltrocknung*	40.000 EUR	0 EUR	20.000 EUR	
Pflanzenkohleanlage*	475.000 EUR	348.750 EUR	0 EUR	
Pflanzenkohleledesign*	12.000 EUR	12.000 EUR	6.000 EUR	
Sachkosten	75.000 EUR	75.000 EUR	37.500 EUR	37.500 EUR
Personalkosten	235.000 EUR	235.000 EUR	117.500 EUR	117.500 EUR
Kommunikation	10.000 EUR	10.000 EUR	5.000 EUR	5.000 EUR
Öffentlichkeitsarbeit	8.000 EUR	8.000 EUR	4.000 EUR	4.000 EUR
<b>Gesamt</b>	<b>1.463.000 EUR</b>	<b>1.127.250 EUR</b>	<b>494.000 EUR</b>	<b>250.000 EUR</b>

\* Planungs- und Baukosten

Für die Grünschnitzaufbereitung und Kompostierung wurden mit Ausnahme der Trocknung keine Fördermittel bereitgestellt.

## 3 Ausgangslage

Gefördert durch:



### 3.1 Grünabfallnutzung

Ein wesentlicher Teil, der nicht über die Biotonne erfassten Grünabfälle (ca. 1/3 des Gesamtaufkommens), wurde vor Projektbeginn über eine direkte Ausbringung auf Flächen ohne wesentliche Vorbehandlung entsorgt. Hierbei bleibt der im Grünschnitt enthaltene stoffliche und energetische Nutzwert weitgehend ungenutzt. Aus diesem Grund gehen die Grünschnittentsorger immer mehr zu einer Abtrennung des Holzigen Materials aus dem Grünschnitt und einer meist externen Verwertung in Biomasseheizkraftwerken bzw. Hackschnitzelheizanlagen über.

Die Abfallwirtschaft Freiburg bereitet den gesammelten Grünschnitt bereits in einem ersten Schritt durch eine Abtrennung des Holzigen Anteils und einer Verwertung in einem externen Hackschnitzelkraftwerk erfolgreich auf. Die Aufbereitung und Nutzung des Grünschnitts bietet jedoch noch Optimierungspotential.

### 3.2 Pflanzenkohleproduktion

Für die Herstellung von Pflanzenkohle aus Grünabfällen mit dem Verfahren der Pyrolyse lagen bereits erste Erfahrungen von technischen Anlagen vor. Erste Versuche mit der Verkohlung von Klärschlamm konnten mit positiven Ergebnissen abgeschlossen werden.

Von der Fa. Pyreg wurden bereits mehrere Pilotanlagen sowie Probetriebsanlagen errichtet.

Die Technik dieses Anlagentyps ist weitgehend ausgereift und praxistauglich.

Nicht ausreichend erprobt sind der Dauerbetrieb der Anlage in der Praxis und insbesondere hierbei die störungsfreie Substratversorgung.

Hier sind die Voraufbereitungstechnik, die Substratkonfiguration sowie die Zuführtechnik weiter zu optimieren.

### 3.3 Pflanzenkohleeinsatz

Der Ansatz, aus Biomasse hergestellte Kohle (Pflanzenkohle, engl. Biochar) zur Bodenverbesserung einzusetzen, stammt aus der noch jungen Erforschung der Indianerschwarzerden Amazoniens (Terra Preta; Glaser und Birk 2011; Glaser 2007; Glaser et al. 2001). Diese durchschnittlich 20 ha großen Böden finden sich mosaikartig inmitten der Ferralsol-Landschaft. Sie entstanden durch die Lebensweise präkolumbischer Amazonas Indianer vor mehr als 2.000 Jahren (Glaser, 2007). Im Gegensatz zu den unfruchtbaren Ferralsolen ist Terra Preta auch heute noch sehr fruchtbar, humus- und nährstoffreich und weist günstigere pH-Werte sowie eine höhere Wasser- und Nährstoff-Speicherfähigkeit auf (Glaser und Birk 2011). Dadurch sind jährlich mehrere und ertragreichere Ernten ohne zusätzliche Düngung möglich.

Studien der amazonischen Terra Preta-Böden belegen, dass eine nachhaltige Bodenfruchtbarkeit und hohe Humusgehalte aus langandauernden Einträgen von Haushaltsabfällen, Biomasseresten, Exkrementen und Pflanzenkohle resultieren (Glaser und Birk 2011; Abb. 5).

Pflanzenkohle besteht zu 50 – 85% aus Kohlenstoff und fällt als „Abfallprodukt“ der thermochemischen oder hydrothermalen Energieproduktion z. B. aus der PYREG-Anlage an (Verheijen et al. 2009). Neben dem Eintrag hoher Nährstoffmengen (v.a. N, P, Ca, K) wird auch deren Verfügbarkeit durch Anhebung des pH-Wertes erhöht (Glaser et al. 2002). Ferner fördert die poröse Struktur der Pflanzenkohle die Wasserspeicherung und die Aktivität von Bodenfauna und -flora (Joseph et al. 2010). Die hocharomatische Struktur reduziert den mikrobiellen Abbau der Pflanzenkohle und fördert dadurch die langfristige C-Speicherung im Boden (Kimetu et al 2010; Nguyen und Lehmann 2009). Allerdings wird Pflanzenkohle auch mikrobiell teiloxidiert, was die Nährstoffspeicherfähigkeit durch Bildung funktioneller Gruppen erhöht, welche zum reversiblen Kationenaustausch fähig sind (Nguyen und Lehmann 2009).



### C-Sequestrierung

Der Transfer von Kohlendioxid aus der Atmosphäre in langfristige C-Senken (Sequestrierung) ist gegenwärtig eine der größten globalen Herausforderungen. Eine innovative Option ist die Konvertierung von Biomasseabfällen in Kohle und dessen Verwendung in (Acker-)Böden.

Pflanzenkohle aus der Niedrigtemperatur-Vergasung von Pflanzenmaterial ist in der stofflichen Zusammensetzung vergleichbar mit Holzkohle. Es wird deshalb angenommen, dass sich Pflanzenkohle aus der Pyrolyse auch im Boden ähnlich wie Holzkohle verhält (Sohiet al. 2010). Während die Elementverteilung für die Stabilität von Pflanzenkohle wichtig ist, dienen funktionelle Gruppen zur Fähigkeit von Pflanzenkohle, Nährstoffe pflanzenverfügbar zu speichern. Die zweidimensionale Darstellung der atomaren Elementverhältnisse von O/C auf der x-Achse gegen H/C auf der y-Achse verschiedener Pflanzenkohlen in einem sog. van-Krevelen-Diagramm, erlaubt folgende Definition für Pflanzenkohlen: Molare H/C-Verhältnisse  $< 0,6$  und molare O/C-Verhältnisse  $< 0,4$ . Diese Grenzwerte sind wichtig, da auch natürliche organische Verbindungen, wie z.B. Lignin relativ niedrige O/C- und H/C-Verhältnisse aufweisen. PYREG- und Holzvergaserkohlen sind demnach als Pflanzenkohlen zu klassifizieren, während HTC-Kohlen diese Kriterien nicht erfüllen und eher im Bereich von Lignin bzw. Braunkohle angesiedelt sind. Untersuchungen zur Stabilität verschiedener Pflanzenkohlen ergaben mittlere Verweilzeiten von ca. 2.000 Jahren für Pyrolysekohlen (Kuzyakov et al. 2009), während HTC-Kohlen bereits nach mehreren Dekaden vollständig zersetzt werden (Steinbeiss et al., 2009). HTC-Kohlen sind daher zum Zweck der langfristigen C-Sequestrierung nicht geeignet, während sich PYREG-Kohlen und Holzvergaserkohlen aus Sicht der Verweilzeiten hervorragend eignen.

### Kaskadennutzung durch Einsatz als Konditionierungsmittel in der Kompostierung

Es gibt bereits Studien, die belegen, dass die bodenverbessernde Wirkung von Pflanzenkohle durch Zugabe von organischen Düngern im Vergleich zur alleinigen Pflanzenkohleanwendung oder in Verbindung mit Mineraldüngern verbessert wird. Allerdings gibt es noch kaum Untersuchungen über die Wirkung von kompostierter oder fermentierter Pflanzenkohle im Boden oder auf das Pflanzenwachstum.

### Kaskadennutzung durch Einsatz in Biogasanlagen

Verschiedene internationale Forschungsinstitute haben den Einsatz von Pflanzenkohle in Biogasanlagen unter Beimischung im Hauptfermenter und im Nachgärer untersucht.

Unter anderen haben Kumar et al. (1987) verschiedene Zusätze zur Steigerung der Biogasausbeute bei Verwendung von Kuhdung als Gär-Substrat getestet. Die Autoren fanden heraus, dass ein Holzkohle-Zusatz von 5% am effizientesten ist. Sie konnten damit die Biogasausbeute in Modellreaktoren um 16% steigern und in einem Technikumsansatz sogar um 35%. Der Zusatz von Pflanzenkohle scheint daher sehr vielversprechend zu sein, die Gasproduktion in Biogasanlagen zu steigern.

## 3.4 Einsatz von Heißgasturbinen

Für die energetische Umwandlung von Abwärme aus einer Holz hackschnitzelverbrennungsanlage gibt es folgende wesentliche Möglichkeiten der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK):

### Dampfturbine

Einer Feuerungsanlage kann ein Dampferzeuger nachgeschaltet werden. Der Dampf wird meist über Dampfturbinen zur Erzeugung von elektrischer Energie genutzt. Auch Dampfmaschinen werden gelegentlich eingesetzt. Als wirtschaftliche Untergrenze gilt für die Dampfturbine eine elektrische Leistung von 1 MW<sub>el</sub>.

### ORC-Prozess

Es sind keine ORC-Anlagen im angestrebten Leistungsbereich am Markt verfügbar. Wirtschaftliche Anlagengrößen beginnen zum Stand der Technik vor Projektbeginn ab 250 kW<sub>el</sub>.

### Dampf-Schraubenmaschine

Die Schraubenmaschine im motorischen Einsatz als Dampfexpander zählt zur Gruppe der Verdrängermaschinen und hier zu den zweiwelligen Umlaufkolbenexpandern in Drehkolbenbauart mit innerer Volumenänderung des Arbeitsraumes. Dieses Funktionsprinzip findet vorrangig Anwendung in dezentralen Energiesystemen zur Kraft-Wärme-Kopplung im kleinen und mittleren Leistungsbereich. Während im Leistungsbereich oberhalb von 2 MWel in der Regel der Einsatz einer Klein-Dampfturbine sinnvoll erscheint, sinkt deren Wirkungsgrad für abnehmende mittlere Massenströme und damit auch deren Leistung deutlich ab. Durch den robusten Aufbau der Maschine ergeben sich nur geringe Anforderungen an die Dampfqualität, so dass der Schraubenmotor in Sattdampf- und Nassdampfprozessen eingesetzt werden. In dem BMBF/DLR Forschungsprojekt (FKZ:01LY0809) wird aktuell ein entsprechendes System aus Dampfschraube und Dampferzeuger aufgebaut und erprobt. Nach ersten Abschätzungen der Systemkosten wird eine derartige Anlage mit 10.000 € pro kW installierte elektrische Leistung allerdings nicht wirtschaftlich betreibbar sein.

### Direkte Gasnutzung im Verbrennungsmotor/Turbine:

Die Vergasungstechnik von Holz und Holzabfällen hat in den vergangenen Jahren erhebliche Fortschritte gemacht, dennoch ist die Teerproblematik bei der KWK mit einem Verbrennungsmotor bei den meisten Verfahren noch nicht hinreichend gelöst. Die im Holzgas enthaltenen Teerbestandteile können wesentliche Aggregate des Verbrennungsmotors (Turbolader, Ladeluftkühler, Ventile etc.) bzw. der direkt befeuerten Turbine im Betrieb beschädigen oder zerstören. Für Holzgas-Blockheizkraftwerke mittlerer Leistung (0,5 – 5 MW<sub>th</sub>) stehen verschiedene Vergasertypen zur Verfügung, die einen hohen Entwicklungsstand aufweisen. Auch im Bereich größerer Anlagen (>5 MW<sub>th</sub>) gibt es verschiedene kommerzielle Wirbelschichtvergasertypen, die Holz und andere Biomasse in ein Schwachgas umwandeln. Ein mit Pyrolysegas betriebenes Blockheizkraftwerk mit Verbrennungsmotor in der Leistungsklasse <50 kWel wird zurzeit von keinem Hersteller marktreif angeboten. Wegen des relativ geringen Heizwertes des Rohgases gegenüber Erdgas muss bei der Gasaufbereitung das Gas gekühlt werden, um den Füllungsgrad der Kraftmaschine zu steigern. Beim direkten Einsatz von Synthesegas in Turbinen muss dieses zum Einblasen in die Brennkammer verdichtet werden, wozu ebenfalls eine Kühlung und Reinigung vorgeschaltet sein muss. Bei der Kühlung des Rohgases vor der Gasreinigung wird thermodynamisch vorhandene Energie wieder zunichte gemacht, was sich negativ auf die energetische Gesamtbetrachtung auswirkt. Durch den hohen technischen Aufwand für die Rohgasaufbereitung kommen aus wirtschaftlichen Gründen nur große Anlagen mit mehr als 5 MW Wärmeleistung in Frage. In diesem Leistungsbereich können auch aufwändige Vergasungsverfahren wie die zirkulierende Wirbelschicht (UMSICHT), das HTC-Verfahren oder die Flugstromvergasung (CHOREN) realisiert werden. Diese großen installierten Leistungen widersprechen aber der vorteilhaften dezentralen Nutzung von Biomasse auf zweierlei Weise:

1. Anlagen zur Biomasseverwertung können nur da wirtschaftlich betrieben werden, wo viel Biomasse vor Ort anfällt oder die Anfahrwege kurz sind und somit geringe Transportkosten entstehen, da die Energiedichte von Biomasse im Vergleich zu anderen Energieträgern (z.B. Erdöl) relativ gering ist.
2. Es ist problematisch, die anfallende Wärme bei dem ohnehin vorhandenen Wärmeüberschuss (elektrische Wirkungsgrade ca. 10 – 25%) an einem Standort sinnvoll zu nutzen, was sich letztendlich negativ auf den Gesamtwirkungsgrad auswirkt.

Biomassevergaser mit Leistungen unter 1 MW<sub>th</sub> sind durchweg Festbettvergaser, welche bedingt durch ihr Funktionsprinzip in der Brennstoffauswahl stark eingeschränkt sind. Hier kommen meist speziell konditionierte Holzsortimente zum Einsatz, die bezüglich der Holzart, der Stückigkeit, des Aschegehaltes, des Wassergehaltes etc., sehr engen Toleranzen unterworfen sind.

Ein Einsatz von Abfall-Biomassen wie Grünschnitt ist in diesen Anlagen nicht möglich. Das Vergasungsgut wird im Vergaser allein durch Gravitationskräfte bewegt, wodurch es bei Abweichungen von

Gefördert durch:

- 11 -



der idealen Brennstoffbeschaffenheit und Zusammensetzung leicht zu Betriebsstörungen durch Brückenbildung und Verschlackung kommt.

### **Stirling-Motor**

In der Leistungsklasse wesentlich unter 50 kW<sub>el</sub> ist der Einsatz von Stirling-Motoren möglich. Stirlingmotoren zeichnen sich durch ein gleichmäßiges Drehmoment und einen leisen, vibrationsarmen Betrieb aus. Da die Wärmezufuhr extern erfolgt, können Schadstoffemissionen durch eine geeignete Wahl der Verbrennungstechnik minimiert werden. Aufgrund der äußeren Wärmezufuhr ist die Maschine in der Lage, die unterschiedlichsten Wärmequellen wie Solarenergie, Brennholz und andere brennenden Feststoffe aber auch ungereinigte Schwachgase wie Biogas oder Pyrolysegas zu nutzen. Das wesentliche Problem bei der Verknüpfung einer Biomassefeuerung mit dem Stirling-Motor ist die Wärmeübertragung aus dem Rauchgas des Brenners an den Erhitzer eines Stirling-Motors. Hier müssen durch eine geeignete Wahl der Erhitzergeometrie sowie der Strömungsführung ein Anbacken von Ablagerungen verhindert werden. Zum derzeitigen Stand der Technik ist lediglich der Motor der Fa. Sunmaschine bis zur Marktreife entwickelt, die Anlage ist aber mit 2 kW<sub>el</sub> zu klein für die geplante Anwendung. Der Motor der Fa. SOLO ist wegen Insolvenz der SOLO-Stirling GmbH nicht verfügbar.

### **Micro Gasturbine als EFGT**

Als Mikrogasturbinen gelten Gasturbinen mit Wellenleistungen zwischen 10 und 1000 kW. Sie sind in der Regel als Einwellenmaschinen konzipiert, bei denen Generator, Verdichter und Turbine auf einer Welle befestigt sind. Bei diesen Einwellenmaschinen werden ein schnell laufender Permanent-Magnet-Generator und ein elektronisches Getriebe zur Netzeinkopplung eingesetzt. Da solche Maschinen nur ein rotierendes Bauteil enthalten und als Strömungsmaschinen über eine hohe Leistungsdichte verfügen, sind sie anderen thermischen Kraftmaschinen bzgl. Bauraum, Gewicht, Einfachheit und damit auch hinsichtlich der Kosten deutlich überlegen.

Die im Vorhaben zum Einsatz kommende Gasturbine ist eine als Heißgasturbine mit externer Feuerung konstruierte Microgasturbine. Die bereits vorliegenden theoretischen Berechnungen von Acrona, können innerhalb des Zuschussvorhabens als Grundlage für die Umkonstruktion des Gasturbinendesigns in ein Heißluftturbinendesign herangezogen werden.

Die Heißluftherzeugung erfolgt extern in der Hackschnitzelanlage mit nachgeschaltetem Heißgaswärmetauscher. Zu diesem Verfahren liegen bereits mehrere Untersuchungen zur Optimierung des Wärmeübergangsprozesses und alternativer Wärmetauschprinzipien (z.B. G. Zimmermann, 2010, TU München) sowie Erfahrungen aus Piloterprobungsverfahren (z.B. Ökoinstitut Langenbruck) und aus Prototypanlagen (z.B. Fa. Schmid AG, Werk Eschlikon; Stadt Lörrach) vor. Am Ökozentrum Langenbruck wird eine Pilotanlage, bestehend aus einer Holzhackschnitzelverbrennung, einem Heißgassystem und einer Heißluftturbine mit 100 kW elektrischer und 200 kW thermischer Leistung betrieben. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen zeigen die grundsätzliche technische Reife und die Möglichkeit des kommerziellen Einsatzes auf.

Die Optimierung und Weiterentwicklung des Wärmeaustauschanlagenteils, der Steuerung (Notabschaltung) sowie der Turbinenkonfiguration im kommerziellen Einsatz sind noch weiter zu führen.



#### 4 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens

Ziel des Vorhabens ist eine Verbesserung der Klimabilanz durch den Einsatz von regenerativ, aus dem Grünabfall gewonnener Energieträger und deren energetisch und stofflich optimierte Verwertung. Hierdurch soll der Einsatz von Primärenergieträgern wie Propangas nahezu völlig ersetzt werden und durch die Erzeugung von Pflanzenkohle ein idealer Bodenverbesserer und Biostoffträger gewonnen werden.

Die Ergebnisse des Projektes können sowohl für die energetische Nachnutzung auf Deponien als auch für die optimierte Verwertung von Grünabfällen an anderen Standorten eingesetzt werden. Die Entwicklung und Erprobung eines extern betriebenen Heißluftturbinenprozesses, für den Einsatz von Hackschnitzeln, bietet eine Übertragungsmöglichkeit auf Kleinenergieversorgungszentren der Region.

**Tabelle 2:** Lösungen in Vorhaben

Problempunkt	Lösung in Vorhaben
Standortverfügbarkeit	Deponiegelände mit Deponiekörper bietet auf Grund der verfügbaren Fläche, der vorhandenen Infrastruktur und der auf Grund der Lage guten UVP-Situation einen ausreichend und sogar nahezu idealen Standort.
Standort mit ausreichendem Prozesswärmebedarf	Durch die gleichzeitig ökologische und wirtschaftlich sinnvolle Ansiedlung einer Speiseresteaufbereitungsanlage am Standort ist ein Dauerabnehmer für Prozesswärme und elektrischer Energie in relevanter Größe am Standort vorhanden
Technische Möglichkeit der optimierten energetischen Nutzung	Das Vorhaben beinhaltet die 2 energetischen Nutzungsanlagen für das holzige Material. Zum einen Teil in einer KWK-Anlage mit der Technik der EFGT und zum anderen die stoffliche und energetische Nutzung in der Pflanzenkohleanlage.
Wirtschaftlichkeit	Eine reine Kompostierung des Grünabfalls wird in den meisten Fällen kein positives wirtschaftliches Ergebnis erzielen können. Durch die Kombination einer energetischen Nutzung in einer KWK-Anlage, dem direkten Eigenverbrauch der elektrischen Energie und der Wärmeenergie sowie der Erzeugung von Pflanzenkohle mit einer stofflichen Kaskadennutzung sowie die günstigen Standortbedingungen, erreicht das Vorhaben ein positives wirtschaftliches Ergebnis.

##### 4.1 Arbeitsziel Grünabfallnutzung

Durch die Aufbereitung der im Einzugsgebiet der Stadt Freiburg anfallenden Grünabfälle sollen die unterschiedlichen Fraktionen (holzige und erdige) so getrennt werden, dass zum einen ein über die Verbrennung energetisch nutzbarer und zum anderen ein über die Kompostierung als Humus nutzbarer Anteil sowie eine über den Pyrolyseprozess nutzbare Pflanzenkohle entsteht. Hierdurch soll eine ökologisch und wirtschaftlich optimierte Nutzung der Grünabfälle erreicht werden.



#### 4.2 Arbeitsziel Pflanzenkohleproduktion

Ziel ist es, mit der Pflanzenkohleanlage der Firma Pyreg einen stabilen und wirtschaftlichen Dauerbetrieb mit dem Einsatz unterschiedlicher Grünschnittmaterialien zu erproben und nachzuweisen.

Die optimierte Aufbereitung und Dosierung sowie eventuelle Vormischung der Verarbeitungsmaterialien sollen im Anlagenbetrieb ermittelt werden.

Die erzeugte Pflanzenkohle soll in einer Art Kaskadennutzung (z.B. Substrat Biogasanlage und danach als Bodenverbesserungsstoff) eingesetzt werden.

#### 4.3 Arbeitsziel Pflanzenkohleinsatz

##### **Bodenverbesserung**

Das hier beschriebene Projekt soll zeigen, dass die im Grünabfall und vergleichbaren Abfällen enthaltenen Nährstoffe durch die Pflanzenkohle gebunden werden, wodurch sie anschließend den angebauten Pflanzen wieder zur Verfügung stehen.

Ein weiteres Ziel wird der nachhaltige Aufbau von Humus in den landwirtschaftlich genutzten Böden sein (Terra-Preta-Effekt). Der Humusgehalt spielt eine wichtige Rolle für das Bodenleben, für die Ertragskraft der Pflanzen und für Dienstleistungen des Ökosystems. Die Verwendung biologisch unbedenklicher Komposte führt zu weniger künstlichem Dünger und damit zu einer Erhöhung der Bodenaktivität und Biodiversität im Boden und auf dem Feld. Dies kann noch unterstützt werden, durch die einhergehende Möglichkeit eines geringeren Einsatzes von Pestiziden. Dadurch ist mit höheren Erträgen und einer verbesserten Pflanzengesundheit zu rechnen. Ein weiterer Vorteil sind geringere Kosten durch die Einsparung von Düngemitteln, Kalk und Herbiziden im laufenden Betrieb. Werden diese Annahmen durch das Projekt bestätigt, könnten die so veredelten Komposte künftig wertschöpfend als Bodenverbesserer gehandelt werden.

##### **Biogasproduktion**

Im Verlauf des Projektes sollen Versuche stattfinden, um die Pflanzenkohle schon vor der Silierung in die Biomasse einzubringen. Dadurch wird erwartungsgemäß eine saubere Milchsäuregärung gefördert, Pilzbefall und die damit zusammenhängende Bildung von Mycotoxinen verhindert, und Pestizide sowie andere Belastungen der Biomasse adsorbiert. Darüber hinaus wird bei der Vergärung der Biomasse im Biogasreaktor das mikrobielle Milieu positiv beeinflusst, die Aktivität der methanbildenden Bakterien wird verbessert. Kumar et al. (1987) testeten verschiedene Zusätze zur Steigerung der Biogasausbeute bei Verwendung von Kuhdung als Gär-Substrat. Die Autoren fanden heraus, dass 5% Holzkohle-Zusatz am effizientesten wirkt. Sie konnten damit die Biogasausbeute in Modellreaktoren um 16% steigern und in einem Technikumsansatz sogar um 35%. Der Zusatz von Pflanzenkohle scheint daher sehr vielversprechend zu sein, um auch die Biogasproduktion von anderen Gärsubstraten zu steigern.

Es soll die unmittelbare (vor Ort) Zumischung der Pflanzenkohle in das Speiserestesubstrat der Speiseresteanlage, vor Übergabe des Substrates in die Biogasanlage untersucht werden. Hierdurch wird eine deutliche Aufwertung des Speiserestesubstrats für den Einsatz in der Vergärungsanlagen erwartet.

Die Motivation dieser Versuche stammt sowohl aus Praxisberichten als auch aus wissenschaftlichen Studien, die von Gasmehrerträgen, reduzierter Freisetzung von Ammoniak oder höherem Methan-Anteil im Biogas berichten.



#### 4.4 Arbeitsziel Mikro-Holz-BHKW

Bei energetischen Nachnutzungen von Deponiestandorten werden zum Betrieb der Anlagen meist elektrische Energie und Wärmeenergie in einem erheblichen Maße benötigt. Diese kann meist noch während der Stilllegungsphase der Deponie durch das erfassbare Deponiegaspotenzial (BHKW-Anlage) ausreichend gedeckt werden.

Im späteren Verlauf, wird dieses Potenzial mit abnehmender Deponiegasproduktion der Deponie nicht mehr ausreichen.

Hier ist dann für einen energieautarken und auch ökologischen Weiterbetrieb der Anlagen ein regenerativer Ersatzenergieträger erforderlich.

Diese Situation besteht auch für die Deponie Eichelbuck.

Ein verfügbarer Energieträger aus dem Aufgabenbereich der Abfallentsorger sind die aus dem Grünabfall gewinnbaren Holzhackschnitzel.

Ziel des Vorhabens ist es, eine Holzhackschnitzelanlage zu entwickeln, deren Abhitze nicht nur für die direkte Nutzung als Wärmeträger, sondern auch als Heißluft für den Betrieb einer Heißluftturbine geeignet ist.

Damit soll der regenerative Energieträger „Holzhackschnitzel“ energetisch, ökologisch und wirtschaftlich optimiert in Form einer KWK-Anlage eingesetzt werden können.

#### 4.5 Arbeitsziel Heißluftturbine

Auf der Deponie Eichelbuck werden seit dem Jahr 2006 Microgasturbinen zur energetischen Nutzung des Deponieschwachgases erfolgreich betrieben.

Ziel ist der teilweise Ersatz dieser Gasturbinen, nach deren Standzeit (10 bis 12 Jahre), durch Heißluftturbinen, in denen dann die in der Hackschnitzelanlage erzeugte Heißluft genutzt werden kann.

Gemeinsam mit dem Ökoinstitut Langenbruck und MPT soll am Standort Eichelbuck mit den dort vorhandenen Gegebenheiten die Heißluftturbinen in Kombination mit dem Heißgassystem, für den technischen Einsatz und mit einer optimierten Energieausbeute weiterentwickelt werden.



## 5 Beteiligte am Vorhaben

Das Vorhaben wurde durch die Abfallwirtschaft und Stadtreinigung Freiburg GmbH (ASF) mit den folgenden Projektbeteiligten im Unterauftrag der ASF durchgeführt:.

**Tabelle 3: Projektbeteiligte**

Projektbeteiligter	Aufgabe
Ingenieurbüro Roth & Partner GmbH	Koordination, Anlagen- und Bauwerksplanung, Kommunikation, Öffentlichkeitsarbeit, Ermittlung- und Auswertung Betriebsdaten
WS Wärmeprozess-technik/Ökoinstitut Langenbruck, Micropower Technology GmbH	Thermodynamische und technische Auslegung Mikro-Holz BHKW mit Heißluftturbine, Ausführungsplanung und Anlagenrealisierung Mikro-Holz-BHKW mit Heißluftturbine
FFE Solutions GmbH	Wärmetausche für Mikro-Holz-BHKW/Speiseresteanlage
Regierungspräsidium Freiburg	Genehmigungsverfahren
iMA Richter & Röckle	Immissionsgutachten
Dipl. Ing. (FH) Ralf Wermuth	Erstellung Landschaftspflegerischer Begleitplan
Lopper Kesselbau GmbH	Lieferant Holzhackschnitzelanlage
Tief- und Rohrleitungsbau Klumpp GmbH	Lieferung und Montage Thermoöl- und Heißwasserrohrleitung
Bruns Umwelt- und Entsorgungstechnik GmbH & Co. KG	Lieferant Schubbodenbehälter
Pyreg GmbH	Ausführungsplanung und Anlagenrealisierung sowie Dauerlaufversuch Pflanzenkohleanlage
PRÄZI-Fördertechnik GmbH	Lieferant Fördertechnik Pyreg-Anlage
Lauber GmbH	Lieferung Trocknungsanlage
Disch GmbH & Co. KG	Rohbau Umschlagplatz und Mikro-Holz-BHKW
Wiesler & Jakob Bauingenieure	Tragwerksplanung
Stahlbau Winterhalter GmbH	Überdachung Pyreg-Anlage, Mikro-Holz-BHK und Lager Plateau; Leitungstrasse Mikro-Holz-BHKW/Speiseresteanlage
Dipl. Ing. Uwe Kniep Elektrotechnik GmbH	Lieferung und Montage Elektrotechnische Anlagen
Schmid Haustechnik GmbH	Herstellung Versorgungsleitungen
baden IT, G&R Netzwerktechnik GmbH	Anbindung und Blitzschutz für Mikro-Holz-BHKW Pyreg-Anlage und Trocknung
INGUS	Brandschutzkonzept
Müller BBM GmbH	Abnahmeprüfung Pyreg-Anlage
UTV AG	Anlagenrealisierung Kompostierung
Ithaka Institut Universität Hohenheim iMA	Wissenschaftliche Begleitung Pflanzenkohle, Versuchsdurchführungen
JOOS Umwelttechnik GmbH	Herstellung Plateau



## 6 Arbeitspakete

Im Folgenden werden die Arbeitspakete im Rahmen des Vorhabens beschrieben.

### **AP 1: Anlagen- und Bauwerksplanung mit Genehmigungsverfahren (verantwortlich: IRP)**

Das AP 1 beinhaltet die Anlagen- und Bauwerksplanung sowie die Genehmigungsplanung für das Gesamtvorhaben. Für das Vorhaben muss eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung gemäß §4 BImSchG für die Errichtung und den Betrieb von Anlagen zur Verwertung biogener Abfälle zur Erzeugung stofflicher, thermischer und elektrischer Energieträger sowie deren Nutzung bei der Aufbereitung der Abfälle auf dem Gelände der Deponie Eichelbuck Freiburg erwirkt werden.

### **AP 2: Engineering Mikro-Holz-BHKW (verantwortlich: MPT)**

Das AP 2 beinhaltet die thermodynamische und technische Auslegung des Mikro-Holz-BHKW. Hierzu zählt die thermodynamische Optimierung des EFGT-Prozesses (EFGT = Externally Fired Gas Turbine) für die Nutzung des Hackschnitzelrauchgases in einer Heißluftturbine, die Auslegung und Konfiguration eines energetisch und technisch optimierten EFGT-Prozesses, die Entwicklung eines praxisanwendbaren EFGT-Prozesses sowie die Ermittlung der energetischen ökologischen und wirtschaftlichen Betriebsparameter des EFGT-Prozesses.

Hauptentwicklungsarbeit steckt noch in der Optimierung der Wärmeübertragung vom Rauchgas zur Heißluft für die Turbine (Optimierung der Wärmetauscher-Konfiguration) und in der Steuerungstechnik der Heißluftturbine (z.B. Abschaltverhalten bei Energieabnahmeausfall).

### **AP 3: Ausführung Mikro-Holz-BHKW mit Testbetrieb und Dauerlaufversuch (Probetrieb) (verantwortlich: MPT)**

Das AP 3 beinhaltet die Ausführungsplanung sowie die Anlagenrealisierung des Mikro-Holz-BHKW mit Probetrieb und Dauerlaufversuch. Die Planung zur Realisierung dieses Anlagenteils baut dabei auf den bereits vorhandenen Erkenntnissen von Versuchsanlagen, Pilotanlagen und Prototypen, insbesondere der Erkenntnisse aus der Pilotanlage des Ökozentrums Langenbruck (wissenschaftliche Begleitung des Projektteils durch das Ökozentrum Langenbruck) auf. Beim Dauerlaufversuch werden die Betriebswerte zur Anlagenoptimierung und für die Gesamtbilanz des Vorhabens aufgenommen.

### **AP 4: Ausführungsplanung und Anlagenrealisierung Grünschnittaufbereitung mit Kompostierung und Trocknung (verantwortlich: IRP)**

Das AP 4 beinhaltet die Planung und Ausführung der Grünschnittaufbereitung mit Kompostierung und der Holzhackschnitzeltrocknung. Die benötigte Wärmeenergie für die Trocknung soll aus der Abwärme der Pflanzenkohleanlage zur Verfügung gestellt werden.

Für die Kompostierungsanlage erfolgt vor dem Regelbetrieb ein mehrmonatiger Probetrieb indem der Anlagenbetrieb optimiert und die Betriebswerte aufgenommen und ausgewertet werden.

### **AP 5: Planung und Ausführung Pflanzenkohleanlage mit Testbetrieb und Dauerlaufversuch (Probetrieb) (verantwortlich: PYREG)**

Das AP 5 beinhaltet die Planung und Ausführung der Pflanzenkohleanlage mit Probetrieb, Abnahme und Dauerlaufversuch. Im Rahmen des Probetriebs soll die Anlage soweit optimiert werden, dass sie im Dauerlauf störungsfrei und möglichst wenig Personaleinsatz betrieben werden kann.

### **AP 6: Wissenschaftliche Begleitung Pflanzenkohle (verantwortlich: Uni Hohenheim, Ithaka Institut)**

Das AP 6 beinhaltet die wissenschaftliche Untersuchung von möglichen Einsatzgebieten der Pflanzenkohle im Gärsubstrat und Kompost sowie deren Begleitung.

### **AP 7: Wirtschaftlichkeitsanalyse und Gesamtbilanzierung Vorhaben**

Da AP 7 beinhaltet die Ermittlung der betriebstechnischen und wirtschaftlichen Daten der errichteten Anlagen im Dauerbetrieb und die Gesamtbilanzierung des Vorhabens.

Gefördert durch:

- 17 -





**AP 8: Projektkoordination (verantwortlich: IRP)**

Das AP 8 umfasst die Koordination des Projekts zwischen den beteiligten Partnern.

**AP 9: Kommunikation (verantwortlich: IRP)**

Das AP 9 umfasst die Durchführung von Meetings und das Erstellen von Protokollen sowie der Projektstands – und Abschlussberichte.

**AP 10: Öffentlichkeitsarbeit (verantwortlich: IRP)**

Das Arbeitspaket beinhaltet die Pressearbeit sowie die Veröffentlichung der Arbeitsergebnisse.

**7 Planung und Ablauf des Projektes**

Der ursprüngliche Bewilligungszeitraum lief vom 01.06.2014 bis 30.11.2017. Der Bewilligungszeitraum wurde mit dem Schreiben vom 12.12.2018 des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg bis zum 31.12.2019 und mit dem Schreiben vom 05.12.2019 bis zum 31.12.2020 verlängert.

**7.1 Zeit- und Meilensteinplanung**

**Tabelle 4:** Zeit und Meilensteinplanung

Meilenstein	Arbeitspaket	Beschreibung	Zeitraum Antrag	Zeitraum geändert
1 Planung abgeschlossen, Genehmigung erteilt	AP 1	Detail- und Genehmigungsplanung Gesamtvorhaben	01.07.2014 - 09.02.2015	
	AP 2	Engineering Mikro-Holz-BHKW	01.07.2014 - 17.11.2014	01.07.2014 - 08.06.2015
	AP 1	Genehmigungsverfahren	18.11.2014 - 09.02.2015	03/2015- 03/ 2016
	AP 8	Projektkoordination	01.07.2014 - 09.02.2015	01.07.2014 - 03/ 2016
	AP 9	Meetings, Aktenvermerke, Projektstandsberichte	01.07.2014 - 09.02.2015	01.07.2014 - 03/ 2016
	AP 10	Teilnahme an Workshop von Umwelttechnik BW  Workshop „Folgenutzung von Deponien“, Windmühlenberg Karlsruhe  Fachgespräch Deponie Eichelbuck „Energiekonzepte für Deponien“  Tagung „Zeitgemäße Deponietechnik, ISWA“, 2015		20.10.2014  21.5.2012  23.10.2014  12.03.2015

Meilenstein	Arbeitspaket	Beschreibung	Zeitraum Antrag	Zeitraum geändert
2 Anlagenrealisierung und Testbetrieb abgeschlossen	AP 3	Ausführungsplanung und Anlagenrealisierung Mikro-Holz-BHKW	10.02.2015 - 19.10.2015	10.09.2015 - 10/2017
	AP 4	Ausführungsplanung und Anlagenrealisierung Grünschnitzaufbereitung	10.02.2015 - 04.05.2015	04/2016 - 04/2020
	AP 5	Ausführungsplanung und Anlagenrealisation Pflanzkohleanlage	10.02.2015 - 19.10.2015	02/2015 - 04/2016
	AP 3	Anlagentestbetrieb Mikro-Holz-BHKW mit Anlagenprüfung, Abnahme	20.10.2015 - 16.11.2015	1. Flox-Betrieb am 18.10.2017
	AP 5	Anlagentestbetrieb Pflanzkohleanlage mit Anlagenprüfung, Abnahme	20.10.2015 - 16.11.2015	IBN mit Testlauf: 6.-8.12. 2016
	AP 8	Projektkoordination	10.02.2015 - 16.11.2015	03/2016 bis heute
	AP 9	Meetings, Aktenvermerke, Projektstandsberichte	10.02.2015 - 16.11.2015	03/2016 bis heute
	AP 10	Einweihung mit Umweltministerium	Oktober 2016	März 2017
3 Anlagendauerbetrieb mit Optimierungen und Auswertungen (Probetrieb)	AP 3	Probetrieb Mikro-Holz-BHKW mit Heißluftturbine, Anlagenoptimierungen, Betriebswerteaufnahme und -auswertung	17.11.2015 - 30.06.2017	x
	AP 4	Probetrieb Kompostierungsanlage, Anlagenoptimierung und Betriebswerteaufnahme- und auswertung	-	seit 04/2020
	AP 5	Probetrieb Pflanzkohleanlage, Anlagenoptimierungen, Betriebswerteaufnahme und -auswertung	17.11.2015 - 30.06.2017	seit 12/2016
	AP 6	wissenschaftliche Untersuchung von Einsatzgebieten der Pflanzkohle im Gärsubstrat+Kompost	08.03.2016 - 30.06.2017	05/2019 - 10/2020
	AP 7	Wirtschaftlichkeitsanalyse Gesamtanlage und Gesamtbilanzierung Vorhaben	15.12.2015 - 30.06.2017	04/2020-heute
	AP 8	Projektkoordination	17.11.2015 - 30.06.2017	bis heute
	AP 9	Meetings, Aktenvermerke, Projektstandsbericht, Abschlussberichte	17.11.2015 - 30.06.2017	bis heute

## 7.2 Erläuterungen zu den Änderungen in der Zeit- und Meilensteinplanung

Für das Gesamtprojekt wurde eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung beantragt und erteilt. Auf Grund von Einwänden innerhalb des Genehmigungsverfahrens für das Gesamtprojekt kam es zu wesentlichen Verzögerungen im Projektablauf. Die immissionsschutzrechtliche Genehmigung (Genehmigungsbescheid RP FR, AZ 54.2-8983.01/FR-016.7) wurde erst im März 2016 erteilt. Dies stellte bereits eine Verzögerung von einem Jahr zur ursprünglichen Planung dar.

Die Pyreg-Anlage läuft seit Dezember 2016 weitgehend störungsfrei. Mehrere erforderliche Nachinstallationen an der Anlage selbst sowie im Umfeld der Anlage zur Integration in das Versorgungsnetz und zum Anschluss an die Trockneranlage, haben den Beginn des Probetriebs verzögert. Aus diesem Grund hat sich die Zertifizierung der produzierten Pflanzkohle ebenfalls weiter hinausgeschoben. Die ASF hat am 18. August 2017 die Anmeldung zur Zertifizierung der Pflanzkohle bei bio.inspekta GmbH beantragt. Hierzu wurden die erforderlichen Proben eingesandt und von der Zertifizierungsstelle die Ortsbesichtigung durchgeführt. Mit Datum vom 15.01.2018 erhielt die ASF GmbH unter der Betriebsnummer 70746 das Zertifikat für die Aufbereitung und den Handel der Pflanzkohle der „premium“ Qualität. Erst im Anschluss wurden Versuche mit der Pflanzkohle geplant.

Gefördert durch:

- 19 -



Die Inbetriebnahme des Mikro-Holz-BHKW erfolgte schrittweise seit Oktober 2017. Seit Oktober 2018 wird vorerst nur Heißwasser erzeugt und die Mikrogasturbine wurde luftseitig isoliert. Es treten in allen Temperaturbereichen Verpuffungen auf, ebenso im Flox-Betrieb. Die Lopper-Holzfeuerung und der Flox-Brenner als herkömmliche Standardanlagen wurden als „einfache Anlagenteile“ betrachtet. Genau diese Anlagenteile in Kombination bereiten nun jedoch Probleme und machen einen sicheren Betrieb der Gesamtanlage derzeit unmöglich.

Da der erste Teil des Deponieplateaus aufgrund des verzögerten Baufortschritts der Oberflächenabdichtung durch die Realisierung von Magerrasenflächen erst im Herbst 2019 fertiggestellt werden konnte, konnte die Grünschnittaufbereitung mit Kompostierung erst Ende 2019 auf dem Deponieplateau errichtet werden. Die Versuche mit der Pflanzenkohle erfolgten aufgrund der zu erwartenden Witterungseinschränkungen im Winterbetrieb erst im Frühjahr 2020.

## 8 Detaillierte Projektbeschreibung

### 8.1 Bestandssituation

Auf der Deponie Eichelbuck wird die Stilllegungsmaßnahme gemäß aktuellem Planungsstand Ende 2022 abgeschlossen sein. Nach Abschluss der Stilllegung soll auf dem Deponiegelände und auch dem Deponiekörper selbst eine energetische Nachnutzung eingerichtet und betrieben werden. Hierzu werden die bereits bestehenden Anlagen weitergeführt bzw. ergänzt und um weitere energetische Anlagen erweitert. Für das Nachnutzungskonzept wurde ein Bebauungsplanverfahren durchgeführt.

Das Nachnutzungskonzept umfasst neben den im Detail beschriebenen Anlagen aus dem Zuschussvorhaben noch folgende weitere Einrichtungen:

- PV-Anlage
- Kehrrichtaufbereitungsanlage
- Glasumschlaganlage
- Sortieranlage Wertstoffe
- Kleinanlieferanlage
- Informations- und Weiterbildungszentrum (Pavillon auf Deponieplateau)
- Brauchwasserversorgung (Regenwasserspeicherung)
- Sickerwasserbehandlungsanlage

Die folgenden Nutzungsanlagen sind bereits auf der Deponie vorhanden und werden wie folgt in das Zuschussvorhaben integriert:



**Tabelle 5:** Zusammenstellung der bestehenden u. im Vorhaben integrierten Anlagen

Anlage	Betriebsgröße	Integration in Vorhaben
Abfallumschlagstation		<ul style="list-style-type: none"><li>• Bezug von elektr. Energie aus Vorhaben</li></ul>
Speiseresteanlage	10.000 t/a	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bezug von elektrischer und thermischer Energie aus Vorhaben</li><li>• Ggf. Gärsubstratlief erung für Kohlezumischung und Verwertung Biogasanlage</li></ul>
Deponiegasnutzungsanlage	120 m <sup>3</sup> /h 2 Turbinen	<ul style="list-style-type: none"><li>• Integration Heißluftturbine</li><li>• Zeitlich begrenzte Weiternutzung Gasturbine</li></ul>
Deponiegaslieferung an externes BHKW	50-100Nm <sup>3</sup> /h	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ggf. Erhöhung der Gaslieferung</li></ul>
Grünabfallaufbereitung	10.000 t/a	<ul style="list-style-type: none"><li>• Erweiterung um verbesserte Trennung</li><li>• Erweiterung auf 12.000 t/a</li><li>• Erweiterung um Holztrocknung</li><li>• Erweiterung um Kompostierung</li><li>• Ggf. Erweiterung um Kohlezumischung</li></ul>
Trafostation mit Einspeisung Überschussstrom	630 kVA	<ul style="list-style-type: none"><li>• Überschussstromeinspeisung</li></ul>
Deponieplateau	ca. 8.000 m <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ausbau innerhalb der Stilllegungsmaßnahme zu Grünabfallaufbereitungsfläche („Badewanne“).</li><li>• Erweiterung um Teilüberdachung</li></ul>
Betriebsgebäude	3 Stück	<ul style="list-style-type: none"><li>• Nutzung für Personal</li></ul>
Umzäunung, Zufahrt, interne Fahrstraßen, Infrastruktur		<ul style="list-style-type: none"><li>• Nutzung</li></ul>
Nachsorgepersonal		<ul style="list-style-type: none"><li>• Mitnutzung</li><li>• bessere Auslastung</li><li>• verbesserte Nachsorgequalität</li></ul>



## 8.2 Detail- und Genehmigungsplanung des Vorhabens (AP 1)

Gemäß der bereits vorliegenden Konzeption und den Zuschussanträgen wurde die Detail- und Genehmigungsplanung zur Realisierung der energetischen Nutzung des Grünschnitts auf der Deponie Eichelbuck erstellt.

Das Vorhaben wird auf dem planfestgestellten Gelände der Deponie Eichelbuck installiert und betrieben (vgl. Übersichtslageplan in Anlage 1).

Das Eingangslager, die Grünschnittoaufbereitung und die Kompostierung werden auf dem Deponieplateau installiert. Das Mikro-Holz-BHKW wird am Deponiefuß West, in unmittelbarer Nähe zur Speiseresteanlage, installiert. Die Pflanzenkohleanlage mit der Holz Trocknungsanlage wird im Bereich der bestehenden Umschlaganlage installiert.

Für die Verfahren auf dem Deponieplateau wird die in der Stilllegung genehmigte Kuppenausbildung zu einer sogenannten „Badewanne“ umgeformt. Dadurch entsteht eine weitgehend ebene Fläche innerhalb dieser „Badewanne“ von rund 8.000 m<sup>2</sup>.

Die Oberflächenabdichtung wird unverändert zum genehmigten Aufbau hergestellt. Allerdings wird die über der Abdichtung genehmigte Rekultivierungsschicht durch eine sogenannte, nach Deponieverordnung Anhang 1 Ziffer 2.3.2 definierte, Funktionsschicht (rund 1,30 m mineralische Tragschicht und Straßenasphaltaufbau) ersetzt. Alle zu gründenden Bauwerke in diesem Bereich werden auf oder innerhalb der Tragschicht gegründet. Die damit verbundenen Änderungen innerhalb der Stilllegungsmaßnahme wurden abfallrechtlich angezeigt.

Zur energetischen Nutzung des Grünschnitts auf der Deponie Eichelbuck gehören:

- Aufbereitung des Grünschnitts und Holzmaterials durch Trennung und Siebung (bereits Bestand)
- Trocknung der Holzigen Anteile
- Kompostierung der krautigen Anteile
- Energetische Nutzung der Holzigen Fraktion in einem Mikro-Holz-BHKW
- Nutzung der Holzigen Fraktion in einer Pyrolyseanlage zur Erzeugung von Pflanzenkohle und Wärme
- Einbindung der gewonnenen Energien (Strom und Wärme) in das Gesamtsystem der Deponie
- Die für die Anlage erforderlichen Bauwerke

Für die Genehmigung erforderliche Fachgutachten wurden ausgearbeitet.

Für das Gesamtprojekt wurde eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung beantragt und im März 2016 mit dem Genehmigungsbescheid RP FR, AZ 54.2-8983.01/FR-016.7 erteilt (Anlage 2). Im Genehmigungsbescheid wurden über den Antrag hinaus, keine wesentlichen Zusatzaufgaben erlassen. Die Verwertungsoptionen für die Pflanzenkohle aus der Karbonisierungsanlage sind nicht Gegenstand der Genehmigung.

Die Pflanzenkohleanlage wurde zur Vereinfachung des Verfahrens als Nebenanlage genehmigt, da diese auf Grund einer Gesetzesänderung der 4. BImSchV bis zu einer Feuerungsleistung von 1MW zwischenzeitlich nicht mehr nach BImSchG zu genehmigen war.

Gefördert durch:

- 22 -



## 8.3 Mikro-Holz-BHKW

### 8.3.1 Engineering (AP 2)

Zur Entwicklung einer Anlage zur Erzeugung und Nutzung von Heißluft aus einem Verbrennungsprozess mit holzigen Abfällen aus der Grünschnitzaufbereitung in einer Heißluftturbine, wurde der Prozess und die Anlagentechnik auf der Grundlage von Wissen aus bereits vorhandenen Versuchsanlagen optimiert und weiterentwickelt. Insbesondere um die folgenden Fragestellungen für einen betriebssicheren und wirtschaftlichen Betrieb zu lösen:

- Optimierung der energetischen Nutzung aus dem Verbrennungsprozess durch Verbesserung der Wärmeübergangsprozesse
- Optimierung der Nutzung von Wärmeträgern für den Betrieb einer Heißluftturbine, einer direkten Wärmenutzung für Prozesswärme und einer Abwärmenutzung für Heizzwecke (Gebäudeheizung, Warmwasserbereitung)
- Nutzung einer herkömmlichen Mikrogasturbine (Hersteller: Capstone) durch Umbau für eine Heißgasnutzung.
- Entwicklung einer möglichst kompakten Anlage

#### 8.3.1.1 Mikrogasturbine

Mikrogasturbinen sind schnelllaufende Gasturbinen, die einen Generator mit Permanentmagnetrotor antreiben. Der damit erzeugte hochfrequente Wechselstrom (1600 Hz) wird zuerst gleichgerichtet und anschließend mit einem Wechselrichter auf die 50 Hz des Netzes transformiert. Es gibt nur wenige Hersteller von Mikrogasturbinen weltweit; der bekannteste Hersteller ist Capstone (Weltmarktanteil > 90 %). Die Gasturbine ist eine sogenannte "frame size" Maschine, d.h. sie wird als ein fertiges Produkt angeboten und nicht individuell an eine Anwendung angepasst. Die EFGT-Anlage basiert auf der C65 Mikrogasturbine von Capstone. Diese Mikrogasturbine wurde unter Verwendung der öffentlich zugänglichen Capstone-Angaben in einem Computermodell modelliert. Anschließend wurde der EFGT-Prozess mit Verwendung des Mikrogasturbinenmodells modelliert. Das Ziel verschiedener Ausführungsvarianten war es, den höchsten elektrischen Wirkungsgrad zu erreichen.

Der Umrichter für die Heißluftturbine wurde neu mit elektrischen Bremswiderstand entwickelt. Der Reperator wird zur Wirkungsgradsteigerung verwendet.

Es wurden Versuche durchgeführt um die Mikrogasturbine im motorischen Betrieb schnell auf 20'000 U/Min hochzufahren. Ein schnelles Anfahren ist wegen der Luftlager nötig.

#### 8.3.1.2 Wärmebilanzen

Um die Wärmeauskopplung besser beurteilen zu können und zur energetischen Auslegung, wurden Wärmebilanzen für unterschiedliche Ausführungsvarianten berechnet.

#### Eintrittstemperatur in die Mikrogasturbine

Die Modellrechnungen ergaben eine Eintrittstemperatur in die Mikrogasturbine von 918 °C nach Mischung mit Kühlluft. Mit den vorgesehenen Materialien für den HT-Wärmetauscher kann diese Temperatur nicht erreicht werden. Deshalb wurde diese Temperatur auf 840 ° festgelegt (850 °C Austritt Wärmetauscher und 10 K Leitungsverlust). Versuche in der Versuchsanlage von WS bildeten die Basis für die Auslegung der HT-Wärmetauscher.



### Höchster elektrischer Wirkungsgrad (Wärmebilanz 1)

In dieser Wärmebilanz (siehe Anlage 3) wird heiße Abluft der Mikrogasturbine in einem Verbrennungsluftvorwärmer (VeLuVo) aufgewärmt und als Verbrennungsluft in die Sekundärbrennkammer eingeführt. Die Nutzwärme wird dadurch kleiner. Diese Wärmebilanz zeigt eine elektrische Nettoleistung von 50 kW und einen elektrischen Wirkungsgrad von 21 %. Dabei wurde ein Eigenbedarf von 0.8 kW angenommen. Dies ist ein außergewöhnlich hoher elektrischer Wirkungsgrad für eine Kleinanlage. Auf Grund der Nutzwärmeanforderungen auf dem Standort Eichelbuck wurde diese Variante jedoch verworfen und daraus folgend die Variante 2 mit der Möglichkeit der Erhöhung der Brennstoffleistung (Variante 3) entwickelt.

### Vergrößerung der Wärmetauscher (Wärmebilanz 2)

Um die Nutzwärme zu erhöhen, entfiel der Verbrennungsluftvorwärmer und die Wärmetauscherflächen wurden vergrößert, damit die elektrische Leistung erreicht wird. Das Resultat zeigt nur eine kleine Erhöhung der Nutzwärme und ist deshalb nicht zielführend (siehe Anlage 3).

### Erhöhung der Brennstoffleistung (Wärmebilanz 3)

Die Wärmebilanz 3 (siehe Anlage 3) zeigt eine erhöhte Brennstoffleistung. Die Erhöhung der Brennerleistung erfordert mehr Primärluft und wesentlich mehr Sekundärluft, damit die Temperatur in der Sekundärbrennkammer eingehalten wird. Diese Vorgehensweise resultiert in einer erhöhten Rauchgasmenge mit einer erhöhten Austrittstemperatur.

## 8.3.1.3 Thermoöl- und Heißwasserleistung

### Thermoölleistung

Die Wärmeauskopplung mit der heißen Abluft der Mikrogasturbine ist beschränkt. Deshalb wurde darauf verzichtet, heiße Abluft der Mikrogasturbine als Sekundärluft abzuführen. Mit dieser Maßnahme erhöht sich die Thermoöl-Leistung auf 60 kW bei Öltemperaturen von 130°C / 217 °C. Diese Leistung vermindert sich allerdings bei erhöhter Rücklauf Temperatur des Öls auf 20 kW bei Temperaturen von 230 °C / 260 °C. Deshalb sollte der Wärmeverbrauch mit Thermoöl vermindert werden. Dies kann durch Heizen des Gärsubstrats um 10 K mit Heißwasser erreicht werden, was eine Heißwasserwärmeleistung von etwa 115 kW ergibt, die nicht durch das Thermoöl aufgebracht werden muss.

### Heißwasserleistung

Die Heißwasserleistung kann variiert werden. Wird wenig Wärme gebraucht z.B. 60 kW, so wird die Sekundärluft durch den Verbrennungsluftvorwärmer geführt, die Brennstoffleistung reduziert sowie der elektrische Wirkungsgrad erhöht. Wird viel Wärme gebraucht z.B. 120 kW, so wird die Sekundärluft von der Umgebung eingeblasen. Die Vorlauf Temperatur des Heißwassers wird dabei immer konstant auf 100 °C gehalten.

## 8.3.2 Ausführungsplanung und Anlagenrealisierung (AP 3)

Das „Mikro-Holz-BHKW“ wurde am Standort der Deponie Eichelbuck errichtet und in die bestehende Infrastruktur integriert.

Die Anlage ist für die Produktion von Wärme und Strom vorgesehen, wobei die Wärmeversorgung Priorität gegenüber der Stromproduktion hat. Die Anlage ist für den Dauerbetrieb vorgesehen und soll möglichst in Volllast gefahren werden.

In der Anlage werden in einer Primärbrennkammer (Kessel der Fa. Lopper) die getrockneten Holzigen Bestandteile aus der Grünabfallaufbereitung (Holzhackschnitzel) vergast. Die entstehenden Holzgase werden in der Sekundärbrennkammer (Flox-Brennkammer) verbrannt. In der Flox-Brennkammer ist ein Hochtemperaturwärmetauscher zur Erzeugung von heißer Luft für die Heißluftturbine integriert.

Gefördert durch:

- 24 -



Die Rauchgase aus dem Flox-Brenner werden über einen Wärmetauscher (Heißwasser-Wärmetauscher) geführt, der Wärme für die Speiseresteanlage bereitstellt. Mit der heißen Abluft der Mikroturbine wird ein Thermoöl-Wärmetauscher beaufschlagt, der ebenfalls Wärme für die Speiseresteanlage liefert.

Die Heißluftturbine generiert Strom für den Eigenbedarf und zur Einspeisung in das Netz.

Die erwartete Leistung der Anlage beträgt:

Elektrische Leistung: 40-50 kW<sub>el</sub>

Feuerungsleistung: 300 kW

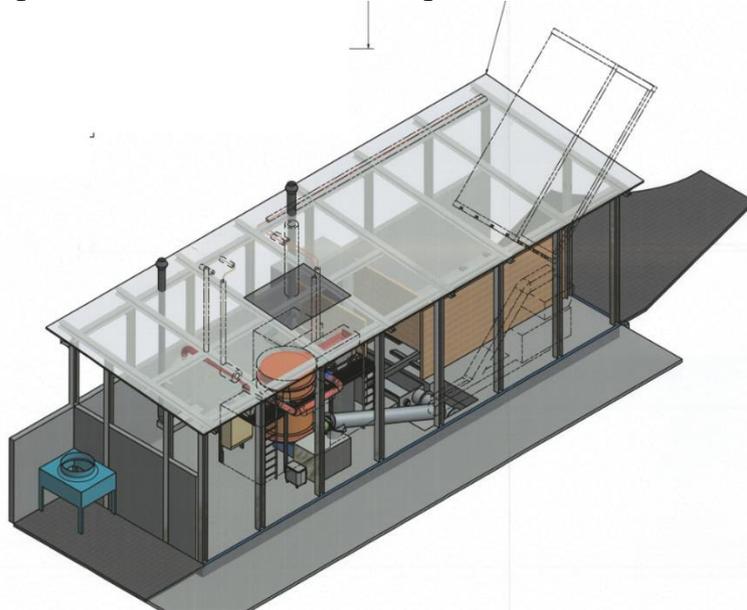
Heizleistung: 192 kW<sub>th</sub> (57 kW<sub>th</sub> Thermoöl, 135 kW<sub>th</sub> Heißwasser)

Die Anlage muss die Emissionsgrenzwerte der 1. BImSchV vom 1.1.2015 einhalten.

Im Speziellen bedeutet dies nach den neuen Vorschriften vom 1.1.2015

20 mg/m<sup>3</sup> Staub und 400 mg/m<sup>3</sup> Kohlenstoffmonoxid (CO) im Abgas bei 13 % Sauerstoffgehalt (O<sub>2</sub>).

Ein Anlagenschema und R&I-Schemata liegen dem Abschlussbericht in Anlage 4 und bei.



**Abbildung 2:** Aufrissbild des Mikro-Holz-BHKW

### 8.3.2.1 Regelkonzept

Der inhomogene Brennstoff "Holzschnitzel" verunmöglicht im Gegensatz zu einer Gas- oder Ölfeuerung eine exakte Regelung der Temperatur und gleichzeitig der Leistung.

Die wichtigste Größe ist die Temperatur im Hochtemperatur-Wärmetauscher, die aus Materialgründen nicht überschritten, aber aus Wirkungsgradgründen nicht wesentlich unterschritten werden sollte. Die Regelung der Temperatur und der Leistung wird mittels dreier Regelparameter vorgenommen, die im Zusammenspiel die Regelung bestimmen:

- Primärluftmenge
- Sekundärluftmenge
- Heißluftmenge zur Mikrogasturbine

### 8.3.2.2 Verbrennung

Die Verbrennung erfolgt zweistufig in einer Primär- und einer Sekundärbrennkammer.

Gefördert durch:

- 25 -

Die Primärbrennkammer wird unterstöchiometrisch betrieben. Mit der Primärluftregelung wird die Leistung geregelt. Die Nachverbrennung erfolgt in der Sekundärbrennkammer (Flammenlose Oxidation). In der Sekundärbrennkammer ist ein Hochtemperaturwärmetauscher integriert, der die Wärme abführt und Heißluft für die Mikrogastrurbine erzeugt

### 8.3.2.3 Hochtemperatur-Wärmetauscher (HT-WT)

Die Wärmeauskopplung erfolgt aus einer Flox-Brennkammer. Durch die Integration eines Wärmetauschers aus hitzebeständigen Materialien (hochlegierte Stähle) in die Flox-Brennkammer, wurde das Volumen des Brennraums vergrößert. Die neuartige Anordnung der Wärmetauscherrohre als hängende Doppelrohre machen die Aufnahme von Wärmedehnungen möglich.

### 8.3.2.4 Druckluftvorwärmer (WT-2)

Der Röhrenvorwärmer wurde für hohe Temperaturen aus hochlegierten Stählen hergestellt. Die neuartige Aufhängung des Wärmetauschers erfolgte, wie bereits beim HAT-WT, zur unproblematischen Aufnahme von Wärmedehnungen.

### 8.3.2.5 Auslegung Wärmetauscher

Die Untersuchungen in der Studie haben ergeben, dass es sinnvoll ist, die Wärmeauskopplung mittels Thermoöl mit der heißen Abluft der Mikrogastrurbine durchzuführen. Der Hauptgrund liegt darin, dass die Ablufttemperatur der Mikrogastrurbine immer unterhalb der erlaubten Thermoöltemperatur von 320 °C liegt. Damit entfallen verschiedenen Sicherheitsvorschriften, die nur mit großem Aufwand einzuhalten wären. Um genügend Wärmeleistung für das Gärsubstrat zu erhalten wird vorgesehen, mit einem zusätzlichen Wärmetauscher, der mit Heißwasser versorgt wird, vorzuwärmen.

Die Vorwärmung des Gärsubstrats erfordert eine erhöhte Heißwasserleistung. Deshalb wird auf einen Verbrennungsluftvorwärmer für die Sekundärluft verzichtet, damit die Abgastemperatur im Heißwasserwärmetauscher erhöht wird.

Da die Wärmeabnahme sehr unregelmäßig anfällt, müssen der Thermoölkreislauf und der Heißwasserkreislauf während der Inbetriebnahme optimiert und aufeinander abgestimmt werden.

### 8.3.2.6 Mikrogasturbine

Die Mikrogasturbine wurde wie folgt umgebaut:

- Neue Austrittsöffnungen für die komprimierte Luft aus der Mikrogasturbine durch 6 Öffnungen (komprimierte Luft wird zu den Wärmetauschern geführt)
- Fünf neue Eintrittsöffnungen in die Mikrogasturbine für die heiße, komprimierte Luft zum Antrieb der Turbine
- Neue Ausblasevorrichtung für Not-Aus, da die Wärmetauscher ein vergrößertes Speichervolumen aufweisen
- Neuartige Lagerung der Mikrogasturbine zur Aufnahme von Wärmedehnungen und vereinfachter Ausrichtung

### 8.3.2.7 Brennstoffeintrag

Der Brennstoff wird mit einem Container angeliefert und auf einen befahrbaren Schubboden gekippt. Der Brennstoffeintrag erfolgt über zwei an einen Schubboden angeschlossene Querförderer. Die Brennersteuerung fördert Brennstoff in die Brennkammer bis das Brennstoffniveau innerhalb zweier Niveauschalter liegt.

Proben des vorgesehenen biogenen Brennstoffes wurden mit dem Lieferanten des Schubbodens und der Fördereinrichtungen besprochen. Der Schneckenförderer wurde im Vergleich zur üblichen Auslegung vergrößert ausgeführt, um auch lange und dünne Brennstoffbestandteile (faserig, Mittelfraktion) fördern zu können und die Verfügbarkeit der Anlage möglichst hoch zu halten (Mehrkosten: 30.000 EUR (netto)).

### 8.3.2.8 Wärmezuführung

Gefördert durch:

- 26 -

Die Wärmezuführung zur Speiseresteanlage (Thermoöl und Heißwasser) erfolgt über eine Rohrbrücke. Die Heißwasserleitungen wurden, um ein Einfrieren der Leitungen zu verhindern, isoliert. Die Thermoölleitungen wurden mit einem Schutzrohr und einer Isolation ausgeführt. Zur Absicherung gegen Leckagen wurde eine Ölauffangwanne unter dem Thermoöl-Wärmetauscher installiert, die das Öl des Wärmetauschers und der Leitungen aufnehmen kann. Die Leitungen sind so auf einer Rohrbrücke verlegt, dass bei Leckage das Öl durch ein geringes Gefälle im Doppelrohr zurück zur Ölauffangwanne beim Wärmetauscher oder zur Speiseresteanlage, welche ebenfalls mit einer Auffangwanne ausgestattet ist, läuft.

### 8.3.2.9 Änderungen gegenüber der Werkplanung

Gegenüber der Werkplanung für die Anlage wurden bei der Realisierung geringfügige Änderungen vorgenommen. Diese sind im Wesentlichen:

- Vergrößerung des Schubbodens:
- Aufstellung des Rückkühlers, hinter der rückwärtigen Stützmauer der Anlage
- Verbesserte Leittechnik
- Zusätzliche Überdachung im Anlagenanschlussbereich
- Zusätzliche Sicherheitseinrichtungen im Thermoölkreislauf



Abbildung 3: Sekundärfeuerungsanlage mit Heißluftturbine



### 8.3.3 Anlagendauerbetrieb mit Optimierungen und Auswertungen (AP 3)

Die Inbetriebnahme der Anlage erfolgte schrittweise seit Oktober 2017. Seit Oktober 2018 wird vorerst nur Heißwasser erzeugt, die Mikrogasturbine wurde luftseitig isoliert. Ein sicherer Betrieb der Anlage ist bisher nicht möglich.

Es treten in allen Temperaturbereichen Verpuffungen auf, ebenso im Flox-Betrieb (Verbrennungsverhalten siehe Anlage 6).

Die Heißluftturbine wurde bisher nur im Leerlauf betrieben. Es wurde noch kein Strom erzeugt. Bei Versuchen konnte die Mikrogasturbine ohne Probleme auf 45'000 U/Min hochgefahren werden. Auf der mechanischen Seite wurden keine Unregelmässigkeiten festgestellt. Die Drücke und Temperaturen bewegten sich im erwarteten Bereich. Die Lärmentwicklung und die Vibrationen/Schwingungen der Mikrogasturbine waren normal.

Da ein Dauerbetrieb bisher nicht möglich war, konnte im Rahmen des Vorhabens keine Auswertung und weitere Optimierung erfolgen.

### 8.3.4 Aufgetretene Probleme

Es treten in allen Temperaturbereichen Verpuffungen auf, ebenso im Flox-Betrieb. Der genaue Ort der Verpuffungen ist nicht lokalisierbar. Eine Stichflamme bei Öffnung der Primärbrennkammer, das Abheben des FLOX-Brenner-Deckels und Druckschwankungen der Primär- und Sekundärluft weisen darauf hin, dass das Risiko der Verpuffung sowohl in der Primär- als auch der Sekundärbrennkammer besteht.

Der Fokus im Projekt lag größtenteils auf der Heißluftturbine. Die Lopper-Holzfeuerung und der Flox-Brenner als herkömmliche Standardanlagen wurden als „einfache Anlagenteile“ betrachtet. Genau diese Anlagenteile bereiten nun jedoch Probleme und machen einen sicheren Betrieb der Gesamtanlage derzeit unmöglich.

Die übliche Anordnung des Lopper-Kessels besteht aus einem unterstöchiometrischen Vergaserteil (bei dem Mikro-Holz-BHKW Primärbrennkammer genannt) und einer sekundären Verbrennung mit zugeführter Sekundärluft. Diese Sekundärbrennkammer sitzt üblicherweise unmittelbar auf dem Vergaserteil, sodass die Flammen vom Primärteil bis in den Sekundärteil gelangen und die vorhandenen Holzgase zünden. Bei der errichteten Anlage befindet sich die Zuführung der Anfahr-Sekundärluft, bedingt durch die Anordnung mit dem Flox-Brenner, unterhalb der Primärbrennkammer, sodass die Flammen nicht immer in diesen Bereich gelangen, was nicht vorhersehbar war. Bei genügend heißen Gasen aus der Primärbrennkammer, zünden diese bei der Zuführung von Frischluft. Nun ist es aber je nach Zusammensetzung der Holzgase und der erreichten Temperatur möglich, dass unverbrannte Holzgase in den Flox-Brenner gelangen und dann unkontrolliert zünden.

### 8.3.5 Technische Erfolge

#### 8.3.5.1 Mikro-Holz-BHKW

Das „Mikro-Holz-BHKW“ ist eine kleine Anlage, die mit dem Einsatz von Holz (möglicherweise auch der holzigen Mittelfraktion des Grünschnitts) als Brennstoff und möglichst niedrigem Materialaufwand sowie einem hohen Wirkungsgrad hochgradige Heißluft erzeugen kann. Somit ist ihr Einsatzbereich sehr flexibel.

#### 8.3.5.2 Mikrogasturbine

Gefördert durch:

- 28 -



Die Mikrogasturbine konnte ohne Probleme auf 45'000 U/min hochgefahren werden. Auf der mechanischen Seite wurden keine Unregelmässigkeiten festgestellt. Die Drücke und Temperaturen bewegten sich im erwarteten Bereich. Die Lärmentwicklung und die Vibrationen/Schwingungen der Mikrogasturbine waren normal.

### 8.3.5.3 Hochtemperaturwärmetauscher

Durch die Wärmeauskopplung aus einer Flox-Brennkammer werden sehr gute Wärmeübergangswerte erreicht. Durch die neuartige Anordnung der Wärmetauscherrohre als Doppelrohre (hängend) können Wärmedehnungen unproblematisch aufgenommen werden.

### 8.3.6 Ausblick

Die Analyse der Ursachen, die zu den Verpuffungen geführt haben und die Erkenntnisse aus dem Probebetrieb und aus anderen Anlagen haben ergeben, dass für den sicheren Betrieb des Mikro-Holz-BHKW folgende wesentlichen Modifikationen notwendig sind:

- Installation eines propangefeuerten Startbrenners
- Installation eines zweiten Saugzugventilators
- Installation eines zweiten Sekundärluftventilators
- Installation einer USV (unterbrechungslose Stromversorgung)
- Aufteilung des Heißwassersystems

Die Energiebilanz der Anlage wurde anhand des Wärmeschaltbilds von einem externen Gutachter der Universität Stuttgart, Prof Dr. G. Scheffknecht, überprüft und kann bestätigt werden. Ferner bestätigt dieses Gutachten, dass die vorgesehenen Anlagenmodifikationen einen sicheren Dauerbetrieb, aber insbesondere auch einen sicheren Anfahr- und Abfahrbetrieb ermöglichen werden (siehe Anlage 10).

Im Juni 2020 wurden bereits Versuche zur Auslegung der Saugzugventilatoren durchgeführt und im Anschluss ein Angebot für das Engineering der notwendigen Anlagenmodifikationen erarbeitet. Dies beläuft sich auf 37.845,00 EUR (netto).

Die Planungen werden in Abstimmung mit dem TÜV erfolgen, damit eine sicherheitstechnische Abnahme der Anlage sichergestellt werden kann. Als 1. Schritt werden vom TÜV Basel Behälterberechnungen durchgeführt, um zu ermitteln, welchem maximalen Druck der Flox-Behälter standhalten muss (ggf. NO-GO für die Anlage).

Die Mikrogasturbine konnte bei den durchgeführten Versuchen ohne Probleme auf 45.000 U/Min hochgefahren werden und es gibt keine Anzeichen dafür, dass ein zukünftiger Flox-Betrieb nach Anlagenumbau nicht möglich wäre. Die Anlage könnte jedoch auch für die Wärmebereitstellung über den Thermoöl-WT im Flox-Betrieb ohne die Heißluftturbine genutzt werden. Hierfür ist beispielweise die Verwendung eines Heißluftkreislaufs ( z.B. temperaturbeständiger Lüfter) anstelle des Betriebes der Heißluftturbine vorstellbar (voraussichtlich ohne aufwändige Umbaumaßnahmen umsetzbar).

## 8.4 Grünschnitzaufbereitung und Kompostierung

### 8.4.1 Ausführungsplanung und Anlagenrealisierung (AP 4)

Im Rahmen des 1. Bauabschnitts wurde auf dem Deponieplateau eine Aufbereitungsfläche von ca. 5.000 m<sup>2</sup> hergestellt. Nach Fertigstellung des 2. Bauabschnitts wird eine Fläche von ca. 8.000 m<sup>2</sup> zur Verfügung stehen.



**Foto 1:** Grünabfallaufbereitung auf dem Deponieplateau

#### 8.4.1.1 Grünabfallanlieferung, Zerkleinerung und Absiebung

Bereits an den Anlieferstellen wird der Grünabfall bestmöglich nach den unterschiedlichen, auf die spätere Nutzung gezielte Fraktionen getrennt.

Auf der Grünschnitzaufbereitungsanlage der Deponie Eichelbuck werden dann die einzelnen, getrennt gelagerten Fraktionen durch Häckseln und anschließende Siebvorgänge gemäß den Anforderungen der Nutzungsanlagen aufbereitet.



**Foto 2:** Sieb und Häcksler auf dem Deponieplateau

#### 8.4.1.2 Kompostierung

Die krautige Fraktion wird in der standorteigenen Kompostierungsanlage zu Fertigkompost für die Landwirtschaft und den Landschaftsbau verarbeitet.

Für die Kompostierungsanlage wurde auf dem Deponieplateau bereits ein erster Wasserspeicher zur Kompostbewässerung errichtet. Der Ausbau der Speicherkapazität ist in Planung, sodass die Bewässerung der Kompostmieten im Endausbau ausschließlich durch gespeichertes Schmutzwasser erfolgen wird. Das krautige Material wird nach der mechanischen Aufbereitung auf dem Deponieplateau in einer Mietenkompostierung zu Fertigkompost aufbereitet. Das Material wird nach der Aufbereitung umgehend zu Mieten aufgesetzt.

Die Kompostierungsanlage besteht aus 4 Intensivrotteboxen (Dauer 4 Wochen, abgedeckt und belüftet) und einer Nachrottebox (Dauer 2 Wochen, nicht abgedeckt, belüftet). Nach sechs Wochen ist der Rottegrad 4 bis 5 erreicht. Das Material wird gesiebt, die Grobfraction in die frischen Mieten zurückgeführt und die Feinfraction zur Abholung zwischengelagert. Die Kompostierungsanlage verfügt über eine Mietenabtrennung, eine Belüftungseinrichtung, Messeinrichtungen, Membranabdeckungen und ein Membranabdeckfahrgerät.



**Foto 3:** Mieten mit Belüftungsrohren



**Foto 4:** Membranabdeckfahrgerät, mit Membran abgedeckte Mieten

Gefördert durch:

Seit Frühjahr 2020 wird die Kompostierungsanlage im Probetrieb betrieben.

Das Anerkennungsverfahren wurde am 12.03.2020 beantragt. Das erste Prüfzeugnis innerhalb des Anerkennungsverfahrens fiel positiv aus (Anlage 5).

Das Anerkennungsverfahren wird durchgeführt, um das Gütezeichen zu erlangen. Es beginnt mit der Bestätigung des Antrags auf Gütesicherung durch die BGK und dauert in der Regel 1 Jahr. Der Nachweis über die hygienisierende Wirksamkeit des eingesetzten Behandlungsverfahrens erfolgt mittels Prozessprüfung nach den Vorgaben der Bioabfallverordnung (BioAbfV).

#### 8.4.1.3 Trocknung

Die Abwärme der Pflanzenkohleanlage wird in einer angeschlossenen Holztrochnungsanlage genutzt um die holzige Fraktion des Grünabfalls zu trocknen. Hierfür wurde eine Trocknungsanlage nach dem Prinzip des „Satztrochners“ installiert.

Diese besteht aus einer Wärmezentrale, welche die erforderlichen Wärmeaustausch- und Wärmetransportkomponenten enthält und zwei Trocknungscontainern.



**Foto 5:** Heizzentrale mit Heißluftanschlüssen zum Trocknungscontainer

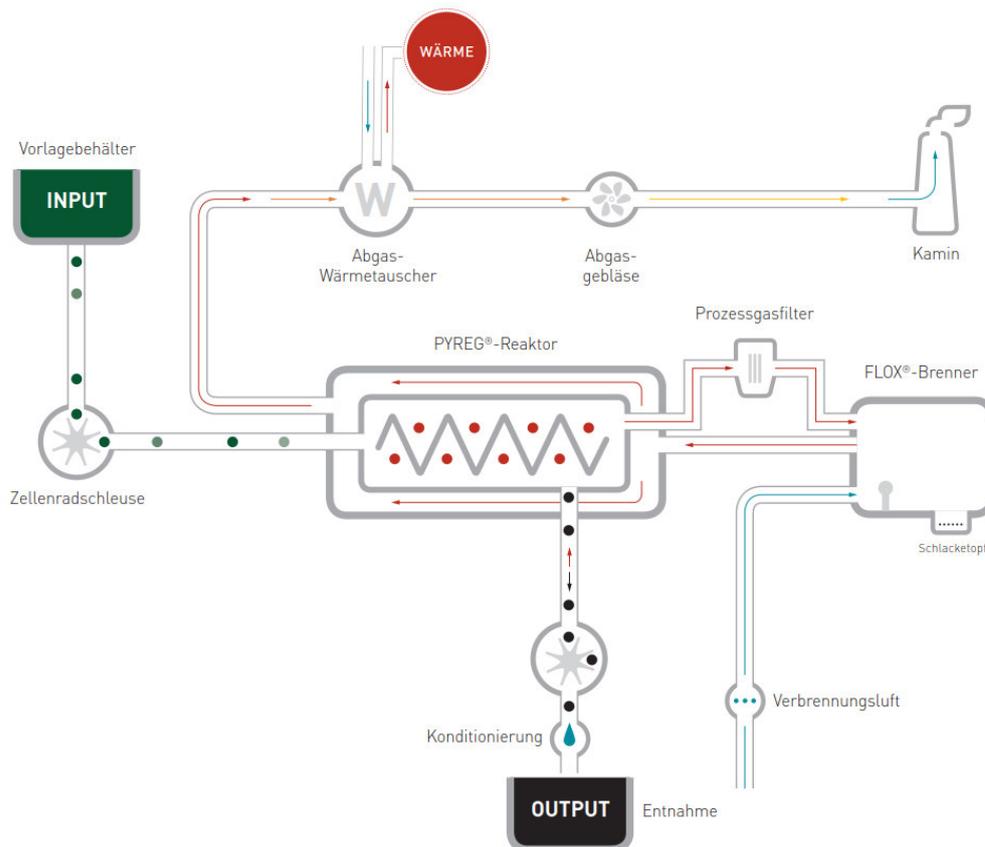
### 8.4.2 Technische Erfolge

Der hergestellte Kompost erfüllt bei allen untersuchten Kriterien die gesetzlichen Vorgaben. Die Bewässerung direkt am Sieb ermöglicht eine sehr gleichmäßige Durchfeuchtung des Substrates. Durch die Speicherung des Schmutzwassers aus der Aufbereitungsfläche, kann der Wasserbedarf der Kompostierung voraussichtlich vollständig gedeckt werden.

## 8.5 Pflanzkohleanlage

### 8.5.1 Ausführungsplanung und Anlagenrealisierung (AP 5)

Zur Herstellung von Pflanzkohle aus holzigen Anteilen der Grünabfallaufbereitung, wurde auf der Deponie Eichelbuck eine Anlage der Fa. Pyreg installiert. Das PYREG®-System arbeitet nach dem Prinzip der trockenen Karbonisierung. In dem zweistufigen Verfahren wird die Biomasse zunächst im PYREG®-Reaktor auf bis zu 500-700° C erhitzt. Die Biomasse wird dabei nicht verbrannt, sondern verschwelt und zu Pflanzkohle karbonisiert. In einer zweiten Stufe werden die im Reaktor entstehenden Schwelgase in der Brennkammer bei ca. 1.250° C vollständig verbrannt. Im PYREG®-Verfahren entstehen keine Problemstoffe, wie Kondensate oder Teere, da das Schwelgas nicht abgekühlt, sondern oxidiert wird.



**Abbildung 4:** Verfahrensschema PYREG (Quelle: Biomasse Broschüre der PYREG GmbH )

Gefördert durch:

Die Pflanzenkohleanlage wurde im Werk der Fa. PYREG montiert. Am 11.06.2015 erfolgte eine Werksabnahme der Anlage. Die Aufstellfläche für die Anlage und die erforderliche Infrastruktur wurde parallel fertig gestellt. Die Dosieranlage wurde vorab aufgestellt.

Die Pflanzenkohleanlage wurde am 19.04.2016 auf dem Standort der Deponie Eichelbuck installiert und provisorisch an die Infrastruktur angeschlossen. Der Standort hat sich während des Genehmigungsverfahrens geändert. Die Pflanzenkohleanlage wurde am Fuße der Deponie aufgestellt und nicht auf dem Deponieplateau, wie ursprünglich geplant. Ein erster Testbetrieb der Anlage wurde mit einer Absiebung von Hackschnitzeln gefahren.



**Foto 6:** Pflanzenkohleanlage Deponie Eichelbuck (links Schubbodencontainer, rechts Kohleaustrag)

Mehrere erforderliche Nachinstallation an der Anlage selbst sowie im Umfeld der Anlage zur Integration in das Versorgungsnetz und zum Anschluss an die Trockneranlage haben den Beginn des Probebetriebs verzögert

Vor Inbetriebnahme der Anlage waren die folgenden Nachrüstungen bzw. Änderungen an der Anlage sowie am Anlagenumfeld notwendig:

- Änderung der Abspannung des Kamins aufgrund der Dachausbildung
- Installationsumbau im Zentralcontainer zum Anschluss von Strom, Gas und Wasser sowie Wärmeausschleusung zur Trocknungsanlage
- Nachrüstung der Rückkühlung (mit geliefertem Notkühler muss der Parallelbetrieb der Trockneranlage jederzeit gewährleistet werden)
- Installation der Anlagenfernsteuerung
- Nachrüstung der Austragsschnecke zur Förderung in Kohlecontainer
- Umbau und Anpassung der Eintrageeinheit (Schubboden, Horizontalschnecke und Vertikal-schnecke)
- Einhaltung gewisser Grenzbedingungen des Verarbeitungsmaterials hinsichtlich Stückigkeit, Homogenität und Trockenheit (bisher kann die Anlage aufgrund der installierten Fördertechnik bzw. ohne weitere Aufbereitung der holzigen Mittelfraktion lediglich mit der getrockneten Grobfraktion des Grünschnitts störungsfrei betrieben werden, nicht wie ursprünglich geplant mit der holzigen Mittelfraktion)
- Nachrüstung der zentralen Steuerung für Pyreg-Baustein, Austragsschnecke und Eintrageeinheit

Die für die Anlage erforderlichen Kosten haben sich auf Grund der für den Anlagenbetrieb erforderlichen Zusatzinstallationen erhöht (siehe Kapitel 9.2).

Gefördert durch:

- 34 -



Im Abgas der Karbonisierungsanlage dürfen die folgenden Schadstoffkonzentrationen, bezogen auf das Abgas im Normzustand bei einem Volumengehalt an Sauerstoff von 11%, nicht überschritten werden:

**Tabelle 6:** Emissionsgrenzwerte Karbonisierungsanlage

	<b>Grenzwert</b>	<b>max. Messwert 2018 zuzügl. erweiterte Messgenauigkeit</b>
Gesamtstaub	20 mg/m <sup>3</sup>	6 mg/m <sup>3</sup>
Schwefeloxide, angegeben als SO <sub>2</sub>	350 mg/m <sup>3</sup>	121 mg/m <sup>3</sup>
Stickstoffoxide	350 mg/m <sup>3</sup>	165 mg/m <sup>3</sup>
organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff	50 mg/m <sup>3</sup>	10 mg/m <sup>3</sup>
Kohlenmonoxid	150 mg/m <sup>3</sup>	< BG
Dioxine und Furane angegeben als Summenwert nach Anhang 5 TA Luft	0,1 ng/m <sup>3</sup>	0,001 ng/m <sup>3</sup>
Benzo(a)pyren	0,05 mg/m <sup>3</sup>	< BG
Benzol	1,0 mg/m <sup>3</sup>	< BG

Dies wird mit einer regelmäßigen Emissionsmessung (alle 3 Jahre) überprüft. Die Anlage hält die Grenzwerte ein.

Die Abnahmeprüfung durch einen zugelassenen Sachverständigen ist erfolgreich durchgeführt worden. Im Rahmen der Abnahmeprüfung wurde ein erster Testlauf erfolgreich durchgeführt. Die endgültige Inbetriebnahme mit dem 48-h Testlauf wurde vom 6.12.2016 bis zum 8.12.2016 durchgeführt. Anschließend ging die Anlage in den Probebetrieb.

### 8.5.2 Anlagendauerbetrieb mit Optimierungen und Auswertungen (AP 5)

Seit Dezember 2016 befindet sich die Pflanzenkohleanlage im Probebetrieb.

Die ASF hat mit Datum vom 18. August 2017 die Anmeldung zur Zertifizierung der Pflanzenkohle bei bio.inspekta GmbH beantragt. Hierzu wurden die erforderlichen Proben eingesandt und von der Zertifizierungsstelle die Ortsbesichtigung durchgeführt.

Die Pflanzenkohleanlage befindet sich seit Februar 2018 im Regelbetrieb.

Seit der Inbetriebnahme einer automatischen Kohleabsackanlage am 19.02.2018, konnte die Anlage ohne größere Störungen über 24 h am Tag und mit einer geringen Stillstandszeit (ca. 30 Stunde alle 2 Wochen) betrieben werden.



**Foto 7: Automatische Absackstation Pyreg-Anlage**

Die Anlage wird in der Regel von einer Person betreut, alle 14 Tage Montags wird eine Wartung mit zwei Arbeitskräften durchgeführt. Ein nächtlicher Bereitschaftsdienst ist eingerichtet.

Störfälle treten nur sehr selten und wenn dann materialbedingt auf. 2019 wurden 265,24 t vorgetrocknetes, gehacktes Holz (rieselfähig, max. 30 x 30 mm, Feuchte 15-28 %) aus der Grünschnitzaufbereitung (Baumstämme, die einmal jährlich gehackt werden) in der Anlage eingesetzt und daraus 64,21 t Pflanzenkohle produziert.

Mit der produzierten Abwärme werden derzeit die in der Pflanzenkohle eingesetzten Hackschnitzel getrocknet.

### 8.5.3 Aufgetretene Probleme

Mehrere erforderliche Nachinstallation an der Anlage selbst sowie im Umfeld der Anlage zur Integration in das Versorgungsnetz waren erforderlich (Mehrkosten ca. 50.000 EUR). Die Wartungskosten und der Verschleiß der Anlage ist deutlich kostenintensiver als angenommen und der Personalaufwand derzeit noch erheblich.

Störstoffe im Aufgabegut, wie Steine, Metallteile oder zu grobe bzw. faserige Stücke führten zu Störungen in der Eintrageinheit und insbesondere in der Zellradschleuse. Auf die Qualität des Eintragsmaterial wird zwischenzeitlich ein hohes Augenmerk gerichtet.

Ein automatisierter Betrieb war erst nach einer deutlichen Verbesserung des Eintragsmaterials und verschiedener Änderungen an der Eintrageinheit möglich. Die Mittelfraktion der Grünschnitzaufbereitung kann, anders als ursprünglich geplant, bisher nicht in der Pflanzenkohleanlage verwertet werden. Um die Anlage dauerhaft betreiben zu können und die Abfahrvorgänge weitestmöglich zu reduzieren, musste eine automatische Kohleabsackanlage installiert werden.

Derzeit läuft die Anlage, trotz intensiver Betreuung, lediglich mit einem Input von max. 47 kg/h. Ausgelegt ist die Anlage laut Herstellerangaben für einen Durchsatz von ca. 120 kg TS/h (brennstoffabhängig). Nach der langwierigen Abstimmung der Fördertechnik, verlagerten sich die Probleme der Anlage hin zur Zellradschleuse und anderen technischen Problemen, die bisher einen Betrieb der Anlage in Volllast bei weitem nicht ermöglichen. Auch andere Betreiber von PYREG-Anlagen erreichen die angegebenen Leistungswerte bisher nicht.

### 8.5.4 Technische Erfolge

Gefördert durch:

- 36 -



Seit der Inbetriebnahme einer automatischen Kohleabsackanlage am 19.02.2018 konnte die Anlage ohne größere Störungen über 24 h am Tag und mit einer geringen Stillstandszeit (ca. 30 Stunde alle 2 Wochen) betrieben werden. Der Pflanzenkohleertrag konnte, von anfangs ca. 5,3 t/Monat bei einem Input von 22 t/Monat, auf einen Pflanzenkohleertrag von 10t/Monat bei einem Input von 31 t/Monat im September 2020 gesteigert werden.

Die produzierte Pflanzenkohle kann als Futterkohle und Holzkohle der Qualität -premium- gehandelt werden (aktuell gültiges Zertifikat siehe Anlage 7).

### 8.5.5 Ausblick

Es gibt derzeit folgende Optimierungspotentiale für den weiteren Betrieb der Pflanzenkohleanlage:

- Wärmenutzung: Ein Zähler zur Aufnahme der tatsächlich produzierten Wärmemenge soll installiert werden. Eine Überprüfung weiterer Einsatzmöglichkeiten (z.B. Beheizung oder Warmwasserbereitstellung Betriebsgebäude) ist in Planung.
- Substrateinsatz: Untersuchung weiterer Aufbereitungsmöglichkeiten der Mittelfraktion, damit größere Teile des Grünschnitts verwertet werden können und somit auch immer ausreichend Material zur Verwertung bereitgestellt werden kann.
- Durchsatz: Stetiges Erhöhen des Materialdurchsatzes durch intensive Betreuung
- Kohleabsatz: Steigerung des Kohleabsatzes
- Reduzierung des Personaleinsatzes durch stetig wachsende Erfahrung des Personals

### 8.6 Wissenschaftliche Untersuchung von Einsatzgebieten der Pflanzenkohle im Gärsubstrat u. Kompost (AP 6)

Die produzierte und zertifizierte Pflanzenkohle wurde in 3 Einsatzgebieten getestet:

- a) Einsatz im Gärsubstrat der Speiseresteaufbereitungsanlage Eichelbuck zur Erhöhung der Gasausbeute
- b) Einsatz als Konditionierungsmittel im Kompostierungsprozess
- c) Einsatz zur Geruchsreduzierung im Aufbereitungsprozess der Speiseresteanlage und im Kompostierungsprozess

Mit Datum vom 15.01.2018 erhielt die ASF GmbH unter der Betriebsnummer 70746 das Zertifikat für die Aufbereitung und den Handel der Pflanzenkohle der „premium“ Qualität (Anlage 7).

Nach Vorliegen der Zertifizierung der Pflanzenkohle, wurde die Erprobung der Pflanzenkohle für den Einsatz in erzeugtem Gärsubstrat und zur Konditionierung von Grünschnittkompost geplant und organisiert.



### 8.6.1 Einsatz im Gärsubstrat

Im Frühjahr 2019 wurde von der Universität Hohenheim die Auswirkung des Einsatzes der Pflanzenkohle als Additiv zum Biogasprozess auf die Vergärung der Speisereste untersucht.

In einem systematischen Batch-Biogasversuch wurde untersucht, ob die Zugabe von Pyrolysekohle einen Einfluss auf die Methanbildung im Biogasprozess ausübt.

Es wurden in den Versuchen das Basissubstrat Speisereste mit unterschiedlichen Mengen an Pyrolysekohle im Hohenheimer Biogasertragstest nach VDI-Richtlinie 4630 (Vergärung organischer Stoffe - Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche ) mit je 3 Wiederholungen je Variante vergoren. Die Zugabeverhältnisse von 0,1 % Pyrolysekohle zu Speiseresten; 0,5 % PK zu Speiseresten; 1 % PK bzw. 3 % PK zu Speiseresten (jeweils frischmassebezogen) wurden untersucht. Bei der Vergärung der Speisereste ergab sich ein sehr guter Verlauf der Gasbildungskurven und es wurde ein Methanertrag von 0,466 Nm<sup>3</sup> Methan/ kg oTS erzielt.

Weder der Methanertrag noch der Verlauf der Biogasbildungskurven wurde jedoch durch die Additivzugabe verringert oder erhöht.

#### 8.6.1.1 Ergebnis

Die Zugabe der Pyrolysekohle in den untersuchten Zugabemengen hatte unter Laborbedingungen keinen messbaren Effekt auf die Biogasbildung. Der ausführliche Bericht der Universität Hohenheim liegt dem Abschlussbericht in Anlage 8 bei.

Die Versuche nach VDI 4630 wurden zum Test von Substraten unter optimierten Bedingungen normiert– nicht zum Test von Additiven. Für die Versuche mit den ASF-Substraten wurde die Biomasse in einem Thermomix zerkleinert. Durch den dadurch erzeugten mechanischen Aufschluss des Substrats sowie den durch die Hygienisierung bereits vorab erfolgten thermischen Aufschluss, war das Optimierungspotential für die Hydrolyse in diesem Fall wahrscheinlich schon ausgeschöpft und so konnte die Zugabe der Pflanzenkohle den Prozess nicht weiter optimieren. Die hohen erzielten Methanerträge mit dem Speiserestesubstrat sprechen dafür, dass unter den angewandten Versuchsbedingungen bereits ein optimierter Prozess stattfindet und es kein weiteres Optimierungspotential für dieses Substrat gibt. In einer Realanlage können ggf. Limitierungen der biologischen Prozesse auftreten, die durch den Einsatz der Pflanzenkohle überbrückt werden können. Um dies zu überprüfen, sollte der spezifische Gasertrag aus dem Laborversuch mit Werten aus der Praxis verglichen werden.

#### 8.6.1.2 Ausblick

Prinzipiell kann Pflanzenkohle einen Einfluss auf alle vier Prozesse zur Entstehung von Biogas( Hydrolyse, Acidogenese, Acetogenese, Methanogenese) haben. Entscheidend ist dabei, welcher dieser Prozesse in einer konkreten Anlage der langsamste und damit der geschwindigkeitsbestimmende Schritt ist. In einem laufenden Forschungsprojekt des Ithaka-Instituts mit der HS Offenburg und der Firma Carbuna deutet sich an, dass Pflanzenkohle vor allem eine beschleunigende Wirkung auf die Hydrolyse hat. Auch wird in der wissenschaftlichen Literatur zunehmend diskutiert, dass sich auf der Pflanzenkohle sowohl acidogene/acetogene sowie methanogene Mikroorganismen gemeinsam ansiedeln können, sodass diese Prozesse biochemisch enger verknüpft werden und dadurch besser ablaufen. Für das Forschungsprojekt des Ithaka-Instituts mit der HS Offenburg wurde die Versuchsvorschrift angepasst (nicht mehr VDI-konform), um realitätsnahe Bedingungen für den Einsatz von Pflanzenkohle abbilden zu können.

Das Ergebnis des vorliegenden Versuchs ist sehr spezifisch und kann z.B. nicht auf andere Substrate (z.B. Mais-Ganzpflanzensilage) übertragen werden. Hierfür wären weitere Tests unter realen Bedingungen notwendig, die den Test von Additiven erlauben.

Es ist vorgesehen den Test der Vergärung von ASF-Speiseresten mit und ohne Pflanzenkohle, möglichst im Vergleich mit einem weiteren Substrat, noch einmal mit der optimierten Methode für Pflanzenkohle-Additive zu wiederholen.

Gefördert durch:

- 38 -





### 8.6.2 Einsatz als Konditionierungsmittel im Kompostierungsprozess

Im Frühjahr 2020 wurde ein Versuch zum Einsatz der Pflanzenkohle zur Konditionierung von Grünschnittkompost in Begleitung des Ithaka Instituts gestartet. Ziel dabei ist es, den Effekt der Zugabe von 10 Vol-% Pflanzenkohle zu überprüfen sowie technische Erfahrungen zum Einmischen der Pflanzenkohle in die zu kompostierende Biomasse zu sammeln. Dabei wurden sowohl Unterschiede im Prozess (Temperaturverlauf) als auch im Produkt (Analyse nach BGK, Pflanzversuche) betrachtet.

Es wurden etwa 10 Vol.-% Pflanzenkohle in die Grüngut-Kompostierung hinzugegeben und eine Versuchsmiete aufgesetzt: Eine Kontrollmiete mit der gleichen Biomasse, aber ohne Pflanzenkohle wurde zeitnah zum Vergleich aufgesetzt.

Die Probenahme des Fertigkomposts erfolgte am 30.07.2020 nach dem in Anlage 9 aufgeführten Probenahmeprotokoll. Die Probenahme wurde im Vergleich zur Probenahme nach den Richtlinien der BGK leicht abgewandelt, damit die entnommenen Proben einen Durchschnitt über die gesamte Mietenlänge abbilden. Für die Versuche mit Kresse und Salat sowie für den Säulen-Test, wurde der Kompost auf 6mm gesiebt. Um mögliche phytotoxischen Eigenschaften des Komposts ausschließen zu können, wurde ein Kresstest durchgeführt. Kresse reagiert bei der Keimung sehr empfindlich auf phytotoxische Eigenschaften. Beim offenen Kresstest (weniger sensitiv) keimten aufgrund der hohen Temperaturen im Gewächshaus nur sehr wenige Kressesamen.

Anschließend wurden mit den Komposten Gewächshaus-Versuche durchgeführt. Die Komposte wurden pur, in zwei unterschiedlichen Dosierungen und in zwei verschiedenen Böden getestet. Ergänzend wurden Versuche mit mineralischer Düngung mit und ohne Pflanzenkohle (unbehandelt) durchgeführt. Der Blattsalat wurde nach 6 Wochen geerntet. Wird der Salat auf dem reinen Kompost (ohne Mischung mit Erde) angebaut, ist der Ertrag auf dem Pflanzenkohle-Kompost doppelt so hoch, wie in der Kontrolle. Die Komposte wurden nach Richtlinien der Bundesgütegemeinschaft Kompost von akkreditierten Laboren (EUROFINS Agraranalytik Deutschland GmbH (Jena) und Eurofins Umwelt Ost GmbH (Jena)) analysiert.

Die ausführliche Beschreibung der Versuche und Versuchsergebnisse des Ithaka Instituts ist dem Abschlussbericht in Anlage 11 beigelegt.

### 8.6.2.1 Ergebnis

Das Einmischen der Pflanzenkohle durch den Häcksler und das Sieb funktioniert grundsätzlich gut. Es gab keine konzentrierten Ansammlungen von Pflanzenkohle nach dem Sieben. Die Pflanzenkohle wurde vor Versuchsbeginn befeuchtet, um eine zusätzliche Staubentwicklung zu vermeiden. Die Mieten (ca. 300m<sup>3</sup>) wurden jeweils mit ca. 25 m<sup>3</sup> Wasser bewässert.



**Foto 8:** Einmischen der Pflanzenkohle in Substrat (Quelle: Dr. Hagemann, Ithaka)



**Foto 9:** Bewässerung beim Aufsetzen der Miete (Quelle: Dr. Hagemann, Ithaka)



**Foto 10:** Bewässerung direkt am Sieb

Die Schüttdichte des Substrates wird durch die Pflanzenkohle leicht erhöht, jedoch ist der Unterschied nicht signifikant. Die Zugabe von 10-Vol.% Pflanzenkohle hat jedoch deutlich den pH-Wert des

Gefördert durch:

- 40 -

Substrates gesenkt. Es ist folglich davon auszugehen, dass die Pflanzenkohle basisch wirkende Stoffe sorbiert. Während der Kontroll-Kompost seine Höchsttemperatur bereits nach drei Tagen erreichte, heizte sich der pflanzenkohlehaltige Kompost über zwei Wochen hinweg sehr langsam auf. Die Pflanzenkohle reduzierte die Höchsttemperatur. Die Hygienisierung wurde dennoch erzielt (3 Tage > 65 °C).

Nach dem Umsetzen ist der Sauerstoffgehalt in der Pflanzenkohle-Miete höher als in der Kontroll-Miete. Dies zeigt einen geringeren Stoffumsatz an, was mit den Temperatur-Daten korrespondiert und als bereits weiter fortgeschrittene Rotte (stabileres Produkt) interpretiert werden kann.

Bei den ASF-Komposten war ein besseres Wachstum als beim kommerziellen Gewächshaussubstrat zu erkennen, es gab jedoch keine deutlichen Unterschiede zwischen den zwei Komposten. Im geschlossenen Kresstest keimte nur die Kresse auf dem kommerziellen Gewächshaussubstrat, mit den ASF-Komposten fand keine Keimung statt. Dies weist auf eine gewisse Phytotoxizität der Komposte hin.

Beide Komposte erfüllten bei allen untersuchten Kriterien die gesetzlichen Vorgaben. Die Komposte waren aus agrarökologischer Sicht bei der Untersuchung noch nicht vollständig ausgereift, was an der nicht oder nur teilweise erfolgten Umwandlung des freigesetzten Ammonium-Stickstoffs in Nitrat zu ersehen ist. Der Pflanzenkohle-Kompost war deutlich weiter in seiner Entwicklung (19% des Stickstoffs liegt als Nitrat vor), was auch am besseren Wachstum des Blattsalats beim Test der puren Komposte erkenntlich war. Die Pflanzenkohle beschleunigte also die Reifung des Komposts. Damit bewährt sich die Zugabe von Pflanzenkohle zur Kompostierung, um eine höhere Qualität im Endprodukt zu erzielen. Dies konnte im Gewächshaus vor allem beim Einsatz als Kultursubstrat (pure Anwendung) gezeigt werden, wo der Ertrag (Frischmasse des Blattsalats) durch den Einsatz der Pflanzenkohle bei der Kompostierung verdoppelt werden konnte. Beim Einsatz als organisches Düngemittel, mit einer Dosierung von 40 und 80 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, war die Verbesserung durch die Pflanzenkohle-Zugabe in den hier durchgeführten Versuchen nicht signifikant.

### 8.6.2.2 Aufgetretene Probleme

Eine Bewässerung beim Aufsetzen der Miete ohne darauffolgende Mischung führte zu einer deutlichen Nass-Trocken-Schichtung (keine homogene Durchfeuchtung).



**Foto 11:** Nass-Trocken-Schichtung nach Bewässerung ohne anschließende Mischung

Beim Aufsetzen der Kontrollmiete wurde aus diesem Grund direkt am Sieb bewässert. Dies führt zu einer gleichmäßigen Bewässerung- erschwert jedoch den Vergleich zur Versuchsmiete, da so die

Gefördert durch:

- 41 -



Unterschiede z.B. der Temperaturverläufe nicht mehr eindeutig der Pflanzenkohle zugeordnet werden können, da diese auch ein Effekt der unterschiedlichen Bewässerung sein könnten.

Grundsätzlich sind die gemessenen Temperaturen extrem hoch.  
In der Pflanzenkohle-Miete wird für über zwei Wochen (Tag 8-23) ein Sauerstoff-Gehalt von Null angezeigt. Dies war ein Messfehler – die Sauerstoff-Sonden waren defekt.

### 8.6.2.3 Technische Erfolge

Bei den durchgeführten Versuchen konnte festgestellt werden, dass die Pflanzenkohle die Reifung des Komposts beschleunigt. Folglich bewährt sich die Zugabe von Pflanzenkohle zur Kompostierung, um eine höhere Qualität im Endprodukt zu erzielen. Dies konnte durch Pflanzversuche gezeigt werden. Aufgrund der begrenzten Lagerkapazitäten auf der Deponie Eichelbuck, ist eine beschleunigte Reifung der Komposte durch die Pflanzenkohle ein nicht unerheblicher Mehrwert.

### 8.6.2.4 Ausblick

Beim Aufsetzen der Versuche stellte die Dosierung der Pflanzenkohle eine gewisse Herausforderung dar (reale Volumina einer gehäuften Baggerschaufel), die aber in Zukunft durch entsprechende Erfahrung kein weiteres Problem darstellen sollte.

Auf Basis der gewonnenen Erfahrungen und Messdaten wäre die Durchführung eines zweiter Kompostversuch mit erweiterter Parametrisierung sinnvoll.

Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die Komposte komplett ausreifen und dann noch einmal getestet werden.

Der durchgeführte Versuch zeigt, dass Pflanzenkohle die Qualität des Komposts deutlich verbessern kann. Allerdings gibt es noch eine Reihe an Optimierungsmöglichkeiten, um die Produktqualität weiter zu erhöhen und vor allem, um Konstanz in der Produktqualität zu erreichen. In weiteren Versuchen könnte die Pflanzenkohle bei optimierter Bewässerung getestet werden. Zudem könnten gerade hinsichtlich des Kosten – Nutzen Verhältnisses geringere Dosierungen getestet werden ((z.B. 5% - 10% - 20% bisher: 10 Vol%). Die dabei hergestellten Komposte könnten dann anwendungsspezifisch getestet werden. Für den Einsatz als abgesackte Erde für den Endverbraucher können Versuche analog zu den hier bereits durchgeführten Tests mit Salat auf purem Kompost durchgeführt werden und sollten dann um kommerzielle Kontrollen (Erden aus dem Baumarkt) ergänzt werden. Für den Einsatz im Gemüse und Ackerbau könnten Feldversuche durchgeführt werden. Zudem könnte die Pflanzung von Stadtbäumen eine Möglichkeit für weitere Pflanzversuche bieten.

Der Effekt der C-Senke durch den Kohlenstoffgehalt der Pflanzenkohle ist bereits ein starkes Marketing-Argument zur weiteren Vermarktung des konditionierten Komposts. Hierfür ist die Anmeldung für eine C-Senkenzertifizierung bei EBC geplant.

Derzeit bietet das europäische Pflanzenkohlezertifikat eine gute Basis, um Qualitätskriterien für eine sichere Verwendung von Pflanzenkohlen z.B. in der Landwirtschaft in Deutschland zu ermöglichen. Als erstes Land in Europa hat die Schweiz den Einsatz von zertifizierter Pflanzenkohle in der Landwirtschaft zugelassen. In der BioAbfV sowie in der DüMV wird die Pflanzenkohle jedoch noch nicht als möglicher zugelassener Ausgangsstoff aufgeführt. In der Düngemittelverordnung werden die in der Abbildung 5 dargestellten pflanzlichen Stoffe als zulässige Ausgangsstoffe für Bodenhilfsstoffe, Kultursubstrate oder Pflanzenhilfsmittel als Hauptbestandteil beschrieben:

7.1.10	Kohlen	Braunkohle, auch Leonardit, Xylith, nicht als Rückstand aus vorherigen Produktions- oder Verarbeitungsprozessen Holzkohle mit einem Kohlenstoffgehalt von mindestens 80 % C in der TM aus chemisch unbehandeltem Holz	Verwendung: - als Ausgangsstoff für Kultursubstrate, - als Trägersubstanz in Verbindung mit der Zugabe von Nährstoffen über zugelassene Düngemittel, - Xylith, Leonardit auch als Bodenhilfsstoff.
--------	--------	---	---

**Abbildung 5:** Ausschnitt DüMV Anlage 2 Tabelle 7

Um die Zulassung weiterer Ausgangsstoffe zur Herstellung von Pflanzenkohle zu erwirken, ist eine Reihe von Erkenntnissen zur Wirkung, Schadlosigkeit und Beschaffenheit der Pflanzenkohle zusammenzustellen. Hierzu können die Ergebnisse des Vorhabens mit unterstützen.

Die EU-Kommission hat in der EU Bio Verordnung mit Durchführungsverordnung (EU)2019/2164 vom 17. Dezember 2019 zur Änderung der VO 889/2008 im Anhang II, die Pflanzenkohle als Düngemittel/ Bodenverbesserer bereits positiv gelistet. Somit kann EBC zertifizierte Pflanzenkohle (premium Qualität mit PAK <4mg/kg) in allen EU Ländern offiziell im Biolandbau eingesetzt werden.

### 8.6.3 Einsatz zur Geruchsreduzierung

#### 8.6.3.1 Gärsubstrat

Bei einem Einsatz der Pflanzenkohle im Gärsubstrat sind positive Auswirkungen auf die Emissionen des Gärsubstrats zu erwarten. Durch eine erste sensitive Geruchsüberprüfung wurde diese Annahme deutlich bestätigt. In einem Batch-Versuch wurde in einen Behälter mit Gärsubstrat ein Eimer Pflanzenkohle hinzugefügt. Im Anschluss war eine deutliche Geruchsminderung zu erkennen.

Aus diesem Grund wurden die Geruchsstoffkonzentrationen über den hygienisierten Speiseresten, nach Zugabe von Pflanzenkohle, durch einen Geruchsgutachter ermittelt.

Hierzu wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

- Es wurden vier Proben an hygienisierten Speiseresten erzeugt. Zu zwei Proben wurde Pflanzenkohle hinzugemischt.
- Die 4 Boxen mit den Proben wurden mit Folie abgedeckt. Die Geruchsproben wurden im Luft- raum unterhalb der Folie nach einer Anreicherungszeit von etwa 30 Minuten entnommen

**Tabelle 7:** Ergebnisse Geruchsmessungen Gärsubstrat (Quelle: Bericht-Nr.: 20-07-01-FR der iMA)

Probe Nr.	Uhrzeit Probenahme	Beschreibung	Temperatur (°C)	Konzentration in GE/m <sup>3</sup>
5	13:35	ohne Pflanzenkohle	34,0	83.000
6	13:45	ohne Pflanzenkohle	33,5	54.000
7	14:00	mit Pflanzenkohle	33,0	43.000
8	14:15	mit Pflanzenkohle	33,0	30.000

Es konnte ein Minderungseffekt von bis zu Faktor 2 festgestellt werden.

### 8.6.3.2 Kompost:

Auch beim Einsatz der Pflanzenkohle im Gärsubstrat wurde eine positive Auswirkung auf die Emissionen des Komposts erwartet.

Aus diesem Grund wurden die Geruchsstoffkonzentrationen des Komposts mit und ohne Zugabe von Pflanzenkohle durch einen Geruchsgutachter ermittelt.

Hierzu wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

- Es wurden zwei Kompostmieten aus dem gleichen Material erzeugt. Einer Kompostmiete wurde Pflanzenkohle zugemischt.
- Nach einer Rottezeit von etwa 5 Tagen wurde Material entnommen und in Boxen gefüllt. In zwei Boxen wurde unbehandeltes Material, in die anderen beiden Boxen das mit Pflanzenkohle vermischte Material gefüllt.
- Die 4 Boxen wurden mit Folie abgedeckt. Die Geruchsproben wurden im Luftraum unterhalb der Folie nach einer Anreicherungszeit von etwa 2 Stunden entnommen.

**Tabelle 8:** Ergebnisse Geruchsmessungen Kompost (Quelle: Bericht-Nr.: 20-07-01-FR der IMA)

Probe Nr.	Uhrzeit Probenahme	Beschreibung	Temperatur (°C)	Konzentration in GE/m <sup>3</sup>
1	11:45	mit Pflanzenkohle	34,5	8.100
2	11:50	ohne Pflanzenkohle	32,5	4.600
3	12:00	ohne Pflanzenkohle	31,0	5.100
4	12:10	mit Pflanzenkohle	32,5	7.200

Es wurde festgestellt, dass die Miete mit Pflanzenkohle eine höhere Geruchsemission hat als die Miete ohne Pflanzenkohle (Faktor 1,6).

### 8.6.3.3 Ergebnis

Die Ergebnisse der Geruchsmessungen waren nicht so deutlich wie erhofft.

#### Gärsubstrat

Die sensitive Geruchsüberprüfung bestätigte deutlich eine Geruchsreduzierung durch das Beimischen von Pflanzenkohle, dies spiegeln die durchgeführten Messungen jedoch nicht wider. Möglicherweise könnte die verwendete Messmethode der Grund hierfür sein. Die Messungen wurden erst nach einer gewissen Anreicherungszeit im abgedeckten Luftraum ohne Luftaustausch über dem Substrat durchgeführt. Möglicherweise war zu dieser Zeit, dieser Luftraum bereits maximal angereichert. Die Durchführung weiterer Versuche mit einem kontinuierlichen Luftdurchzug könnte möglicherweise zu anderen Ergebnissen führen. Eine Durchführung weiterer Versuche ist jedoch nur sinnvoll, wenn die Pflanzenkohle auch im Gärsubstrat einen Marktvorteil erzielen kann. So könnte man das Gärsubstrat wirtschaftlich konditionieren und gleichzeitig Geruchsprobleme lösen.

#### Kompost

Die Geruchsmessungen zeigen, dass der Umsetzungsprozess bei der Miete mit Pflanzenkohle nicht dem der Kontrollmiete entspricht. Dies passt zu den Ergebnissen der Versuche aus Kapitel 8.6.2.1. Eine Geruchsminderung durch den Einsatz von Pflanzenkohle im Kompostierungsprozess kann nicht festgestellt werden. Es ist jedoch auch nicht davon auszugehen, dass die Pflanzenkohle zu höheren Geruchsemissionen führt. Lediglich der Umsetzungsprozess und somit der Zeitpunkt der maximalen Geruchsemission wird beeinflusst.

## 9 Bilanzierung des Vorhabens und Wirtschaftlichkeitsanalyse (AP 7)

Gefördert durch:

- 44 -

## 9.1 Gegenüberstellung der Vorhabensziele/Ergebnisse

Tabelle 9: Gegenüberstellung Vorhabensziele/Ergebnisse

Vorhabensziele	Ergebnisse
Erprobung und Nachweis eines stabilen u. wirtschaftlichen Dauerbetriebs der Pflanzkohleanlage mit dem Einsatz unterschiedlicher Grünschnittmaterialien	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dauerbetrieb ohne größere Störungen über 24 h am Tag und mit einer geringen Stillstandszeit (ca. 30 Stunde alle 2 Wochen) nach Installation einer Absackanlage</li> <li>• Die Mittelfraktion der Grünschnittoaufbereitung kann - anders als ursprünglich geplant - nicht in der Pflanzkohleanlage verwertet werden, bisher funktioniert die Anlage nur bei Einsatz der holzigen Grobfraction problemlos</li> <li>• Bisher kein Betrieb in Vollast und somit eines wirtschaftlichen Betriebes möglich</li> </ul>
Herstellung von Pflanzkohle, Untersuchung der Materialeigenschaften von Pflanzkohle, Erprobung der Einsatzmöglichkeiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Das Zertifizierungsverfahren für die Pflanzkohle wurde durchgeführt. Eine Zertifizierung für die Qualität „Premiumkohle“ liegt vor</li> <li>• Erste Vermarktungen werden aktuell erfolgreich betrieben (Erlös: ca. 600 EUR/t)</li> <li>• Die Pflanzkohle beschleunigt die Kompostreifung und erhöht bei Zugabe in Kompostierungsprozess die Qualität des Endprodukts</li> <li>• Bei Zugabe zum Gärsubstrat (Speisereste) konnte im verwendeten Versuchsmaßstab kein Effekt auf die Biogasausbeute nachgewiesen werden</li> <li>• Sensitive Geruchsüberprüfungen bestätigen eine geruchsreduzierende Wirkung der Pflanzkohle. Durch die durchgeführten Geruchsmessungen konnte dies jedoch nicht deutlich nachgewiesen werden.</li> </ul>
Energetisch, ökologisch und wirtschaftlich optimierter Einsatz des regenerativen Energieträgers „Holzhackschnitzel“ in Form einer KWK-Anlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ein sicherer Betrieb der Anlage ist bisher nicht möglich.</li> </ul>
Weiterentwicklung der Heißluftturbine in Kombination mit dem Heißgassystem für den technischen Einsatz und mit einer optimierten Energieausbeute	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Heißluftturbine wurde bisher nur im Leerlauf gefahren und die Turbine hat noch keinen Strom erzeugt</li> </ul>
Ersatz von bisher eingesetzten Primärenergieträgern, durch den Einsatz von regenerativ aus dem Grünabfall gewonnener Energieträger und deren energetisch und stofflich optimierten Verwertung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• stoffliche Verwertung durch Produktion von qualitativ hochwertigem Kompost und Pflanzkohle</li> <li>• bisher kein nachweislicher Ersatz von Primärenergieträgern erreicht</li> </ul>

## 9.2 Kostenbetrachtung

Im Folgenden werden die geplanten Investitionskosten mit den tatsächlich entstandenen Kosten verglichen.

**Tabelle 10:** Kostenübersicht

Pos	Leistung	Nettokosten				Differenz
		geplant		tatsächlich		
		Gesamt	Zuschuss	Gesamt	Zuschuss	
<b>1100</b>	<b>Hackschnitzelanlage mit EFGT*</b>					
1101	Anlagentechnik	380.000 €	380.000 €	551.290 €	551.290 €	171.290 €
1102	Bauwerk mit Überdachung	150.000 €		97.400 €		-52.600 €
	Baunebenkosten	78.000 €	58.500 €	83.412 €	62.559 €	5.412 €
	<b>Summe</b>	<b>608.000 €</b>	<b>438.500 €</b>	<b>732.102 €</b>	<b>613.849 €</b>	<b>124.102 €</b>
<b>1200</b>	<b>Pflanzenkohleanlage*</b>					
1201	PYREG-Anlage	300.000 €	300.000 €	316.555 €	316.555 €	16.555 €
1202	Abgaskamin	10.000 €	0 €			-10.000 €
1203	Schubcontainer mit Förderanlage	40.000 €	0 €	71.100 €		31.100 €
1204	Bauwerk mit Überdachung	60.000 €	0 €	40.500 €		-19.500 €
1201-1	Absackanlage	0 €	0 €	12.770 €		12.770 €
	Baunebenkosten	65.000 €	48.750 €	73.542 €	55.157 €	8.542 €
	<b>Summe</b>	<b>475.000 €</b>	<b>348.750 €</b>	<b>514.467 €</b>	<b>371.712 €</b>	<b>39.467 €</b>
1403	Hackschnitzeltrocknung*	40.000 €		47.588 €		7.588 €
1500	Pflanzenkohledesign*	12.000 €	12.000 €	12.000 €	12.000 €	0 €
2000	Sachkosten	75.000 €	75.000 €	75.000 €	75.000 €	0 €
<b>4000</b>	<b>Personalkosten</b>					
4100	Koordination	75.000 €	75.000 €	71.473 €	71.473 €	-3.528 €
4200	Wissenschaftliche Begleitung Pflanzenkohle	55.000 €	55.000 €	39.050 €	39.050 €	-15.950 €
4300	Wissenschaftliche Begleitung EFGT	105.000 €	105.000 €	119.000 €	119.000 €	14.000 €
	<b>Summe</b>	<b>235.000 €</b>	<b>235.000 €</b>	<b>229.523 €</b>	<b>229.523 €</b>	<b>-5.478 €</b>
5000	Kommunikation	10.000 €	10.000 €	5.500 €	5.500 €	-4.500 €
6000	Öffentlichkeitsarbeit	8.000 €	8.000 €	5.500 €	5.500 €	-2.500 €
	<b>Gesamt</b>	<b>1.463.000 €</b>	<b>1.127.250 €</b>	<b>1.621.680 €</b>	<b>1.313.083 €</b>	<b>158.680 €</b>

\*Weitere zusätzliche Kosten geplant: 150.000 EUR (notwendige Anlagenmodifikation)

### 9.2.1 Gründe der Kostendifferenz

#### Pos. 1100

- Um die Verfügbarkeit der Anlage möglichst hoch zu halten wurde die Förderanlage großzügiger ausgelegt.
- die Leittechnik war aufgrund der Komplexität der Anlage im Invest teurer
- Zur Optimierung der Energieausbeute wurde die Thermoölübertragung auf der EFGT-Anlage selbst realisiert und zur Speiseresteanlage eine Thermoölleitung installiert.

#### Pos. 1200

- Höhere Investitionskosten als kalkuliert, vor allem bei der Fördertechnik
- Installation einer zusätzlichen Absackanlage aus betrieblichen Gründen

#### Pos. 1403

- Höhere Investitionskosten als kalkuliert

### 9.3 Rentabilität der errichteten Anlagen

#### 9.3.1 Mikro-Holz-BHKW

Da zum jetzigen Stand noch keine Aufnahme und folglich auch keine Auswertung von Betriebswerten stattfinden konnte, kann die Rentabilität der errichteten Anlage noch nicht bewertet werden.

#### 9.3.2 Pflanzkohleanlage

Derzeit kann die Pflanzkohleanlage noch nicht wirtschaftlich betrieben werden. Die hohen Personal-, Betriebs- und Wartungskosten sowie die höheren Investkosten, können durch den bisher niedrigen Ertrag der Pflanzkohle und die dadurch erzielten Erlöse nicht ausgeglichen werden (vgl. Tabelle 11 und 12). Jedoch wird eine stetige Steigerung des Durchsatzes und somit auch des Pflanzkohleertrags angestrebt und es ist davon auszugehen, dass der Personalaufwand sich aufgrund der wachsenden Betriebserfahrungen weiter reduzieren lässt. Zudem produziert die Pyreg-Anlage Wärme, die bei einer Nutzung z.B. zu Heizzwecken den Propangasverbrauch deutlich reduzieren kann. Die aktuell erzeugte Wärmemenge (ca. 326.250 kWh/a) hat einen Wert von 36.250 EUR (49.658 l Propangas mit einem Heizwert von 6,57 kWh/l ).

**Tabelle 11:** aktuelle jährliche Kosten Pflanzkohleanlage

Anlageninvest + Finanzierung (4%, 15 Jahre, ohne Zuschuss)	46.682 EUR
Wartungsvertrag	16.000 EUR
Emissionsmessung	1.200 EUR
Analysen Pflanzkohle	4.000 EUR
Ersatz- und Verschleißteilpaket	24.000 EUR
Betriebskosten (Strom, Flüssiggas, Brauch- u. Abwasser))	13.230 EUR
Kosten BigBags	1.900 EUR
Personalkosten	28.750 EUR
Versicherung u. Sonstiges	5.259 EUR
<b>Gesamt</b>	<b>143.621 EUR</b>

Gefördert durch:

- 47 -



**Tabelle 12:** aktuelle Erlöse PYREG-Anlage

Erlöse durch Pflanzkohle	85 t/a	600 EUR/t	51.000 EUR/a
Erlöse durch Annahme von Reststoffen	350 t/a	30 EUR/t	10.500 EUR/a
<b>Gesamt</b>			<b>61.500 EUR/a</b>

Ab einem Input von 578 t/a und dem Erreichen eines Pflanzkohleertrages von 140 t/a, kann die Anlage bei Nutzung der vollständigen Wärmemenge wirtschaftlich betrieben werden (vgl. Abbildung 6).

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Pyreg-Anlage					
	Kunde:	ASF			
	Projekt-Name:	Energetische Nachnutzung Eiche			
		14F133			
	Datum:	15. November 2020			
Auslegungsdaten Pyreg			Holzige Abfälle		
	Betriebsstunden	7.500 Bh/a			
	Grünschnitt Eintritt	578 t-OS/a	80,0 %	462 t-TS/a	
		77 kg-OS/h		62 kg-TS/h	
	Asche Pyreg Austritt, bei Organic-Anteil	140 t-OS/a			
Anlageninvest + Finanzierung Pyreg					
1	Genehmigungsverfahren	enthalten			
1	Maschinentechnik	enthalten			
1	Montage	enthalten			
1	Verrohrung und Verkabelung	enthalten			
1	Bautechnik	enthalten			
	Gesamtsumme	525.920 €			
	Förderung	0%			
1	Annuitätendarlehen, Volltilgung	525.920 €	4,0%	15 Jahre	46.682 €
Betriebskosten Pyreg					
1	Wartungsvertrag mit Pyreg (Versicherungsgründe)				16.000 €
1	Emissionsmessung				3.800 €
1	Analysen Pflanzkohle				4.000 €
1	Ersatz- und Verschleißteilpaket				24.000 €
1	Strombedarf Anlage gesamt		75.000,0 kWh	0,15 €/kWh	11.250 €
1	Brauchwasser		330 m³/a	0,50 €/m³	165 €
1	Abwasser		330 m³/a	1,50 €/m³	495 €
1	Kosten BigPacks			1.900 €/a	1.900 €
1	Flüssiggas	40 Starts a 45,2 l	1.808 l/a	0,73 €/l	1.320 €
	<b>Gesamtkosten Betrieb Pyreg</b>				<b>62.930 €</b>
Personalkosten Gesamtanlage					
1	Personalkosten	100,0 %		28.750 €/a	28.750 €
Versicherung und Sonstiges					
1	Versicherung und Sonstiges	1,0%	auf Gesamtinvest		5.259 €
Gesamtkosten Verwertungsanlage Pyreg					
		pro Jahr, netto			143.621,0 €/a
Zusammenfassung					
	Gesamtkosten Pyreg pro Jahr, netto				-143.621 €/a
	Erlöse durch Annahme von Reststoff	578 t-OS/a		30 €/t-OS	17.325 €/a
	Wärmeertrag und somit Ersatz Propangas	57,0 kW	7.500 h/a	0,73 €/l	47.500 €/a
	Erlöse durch Pflanzkohle	140 t/a		600 €/t	84.000 €
	<b>Gewinn/Verlust</b>	pro Jahr			<b>5.204 €/a</b>

**Abbildung 6:** Wirtschaftlichkeitsbetrachtung PYREG-Anlage mit Wärmenutzung



Ab einem Input von 830 t/a (entspricht ca. 89 kg-TS/h) und dem Erreichen eines Pflanzenkohleertrages von 200 t/a, kann die Anlage auch ohne Nutzung der vollständigen Wärmemenge wirtschaftlich betrieben werden (vgl. Abbildung 7). Ursprünglich wurde vom Anlagenhersteller eine Durchsatzmenge von 108 kg-TS/h angegeben, diese kann bisher trotz des Einsatzes von hochwertigem Inputmaterial bei Weitem nicht erreicht werden.

Auslegungsdaten Pyreg		Holzige Abfälle			
	Betriebsstunden	7.500 Bh/a			
	Grünschnitt Eintritt	830 t-OS/a	80,0 %	664 t-TS/a	
		111 kg-OS/h		89 kg-TS/h	
	Asche Pyreg Austritt, bei Organic-Anteil	200 t-OS/a			
<b>Anlageninvest + Finanzierung Pyreg</b>					
1	Genehmigungsverfahren	enthalten			
1	Maschinentechnik	enthalten			
1	Montage	enthalten			
1	Verrohrung und Verkabelung	enthalten			
1	Bautechnik	enthalten			
	Gesamtsumme	525.920 €			
	Förderung	0%			
1	Annuitätendarlehen, Volltilgung	525.920 €	4,0%	15 Jahre	46.682 €
<b>Betriebskosten Pyreg</b>					
1	Wartungsvertrag mit Pyreg (Versicherungsgründe)				16.000 €
1	Emissionsmessung				1.200 €
1	Analysen Pflanzenkohle				4.000 €
1	Ersatz- und Verschleißteilpaket				24.000 €
<b>Betriebsmittel Pyreg</b>					
1	Strombedarf Anlage gesamt		75.000,0 kWh	0,15 €/kWh	11.250 €
1	Brauchwasser		330 m³/a	0,50 €/m³	165 €
1	Abwasser		330 m³/a	1,50 €/m³	495 €
1	Kosten BigPacks			1.900 €/a	1.900 €
1	Flüssiggas	0 Starts a 45,2	1.808 l/a	0,73 €/l	1.320 €
	<b>Gesamtkosten Betriebsmittel Pyreg</b>				<b>60.330 €</b>
<b>Personalkosten Gesamtanlage</b>					
1	Personalkosten	100,0 %		28.750 €/a	28.750 €
<b>Versicherung und Sonstiges</b>					
1	Versicherung und Sonstiges	1,0%	auf Gesamtinvest		5.259 €
<b>Gesamtkosten Verwertungsanlage Pyreg</b>		pro Jahr, netto			<b>141.021,0 €/a</b>
<b>Zusammenfassung</b>					
Gesamtkosten Pyreg pro Jahr, netto					-141.021 €/a
Erlöse durch Annahme von Reststoff		830 t-OS/a		30 €/t-OS	24.900 €/a
Erlöse durch Pflanzenkohle		200 t/a		600 €/t	120.000 €
<b>Gewinn/Verlust durch Pyreg ohne Trocknung</b>		pro Jahr			<b>3.879 €/a</b>

Abbildung 7: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung PYREG-Anlage ohne Nutzung



## 10 Öffentlichkeitsarbeit (AP 10)

Mit Umwelttechnik BW fand am 20.10.2014 ein Workshop statt, welcher das Thema „Biokohle-Produktion und Verwertung“ zum Thema hatte. An diesem haben auch Herr Ebel und Herr Roth teilgenommen. Dieser soll regelmäßig zum Austausch weitergeführt werden.

Weiterhin wurde die Anlagenplanung in mehreren Vortragsreihen durch Herrn Roth präsentiert. Innerhalb eines Workshops auf dem Windmühlenberg Karlsruhe wurde die Anlagentechnik unter Teilnahme von Fachleuten sowie Deponiebetreibern vorgestellt und diskutiert.

Im März 2017 konnte die Anlage in Ihren Grundfunktionen (ausgenommen der Turbinenbetrieb unter Last) in Betrieb gesetzt und die Anlage in Anwesenheit des Umweltministers eingeweiht werden (ursprünglich geplant Oktober 2016).

Freiburg, den 30.11.2020

Ingenieurbüro Roth & Partner GmbH  
Freiburg / Karlsruhe



Dipl. Ing. Johann Roth

Gefördert durch:

- 50 -



**Anlage 1:**

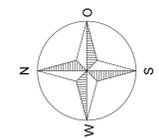
Lageplan Endgestaltung mit Darstellung der Vorhabensbestandteile

Gefördert durch:



Gefördert durch den  
Innovationsfonds  
Klima- und Wasserschutz

**badenova**  
*Energie. Tag für Tag*



**LEGENDE**

- Stützwand
- Rasenfugerpflaster
- Sickerpflasterstein
- Holzboden
- Höhenlinien gestarte Endgestaltung
- Betriebsrichtungen
- PV-Tische
- Grünfläche
- RS 1 Gasregelanlage
- R13 Gasbrunnen
- Gasleitung
- Gassammelleitung
- Flüssiggas
- Erdgas Mitteldruckleitung
- GW 1 Grundwassermesspegel
- Sickerwasser / Abwasserschicht
- Br Brunnen
- Mauer
- Zaun
- Leitplanke
- Plangenehmigte Deponiegrenze
- Nutzungsartengrenze (Verm.-u. Liegenschaftsamt Freiburg)
- Flurstücksgrenze
- Flurstücksnummer
- Entwässerungsrinne
- Kaskadenrinnen
- Vorflutgraben

**Landschaftsplanung gemäß LPB v. 14.12.2016**

- Sukzessionswald (42.10.41.10) mit Eignungsanforderungen
- Fehtwiesen (33.41)
- Trockenstandorte (35.62)
- Magerrasen bodensaure Standorte (36.40)
- Feldhecke aus standortgerechten Strauchern (41.20)
- Erdaufschüttung begrünt
- Feinschotter
- Asphalt
- Schotter
- Bestandteil des Vorhabens

Planungsdatum: 08.07.2017, 18.03.2019 und 10.05.2019  
 Auftraggeber: ASF  
 Auftraggeber: ASF  
 Auftraggeber: ASF

**Projekt Deponie Eichelbuck**

Verwertung biogener Abfälle

Planungsdatum: Stand November 2019

Projektnummer: 14 F 133

Planinhalt: Lageplan Endgestaltung mit Darstellung der Vorhabensbestandteile

Maßstab: 1:1000

Plan-Nr.: 1

Auftraggeber: Abfallwirtschaft und Stadtreinigung Freiburg

Planungsbüro: INGENIEURBÜRO ROTH & PARTNER

Freiburg, Oktober 2020

Gez. Datum Name Ersatz für Ersetzt durch

Gez. Datum Änderung

Alle Rechte dieser Zeichnung unterliegen dem Umweltschutz gemäß DIN 34



**Anlage 2:**

Immissionsschutzrechtliche Genehmigung

Gefördert durch:



Gefördert durch den  
Innovationsfonds  
Klima- und Wasserschutz

**badenova**  
*Energie. Tag für Tag*



**Baden-Württemberg**  
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG  
ABTEILUNG UMWELT

Regierungspräsidium Freiburg, Abteilung 5 · 79083 Freiburg i. Br.

Freiburg i. Br. 17.03.2016

ASF  
Abfallwirtschaft und Stadt-  
reinigung Freiburg GmbH  
Hermann-Mitsch-Straße 26  
79108 Freiburg i. Br.

Name: Hans Ernst Kunz			
Durchwahl: 0761 208-2110			
Abfallwirtschaft und Stadtreinigung Freiburg AktENZEICHEN: 54.2-8983.01/FR-016.7			
WV	Rechtsprechung	P.G.A. (Bitte bei Antwort angeben)	
22. März 2016			
SIV Clü	PWE	GEB	GA
Controll.	FW	LO/ROM	RM
PM	EDV	LO/UMW	WER

**Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG)**

Genehmigung gemäß § 4 BImSchG für die Errichtung und den Betrieb von Anlagen zur Verwertung biogener Abfälle zur Erzeugung stofflicher, thermischer und elektrischer Energieträger und deren Nutzung bei der Aufbereitung der Abfälle auf dem Gelände der Deponie Eichelbuck in Freiburg

Ihr Antrag vom 31.03.2015, ergänzt am 03.11.2015, am 02.02.2016 und am 08.03.2016

**Anlagen**

- gesiegelte Antragsunterlagen
- Empfangsbestätigung
- Gebührenmitteilung
- Auflagen und Bedingungen der unteren Baurechtsbehörde und des Fachbereichs Brand- und Katastrophenschutz
- Allgemeine Bestandteile der Baugenehmigung
- Baufreigabebeschein

Sehr geehrte Damen und Herren,

auf Ihren Antrag vom 31.03.2015, ergänzt am 03.11.2015, am 02.02.2016 und am 08.03.2016, erteilt das Regierungspräsidium Freiburg gemäß §§ 4, 19 ff BImSchG folgende

## 1. Immissionsschutzrechtliche Genehmigung

für die Errichtung und den Betrieb von Anlagen zur Verwertung biogener Abfälle (Grünschnitt und naturbelassenes Holz) zur Erzeugung stofflicher, thermischer und elektrischer Energieträger und deren Nutzung bei der Aufbereitung der Abfälle auf dem Gelände der Deponie Eichelbuck in Freiburg, Flst.-Nr. 8323, bestehend aus

- der zeitweiligen Lagerung von Grünschnitt, Zwischenprodukten und Ausgangsmaterialien,
- der mechanischen Aufbereitung von 12.000 t/a Grünschnitt und naturbelassenem Holz durch Zerkleinern und Sieben,
- der aeroben Behandlung des krautigen Anteils des Grünschnitts (8.550 t/a) in einer Mietenkompostierung und der Aufbereitung des Kompostes,
- der Karbonisierung der mittleren Fraktion aus der mechanischen Aufbereitung (1.250 t/a) in einer Pyrolyseanlage,
- die Trocknung der Holzhackschnitzel aus der mechanischen Aufbereitung (2.200 t/a) in einem Satzrockner.

- 1.1 Die Genehmigung erfolgt unter den in Ziff. 4 aufgeführten Nebenbestimmungen und Auflagen.
- 1.2 Diese Genehmigung schließt gemäß § 13 BImSchG die Baugenehmigung ein. Im Übrigen ergeht dieser Bescheid unbeschadet der behördlichen Entscheidungen, die nach § 13 BImSchG nicht von der Genehmigung umfasst werden.
- 1.3 Der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung liegen die mit dem Dienstsiegel des Regierungspräsidiums Freiburg versehenen Antragsunterlagen vom 31.03.2015, aktualisiert durch die Nachlieferung vom 03.11.2015 und den Nachträgen vom 02.02.2016 und 08.03.2016, zugrunde.
- 1.4 Die immissionsschutzrechtliche Genehmigung für die einzelnen Teilanlagen erlischt, sofern diese nicht innerhalb einer Frist von drei Jahren ab Bestands-

kraft der Genehmigung errichtet oder mit dem Betrieb der Anlage begonnen wurde. Im Übrigen gelten die Bestimmungen des § 18 BImSchG.

- 1.5 Die im Antrag genannten Verwertungsoptionen für die Pflanzenkohle aus der Pyrolyseanlage sind nicht Gegenstand dieser Entscheidung.

## 2. Antragsunterlagen

Die nachfolgend aufgeführten Unterlagen sind wesentlicher Bestandteil dieser Entscheidung und bestimmen deren Inhalt und Umfang:

Formblatt 1.1 bis 1.2	Antrag auf immissionsschutzrechtliche Genehmigung
Anlage 2.1	Erläuterungsbericht vom 31.03.2015, Ingenieurbüro Roth & Partner
Nachlieferung	Stellungnahme, Ergänzungen und Änderungen zum Antrag, 30.10.2015, Ingenieurbüro Roth & Partner
Nachtrag	Änderungen zum Antrag vom 31.03.2015
Anlage 2.2.1	Schematische Darstellung der Anlage(Fassung Nachtrag); Fließschema Karbonisierungsanlage
Formblatt 2.1 bis 2.12	15 Seiten
Nachtrag	Formblatt 2.1, Seite 1
Anlage 2.2.9	Maßnahme nach Betriebseinstellung
Anlage 2.3	Antrag auf Baugenehmigung, 3 Seiten
	Baubeschreibung, 3 Seiten
	Schriftl. Teil zum Lageplan, 6 Seiten
	Bestellung Bauleiter, 1 Seite
	Erläuterungsbericht, Entwässerungsantrag, 6 Seiten
Pläne zum Bauantrag	Lageplan, M 1:1.000, 05.03.15
	Detallageplan Umschlagplatz, M 1:500, 05.03.15
	Überdachung Holzhackschnitzzellager Plateau Grundriss, M 1:100, 05.03.15
	Überdachung Holzhackschnitzzellager Schnitt - A,

	M 1:100, 05.03.15
	Überdachung Holzhackschnitzzellager Ansicht, M 1:100, 05.03.15
	Überdachung Pyreganlage Grundriss, M 1:100, 05.03.15
	Überdachung Pyreganlage Schnitt - A, M 1:100, 05.03.15
	Überdachung Pyreganlage Ansicht, M 1:100, 05.03.15
Brandschutzkonzept	6 Seiten, INGUS Ingenieurbüro für Umweltschutz und Sicherheit Dr. Winfried Reiling, 02.03.15
Formblatt 2.15 bis 2.17	3 Seiten
Formblatt 2.18	1 Seite
Formblatt 2.19	1 Seite
Nachtrag	Natura 2000 - Verträglichkeits-Vorprüfung, Dr. Martin Boschert, BIOPLAN Bühl, 21.10.15, 20 Seiten
Anlage 3.1	Schalltechnisches Gutachten, SGS-TÜV Saar GmbH, 23.03.2015, 50 Seiten
Anlage 3.2	Emissions- und Immissionsprognose, iMA Richter und Röckle, 30.03.2015, 43 Seiten,
Nachlieferung	Stellungnahme, iMA Richter & Röckle, 22.10.15, 12 Seiten
Nachtrag	Emissions- und Immissionsprognose, iMA Richter und Röckle, 29.01.2016, 105 Seiten, ersetzt Anl. 3.2
Nachtrag	Emissions- und Immissionsprognose, iMA Richter und Röckle, 08.03.2016, Stellungnahme zu Abwurf- höhen
Anlage 3.3, Pläne	Lageplan gesamt, M 1:1.000, 31.03.15
	Lageplan Genehmigungsstand Anlagen, M 1:1.000, 31.03.15

	Detallageplan Plateau, M 1:500, 31.03.15, ersetzt durch
Nachtrag	Detallageplan Plateau, M 1:500, 25.01.2016
	Systemschnitt Plateau, M 1:200, 31.03.15
	Detallageplan Pflanzenkohlelager/Trocknungsanlage M 1:500, 31.03.15
	Lageplan Ausbauabschnitt A und B, M 1:1.000, 31.03.15, ersetzt durch
Nachtrag	Lageplan Ausbauabschnitt A und B, M 1:1.000, 25.01.2016
	Detail Aufbau Plateau, M 1:100, 31.03.15
Anlage 3.4	Allgemeine Vorprüfung § 3c UVPG, Ingenieurbüro Roth & Partner, 31.03.2015, 16 Seiten

### **3. Gebührenentscheidung**

Für die Entscheidungen gem. Ziffer 1 wird eine Gebühr in Höhe von 7943,33 Euro festgesetzt. Die beiliegende Gebührenmitteilung ist Bestandteil dieses Bescheids.

### **4. Nebenbestimmungen und Auflagen**

#### **4.1 Immissionsschutz**

4.1.1 Der Tag der Aufnahme des Probetriebs der einzelnen Anlagenteile ist dem Regierungspräsidium Freiburg jeweils schriftlich mitzuteilen.

Die Dauer des Probetriebs der einzelnen Anlagenteile wird auf maximal 8 Kalendermonate beschränkt.

Die einzelnen Anlagenteile dürfen endgültig erst in Betrieb genommen werden, wenn das Regierungspräsidium Freiburg bestätigt, dass Anforderungen aus diesem Bescheid der Inbetriebnahme nicht entgegenstehen.

4.1.2 Die Karbonisierungsanlage und die dazugehörige Dokumentation (einschließlich des Brand- und Explosionsschutzkonzeptes gem. Nr. 2.3 des Brandschutzkonzeptes) sind vor der Aufnahme des Probetriebs durch einen nach § 29b BImSchG bekanntgegebenen Sachverständigen einer sicherheitstechnischen Überprüfung zu unterziehen. Der Probetrieb darf erst nach Freigabe durch den Sachverständigen aufgenommen werden.

#### 4.1.3 Emissionsbegrenzung für die Karbonisierungsanlage

Im Abgas der Karbonisierungsanlage dürfen die folgenden Schadstoffkonzentrationen, bezogen auf das Abgas im Normzustand bei einem Volumengehalt an Sauerstoff von 11 %, nicht überschritten werden:

Gesamtstaub	20 mg/m <sup>3</sup>
Schwefeloxide, angegeben als SO <sub>2</sub> :	350 mg/m <sup>3</sup>
Stickstoffoxide, angegeben als NO <sub>2</sub> :	350 mg/m <sup>3</sup>
organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff:	50 mg/m <sup>3</sup>
Kohlenmonoxid	150 mg/m <sup>3</sup>
Dioxine und Furane: angegeben als Summenwert nach Anhang 5 TA Luft	0,1 ng/m <sup>3</sup>
Benzo(a)pyren:	0,05 mg/m <sup>3</sup>
Benzol:	1,0 mg/m <sup>3</sup>

#### 4.1.4 Emissionsüberwachung

Die Einhaltung der Emissionskonzentrationen der Luftschadstoffe für die nach Nr. 4.1.3 Grenzwerte festgelegt sind, ist frühestens 3 Monate und spätestens 6 Monate nach der endgültigen Inbetriebnahme der Karbonisierungsanlage und anschließend wiederkehrend alle 3 Jahre von einer nach den §§ 26 und 29b BImSchG bekannt gegebenen Messstelle überprüfen zu lassen. Die Überprüfung muss die ungünstigsten Betriebszustände erfassen. Die Messplanung ist rechtzeitig, d.h. mindestens 4 Wochen vor dem geplanten Messtermin, mit dem Regierungspräsidium Freiburg abzustimmen. Der nach den Vorgaben zum bundeseinheitlichen Emissionsbericht gefertigte Bericht der Messstelle ist dem Regierungspräsidium innerhalb von 8 Wochen nach Durchführung der Überprüfung vorzulegen.

#### 4.1.5 Messplätze, Messstellen

Die Messplätze zur Durchführung der Einzelmessungen sind insbesondere nach den Anforderungen der EN 15259 (Jan. 2008) einzurichten. Sie müssen gefahrlos zugänglich und begehbar sein. An den Bühnen für die Überwachung der Emissionen einschließlich der Betriebsgrößen sind ortsfeste Anschlüsse für die notwendigen Betriebsmittel (z.B. Strom, Druckluft) vorzusehen.

Die gesamte Einrichtung der Messplätze und Messstrecken ist mit einer zugelassenen Messstelle abzustimmen.

4.1.6 Auf Grundlage der Ergebnisse der Erstmessung und der ersten Wiederholungsmessung legt die Genehmigungsbehörde den Überwachungsumfang für die Karbonisierungsanlage neu fest.

4.1.7 Zur Minimierung der diffusen Emissionen sind folgende Maßnahmen zu treffen:

- Das angelieferte Material ist zeitnah zu häckseln, strukturarmes und feuchtes Material (Grasanteil) noch am gleichen Tag. Das Häckselgut ist spätestens am zweiten Tag nach dem Häckseln zu sieben und die Feinfraktion auf Kompostierungsmieten aufzusetzen.

- Abwurfhöhen sind so gering wie möglich zu halten.
- Fahrwege für LKW und Radlader sind mit einer tragfähigen Asphaltdecke zu befestigen.
- Die Fahrwege sind regelmäßig mit einer Reinigungsmaschine zu säubern.
- Der betriebsinterne Transport von potentiell staubenden Gütern bzw. deren Umschlag hat so zu erfolgen, dass eine Staubentwicklung so gering wie möglich gehalten wird. Die in der Emissionsprognose angesetzten spezifischen Transportentfernungen sind einzuhalten.
- Die Fahrwege sind bei Trockenheit und Staubentwicklung zu befeuchten.
- Leergeräumte Lager- und Mietenflächen sind unverzüglich zu säubern.
- Die Abdeckung der Kompostmieten ist arbeitstäglich auf Leckstellen zu prüfen.

Es sind entsprechende schriftliche Betriebsanweisungen zu erstellen und das Personal nach diesen zu schulen. Die Wirksamkeit der Maßnahmen ist vom Personal regelmäßig zu prüfen. Die Ergebnisse der Überprüfung sowie die Reinigung und Befeuchtung der Fahrwege und der sonstigen Flächen sind im Betriebstagebuch zu dokumentieren.

- 4.1.8 Frühestens 3 und spätestens 6 Monate nach der Inbetriebnahme der Kompostierung und danach alle 3 Jahre ist die Anlage durch den Geruchsgutachter zu begehen und auf Einhaltung der emissionsmindernden Maßnahmen zu überprüfen. Über das Ergebnis der Begehung ist ein Bericht zu erstellen und der Genehmigungsbehörde spätestens 8 Wochen nach der Begehung vorzulegen.

Abhängig vom Ergebnis der ersten beiden Begehungen entscheidet die Genehmigungsbehörde über die Fortführung der regelmäßigen Begehungen durch den Geruchsgutachter.

## 4.2 Naturschutz

- 4.2.1 Sofern Außenbeleuchtungen und Leuchtkörper an den Bauwerken (Überdachung Pflanzenkohleanlage und Hackschnitzzellager auf Plateau) angebracht

werden sind HSE-Natriumdampfhochdruck-Lampen mit Blenden und soweit für den jeweiligen Beleuchtungszweck ausreichend, Niederdrucklampen vorgenannter Leuchtenversion zu verwenden.

4.2.2 Es sind Beleuchtungskörper mit Begrenzung der Lichtemissionen (keine Abstrahlung nach oben und seitlich, insbesondere ist Streulicht in Richtung Waldrand zu vermeiden) zu verwenden. Die Beleuchtungskörper müssen wirksam abgedichtet sein, um ein Eindringen und das damit verbundene Verbrennen von Insekten zu verhindern.

4.2.3 Die angrenzenden Schutzgebiete dürfen durch die Bautätigkeiten nicht beeinträchtigt oder geschädigt werden. Insbesondere ist in den Gebieten untersagt, Materialien, Maschinen, (Bau-)Fahrzeuge, Erdaushub oder Gegenstände zu lagern oder abzustellen.

#### 4.3 Baurecht und Brandschutz

Die als Anlage beigefügten

- Allgemeine Bestandteile der Baugenehmigung,
- Auflagen, Bedingungen und Hinweise,
- Baufreigabebeschein

der unteren Baurechtsbehörde sind Bestandteile der Entscheidung.

#### 4.4 Arbeitsschutz

Zur Umsetzung des § 6 Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) hat der Betreiber das Pyrolysegas, die beim Öffnen von Anlagenteilen evtl. vorhandenen Anhaftungen und Verunreinigungen und die (insbesondere auch beim An- und Abfahren der Anlage) entstehende Pflanzenkohle auf das Vorhandensein von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK nach EPA) untersuchen zu lassen. Die Untersuchungsberichte sind der Genehmigungsbehörde vorzulegen.

Bis zum Beweis des Gegenteils ist bei den jeweiligen Gefährdungsbeurteilungen davon auszugehen, dass die TRGS 551 Anwendung findet.

Die sonstigen Verpflichtungen des Arbeitgebers zum Schutz der Beschäftigten bleiben unberührt.

#### 4.5 Nachweis- und Berichtspflichten

##### 4.5.1 Vor Baubeginn:

Der unteren Baubehörde bei der Stadt Freiburg ist der Baubeginn schriftlich anzuzeigen.

##### 4.5.2 Vor Aufnahme des Probebetriebs:

Dem Regierungspräsidium ist vorzulegen:

- Prüfbericht zur Sicherheitstechnik der Karbonisierungsanlage (vgl. Nr. 4.1.2)

Der zuständigen Feuerwehr sind die mit dieser abgestimmten überarbeiteten Feuerwehrpläne vorzulegen (vgl. Nr. 2.4 des Brandschutzkonzeptes).

##### 4.5.3 Vor der endgültigen Inbetriebnahme:

Dem Regierungspräsidium sind vorzulegen:

- Untersuchungsberichte zum PAK-Gehalt des Pyrolysegases und der Pflanzenkohle (vgl. Nr. 4.4)

##### 4.5.4 Anlagenüberwachung im Dauerbetrieb:

Dem Regierungspräsidium sind vorzulegen:

- Bericht über die Ergebnisse der Einzelmessungen nach Nr. 4.1.4 jeweils innerhalb von 8 Wochen nach Durchführung der Messungen
- Bericht über die Begehung durch den Geruchsgutachter gem. Nr. 4.1.8 jeweils innerhalb von 8 Wochen nach der Begehung.

## **5. Hinweise:**

5.1 Sofern Stoffströme aus den beantragten Bioabfallverwertungsanlagen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden verwertet werden sollen, sind die Vorgaben der Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung - BioAbfV) in der jeweils gültigen Fassung einzuhalten. Dies betrifft insbesondere die Anforderungen an das Behandeln sowie die Untersuchungs-, Überwachungs- und Dokumentationspflichten des Bioabfallbehandlers.

5.2 Sofern Stoffströme aus den Bioabfallverwertungsanlagen als Düngemitteln, die nicht als EG-Düngemittel bezeichnet sind, sowie als Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln in den Verkehr werden sollen, so sind die Vorgaben der Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV) in der jeweils gültigen Fassung einzuhalten. Dies gilt insbesondere für das Inverkehrbringen der Pflanzenkohle.

## **6. Begründung:**

6.1

Mit Antragsunterlagen vom 31.03.2015, aktualisiert durch die Nachlieferung vom 03.11.2015 und den Nachträgen vom 02.02.2016 und 08.03.2016, wurde die Genehmigung für die Errichtung und den Betrieb von Anlagen zur Verwertung biogener Abfälle auf dem Gelände der Deponie Eichelbuck, bestehend aus

- der zeitweiligen Lagerung von Grünschnitt, Zwischenprodukten und Ausgangsmaterialien,
- der mechanischen Aufbereitung von Grünschnitt und naturbelassenem Holz durch Zerkleinern und Sieben,

- der aeroben Behandlung des krautigen Anteils des Grünschnitts in einer Mietenkompostierung und der Aufbereitung des Kompostes,
- der Karbonisierung der mittleren Fraktion aus der mechanischen Aufbereitung in einer Pyrolyseanlage,
- die Trocknung der Holzhackschnitzel aus der mechanischen Aufbereitung in einem Satzrockner

beantragt.

## 6.2

Die Errichtung und der Betrieb dieser Anlagen bedürfen einer Genehmigung nach den §§ 4 ff, 19 des BImSchG i.V.m. den §§ 1, 2 und der Nrn. 8.5.2, 8.11.2.4 und 8.12.2 des Anhangs der 4. Verordnung zur Durchführung des BImSchG (4. BImSchV).

Die Anlage zur Karbonisierung (Pflanzenkohleanlage) wird als Nebeneinrichtung eingestuft; für diese war nach Ziff. 8.1.1.3 der Anlage 1 zum Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) eine allgemeine Vorprüfung des Einzelfalls nach § 3 c Satz 1 UVPG durchzuführen. Anhand der vorgelegten Unterlagen zur Vorprüfung wurde festgestellt, dass auf eine Umweltverträglichkeitsprüfung verzichtet werden konnte. Nach Einschätzung des Regierungspräsidiums sind aufgrund überschlüssiger Prüfung keine erheblichen nachteiligen Umweltauswirkungen des Vorhabens zu erwarten.

Die Zuständigkeit des Regierungspräsidiums Freiburg für die Erteilung dieser Genehmigung ergibt sich aus § 2 Abs. 1 Nr.1 der Immissionsschutz-Zuständigkeitsverordnung – ImSchZuVO – des Umweltministeriums.

Das Genehmigungsverfahren wurde entsprechend der §§ 10 und 19 BImSchG im vereinfachten Verfahren durchgeführt.

Gemäß § 10 Abs. 5 BImSchG wurde die Stadt Freiburg, Fachbereiche Baurecht und Naturschutz, am Genehmigungsverfahren beteiligt. Daneben wurde in Absprache mit

dem Betreiber auch der Gemeinde Vörstetten Gelegenheit zur Stellungnahme gegeben.

Die Genehmigung schließt gemäß § 13 BImSchG die Baugenehmigung nach § 58 LBO und das naturschutzrechtliche Benehmen nach § 17 BNatSchG ein.

### 6.3

Die Anforderungen an die geplanten Anlagen richten sich nach den allgemeinen Vorschriften des Immissionsschutzes, wozu insbesondere die Betreiberpflichten nach § 6 BImSchG gehören. Danach sind genehmigungsbedürftige Anlagen so zu errichten und zu betreiben, dass schädliche Umwelteinwirkungen und sonstigen Gefahren, erhebliche Nachteile und Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft nicht hervorgerufen werden können. Des Weiteren muss Vorsorge gegen die oben näher bezeichneten Umwelteinwirkungen durch Maßnahmen getroffen werden, welche dem Stand der Technik entsprechen. In der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) vom 24.07.2002 wird der Begriff „schädliche Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen“ und der Stand der Technik für genehmigungsbedürftige Anlagen konkretisiert. Mögliche Auswirkungen auf das benachbarte FFH-Gebiet werden nach den einschlägigen Fachveröffentlichungen bewertet.

Die einzelnen Punkte der umfangreichen Stellungnahme der Gemeinde Vörstetten wurden durch Nachbesserungen und Ergänzungen der Antragsunterlagen abgearbeitet. Die Stellungnahme der Gemeinde wurde, soweit fachtechnisch begründet und nach unserer Prüfung erforderlich, in der Genehmigung berücksichtigt.

Nach §§ 6 Abs. 1, 4 BImSchG ist die beantragte Genehmigung zu erteilen. Bei antragsgemäßer Realisierung und unter Einhaltung der in dieser Entscheidung genannten Nebenbestimmungen und Auflagen ist sichergestellt, dass von dem Vorhaben keine schädlichen Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft hervorgerufen werden. Durch Anwendung des Standes der Technik ist auch ausreichend Vorsorge getroffen.

Mit den Antragsunterlagen wurde eine gutachterliche Prognose der Emissionen und Immissionen der Gesamtanlage für die Luftschadstoffe und Gerüche vorgelegt. Die Ausführungen des Gutachters sind nach verschiedenen Nachbesserungen und Klar-

stellungen nachvollziehbar und plausibel. Gleiches gilt für das vorgelegte schalltechnische Gutachten und die Verträglichkeits-Vorprüfung für das angrenzende Vogelschutzgebiet.

Andere öffentlich-rechtliche Vorschriften oder Belange des Arbeitsschutzes stehen dem Vorhaben ebenfalls nicht im Wege.

Rechtsgrundlage für die Nebenbestimmungen und Auflagen der Ziffer 4 dieser Genehmigung ist § 12 BImSchG i. V. m. § 36 Landesverwaltungsverfahrensgesetz (LVwVG). Die Nebenbestimmungen dienen zur Sicherstellung der Erfüllung der in § 6 Abs. 1 BImSchG genannten Voraussetzungen. Sie sind erforderlich, aber auch ausreichend, den in § 5 BImSchG genannten Zielen und sonstigen berührten Rechtsvorschriften Geltung zu verschaffen. Sie gewährleisten, dass die Umweltauswirkungen des Vorhabens auf einem hohen Schutzniveau für die Umwelt insgesamt begrenzt werden.

Sie werden wie folgt begründet:

**zu 4.1 (Immissionsschutz):**

Die sicherheitstechnische Prüfung der Karbonisierungsanlage wurde auf der Grundlage des § 29a BImSchG gefordert.

Die im Rauchgas der Karbonisierungsanlage zu überwachenden Schadstoffe wurden antragsgemäß festgelegt. Die Regelungen zur Überwachung richten sich nach Nr. 5.3 der TA Luft.

Die Auflagen zu den diffusen Emissionen dienen der Festschreibung der Maßnahmen, die in der gutachterlichen Prognose der Emissionen und Immissionen als umgesetzt angenommen wurden.

Mit der Auflage zur Begehung der Anlage durch den Geruchsgutachter wird einem Anliegen der Gemeinde Vörstetten entsprochen. Der Antragsteller hat der Auflage zugestimmt.

**zu 4.2 (Naturschutz):**

Rechtsgrundlagen für die naturschutzrechtlichen Nebenbestimmungen sind §§ 14 ff sowie § 33 Abs. 1 Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG). Der Einsatz insektenfreundlicher Beleuchtungskörper trägt den Schutzzwecken des angrenzenden FFH-Gebietes Rechnung, indem nachteilige Auswirkungen auf Insekten und nachtfjagende Fledermäuse minimiert werden.

**zu 4.4 (Arbeitsschutz):**

Die Nebenbestimmung konkretisiert die Pflichten aus der Gefahrstoffverordnung.

**Begründung der Gebührenfestsetzung:**

Die Gebührenfestsetzung stützt sich auf die §§ 1 bis 8 und 12 Landesgebührengesetz i.V.m. §§ 1, 2 der Gebührenverordnung des Umweltministeriums (GebVO UM) und Nr. 8.2, 8.7.2 des dazu ergangenen Gebührenverzeichnisses sowie §§ 1, 2 der Gebührenverordnung des Wirtschaftsministeriums (GebVO WM) und Nr. 11.1.1 des dazu gehörenden Gebührenverzeichnisses. Der Gebührenberechnung liegen die von Ihnen angegebenen Gesamtkosten in Höhe von 1.337.030,45 Euro (davon Baukosten in Höhe von 418.880,00 Euro) zugrunde.

Gebühr nach Ziffer 8.2, 8.7.2 GebVerz UM (immissionsschutzrechtliche Genehmigung)	6267,33 Euro
--	--------------

Gebühr nach Ziffer 11.1.1 GebVerz WM (enthaltene Baugenehmigung)	1676,00 Euro
---	--------------

**Rechtsbehelfsbelehrung**

Gegen diesen Bescheid kann innerhalb eines Monats nach Bekanntgabe Klage beim Verwaltungsgericht Freiburg, Habsburgerstraße 103, 79104 Freiburg i. Br., schriftlich

oder zur Niederschrift erhoben werden. Bei schriftlicher Einlegung ist die Klagefrist nur gewahrt, wenn die Klageschrift innerhalb der Rechtsmittelfrist beim Verwaltungsgericht eingeht.

Mit freundlichen Grüßen

  
Hans Ernst Kunz



**Anlage 3:**

Wärmebilanzen

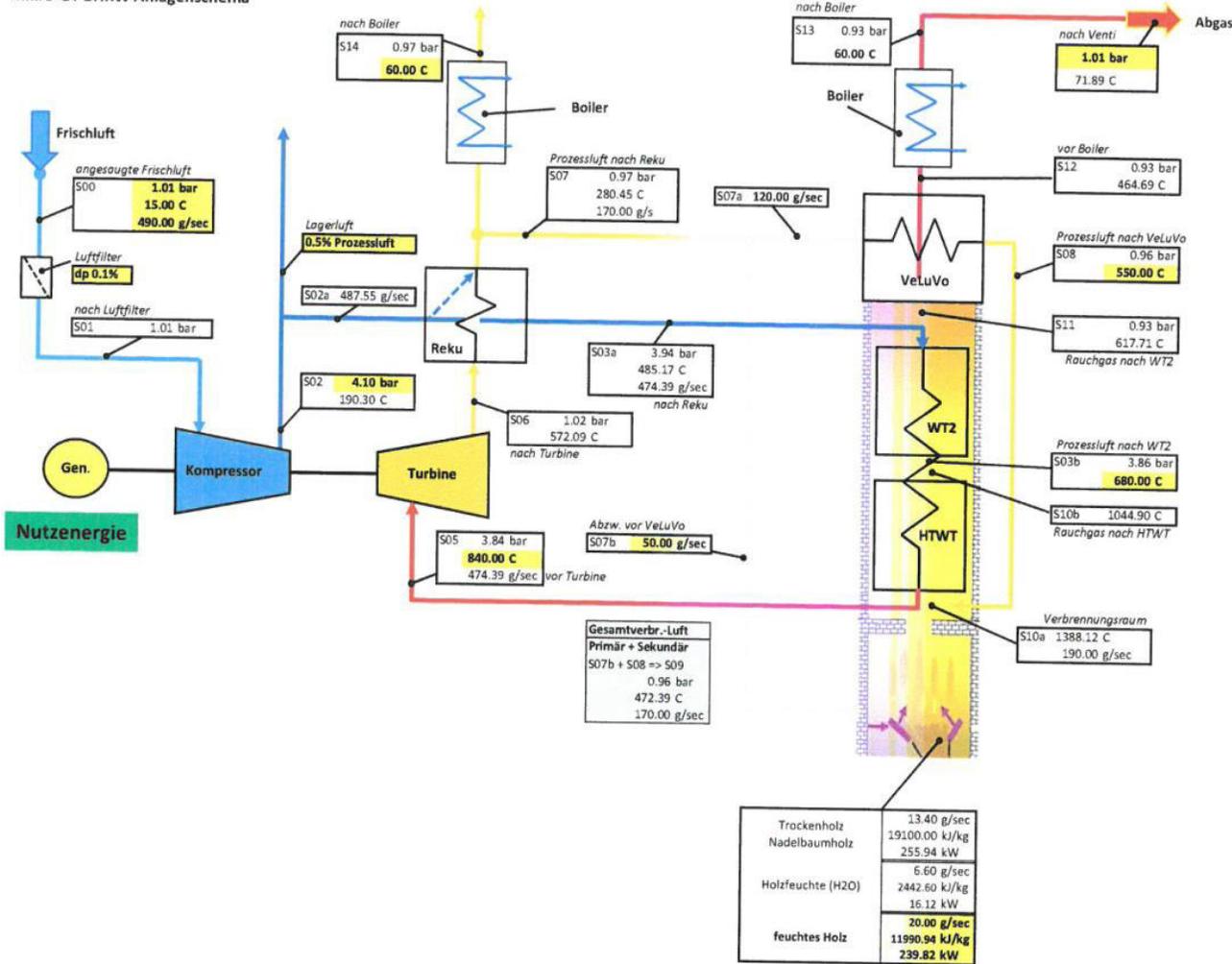
Gefördert durch:



Gefördert durch den  
Innovationsfonds  
Klima- und Wasserschutz

**badenova**  
*Energie. Tag für Tag*

Mikro-GT BHKW Anlagenschema



Wichtige Daten	
elektrisch	
Netto-Leistung	50.39 kW
el. Wirkungsgrad	21.01 %
thermisch	
Nutzwärme	157.91 kW
th. Wirkungsgrad	65.85 %
Gesamt	
Nutzungsgrad	86.86 %

Leistung und Wirkungsgrad		
Generatorverluste	5.2 kW	9.0 %
Kompressor	87.4 kW	80.0 %
Turbine	145.3 kW	85.0 %
Rekuperator	148.3 kW	76.5 %
VeLuVo	34.9 kW	79.3 %
HTWT	87.6 kW	49.7 %
WT2	103.3 kW	77.3 %
Ventilator	2.4 kW	70.0 %

Druckverluste			
		relativ	absolut
Luftfilter		0.1 %	1.0 mbar
Rekuperatur	kalt	4.0 %	164.0 mbar
	heiss	5.0 %	51.2 mbar
VeLuVo	kalt	1.0 %	9.7 mbar
	heiss	0.0 %	0.0 mbar
HTWT	kalt	5.0 %	192.9 mbar
	heiss	0.0 %	??? mbar
WT2	kalt	2.0 %	78.7 mbar
	heiss	4.0 %	38.6 mbar

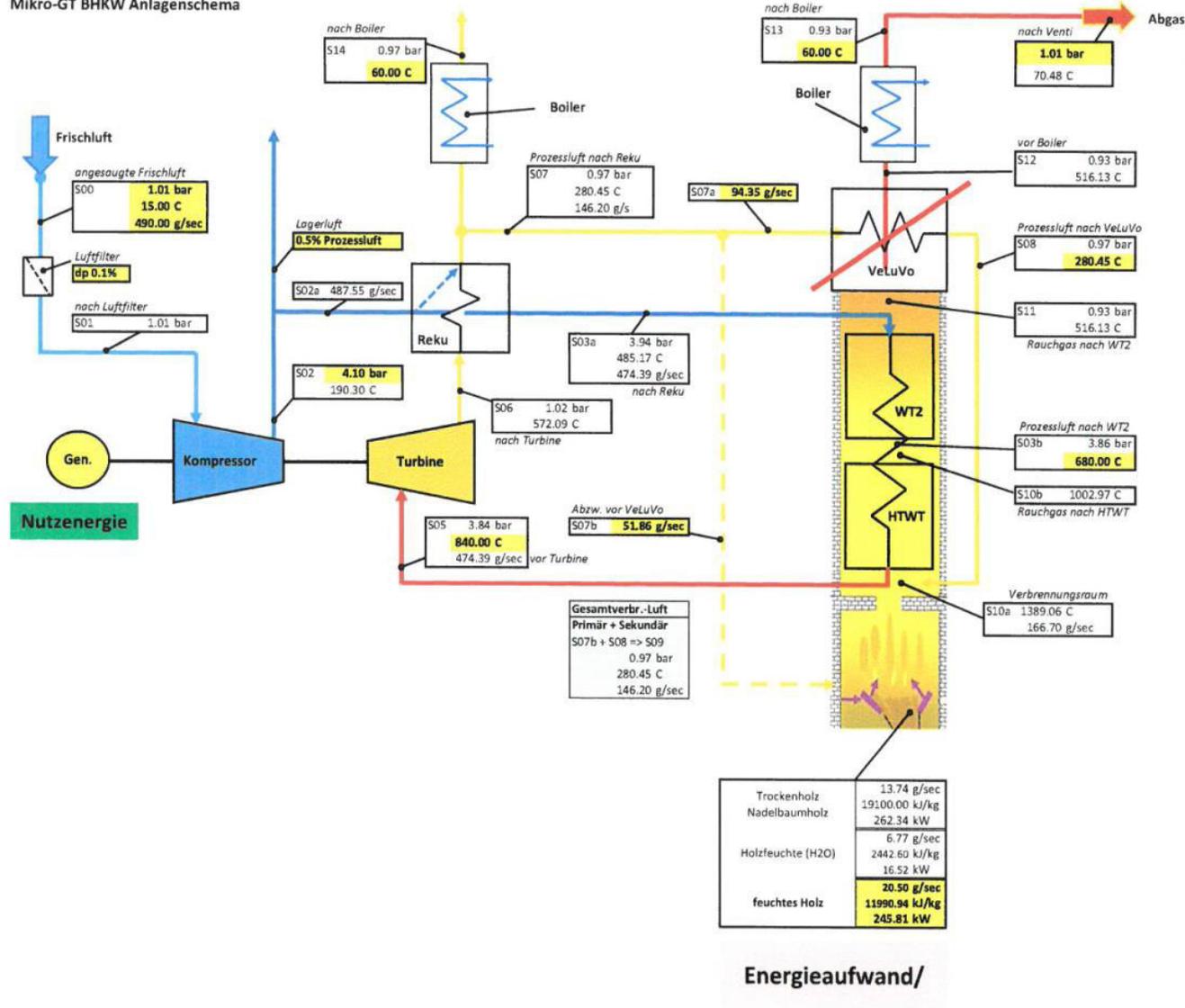
Energieaufwand/

Höchster elektrischer Wirkungsgrad

Wärmebilanz 1



Mikro-GT BHKW Anlagenschema



Wichtige Daten	
<i>elektrisch</i>	
Netto-Leistung	50.91 kW
el. Wirkungsgrad	20.71 %
<i>thermisch</i>	
Nützwärme	163.87 kW
th. Wirkungsgrad	66.66 %
Gesamt	
Nutzungsgrad	87.37 %

Leistung und Wirkungsgrad		
Generatorverluste	5.2 kW	9.0 %
Kompressor	87.4 kW	80.0 %
Turbine	145.3 kW	85.0 %
Rekuperator	148.3 kW	76.5 %
VeLuVo	0.0 kW	61.8 %
HTWT	87.6 kW	55.7 %
WT2	103.3 kW	94.3 %
Ventilator	1.9 kW	70.0 %

Druckverluste		
	relativ	absolut
Luftfilter	0.1 %	1.0 mbar
Rekuperatur	kalt	4.0 %
	heiss	5.0 %
VeLuVo	kalt	0.0 %
	heiss	0.0 %
HTWT	kalt	5.0 %
	heiss	0.0 %
WT2	kalt	2.0 %
	heiss	4.0 %

Trockenholz	13.74 g/sec
Nadelbaumholz	19100.00 kJ/kg
	262.34 kW
Holzfeuchte (H2O)	6.77 g/sec
	2442.60 kJ/kg
	16.52 kW
feuchtes Holz	20.50 g/sec
	11990.94 kJ/kg
	245.81 kW

Energieaufwand/



**Anlage 4:**

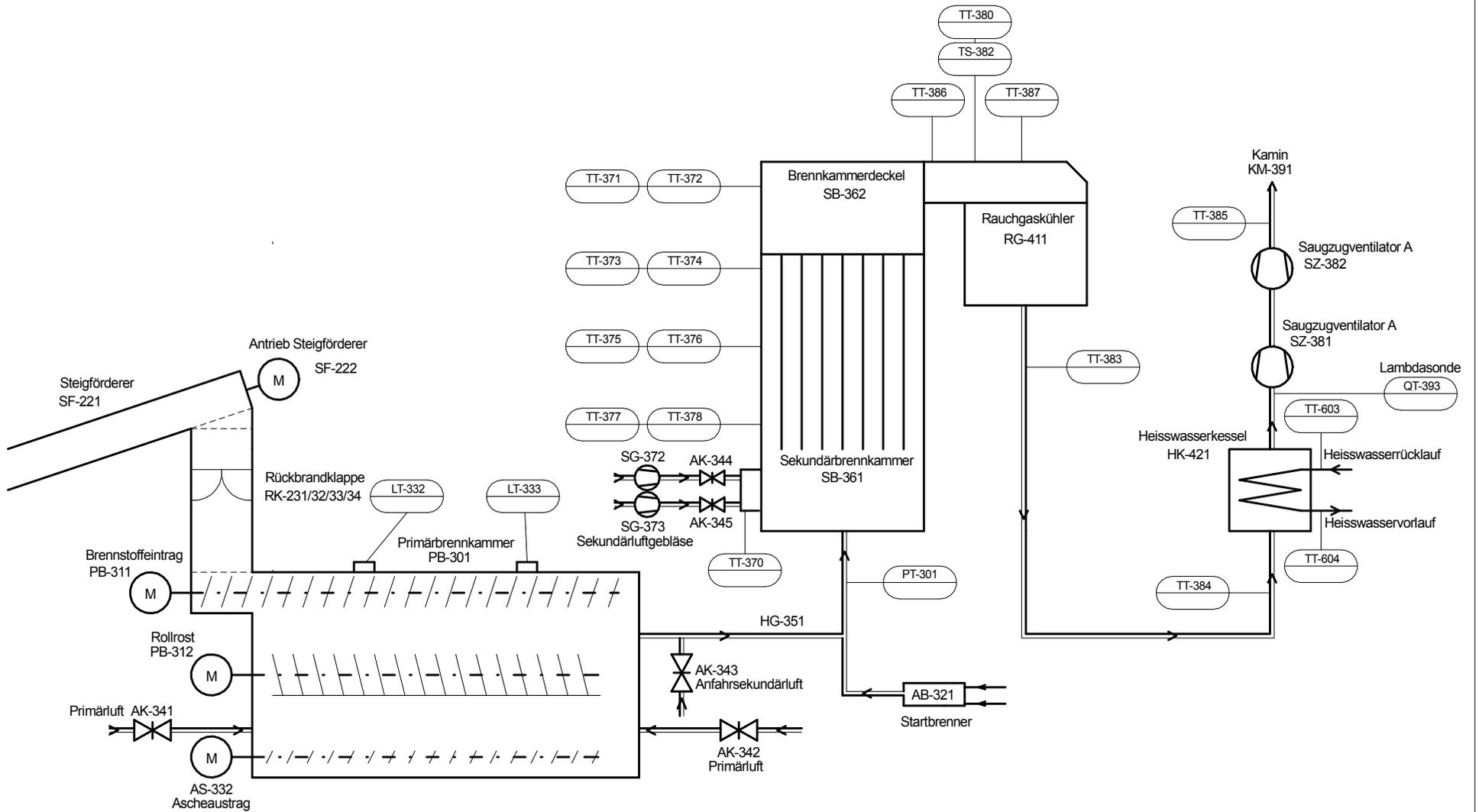
Anlagenschema und R&I-Schemata Mikro-Holz-BHKW

Gefördert durch:



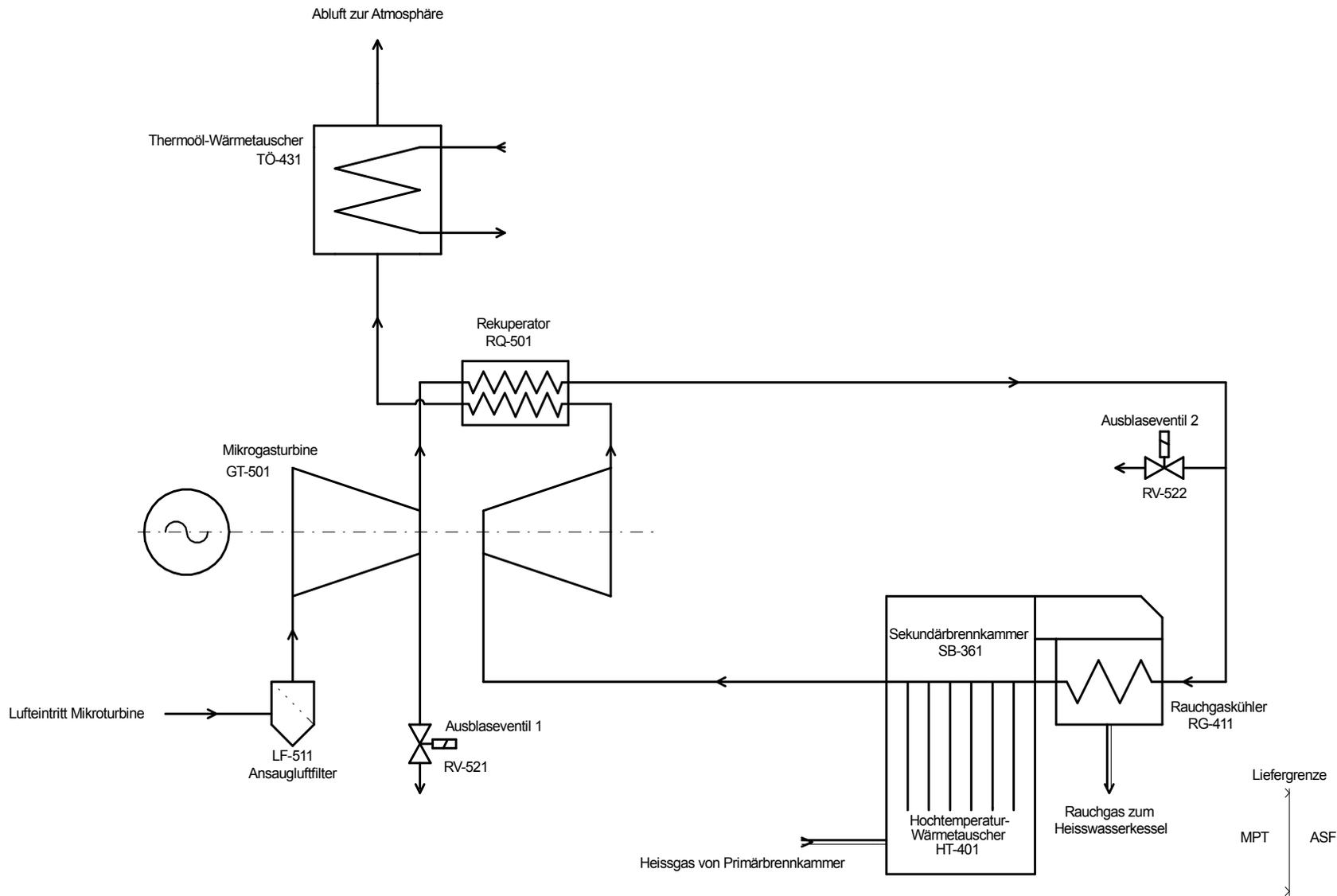
Gefördert durch den  
Innovationsfonds  
Klima- und Wasserschutz

**badenova**  
*Energie. Tag für Tag*



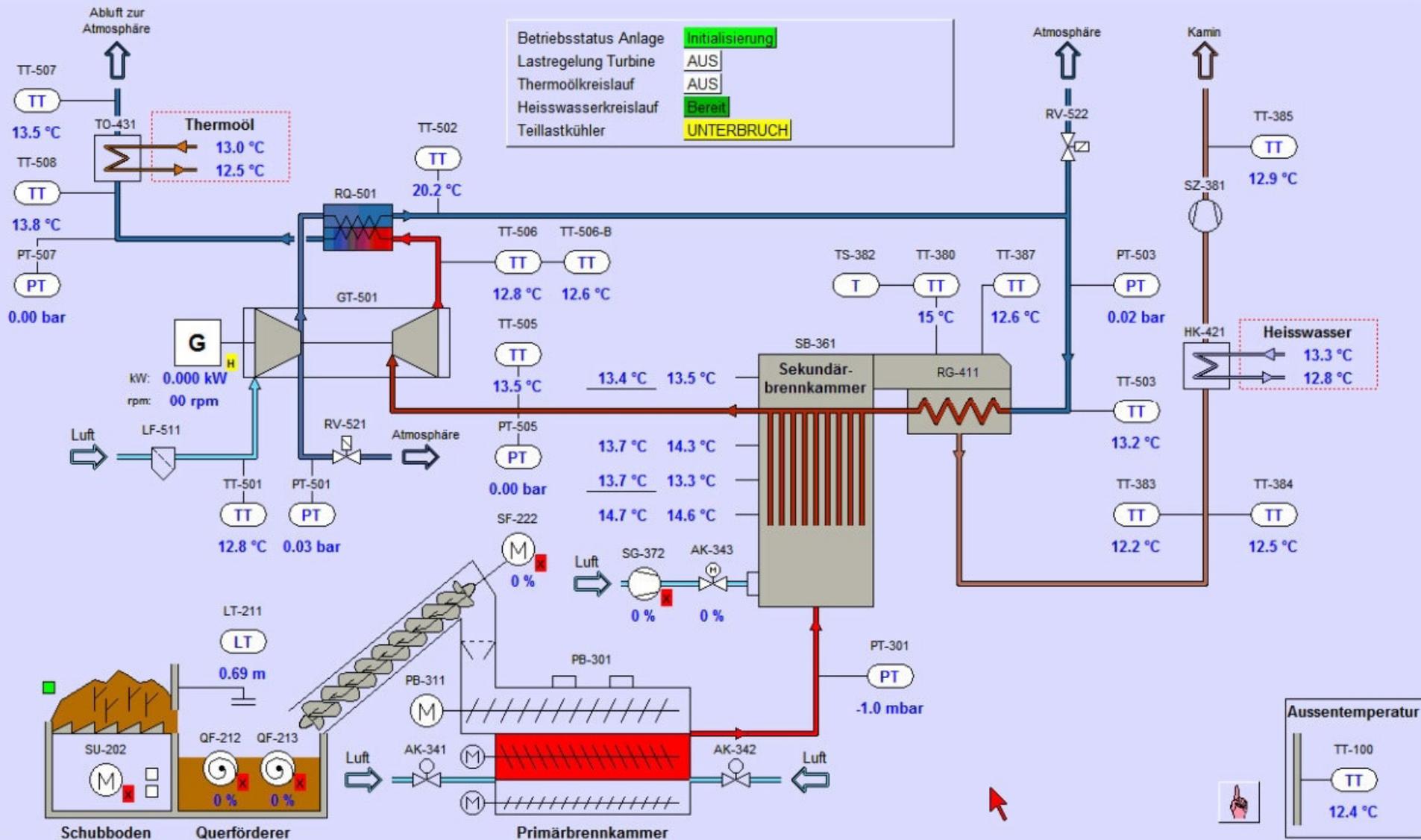
- PT Drucktransmitter
- PI Druckanzeige
- PS Pressostat
- TT Thermoelment/Widerstandselement
- TI Temperaturanzeige
- TS Thermostat
- FS Durchflusswächter
- xxx Testmuffe

Kunde:				Z.-Nr.	
<b>ASF</b>				<b>MPT</b>	
Abfallwirtschaft und Stadtreinigung Freiburg				Micropower Technology GmbH	
			Datum	Name	Titel
			Bearb. 12.06.2016	R. Stucki	
			Gepr.		
			Norm		
B		23.10.2019	Sur		Projekt
A		16.08.2016	Sur		
Index	Änderungen	Datum	Norm		
<b>EFGT Eichelbuck</b>					Blatt
					<b>1</b>



Kunde:				Z.-Nr.	
<b>ASF</b>				<b>MPT</b>	
Abfallwirtschaft und Stadtreinigung Freiburg				Micropower Technology GmbH	
			Datum	Name	Titel
			Bearb. 12.06.2016	R. Stucki	
			Gepr.		
			Norm		PID Mikrogasturbine Kurzbezeichnungen
C		23.10.2019	Sur		Projekt <b>EFGT Eichelbuck</b>
B		16.08.2016	Sur		
Index	Änderungen	Datum	Norm		Blatt <b>1</b>

# EFGT Eichelbuck





**Anlage 5:**

Prüfzeugnis Fertigkompost

Gefördert durch:



Gefördert durch den  
Innovationsfonds  
Klima- und Wasserschutz

**badenova**  
*Energie. Tag für Tag*



# Prüfzeugnis

RAL-GZ 251 PZ-Nr: 5124-166296-1

## Fertigkompost (grobkörnig)

### RAL-Gütesicherung Kompost Chargenuntersuchung

Seite 1 von 2

Anlage UVZ Eichelbuck  
(BGK-Nr.: 5124)  
Eichelbuckstr. 1  
79108 Freiburg

Probenahme am 07.05.2020

#### Rechtsbestimmungen:

- Bioabfallverordnung
- Düngemittelverordnung
- EU-Ökoverordnung  
VO(EG) Nr.889/2008, Anhang 1

#### Regelwerke:

- RAL-Gütesicherung (RAL-GZ 251)  
(Anerkennungsverfahren)
- Wasserschutzgebiete  
(geeignet für WSZ II und III)



### Anerkennungsverfahren

Zeichengrundlage unter  
[www.gz-kompost.de](http://www.gz-kompost.de)

Die Einhaltung der jeweiligen Norm wird mit einem Häkchen ausgewiesen.

## Warendeklaration der RAL-Gütesicherung<sup>1)</sup>

### Kennzeichnung

gemäß Düngemittelverordnung

#### **Organischer NPK-Dünger 0,73-0,22-0,48**

##### **mit Spurennährstoffen**

unter Verwendung von pflanzlichen Stoffen

0,73 % N Gesamtstickstoff  
0,22 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Gesamtposphat  
0,48 % K<sub>2</sub>O Gesamtkaliumoxid  
0,50 % Fe Eisen  
0,02 % Mn Mangan

**Nettomasse: siehe Lieferschein**

#### **Hersteller/Inverkehrbringer:**

ASF GmbH  
Hermann-Mitsch-Str. 26  
79108 Freiburg

#### **Ausgangsstoffe:**

Pflanzliche Stoffe aus Garten- und Landschaftsbau (100%)

#### **Nebenbestandteile:**

0,34 % MgO Gesamtmagnesiumoxid  
27,8 % Organische Substanz

#### **Lagerung und Anwendung:**

Eine Lagerung im Freiland ist unter Berücksichtigung anderer Rechtsbestimmungen möglich. Durchnässung, Abtragung und Auswaschung ist zu vermeiden, ansonsten trocken lagern. Wesentliche stoffliche Veränderungen sind nicht zu erwarten. Hinweise zur sachgerechten Anwendung siehe Anwendungsempfehlung. Die Empfehlungen der amtlichen Beratung sind vorrangig zu berücksichtigen. Bei einer Aufbringung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen sind die Anwendungs- und Mengenbeschränkungen aus abfallrechtlichen Vorschriften (AbfKlärV, BioAbfV) zu beachten.

### Eigenschaften und Inhaltsstoffe

in der Frischmasse

	kg/t	kg/m <sup>3</sup>
Stickstoff gesamt (N)	7,33	3,35
Stickstoff CaCl <sub>2</sub> -löslich (N)	0,01	0,00
Stickstoff organisch (N)	7,32	3,35
Phosphat gesamt (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	2,26	1,03
Kaliumoxid gesamt (K <sub>2</sub> O)	4,82	2,20
Magnesiumoxid ges.(MgO)	3,46	1,58
Basisch wirks. Stoffe (CaO)	21,89	10,00
pH-Wert		8,9
Salzgehalt	1,07	g/l
C/N-Verhältnis		22
Organische Substanz	278	kg/t
Humus-C	82	kg/t

Hygienisierend und biologisch stabilisierend behandelt gem. §2 BioAbfV

Frei von keimfähigen Samen und austriebfähigen Pflanzenteilen

Körnung	0 - 30 mm
Rohdichte	457 kg/m <sup>3</sup>
Trockenmasse	50,20 %

Düngewert <sup>2)</sup>	6,35 €/t
(im Anwendungsjahr)	2,90 €/m <sup>3</sup>
Humuswert <sup>3)</sup>	13,98 €/t
	6,39 €/m <sup>3</sup>

### Zweckbestimmung

Zur Bodenverbesserung und Düngung  
Geeignet als Mischkomponente für  
Erden und Substrate

### Anwendungsbereiche

Landwirtschaft  
Landschaftsbau  
Erdenwerke

### Anwendungsempfehlungen

Landwirtschaft: siehe Anlage LW  
Landschaftsbau: siehe Anlage LB

Das Erzeugnis unterliegt der  
RAL-Gütesicherung (RAL-GZ 251).

Dieses Zeugnis wurde elektronisch  
erstellt. Es gilt ohne Unterschrift.



Bundesgüte-  
gemeinschaft  
Kompost e.V.

Träger der regelmäßigen Güteüberwachung  
gemäß §11 Abs. 3 BioAbfV.

Köln, den 29.05.2020

1) bei der Abgabe des Erzeugnisses verbindliche Warendeklaration der RAL-Gütesicherung. 2) gemäß aktuellem Marktwert, ermittelt über äquivalente Kosten mineralischer Düngung nach Landhandelspreisen (Jan. - März 2020) ohne MwSt. (0,77 €/kg N im Anwendungsjahr (N-löslich zzgl. 5% von N-organisch); 0,64 €/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 0,64 €/kg K<sub>2</sub>O; 0,07 €/kg CaO). 3) Der Wert von Humus-C beträgt 0,17 €/kg Humus-C (Kalkuliert auf Basis eines Strohpreises von 72,50 Euro/t).



RAL-GZ 251

# Untersuchungsbericht

PZ-Nr.: 5124-166296-1

UVZ Eichelbuck  
(BGK-Nr.: 5124)

Seite 2 von 2

Charge: 2020/03/2

Probenahme am 07.05.2020

Tgb.-Nr.: 1-262-2020

Prüflabor BGK-Nr.: 39

## Fertigkompost (grobkörnig)

### Allgemeine Angaben

Auftraggeber / -in: ASF GmbH

Probenehmer / -in: Frau Iris Möller  
(BGK-Nr.: 355) INFU GmbH GB PLANCO-TECPrüflabor: INFU GmbH Geschäftsbereich PLANCO-TEC  
(BGK-Nr.: 39) 37249 Neu-Eichenberg  
Laborverantwortlicher: Eileen SchützeProbenahmedatum: 07.05.2020  
Probeneingang im Labor: 08.05.2020Beprobtes Erzeugnis: Fertigkompost (0 - 30 mm)  
lose WareProduktionsmonat: April  
Chargenbezeichnung: 2020/03/2 Prozessüberwachung geprüft, nicht beanstandet

### Analysenergebnisse

Parameter	Wert	Einheit
<u>Pflanzennährstoffe</u>		
Stickstoff, gesamt (N)	1,46	% TM
Phosphat, gesamt (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,45	% TM
Kaliumoxid, gesamt (K <sub>2</sub> O)	0,96	% TM
Magnesiumoxid, gesamt (MgO)	0,69	% TM
Ammonium CaCl <sub>2</sub> -löslich (NH <sub>4</sub> -N)	2	mg/l FM
Nitrat CaCl <sub>2</sub> -löslich (NO <sub>3</sub> -N)	2	mg/l FM
Phosphat löslich (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	377	mg/l FM
Kaliumoxid löslich (K <sub>2</sub> O)	1430	mg/l FM
<u>Bodenverbesserung</u>		
Organische Substanz (GV 450°C)	55,4	% TM
Basisch wirks. Bestandteile (CaO)	4,36	% TM
<u>Physikalische Parameter</u>		
Rohdichte	457	g/l
Wassergehalt	49,8	% FM
Salzgehalt (Extr. 1:5)	1,07	g/l FM
pH-Wert (H <sub>2</sub> O)	8,9	
Rottegrad (1-5)	5	(21°C)
Fremdstoffe > 2mm gesamt	0,05	% TM
- verformbare Kunststoffe (Folien)	0,010	% TM
- sonstige Fremdstoffe	0,04	% TM
Verunreinigungsgrad (Flächensumme)	2	cm <sup>2</sup> /l
Steine > 10 mm	0,00	% TM
<u>Biologische Parameter/Hygiene</u>		
Pflanzenverträglichkeit:		
bei 25% Prüfsubstratanteil	107	%
bei 50% Prüfsubstratanteil	106	%
Keimfähige Samen / keimf. Pflanzenteile	0	je l FM
Salmonellen	nicht nachweisbar	
<u>Schwermetalle</u>		
Blei (Pb)	34,8	mg/kg TM
Cadmium (Cd)	0,39	mg/kg TM
Chrom (Cr)	17,4	mg/kg TM
Kupfer (Cu)	38,5	mg/kg TM
Nickel (Ni)	10,7	mg/kg TM
Quecksilber (Hg)	0,11	mg/kg TM
Zink (Zn)	143	mg/kg TM
<u>Zusätzliche Parameter</u>		
Natrium gesamt	0,06	% TM
Natrium wasserlöslich (Na)	0,02	% TM
Schwefel gesamt (S)	0,15	% TM
Schwefel wasserlöslich (S)	0,02	% TM
Eisen gesamt (Fe)	1	% TM
Mangan gesamt (Mn)	0,04	% TM
Arsen gesamt (AS)	9,00	mg/kg TM
Thallium gesamt (TI)	0,14	mg/kg TM

### Einsatzstoffe<sup>1)</sup>

Anteil	Bezeichnung
100%	A2 Garten- und Parkabfälle

#### Hilfsstoffe

<sup>1)</sup> Einsatzstoffe gemäß Verzeichnis zulässiger Einsatzstoffe für die Herstellung gütegesicherter Komposte und Gärprodukte der BGK (Dok. GS-007-1)

### Bemerkung Probenehmer / -in:

#### Bemerkung Prüflabor:

Fremdvergabe Agrolab Group:  
Pflanzennährstoffe  
Bodenverbesserung  
Schwermetalle  
Zusätzliche Parameter  
Fremdvergabe JenaBios GmbH, Arsen und Thallium  
Fremdvergabe Aqua Control Diagnosticum:  
Salmonellen

Die Probenahme und Untersuchung wurde gemäß dem Methodenbuch der BGK e.V. durchgeführt.

Neu-Eichenberg, den 29.05.2020

## Fertigkompost (grobkörnig)

BGK-Nr.: 5124

**Tabelle 1: Daten zur Düngeberechnung**

(Angaben in der Frischmasse)

Inhaltsstoff	%	kg/t	kg/m <sup>3</sup>
Stickstoff gesamt (N)	0,73	7,33	3,35
Stickstoff löslich (N)	0,00	0,01	0,00
Stickstoff organisch (N)	0,73	7,32	3,35
Phosphat gesamt (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,23	2,26	1,03
Kaliumoxid gesamt (K <sub>2</sub> O)	0,48	4,82	2,20
Magnesiumoxid gesamt (MgO)	0,35	3,46	1,58
Bas. wirks. Bestandteile (CaO)	2,19	21,9	10,0
Organische Substanz	27,8	278	127
Humus-C	8,23	82,3	37,6

**Umrechnungsfaktoren Aufwandmenge**

Der Umrechnungsfaktor von Frischmasse (FM) in Trockenmasse (TM) beträgt 0,5 und von TM in FM 1,99. Der Umrechnungsfaktor von Volumen (m<sup>3</sup>) in Masse (t) beträgt 0,46 und von t in m<sup>3</sup> FM 2,19.

**Tabelle 2: Stickstoffausnutzung nach DüV**

(Mindestanrechenbarkeit nach DüV, Angaben in der Frischmasse)

Ackerland	% von N <sub>ges</sub>	kg/t	kg/m <sup>3</sup>
Anwendungsjahr <sup>1)</sup>	3	0,22	0,10
Erstes Folgejahr*	4	0,29	0,13
Zweites Folgejahr*	3	0,22	0,10
Drittes Folgejahr*	3	0,22	0,10
<b>Grünland, Dauergrünland mehrschnittiger Feldfutterbau</b>	% von N <sub>ges</sub>	kg/t	kg/m <sup>3</sup>
Anwendungsjahr <sup>1)</sup>	3	0,22	0,10
Erstes Folgejahr*	10	0,73	0,33

\*nach § 4 Abs. 1 Nr. 5 und Abs. 2 Nr.4 DüV anzurechnende Folgewirkung.

**Tabelle 3: Mittlere Aufwandmengen und Düngewert**

(am Beispiel einer dreigliedrigen Fruchtfolge)

	Aufwandmenge (FM)		Düngewert <sup>3,6)</sup>	Humuswert <sup>4)</sup>
	t/ha	m <sup>3</sup> /ha		
jährlich	20	44	127	279
alle 3 Jahre <sup>2)</sup>	60	131	380	836

Die Tabelle zeigt ein Beispiel für Aufwandmengen zur Versorgung einer dreigliedrigen Fruchtfolge. Dem Beispiel liegt eine mittlere Versorgungsstufe des Bodens und ein jährlicher Bedarf von 120 kg N<sup>1)</sup>, 60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> und 140 kg K<sub>2</sub>O zugrunde. Im vorliegenden Fall ist die zulässige Höchstmenge nach BioAbfV limitierend. Sie ist erreicht, wenn 60 t bzw. 131 m<sup>3</sup>/ha Kompost ausgebracht werden.

**Anrechnung von Nährstoffen und Humus**

Stickstoff im Kompost liegt überwiegend in organisch gebundener Form vor. Tabelle 2 zeigt die Anrechenbarkeit nach Düngerverordnung (DüV).

Phosphat, Kaliumoxid, Magnesiumoxid sowie basisch wirksame Stoffe sind in der Fruchtfolge zu 100 % anrechenbar. Bei Aufwandmengen nach Tabelle 3 sind die Grunddüngung (P, K) und die Erhaltungskalkung (CaO) weitgehend abgedeckt.

Humus-C ist der im Rahmen der Humusbilanz nach VDLUFA anrechenbare humusreproduktionswirksame Kohlenstoff (Humus-C).

**Angaben nach Düngerverordnung**

Nach DüV handelt es sich um ein Düngemittel

- ohne wesentlichen Nährstoffgehalt (gemäß § 2, Nr. 11 DüV, <=1,5 % N und <=0,5 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> i.d. TM)
- ohne wesentlichem Gehalt an Stickstoff (gemäß § 2 Nr. 11 DüV <1,5% N)

Die Sperrfristen nach § 6 Abs. 8 Satz 2 DüV (i.d.R. 1.Dezember bis 15.Januar) gilt nicht.

Im Rahmen der schlagbezogenen Aufzeichnungspflichten (§ 10 Abs. 2) sind die Gesamtgehalte der aufgetragenen Nährstoffe und die verfügbaren Stickstoffgehalte (Tabelle 1) zu berücksichtigen.

Zeitpunkt und Menge der Düngung sind so zu wählen, dass verfügbare oder verfügbar werdende Nährstoffe den Pflanzen zeitnah und in einer dem Bedarf der Pflanzen entsprechenden Menge zur Verfügung stehen.

Für ausgewiesene belastete Gebiete sind die Vorschriften der jeweiligen Landesregierungen zu beachten. Ab dem 1.Januar 2021 gelten zusätzlich bundesweite Vorgaben für die dann ausgewiesenen belasteten Gebiete.

**Anwendungsvorgaben**

Zulässige Aufwandmengen sind nach guter fachlicher Praxis der Düngerverordnung zu bestimmen und dürfen gemäß Bioabfallverordnung 30 t Trockenmasse bzw. 60 t Frischmasse je Hektar in drei Jahren nicht überschreiten. Empfehlungen der amtlichen Beratung gelten vorrangig. Bei Anwendung auf Grünland zur Futtergewinnung und auf Ackerfutterflächen mit nichtwendender Bodenbearbeitung nach der Aufbringung (ausgenommen Maisanbauflächen), gilt ein Grenzwert von 8 ng/kg TM WHO-TEQ für die Summe aus Dioxin und dl-PCB. Keine Ausbringung auf überschwemmten, wassergesättigten, gefrorenen oder schneebedeckten Flächen. Abstandregelungen zu Gewässern sind zu berücksichtigen (§ 5 Abs. 2 und 3 DüV).

Im Zeitraum von 3 Jahren dürfen auf derselben Fläche Klärschlämme nicht zusätzlich aufgebracht werden. Bei der Aufbringung auf Feldgemüse- und Feldfutterflächen oberflächlich einarbeiten. Bei der Erstanwendung der Komposte sind die Flächen durch den Bewirtschafter der zuständigen Behörde anzugeben (§ 9 Abs. 1 BioAbfV). Das BGK-Merkblatt "Dokumentations- und Meldepflichten des Landwirtes" (Dok. GS-010-1) enthält weitere Informationen<sup>5)</sup>.

1) Ermittelter Gehalt an verfügbarem Stickstoff, jedoch mindestens 3% von N-gesamt (DüV Anlage 3). 2) Bei Düngung für die gesamte Fruchtfolge (Grunddüngung) können die jährlichen Aufwandmengen für eine Bedarfsdeckung von 3 Jahren summiert werden. 3) Gemäß aktuellem Marktwert, ermittelt über äquivalente Kosten mineralischer Düngung nach mittleren Landhandelspreisen (Jan. - März 2020) ohne MwSt. ( 0,77 €/kg N-anrechenbar, 0,64 €/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 0,64 €/kg K<sub>2</sub>O, 0,07 €/kgCaO). 4) Der Wert von Humus-C beträgt 0,17 €/kg Humus-C (kalkuliert auf Basis eines Strohpreises von 72,50 Euro/t). 5) Abzurufen unter [www.kompost.de](http://www.kompost.de). 6) Anrechenbarer Stickstoff im Anwendungsjahr (N-löslich zzgl. 5% von N-organisch).



RAL-GZ 251

# Anwendung Landschaftsbau

Anlage LB zum PZ-Nr.: 5124-166296-1



## Fertigkompost (grobkörnig)

BGK-Nr.: 5124

**Tabelle 1: Gehalte an wertgebenden Inhaltsstoffen**

(Angaben in der Frischmasse)

Inhaltsstoff	%	kg/t	kg/m <sup>3</sup>
Stickstoff gesamt (N)	0,73	7,33	3,35
Stickstoff löslich (N)	0,00	0,01	0,00
Stickstoff anrechenbar (N) <sup>1)</sup>	0,04	0,37	0,17
Phosphat gesamt (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,23	2,26	1,03
Kaliumoxid (K <sub>2</sub> O)	0,48	4,82	2,20
Magnesiumoxid (MgO)	0,35	3,46	1,58
Bas. wirks. Bestandteile (CaO)	2,19	21,9	10,0
Organische Substanz	27,8	278	127
Humus-C	8,23	82,3	37,6

**Tabelle 2: Aufwandmengen für spezifische Anwendungen**

(für nährstoffarme Böden Gehaltsstufe A und B nach VDLUFA)

Anwendungszweck	Bindige Böden		Nichtbindige Böden	
	kg/m <sup>2</sup>	l/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	l/m <sup>2</sup>
<b>Baumaßnahmen, Neuanlagen</b>				
Strapazierrasen, Rekultivierung	21	45	21	45
Gebrauchsrasen, Rosenbeete	12	27	12	27
Gehölze, Stauden	8	18	8	18
Extensivbegrünung	4	8	4	8
<b>Unterhaltungspflege</b>				
Stauden, Zierrasen, Gehölze	2 - 10	4 - 23	2 - 10	4 - 23

Die Empfehlungen entsprechen den „Qualitätsanforderungen und Anwendungsempfehlungen für organische Mulchstoffe und Kompost im Landschaftsbau“ der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL) und berücksichtigen die Landschaftsbau-Fachnormen DIN 18915 bis 18919.

**Tabelle 3: Herstellung durchwurzelbarer Bodenschichten**

(nährstoffarmer Unterboden + Kompost)

Bodenart des Bodenaushubs	Zumischung von Kompost bis ... Vol.-%	Zumischung von Kompost in l/m <sup>2</sup> bei Schichtstärken von ...		
		10 cm	20 cm	30 cm
Sand	25 %	25	50	76
anlehmiger Sand bis lehmiger Sand	31 %	31	61	92
Stark lehmiger Sand bis Sandiger Ton	39 %	39	78	117
Lehm	47 %	47	94	141
Lehmiger Ton bis Ton	50 %	50	100	150

**Anwendungen im Garten- und Landschaftsbau**

Die Anwendung von Kompost im Garten- und Landschaftsbau erfolgt hauptsächlich zur

- Herstellung von Vegetationsflächen nach Baumaßnahmen oder bei Neuanlagen
- Pflege von Vegetationsflächen (Bodenabdeckung, Düngung, Humusversorgung)

Bei der Herstellung von Vegetationsflächen werden humusarme Roh- und Unterböden mit organischer Substanz angereichert, so dass sie als Vegetationstragschicht geeignet sind. Hierzu werden einmalig größere Mengen Kompost eingesetzt (Tabelle 2).

Bei der Unterhaltungspflege von Vegetationsflächen werden geringere Mengen an Kompost in Abständen von etwa 5 Jahren eingesetzt (Tabelle 2).

Darüber hinaus kann Kompost als Mischkomponente zur Herstellung von Substraten (für Dachbegrünung, Lärmschutzwände, Pflanzgefäße usw.) oder bei der technischen Herstellung von Oberböden (Erden) eingesetzt werden (Tabelle 3).

**Gute fachliche Praxis**

Die Aufwandmenge richtet sich nach dem Begrünungsziel und den Standortverhältnissen. Die Einarbeitungstiefe beträgt für bindige Böden nicht mehr als 10-20 cm, bei sandigen Böden nicht mehr als 30 cm. Bei Pflegemaßnahmen genügt oberflächliches Einharken.

**Hinweise**

Die Anwendung ist ganzjährig möglich.

Nicht in höheren Schichtdicken anwenden.

Bei Komposteinsatz > 5 l/m<sup>2</sup> nach Ansaat oder Pflanzung kräftig wässern. Gegebenenfalls ist eine zusätzliche N-Düngung erforderlich.

Bei Dach- und Baums substraten auf die Begrenzung organischer Anteile achten.

Phosphat und Kaliumoxid sind als Gesamtgehalte anzurechnen. Bei Stickstoff im Anwendungsjahr ist nur der anrechenbare Anteil, in den Folgejahren 20 bis maximal 40 % des Gesamtgehaltes anzurechnen.

Düngemittel-, wasserschutz- und bodenschutzrechtliche Bestimmungen sind zu beachten. Für die Anwendung nach guter fachlicher Praxis haftet der für die Maßnahme Verantwortliche.

1) Angenommener anrechenbarer Stickstoff bei erstmaliger Anwendung (N-löslich zzgl. 5% von N-organisch).



**Anlage 6:**

Verbrennungsverhalten Mikro-Holz-BHKW

Gefördert durch:



Gefördert durch den  
Innovationsfonds  
Klima- und Wasserschutz

**badenova**  
*Energie. Tag für Tag*

## EFGT Eichelbuck Verbrennungsverhalten

### 1. Einleitung

Um das Verhalten der Verbrennung im Bezug auf Stabilität und Verpuffung zu beurteilen, wurden viele Anfahrversuche beurteilt. Aufgrund dieser Untersuchung soll festgestellt werden, ob eine stabile Verbrennung möglich ist, wenn einmal die Zündtemperatur des Holzgases, vor allem Kohlendioxyd durchfahren ist.

### 2. Beurteilung einzelner Fahrversuche

- 12.10.2017    Höchste erreichte Flox-Temperatur: ca. 235°C  
Verbrennungsverhalten: stabil
- 16.10.2017    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 356°C  
Verbrennungsverhalten: stabil
- 17.10.2017    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 588°C  
Verhalten beim Hochfahren: von 253°C bis 345°C etwas unruhig  
Verhalten beim 2. Mal Hochfahren: von 331°C bis 485°C unruhig  
Verhalten beim Herunterfahren: stabil, wahrscheinlich kein Feuer mehr
- 18.10.2017    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 893°C  
Verhalten beim Hochfahren: stabil  
**Verhalten bei Flox-Betrieb: zuerst stabil dann mit weniger Flox-Sekundärluft instabil, leichter Überdruck von 1.4 mbar, Druckschwankungen bis 3.2 mbar**  
Verhalten beim Herunterfahren: stabil
- 23.10.2017    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 572°C  
Verhalten beim Hochfahren: stabil  
Verhalten beim Hochfahren von 417°C bis 478°C etwas unruhig  
Verhalten beim Herunterfahren: stabil, wahrscheinlich kein Feuer mehr
- 25.10.2017    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 572°C  
Verhalten beim Hochfahren: stabil, von 430°C bis 460°C unruhig
- 30.10.2017    Aufzeichnungen irrtümlicherweise gelöscht
- 02.11.2017    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 895°C  
Verhalten beim Hochfahren: bis 776°C stabil, etwas unruhig, dann Umschalten auf Flox  
**Verhalten im Flox-Betrieb: instabil, Überdruck von bis 1.5 mbar, Druckschwankungen von 3.6 mbar**

- 06.11.2017    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 879°C  
Verhalten bei Hochfahren: stabil bis 813°C dann Umschalten auf Flox-Betrieb  
**Überdruck von 16.9 mbar**  
**Druckschwankungen von bis 17.5 mbar**  
**Flox-Betrieb: teilweise stabil, teilweise sehr unstabil mit Verpuffung**
- 16.08.2018    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 412°C  
Druckauflösung im Trend klein, keine Aussage möglich
- 23.08.2018    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 571°C  
Druckauflösung im Trend klein, keine Aussage möglich
- 28.08.2018    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 595°C  
Verhalten beim Hochfahren: stabil  
Verhalten beim Herunterfahren: stabil
- 31.08.2018    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 716°C  
Verhalten beim Hochfahren: stabil  
Verhalten beim Herunterfahren: stabil
- 06.09.2018    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 820°C  
Verhalten beim Hochfahren: unruhig zwischen 402°C und 446°C  
Verhalten beim Hochfahren: unruhig zwischen 757°C und 750°C  
Verhalten beim Hochfahren: unruhig zwischen 775°C und 815°C
- 18.09.2018    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 663°C  
Verhalten beim Hochfahren: etwas unruhig von 250°C bis 380°C
- 20.09.2018    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 736 °C  
Verhalten beim Hochfahren: ab 463°C bis 663 °C etwas unruhig  
Verhalten beim Herunterfahren: stabil, wahrscheinlich kein Feuer mehr  
Verhalten beim 2. Mal Hochfahren: ab 533 °C bis 674 °C etwas unruhig  
Verhalten beim 2. Mal Herunterfahren: stabil, wahrscheinlich kein Feuer mehr  
Verhalten beim 3. Mal Hochfahren: ab 611°C bis 736 °C etwas unruhig  
Dann Einschalten der Flox-Sekundärluft: Verbrennung etwas ruhiger und  
ruhiges Herunterfahren
- 25.09.2018    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 974 °C  
Verhalten beim Hochfahren: ab 344°C bis 636 °C etwas unruhig  
Verhalten beim weiteren Hochfahren: ab 735 °C bis 922 °C etwas unruhig  
**Mit einem grösseren Ausschlag von 3.5 mbar bei 840 °C**  
Im Bereich von 866°C 974°C unruhiges Verhalten mit Druckschwankungen  
von 2.0 mbar und **Überdruck von 0.4 mbar im Flox-Kessel**  
Verhalten beim Herunterfahren: stabil, wahrscheinlich kein Feuer mehr

- 27.09.2018    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 617 °C  
Verhalten beim Hochfahren: ab 350°C bis 417°C etwas unruhig  
Mit etwas Flox-Sekundärluft weiteres Hochfahren: stabil  
Verhalten beim Herunterfahren: stabil, wahrscheinlich kein Feuer mehr  
Tiefster erreichter Vakuumwert: -3.3 mbar (4.1 – 0.8 mbar 0-Pt Korrektur) mit  
(vermutlich) geschlossener Primär- und Sekundärluftklappen
- 02.10.2018    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 1000.7°C  
Verhalten beim Hochfahren: stabil bis 736°C  
Verhalten im Betrieb: im Bereich 736°C bis 972°C etwas unruhig  
Im Bereich 972°C bis 1000.7°C stabil  
Verhalten beim Herunterfahren: stabil, wahrscheinlich kein Feuer mehr,  
Sekundärluftklappe Störung, Inbetriebnahme Flox-Sekundärluft  
Tiefster Vakuumwert: -2.1 mbar (3.1 – 1.0 mbar 0-Pt Korrektur)
- 11.10.2018    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 992°C  
Verhalten beim Hochfahren: ruhig, stabil bis 690°C  
Kurzes unruhiges Verhalten bei etwa 690 °C und 744°C  
Verhalten beim weiteren Hochfahren: unruhig bei 734°C bis 798°C wobei  
**kleine Verpuffung (ohne Überdruck) bei 767°C von 3.4 mbar**  
Unruhiges Verhalten beim Hochfahren von 935°C auf 948°C  
Unruhiges Verhalten im Bereich von **987°C und 992°C, kleiner Überdruck**
- 18.10.2018    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 594°C  
Verhalten beim Hochfahren: unruhig von 200°C bis 613°C  
Verhalten beim Herunterfahren: etwas unruhig  
**1. Verpuffung bei 406°C**  
**2. Verpuffung bei 416°C**  
**3. Verpuffung bei 412°C**  
**4. Verpuffung bei 402°C**  
**5. Verpuffung bei 400°C**  
**6. Verpuffung bei 384°C**  
**7. Verpuffung bei 424°C**  
**8. Verpuffung bei 418°C**  
**9. Verpuffung bei 403°C**  
**10. Verpuffung bei 402°C**  
Dann unruhiger Ausbrand bei 456°C bis 519°C
- 30.11.2018    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 470°C  
Verhalten beim Hochfahren: von 264°C bis 324°C unruhig  
Verhalten beim Hochfahren: von 403°C bis 464°C unruhig
- 03.12.2018    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 482°C  
Verhalten beim Hochfahren: von 263°C bis 330°C etwas unruhig  
Verhalten beim Hochfahren: von 390°C bis 480°C etwas unruhig  
Verhalten beim Herunterfahren: stabil, wahrscheinlich kein Feuer mehr

- 06.12.2018    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 539°C  
Verhalten beim Hochfahren: von 275°C bis 385°C etwas unruhig  
Nach Abschaltung Lopper-Steuerung wegen Motorschutz:  
**Beim Herunterfahren bei 294°C plötzlich völlig instabil, wieder sehr schneller Anstieg der Temperatur auf 532°C und mehrere Verpuffungen mit Überdruck, grösster Überdruck: 14.0 mbar bei 477°C. Kurze Abkühlung instabil, dann wieder Erhitzung von 380°C auf 539°C sehr instabil mit teilweisem Überdruck bis 0.6 mbar. Verbrennung ausser Kontrolle.**
- 12.12.2018    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 178°C  
Stabile Verbrennung
- 17.12.2018    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 301°C  
Verhalten beim Hochfahren: von 270°C bis 286°C etwas unruhig  
Verhalten beim Herunterfahren: stabil, wahrscheinlich kein Feuer mehr
- 19.12.2018    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 431°C  
Verhalten beim Hochfahren: von 210°C bis 287°C unruhig  
Verhalten beim Hochfahren: von 340°C bis 419°C etwas unruhig  
Verhalten beim Herunterfahren: stabil, wahrscheinlich kein Feuer mehr
- 18.01.2019    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 385°C  
Verhalten beim Hochfahren und Herunterfahren: stabil
- 24.01.2019    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 412°C  
Verhalten beim Hochfahren: von 180°C bis 264°C etwas unruhig  
Verhalten beim Hochfahren: von 261°C bis 334°C sehr unruhig, instabil
- 29.01.2019    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 449°C  
Verhalten beim Hochfahren: von 279°C bis 434°C unruhig
- 01.02.2019    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 332°  
Verhalten beim Hochfahren: stabil
- 12.02.2019    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 490°C  
Verhalten beim Hochfahren: stabil  
Bei 452°C plötzlicher Unterdruck von -2.3 mbar auf -4.9 mbar (keine Erklärung)
- 14.02.2019    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 413°C  
Verhalten beim Hochfahren: von 345°C bis 413°C unruhig
- 19.02.2019    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 556°C  
Verhalten beim Hochfahren: von 410°C bis 556°C etwas unruhig
- 21.02.2019    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 501°C  
Verhalten beim Hochfahren: stabil

- 27.02.2018    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 516°C  
Verhalten beim Hochfahren: von 455°C bis 474°C etwas unruhig
- 05.03.2019    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 614°C  
Verhalten beim Hochfahren: von 450°C bis 519°C etwas unruhig
- 07.03.2019    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 533°C  
Verhalten beim Hochfahren: von 487°C bis 522°C etwas unruhig
- 12.03.2019    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 625°C  
Verhalten beim Hochfahren: von 546°C bis 563°C instabil  
**Verpuffung bei 549°C, Überdruck von 1.1 mbar, Druckschwankung von 5.7 mbar, dann unruhige Verbrennung**
- 14.03.2019    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 554°C  
Verhalten beim Hochfahren: von 362°C bis 518°C unruhig  
**Kleine Verpuffung bei 502°C, Druckschwankung 2.0 mbar**
- 26.03.2019    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 459°C  
Verhalten beim Hochfahren: von 178°C bis 432°C etwas unruhig
- 28.03.2019    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 458°C  
Verhalten beim Hochfahren: stabil
- 02.04.2019    Höchste erreichte Flox-Temperatur: 561°C  
Verhalten beim Hochfahren: stabil bis 478°C  
**Dann Verpuffung mit 2.4 mbar Überdruck und 4.1 mbar Druckschwankung**  
**Dann sehr unruhige Verbrennung, evtl. viele kleine Verpuffungen mit kleinem Überdruck und Druckschwankungen von 2.0 mbar**  
**Beim Herunterfahren bei tiefer Temperatur von unter 100°C Druckschwankungen von ca. 1 mbar**

### **3. Diskussion, Resultate**

#### 3.1 Allgemeines

Die Beurteilung der vielen Fahrversuche ist nicht einfach, da sich die Anlage bei vergleichbaren Fahrversuchen unterschiedlich verhalten hat. Die Versuche und damit das Verhalten der Feuerung sind nicht reproduzierbar.

#### 3.2 Unterer Temperaturbereich

Die Zündtemperatur von Kohlendioxid beträgt 605°C. Durch die Pyrolyse und Vergasung von Holz in der Primärbrennkammer entstehen verschiedene andere Gase (Holzgase). Diese verbrennen schon bei niedrigeren Temperaturen. Bei vielen Versuchen zeigt sich beim Hochfahren, dass diese Gase im Bereich von etwa 250 bis 460°C zünden und mit der Sekundärluft verbrennen. Diese Verbrennung ergibt kleinere Druckschwankungen.

Am 18.10.2018 erfolgten mehrer Verpuffungen.

Am 06.12.2018 erfolgten mehrer grössere Verpuffungen.

Am 12.03.2019 erfolgte eine kleine Verpuffung

Am 14.03.2019 erfolgte eine kleine Verpuffung

Am 02.04.2019 erfolgt eine Verpuffung mit Überdruck

#### 3.3 Oberer Temperaturbereich (kein Flox-Betrieb)

Instabiles Verhalten mit Überdruck am 25.09.2018 (kleine Verpuffung)

Instabiles Verhalten mit Überdruck am 11.10.2018 (kleine Verpuffung)

#### 3.4 Oberer Temperaturbereich (Flox-Betrieb)

Instabiles Verhalten mit Überdruck am 18.10.2017 (kleine Verpuffung)

Am 06.11.2017 Instabiles Verhalten und Verpuffung.

#### 3.5 Zusammenfassung

Es treten in allen Temperaturbereichen Verpuffungen auf, ebenso im Flox-Betrieb.

01.05.2019/Sur



**Anlage 7:**

Zertifikat Pflanzenkohle

Gefördert durch:



Gefördert durch den  
Innovationsfonds  
Klima- und Wasserschutz

**badenova**  
*Energie. Tag für Tag*

Nummer des Zertifikates: BINT-5424

**Abfallwirtschaft und Stadtreinigung  
Freiburg GmbH  
Hermann-Mitsch-Strasse 26  
79108 Freiburg  
Deutschland**

Betriebsnummer: 70746

Die Produkte und Tätigkeiten des genannten Unternehmens sind nach folgenden Standards zertifiziert:



**European Biochar Certificate**

**Haupttätigkeiten:** Aufbereitung, Handel

Die Zertifizierungsdetails der Produkte und Tätigkeiten sind unter [www.EASY-CERT.com/CH/70746](http://www.EASY-CERT.com/CH/70746) aufgelistet.

**Gültig bis:**

**31.12.2020**

Frick, den 22.01.2020

Peter Jossen  
Präsident des Verwaltungsrates

Ueli Steiner  
Geschäftsführer

Dieses Zertifikat Nr. BINT-5424 bleibt gültig bis zur Ausstellung eines neuen Zertifikates, längstens bis 31.12.2020. Vorbehalten bleibt ein Widerruf durch q.inspecta. Änderungen werden strafrechtlich geahndet.



**EASY-CERT**

**q.inspecta GmbH**  
Ackerstrasse  
CH-5070 Frick  
Tel. +41 (0)62 865 63 00  
[www.q-inspecta.ch](http://www.q-inspecta.ch)

# Produkteliste

Stand vom 13.10.2020

**Abfallwirtschaft und Stadtreinigung**  
**Hermann-Mitsch-Strasse 26**  
**79108 Freiburg**  
**DE**

ID-Nummer: **70746**

**Diese Produkteliste ist nur gültig zusammen mit einem gültigen, von EASY-CERT heruntergeladenen Zertifikat.** Produkte, die nach dieser Produkteliste registriert wurden, sind nachstehend nicht aufgeführt. Sie werden nach deren Zertifizierung unter [www.EASY-CERT.com/CH/70746](http://www.EASY-CERT.com/CH/70746) publiziert.

## Produkte

<i>Produkte</i>	<i>Tätigkeiten</i>	<i>Standards</i>	<i>Status</i>	<i>gültig bis</i>
<b>Chargen ID 2018-11 (Futterkohle) - premium - Produktionszeitraum: 3.12.2018 - 23.11.2019</b>	Aufbereitung, Handel	European Biochar Certificate – für die Produktion von Pflanzenkohle	Anerkannt	31.12.2020
<b>Chargen ID 2018-11 (Holzkohle) - premium - Produktionszeitraum: 3.12.2018 - 23.11.2019</b>	Aufbereitung, Handel	European Biochar Certificate – für die Produktion von Pflanzenkohle	Anerkannt	31.12.2020
<b>Chargen ID 2019-11 (Holzkohle) - premium - Produktionszeitraum: 25.11.2019 - 24.11.2020</b>	Aufbereitung, Handel	European Biochar Certificate – für die Produktion von Pflanzenkohle	Anerkannt	31.12.2020



**EASY-CERT**

EASY-CERT Schweiz  
CH-5070 Frick  
+41 (0)62 865 63 00

info@easy-cert.com

EASY-CERT Österreich  
AT-2202 Enzersfeld bei Wien  
+43 (0) 2262 67 22 12

info@easy-cert.com



**Anlage 8:**

Bericht Einsatz Pflanzenkohle in Vergärung

Gefördert durch:



Gefördert durch den  
Innovationsfonds  
Klima- und Wasserschutz

**badenova**  
*Energie. Tag für Tag*

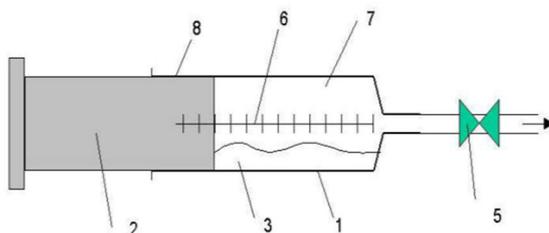
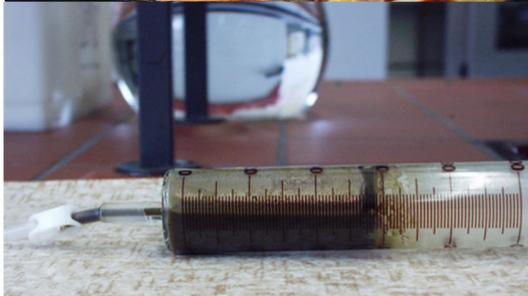
UNIVERSITÄT HOHENHEIM



Landesanstalt für Agrartechnik  
und Bioenergie



## Untersuchung zum Einsatz von Pyrolysekohle als Additiv zum Biogasprozess - Auswirkung bei der Vergärung von Speiseresten



# **Untersuchung zum Einsatz von Pyrolysekohle als Additiv zum Biogasprozess - Auswirkung bei der Vergärung von Speiseresten**

Das Projekt wurde im Auftrag der Abfallwirtschaft und Stadtreinigung Freiburg GmbH, vertreten durch Hr. Dipl. Geologe Matthias Ebel durchgeführt.

An dieser Stelle gilt unser herzlicher Dank der Stadt Freiburg für die Finanzierung und Unterstützung dieser kleinen Untersuchung.

Mai 2019

Projektleitung: Dr. Hans Oechsner

Projektbearbeitung: Benedikt Hülsemann und Saliha Ezghi Küver

---

## 1 MATERIAL UND METHODE

Von der Abfallwirtschaft und Stadtreinigung Freiburg GmbH wurden uns zwei verschiedene Substrate zur Vergärung zur Verfügung gestellt:

Das hauptsächliche Gärsubstrat waren Speisereste. Das eigentliche Testsubstrat in dieser Untersuchung war allerdings eine Pyrolysekohle, die aus Biomüll der Stadt Freiburg hergestellt wurde.

Diese Pyrolysekohle sollte in verschiedenen Konzentrationen dem Biogasprozess zugesetzt werden, um zu überprüfen, ob die Zugabe dieses Additives eine Auswirkung auf den Verlauf der Biogasbildung ausübt bzw. einen Einfluss auf die Höhe des Biogasertrages hat.

Nach Ankunft in Hohenheim wurden die Proben sofort weiterverarbeitet. Hierzu mussten die gelieferten Speisereste zerkleinert und homogenisiert werden, um für alle Versuchsvarianten das identische Ausgangsmaterial zur Verfügung zu haben. Die Zerkleinerung der feuchten Proben erfolgte mit einem Thermomix-Gerät. Das Substrat wurde gekühlt.

Die Pyrolysekohle ist relativ inhomogen. Daher wurde vor Versuchsbeginn vereinbart, die Kohle zu trocknen und mit einer Schneidmühle auf eine Größe von 1 mm zu zerkleinern. Diese Zerkleinerung war von entscheidender Bedeutung, da es ansonsten nicht möglich gewesen wäre, die sehr kleinen Additivmengen im gewünschten Verhältnis zu dosieren.

Die Dosierung der Pyrolysekohle basiert auf der zugegebenen Menge an Testsubstrat. Dazu werden folgende Konzentrationen aus Pyrolysekohle und Testsubstrat hergestellt und entsprechende Versuchsvarianten bestimmt:

- Inokulum (ohne weitere Zugabe)
- Inokulum (1% Pyrolysekohle)
- Kontrolle (0% Pyrolysekohle)
- 0,1 % PK (w/w)
- 0,5 % PK (w/w)
- 1 % PK (w/w)
- 3 % PK (w/w)

Als zusätzliche Kontrollvarianten werden die Standardsubstrate Rinderkrafffutter und Wiesenheu in einigen Fermentern vergoren, um die Qualität des Inokulums und damit die Ergebnisse der gesamten Untersuchung sicherzustellen.

Die Substrate wurden entsprechend der Vereinbarung im Hohenheimer Biogasertragstest in je 3 Wiederholungen vergoren. Wie in der VDI-Richtlinie 4630 beschrieben, wird das Testsubstrat einer Inokulumvorlage zugesetzt. Das Verhältnis der oTS-Menge des Inokulums zur oTS-Menge des Futtersubstrates beträgt beim Versuchsansatz  $\geq 2$ .

Es wird beim Testsubstrat der Gehalt an Trockensubstanz, der Glühverlust, und der Methanertrag bei mesophiler Vergärung über mindestens 35 Tage Gärdauer untersucht.

## **2 Untersuchungsmethoden und Ergebnisse:**

### **1. Bestimmung des Trockensubstanzgehaltes (TS) und des Gehaltes an organischer Trockensubstanz (oTS)**

Die zerkleinerten Proben wurden in Schmelztiegel eingewogen und nach VdLUFA bei einer Temperatur von  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

Die anschließende Veraschung erfolgte bei einer Temperatur von  $550 \pm 10^\circ\text{C}$ .

Je Probe wurden 3 Wiederholungen analysiert.

Der Trockensubstanzgehalt der als Futtersubstrat eingesetzten Speisereste lag bei 14,33 %, der organische Trockensubstanzgehalt lag bei 12,99 %.

Der TS-Gehalt des verwendeten Inokulums lag bei 4,7 %, der oTS-Gehalt bei 2,86 %.

### **2 Messung des Methanertragspotenzials der Substratproben**

Für die Bestimmung des Methanertragspotenzials wird nach der VDI-Richtlinie 4630 bzw. nach der VdLUFA-Methodenvorschrift zur Methanertragsbestimmung vorgegangen. Hierzu wurde das wie beschrieben zerkleinerte Gärsubstrat einem Inokulum zugesetzt und bei einer mesophilen Gärtemperatur von  $38 \pm 1^\circ\text{C}$  über eine Gärdauer von 35 Tagen vergoren. Die Gärtemperatur wurde nach Absprache gewählt,

da die geplante Anaerobanlage im Praxismaßstab häufig bei dieser Temperatur betrieben werden. Die Zugabe des gepflegten Inokulums stellte sicher, dass der Gärvorgang einsetzt und stabil ohne Störung des Prozessablaufs verläuft. Wesentlich dabei ist die Pufferkapazität des Inokulums, welche eine wesentliche Veränderung des pH-Wertes im Substrat verhindert. Damit kann davon ausgegangen werden, dass der ermittelte Methanertrag mit den in der Praxis erzielbaren Werten übereinstimmt.

Es wurde das System des Hohenheimer Biogasertragstests (HBT) eingesetzt. Dieses ist in Abb. 1 zu sehen. Jede Substratprobe wurde in 3 Wiederholungen angesetzt. Zur Absicherung der Ergebnisse wurden 2 Standardsubstrate in extra Fermentern mitvergoren, um die Aktivität des Inokulums zu überprüfen.

Vor jeder Entnahme von Biogas aus dem System wurde die gebildete Biogasmenge abgelesen und danach dessen Methangehalt mithilfe eines vor jeder Messung kalibrierten Infrarotsensors bestimmt. Die ermittelten Biogas- und Methanwerte werden auf Normbedingungen (273 K, 1013 hPa) umgerechnet und auf trockenes Gas bezogen.

Aus der Ablesung des Methanvolumens ergibt sich über die Messdauer eine Summenkurve. Das Beispiel einer Summenkurve eines Substrates ist in Abb. 2 dargestellt.

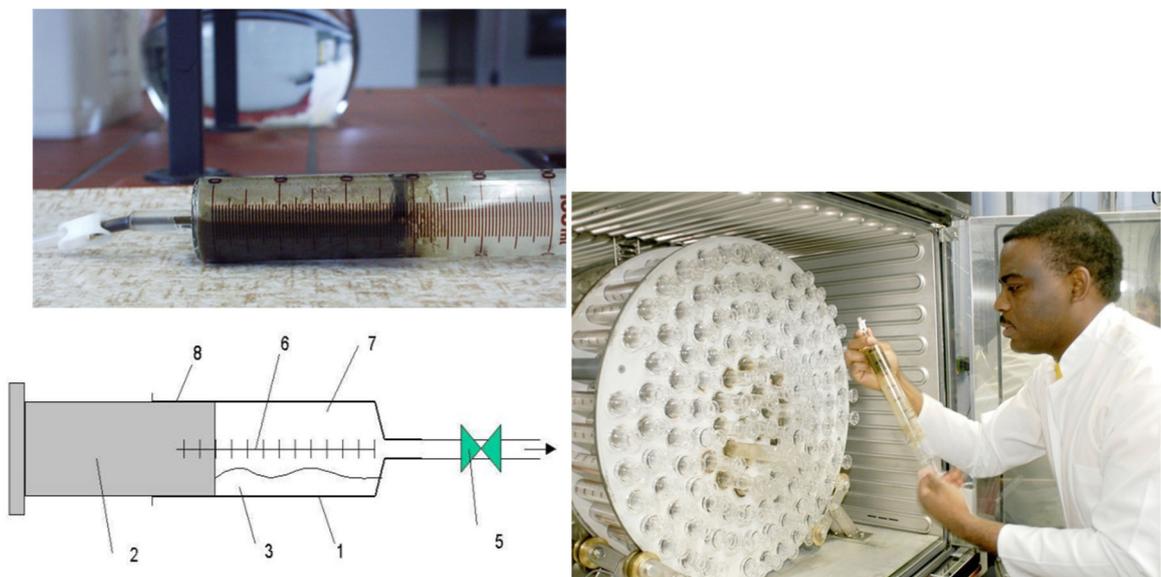


Abb. 1: Methanertragstest HBT zur Bestimmung des Methanertrages aus Substratproben nach VDI-Richtlinie 4630

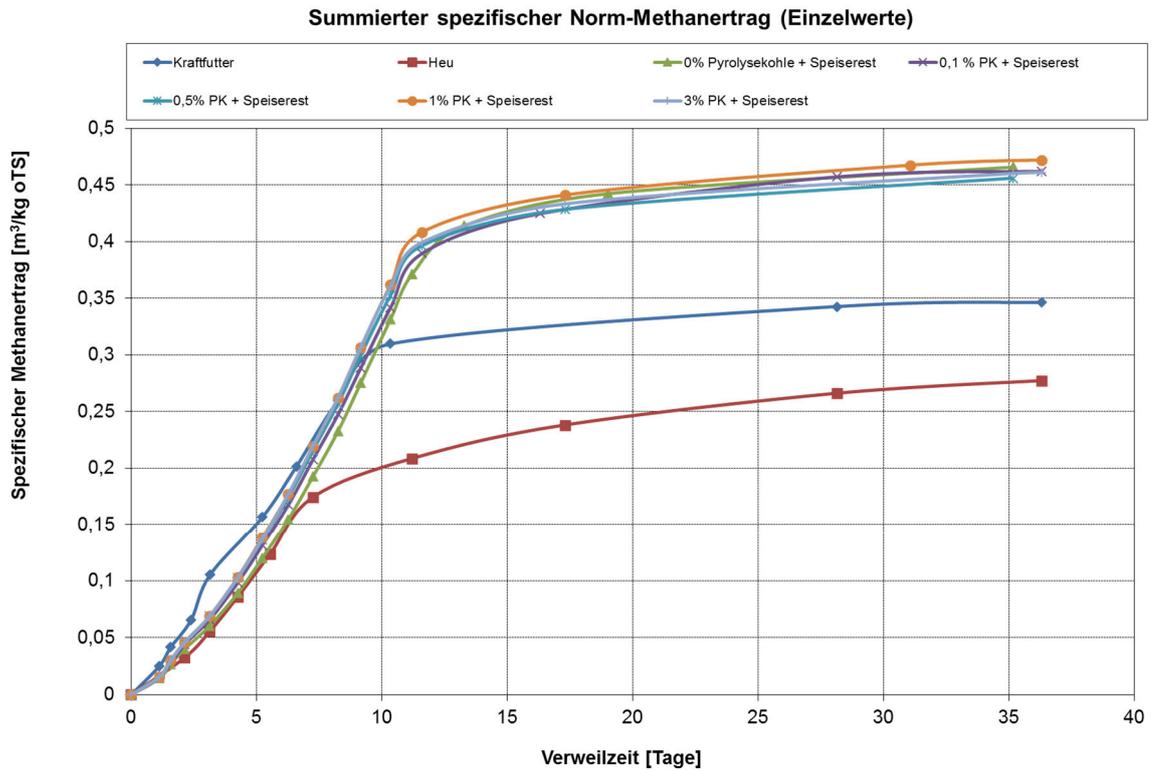


Abb. 2: Summenkurve des spezifischen Norm-Methanertrages aus zerkleinerten Speiseresten der Stadt Freiburg, gemischt mit geringen Additivmengen aus Pyrolysekohle. Mesophile Gärtemperatur von 38°C über die Gärdauer von 35 Tagen, dargestellt in m<sup>3</sup> Methan pro kg oTS (273 K, 1013 hPa). Dargestellt sind die Mittelwerte aus jeweils 3 Wiederholungen.

Tab. 1: Spezifische Norm-Methanerträge aus den verschiedenen Versuchsvarianten bei Einsatz von Pyrolysekohle als Additiv zu Speiseresten in Batch-Vergärung; Gärdauer 35 Tage, dargestellt in m<sup>3</sup> Methan pro kg oTS bei (273 K, 1013 hPa)

Schrank Nummer	Kolben Nummer	Probenbezeichnung	Methangehalt korrigiert [% Volumen]	Spezifischer Gasertrag [Nm <sup>3</sup> /kg oTS]	Spezifischer Methanertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS]	Mittelwert Spezifischer Methanertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg oTS]	VK Spezifischer Methanertrag [%]
2	1	Impfgülle	66	0,019	0,012	0,012	5,5
2	2	Impfgülle	64	0,018	0,011		
2	3	Impfgülle	62	0,018	0,011		
2	4	Krafftutter	59	0,583	0,343	0,346	1,4
2	5	Krafftutter	59	0,600	0,352		
2	6	Krafftutter	59	0,582	0,345		
2	7	Heu	61	0,444	0,269	0,277	3,0
2	8	Heu	60	0,474	0,286		
2	9	Heu	60	0,459	0,277		
2	10	Inokulum 1% Pyrolysekohle	57	0,019	0,011	0,010	8,0
2	11	Inokulum 1% Pyrolysekohle	54	0,019	0,010		
2	12	Inokulum 1% Pyrolysekohle	54	0,017	0,009		
2	13	0% Pyrolysekohle + Speiserest	64	0,694	0,447	0,466	5,3
2	14	0% Pyrolysekohle + Speiserest	66	0,752	0,494		
2	15	0% Pyrolysekohle + Speiserest	65	0,702	0,457		
2	16	0,1 % PK + Speiserest	65	0,738	0,477	0,462	4,0
2	17	0,1 % PK + Speiserest	66	0,673	0,442		
2	18	0,1 % PK + Speiserest	66	0,708	0,467		
2	19	0,5% PK + Speiserest	66	0,669	0,444	0,456	3,0
2	20	0,5% PK + Speiserest	66	0,713	0,470		
2	21	0,5% PK + Speiserest	66	0,686	0,453		
2	22	1% PK + Speiserest	65	0,739	0,482	0,472	2,0
2	23	1% PK + Speiserest	66	0,706	0,464		
2	24	1% PK + Speiserest	66	0,712	0,470		
2	25	3% PK + Speiserest	66	0,679	0,445	0,461	3,6
2	26	3% PK + Speiserest	65	0,709	0,460		
2	27	3% PK + Speiserest	65	0,730	0,478		

Die Versuche liefen stabil ohne Störung der Fermenterbiologie. Die mitgeführten Standardsubstrate Heu und Krafftutter belegten dies.

Bei der Vergärung des Inokulums wurde ein spezifischer Methanertrag von 0,012 Nm<sup>3</sup> Methan/kg oTS erzielt.

Das Inokulum wurde zusätzlich mit einer Aktivkohlezugabe von 1 % Pyrolysekohle gefahren, um zu überprüfen, ob ggfs. die zugegebene Kohle ein eigenes Biogaspotenzial mitliefert. Dies wurde für die geringen Zugabemengen nicht bestätigt.

Die Kontrollvariante von Speiserest ohne Zugabe von Pyrolyse lieferte einen sehr guten Methanertrag von **0,466 Nm<sup>3</sup> Methan/ kg oTS**.

Die Zugabe der Pyrolysekohle in einen Zugabeverhältnis von 0,1 % PK zu Speiseresten; 0,5 % PK zu Speiseresten; 1 % PK bzw. 3 % PK zu Speiseresten ergab Methanerträge **0,462, 0,456, 0,472 und 0,461 Nm<sup>3</sup> Methan/ kg oTS**. Diese Werte liegen im selben Bereich wie die der Speisereste ohne Zugabe der Additive.

---

Es konnte bei diesen sehr systematischen Versuchen unter gut abgestimmten und kontrollierten Bedingungen kein signifikanter Einfluss der Pyrolysekohle gefunden werden. Das heißt, die Pyrolyse übte bei der Vergärung der Speisereste weder einen positiven Effekt auf die Biogasbildung aus noch hatte eine Hemmung oder Bremsung der Biogasbildung zur Folge. Dies wird auch durch die Darstellung der Methanbildungskurven in Abb. 2 belegt.

#### **4. Zusammenfassung**

Im Auftrag der Abfallwirtschaft und Stadtreinigung Freiburg GmbH und nach detaillierter Abstimmung wurde in einem systematischen Batch-Biogasversuch untersucht, ob die Zugabe von Pyrolysekohle einen Einfluss auf die Methanbildung im Biogasprozess ausübt.

Es wurden in den Versuchen das Basissubstrat Speisereste mit unterschiedlichen Mengen an Pyrolysekohle im Hohenheimer Biogasertragstest nach VDI-Richtlinie 4630 mit je 3 Wiederholungen je Variante vergoren. Es wurden die Zugabeverhältnisse von 0,1 % Pyrolysekohle zu Speiseresten; 0,5 % PK zu Speiseresten; 1 % PK bzw. 3 % PK zu Speiseresten (jeweils frischmassebezogen) untersucht. Hinzu kamen noch einige Kontrollvarianten.

Bei der Vergärung der Speisereste ergab sich ein sehr guter Verlauf der Gasbildungskurven und es wurde ein Methanertrag von 0,466 Nm<sup>3</sup> Methan/ kg oTS erzielt. Weder der Methanertrag noch der Verlauf der Biogasbildungskurven wurde durch die Additivzugabe verringert noch erhöht, Dies belegt, dass die Zugabe der Pyrolysekohle in den untersuchten Zugabemengen keinen messbaren Effekt auf die Biogasbildung ausübt.



**Anlage 9:**

Probenahmeprotokoll Kompost

Gefördert durch:



Gefördert durch den  
Innovationsfonds  
Klima- und Wasserschutz

**badenova**  
*Energie. Tag für Tag*

**Probenahme Kompostversuch ASF Frühjahr/Sommer 2020**

Es werden **von beiden Mieten** Proben entnommen (mit Pflanzenkohle / Kontrolle ohne Pflanzenkohle). Zwischen den beiden Probenahmen sollte nicht mehr als zwei, u.U. drei Tage liegen.

Falls der Kompost mit Pflanzenkohle noch nicht zerkleinert werden soll, sind auch Proben von der Kontrollmiete unzerkleinert zu entnehmen.

Die Proben müssen zwingend in Gewebe-Säcken gelagert werden, damit weiterhin Luft an den Kompost kommt. Diese sind auf den Herrn Burger zur Lieferung in die Hermann-Mitsch-Str. 26 bestellt und sollten dort am Dienstag eintreffen.

**Vorgehen:**

- Beim Umsetzen/Zerkleinern des Komposts wird nach jeder 10. Radlader-Schaufel eine Teilprobe entnommen (rechnerisch:  $300 \text{ m}^3$  Kompost,  $3 \text{ m}^3$  je Radlader-Schaufel = 100 Radlader-Schaufeln/Fahrten => 10 Teilproben)
- Dazu jeweils zwei Schaufeln (Hand-Schaufeln) Kompost in die zu Verfügung gestellten Gewebe-Säcke abgefüllt (max. 10 Säcke je Miete)
- Die Säcke werden doppelt beschriftet:
  - o Einen Zettel **in** jeden Sack legen: „mit Kohle“ bzw. „ohne“
  - o Den Sack außen mit einem Edding o.ä. beschriften „mit Kohle“ bzw. „ohne“

Die Säcke bitte geschützt (keine direkte Sonneneinstrahlung, kein Regen oder stehende Nässe) lagern. Ithaka holt das Material für die weiteren Analysen ab (voraussichtlich am 03. August)

Für Rückfragen: Nikolas Hagemann, 0177 17 48 598



**Anlage 10:**

Gutachten Anlagenmodifikation Mikro-Holz-BHKW

Gefördert durch:



Gefördert durch den  
Innovationsfonds  
Klima- und Wasserschutz

**badenova**  
*Energie. Tag für Tag*

**Gutachterliche Beurteilung des überarbeiteten Anlagenkonzepts  
des Mikro-Holz-BHKW mit extern befeuerter Heißluftturbine  
(EFGT-Anlage Eichelbuck)**

**erstellt für:**

**ASF Abfallwirtschaft und Stadtreinigung Freiburg GmbH  
Hermann-Mitsch-Str. 26  
79108 Freiburg**

**erstellt von:**

**Prof. Dr. Günter Scheffknecht**

**30. November 2019**

## 0. Inhaltsverzeichnis

0.	Inhaltsverzeichnis .....	2
1.	Einleitung und Aufgabenstellung .....	3
2.	Energiebilanz.....	3
3.	Geplante Anlagenmodifikationen.....	4
4.	Zusammenfassung .....	5
5.	Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen .....	5
6.	Anlagen zum Gutachten .....	5
7.	Literatur .....	5

## 1. Einleitung und Aufgabenstellung

Die Abfallwirtschaft und Stadtreinigung Freiburg GmbH (ASF) hat bei der Firma MPT, Micropower Technology GmbH, Würenlos, Schweiz, (MPT) ein Mikro-Holz-BHKW bestellt. Die Anlage wurde am Standort Deponie Eichelbuck errichtet und die Inbetriebnahme der Anlage erfolgte ab Oktober 2017.

Herzstück des BHKW ist eine extern befeuerte Mikrogasturbine. Die komprimierte Luft wird zunächst im Rekuperator weiter aufgewärmt um anschließend in einem Hochtemperaturwärmeübertrager auf Turbineneintrittstemperatur erhitzt zu werden. Nach Expansion in der Turbine wird die Abgaswärme in einem Thermoöl-Wärmeübertrager genutzt.

Hackgut wird in einer Primärbrennkammer mit Luft vergast. Das erzeugte Produktgas wird in einer FLOX-Brennkammer verbrannt, in der auch der Hochtemperaturwärmeübertrager angeordnet ist. In dieser FLOX-Brennkammer sind mehrfach Verpuffungen während des Anfahrens aufgetreten.

Die ASF hat den Unterzeichner am 19. November 2019 mit der Erstellung dieses Gutachtens beauftragt. Zweck des Gutachtens ist eine Aussage zur Leistung und zum Wirkungsgrad der Anlage sowie eine Beurteilung der geplanten Anlagenmodifikationen zur Verhinderung von weiteren Verpuffungen.

## 2. Energiebilanz

Die Beurteilung hinsichtlich Leistung und Wirkungsgrad erfolgt auf Basis des übergebenen Wärmeschaltbildes (vgl. Anlage 1). Dieses Wärmeschaltbild wurde von mir hinsichtlich der Massen- und Energiebilanzen nachgerechnet und konnte im Rahmen der erzielbaren Genauigkeit bestätigt werden. Dies gilt gleichermaßen für die Netto-Leistung, die Nutzwärme und die Wirkungs- bzw. Nutzungsgrade. Den Kompressor- und Turbinenwirkungsgrad habe ich an Hand vergleichbarer Anlagen geprüft.

Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Leistungswerte gemäß Wärmeschaltbild im Dauerbetrieb erreicht werden.

### 3. Geplante Anlagenmodifikationen

Wie bereits erwähnt ist es im Anfahrbetrieb vereinzelt zu Verpuffungen gekommen. In sichere Verbrennung in der FLOX-Brennkammer ist gewährleistet, wenn die Temperatur in der Brennkammer mehr als 750 °C beträgt. Diese Temperaturgrenze ergibt sich beispielsweise aus [1]. Brennbare Gasbestandteile im Produktgas sind in erster Linie Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Methan. Die Zündtemperaturen dieser Gaskomponenten liegen zwischen 560 und 610 °C, also deutlich unterhalb der 750 °C. Höhere Kohlenwasserstoffe, die ebenfalls Bestandteil des Produktgases sein können, weisen Zündtemperaturen von 470 °C und weniger auf. Bei Einhaltung der unteren Temperaturgrenze von 750 °C ist somit eine sichere und stabile Verbrennung gewährleistet.

Im Dauerbetrieb kann durch die alleinige Verbrennung des Produktgases diese Temperaturgrenze eingehalten werden. Während des Anfahrens ist dies allerdings nicht gewährleistet. Um auch dabei die Einhaltung der unteren Temperaturgrenze von 750 °C sicherzustellen, wurde von MPT die Installation eines zusätzlichen, mit Propan gefeuerten Brenners (Stützbrenners) zwischen dem Vergaser (Primärbrennkammer) und der FLOX-Brennkammer (Sekundärbrennkammer) vorgeschlagen (vgl. Überarbeitetes Anlagenkonzept vom 29.10.2019, Anlage 2).

Neben der Installation des zusätzlichen Brenners wurde die Installation je eines zusätzlichen Saugzug- und Frischluftgebläses vorgeschlagen. Beide Aggregate sollen mit einer unterbrechungslosen Stromversorgung versorgt werden. Dadurch ist auch im Falle eines Stromausfalls gesichert, dass brennbare Gase aus der Primärbrennkammer sicher abgeführt werden können.

Der zusätzliche Brenner heizt zunächst die FLOX-Brennkammer sicher auf mindestens 750 °C auf. Erst nachdem diese Bedingungen vorliegen, wird der Vergaser (Primärbrennkammer) in Betrieb genommen und das dann erzeugte Produktgas wird in der vorgeheizten FLOX-Brennkammer sicher gezündet. Mit Erhöhung der Brennstoffzufuhr zur Primärbrennkammer wird die Leistung des Stützbrenners reduziert, bis er schließlich ohne Unterschreitung der Mindesttemperatur von 750 °C ausgeschaltet werden kann. Das Einhalten der Mindesttemperatur ist dabei in geeigneter Form zu überwachen. Beim Abfahren ist sinngemäß vorzuziehen.

Ferner wurde von MPT die Installation eines zusätzlichen Saugzug- und eines zusätzlichen Frischluftgebläses, die beide unterbrechungsfrei mit elektrischer Energie versorgt werden, vorgeschlagen. Damit kann im Falle eines Stromausfalls der sichere Abzug und das Ausbrennen des Produktgases sichergestellt werden.

#### **4. Zusammenfassung**

Die Energiebilanz der Anlage wurde anhand des Wärmeschaltbilds überprüft und kann bestätigt werden. Ferner kann bestätigt werden, dass die vorgesehenen Anlagenmodifikationen einen sicheren Dauerbetrieb, aber insbesondere auch einen sicheren Anfahr- und Abfahrbetrieb ermöglichen werden. Darüber hinaus sind Maßnahmen zur Beherrschung eines Stromausfalls geplant, so dass auch dieser Störfall abgesichert werden kann.

#### **5. Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen**

In diesem Gutachten wurden die folgenden Abkürzungen verwendet:

BHKW	Blockheizkraftwerk
EFGT	Externally Fired Gas Turbine (indirekt gefeuerte Gasturbine)
FLOX	Flammenlose Oxidation

#### **6. Anlagen zum Gutachten**

Ein Wärmeschaltbild sowie die Ausführungen zum überarbeiteten Anlagenkonzept sind dem Gutachten beigelegt und sind Bestandteil dieses Gutachtens.

#### **7. Literatur**

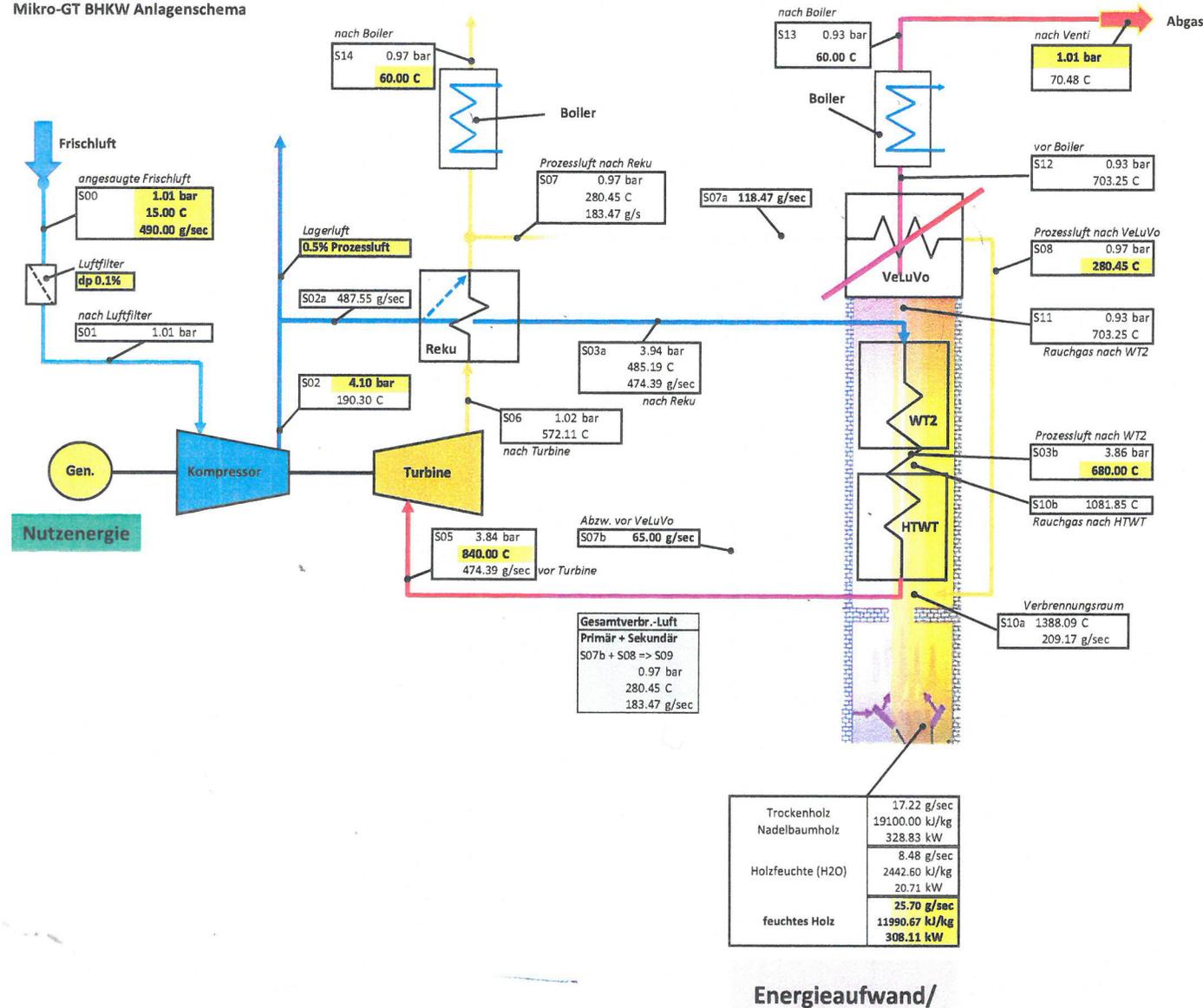
- [1] EN 746-2 Industrielle Thermoprozessanlagen – Teil 2: Sicherheitsanforderungen an Feuerungen und Brennstoffführungssysteme, Europäische Norm, Mai 2010

Waiblingen, den 30. November 2019



Prof. Dr. Günter Scheffknecht

Mikro-GT BHKW Anlagenschema



Wichtige Daten	
<i>elektrisch</i>	
Netto-Leistung	50.43 kW
el. Wirkungsgrad	16.37 %
<i>thermisch</i>	
Nutzwärme	225.84 kW
th. Wirkungsgrad	73.30 %
<i>Gesamt</i>	
Nutzungsgrad	89.66 %

Leistung und Wirkungsgrad		
Generatorverluste	5.2 kW	9.0 %
Kompressor	87.4 kW	80.0 %
Turbine	145.3 kW	85.0 %
Rekuperator	148.3 kW	76.5 %
VeLuVo	0.0 kW	79.3 %
HTWT	87.6 kW	44.5 %
WT2	103.3 kW	64.8 %
Ventilator	2.4 kW	70.0 %

Druckverluste		
	relativ	absolut
Luftfilter	0.1 %	1.0 mbar
Rekuperatur	kalt 4.0 % heiss 5.0 %	164.0 mbar
VeLuVo	kalt 0.0 % heiss 0.0 %	0.0 mbar
HTWT	kalt 5.0 % heiss 0.0 %	192.9 mbar
WT2	kalt 2.0 % heiss 4.0 %	78.7 mbar

Vergrößerung der Wärmetauscher

Wärmebilanz 2

**Gesamtnachnutzung Deponie Eichelbuck**

**„Mikro-Holz-BHKW“ mit extern befeuerter Heißluftturbine**

**- Überarbeitetes Anlagenkonzept -**

## INHALTSVERZEICHNIS

1	Beschreibung der Gesamtanlage .....	- 3 -
2	Projektstand .....	- 3 -
3	Geplante Nachrüstung .....	- 4 -
3.1	Installation eines Stützbrenners .....	- 4 -
3.2	Zweiter Saugzugventilator .....	- 4 -
3.3	Zweiter Sekundärluftventilator .....	- 4 -
3.4	Unterbruchlose Stromversorgung (USV) .....	- 4 -
3.5	Aufteilung des Heißwassersystems.....	- 5 -
4	Neues An- und Abfahrkonzept.....	- 5 -

## Anlagen

**Anlage 1:** Anlagenschema

**Anlage 2:** R&I Schemata

## 1 Beschreibung der Gesamtanlage

Das „Mikro-Holz-BHKW“ wurde am Standort der Deponie Eichelbuck errichtet und in die bestehende Infrastruktur integriert. Die Anlage ist für die Produktion von Wärme und Strom vorgesehen, wobei die Wärmeversorgung Priorität gegenüber der Stromproduktion hat. Die Anlage ist für Dauerbetrieb vorgesehen, wobei möglichst Volllast gefahren werden soll. In der Anlage werden in einer Primärbrennkammer (Kessel der Fa. Lopper) Holzhackschnitzel vergast. Die entstehenden Holzgase werden in der Sekundärbrennkammer (Flox-Brennkammer) verbrannt. In der Flox-Brennkammer ist ein Hochtemperaturwärmetauscher zur Erzeugung von heißer Luft für die Heißluftturbine integriert. Die Rauchgase aus dem Flox-Brenner werden über einen Wärmetauscher (Heißwasser-Wärmetauscher) geführt, der Wärme für die Speiseresteanlage bereitstellt. Mit der heißen Abluft der Mikroturbine wird ein Thermoöl-Wärmetauscher beaufschlagt, der ebenfalls Wärme für die Speiseresteanlage liefert. Die Heißluftturbine generiert Strom für den Eigenbedarf und zur Einspeisung in das Netz. Der Eintrag der Hackschnitzel erfolgt über eine Schubbodenfördereinrichtung, einen Quer- und einen Steigförderer in den Kessel.

Die erwartete Leistung der Anlage beträgt:  
 Elektrische Leistung: 40-50 kW<sub>el</sub>  
 Feuerungsleistung: 300 kW  
 Heizleistung: 192 kW<sub>th</sub> (57 kW<sub>th</sub> Thermoöl, 135 kW<sub>th</sub> Heißwasser)

Die Anlage muss die Emissionsgrenzwerte der 1. BImSchV vom 1.1.2015 einhalten.

Ein Anlagenschema und R&I-Schemata liegen dem Anlagenkonzept in Anlage 1 und 2 bei.

## 2 Projektstand

Die Inbetriebnahme der Anlage erfolgte schrittweise seit Oktober 2017. Seit Oktober 2018 wird vorerst nur Heißwasser erzeugt, die MGT wurde luftseitig isoliert.

Ein sicherer Betrieb der Anlage ist bisher nicht möglich. Es treten in allen Temperaturbereichen Verpuffungen auf, ebenso im Flox-Betrieb.

Die Heißluftturbine wurde bisher nur im Leerlauf gefahren, die Turbine hat noch keinen Strom erzeugt. Die Heißluftturbine muss im Kaltbetrieb eine Drehzahl von 45.000 Umdrehungen erreichen um sicher auch im Normalbetrieb zu funktionieren. Bisher wurden 40.000 Umdrehungen erreicht. Die Pumpengrenze darf in diesem Drehzahlbereich nicht erreicht werden. Versuche hierzu werden im weiteren Projektverlauf erfolgen.

### 3 Geplante Nachrüstung

Zur Erzielung einer stabilen und betriebssicheren Verbrennung, soll ein propangasgefeuerter Startbrenner zur Erhitzung des Flox-Brenners auf Betriebstemperatur vor dem eigentlichen Holzgas-Betrieb nachgerüstet werden. Zudem sollen ein zusätzlicher Saugzugventilators sowie ein zusätzlicher Sekundärluftventilators als Redundanz installiert werden. Um auch bei Stromausfall einen sicheren Betrieb zu ermöglichen, soll außerdem eine USV (unterbrechungslose Stromversorgung) für bestimmte Anlagenteile nachgerüstet werden. Zusätzlich soll das Heißwassersystem geändert werden, da dort in der Vergangenheit ebenfalls Probleme aufgetreten sind. Die geplanten Änderungen sind in den Anlagen-Schemata bereits dargestellt.

#### 3.1 Installation eines Stützbrenners

Der Startbrenner kann in den Verbindungskanal zwischen der Primärbrennkammer und der Flox-Brennkammer eingebaut werden, indem der Kanal um ca. 100 cm verlängert wird. Die Ausmauerung muss hierfür angepasst werden. Die Stirnseite der Verlängerung soll dann eine Öffnung aufweisen, damit dort der Startbrenner angeflanscht werden kann. Der Startbrenner soll modulierend sein, damit beim Einsetzen der Holzvergasung die Leistung langsam zurückgefahren werden kann. Er soll mit einem handelsüblichen Feuerungsautomaten ausgestattet sein, inkl. einer STB. Die Temperaturregelung soll mittels Thermoelement im Flox-Brenner erfolgen (900°C). Die Stromversorgung erfolgt über den bestehende Schrank und wird dort abgesichert.

#### 3.2 Zweiter Saugzugventilator

Ein zweiter Saugzugventilator ist notwendig, um immer alle Gase aus dem Flox-Brenner absaugen zu können, auch bei Ausfall eines Saugzugventilators. Der zweite Saugzugventilator soll in Serie oder parallel zum bestehenden Saugzugventilator eingebaut werden. Die Stromversorgung soll über eine USV sichergestellt werden, sodass auch bei Stromausfall immer sicher das Gas abgesaugt werden kann. Die Ansteuerung soll von der PLS aus erfolgen. Die Leistung des zweiten Saugzugventilators und die Frage ob ein FU vorzusehen ist, muss noch abgeklärt werden.

#### 3.3 Zweiter Sekundärluftventilator

Ein zweiter Sekundärluftventilator ist notwendig, um im Flox-Brenner immer einen großen Sauerstoffüberschuss zu erzielen. Der zweite Sekundärluftventilator soll in Serie oder parallel zum bestehenden Sekundärluftventilator eingebaut werden. Die Stromversorgung soll über eine USV sichergestellt werden, damit auch bei Stromausfall die Sauerstoffversorgung des Flox-Brenners sichergestellt ist. Die Ansteuerung soll von der PLS aus erfolgen. Die Leistung des zweiten Saugzugventilators und die Frage ob ein FU vorzusehen ist, muss noch abgeklärt werden.

#### 3.4 Unterbrechungslose Stromversorgung (USV)

Um auch bei Stromausfall einen sicheren Betrieb zu ermöglichen, soll eine USV (unterbrechungslose Stromversorgung) für einen Saugzugventilator und einen

Sekundärluftventilator installiert werde. Die an der USV angeschlossenen Anlagenteile können bei Stromausfall noch eine Zeit lang weiterbetrieben werden, damit der sichere Ausbrand der noch im Kessel vorhandenen Hackschnitzel gewährleistet ist. Die Dauer des Weiterbetriebes muss noch genauer abgeklärt werden. Die erste Schätzung von MPT sind 150 Minuten. Für die USV ist ein neuer Schrank vorzusehen, in welchem auch der Schutz der beiden neuen Ventilatoren und die Steuerung untergebracht werden können.

### **3.5 Aufteilung des Heißwassersystems**

Derzeit wird der Druck des Wassers, das von der Speiseresteanlage zurück kommt, auf einen Druck von 2,5 bar reduziert, da der Kesselwasserkreislauf auf 3 bar Druck ausgelegt ist. Der Wasserdruck wird dann wieder vor Eingang in das Heißwassersystem der Speiseresteanlagenseite auf 7 bar erhöht. Sobald Luft in das System eindringt, kommt es in der Pumpe zu Kavitation. Zudem drückt bei Abschalten der Pumpe das gesamte System (eine hohe Wassermenge) auf die Pumpe. Dies führte in der Vergangenheit schon zu Problemen.

Die Rohrleitungen des Kesselwasserkreislaufs sollen so abgeändert werden, dass das ganze System mit einem Druck von etwa 2.5 bar (Überdruck) betrieben werden kann. Eine zusätzliche Umwälzpumpe und ein Plattenwärmetauscher sind vorzusehen. Die Ansteuerung der Umwälzpumpe wird durch das PLS erfolgen. Die Rohrleitungen des Heißwassers auf der Speiseresteanlagenseite soll so abgeändert werden, dass das ganze System mit einem Druck von ca. 7 bar betrieben werden kann. Ein zusätzlicher Expansionsbehälter muss vorgesehen werden. Die Steuerung erfolgt weiterhin durch die PLS.

## **4 Neues An- und Abfahrkonzept**

Der Flox-Brenner soll mit Hilfe eines Propangasbrenners vor Inbetriebnahme der Holzhaackschnitzelfeuerung auf 900°C aufgeheizt werden. Der Propangasbrenner wird nach Anfeuerung des Lopper-Kessels in Abhängigkeit des produzierten Holzgases nach unten geregelt und dann abgeschaltet.

Das Abfahren der Anlage soll über die Lopper-Steuerung gesteuert werden.

Es erfolgt dann kein Hackschnitzeleintrag mehr, der Kessel brennt aus und die Temperatur im Flox-Brenner sinkt (ggf. kann durch den Propangasbrenner auch eine Mindesttemperatur im Flox-Brenner gehalten werden). Die Saugzugventilatoren sind weiterhin bis zu einer noch festzulegenden Temperatur in Betrieb.

Bei Stromausfall sollen ein Saugzugventilator und ein Flox-Sekundärluftventilator weiterbetrieben werden. Damit wird erreicht, dass alle Gase in den Flox-Brenner gesaugt werden und dort immer ein großer Sauerstoffüberschuss herrscht. Dieser Zustand muss beibehalten werden, bis der gesamte Brennstoff (Hackschnitzel) verbrannt ist oder das Feuer vollständig aus ist. Die beiden Ventilatoren sollen von einer USV (3-phasig) gespeist werden.

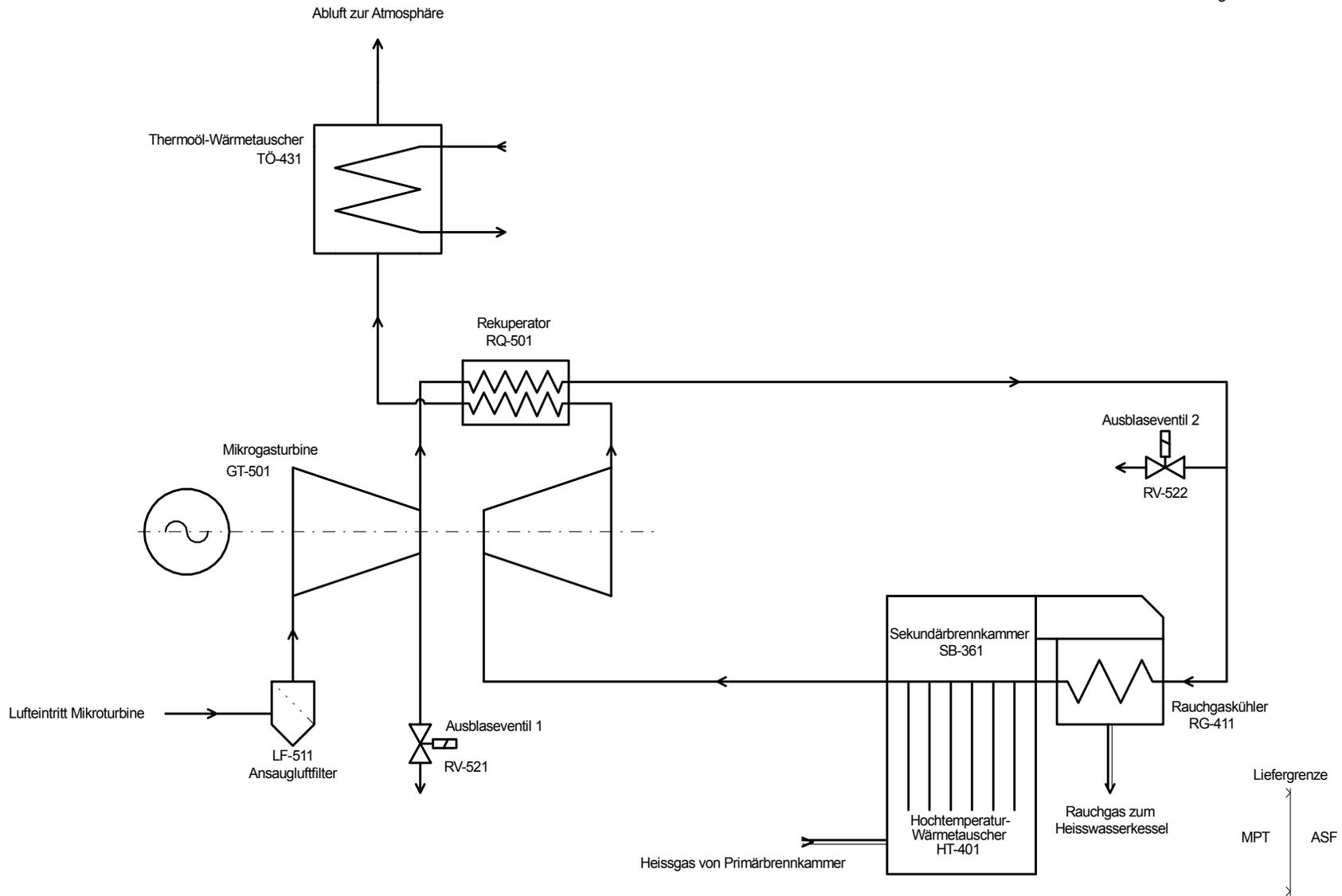
## **Anlage 1**

### **Anlagenschema**



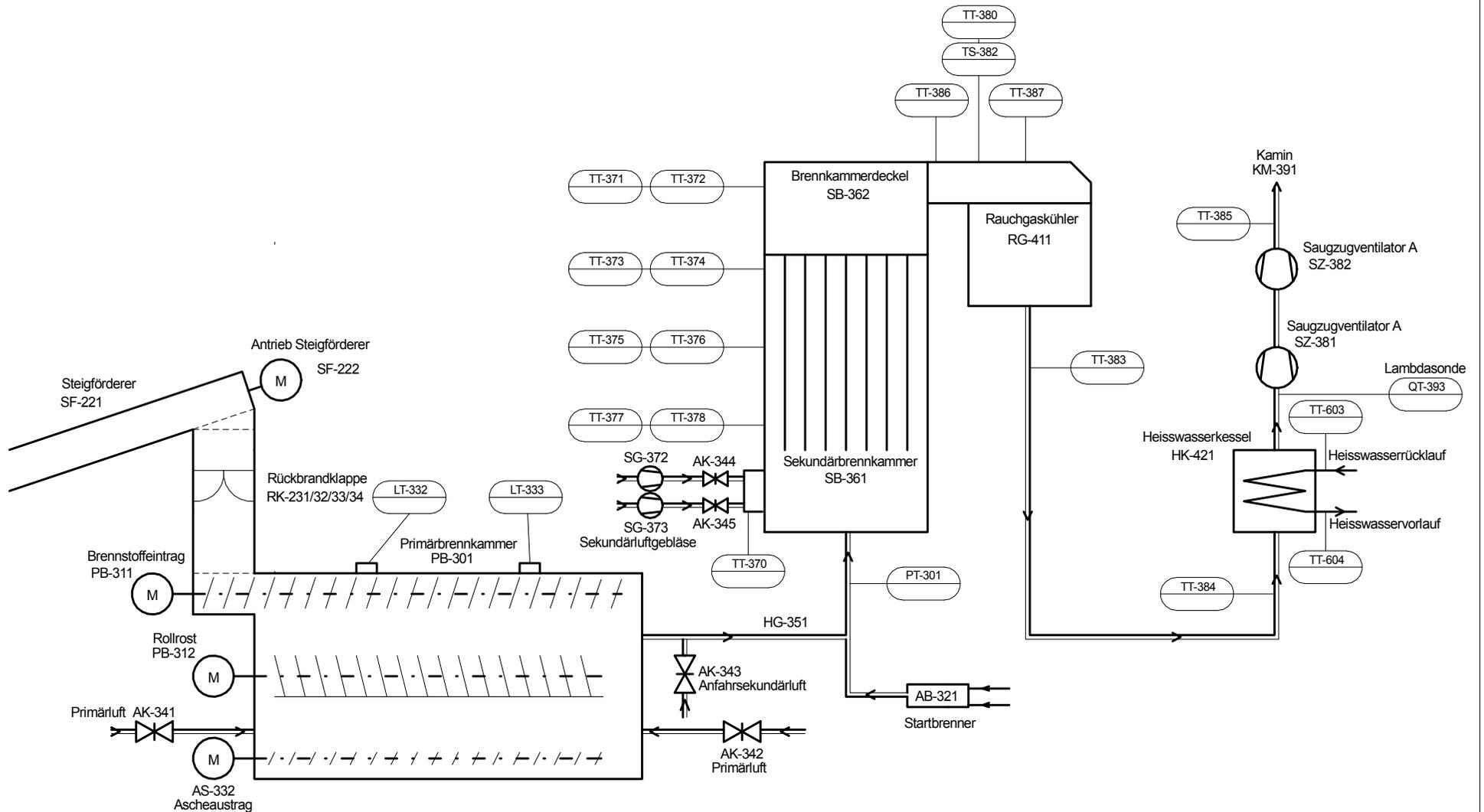
## **Anlage 2**

### **R&I Schemata**



Kunde:				Z.-Nr.	
<b>ASF</b>				<b>MPT</b>	
Abfallwirtschaft und Stadtreinigung Freiburg				Micropower Technology GmbH	
			Datum	Name	Titel
			Bearb. 12.06.2016	R. Stucki	
			Gepr.		
			Norm		PID Mikrogasturbine Kurzbezeichnungen
C		23.10.2019	Sur		Projekt <b>EFGT Eichelbuck</b>
B		16.08.2016	Sur		
Index	Änderungen	Datum	Norm		Blatt <b>1</b>

Liefergrenze  
MPT | ASF



- PT Drucktransmitter
- PI Druckanzeige
- PS Pressostat
- TT Thermoelement/Widerstandselement
- TI Temperaturanzeige
- TS Thermostat
- FS Durchflusswächter
- xxx Testmuffe

Kunde:						Z.-Nr.		
<b>ASF</b>						<b>MPT</b>		
Abfallwirtschaft und Stadtreinigung Freiburg						Micropower Technology GmbH		
				Datum	Name	Titel		
				Bearb.	12.06.2016	R. Stucki		
				Gepr.				
				Norm				
B		23.10.2019	Sur	Projekt <b>EFGT Eichelbuck</b>				Blatt
A		16.08.2016	Sur					1
Index	Änderungen	Datum	Nom					



**Anlage 11:**

Bericht Einsatz Pflanzenkohle in Kompostierung

Gefördert durch:



Gefördert durch den  
Innovationsfonds  
Klima- und Wasserschutz

**badenova**  
*Energie. Tag für Tag*

# ithaka institute



## Kompostversuch ASF Freiburg

Nikolas Hagemann, Hans-Peter Schmidt  
Ithaka Institute for Carbon Strategies

## Zielsetzung

- Der Effekt der Zugabe von 10 Vol% Pflanzenkohle in die Grüngut-Kompostierung wird überprüft:
  - Unterschiede im Prozess => Temperaturverlauf
  - Unterschiede im Produkt => Pflanzversuche mit dem Substrat
- Die Pflanzenkohle wurde vom ASF selbst produziert.



volumetrisches Mischen von vor-zerkleinertem Grüngut (rechts) und Pflanzenkohle (links) in den Shredder

04.05.2020



weitgehend staubfreies Schütten der Pflanzenkohle, Pflanzenkohle wurde nach der Pyrolyse ausreichend befeuchtet.



Um ein möglichst einheitliches Ausgangsmaterial für beide Mieten (mit/ohne Pflanzenkohle) zu erzielen, würde Grüngut aus zwei Mieten gemischt.



- Einmischung der Pflanzenkohle durch Shredder und Sieb funktioniert grundsätzlich gut: keine konzentrierten Ansammlungen von Pflanzenkohle nach dem Sieb





- Einmischung der Pflanzenkohle durch Shredder und Sieb funktioniert grundsätzlich gut: keine konzentrierten Ansammlungen von Pflanzenkohle nach dem Sieb
- Farbunterschiede v.a. durch unterschiedliche Feuchtigkeit des Grünguts (trockener Rand, feuchte Mitte des vorherigen Haufens, zwei verschiedenen alte Ausgangsmaterialien ), ggf. auch durch unterschiedliche lokale Konzentrationen der Pflanzenkohle



- FlexStar 3000 mit 120 rpm betrieben
- links: Feinanteil zur Kompostierung
- rechts: Mittelfraktion zur Verbrennung, ca. 10 Vol%, mit Spuren Pflanzenkohle in ca. 1 cm großen Stücken
- praktisch kein Siebüberkorn, da Material bereits vorab zerkleinert und gesiebt wurde

## Einmischen der Kohle

- zu Beginn:
  - je 8 Schaufeln mit Nennvolumen von  $2,5 \text{ m}^3$  (Annahme:  $3 \text{ m}^3$  Grüngut „gehäuft“) wurden 2 Schaufeln Pflanzenkohle à  $1,5 \text{ m}^3$  (Nennvolumen) in den Shredder gegeben
  - $24 \text{ m}^3$  Grüngut +  $3 \text{ m}^3$  Pflanzenkohle
  - Annahme: gewisse Menge Pflanzenkohle wird im Sieb aussortiert, Aussiebung des Grünguts wurde in der Berechnung vernachlässigt.
- Spätere Anpassung:
  - ca. 10 Vol% des Grünguts wurden mit der Mittelfraktion des Sternsiebs aussortiert, mit Spurenanteilen der Pflanzenkohle
  - angepasste Mischung: 11 Schaufeln Grüngut + 2 Schaufeln Pflanzenkohle



- Bewässerung beim Aufsetzen der Miete
- insgesamt ca. 25'000 L auf 300 m<sup>3</sup> Kompost mit Pflanzenkohle



- Bewässerung beim Aufsetzen der Miete
- insgesamt ca. 25'000 L auf 300 m<sup>3</sup> Kompost mit Pflanzenkohle



- Bewässerung ohne darauf folgende Mischung führt zu deutlicher Nass-Trocken-Schichtung, keine homogene Durchfeuchtung



## Bewässerung des Komposts

- Eine richtig dosierte (Faustprobe) und v.a. eine gleichmäßige Bewässerung des Komposts ist eine wichtige Voraussetzung für eine gute Kompostierung.
- Bewässerung der Miete beim Aufsetzen führte im Versuch nicht zu einer gleichmäßigen Durchfeuchtung des Kompostausgangsmaterials.
- Bei der gelenkten, aeroben Kompostierung für hochpreisige Kompostsubstrate erfolgt die Bewässerung direkt beim Wenden, um eine gleichmäßige Verteilung des Wassers sicherzustellen (vgl. nächste Folie).
- Vorschlag für die Situation des ASF: Bewässerung an der Siebanlage, Feinmaterial wird noch auf dem Förderband mit Wasser besprüht (vgl. übernächste Folie).



- Bei der gelenkten, aeroben Kompostierung erfolgt die Bewässerung direkt beim Wenden, um eine gleichmäßige Verteilung des Wassers sicherzustellen.
- Beispielfoto zeigt den Kompostwender auf der Versuchsanlage des Ithaka Instituts



- Vorschlag: Bewässerung direkt auf das Förderband der zu kompostierenden Feinfraktion aufsprühen. Vorteile:
  - Feuchtigkeit kann direkt am Haufen mittels Faustprobe überprüft werden
  - gleichmäßige Verteilung
  - Erneutes Durchmischen beim Aufsetzen der Miete mit dem Radlader



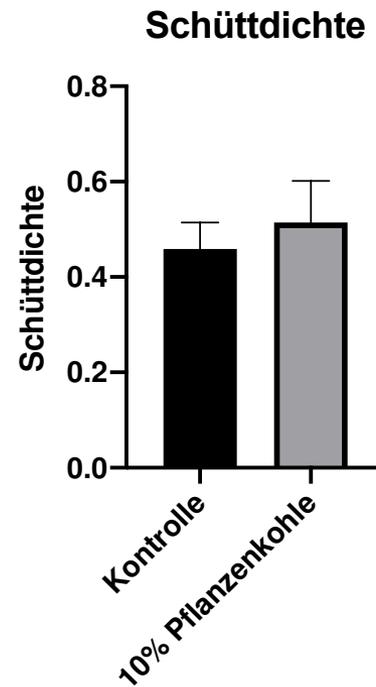
- Der Vorschlag wurde bereits am nächsten Tag bei Aufsetzen der Kontroll-Miete umgesetzt, was grundsätzlich zu einem guten Ergebnis führte.
- Jedoch können dadurch die Unterschiede zwischen den beiden Varianten nicht mehr eindeutig der Pflanzenkohle zugeordnet werden, sondern können sie können auch ein Effekt der unterschiedlichen Bewässerung sein.

## **Daten zum Aufsetzen des Komposts**

- Der Kompost mit ca. 10 Vol% Pflanzenkohle wurde am 04.05. aufgesetzt. Dabei wurde Material aus zwei Mieten gemischt, in der Hoffnung, dass diese beiden Mieten ausreichend Material sowohl für die Kontrolle, als auch für die Pflanzenkohle-Variante bieten.
- Der Kontroll-Kompost wurde am 05.05. und am 06.05. aufgesetzt. Da absehbar war, dass die beiden bisher verwendeten Mieten nicht ausreichen, wurde nun von Anfang an das Material aus drei Mieten gemischt. Die Materialien unterschieden sich im Alter (Lagerzeit der Biomasse).

## Schüttdichte

- Die Schüttdichten des Kontroll-Komposts unterscheiden sich nicht signifikant zwischen den beiden Tagen (t-Test,  $p = 0.33$ ).
- Die Schüttdichte wird durch die Zugabe der Pflanzenkohle leicht erhöht, jedoch ist der Unterschied nicht signifikant (t-Test,  $p = 0.16$ ).



## pH

	pH (direkt)		
	min	Mittelwert	max
<b>Kontrolle 05.05.</b>	6.6	<b>7.0</b>	7.3
<b>Kontrolle 06.05.</b>	7.6	<b>8.4</b>	8.6
<b>10% Pk</b>	6.0	<b>6.6</b>	7.0

	pH (in Wasser, 1+2)		
	min	Mittelwert	max
<b>Kontrolle 05.05.</b>	7.2	<b>7.3</b>	7.3
<b>Kontrolle 06.05.</b>	8.3	<b>8.4</b>	8.5
<b>10% Pk</b>	6.4	<b>6.7</b>	6.9

- Großer Unterschied zwischen den Kontroll-Kompost vom 05.05. und 06.05., vermutlich durch Unterschiede im Ausgangsmaterial. Für den Vergleich mit der Pflanzenkohle-Variante werden die Werte vom 05.05. herangezogen
- Die Zugabe von 10% Pflanzenkohle senkte den pH-Wert innerhalb des circum-neutralen Bereichs – trotz ihres basischen pH. Erwartet wurde, dass die Pflanzenkohle keinen nennenswerten Einfluss auf den pH hat.
- Potentiell kann es zur Sorption von basisch wirkenden Stoffen durch die Pflanzenkohle kommen. Dies wird dadurch nahe gelegt, dass die pH Senkung vor allem bei der Messung im Wasser deutlich ist – in der Suspension hat die Pflanzenkohle bessere Möglichkeit, Stoffe zu binden, als in der direkten Messung.

## Trockensubstanz

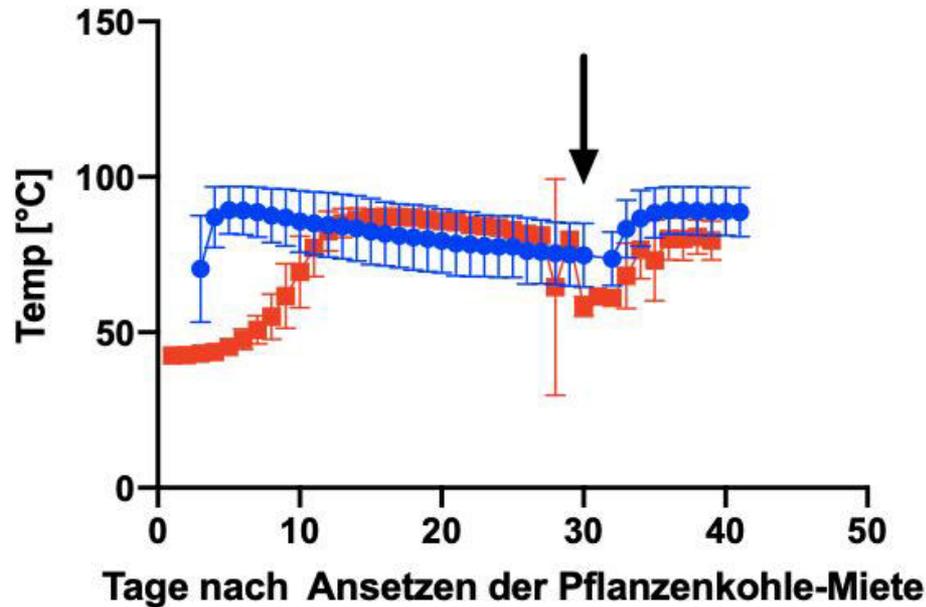
- Kompost mit Pflanzenkohle:  $50 \pm 9\%$  (N = 8)
- Kontroll-Kompost  $46 \pm 6\%$  (N = 7)

Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung

Die angepasste Bewässerungsmethode führt zu deutlich geringeren Standardabweichung bei der Trockensubstanz.

Die Trockensubstanz wurde aus einer homogenisierten Proben aus der Miete ermittelt. Dazu wurden je ca. 12-15 Schaufeln Material aus der Miete entnommen und drei mal mit der Schaufel umgesetzt/gemischt.

## Temperaturverlauf (1/3)



- Kontrolle
- Pflanzenkohle

Der Pfeil markiert das Umsetzen des Komposts

Dargestellt ist der Mittelwert von fünf Einzelmessungen über das Profil der Miete sowie deren Standardabweichung

	Höchsttemperatur (Einzelmessung)	... erreicht nach ...	Mittlere Temp. nach Umsetzen
Kontrolle	103 °C	3 Tagen	87±9 °C
Pflanzenkohle	89 °C	14 Tagen	72±11 °C

## Temperaturverlauf (2/3)

- Während der Kontroll-Kompost seine Höchsttemperatur bereits nach drei Tage erreichte, heizte sich der Pflanzenkohle-haltige Kompost über zwei Wochen hinweg deutlich langsamer und schonender auf.
- Dies könnte zumindest z.T. auch ein Effekt der ungleichmäßigen Bewässerung beim Aufsetzen des Pflanzenkohle-Komposts (Bewässerung der Miete) sein.
- Pflanzenkohle reduzierte die Höchsttemperatur. Die Hygienisierung wurde dennoch erzielt (3 Tage > 65 °C).
- Pflanzenkohle reduzierte die mittlere Temperatur nach dem Umsetzen des Komposts. Nach dem Umsetzen sollten etwaige Einflüsse der unterschiedlichen Bewässerung durch das erneute Durchmischen weitestgehend ausnivelliert sein. Daher kann eine niedrigere Temperatur hier z.B. das Resultat einer bereits weiter fortgeschrittenen Rotte sein.
- Grundsätzlich sind die Temperaturen extrem hoch. Die Temperatursonden sollten ggf. in kochendem Wasser überprüft werden, ob sie 99-100 °C anzeigen.

## Temperaturverlauf (3/3)

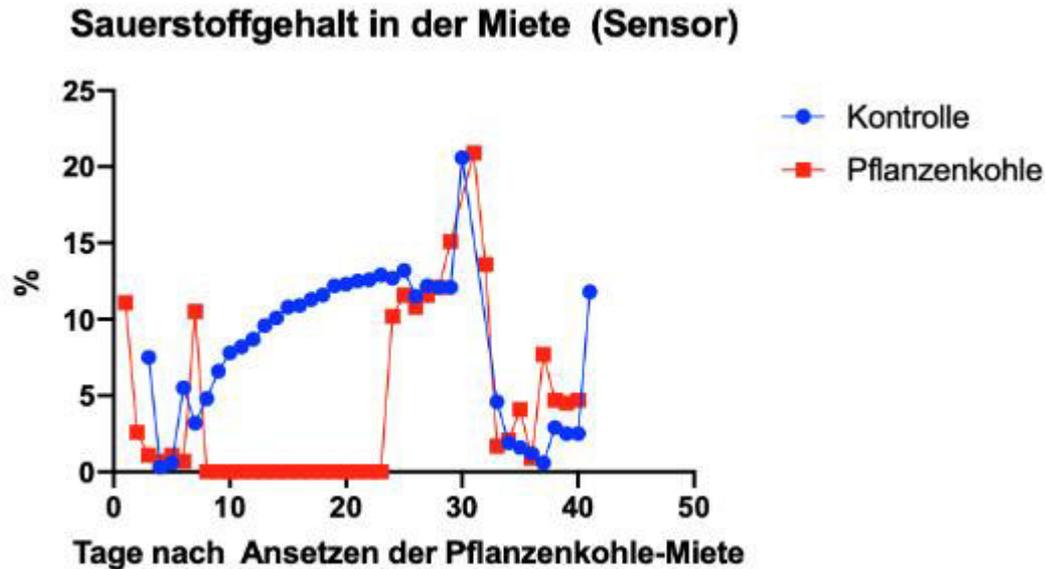
- Bei Temperaturen von über 80 °C spricht man von hyperthermophiler Kompostierung (*hyperthermophilic composting*)<sup>1</sup>. Dies führt zwar zu niedrigeren Emissionen von N<sub>2</sub>O, z.T. zu schnellerer Umsetzung/Rotte des Komposts und zu höheren Toleranzen gegenüber ungünstigen C/N Verhältnissen, aber auch zu einer stärkeren Selektion der Mikroorganismen im Kompost.
- Unstrittig ist die Notwendigkeit der Hygienisierung (Abtöten von Pathogenen und Pflanzensamen) im Rahmen der Vorschriften der BGK. Hier sind aber bereits 55 °C (über 14 Tage) bzw. 60 °C (über 7 Tage) ausreichend.
- Bei Temperaturen über 65 °C sterben insbesondere Pilze ab, die z.B. zum Abbau von Lignin notwendig sind und/oder für die spätere pflanzenbauliche Qualität des Komposts förderlich sind. Dieser Effekt wurde wissenschaftlich noch nicht abschließend verstanden, aber einige Experten empfehlen eindringlich, bei der Kompostierung die Marke von 65 °C nicht zu überschreiten.<sup>2</sup>
- Auch führen hohe Temperaturen zu hohen Masseverlusten.

<sup>1</sup>Yu Z, Tang J, Liao H, Liu X, Zhou P, Chen Z, Rensing C, Zhou S. The distinctive microbial community improves composting efficiency in a full-scale hyperthermophilic composting plant. *Bioresource Technol* **265**, 146-154 (2018).

<sup>2</sup><https://www.awn->

[online.de/images/zeus/projekte/biomassezentrum\\_buchen/2018\\_09\\_15\\_AWN\\_Vortrag\\_Angelika\\_Luebke\\_Hildebrandt.pdf](https://www.awn-online.de/images/zeus/projekte/biomassezentrum_buchen/2018_09_15_AWN_Vortrag_Angelika_Luebke_Hildebrandt.pdf)

## Sauerstoffgehalt (1/2)



- Der Kontroll-Kompost zeigt einen stetig ansteigenden Sauerstoffgehalt, d.h. der Sauerstoffverbrauch sinkt über die Zeit. Nach dem Umsetzen ist der Sauerstoffverbrauch wieder erheblich höher, sodass die Sauerstoffkonzentration wieder niedriger ist.

## Sauerstoffgehalt (2/2)

- Dies zeigt, dass früheres/häufigeres Umsetzen die Reife des Komposts beschleunigen und verbessern könnte, da nach dem Umsetzen der Miete die Rotte wieder erheblich intensiviert wird, da Biomasse und Mikroorganismen neu gemischt werden.
- In der Pflanzenkohle-Miete wird für über zwei Wochen (Tag 8-23) ein Sauerstoffgehalt von Null angezeigt. Dies bedeutet, dass entweder der eingeblasene Sauerstoff vollständig verbraucht worden ist, oder ein Messfehler vorliegt. Da Sauerstoff auf jeden Fall verfügbar gewesen sein muss, da ansonsten die Temperaturen von über 80 °C nicht erklärbar wären, sollten die Sauerstoff-Sonden unbedingt überprüft werden. Auch der sprunghafte Abfall und erneute Anstieg des Sauerstoffgehalts sind wenig schlüssig.
- Nach dem Umsetzen ist der Sauerstoffgehalt in der Pflanzenkohle-Miete höher, als in der Kontroll-Miete. Dies zeigt einen geringeren Stoffumsatz an, was mit den Temperatur-Daten korrespondiert und als bereits weiter fortgeschrittene Rotte (stabileres Produkt) interpretiert werden kann.

Bei Probenahmen nach den Richtlinien der Bundesgütegemeinschaft Kompost werden Teilproben aus einem Querschnitt einer Miete entnommen. Beim Aufsetzen des Komposts wurde jedoch vermutlich auf dem ersten Drittel der Miete etwas mehr Pflanzenkohle eingebracht, als in der restlichen Miete. Die Probennahme musste daher auch einen Durchschnitt über die gesamte Länge der Miete abbilden. Daher wurde ein alternatives Protokoll zur Probenahme angewandt:

- Beim Umsetzen des Komposts nach der Nachrotte wurde nach jeder 10. Radlader-Schaufel eine Teilprobe entnommen (rechnerisch:  $300 \text{ m}^3$  Kompost,  $3 \text{ m}^3$  je Radlader-Schaufel = 100 Radlader-Schaufeln/Fahrten => 10 Teilproben)
- Dazu wurden jeweils zwei Schaufeln (Hand-Schaufeln) Kompost in Gewebesäcke abgefüllt, die eine Luftzufuhr bei der Lagerung des Komposts ermöglichten.
- Die gesamte Probenmenge wurde von Ithaka durch dreimaliges Mischen homogenisiert und danach für die anstehenden Untersuchungen repräsentativ geteilt.
- Für die Versuche mit Kresse und Salat sowie für den Säulen-Test wurde der Kompost auf 6 mm gesiebt.

- offener und geschlossener Kressetest
- Gewächshausversuche mit Salat
- chemische Analyse nach Anforderungen der Bundesgütegemeinschaft Kompost
- Versuche zur Nährstoff-Auswaschung

## **Kressetest**

- Der Kressetest diente dem Ausschluss von möglichen phytotoxischen Eigenschaften des Komposts, da Kresse bei der Keimung hier sehr empfindlich reagiert.
- Er wurde offen (weniger sensitiv) und geschlossen (gasdicht verschlossenes Gefäß, sehr sensitiv) durchgeführt
- Kontroll-Kompost, Pflanzenkohle-Kompost und ein kommerzielles Gewächshaussubstrat (Referenz) wurden mit drei Wiederholungen miteinander verglichen.
- Nach 5 Tagen wurde die Höhe des Aufwuchs gemessen und das Ergebnis fotografisch dokumentiert.



Abb: Offener Kressetest mit ASF-Kontrollkompost ohne Pflanzenkohle (li), ASF Pflanzenkohle-Kompost (mi) und einem kommerziellen Gewächshaussubstrat („Konorolle“) (re) nach 5 Tagen.

- Aufgrund der hohen Temperaturen im Gewächshaus keimten insgesamt nur sehr wenige Kresse-Samen.
- Besseres Wachstum in den ASF Komposten als im kommerziellen Gewächshaussubstrat, kein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Komposten.



Abb: Geschlossener Kressetest mit ASF-Kontrollkompost ohne Pflanzenkohle (li), ASF Pflanzenkohle-Kompost (mi) und einem kommerziellen Gewächshaussubstrat („Kontrolle“) (re) nach 5 Tagen.

- Auch der geschlossene Kressetest wurde durch hohe Temperaturen beeinträchtigt, dennoch deutliche Keimung in der Kontrolle
- Keine Keimung in den Komposten der ASF, was auf gewisse Phytotoxizität der Komposte hinweist
- ggf. sollten die Komposte vor dem Einsatz länger gelagert werden, um die phytotoxischen Eigenschaften abzubauen

## Gewächshaus-Versuche mit Blattsalat

- Die Komposte wurden pure und in zwei Dosierungen in zwei verschiedenen Böden getestet.
- Ergänzend wurden Versuche mit mineralischer Düngung mit und ohne Pflanzenkohle (unbehandelt) durchgeführt.
- Alle Düngungs-Varianten wurden mit fünf Replikaten getestet.
- Der Versuch wurde mit kommerziellen Blattsalat-Setzlingen angesetzt.
- Blattsalat wurde nach sechs Wochen geerntet

### Generierte Daten:

- Foto-Dokumentation des optischen Eindrucks der Salatköpfe
- Frischgewicht der Salatköpfe



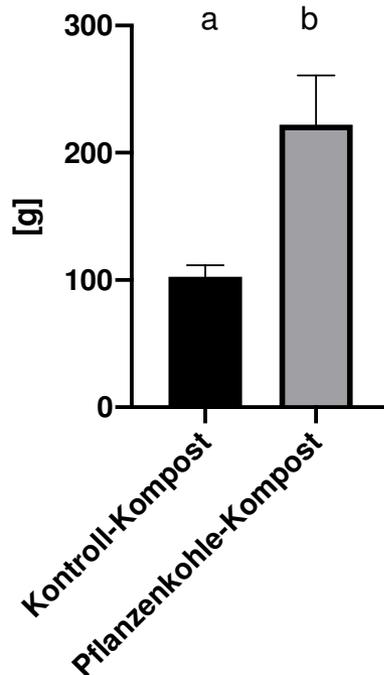
## Gewächshaus-Versuche mit Blattsalat

Behandlung	Topf	
ASF01	1-5	Null-Kontrolle (keine Düngung)
ASF02	6-10	Mineralische Voll-Düngung (im weiteren: „NPK“)
ASF03	11-15	Pflanzenkohle unbehandelt 2 t ha <sup>-1</sup> + mineralische Voll-Düngung
ASF04	16-20	Kontroll-Kompost, 40 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>
ASF05	21-25	Kontroll-Kompost, 80 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>
ASF06	26-30	Pflanzenkohle-Kompost, 40 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>
ASF07	31-35	Pflanzenkohle-Kompost, 80 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>
ASF08	36-40	Kontroll-Kompost pur
ASF09	41-45	Pflanzenkohle-Kompost pur

## Ertrag (Frischmasse) Blattsalat auf purem Kompost

- Wird der Salat auf dem puren Kompost (ohne Mischung mit Erde) angebaut, ist der Ertrag auf dem Pflanzenkohle-Kompost doppelt so hoch, wie in der Kontrolle.

Salat in purem Kompost

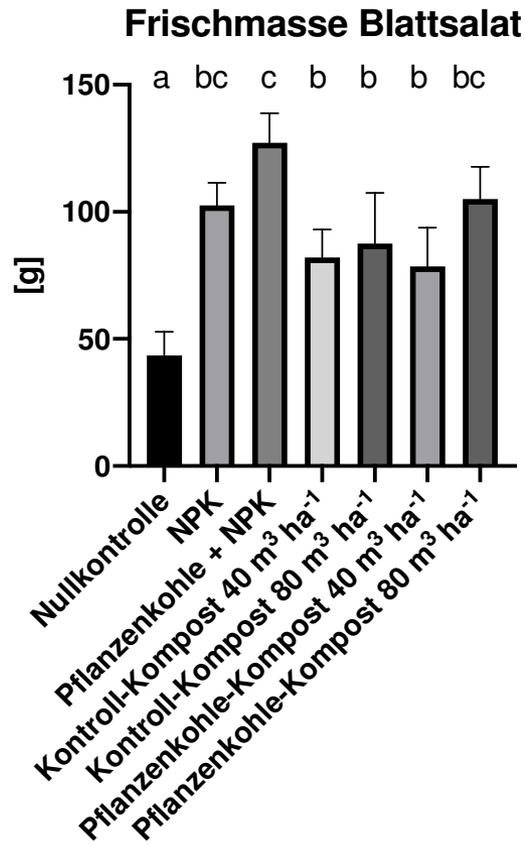


t-Test,  $p = 0.002$



Abb: Beispielhafte Salate, gewachsen auf Kontroll-Kompost (li) bzw. Pflanzenkohle-Kompost (re)

# Ertrag (Frischmasse) Blattsalat auf Boden mit verschiedenen Additiven



- Alle Zugaben von Kompost erhöhten die Erträge in ähnlichem Maße wie die mineralische Düngung signifikant gegenüber der Kontrolle (80-140% Mehrertrag).
- Es gibt keinen deutlichen Effekt der Dosierung oder der Pflanzkohle-Zugabe.
- Eine mineralische Düngung erhöht den Ertrag um 140%
- Beim Einsatz von Pflanzkohle in der Wurzelzone wird durch die mineralische Düngung eine Ertragssteigerung von 190% erzielt – jedoch ist die Erhöhung gegenüber der gedüngten Variante ohne Pflanzkohle nicht statistisch signifikant.

# Ertrag (Frischmasse) Blattsalat auf Boden mit verschiedenen Additiven

ithaka institute



## Eigenschaften Boden

- pH: 6.2
- Humus-Gehalt: 4.3 %
- effektive Kationenaustauschkapazität: 18 cmol kg<sup>-1</sup>
- Kjeldahl-Stickstoff: 0.24 %
- Phosphor: 3.2 mg kg<sup>-1</sup>

- Die Komposte wurden nach Richtlinien der Bundesgütegemeinschaft Kompost von EUROFINS Agraranalytik Deutschland GmbH (Jena) und Eurofins Umwelt Ost GmbH (Jena) analysiert. Diese Labore sind für diese Untersuchungen akkreditiert.

# Untersuchung nach BGK

## Physikalische Parameter (1 von 2)

Parameter	Einheit	BG	MU (%)	KSW	DümV	Bio- AbfV 20 t	Bio- AbfV 30 t	Kontroll- Kompost	Pflanzkohle- Kompost
Rohdichte, frisch	g/l OS	10						692	657
Trockensubstanz	Ma.-% OS	0,1	1,03					63,8	72,0
Wassergehalt	Ma.-% OS	0,01						36,2	28,0
Salzgehalt	g/l OS	0,01						2,17	2,23
Leitfähigkeit	µS/cm OS							594	643
pH-Wert (25 °C) (H2O)	ohne		5,22					8,3	8,4
Rottegrad	ohne							5	5
Temperatur, maximal	°C							22	22

Der Pflanzkohle-Kompost weist einen deutlich höheren Trockensubstanz-Gehalt auf. Dies ist vermutlich noch eine Folge der unterschiedlichen Methoden der Bewässerung beim Aufsetzen der Kompost-Mieten. Obwohl ähnlich viel Wasser angewendet wurde, konnte der Kompost bei der Bewässerung direkt nach dem Sieb mehr Wasser aufnehmen.

# Untersuchung nach BGK

## Physikalische Parameter (2 von 2)

Parameter	Einheit	BG	MU (%)	KSW	DümV	Bio- AbfV 20 t	Bio- AbfV 30 t	Kontroll- Kompost	Pflanzenkohle- Kompost
Rohdichte, frisch	g/l OS	10						692	657
Trockensubstanz	Ma.-% OS	0,1	1,03					63,8	72,0
Wassergehalt	Ma.-% OS	0,01						36,2	28,0
Salzgehalt	g/l OS	0,01						2,17	2,23
Leitfähigkeit	µS/cm OS							594	643
pH-Wert (25 °C) (H <sub>2</sub> O)	ohne		5,22					8,3	8,4
Rottegrad	ohne							5	5
Temperatur, maximal	°C							22	22

Trotz der Alkalinität der Pflanzenkohle unterscheidet sich der pH Wert kaum zwischen den Komposten. Die Pflanzenkohle unterstützt die Kompostierung, sodass im Pflanzenkohle-Kompost auch bereits Ammonium-Stickstoff nitrifiziert wurde (s.u.), was zur gewünschten pH Absenkung führt.

# Untersuchung nach BGK

## Pflanzennährstoffe, Gesamtgehalte



Parameter	Einheit	BG	MU (%)	KSW	Düm V	Bio- AbfV 20 t	Bio- AbfV 30 t	Kontroll- Kompost	Pflanzenkohle- Kompost
Gesamtstickstoff	Ma.-% TS	0,03	7,95					<b>0,952</b>	<b>0,834</b>
C/N-Verhältnis	ohne							<b>19</b>	<b>22</b>
Gesamtstickstoff	Ma.-% TS	0,03	7,95					<b>0,952</b>	<b>0,834</b>
Phosphor als P2O5	Ma.-% TS	0,01						<b>0,32</b>	<b>0,34</b>
Phosphor als P2O5	mg/kg TS	100						<b>3200</b>	<b>3400</b>
Kalium als K2O	Ma.-% TS	0,01						<b>0,73</b>	<b>0,84</b>
Kalium als K2O	mg/kg TS	100	14,88					<b>7300</b>	<b>8400</b>
Magnesium als MgO	Ma.-% TS	0,01	12,92					<b>0,71</b>	<b>0,74</b>
Magnesium als MgO	mg/kg TS	100	12,92					<b>7100</b>	<b>7400</b>

Der Pflanzenkohle-Kompost weist einen 13% niedrigeren Stickstoffgehalt (Gesamtstickstoff nach Elementaranalyse) und auch ein weiteres C/N-Verhältnis auf. Diese Unterschiede sind auf die Zugabe von Pflanzenkohle zurückzuführen, die bei einem C-Gehalt von 85.3 % einen Stickstoff-Gehalt von 0.5 % aufweist. Damit führt die Zugabe von Pflanzenkohle hinsichtlich Stickstoff zu einem Verdünnungseffekt. Die Gesamtgehalte and Phosphor, Kalium und Magnesium weisen erwartungsgemäß keine wesentlichen Unterschiede auf.

# Untersuchung nach BGK

## lösliche Nährstoffe

Parameter	Einheit	BG	MU (%)	KSW	DümV	Bio- AbfV 20 t	Bio- AbfV 30 t	Kontroll- Kompost	Pflanzkohle- Kompost
Stickstoff (CaCl <sub>2</sub> )	mg/l OS	1						3,51	10,7
davon Ammonium-N	mg/l OS	1	23,01					3,51	8,67
Ammonium-Stickstoff	mg/kg TS	10,0	23,01					< 10,0	18,3
davon Nitrat-N	mg/l OS	1,00	9,85					< 1,00	2,07
Nitrat-Stickstoff	mg/kg TS	10,0	9,85					< 10,0	< 10,0
Phosphor als P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (CAL)	mg/l OS	3	8,13					697	677
Kalium als K <sub>2</sub> O (CAL)	mg/l OS	2						2340	2530
Magnesium (CaCl <sub>2</sub> )	mg/l OS	1	13,15					195	179

Hinsichtlich der löslichen Nährstoffe weisen die beiden Komposte erwartungsgemäß keine Unterschiede bei Phosphor, Kalium und Magnesium auf. Der Pflanzenkohle-Kompost weist den dreifachen Gehalt an verfügbarem Stickstoff auf, was auf geringere Stickstoff-Verluste während der Kompostierung schließen lässt. Auch liegt der Stickstoff zu 19% als Nitrat vor, während in der Kontrolle kein Nitrat nachweisbar ist. Bei einem ausgereiften Kompost sollte mindestens 40% des Stickstoffs zu Nitrat oxidiert worden sein. Dies weist deutlich darauf hin, dass die Komposte noch nicht voll ausgereift sind, da sonst die Umwandlung in Nitrat bereits erfolgt sein sollte. Der Pflanzenkohle-Kompost ist deutlich weiter in seiner Entwicklung, aber ebenfalls noch nicht ausgereift.

## Bestimmung aus dem Königswasseraufschluss

Parameter	Einheit	BG	MU (%)	KSW	DümV	Bio- AbfV 20 t	Bio- AbfV 30 t	Kontroll- Kompost	Pflanzenkohle- Kompost
Blei (Pb)	mg/kg TS	0,3	12,83	100	150	150	100	42	56
Cadmium (Cd)	mg/kg TS	0,1	11,27	1	1,5	1,5	1	0,40	0,47
Chrom gesamt (Cr)	mg/kg TS	0,3	12,88	300		100	70	26	27
Kupfer (Cu)	mg/kg TS	2	14,76			100	70	33	40
Nickel (Ni)	mg/kg TS	1,5	12,73	40	80	50	35	15	16
Quecksilber	mg/kg TS	0,01	17,78	0,5	1	1	0,7	0,14	0,17
Zink (Zn)	mg/kg TS	2	14,54			400	300	140	180

Die Schwermetall-Gehalte sind bei beiden Komposten deutlich unterhalb aller relevanten Grenzwerte. Der Pflanzenkohle-Kompost weist jeweils ca. 30% höhere Gehalte an Blei, Kupfer und Zink auf. Durch den Massenverlust bei die Pyrolyse der Biomasse werden diese Schwermetalle in der Pflanzenkohle aufkonzentriert und können so zu diesen höheren Werten im Kompost führen. Diese Schwermetalle sind jedoch biogen und damit unvermeidbar, wenn man Biomasse rezykliert. Es ist zu beachten, dass ein Kilogramm Pflanzenkohle-Kompost aus mehr Biomasse (Ausgangsmaterial Kompostierung + Ausgangsmaterial Pyrolyse) hergestellt wurde, als die gleiche Masse des Kontroll-Komposts (Ausgangsmaterial Kompostierung).

# Untersuchung nach BGK

## Fremdstoffe

Parameter	Einheit	BG	MU (%)	KSW	DümV	Bio- AbfV 20 t	Bio- AbfV 30 t	Kontroll- Kompost	Pflanzenkohle- Kompost
Fremdstoffe gesamt (Summe aus harten Fremdstoffen, Weichkunststoffen, Sonstiges)	Ma.-% TS	0,01				0,5	0,5	0,06	< 0,01
Harte Fremdstoffe	Ma.-% TS	0,01			0,4			0,02	< 0,01
davon Glas	Ma.-% TS	0,01						0,01	< 0,01
davon nicht verformbare Kunststoffe (Hartkunststoffe)	Ma.-% TS	0,01						0,01	< 0,01
davon Metall	Ma.-% TS	0,01						< 0,01	< 0,01
verformbare Kunststoffe (Folien etc.) (Weichkunststoffe)	Ma.-% TS	0,01			0,1			0,04	< 0,01
Weich- und Hartkunststoffe	Ma.-% TS	0,01						0,05	-
Sonstige Fremdstoffe	Ma.-% TS	0,01						< 0,01	< 0,01
Steine > 10 mm Durchmesser	Ma.-% TS	0,01			5	5	5	< 0,01	< 0,01
Fremdstoffflächensumme	cm <sup>2</sup> /l OS	1						8,22	1,55

Die Fremdstoffgehalte beider Komposte sind deutlich unter allen relevanten Grenzwerten.

# Untersuchung nach BGK Fremdstoffe Kontroll-Kompost visuelle Darstellung

ithaka institute



# Untersuchung nach BGK

## Fremdstoffe Pflanzenkohle-Kompost

### visuelle Darstellung

**ithaka institute**



# Säulen-Versuche zur Nährstoff-Auswaschung

Parameter	Probenbezeichnung		ASF - Kompost ohne Kohle, gesiebt	ASF - Pflanzkohle- Kompost, gesiebt
	BG	Einheit		
Gelöster organischer Kohlenstoff DOC	1	mg/l	976	1140
Gebundener Stickstoff TNb	1	mg/l	128	139
Kjeldahl-Stickstoff	10	mg/l	90	140
Ammonium	0,06	mg/l	6,5	40
Ammonium-Stickstoff	0,05	mg/l	5,0	31
Gelöster organischer Stickstoff DON		mg/l	85	110
Nitrat	1	mg/l	< 1	< 1
ortho-Phosphat	0,05	mg/l	10,3	22,6
Phosphor	1	mg/l	6	11
Kalium	5	mg/l	880	970

Der gesiebte Kompost wurde in eine Säule mit 6 cm Innendurchmesser 28,5 cm hoch gefüllt und dann über ca. 12 Stunden mit ca. 800 mL Wasser perkoliert (DIN 19528 2009-01 Anhang E, Verfahren a). Die Analyse des Perkolats zeigt höhere Auswaschung aus dem Pflanzkohle-Kompost. Der Grund dafür ist, dass der Pflanzkohle-Kompost deutlich mehr ausgereift ist und daher nicht nur mehr Nährstoffe, sondern auch mehr organische Substanzen wasserlöslich (und damit auch pflanzenverfügbar) geworden sind.

## Zusammenfassung (1/2)

Die hier dargelegten Versuche wurden mit dem Ziel durchgeführt, den Effekt der Zugabe von 10 Vol% Pflanzenkohle in die Grüngut-Kompostierung zu überprüfen. Dabei wurden sowohl Unterschiede im Prozess (Temperaturverlauf) als auch im im Produkt (Analyse nach BGK, Pflanzversuche) betrachtet.

Beim Aufsetzen der Versuche stellte die Dosierung der Pflanzenkohle eine gewisse Herausforderung dar (reale Volumina einer gehäuften Baggerschaufel), die aber in Zukunft durch entsprechende Erfahrung kein weiteres Problem darstellen wird. Die leicht ungleichmäßige Dosierung der Pflanzenkohle über die Länge der Miete konnte durch eine entsprechend angepasste Probenahme kompensiert werden und hat den Versuch nicht beeinträchtigt.

Die Bewässerung der Komposte direkt hinter dem Sternsieb (Kontroll-Kompost) führte zu einer gleichmäßigeren Befeuchtung des Ausgangsmaterials und stellt gerade bei sehr trockenem Ausgangsmaterial eine Verbesserung gegenüber der Beregnung der Miete dar, die noch beim Aufsetzen des Pflanzenkohle-Komposts angewendet wurde. Jedoch stellte der Wechsel des Bewässerungsmodus einen zusätzlichen Einflussfaktor dar, der die Auswertung des Versuchs erschwert.

Insgesamt zeigte der Pflanzenkohle-Kompost ein langsames Aufheizen und etwas niedrigere Höchsttemperaturen, was im Kontext dieser Versuche sehr positiv zu werten ist.

## Zusammenfassung (1/2)

Beide Komposte erfüllten bei allen untersuchten Kriterien die gesetzlichen Vorgaben. Die Komposte waren aus agrarökologischer Sicht bei der Untersuchung noch nicht vollständig ausgereift, was an der nicht oder nur teilweise erfolgten Umwandlung des freigesetzten Ammonium-Stickstoffs in Nitrat zu ersehen ist. Der Pflanzenkohle-Kompost war deutlich weiter in seiner Entwicklung (19% des Stickstoffs liegt als Nitrat vor), was auch am besserem Wachstum des Blattsalats beim Test der puren Komposte erkenntlich war. Daher beschleunigte die Pflanzenkohle die Reifung des Komposts. Damit bewährt sich die Zugabe von Pflanzenkohle zur Kompostierung, um eine höhere Qualität im Endprodukt zu erzielen. Dies konnte im Gewächshaus vor allem beim Einsatz als Kultursubstrat (pure Anwendung) gezeigt werden, wo der Ertrag (Frischmasse des Blattsalats) durch den Einsatz der Pflanzenkohle bei der Kompostierung verdoppelt werden konnte. Beim Einsatz als organisches Düngemittel mit einer Dosierung von 40 und 80 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> war die Verbesserung durch die Pflanzenkohle-Zugabe in den hier durchgeführten Versuchen nicht signifikant. Dies sollte in längeren Gewächshausversuchen oder in Feldversuchen eingehender untersucht werden.